

## Waterschermen en waterstralen:

Een literatuuronderzoek naar de  
effectiviteit van waterschermen en -stralen  
bij het mitigeren van dampwolken



Nederlandse Academie voor  
Crisisbeheersing en Brandweezorg  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
www.nipv.nl  
info@nipv.nl  
026 355 24 00

## Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2023

Auteurs L. Wolfs, R. van Liempd  
Met medewerking van Ph. van den Berg, I. in 't Veld  
Contactpersoon R. van Liempd

Opdrachtgever LEC Industriële Veiligheid  
Contactpersoon L. van de Ven

Datum 22 december 2023

Foto's Cover: Persburo Sander van Gils

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.

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>1 Methode en achtergrond</b>	<b>6</b>
1.1 Methode	6
1.2 Beïnvloeding van een dampwolk door een waterschermb	6
<b>2 Grootschalige experimenten</b>	<b>8</b>
2.1 Experiment ammoniak 1996	8
2.2 Experiment ammoniak 1998-1999	11
2.3 Experiment LNG 2007	16
2.4 Experiment ammoniak 2013	23
2.5 Experiment beperking rookverspreiding 2013	25
2.6 Experiment ammoniak en chloor 2015	26
<b>3 Kleinschalige experimenten</b>	<b>29</b>
3.1 Kleinschalig experiment chloor 2002	29
3.2 Kleinschalig experiment chloor 2003a	31
3.3 Kleinschalig experiment chloor 2003b	35
3.4 Kleinschalig experiment kooldioxide en chloor 2005	38
3.5 Kleinschalig experiment kooldioxide 2012	41
<b>4 Experimenten op labschaal</b>	<b>44</b>
4.1 Experiment in een windtunnel 2001	44
4.2 Experimenten in een windtunnel en simulaties 2004	45
4.3 Experimenten in een windtunnel 2009	47
4.4 Labschaal experiment ammoniak 2012	50
4.5 Experimenten met toevoegingen aan het water 2017	51
<b>5 Overig onderzoek</b>	<b>53</b>
5.1 Simulatieonderzoek	53
5.2 Overig onderzoek	53
<b>6 Conclusie</b>	<b>54</b>
<b>Literatuurlijst</b>	<b>56</b>
<b>Bijlage 1 Gebruikte zoektermen</b>	<b>58</b>

# Samenvatting

Het Landelijk expertisecentrum industriële veiligheid heeft het NIPV verzocht om duidelijkheid te verschaffen over de effectiviteit van waterschermen en waterstralen als line of defence bij industriële incidentscenario's met toxische gas- en dampwolken. Met name de effectiviteit van waterschermen en -stralen bij ammoniakwolken behoeft aandacht, aangezien ammoniak in opmars is als drager van waterstof. Als eerste stap is opgehaald wat in de literatuur beschreven staat. De volgende onderzoeksvraag heeft daarbij centraal gestaan:

*Wat is in (internationale) literatuur te vinden over de effectiviteit van waterschermen en waterstralen in het beperken van de verspreiding van toxische of brandbare gas- en dampwolken bij een incident?*

In zowel nationale als internationale literatuur is gezocht naar informatie over de effectiviteit van waterschermen en -stralen bij incidenten met toxische of brandbare gas- en dampwolken.

Er blijken grofweg drie manieren te zijn waarop een waterscherm een dampwolk kan beïnvloeden: mechanisch (inmengen of verplaatsen), thermisch (afkoelen of opwarmen) en fysisch of chemisch (oplossen). Welke manier in welke mate bijdraagt, is veelal niet te bepalen aan de hand van de rapporten van de verschillende experimenten.

Vastgesteld kan verder worden, dat de effectiviteit van een waterscherm van veel factoren afhankelijk is. Dit maakt dat het op een juiste wijze toepassen van een waterscherm in de praktijk niet eenvoudig realiseerbaar is. Tevens kan geconcludeerd worden dat het reduceren van de dampconcentratie direct achter een waterscherm goed mogelijk is, maar wel een lage snelheid van de damp en een voldoende hoge snelheid van het waterscherm vraagt. De damp zal daarbij verder (groten)deels weggeduwd worden door het waterscherm. Hierbij kan de damp verdund en verplaatst worden, maar het volledig mitigeren van een dampwolk lijkt niet realistisch. Verder achter het scherm neemt de mate waarin de dampwolk gereduceerd wordt vaak flink af.

# Inleiding

## Aanleiding

Bij emissies van brandbare, maar vooral ook toxische stoffen als damp of als gas wordt regelmatig de inzet van waterschermen en waterstralen opgevoerd als line of defence (LOD) bij industriële (bedrijfsbrandweer) scenario's. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de effecten van de damp of het gas (deels) worden weggenomen. Er bestaan echter vermoedens dat de effectiviteit van dergelijke maatregelen beperkt is.

Het Landelijk expertisecentrum industriële veiligheid (LEC IV voorheen LEC Brandweer-BRZO) heeft het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) verzocht om duidelijkheid te verschaffen over de effectiviteit van waterschermen en waterstralen als line of defence bij industriële incidentscenario's met toxische gas- en dampwolken. Met name de effectiviteit van waterschermen en -stralen bij ammoniakwolken behoeft aandacht, aangezien ammoniak in opmars is als drager van waterstof. Als eerste stap is besloten om op te halen wat in de literatuur beschreven staat over de effectiviteit van waterschermen en -stralen in het mitigeren van toxische of brandbare wolken. In de praktijk kan het daarbij gaan om stationaire of mobiele (bedrijfs- of overheidsbrandweer) waterschermen en -stralen.

## Onderzoeksvraag

De volgende onderzoeksvraag staat centraal:

*Wat is in (internationale) literatuur te vinden over de effectiviteit van waterschermen en waterstralen in het beperken van de verspreiding van toxische of brandbare gas- en dampwolken bij een incident?*

## Afbakening

Omdat dit een literatuuronderzoek is, is informatie van experts of niet gedocumenteerd onderzoek buiten beschouwing gelaten. Een eventuele vertaling van de informatie uit de literatuur naar een concreet handelingsperspectief voor de brandweer tijdens een inzet of bij advisering maakt geen deel uit van dit onderzoek.

## Leeswijzer

In hoofdstuk 1 wordt de onderzoeksmethode beschreven, evenals kort wat noodzakelijke achtergrondinformatie. Vervolgens worden de grootschalige experimenten beschreven die in de literatuur gevonden zijn (hoofdstuk 2), dan de kleinschalige experimenten (hoofdstuk 3), experimenten op labschaal (hoofdstuk 4) en ten slotte de overige typen onderzoek (hoofdstuk 5). Hoofdstuk 6 geeft antwoord op de onderzoeksvraag.

# 1 Methode en achtergrond

In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe het onderzoek is uitgevoerd. Tevens komt kort aan bod wat er in de literatuur is gevonden over de manieren waarop een waterscherm een dampwolk kan beïnvloeden

## 1.1 Methode

In zowel nationale als internationale literatuur is gezocht naar informatie over de effectiviteit van waterschermen en -stralen bij incidenten met toxische of brandbare gas- en dampwolken. Er is gezocht naar artikelen, onderzoeksrapporten en publicaties in wetenschappelijke tijdschriften. Hiervoor is gebruikgemaakt van diverse kennisdatabanken en websites, waaronder:

- > Google
- > Google Scholar
- > ScienceDirect
- > Wiley
- > SpringerLink.

Aan de hand van een lijst met zoektermen is gezocht in de kennisdatabanken en op Google en Google Scholar. Bij elke zoekterm zijn de eerste honderd resultaten bekeken en beoordeeld op relevantie. Daarnaast is gebruikgemaakt van de sneeuwbalmethode, waarbij de referenties die genoemd staan in gevonden literatuur verder onderzocht zijn op relevantie informatie. De lijst met zoektermen is opgenomen in bijlage 1.

Naast de literatuurscan is het eigen netwerk bevraagd. Vanuit het LEC Industriële Veiligheid en door een collega-onderzoeker van het NIPV zijn onderzoeken aangeleverd die zijn meegenomen in het literatuuronderzoek.

## 1.2 Beïnvloeding van een dampwolk door een waterscherm

Er zijn grofweg drie manieren waarop een waterscherm een dampwolk kan beïnvloeden (Houben, 2004).

### 1. Mechanisch

Stroming of luchtverplaatsing door het water. Dit kan onder meer als gevolg hebben dat:

- a. De dampwolk wordt verdund door het inmengen van omgevingslucht.
- b. Vallende waterdruppels de dampwolk mee 'naar beneden trekken'.
- c. Een waterscherm een dampwolk 'wegduwt' door de impuls van het waterscherm.

**2. Thermisch**

Afkoelen van het gas door warmte-uitwisseling, waardoor de dichtheid van het gas verandert en mogelijk kan dalen. Wanneer de damp kouder is dan water, kan deze opgewarmd worden door het water en vindt het omgekeerde effect plaats.

**3. Fysisch of chemisch**

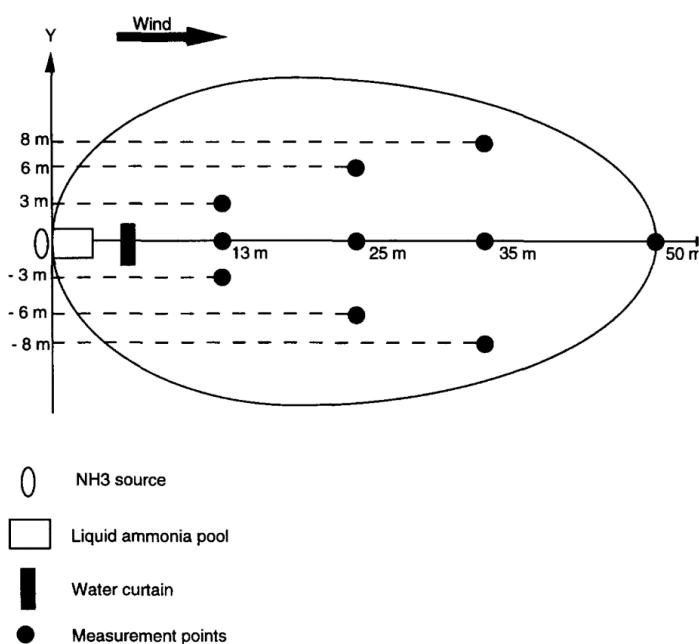
Oplossen van het gas in water.

## 2 Grootschalige experimenten

Tijdens het literatuuronderzoek zijn zes relevante onderzoeken gevonden waarbij grootschalige experimenten met waterschermen zijn uitgevoerd. In dit hoofdstuk staan de experimenten en resultaten beschreven. Er is voor gekozen om de bevindingen uit de literatuur per experiment te bespreken. Op die manier kan voor specifieke testomstandigheden snel gezocht worden welke resultaten behaald zijn.

### 2.1 Experiment ammoniak 1996

In 1996 is een experiment met ammoniak uitgevoerd in Frankrijk door onderzoekers van het Laboratorium voor Milieutechniek van de Nationale Academie voor Techniek en Mijnbouw in samenwerking met de brandweer van Alès (Bara & Dusserre, 1997). Het doel van het onderzoek was om te kijken of brandweermensen tijdens een inzet door een waterscherm beschermd kunnen worden. Het experiment is uitgevoerd op een groot en vlak rechthoekig gebied op een vliegveld. Op tien punten zijn metingen uitgevoerd; deze punten zijn weergegeven op de plattegrond in figuur 2.1.



**Figuur 2.1** Plattegrond van de testlocatie inclusief meetpunten, locatie waterscherm en locatie bron

Er zijn drie testen uitgevoerd. Test 1 was een nulmeting waarbij geen waterscherm is ingezet. Bij test 2 en 3 is wel een waterscherm ingezet, dat is aangezet op het moment dat een cilinder met ammoniak werd opgedraaid. De kenmerken van de testen zijn opgenomen in tabel 2.1.



**Tabel 2.1 Kenmerken van de testen met ammoniak in 1996**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Ammoniak (toxisch)
	Wateroplosbaarheid	52 g/100 ml
	Hoeveelheid	7,6 kg/min, 2 minuten per experiment
	Concentratie damp	Maximaal 3.570 ppm zonder waterscherm
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Waaivorm, omhoog gericht, mobiel, afmetingen niet beschreven
	Druk en flowrate	Druk 10 bar Flowrate 500 liter/min
	Plaatsing en afstand tot bron	Afstand tot bron 8 meter Waterscherm benedenwinds van lekkage
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Gemiddeld 2 - 3 m/s met windvlagen tot 4 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	30 % - 33 %

## Resultaten

De onderzoekers hebben de verzamelde data van test 2 en test 3 afgezet tegen de nulmeting (test 1). Daarbij is berekend wat de effectiviteit van het waterscherm is. Hiervoor is de volgende formule gebruikt:

$$x\% = \left(1 - \frac{[\text{test 2 or 3}]}{[\text{test 1}]}\right) \times 100$$

Daarnaast is berekend met welke factor de concentratie ammoniak gedaald is door het waterscherm. Dit is berekend met de volgende formule:

$$D = [\text{test 1}] / [\text{test 2 or 3}]$$

De resultaten zijn weergegeven in tabel 2.2.

**Tabel 2.2 Data van de testen met ammoniak in 1996**

Meetpunt X-as; Y-as	Gemeten concentratie ammoniak (ppm)			Effectiviteit waterschermb (afgezet tegen test 1)		Verdunningsfactor waterschermb (afgezet tegen test 1)	
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 2	Test 3	Test 2	Test 3
13 m; 3 m	3.157	623	1.547	80,3 %	51 %	5,1	2,0
13 m; 0 m	3.475	303	272	91,3 %	92,2 %	11,5	12,8
13 m; -3 m	3.570	1.144	769	68 %	78,5 %	3,1	4,6
25 m; 6 m	1.065	146	317	86,3 %	70,2 %	7,3	3,4
25 m; 0 m	728	340	147	53,3 %	79,8 %	2,1	4,9
25 m; -6 m	679	264	112	61,1 %	83,5 %	2,6	6,1
35 m; 8 m	584	80	145	86,3 %	75,2 %	7,3	4,0
35 m; 0 m	337	242	129	28,2 %	61,7 %	1,4	2,6
35 m; -8 m	161	205	79	<b>- 27,3 %</b>	50,9 %	<b>0,8</b>	2,0
50 m; 0 m	149	115	-*	22,8 %	-*	1,3	-*

\* Geen meting door uitvallen meetapparatuur

Volgens de onderzoekers is de effectiviteit van het waterschermb met dit experiment aangetoond. Wat ook naar voren komt in het experiment, is dat de gemeten concentraties ammoniak verder van de as hoger zijn dan de concentraties gemeten op de as (Y-as = 0 meter). Dit heeft volgens de onderzoekers te maken met het ontwerp van het waterschermb. Het scherm bedekt geen 180 graden, waardoor er gas tussen het scherm en de grond door kan. Ook zou het scherm niet breed genoeg zijn, waardoor de ammoniakwolk eromheen kan.

### **Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV**

De opzet en resultaten van het experiment zijn goed gedocumenteerd. De meetopstelling, meettechniek en de verzamelde data zijn duidelijk beschreven, alleen de afmetingen van het waterschermb zijn niet opgenomen in het artikel. Door de goede documentatie is het experiment navolgbaar, wat de betrouwbaarheid ten goede komt en ervoor zorgt dat de resultaten bruikbaar zijn.

De onderzoekers trekken de conclusie dat de effectiviteit van het waterschermbaangetoond, aangezien de concentraties achter het scherm dalen met minimaal een factor 3 op een afstand van ongeveer 20 meter en een factor 10 op 13 meter. Hierbij valt op dat de onderzoekers over de verdunningsfactor op een afstand van 20 meter schrijven, terwijl er niet op 20 meter is gemeten. Wellicht is er een typefout gemaakt of hebben de onderzoekers de verdunningsfactor afgeleid van andere meetpunten. Daarnaast moet worden opgemerkt dat de onderzoekers hun conclusie baseren op de verdunningsfactor van het waterschermbaan op de as (Y-as = 0 meter). Dat is de meest gunstige verdunningsfactor op 13 meter afstand. Als wordt gekeken naar de verdunningsfactoren van meetpunten verder van de as, dan liggen deze lager.

Als wordt gekeken naar de effectiviteit van het waterschermbaan, dan ligt deze op gemiddeld 76,9 %<sup>1</sup> op 13 meter afstand en op gemiddeld 72,4 %<sup>1</sup> op 25 meter afstand. Vanaf 35 meter afstand neemt de effectiviteit beduidend af, namelijk naar gemiddeld 45,8 %<sup>1</sup> op 35 meter afstand en 22,8 %<sup>1</sup> op 50 meter afstand.

Bij de testen is enkel gemeten op plekken achter het waterschermbaan. Omdat niet is gemeten op plekken naast of boven het waterschermbaan, is niet bekend of de ammoniak wellicht wordt weggeduwd door het waterschermbaan. Op één plek op  $y = -8$  meter is een negatieve effectiviteit gemeten van het waterschermbaan. Dit draagt bij aan het vermoeden dat de ammoniak door het waterschermbaan wordt weggeduwd naar de zijkanten. Omdat er niet is gemeten op plekken naast of boven het waterschermbaan, kan echter niet vastgesteld worden of het waterschermbaan de ammoniak oplost of dat het de ammoniak verplaatst.

## 2.2 Experiment ammoniak 1998-1999

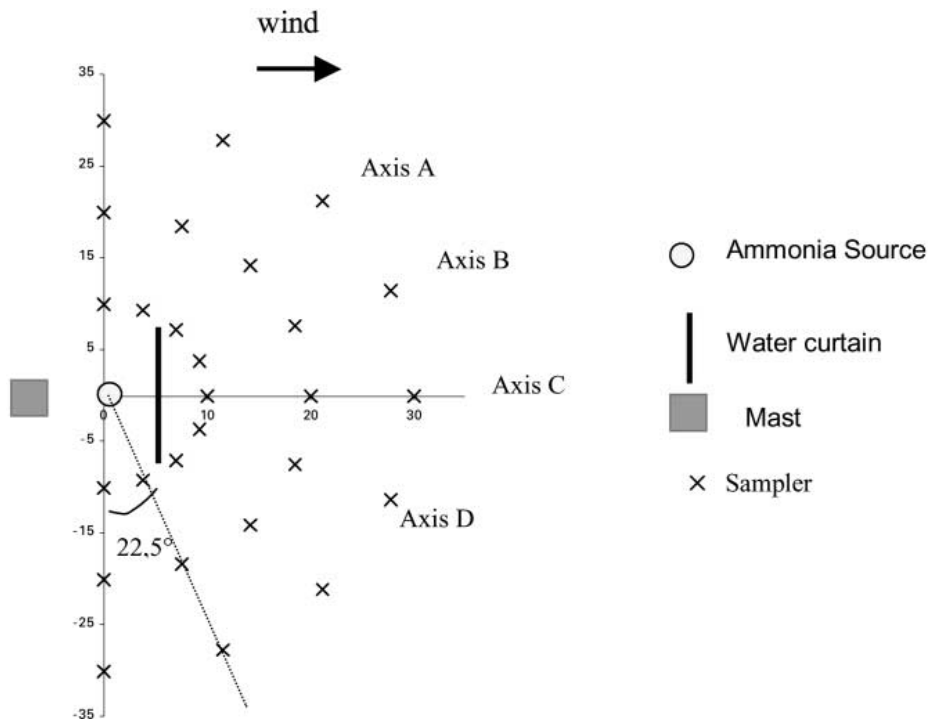
In de winter van 1998-1999 is in Frankrijk wederom een experiment uitgevoerd met ammoniak door onderzoekers van het Laboratorium voor Milieutechniek van de Nationale Academie voor Techniek en Mijnbouw in Alès (Dandrieux, Dusserre, Ollivier, & Fournet, 2001). Het doel van het onderzoek was om te kijken of brandweermensen tijdens het werken door een waterschermbaan beschermd kunnen worden. Het experiment is uitgevoerd op een vliegveld.

In totaal zijn 11 testen uitgevoerd. Volgens de onderzoekers zijn zeven testen bruikbaar; bij deze testen waren de omstandigheden acceptabel voor het onderzoek.

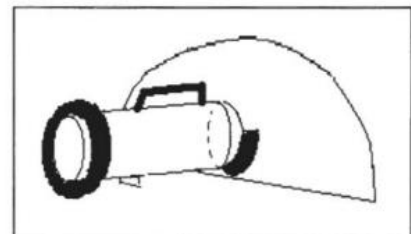
Op 27 punten zijn metingen uitgevoerd. De meetpunten van testen 2, 3, 5 en 6 zijn weergegeven op de plattegrond in figuur 2.2. Bij testen 1 en 4 werd op 15, 25, 35 en 50 meter afstand gemeten. Dertig seconden na het begin van het vrijkomen van de ammoniak werden de metingen gestart. Deze dertig seconden waren nodig om ervoor te zorgen dat de ammoniakwolk alle meetpunten had bereikt voordat de meting begon. Het gebruikte waterschermbaan is weergegeven in figuur 2.3.

---

<sup>1</sup> Gemiddelde van alle waarden op alle assen van dit meetpunt.



**Figuur 2.2** Plattegrond van de testlocatie inclusief meetpunten, locatie waterscherm en locatie bron voor test 2, 3, 5 en 6



**Figuur 2.3** Gebruikt waterscherm in de test

Van de zeven bruikbare testen, zijn drie testen uitgevoerd zonder waterscherm (nulmetingen) en vier met waterscherm. De kenmerken van de testen zijn opgenomen in tabel 2.3.

**Tabel 2.3 Kenmerken van de testen met ammoniak 1998-1999**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Ammoniak (toxisch)
	Wateroplosbaarheid	52 gram/100 ml
	Hoeveelheid	Gemiddeld 0,25 kg/s Tijdsduur was per test 90 of 120 seconden
	Concentratie damp	Maximaal 35.550 ppm zonder waterscherm
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Waaivorm, omhoog gericht, mobiel, afmeting van 8 bij 20 meter
	Druk en flowrate	Druk 8 bar Flowrate 730 l/min
	Plaatsing en afstand tot bron	Test 4, 5 en 6: afstand tot bron 6 meter Test 7: afstand tot bron 5 meter Waterscherm benedenwinds van lekkage
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Variërend tussen 0,3 – 4,4 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	50 – 65 %

## Resultaten

De onderzoekers hebben naar drie aspecten gekeken, namelijk de verdunningsfactor van het waterscherm (ook wel reductiefactor genoemd), de effectiviteit van het waterscherm en de mate van oplosbaarheid van ammoniak door het waterscherm.

### *Verdunningsfactor*

De verzamelde data van test 5 (met waterscherm) zijn afgezet tegen een nulmeting (test 2). Daarnaast zijn ook de data van test 7 (met waterscherm) afgezet tegen een nulmeting (test 3). Er is berekend met welke factor de concentratie ammoniak gedaald is door het waterscherm. Dit is gedaan door de gemeten concentratie van de nulmeting te delen door de gemeten concentratie van de test met waterscherm. De resultaten zijn weergegeven in tabel 2.4 op de volgende pagina.

**Tabel 2.4 Data van testen 2, 3, 5 en 7 met ammoniak 1998-1999**

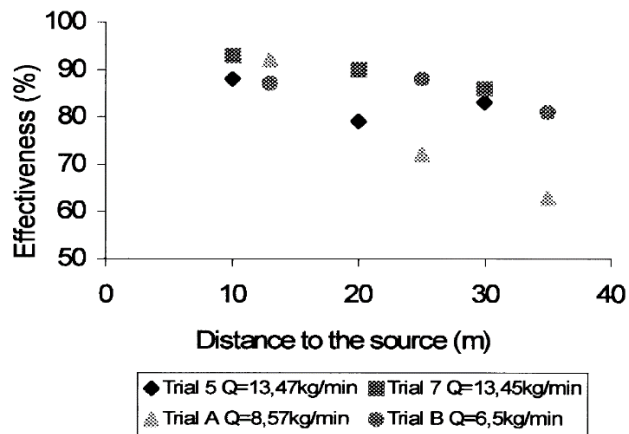
Meetpunt (as en afstand)	Gemeten concentratie ammoniak (ppm)		Reductie- factor	Gemeten concentratie ammoniak (ppm)		Reductie- factor
	Test 2 (zonder scherm)	Test 5 (met scherm)		Test 3 (zonder scherm)	Test 7 (met scherm)	
A 10m	200	900	0,2	180	1.000	0,2
A 20m	30	300	0,1	710	1.130	0,6
A 30m	10	80	0,1	640	670	1,0
B 10m	-	-	-	4.050	2.650	1,5
B 20m	17.780	3.440	5,2	-	1.550	-
B 30m	13.380	2.060	6,5	1.940	1.310	1,5
C 10m	26.150	2.990	8,7	35.550	2.770	12,8
C 20m	10.910	1.720	6,3	15.400	670	23,0
C 30m	340	80	4,3	8.880	230	38,6
D 10m	30	1.070	0,0	20	170	0,1
D 20m	10	180	0,1	10	50	0,2
D 30m	20	80	0,3	10	0	-

De onderzoekers trekken op basis van de data in tabel 2.4 de conclusie dat het effect van het waterscherm aanzienlijk is: de concentraties achter het scherm bij test 5 zijn meer dan acht keer lager op 10 meter afstand en vier keer lager op 30 meter afstand.

Verder is uit de data af te lezen dat er een stijging plaatsvindt van de concentraties op de assen aan de randen van het waterscherm. Een verklaring hiervoor is volgens de onderzoekers dat wanneer de ammoniakwolk tegen een obstakel botst (in dit geval een waterscherm), de ammoniakwolk naar boven en de zijanten wordt geduwd waardoor een deel van de ammoniak door en om de randen van het scherm gaat. De onderzoekers zijn van mening dat het waterscherm veel groter moet zijn dan de afmetingen van de wolk om de brandweer te beschermen bij een inzet. Bovendien is de windrichting nauwelijks constant en zijn er dus grotere waterschermen nodig. Een oplossing zou zijn om een barrière van meerdere waterschermen te maken en ze in een halve cirkel te plaatsen om te anticiperen op een verandering in de windrichting.

#### *Effectiviteit*

De effectiviteit van het waterscherm hebben de onderzoekers berekend voor de assen waar hogere concentraties werden waargenomen tijdens de nulmetingen en de testen met het waterscherm. Van testen 5 en 7 is de effectiviteit berekend en vergeleken met eerder uitgevoerde testen (test A en B) met een lagere uitstroomsnelheid van ammoniak (ongeveer 0,1 kg/s). Dit is weergegeven in figuur 2.4.



**Figuur 2.4 Effectiviteit van het waterscherm bij verschillende uitstroomsnelheden van ammoniak**

De effectiviteit van het waterscherm in testen 5 en 7 ligt ongeveer tussen de 80 % en 95 % en is ongeveer gelijk aan die van testen A en B.

#### *Oplosbaarheid van ammoniak*

Ammoniak is goed oplosbaar in water. Het waterscherm zou door dit fysisch-chemische effect een aanzienlijke hoeveelheid ammoniak moeten kunnen opnemen. De onderzoekers hebben geprobeerd om dit effect te kwantificeren. Een grondzeil is gebruikt om de totale hoeveelheid gebruikt water te verzamelen. Hier werd een representatief monster van genomen en geanalyseerd. De hoeveelheid opgeloste ammoniak is berekend uit het waterdebiet, de werkingsduur van het waterscherm en de ammoniakconcentratie in het monster. De concentraties ammoniak die opgelost zijn in water voor testen 4, 5 en 6 zijn opgenomen in tabel 2.5.

**Tabel 2.5 Percentage opgeloste ammoniak voor testen 4, 5 en 6**

	Trial 4	Trial 5	Trial 6
Quantity of NH <sub>3</sub> in the water (kg)	5.2	2.2	1.7
Quantity released in the air (kg)	24.7	20.3	20.2
Dissolution of NH <sub>3</sub> %	21.2	11.0	8.2
Concentration of NH <sub>3</sub> (g/l)	5.81	1.43	1.90

Het gemiddelde oplossingspercentage bleek ongeveer 15 %; dit is een lage waarde voor ammoniak, dat immers een hoge oplosbaarheid in water heeft. De gemeten concentraties komen niet in de buurt van verzadiging. Dit komt, omdat een deel van de ammoniakwolk de randen van het scherm passeert, en zo nooit in contact komt met het water. De onderzoekers stellen dat de zwakke absorptie van ammoniak door het waterscherm mogelijk niet gerelateerd is aan de verzadiging, maar gedeeltelijk veroorzaakt wordt door een te klein contactoppervlak en een te korte contacttijd tussen de waterdruppels en de ammoniakwolk.

Volgens de onderzoekers leidt het overheersende mechanische effect van dit type waterscherm ertoe dat een groot deel van de ammoniakwolk om het waterscherm heen gaat en niet opgenomen wordt door het water (fysisch-chemisch effect).

## Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

De opzet van het experiment komt uitgebreid aan bod, maar er zijn een aantal zaken die ontbreken of onduidelijk zijn. Zo zijn er volgens de plattegrond 27 meetpunten, maar worden er maar 12 meetpunten meegenomen in het artikel. Daarnaast ontbreekt een beschrijving van de meetpunten die gebruikt zijn voor test 7. Ook is er geen duidelijke uitleg over wanneer, door wie en hoe testen A en B (met een kleinere hoeveelheid ammoniak) zijn uitgevoerd. Tevens is niet van elke test exact bekend hoeveel ammoniak is vrijgekomen, aangezien niet duidelijk is wat de tijdsduur per test is (90 of 120 seconden).

De data met betrekking tot de verdunningsfactor en effectiviteit die gepresenteerd zijn in het artikel, bestrijken slechts vier testen (2, 3, 5 en 7). Van de overige testen zijn de verzamelde data niet beschreven. Verder is het niet altijd duidelijk welke data de onderzoekers gebruikt hebben voor bepaalde berekeningen; dit geldt met name voor de effectiviteitsberekening.

Volgens de onderzoekers is de effectiviteit van het waterscherm bewezen wanneer de uitstroomsnelheid van ammoniak wordt verdubbeld (0,25 kg/s in plaats van 0,1 kg/s). Het waterscherm kan de concentraties ammoniak verlagen, met een effectiviteit van meer dan 90 % op 10 meter achter het scherm. De onderzoekers baseren hun conclusie op de berekende effectiviteit van het waterscherm op de C-as ( $y = 0$  meter) en op de meest gunstige meting op 10 meter afstand. Als wordt gekeken naar de meetpunten verder van de as, dan ligt de effectiviteit lager. Op de A-as en de D-as worden zelfs hogere concentraties ammoniak gemeten met waterscherm dan zonder waterscherm. Dit toont aan dat het effectgebied door het waterscherm minder lang wordt, maar wel breder. De ammoniakwolk wordt door het waterscherm naar boven en opzij geduwd, waardoor er hogere concentraties ammoniak worden gemeten op de meetpunten verder van de C-as.

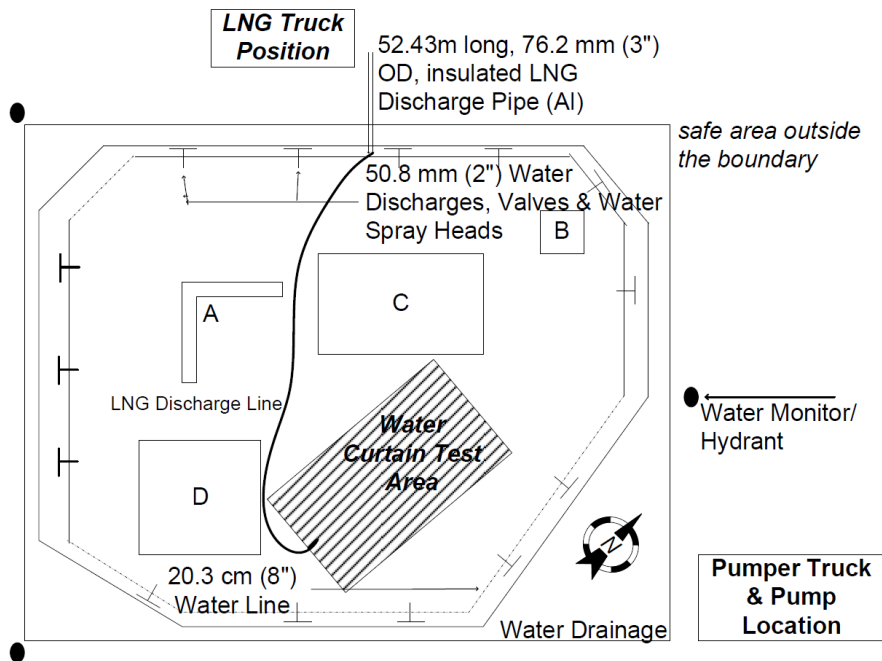
Het artikel biedt nuttige inzichten en de testopzet is goed beschreven. Een deel van de data ontbreken echter. Vermoedelijk is de reden hiervoor de wens om de resultaten overzichtelijk te presenteren, maar dit wordt niet duidelijk in het artikel.

## 2.3 Experiment LNG 2007

Onderzoekers van de Texas A&M University hebben in 2007 een onderzoek uitgevoerd naar de effectieve toepassing van waterschermen bij de verspreiding van dampwolken van vloeibaar aardgas (LNG) (Rana, Cormier, Suardin, Zhang, & Sam Mannan, 2008 en Rana, Guo, & Sam Mannan, 2010). LNG bestaat meestal voor 85-98 % uit methaan en voor de rest uit een combinatie van stikstof, kooldioxide, ethaan, propaan en andere zwaardere koolwaterstofgassen.

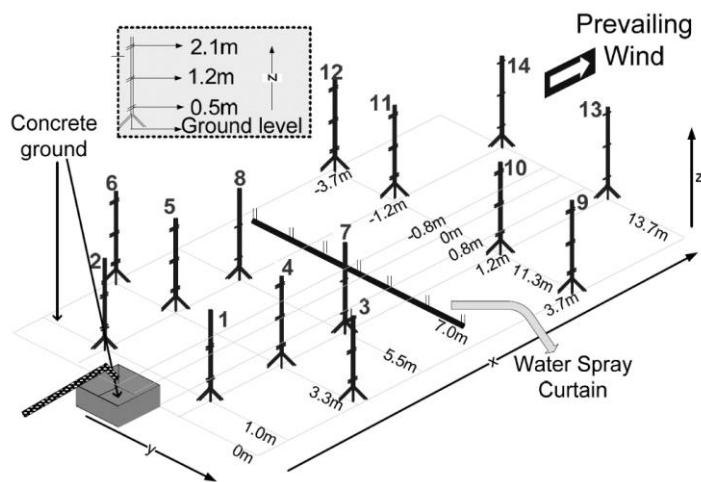
Het experiment is uitgevoerd op de LNG Emergency Response Training Facility van het Brayton Fire Training Field (Emergency Service Training Institute) in College Station, Texas. Een plattegrond van de testlocatie is weergegeven in figuur 2.5.





**Figuur 2.5** Plattegrond van de testlocatie

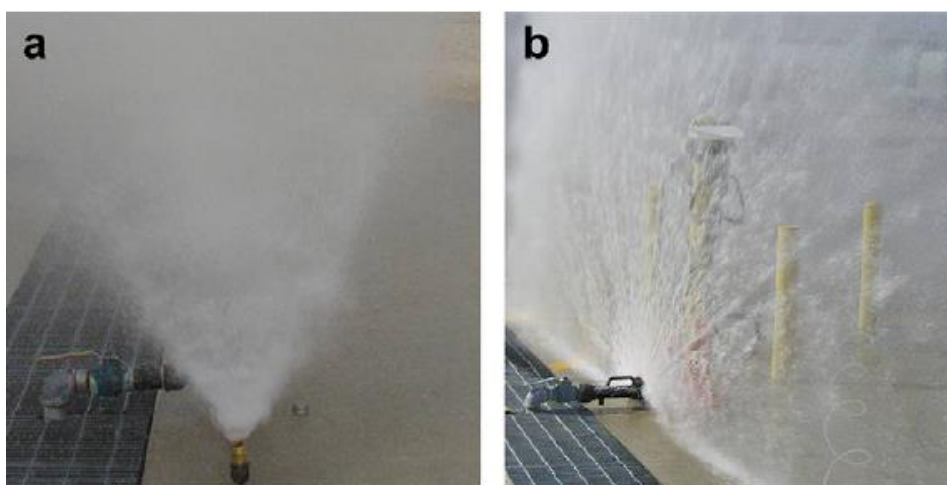
Er zijn op meerdere locaties metingen uitgevoerd om de dampconcentratie en temperatuur vast te leggen. Diverse meetapparatuur werd geïnstalleerd op tripods om te meten op verschillende benedenwindse afstanden en hoogten. De experimentele opstelling inclusief de meetlocaties en de locatie van het waterscherm, is weergegeven in figuur 2.6.



**Figuur 2.6** Experimentele opstelling met meetlocaties en locatie waterscherm

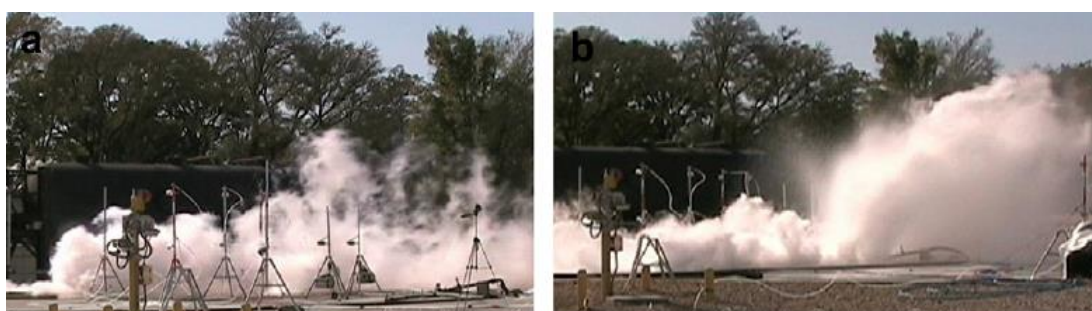
Er zijn vier testen uitgevoerd. Alle vier de testen bestaan uit een gedeelte zonder waterscherm en een gedeelte met waterscherm. Testen 1 en 2 zijn uitgevoerd met een omhooggericht waterscherm bestaande uit full cone spiral nozzles. Bij testen 3 en 4 bestond het waterscherm uit een omhooggerichte waaivorm. De kenmerken van de testen zijn opgenomen in

tabel 2.6. De gebruikte waterschermen staan weergegeven in figuur 2.7.



**Figuur 2.7** Gebruikte waterschermen in de experimenten. Full cone spiral nozzles (a) en waaiervorm (b)

Enkele minuten nadat de LNG-uitstroom was gestart, werd het waterscherm ingeschakeld om de LNG-wolk te dispergeren. De LNG-uitstroom werd enkele minuten voortgezet, terwijl het waterscherm aanstond. Daarna werd de LNG-uitstroom stop gezet, terwijl het waterscherm in werking bleef. Het waterscherm bleef aan totdat de zichtbare witte LNG-wolk was verdwenen. Een foto van een tweetal experimenten is te zien in figuur 2.8.



**Figuur 2.8** Foto test: zonder waterscherm (a) en met full cone waterscherm (b)

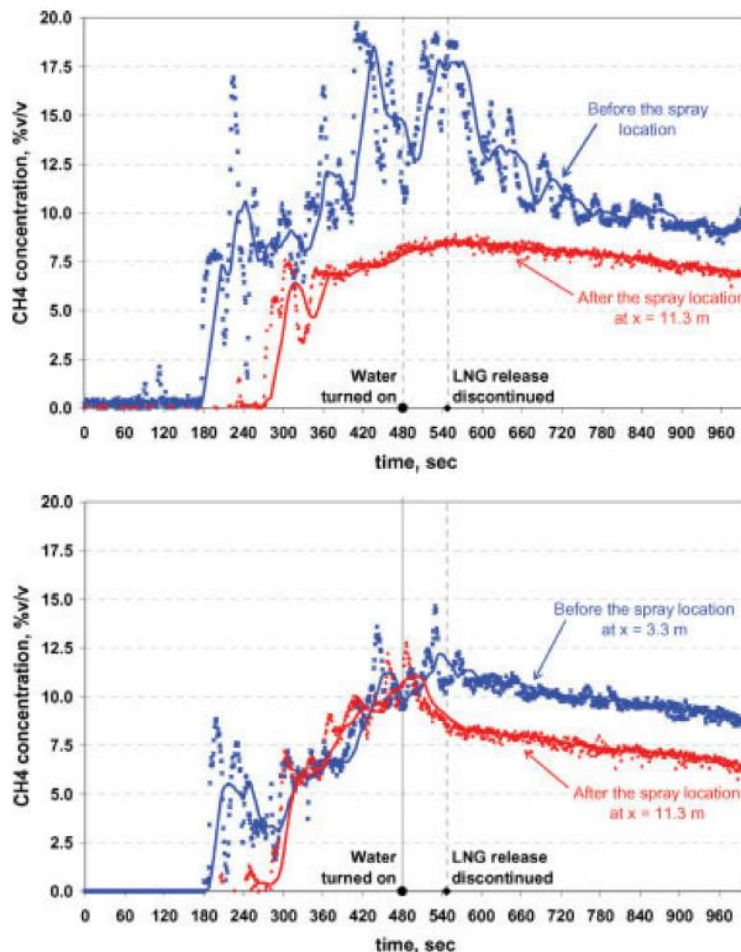
**Tabel 2.6 Kenmerken van de testen met LNG in 2007**

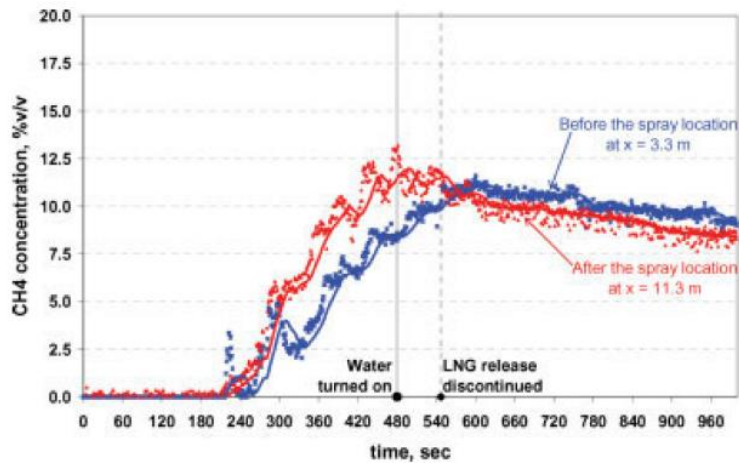
Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	LNG (85 – 98 % methaan) (zeer brandbaar gas, niet toxisch)
	Wateroplosbaarheid	niet
	Hoeveelheid	39,3 GPM (gallons per minute) (148,8 l/min), tijdsduur 9 minuten (full cone spiral nozzles test) 55,9 GPM (221,6 l/min), tijdsduur 5,9 minuten (waaivorm test)
	Concentratie damp	Onbekend
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Twee soorten: - Full cone spiral nozzles, naar boven gericht, 7 meter breed en 3,7 meter hoog - Waaivorm, naar boven gericht, 15,2 meter breed en 7,6 meter hoog
	Druk en flowrate	Full cone nozzles 160,8 GPM (608,7 l/min), 40 psi (2,8 Bar), tijdsduur 9,8 minuten Waaivorm 178,6 GPM (676,1 l/min), 79,5 psi (5,5 Bar), tijdsduur 4,3 minuten
	Plaatsing en afstand tot bron	Afstand tot bron 7 meter Waterscherm benedenwinds van lekkage
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Gemiddeld 2 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Gemiddeld 25,5 %

## Resultaten

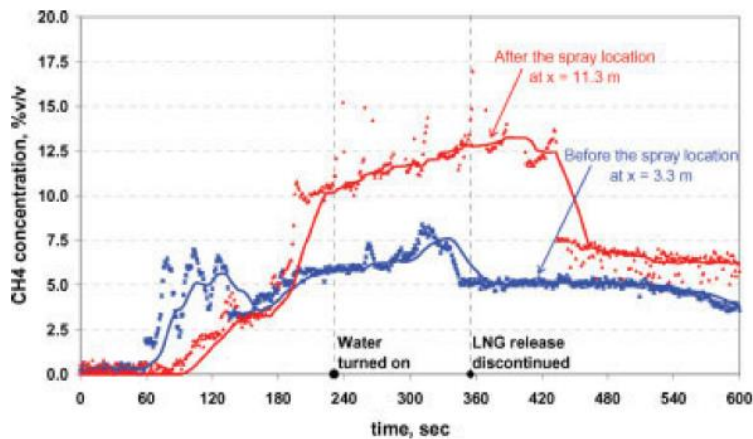
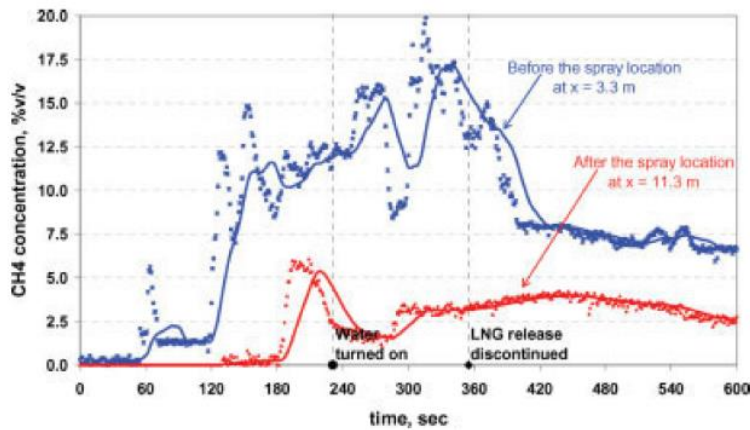
De onderzoekers hebben de experimentele gegevens geanalyseerd om het effect te bepalen van waterschermen op de LNG-dampconcentratie.

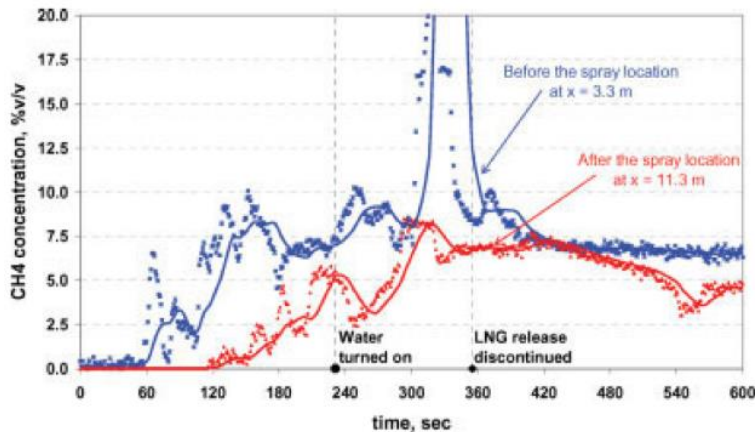
Doordat de wind vaak van richting veranderde, kon de LNG-damp zich soms verspreiden zonder door het waterscherm te gaan. Dit veroorzaakte fluctuaties in de metingen van de methaanconcentratie. Daarom werd voor de analyse van de gasconcentratiegegevens gekeken naar het gemiddelde van de concentratielezingen van alle detectoren die op een bepaalde benedenwindse afstand en hoogte waren geplaatst. In figuur 2.9 en figuur 2.10 zijn de gemiddelde gasconcentraties weergegeven voor test 1 (full cone spiral nozzles) en test 3 (waaivorm).





Figuur 2.9 Gemiddelde gasconcentraties op 3,3 en 11,3 meter van de bron gemeten op 0,5 (boven), 1,2 (midden) en 2,1 meter (onder) hoogte tijdens de test met de full cone spiral nozzles (test 1)





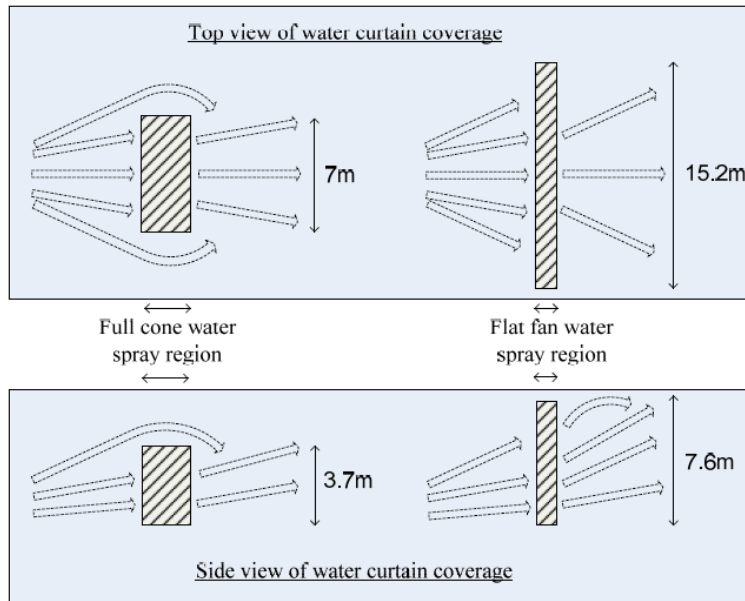
**Figuur 2.10 Gemiddelde gasconcentraties op 3,3 en 11,3 meter van de bron gemeten op 0,5 (boven), 1,2 (midden) en 2,1 meter (onder) hoogte tijdens de test met de waaivorm (test 3)**

Op basis van de grafieken geven de onderzoekers aan dat de gasconcentratie tijdens de toepassing van het waterscherm in testen 1 en 3 op zowel 3,3 meter als 11,3 meter afstand bleef afnemen, nadat de LNG-stroom was gestopt. In alle testen bereikte de methaanconcentratie op 11,3 meter benedenwinds echter nooit minder dan de helft van de LFL (lower flammable limit) van 2,5 % (v/v) door geforceerde dispersie.

Uit de analyse blijkt dat de werking van waterschermen de methaanconcentratie verlaagt door verdunning en vermenging met meegevoerde lucht, en de damp omhoog duwt. De resultaten geven volgens de onderzoekers aan dat het waterscherm in staat is om de LNG-dampwolk te beheersen door de methaanconcentratie op grondniveau te veranderen. De testen konden echter geen significante verandering in de concentratie op een hoger niveau dan het maaiveld aantonen.

Het waterscherm met full cone spiral nozzles is effectiever in het creëren van turbulentie dan het waterscherm in waaivorm. De waaivorm is effectiever in het verlagen van de concentratie op grondniveau door een barrière te creëren op het pad van de dampwolk en de dampwolk omhoog te duwen. De resultaten tonen aan dat waterschermen ook enige warmte leveren aan de gemengde gaswolk en lucht.

In figuur 2.11 is weergegeven wat de visuele dekking en door de onderzoekers geïnterpreteerde interacties waren van de twee typen waterschermen met de dampwolk.



**Figuur 2.11 Visuele dekking en geïnterpreteerde interacties van de twee typen waterschermen met de dampwolk**

### Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

De opzet van het experiment komt uitgebreid aan bod, maar er zijn een aantal zaken die ontbreken of onduidelijk zijn. Het is niet duidelijk wat de maximale concentratie van de dampwolk was, want de data in de grafieken zijn gemiddelde waarden en bovendien worden niet alle gemeten waarden weergegeven door de beperkte schaal op de Y-as. Daarnaast zijn de data die gepresenteerd zijn in het artikel slechts van twee van de vier testen (1 en 3). Van de overige testen zijn de verzamelde data niet opgenomen.

Wat opvalt aan de uitvoering van de testen is dat de momenten waarop de waterschermen zijn aangegaan en de LNG-toevoer is gestopt niet gelijk zijn. Bij test 1 is na 8 minuten het waterscherm aangezet en na 9 minuten de LNG-toevoer gestopt. Bij test 3 is na 4 minuten het waterscherm aangezet en na 6 minuten de LNG-toevoer stopgezet. Hierdoor zijn de testen en resultaten slechts in beperkte mate vergelijkbaar.

Als wordt gekeken naar de werking van de waterschermen terwijl de LNG-toevoer nog openstaat, is te zien dat de concentratie methaan op 11,3 meter afstand van de bron (3,3 meter achter het waterscherm) alleen bij test 1 op 1,2 meter hoogte en bij test 3 op 0,5 meter hoogte afgenomen is. Op de andere meetpunten op 11,3 meter afstand is de concentratie vrijwel gelijk gebleven of zelfs gestegen. Pas na het stopzetten van de LNG-toevoer is een afname te zien op alle meetpunten achter het waterscherm. En dat is ook logisch, want als de toevoer van LNG is gestopt zullen ook de omvang en de concentratie van de dampwolk afnemen. Bij de testen is enkel gemeten op plekken achter het waterscherm. Omdat niet is gemeten op plekken naast of boven het scherm, is niet bekend in hoeverre de LNG wordt weggeduwd door het waterscherm.

Over het geheel gezien biedt het artikel enkele nuttige inzichten, maar doordat een deel van de data ontbreekt, is er geen volledig beeld van het experiment. Hierdoor is onduidelijk of de testen die wel beschreven zijn, representatief zijn voor het gehele experiment. Ook zijn de testen slechts beperkt vergelijkbaar. Dit heeft invloed op de betrouwbaarheid van het onderzoek. De resultaten moeten dan ook met enige voorzichtigheid worden gezien.

## 2.4 Experiment ammoniak 2013

Kotov en Fisenko hebben meerdere experimenten op grote schaal uitgevoerd met ammoniak (Kotov & Fisenko, 2013). Er is gewerkt met ammoniakconcentraties tussen de 2 en 2000 mg / m<sup>3</sup> en verschillende uitvoeringen van een waterscherm. In tabel 2.7 hieronder staan de kenmerken van de experimenten opgesomd.

**Tabel 2.7 Kenmerken van de testen met ammoniak uit 2013**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Ammoniak (toxisch)
	Wateroplosbaarheid	52 gram/100 ml
	Hoeveelheid	2 of 4 m <sup>2</sup> spill
	Concentratie damp	2 – 2000 mg/m <sup>3</sup>
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Onbekend
	Druk en flowrate	Onbekend
	Plaatsing en afstand tot bron	Onbekend
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Onbekend
	Relatieve luchtvochtigheid	Onbekend

### Resultaten

In de experimenten is gezien dat het effectgebied als gevolg van een waterscherm minder lang, maar ook breder wordt. Dit komt waarschijnlijk door het zijwaarts wegduwen van de ammoniak door het water. Er zijn een aantal grafieken weergegeven van de effectiviteit van het waterscherm bij verschillende parameters zoals de hoogte van het waterscherm (figuur 2.12) en de windsnelheid (figuur 2.13).



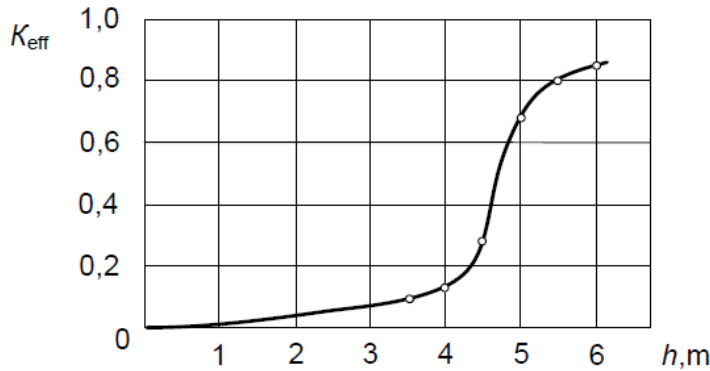


FIG.3 CORRELATION BETWEEN WATER CURTAIN EFFICIENCY INDEX AND CURTAIN HEIGHT

**Figuur 2.12 Effectiviteitsfactor waterschermbij verschillende hoogtes van het waterschermbij**

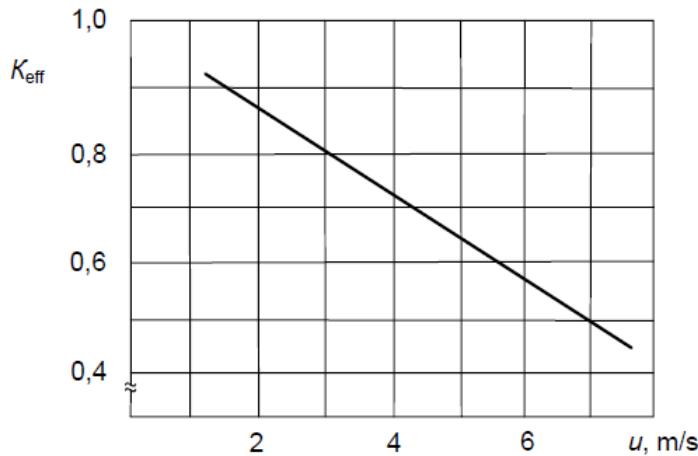


FIG.5 DEPENDENCE OF WATER CURTAIN EFFICIENCY ON WIND SPEED

**Figuur 2.13 Effectiviteitsfactor waterschermbij verschillende windsnelheden**

In figuur 2.12 en figuur 2.13 is te zien dat de effectiviteit van het waterschermbij fors toeneemt met het toenemen van de hoogte van het waterschermbij en sterk afneemt bij hogere windsnelheden. Bij een windsnelheid van 7 m / s is de effectiviteit van het waterschermbij 50 %. Een windsnelheid van 7 m / s komt overeen met windkracht 4 Bft. Bij een hogere windsnelheid neemt ook de snelheid van de dampwolk toe. Hierdoor wordt de contacttijd tussen de dampwolk en het waterschermbij kleiner. Bij een hoger waterschermbij is er meer water waar de ammoniak in op kan lossen, maar ook meer turbulentie en meer inmenging van de lucht en ammoniak in het waterschermbij. Er wordt verder geconcludeerd dat de luchttemperatuur een belangrijke parameter is voor de effectiviteit van het waterschermbij. Dit wordt niet nader onderbouwd.

### Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

De opzet van de testen is slecht gedocumenteerd. Zo is nagenoeg niets bekend over de meetopstelling en -techniek en de uitvoering van het waterschermbij. Dit maakt dat het lastig is om de resultaten te beoordelen. Alhoewel het artikel praktische bruikbare resultaten geeft, moet er vanwege de onduidelijkheid over de opzet van de test voorzichtig mee worden

omgegaan. Omdat de opzet van de testen niet goed gedocumenteerd is, is het ook lastig om de resultaten te vertalen naar andere situaties.

## 2.5 Experiment beperking rookverspreiding 2013

In 2013 zijn door het IFV, RIVM en Efectis experimenten uitgevoerd om verschillende methoden en middelen voor het beperken van rookverspreiding bij grote branden te vergelijken (Brandweeracademie: IFV, 2013). Dit onderzoek wijkt enigszins af van de andere grootschalige experimenten die zijn beschreven. Het gaat namelijk om het beïnvloeden van een wolk met rook (een mengsel van verschillende gassen en vaste deeltjes) en niet om het beïnvloeden van een dampwolk met één specifiek gas. Er is verder, vanwege de thermiek van de brand die de rookwolk veroorzaakte, een sterke opwaartse druk van de rookwolk. Omdat het onderzoek inzicht geeft in de beïnvloeding van een dergelijke rookwolk, wordt het hier toch beschreven.

In dit onderzoek is voor het beperken van de rookverspreiding gekeken naar vier principes:

1. Het aanwakkeren van de brand.
2. Het filteren van de rook met watermist.
3. Het afdekken van de brand.
4. Het afbuigen van de rookpluim.

Enkel principe 2 en 4 worden hier meegenomen. De kenmerken van de testen zijn beschreven in tabel 2.8.

**Tabel 2.8 Kenmerken van de testen beperking rookverspreiding uit 2013**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	800 liter dieselolie als plas van 78,5 m <sup>2</sup> uitgevoerd als ronde bak met een diameter van 10 meter.	
	Type waterscherm	Turbolöscher
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Druk en flowrate	Bij filteren rook: 8 bar en 8000 l/min Bij afbuigen rook: 1000 m <sup>3</sup> /s (geen water)
	Plaatsing en afstand tot bron	Bij filteren rook: Haaks op de rookpluim, 40 meter vanaf de plas dieselolie Bij afbuigen rook: Haaks op de rookpluim, 30 meter vanaf de plas dieselolie
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Gemiddeld 3 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Onbekend

Het RIVM heeft met verschillende meetmethoden de omvang en samenstelling van de rookpluim gemeten.

## Resultaten

Bij het filteren van de rook is een beperkt visueel effect gezien op de rook. Hoeveel roetdeeltjes en andere gassen uitgewassen zijn, is echter op het oog niet vast te stellen. Ten aanzien van het afbuigen van de rookkolom is geconcludeerd dat sturen van de rookkolom tegen de windrichting niet mogelijk is. De turbinestraal van de Turbolöscher heeft alleen effect op het eerste deel van de rookkolom (15 - 30 m). Boven die hoogte heeft de wind (ten tijde van de experimenten 1 – 3 m / s op 1,5 m hoogte) al meer invloed dan de turbinestraal. De Turbolöscher zal bij de gemiddelde in Nederland heersende windsnelheid weinig tot geen invloed kunnen uitoefenen op de richting van de rookpluim. Een belangrijk neveneffect is dat er door het inblazen van lucht in de rookpluim nog naverbranding van de rook heeft plaatsgevonden.

## Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

Dit is geen experiment waarin een waterscherm op de grond is gezet en één specifieke stof in een dampwolk moet mitigeren. Het experiment wijkt daarmee af van de andere groot-schalige experimenten. Het experiment geeft wel goed inzicht in de beperkte mogelijkheid om een hoeveelheid rook op hoogte te beïnvloeden.

## 2.6 Experiment ammoniak en chloor 2015

In 2015 hebben medewerkers van de Universiteit van Leoben in Oostenrijk onderzoek gedaan naar het effect van waterschermen bij ammoniak- en chloorwolken (Kern, 2015 en Kern, 2016). Het experiment is uitgevoerd op het militaire oefenterrein van Großmittel in Oostenrijk. De testen bestonden uit twee testreeksen van ieder vijf dagen; het is onbekend hoeveel testen in totaal zijn uitgevoerd. De eerste testreeks was gericht op de werking van de waterschermen. Er zijn diverse testen gedaan met waaiervormige waterschermen, waterkanonnen en sproeislangen. De kenmerken van de testen zijn opgenomen in tabel 2.9.

De focus van de tweede testreeks lag op het verbeteren van maatregelen voor gasabsorptie. De belangrijkste chemicaliën die hiervoor werden gebruikt, waren natriumthiosulfaat en ammoniumhydroxide. Natriumthiosulfaat kan de oplosbaarheid van chloor in water verbeteren en bereikt vergelijkbare waarden als ammoniak. Tijdens de testen werden de chloride- en ammoniumconcentraties in het waswater gemeten. Dit werd uitgevoerd met behulp van snelle meetstrips en fotometrische methoden in het veldlaboratorium.

**Tabel 2.9 Kenmerken van de testen met ammoniak en chloor in 2015**

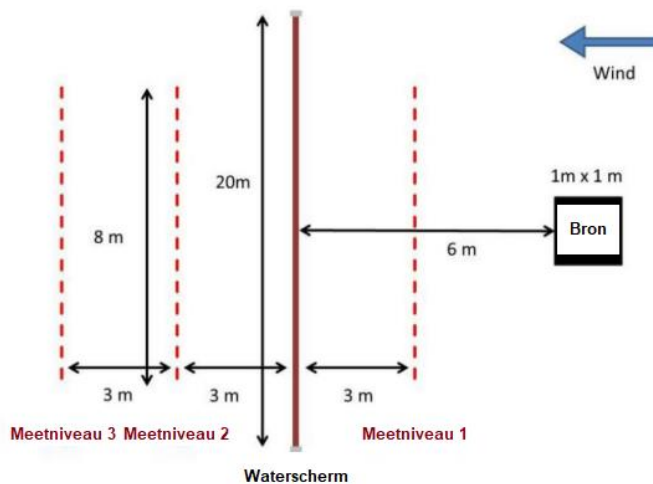
Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Ammoniak en chloor (toxisch)
	Wateroplosbaarheid	Ammoniak: 52 gram/100 ml Chloor: 0,7 gram/100 ml
	Hoeveelheid	Totaal van alle testen: 1.500 kg chloor en 1.500 kg ammoniak Per test onbekend
	Concentratie damp	Onbekend
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Waaivorm, omhoog gericht, mobiel Waterkanon, schuin omhoog gericht, mobiel Sproeislang, omhoog gericht, mobiel Afmetingen onbekend
	Druk en flowrate	Waaivorm: 400 en 800 liter/min Waterkanon: 800 en 2.400 liter/min Sproeislang: 400 en 800 liter/min
	Plaatsing en afstand tot bron	Afstand tot bron 6 meter Waterscherm benedenwinds van lekkage
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Gemiddeld 3 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Onbekend

Volgens de onderzoekers was de bestaande meettechnologie niet in staat om betrouwbare meetresultaten te leveren, vooral in de nabijheid van de bron. Daarom werden voor de testen speciale meetsensoren ontwikkeld en werden verschillende methoden gebruikt om de gasverspreiding zichtbaar te maken. Door de reactiviteit van chloor en ammoniak ontstond het zout ammoniumchloride, dat een witte wolk creëerde. Ook werden tracerdeeltjes gebruikt om het gas een oranje kleur te geven, zie figuur 2.14.



**Figuur 2.14 Gebruik van tracerdeeltjes bij een test met een waaivormig waterscherm**

De exacte meetlocaties tijdens de testen zijn niet beschreven. Er is wel een overzicht van globale testopstelling; die is weergegeven in figuur 2.15.



**Figuur 2.15 Globale testopstelling experiment ammoniak en chloor**

### Resultaten

Op basis van de waarnemingen trekken de onderzoekers de conclusie dat tijdens de eerste testreeks de waterschermen niet in staat zijn om de gasconcentraties significant te verminderen of de verspreiding van gaswolken in de buitenlucht te beperken. De belangrijkste reden hiervoor is volgens de onderzoekers de heersende windsituatie. Zelfs bij zeer lage windsnelheden van ongeveer 1-2 m/s worden vrijgekomen gassen door de waterschermen geduwd en worden er nauwelijks door beïnvloed.

Bij de tweede testreeks werden bij gebruik van een waterkanon en waaiervormig waterscherm concentraties van ongeveer 200 mg/l voor ammoniak en 2.000 mg/l voor chloor met natriumthiosulfaatbimenging gemeten in het waswater. Volgens de onderzoekers was het waarschijnlijk mogelijk om, rekening houdend met de hoeveelheid water die werd gebruikt, ongeveer 15-20 % van de hoeveelheid vrijgekomen chloorgas te binden. Hiervoor was echter een debiet nodig van in totaal ongeveer 2400 liter/min water.

### Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

De opzet van de testen en de resultaten zijn niet volledig gedocumenteerd. Zo is nagenoeg niets bekend over het aantal testen, de manier waarop de testen zijn uitgevoerd, op welke locaties is gemeten, welke data verzameld zijn en wat de resultaten waren van de metingen. Dit maakt het lastig om de resultaten te beoordelen. Door de onvolledige documentatie is het experiment niet navolgbaar, wat de betrouwbaarheid niet ten goede komt en ervoor zorgt dat voorzichtig omgegaan moet worden met de conclusies van het onderzoek.

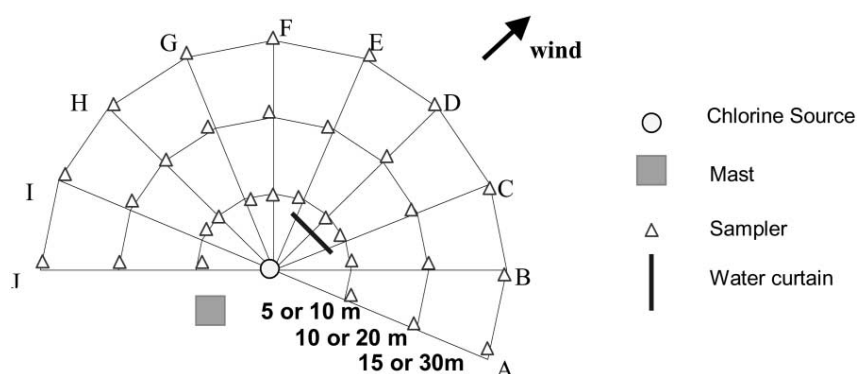
Op het eerste gezicht lijkt het te gaan om een uitgebreid onderzoek, zowel experimenteel als simulatie. In een vervolg op dit literatuuronderzoek kan het nuttig zijn om contact te zoeken met de onderzoekers van dit project om extra informatie bij hen op te halen.

# 3 Kleinschalige experimenten

Er zijn vijf relevante onderzoeken gevonden waarbij kleinschalige experimenten met waterschermen zijn uitgevoerd. In deze paragraaf staan de experimenten en resultaten beschreven en worden de opzet en resultaten kritisch beschouwd.

## 3.1 Kleinschalig experiment chloor 2002

In 1999 hebben onderzoekers in Frankrijk een kleinschalig experiment uitgevoerd met chloor (Dandrieux, Dusserre, & Ollivier, 2002). Het doel van het onderzoek was om de kennis over de verspreiding van een kleine chloorgaswolk te vergroten. In totaal zijn vier testen uitgevoerd; drie zonder waterscherm en één met een waaivormig waterscherm. De testopstelling is weergegeven in figuur 3.1.



**Figuur 3.1** Plattegrond van de testlocatie inclusief meetpunten, locatie waterscherm en locatie bron

Tijdens testen 1 en 2 werd gemeten op 10, 20 en 30 meter afstand; tijdens testen 3 en 4 is op 5, 10 en 15 meter afstand gemeten. De kenmerken van de testen zijn opgenomen in tabel 3.1.

**Tabel 3.1 Kenmerken van de testen met chloor 2002**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Chloor
	Wateroplosbaarheid	0,7 gram/100 ml
	Hoeveelheid	De release rates lagen tussen 0,33 and 0,54 kg/min Tijdsduur 4,5 min
	Concentratie damp	Max. 488 ppm
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Waaivorm, omhoog gericht, mobiel Afmeting: 8 meter hoog en 20 meter breed
	Druk en flowrate	8 bar, 730 l/min
	Plaatsing en afstand tot bron	Afstand tot bron 4 meter Waterscherm benedenwinds van lekkage
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Tussen 0,8 en 1,8 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	30 %

## Resultaten

In testen 1 en 2 lagen de concentraties chloor op 30 meter afstand lager dan 11 ppm. Aangezien de laagst detecteerbare waarde door de meetsensoren 11 ppm was, hebben de onderzoekers besloten om de meetafstanden te verkleinen in testen 3 en 4. De gemeten concentraties chloor tijdens deze testen zijn opgenomen in tabel 3.2.

**Tabel 3.2 Gemeten concentraties chloor (ppm) tijdens testen 3 en 4\***

Distance to the source	Trial 3 [Cl <sub>2</sub> ] (ppm)			Trial 4 [Cl <sub>2</sub> ] (ppm)		
	5 m	10 m	15 m	5 m	10 m	15 m
Axis A	0	0		14		
Axis B	27	0	0	15	68	33
Axis C	40	20	0	98	31	0
Axis D	94	58	20	15	0	0
Axis E	488	54	17	17	0	0
Axis F	0		0		0	0
Axis G	0	0	0	39	12	0
Axis H	12	0	0	50	12	0
Axis I	17	11	0	19	0	0
Axis J	0	11	0	0	0	0

\* Waarden onder de detectiegrens (11 ppm) zijn gelijkgesteld aan 0

De verdunningsfactor (Df) is 5 voor testen 3 en 4. Er is dan volgens de onderzoekers sprake van een effectieve verdunning voor een zwakke chloorlekkage. De windrichting tijdens de testen was een beetje ongunstig, want de loodlijn van het waterscherm en de wind stonden niet in dezelfde richting. Hierdoor ging een deel van de gaswolk door de rechterrاند van het waterscherm. De onderzoekers geven aan dat vanwege deze omstandigheden de resultaten van de effectiviteit van het waterscherm met zorg moeten worden bekeken.

## Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

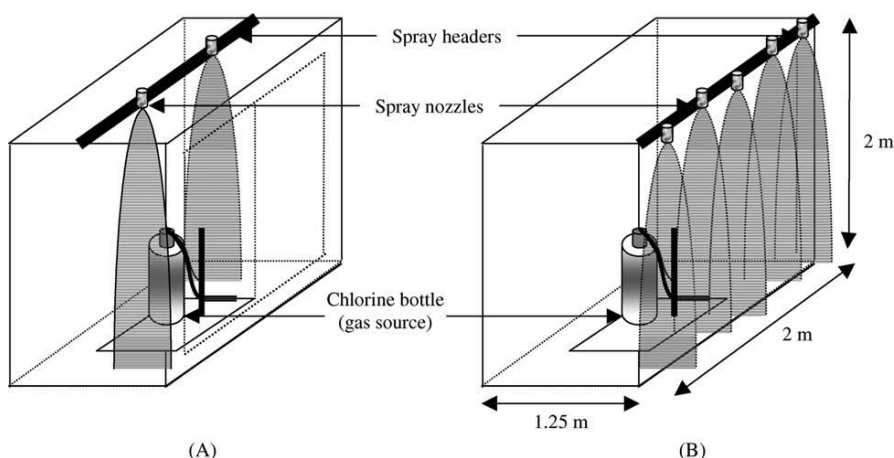
In dit artikel zijn de opzet en resultaten goed gedocumenteerd. De meetopstelling, meettechniek en de verzamelde data zijn duidelijk beschreven. Door de goede documentatie is het experiment navolgbaar, wat de betrouwbaarheid ten goede komt en ervoor zorgt dat de resultaten bruikbaar zijn.

Doordat na twee testen de meetopstelling is gewijzigd, zijn resultaten van testen 1 en 2 niet of slechts beperkt te vergelijken met die van testen 3 en 4. De onderzoekers hebben testen 1 en 2 dan ook buiten beschouwing gelaten bij het berekenen van de verdunningsfactor. Het is alleen niet duidelijk welke data van testen 3 en 4 zij hebben gebruikt om dit te doen. Dat de meetsensoren waarden onder 11 ppm niet konden waarnemen, is een beperking van de meetopstelling. Hierdoor konden er niet voor alle meetpunten nauwkeurige waarden worden geregistreerd. Ook de ongunstige windrichting tijdens enkele testen heeft invloed gehad op de metingen.

Als wordt gekeken naar de concentratie chloor in testen 3 en 4, is te zien dat in beide testen de 10-minuten alarmeringsgrenswaarde (AGW) van chloor van 4,7 ppm ruim wordt overschreden. Ook de 10-minuten levensbedreigende waarde (LBW) van 98 ppm wordt op twee meetpunten behaald (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), 2022).

## 3.2 Kleinschalig experiment chloor 2003a

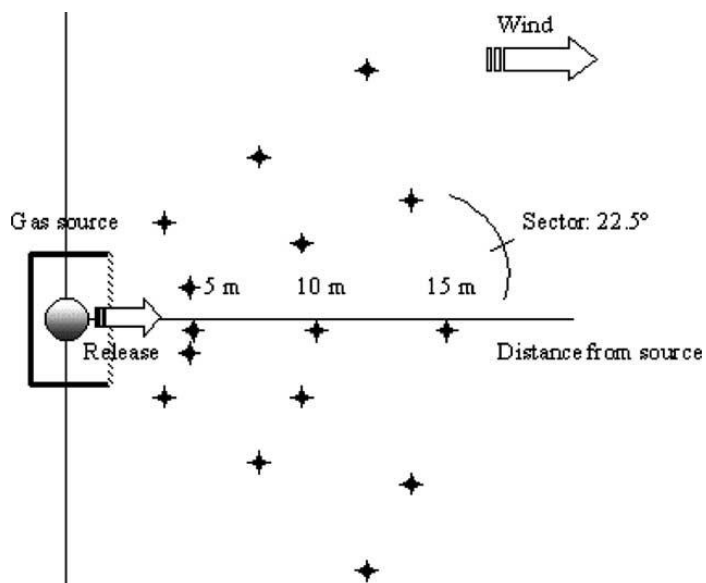
In 2003 is een artikel gepubliceerd over kleinschalige testen met chloor (Dimbour, Gilbert, Dandrieux, & Dusserre, 2003). Het doel was om te onderzoeken wat de effectiviteit is van verschillende naar beneden gerichte waterschermen (nozzles) bij vrijgekomen chloorgas in gedeeltelijk afgesloten ruimten. Als gedeeltelijk afgesloten ruimte kozen de onderzoekers voor een kleine opslagloods van 2 bij 1,25 meter, waarvan een zijde volledig open of gesloten kon worden door middel van een deur. Hierdoor waren twee configuraties mogelijk. Deze configuraties zijn in figuur 3.2 weergegeven.



**Figuur 3.2 Configuraties opslagloods met nozzles. (A) Gesloten configuratie met de nozzles aan de binnenkant, (B) halfgesloten configuratie met de nozzles aan de rand**

Gassensoren waren benedenwinds geplaatst op 10 cm boven de grond op 5, 10 en 15 meter afstand tot de bron. Door de cirkelvormige meetopstelling konden onderzoekers de opslagloods draaien, zodat de opening altijd benedenwinds was gesitueerd. De meetopstelling is weergegeven in figuur 3.3.





**Figuur 3.3** Plattegrond van de testlocatie inclusief meetpunten, locatie waterscherm en locatie bron

In tabel 3.3 op de volgende pagina zijn de kenmerken van de testen met chloor opgenomen.

**Tabel 3.3 Kenmerken van de testen met chloor 2003**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Chloor
	Wateroplosbaarheid	0,7 gram/100 ml
	Hoeveelheid	Gemiddeld 1 kg/min, tijdsduur 4 minuten
	Concentratie damp	Gesloten configuratie: 26.050 ppm Deels gesloten configuratie: 9.800 ppm
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Naar beneden gerichte nozzles, niet mobiel Type nozzles: flat fan, hollow cone, full cone en fog Afmeting: 2 meter lange pijpleiding op 2 meter hoogte
	Druk en flowrate	Druk: $5 \times 10^5$ Pa (gelijk aan 5 bar) Flowrate: variërend van 0,7 tot $4,7 \times 10^{-4}$ m <sup>3</sup> /s (4,2 tot 28,2 l/min)
	Plaatsing en afstand tot bron	Gesloten configuratie: vrijwel direct boven de bron (2 nozzles) Deels gesloten configuratie: ongeveer 60 cm van de bron, benedenwinds (meerdere nozzles)
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Variërend van 0,2 tot 3,8 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Variërend van 47 % tot 90 %

## Resultaten

Om de effectiviteit te onderzoeken hebben de onderzoekers de verdunningsfactor berekend. Dit hebben ze gedaan door de gemeten concentratie chloor van de vrije dispersietest (geen waterscherm) te delen door de gemeten concentratie chloor van een test met waterscherm. De data van de testen met de concentraties chloor en de verdunningsfactor zijn weergegeven in tabel 3.4.

**Tabel 3.4 Data van de testen met chloor**

Test-nummer	Test	Concentraties chloor (ppm, tijdgewogen gemiddelde) en verdunningsfactor (DR)					
		In de opslag-loods	DR	5 m	10 m	15 m	Gem. DR
<b>Gesloten configuratie</b>							
3.4	Geen waterscherm	26.050	-	-	-	-	-
3.5	Fog nozzles	15.385	1,7	-	-	-	-

Test-nummer	Test	Concentraties chloor (ppm, tijdgewogen gemiddelde) en verdunningsfactor (DR)					
		In de opslag-loods	DR	5 m	10 m	15 m	Gem. DR
3.6	Flat fan nozzles	12.625	2,1	-	-	-	-
<b>Deels gesloten configuratie</b>							
2.1	Geen waterscherm	-	-	225	25	5	-
2.2	Hollow cone nozzles	-	-	290	20	20	0,7
2.3	Full cone nozzles	-	-	190	10	5	1,5
3.1	Geen waterscherm	-	-	1.860	280	100	-
3.2	Flat fan nozzles	-	-	790	155	35	2,3
3.3	Fog nozzles	-	-	1.505	355	230	0,9
4.1	Geen waterscherm	-	-	9.800	8.120	2.750	-
4.2	Flat fan nozzles	-	-	2.155	1.700	930	4,1

### Deels gesloten configuratie

De resultaten van de testen in de deels gesloten configuratie laten lage verdunningsfactoren zien voor de hollow cone nozzles en de fog nozzles. Dit zou volgens de onderzoekers het gevolg kunnen zijn van de variabiliteit in de atmosferische omstandigheden, vooral in windsnelheid en -richting. Een zeer lichte concentratievermindering leek te worden bereikt wanneer het waterscherm met de full cone nozzles werd gebruikt. De hoogste concentratiereductie werd waargenomen bij het waterscherm met de flat fan nozzles (testen 3.2 en 4.2) met gemiddelde DR-waarden van respectievelijk 2,3 en 4,1. Deze resultaten lijken erop te wijzen dat de flat fan nozzles beter presteerden dan de andere nozzles voor de deels gesloten configuratie.

Voor de drie testen met natuurlijke dispersie in de deels gesloten configuratie vertonen de gemeten concentraties verschillen. De meest waarschijnlijke verklaring volgens de onderzoekers is dat de verschillen in atmosferische omstandigheden tussen de testen verschillend gedrag van de gaswolken hebben veroorzaakt. Bij de testen met lage windsnelheden zoals test nummer 4.1 (0,2 m/s) vertoonde de gaswolk een typische brede laterale verspreiding. Bij test 2.1 met een hogere windsnelheid (2 m/s) was de wolkbreedte kleiner en spreidde de wolk zich uit over een grote afstand benedenwinds. Ook lijken de concentraties op grondniveau hoger te zijn bij de testen met lage windsnelheid en een hoge luchtvochtigheid.

### Gesloten configuratie

Tijdens de vrije dispersie test in de gesloten configuratie zagen de onderzoekers dat er zich twee lagen vormden. De eerste laag, die eruit zag als een zeer dichte gele wolk van bijna

zuiver gasvormig chloor, had na 2 minuten de helft van de opslagloods gevuld. De tweede laag, die voornamelijk uit lucht bestond, nam het bovenste gedeelte van de loods in beslag. Bij de testen met de waterschermen werd er geen stratificatie waargenomen, alleen een gelige gaswolk gemengd met lucht. Wat betreft de verdunningsfactor liggen de flat fan nozzles en de fog nozzles dicht bij elkaar.

### **Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV**

In het artikel zijn de testopzet en resultaten duidelijk beschreven. Dit maakt dat het experiment navolgbaar is, wat de betrouwbaarheid ten goede komt. Hierdoor zijn de resultaten bruikbaar. Het onderzoek biedt nuttige inzichten in het type nozzle dat het beste effect heeft bij een chloorlekkage in een deels gesloten configuratie. Het waterschermb met de flat fan nozzles presteerde beter dan de andere typen nozzles. Desalniettemin zijn de waterschermen maar beperkt effectief in het reduceren van de concentratie chloor in de lucht.

Het experiment geeft ook inzicht in het gedrag van de gaswolk bij lagere en hogere windsnelheden. Bij lagere windsnelheden vertoonde de gaswolk een typische brede laterale verspreiding, bij hogere windsnelheden was de gaswolk smaller en langgerekt. Ook lijken de concentraties op grondniveau hoger te zijn bij de testen met lage windsnelheid en een hoge luchtvochtigheid.

Het waterschermb dekte de volledige breedte van de opening van de opslagloods af, zodat de gaswolk niet aan de zijkant kon ontsnappen tijdens het experiment. Dit is een beperking. Het volledig omsluiten van een gaswolk met een waterschermb is enkel mogelijk bij een stationaire installatie en niet bij een brandweerinzet tijdens een incident. Het waterschermb lijkt verder vooral effectief in het beperkt doorlaten van het chloor en minder in het daadwerkelijk mitigeren van de dampwolk.

### **3.3 Kleinschalig experiment chloor 2003b**

Aanvullend op het kleinschalig experiment met chloor uit 2003, hebben de onderzoekers nog een artikel uitgebracht over een ander kleinschalig experiment met chloor (Dimbour, Dandrieux, Gilbert, & Dusserre, 2003). Ditmaal hebben ze getest in een deels gesloten opslagloods met een grotere hoeveelheid gas. Ook hebben ze naast neerwaarts gerichte nozzles een waaiervormig waterschermb getest. Gassensoren waren benedenwinds geplaatst op 10 cm boven de grond op 5, 10, 15 en 20 meter afstand tot de bron. De kenmerken van de testen zijn te vinden in tabel 3.5.

**Tabel 3.5 Kenmerken van de testen met chloor in deels gesloten configuratie**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Chloor
	Wateroplosbaarheid	0,7 gram/100 ml
	Hoeveelheid	2 kg/min en 4 kg/min, tijdsduur 4 minuten
	Concentratie damp	14.385 ppm
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Naar beneden gerichte nozzles, niet mobiel Type nozzles: flat fan en full cone Afmeting: 2 meter lange pijpleiding op 2 meter hoogte Waaivorm, omhoog gericht, mobiel, afmeting onbekend
	Druk en flowrate	Druk nozzles: 5 bar Flat fan nozzles: $0,7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (4,2 l/min) Full cone nozzles: $3,3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (19,8 l/min) Druk en flowrate waaivorm: 8 bar, 750 l/min.
	Plaatsing en afstand tot bron	Nozzles: ongeveer 60 cm van de bron, benedenwinds Waaivorm: afstand onbekend, benedenwinds
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Variërend van 0,5 tot 4,8 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Variërend van 28 % tot 67 %

## Resultaten

Net als in het andere onderzoek hebben de onderzoekers de verdunningsfactor berekend om te kijken hoe effectief een waterscherm is. De testen met de bijbehorende verdunningsfactoren per gemeten afstand zijn weergegeven in tabel 3.6.

**Tabel 3.6 Verdunningsfactoren van de testen met waterscherm**

Test-nummer	Type waterscherm	Verdunningsfactor				
		5 m	10 m	15 m	20 m	Gemiddeld
<b>Hoeveelheid chloor 2 kg/min</b>						
7B	Flat fan nozzles	2,2	2,6	1,7	1,5	2,0
7D	Flat fan nozzles	1,7	2,9	2,0	1,5	2,0
7E	Full cone nozzles	1,6	2,7	1,9	0,8	1,8
7F	Waaivorm	10	5,7	3,8	2,1	5,4
<b>Hoeveelheid chloor 4 kg/min</b>						
8B	Flat fan nozzles	1,2	1,8	1,6	1,3	1,5

Test-nummer	Type waterschermb	Verdunningsfactor				
		5 m	10 m	15 m	20 m	Gemiddeld
8C	Flat fan nozzles	1,1	3,5	2,2	1,6	2,1
9C	Full cone nozzles	2,0	3,6	2,3	2,2	2,5
9D	Flat fan nozzles	4,1	4,7	3,0	3,0	3,7
9E	Waaivorm	7,1	5,1	4,6	4,4	5,3
9F	Flat fan nozzles	2,4	2,9	2,5	2,3	2,5
9G	Flat fan nozzles	2,1	3,5	2,8	2,2	2,6

#### *Neerwaarts gerichte nozzles*

Voor alle testen met een hoeveelheid chloor van 2 kg/min werd een optimaal effect op 10 meter benedenwinds van de bron waargenomen, met een concentratiereductie van een factor 3 voor vergelijkbare flowrates, windsnelheden en water-gasverhoudingen. De mitigatieprestaties van het waterschermb zijn volgens de onderzoekers deels afhankelijk van de water-gasverhouding (Rw/g). Het mitigatie-effect van de flat fan nozzles lijkt te stagneren vanaf een afstand van meer dan 15 meter. Het mitigatie-effect van de full cone nozzles is op 20 meter van de bron nihil, aangezien de gemeten concentraties min of meer vergelijkbaar zijn met de concentraties die worden waargenomen zonder waterschermb. Bij de testen met een hoeveelheid chloor van 4 kg/min werden de chloorconcentraties ook verminderd met een factor 2 tot 5, met een optimale effectiviteit op 10 m benedenwinds van de bron.

#### *Waaivormig waterschermb*

Bij een waaivormig waterschermb kan bij lage windsnelheden en een hoge flowrate een recirculatiezone ontstaan direct achter het waterschermb, wat de effectiviteit van de mitigatie bepaalt. Op 10 meter van de bron bij 2 kg/min chloor verminderde het waterschermb de concentraties twee keer zo veel (met een factor 6) dan de neerwaartse flat fan en full cone nozzles (testserie nummer 7). Er moet echter benadrukt worden dat dit betere mitigatie-effect het gevolg is van een groter waterverbruik (Rw/g = 395) in vergelijking met de neerwaartse waterschermben (Rw/g = 20). Bij een hoeveelheid chloor van 4 kg/min werden de beste resultaten behaald met het waaivormig waterschermb op 5 meter afstand met een concentratiereductie van een factor 7. Het effect van het waaivormig waterschermb lijkt te stagneren vanaf een afstand van meer dan 15 meter.

### **Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV**

De opzet van de testen zijn in dit artikel goed beschreven, alleen ontbreken details over het waaivormig waterschermb zoals afmeting en afstand tot de bron. De data worden beknopt gepresenteerd. Er zijn geen data opgenomen over de gemeten concentraties chloor, alleen de verdunningsfactor is voor alle testen weergegeven. Hierdoor is het experiment niet volledig navolgbaar, wat invloed heeft op de betrouwbaarheid van het onderzoek. Er kan daardoor niet beoordeeld worden of het waterschermb de dampwolk daadwerkelijk mitigeert of voornamelijk tegenhoudt.

Het experiment laat zien dat de verhouding tussen water en gas een rol speelt bij de effectiviteit van een waterschermb: hoe hoger de water-gasratio, hoe effectiever het waterschermb lijkt te zijn. Het onderzoek maakt ook duidelijk dat een omhoog gericht

waaivormig waterscherm in deze situatie effectiever is dan een neerwaarts gericht waterscherm met full cone of flat fan nozzles.

Net zoals bij de eerdere testen (Dimbour, Gilbert, Dandrieux, & Dusserre, 2003) kon de gaswolk bij de testen met neerwaarts gerichte nozzles niet aan de zijkant ontsnappen. Dit is een beperking van deze testen. Het volledig omsluiten van een gaswolk met een waterscherm is enkel mogelijk bij een stationaire installatie en niet bij een brandweerinzet tijdens een incident.

### 3.4 Kleinschalig experiment kooldioxide en chloor 2005

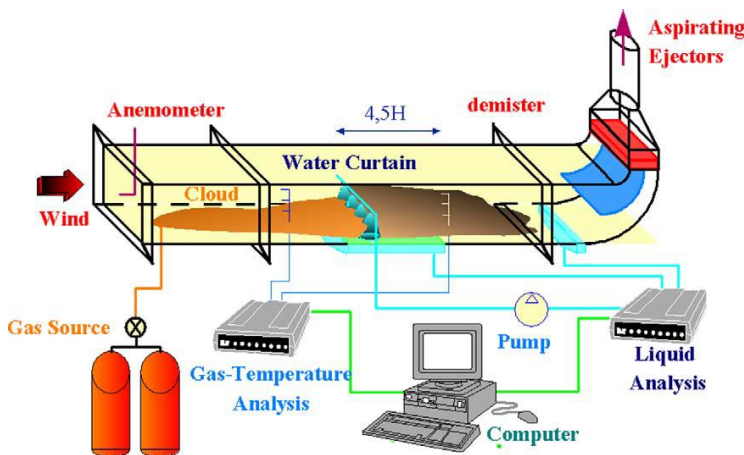
In 2005 is een artikel gepubliceerd over een kleinschalig experiment met chloor en kooldioxide (Hald, Buchlin, Dandrieux, & Dusserre, 2005). Het onderzoek richtte zich alleen op het mechanische effect van het waterscherm. De kenmerken van de kleinschalige testen zijn opgenomen in tabel 3.7. Het onderzoek omvatte naast kleinschalige testen ook windtunneltesten en numerieke simulaties. Omdat de simulaties geen nieuwe resultaten hebben opgeleverd, worden ze hier buiten beschouwing gelaten.

**Tabel 3.7 Kenmerken van de kleinschalige testen met chloor en kooldioxide 2005**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Chloor en kooldioxide
	Wateroplosbaarheid	Kooldioxide: 1,45 gram/liter (bij 20 °C en 1 atm) Chloor: 0,7 gram/100 ml
	Hoeveelheid	Variërend van 1 tot 8 kg/min voor chloor en van 15 tot 25 kg/min voor kooldioxide. Tijdsduur 10 min.
	Concentratie damp	
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Een pijpleiding met full cone nozzles met een onderlinge afstand van 20 cm, initiële spuithoek van 90 graden, naar beneden gericht, niet mobiel
		Chloortesten: afmeting 5 m lang en 2 m hoog Kooldioxidetesten: afmeting 10 m lang en de hoogte instelbaar tussen 2 en 3 m.
	Druk en flowrate	Chloortesten: 200 kg/min per meter waterscherm Kooldioxidetesten: niet hoger dan 100 kg/min per meter waterscherm
	Plaatsing en afstand tot bron	Waterscherm benedenwinds van lekkage Afstand tot bron onbekend
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	Wel gemeten, maar niet beschreven
	Relatieve luchtvochtigheid	Wel gemeten, maar niet beschreven

Elke test bestond uit twee delen. Het eerste deel was een vrije verspreiding zonder waterscherm. Om zoveel mogelijk dezelfde wind- en meetcondities te garanderen, werd het eerste deel direct gevolgd door de geforceerde dispersie waarbij het waterscherm in actie kwam.

De windtunneltesten met kooldioxide zijn uitgevoerd in een tunnel van 1 meter hoog, 1,3 meter breed en 7 meter lang. De windsnelheid in de tunnel kon variëren van 0,25 tot 1 m/s, wat overeenkomt met snelheden variërend van 5 tot 18 km/u op volle schaal. Het waterscherm was uitgerust met hetzelfde type nozzles als in de kleinschalige testen, maar dan op schaal 1/4. Het waterscherm besloeg de hele breedte van de tunnel. De nozzles waren naar beneden gericht en bevonden zich op 0,3, 0,4 en 0,5 meter boven de grond. In figuur 3.4 is de opzet weergegeven.



**Figuur 3.4 Opzet van de windtunneltesten met kooldioxide 2005**

## Resultaten

De onderzoekers hebben de efficiëntie van het waterscherm onderzocht. De efficiëntie van het waterscherm wordt uitgedrukt in verdunningsfactor  $D_f$  (gedefinieerd als de verhouding van de grondconcentratie zonder en met waterscherm) met de volgende formule:

$$D_F = \frac{C_{\text{free\_dispersion}}}{C_{\text{forced\_dispersion}}}$$

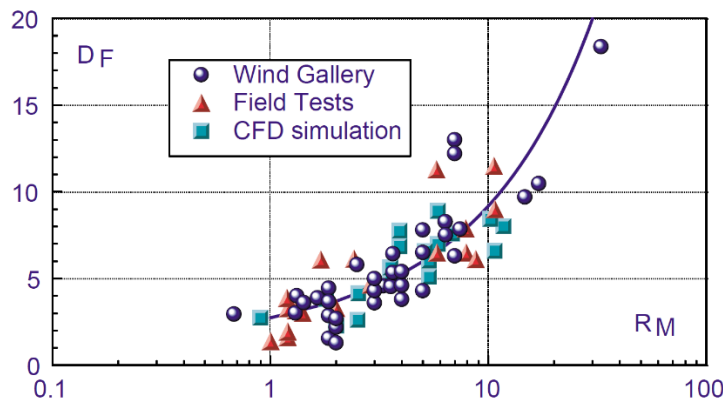
De verdunningsfactor wordt uitgezet tegen de momentumratio  $R_M$  (gedefinieerd als de verhouding van het momentum van het waterscherm tot een representatief momentum van de gaswolk) met de volgende formule:

$$R_M = \frac{\dot{m}_{l,u} U_{d0}}{\rho V^2 H_{wc}}$$

Daarbij is  $M_{l,u}$  het waterdebiet per eenheid lengte waterscherm (kg/s/m),  $U_{d0}$  de initiële druppelsnelheid bij de spuitopening van de nozzles van het waterscherm (m/s),  $\rho$  de dichtheid van de gaswolk (kg/m<sup>3</sup>),  $V$  de windsnelheid (m/s) en  $H_{wc}$  de hoogte van het waterscherm (m).

De metingen van de kleinschalige testen, de windtunneltesten en de simulatie zijn opgenomen in figuur 3.5.





**Figuur 3.5 Verdunningsfactor  $D_f$  als functie van  $R_m$  (verhouding tussen het momentum van het waterscherm en het momentum van de gaswolk)**

Bij een lage  $R_m$  gaat de gaswolk door het waterscherm zonder merkbare concentratieverandering. Naarmate  $R_m$  toeneemt, neemt de kracht van het waterscherm ten opzichte van de wind toe en vormt zich een windwaartse recirculatiezone stroomopwaarts van het waterscherm. Bij een matige  $R_m$ , meestal 2, gaat een grote hoeveelheid gas door het waterscherm. Bij hoge  $R_m$ -waarden, meestal 10, heeft het waterscherm een sterk effect en begint het zich te gedragen als een actief obstakel voor de gaswolk. Door het meezuigen van lucht in de nevel zal de gaswolk op grondniveau een bovenwindse luchtstroom tegenkomen en wordt de bovenwindse recirculatiebel groter.

Het effect van de hoogteverhouding tussen waterscherm en gaswolk ( $H_{wo}/H_c$ ) op de dispersiefactor is ook onderzocht tijdens de windtunneltesten. De beschouwde hoogte van de gaswolk is de dikte van de wolk bij het waterscherm tijdens het experiment met vrije dispersie. Het effect van de hoogteverhouding op de dispersiefactor wordt signifikanter naarmate  $R_m$  toeneemt. Als praktische regel wordt door de onderzoekers een waterscherm aanbevolen dat meer dan twee keer zo hoog is als de gaswolk.

De momentumratio  $R_m$  heeft een belangrijk regulerend effect op de verdunningsfactor  $D_f$ . Uiteindelijk leidden de diverse testen tot de conclusie dat bij lage windsnelheden waarbij waterschermen gemakkelijk kunnen functioneren bij een  $R_m$  gelijk aan of hoger dan 10, een verdunningsfactor van 10 of meer kan worden bereikt. Bij harde wind kan de  $R_m$  dalen tot 1; dan zal de verdunningsfactor niet snel een factor 2 overschrijden. Als algemene vuistregel kan volgens de onderzoekers worden gesteld dat als de waterscherm-gaswolkhoogteverhouding voldoende groot is, een  $R_m$ -waarde van 10 zou moeten leiden tot een  $D_f$ -waarde van 10.

### **Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV**

De opzet van de testen en de resultaten zijn erg beknopt beschreven, en er ontbreken enkele belangrijke gegevens over de testopstelling en het aantal testen. Desalniettemin biedt het artikel nuttige inzichten in de factoren die invloed hebben op de werking van het waterscherm. De momentumratio  $R_m$  wordt bepaald door het waterdebiet, de druppelsnelheid, dichtheid van de gaswolk, de windsnelheid en de hoogte van het waterscherm, en heeft grote invloed op de verdunningsfactor. Bij een harde wind zal de  $R_m$  laag zijn, wat leidt tot een lage verdunningsfactor waardoor het waterscherm minder effectief is.

De onderzoekers geven aan dat het waterscherm twee keer zo hoog zou moeten zijn als de gaswolk om een hoge  $R_m$ -waarde te halen. In de brandweerpraktijk zou dit kunnen betekenen dat het waterscherm dicht bij de bron geplaatst zou moeten worden.

Hoewel het artikel interessante inzichten biedt, moet door het ontbreken van enkele belangrijke gegevens over de opzet toch wat terughoudend worden omgegaan met de resultaten.

### 3.5 Kleinschalig experiment kooldioxide 2012

Onderzoekers in China hebben een kleinschalig experiment uitgevoerd met kooldioxide (Guo, et al., 2012). Daarbij zijn twee typen waterschermen getest, namelijk een waaier-vormig waterscherm en een waterscherm met cone nozzles. Beide waterschermen hebben verschillende verdunningsmechanismen. Het doel van het onderzoek was om deze mechanismen inzichtelijk te maken.

Op zes locaties zijn kooldioxidemetingen verricht. Een minimum van negen testen is uitgevoerd: een nulmeting, vier testen met het waaier-vormig waterscherm en vier testen met het waterscherm met de cone nozzles. Er is gewerkt met meerdere testopzetten, namelijk het waterscherm tegelijk aanzetten met de verspreiding van het gas (zowel met één waterscherm als met twee waterschermen tegelijk) en het waterscherm aanzetten 180 seconden na de start van de verspreiding van het gas (zowel met één waterscherm als met twee waterschermen tegelijk). De kenmerken van de testen zijn opgenomen in tabel 3.8.

**Tabel 3.8 Kenmerken van de testen met CO<sub>2</sub> in 2012**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	CO <sub>2</sub> (kooldioxide)
	Wateroplosbaarheid	1,45 gram/liter (bij 20°C en 1 atm)
	Hoeveelheid	Release rate 6 m <sup>3</sup> /u (gasvormig), gedurende 10 minuten
	Concentratie damp	Niet duidelijk
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Waaievorm, omhoog gericht, 160° hoek Cone nozzles, omhoog gericht, 60° hoek Afmetingen onbekend
	Druk en flowrate	0,2 MPa (2 bar) en flow coëfficiënt van 35
	Plaatsing en afstand tot bron	Afstand tot bron 2 meter Waterscherm benedenwinds van lekkage
<b>Meteorologische omstandigheden</b>	Windsnelheid	0 – 0,5 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Onbekend

### Resultaten

De druppels van het waaier-vormig waterscherm waren groot en hadden een sterke continuïteit; de dekking was 160 graden, zodat een beschermend scherm kon worden gevormd om de verspreiding van zwaar gas te belemmeren. De druppels van het waaier-vormig waterscherm dreven het gas omhoog door hun mechanisch effect. Tegelijkertijd leidden grote druppels tot lucht-turbulentie waardoor het gas verspreid en zo

verdund werd. Het cone nozzle waterscherm had kleinere druppels en vernevelde water op grotere schaal, wat leidde tot grote luchtinmenging, waardoor de gaswolken werden verdund. De gemiddelde kooldioxideconcentraties (waarvan de eenheid niet genoemd wordt in artikel) tijdens de verschillende testen zijn opgenomen in tabel 3.9.

**Tabel 3.9 Gemiddelde waarde van de kooldioxide concentratie ( $10^{-6}$ ) tijdens verschillende testen**

Soort test	Type waterscherm	Meetpunten (afstand bron en meetlocatie in m; meethoogte in m)					
		1	2	3	4	5	6
		(6 m; 0,3 m)	(6 m; 0,6 m)	(6 m; 0,8 m)	(8 m; 0,3 m)	(8 m; 0,6 m)	(8 m; 0,8 m)
Nulmeting	Geen waterscherm	3500.315	2697.185	2016.877	2629.068	1771.56	1008.435
Waterscherm aangezet op t = 0 sec.	Waaivormig waterscherm	102.562	128.563	109.688	49.062	61.000	67.437
	Cone nozzle waterscherm	378.437	371.562	365.313	274.062	243.438	254.063
Waterscherm aangezet op t = 180 sec.	Waaivormig waterscherm	222.125	271.813	390.248	430.876	443.068	448.188
	Cone nozzle waterscherm	216.25	231.875	199.688	206.876	206.562	208.437
Twee waterschermen aangezet op t = 0 sec.	Waaivorm voor cone nozzle	46.249	66.813	78.125	28.126	46.251	52.500
	Cone nozzle voor waaivorm	7.188	13.000	12.938	0	0	0
Twee waterschermen aangezet op t = 180 sec.	Waaivorm voor cone nozzle	144.25	134.875	115.625	255.938	231.625	219.25
	Cone nozzle voor waaivorm	650.50	550.69	503.75	881.94	785.31	735.69

Als het waterscherm werd aangezet tegelijk met de verspreiding van het gas, was het verdunningseffect van het waaivormig waterscherm beter. Als het waterscherm werd aangezet wanneer het gas 180 seconden had gelekt, was het verdunningseffect van het cone nozzle waterscherm beter. Bij de testen waarbij twee waterschermen achter elkaar werden gebruikt, is het verdunningseffect beter als het cone nozzle waterscherm voor het waaivormig waterscherm werd geplaatst, wanneer de waterschermen en de verspreiding van het gas tegelijk zijn gestart. Bij het aanzetten van de waterschermen 180 seconden na de start van de verspreiding van het gas, is het verdunningseffect beter wanneer het waaivormig waterscherm voor het cone nozzle waterscherm wordt geplaatst.

## Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

Er ontbreken enkele details van de testopstelling, zoals de afmeting van het waterscherm. Hierdoor is niet bekend of ook naast en boven het waterscherm gemeten is. In hoeverre de damp is weggeduwd door het waterscherm is niet bekend. Zoals reeds vermeld, ontbreekt de eenheid waarin de concentratie van de CO<sub>2</sub> is gemeten. Verder zijn de opzet van de testen en de resultaten relatief goed beschreven.

Het onderzoek biedt interessante inzichten in de werking van beide waterschermen. Het waaivormig waterscherm houdt het gas in bepaalde mate tegen en de druppels drijven het gas omhoog door hun mechanisch effect. De druppels van het cone nozzle waterscherm waren kleiner en vernevelden het water meer. Dit leidde ertoe dat gas en lucht intensief konden worden gemengd, waardoor de gaswolken werden verdund.

De testen waarbij het waterscherm tegelijk met de gasverspreiding werd gestart, leidden tot betere resultaten dan wanneer het waterscherm op  $t = 180$  seconden werd gestart. In de praktijk is het echter niet mogelijk om het waterscherm tegelijk met de gasverspreiding te starten, dus deze resultaten zijn minder bruikbaar voor de brandweer. Maar voor stationaire waterschermen die aangaan zodra een gaslekkage ontstaat, zijn dit wel bruikbare resultaten. Wanneer het waterscherm op  $t = 180$  seconden werd gestart, gaf het cone nozzle waterscherm betere resultaten. Maar ten opzichte van de nulmeting brengen beide schermen de concentratie kooldioxide aanzienlijk naar beneden.

Dit is het enige experiment waarbij twee waterschermen achter elkaar zijn opgesteld en gelijktijdig zijn gebruikt, wat interessante resultaten oplevert. Kijkend naar de testen waarbij het waterscherm op  $t = 180$  seconden is aangezet, is te zien dat wanneer het waaivormig waterscherm voor het cone nozzle scherm wordt geplaatst, de resultaten beter zijn bij meetpunten 1, 2 en 3 dan bij een enkel cone nozzle waterscherm. Bij meetpunten 4, 5 en 6 liggen de gemeten waarden juist weer iets hoger dan die van een enkel cone nozzle waterscherm. Het dubbele waterscherm lijkt aldus alleen dicht erachter een beter effect te hebben dan een enkel cone nozzle waterscherm. Hoewel niet gemeten is wat de gasconcentratie is op meer dan 8 meter van de bron, lijkt op basis van dit experiment het inzetten van twee soorten waterschermen in de praktijk weinig meerwaarde te hebben.

# 4 Experimenten op labschaal

In dit hoofdstuk worden de experimenten op labschaal besproken. Er zijn vijf relevante onderzoeken gevonden.

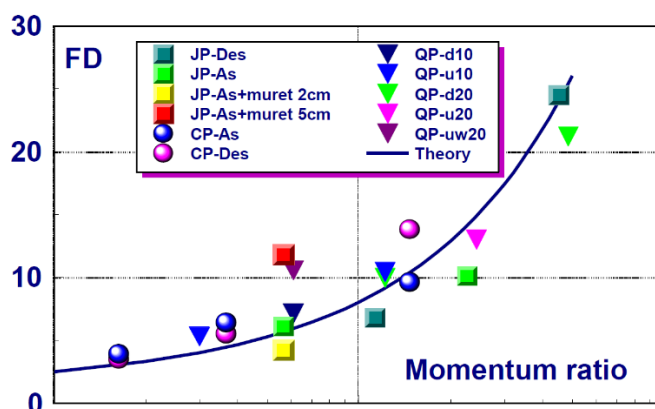
## 4.1 Experiment in een windtunnel 2001

In 2001 is een artikel verschenen van een onderzoek in een windtunnel in Frankrijk met zwavelhexafluoride, kooldioxide en vloeibare stikstof (Uznanski & Nédelka, 2001). In de windtunnel van 1 meter hoog, 1,3 meter breed en 7 meter lang zijn verschillende configuraties van waterschermen onderzocht, waaronder:

- > omhoog en naar beneden gerichte waterschermen
- > verschillende soorten nozzles (full cone, flat fan en waaivormig)
- > verschillende hoeveelheden nozzles per lengte-eenheid van het waterscherm.

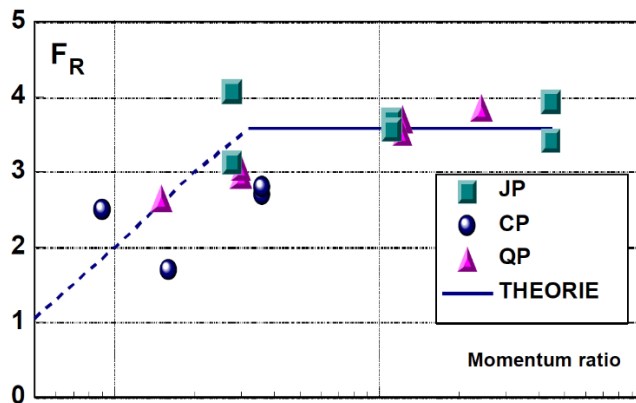
### Resultaten

Verdunningsfactoren FD (gedefinieerd als de verhouding van de gasconcentratie benedenwinds van het waterscherm zonder dat het waterscherm in werking is, tot die met het geactiveerde waterscherm) worden uitgezet als functie van de momentumverhouding van het waterscherm ten opzichte van de wind in figuur 4.1. Er is waargenomen dat de gaswolk wordt verdund met een factor van meer dan 20 bij een zwakke wind en met een factor van ongeveer 4 bij de sterkste wind.



Figuur 4.1 Verdunningsfactoren van verschillende waterschermen

Opwarmingsfactoren FR (gedefinieerd als de verhouding van het temperatuurverschil tussen de gaswolk en de omgevingslucht zonder en met het waterscherm in werking) verkregen voor naar beneden gerichte nozzles zijn uitgezet tegen de verhouding van het momentum van het waterscherm ten opzichte van de wind in figuur 4.2.



**Figuur 4.2 Opwarmingsfactoren voor verschillende neerwaarts gerichte waterschermen**

Het temperatuurverschil tussen de gaswolk en de omgevingslucht wordt verminderd met een factor 3 tot 4 bij de laagste wind en met ongeveer 2 bij de sterkste wind. Er kan ook worden waargenomen dat de opwarmingsfactoren een maximumwaarde bereiken, die gelijk is aan de verhouding tussen de hoogte van het scherm en de hoogte van de wolk (voor een naar beneden gericht waterscherm).

Om gevaarlijke gaswolken tegen te gaan, kunnen waterschermen de wolk aanzienlijk verdunnen als de verhouding tussen waterscherm en windmoment hoog genoeg is. Over het algemeen werd waargenomen dat het neerwaarts gerichte waterscherm efficiënter is bij lage windsnelheden, terwijl het opwaartse waterscherm beter bestand is tegen sterke wind. Daarnaast zal het waterscherm de wolk ook opwarmen, wat de latere menging met de omgevingslucht kan versterken.

### Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

De opzet van de testen is summier beschreven; er ontbreken belangrijke gegevens over de testopstelling, de kenmerken van de testen en het aantal testen. Ook de beschrijving van de resultaten is erg beperkt: er wordt slechts één grafiek met verdunningsfactoren gepresenteerd, en uit die grafiek is niet te herleiden welk waterscherm bij welke resultaten hoort. Er kan dus alleen een algemeen oordeel worden gegeven. Dit maakt dat het lastig is om de resultaten te beoordelen. Door de slechte documentatie is het experiment beperkt navolgbaar, wat de betrouwbaarheid niet ten goede komt en ervoor zorgt dat de resultaten niet of slechts in beperkte mate bruikbaar zijn.

## 4.2 Experimenten in een windtunnel en simulaties 2004

Het rapport over deze experimenten heeft in hoofdlijn drie onderwerpen (Houben, 2004):

1. Een theoretische beschouwing van de werking van waterschermen in het beperken van de verspreiding van een dampwolk.
2. Experimenten in een windtunnel.
3. Simulaties met als doel het nabootsen van de geëxperimenteerde situatie.

Omdat de simulaties op zichzelf geen nieuwe resultaten geven, worden ze hier buiten beschouwing gelaten. Het doel van de experimenten was om te kijken naar het effect van het aanzuigen van lucht door een spray van water en in hoeverre dat kan zorgen voor het

dispergeren van een dampwolk. Om die reden is er gebruikgemaakt van een gas dat slecht oplost in water. De kenmerken van de windtunneltesten zijn opgenomen in tabel 4.1.

**Tabel 4.1 Kenmerken van de testen in de windtunnel**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Kooldioxide
	Wateroplosbaarheid	1,45 g/l
	Hoeveelheid	Van 0,001 tot 0,008 kg/s
	Concentratie damp	Onbekend
<b>Testomgeving</b>	Windtunnel	Totale lengte is 11,5 meter. Het testdeel is 1,3 meter breed en 1 meter hoog. Het eerste deel van de vloer is van hout. Daarna is de vloer poreus.
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	7 vaste nozzles
	Druk en flowrate	0,5 – 5,3 * 10 <sup>5</sup> Pa, 0,063 – 0,143 kg/ms
	Plaatsing en afstand tot bron	Op een hoogte van 0,3, 0,4 of 0,5 meter boven de vloer. De 7 nozzles bestrijken de volledige breedte van de windtunnel. De afstand tussen de bron en de nozzles is niet genoemd.
<b>Omstandigheden</b>	Windsnelheid	0,6 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Onbekend

## Resultaten

Er zijn grofweg drie manieren waarop een waterscherm een gas kan beïnvloeden:

1. Verdunnen door inmengen van omgevingslucht. Vallende waterdruppels kunnen verder gas mee 'naar beneden trekken'. Ook kan de impuls van een waterscherm een dampwolk 'wegduwen'.
2. Afkoelen van het gas door warmte-uitwisseling, waardoor de dichtheid van het gas verandert en het gas mogelijk kan dalen.
3. Oplossen van het gas (fysisch of chemisch).

De eigenschappen van de dampwolk, zoals bijvoorbeeld de snelheid van verplaatsing, zijn belangrijk voor de effectiviteit van het waterscherm. Nadeel van de opzet met een windtunnel zijn de wanden. Hierdoor kan de verspreiding van het gas beperkt worden, en kan de invloed van wind op verspreiding van de dampwolk veranderen. Omdat het waterscherm nu de volledige windtunnel afdekt, kan het gas niet aan de zijkanten langs het waterscherm ontsnappen.

Er zijn twee factoren die de effectiviteit van het waterscherm bepalen:

- > Momentumratio: de verhouding tussen de impulsstroom van het waterscherm en de wind.
- > Volume-flowratio: de verhouding van de ingemengde lucht en het debiet van de bron.

Met name bij een lagere momentumratio is de effectiviteit van het waterscherm veelal lager. Bij een hogere momentumratio is er meer inmenging van lucht en daardoor ook een hogere effectiviteit van het waterscherm. Voor de volume-flowratio geldt dat het waterscherm minder effectief wordt wanneer er minder kooldioxide in de ingemengde lucht zit.

### **Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV**

Het rapport bevat naast een beschrijving van de experimenten en simulaties ook een goede fundamentele beschrijving van de theorie van de fysische en chemische fenomenen die een rol spelen bij het dispergeren van een dampwolk met een waterscherm. Alhoewel het testen zijn op relatief kleine schaal geven ze wel inzicht in de complexiteit van het beperken van de verspreiding van een dampwolk met een waterscherm. Het waterscherm is in de testen in staat om in sterke mate de verspreiding van de damp te beperken, maar wanneer de omstandigheden niet optimaal zijn, kan de effectiviteit van het waterscherm ook flink afnemen. Dit roept de vraag op of een waterscherm tijdens een incident dermate goed geconfigureerd kan worden dat er een hoge effectiviteit behaald wordt. De condities zoals bijvoorbeeld de wind zijn tijdens een incident immers niet stabiel, en de opstelling en werking van een waterscherm is maar tot op zekere hoogte te beïnvloeden.

In deze testen is het waterscherm van boven naar beneden gericht. Dat heeft als voordeel dat de impuls van het water ook naar beneden is gericht. Hierdoor is de luchtverplaatsing ook grotendeels naar omlaag, in tegenstelling tot een mobiel waterscherm waarbij de impuls van het water omhoog en naar de zijkanten is gericht. Hierbij bestaat de kans dat de damp door deze impuls ook naar boven en de zijkant verplaatst wordt, en niet door het waterscherm heen gaat.

In deze testen kon de damp niet aan de zijkant ontsnappen. Het waterscherm dekte de volledige breedte van de windtunnel af. Hierdoor kan niet vastgesteld worden of het naar beneden gericht zijn van de impuls van het water volledig voorkomt dat damp aan de zijkant langs het scherm gaat. Dit is dan ook een beperking van deze experimenten. Het volledig omsluiten van damp met een waterscherm is enkel mogelijk bij een stationaire installatie en niet bij een inzet tijdens een incident.

### **4.3 Experimenten in een windtunnel 2009**

Palazzi, Currò en Fabiano (2009) hebben experimenten uitgevoerd in een windtunnel. Op basis daarvan hebben zij formules opgesteld om de effectiviteit van een waterscherm te kunnen berekenen. Er is verder een manier uitgelegd om ook voor een dampwolk op werkelijke schaal betrouwbare resultaten te kunnen verkrijgen; er is een beperkte validatie gedaan met testen op grotere schaal. Naast het gebruik van water in een waterscherm, is er ook gewerkt met een oplossing van NaOH in water. Er zijn meerdere experimenten uitgevoerd in een windtunnel van 0,9 meter breed, 0,8 meter hoog en 5 meter lang. De windsnelheid varieerde van 0 tot 2 meter per seconde. De kenmerken van de testen zijn te vinden in tabel 4.2.



**Tabel 4.2 Kenmerken van de windtunneltesten**

Kenmerken testen		
<b>Bron</b>	Type stof	Chloor
	Wateroplosbaarheid	7 g/l
	Hoeveelheid	onbekend
	Concentratie damp	50 – 250 * 10 <sup>-6</sup> kg/m <sup>3</sup>
<b>Testomgeving</b>	Windtunnel	0,9 meter breed, 0,8 meter hoog en 5 meter lang
<b>Kenmerken waterscherm</b>	Type waterscherm	Nozzles. Getest met water en met drie verschillende concentraties NaOH
	Druk en flowrate	Druk onbekend. Debiet onbekend
	Plaatsing en afstand tot bron	Neerwaarts gerichte nozzles. Aantal en plaats ten opzichte van de bron onbekend. Hoogte scherm 0,55 of 0,67 meter.
<b>Omstandigheden</b>	Windsnelheid	0 – 2 m/s
	Relatieve luchtvochtigheid	Onbekend

## Resultaten

De resultaten zijn slechts voor een klein deel beschreven in het artikel. Voorbeelden van resultaten die beschreven staan zijn te vinden in figuur 4.3 tot en met figuur 4.5. De concentratiereductiefactor is de verhouding tussen de concentratie damp zonder en met het waterscherm.

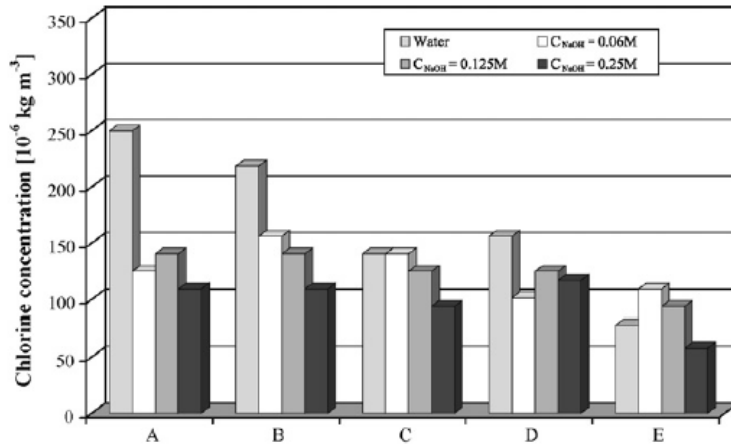


Fig. 3 – Measured chlorine concentration upwind the curtain during wind tunnel testing at different operative conditions (A: wind =  $0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.22 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ; B: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.18 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ; C: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.11 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ; D: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.11 \text{ l s}^{-1}$ ; E: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.22 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ).

Figuur 4.3 Chloorconcentraties bovenwinds van het waterscherm

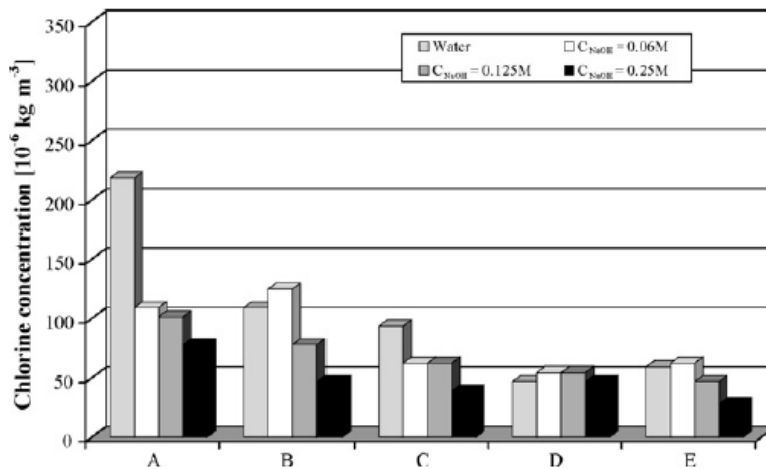


Fig. 4 – Measured chlorine concentration downwind the curtain during wind tunnel testing at different operative conditions (A: wind =  $0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.22 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ; B: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.18 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ; C: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.11 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ; D: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.11 \text{ l s}^{-1}$ ; E: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.22 \text{ l s}^{-1}$ ,  $h = 0.55 \text{ m}$ ).

Figuur 4.4 Chloorconcentraties benedenwinds van het waterscherm

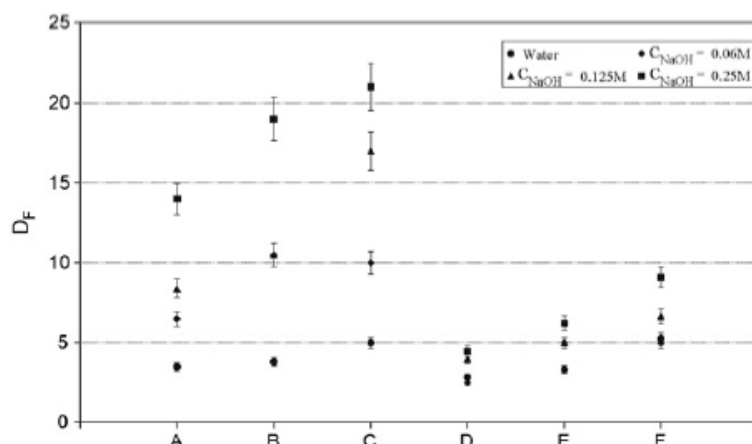


Fig. 6 – Experimental dilution factor ( $D_F$ ) obtained in wind tunnel testing, with chlorine flow rate  $m_r = 9 \text{ l h}^{-1}$  and  $h = 0.55 \text{ m}$ , under different operating conditions (A: wind =  $0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.11 \text{ l s}^{-1}$ ; B: wind =  $0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.18 \text{ l s}^{-1}$ ; C: wind =  $0 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.22 \text{ l s}^{-1}$ ; D: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.11 \text{ l s}^{-1}$ ; E: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.18 \text{ l s}^{-1}$ ; F: wind =  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ ,  $s = 0.22 \text{ l s}^{-1}$ ).

#### Figuur 4.5 Concentratie reductiefactor

### Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

Omdat slechts een deel van de resultaten van de experimenten in de windtunnel gepresenteerd wordt, is het lastig om een oordeel te geven over de effectiviteit van het waterscherm in de testen. Ook wordt het niet goed duidelijk welke factoren van invloed zijn op de effectiviteit. Er wordt beschreven dat er een groot verschil is tussen de mate van turbulentie direct bij de nozzles of op grotere afstand daarvan. Dit verschil leidt tot een verschil in de hoeveelheid lucht die ingemengd wordt, wat weer direct van invloed is op de mate van verdunning van een dampwolk. Dit maakt dat de afstand tussen de bron en de plek waar het water uit het watervoerende armatuur komt niet te groot mag zijn om optimaal gebruik te kunnen maken van het inmengen van lucht door de impuls van het water. Bij een grotere bron moet gekeken worden of er voldoende watervormende armaturen beschikbaar zijn om genoeg turbulente stroming ter plaatse van de bron te krijgen.

Over het geheel gezien geeft het artikel nuttige inzichten, maar lijken de gepresenteerde resultaten niet direct toepasbaar in de praktijk. De auteurs geven zelf ook aan dat het onderzoek nog gevalideerd moet worden met testen op werkelijke schaal.

## 4.4 Labschaal experiment ammoniak 2012

In 2012 (en nog eens in 2018) is een artikel verschenen van een Pools onderzoek naar de effectiviteit van waterschermen voor de beheersing van ammoniakdampwolken (Wesierski, Majder-Łopatka, Matuszkiewicz, & Porowski, 2012 en Wesierski & Majder-Łopatka, 2018). De onderzoekers hebben zich gefocust op de halveringstijd van de ammoniakconcentratie. Er zijn meerdere series metingen uitgevoerd in een testkamer met een neerwaarts gerichte fog nozzle:

1. bij verschillende beginconcentraties ammoniak in de kamer (4950 ppm, 2860 ppm, 550 ppm) en een constant waterdebiet (95 l/u) bij  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  en

2. bij een constante beginconcentratie ammoniak (150 ppm) en variabele waterstroomsnelheid (72 l/u, 62 l/u, 45 l/u) bij 15 °C.

## Resultaten

De gemeten waarden van de series testen zijn opgenomen in 4.3.

**Tabel 4.3 De gemeten waarden van de snelheid van het absorptieproces en de halveringstijd van de ammoniakconcentratie tijdens de testen**

$c_o$	$q$	$k_p$	$t_{1/2}$
Ppm	$\text{dm}^3 \text{ h}^{-1}$	$\text{s}^{-1}$	S
4950	95	0.0413	16.78
2860	95	0.0521	13.29
550	95	0.0549	12.62
147	72	0.0467	14.84
156	62	0.0383	18.11
144	45	0.0290	23.88

$c_o$  is concentratie ammoniak

$q$  is waterdebiet

$k_p$  is de snelheid van absorptieproces

$t_{1/2}$  is de halveringstijd van de ammoniakconcentratie

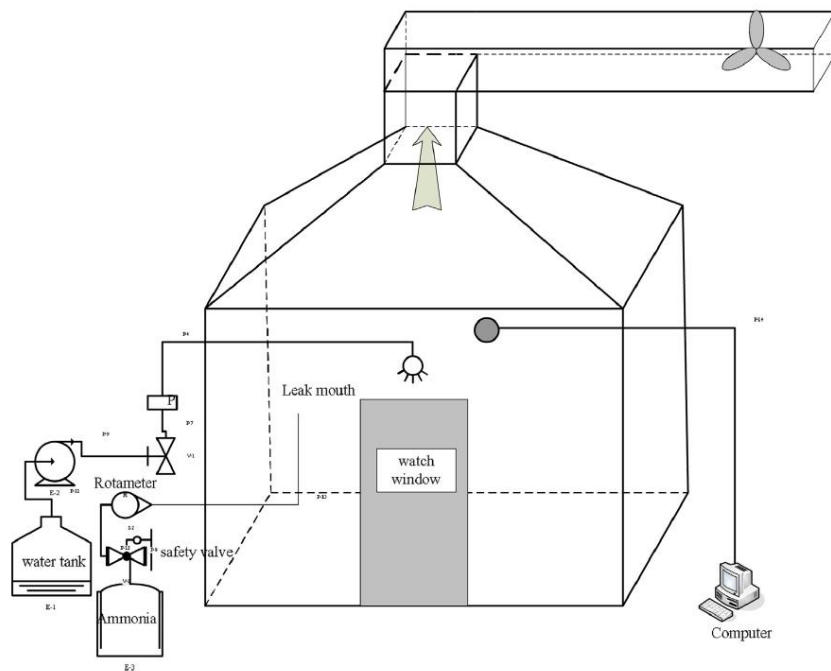
De resultaten van het onderzoek geven volgens de onderzoekers duidelijk aan dat waterschermen effectief kunnen zijn voor het verminderen van het risico van blootstelling aan gaswolken tijdens het ongecontroleerd vrijkomen daarvan. Bij de hoogste ammoniakconcentratie in de uitgevoerde testen (4950 ppm), vermindert de werking van het waterscherm de toxische belasting van ammoniak aanzienlijk (halveringstijd van 16,78 seconden). Een significante vermindering van de toxische belasting bij inzet van een waterscherm geeft aan dat het bijdraagt aan het verbeteren van de veiligheid, waarbij de effectiviteit van het waterscherm duidelijk toeneemt met een toenemende watercapaciteit en temperatuur.

## Beschouwing van opzet en resultaten door het NIPV

De opzet van de testen en de resultaten zijn redelijk goed gedocumenteerd in de artikelen. De onderzoekers hebben zich uitsluitend gericht op de halveringstijd van de ammoniakconcentratie en ook alleen daarover gerapporteerd. Er is niet gekeken naar andere variabelen die mogelijk invloed hebben op de werking van het waterscherm. Hoewel de artikelen nuttige inzichten bieden op kleine schaal, heeft het onderzoek ten opzichte van de eerder beschreven grootschalige of kleinschalige experimenten weinig meerwaarde.

## 4.5 Experimenten met toevoegingen aan het water 2017

In het artikel van Zhu, Wang, Li, Liu, Kong, Huang, Zhao en Yuan worden experimenten beschreven waarbij is gekeken wat het effect is van toevoegingen aan water op het mitigeren van een ammoniaklek (Zhu, et al., 2017). De testopstelling is weergegeven in figuur 4.6. Veel details van de testen, zoals bijvoorbeeld het debiet van het waterscherm of van het ammoniaklek zijn niet beschreven.



**Figuur 4.6 Testopstelling van de experimenten**

Als toevoeging aan het water zijn 3 organische zuren (citroenzuur, appelzuur en azijnzuur) en een surfactant beproefd. Uit het onderzoek blijkt dat toevoegingen de effectiviteit van het waterscherm kunnen verhogen. Zonder toevoeging was de effectiviteit van het waterscherm ruim 80 %. Met toevoeging ging dit omhoog naar 90 – 98 %.

# 5 Overig onderzoek

## 5.1 Simulatieonderzoek

Naast de experimentele onderzoeken is er ook simulatieonderzoek uitgevoerd. Zo hebben Cheng, Tan en Liu met CFD-softwarepakket Ansys-simulaties uitgevoerd van een waterscherm bij een dampwolk van ammoniak (Cheng, Tan, & Liu, 2014). Er is een validatie gedaan met testen op werkelijke schaal. De resultaten van de simulaties kwamen goed overeen met de resultaten van de testen. Uit het onderzoek blijkt dat de turbulentie van het waterscherm en daarmee de luchtinmenging van het scherm belangrijk zijn voor een goede effectiviteit van het scherm. Het oplossen van ammoniak in water draagt ook bij aan de effectiviteit. Het simuleren van het waterscherm met Ansys is enkel mogelijk door het toevoegen van empirische correlaties; de effectiviteit van het waterscherm kan dus niet zonder eigen toevoegingen betrouwbaar gesimuleerd worden.

## 5.2 Overig onderzoek

Naast experimenteel- en simulatieonderzoek is er nog onderzoek dat kennis van verschillende gebieden combineert. Zo wordt in een artikel uit 2017 gekeken naar de effectiviteit van waterschermen bij hogere gassnelheden (Mukherjee, S., & Jaskolka, 2017). In het artikel wordt geconcludeerd dat onderzoeken waarin waterschermen een hoge effectiviteit hebben, allemaal zijn uitgevoerd bij lage snelheden van het gas of de dampwolk. In het artikel wordt gerekend aan de snelheid waarmee ammoniak of waterstoffluoride kan vrijkomen wanneer het als vloeistof onder druk is opgeslagen. Deze snelheid is dermate hoog, dat een waterscherm dat enkel werkt bij lage gassnelheden op een flinke afstand (15 – 30 meter) van de bron geplaatst moet worden. Om een uitspraak te kunnen doen over de effectiviteit van een waterscherm bij hogere gassnelheden wordt gekeken naar onderzoek naar industriële gas scrubbers. Hierbij wordt het gas geforceerd door een kanaal heen geleid waarbij het langs meerdere rijen nozzles komt. In het artikel wordt geconcludeerd dat voor het mitigeren van gas met een hoge snelheid meerdere rijen nozzles nodig zijn. De afstand tussen de nozzles is hierbij belangrijk. Als de nozzles te ver uit elkaar staan, is er een open ruimte waardoor het gas kan ontsnappen. Staan de nozzles te dicht op elkaar, dan kunnen druppels tegen elkaar aan komen en samensmelten tot grotere, minder effectieve druppels.

# 6 Conclusie

De onderzoeksvraag die centraal heeft gestaan in dit rapport is de volgende:

*Wat is in (internationale) literatuur te vinden over de effectiviteit van waterschermen en waterstralen in het beperken van de verspreiding van toxische of brandbare gas- en dampwolken bij een incident?*

Het blijkt dat er grofweg drie manieren zijn waarop een waterscherm een gaswolk kan beïnvloeden:

1. Mechanisch: stroming of luchtverplaatsing door het water. Dit kan onder meer als gevolg hebben dat:
  - a. de dampwolk wordt verdund door het inmengen van omgevingslucht.
  - b. vallende waterdruppels de dampwolk mee 'naar beneden trekken'.
  - c. de impuls van een waterscherm een dampwolk 'wegduwt'.
2. Thermisch: afkoelen van het gas door warmte-uitwisseling, waardoor de dichtheid van het gas verandert en mogelijk kan dalen. Wanneer de damp kouder is dan water, kan deze opgewarmd worden door het water en vindt het omgekeerde effect plaats.
3. Fysisch of chemisch: oplossen van het gas in water.

Welke manier in welke mate bijdraagt, is veelal niet te bepalen aan de hand van de rapporten van de verschillende experimenten. Dit maakt dat de vertaling van de resultaten uit één experiment naar andere situaties vaak lastig is. Daarnaast kan het volgende vastgesteld worden:

- > Bij de meeste grootschalige experimenten is gewerkt met een puntbron of bron van beperkte omvang en een waterscherm benedenwinds nabij de bron. Hierdoor kunnen er geen uitspraken gedaan worden over andersoortige bronnen met een grotere omvang.
- > Bij het beoordelen van de haalbaarheid van het plaatsen van een scherm moet de praktische uitvoerbaarheid meegenomen worden.
- > Bij alle onderzoeken wordt gesproken over de effectiviteit van het waterscherm. Wat effectiviteit inhoudt, kan echter verschillen per test en hangt vaak samen met het doel van de test. Bij het interpreteren van de resultaten moet daarom goed gekeken worden wat bedoeld wordt met effectiviteit. Een waterscherm kan heel effectief zijn in het reduceren van de concentratie damp direct erachter, maar dat wil niet zeggen dat de damp ook oplost in het water of dat de dampwolk volledig wordt gemitigeerd.
- > Op korte afstand (enkele meters) achter een waterscherm zijn er reducties in de concentratie ammoniakdamp gezien tot wel 90 %. Op grotere afstand van het waterscherm neemt de reductie echter sterk af.
- > Er is slechts één grootschalig experiment gevonden waarbij is gemeten naast of boven het waterscherm. Uit dit experiment bleek dat de dampwolk door het waterscherm (deels) verplaatst wordt. Hierdoor komt (een deel van) de damp niet of slechts beperkt in aanraking met het water. Het mechanische effect waarbij het waterscherm de dampwolk wegduwt en er lucht inmengt, Dit mechanische effect lijkt bij een experiment met de goed in water oplosbare ammoniak een grotere rol te spelen dan het fysische effect waarbij de ammoniak oplost in het water. De richting waarin het waterscherm gericht is, bepaalt daardoor ook mede welke kant de damp op geduwd wordt.
- > De contacttijd tussen water en damp en de wateroplosbaarheid van het gas spelen een rol in de effectiviteit van een waterscherm voor wat betreft het oplossen van de damp in

het water. De wateroplosbaarheid kan verhoogd worden door het toevoegen van een stof aan het water.

- > Bij hogere windsnelheden neemt de concentratiereductie recht achter het waterscherm sterk af. Veelal is de snelheid van de wind bepalend voor de snelheid van de dampwolk. Wanneer opslag onder druk vrijkomt, kan de snelheid van de dampwolk echter anders zijn dan de windsnelheid. Ook bij een hoge snelheid van de dampwolk kan de effectiviteit van het waterscherm sterk afnemen.
- > Op basis van de kleinschalige experimenten kan gesteld worden dat de grootte van de druppels en de wijze van het verspreiden van het water (scherm, nozzle et cetera) van invloed zijn op de verhouding tussen de verschillende manieren van beïnvloeden van een dampwolk door een waterscherm (mechanisch, thermisch, fysisch en chemisch).
- > Een waterscherm zou flink groter moeten zijn dan de dampwolk om een hogere effectiviteit te verkrijgen. Bij chloor, een gas dat een lage wateroplosbaarheid heeft, is een waterscherm slechts beperkt in staat tot het verlagen van de concentratie in de lucht, ook bij een deels gesloten configuratie.

Vastgesteld kan worden, dat de effectiviteit van een waterscherm van veel factoren afhankelijk is. Dit maakt dat het op een juiste wijze toepassen van een waterscherm in de praktijk niet eenvoudig realiseerbaar is. Tevens kan geconcludeerd worden dat het reduceren van de dampconcentratie direct achter een waterscherm goed mogelijk is, maar wel een lage snelheid van de damp en een voldoende hoge snelheid van het waterscherm vraagt. De damp zal daarbij verder (groten)deels weggeduwd worden door het waterscherm. Hierbij kan de damp verdund en verplaatst worden, maar het volledig mitigeren van een dampwolk lijkt niet realistisch. Verder achter het scherm neemt de reductie van de concentratie damp vaak flink af.



# Literatuurlijst

- Bara, A., & Dusserre, G. (1997). The use of water curtains to protect firemen in case of heavy gas dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 10(3), pp. 179-183.
- Brandweeracademie: IFV. (2013). *Experimenteel onderzoek beperking rookverspreiding*. Arnhem.
- Cheng, C., Tan, W., & Liu, L. (2014). Numerical simulation of water curtain application for ammonia release dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 36, pp. 105-112.
- Dandrieux, A., Dusserre, G., & Ollivier, J. (2002). Small scale field experiments of chlorine dispersion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15, pp. 5 – 10.
- Dandrieux, A., Dusserre, G., Ollivier, J., & Fournet, H. (2001). Effectiveness of water curtains to protect firemen in case of an accidental release of ammonia: comparison of the effectiveness for two different release rates of ammonia. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 14, pp. 349–355.
- Dimbour, J., Dandrieux, A., Gilbert, D., & Dusserre, G. (2003). The use of water sprays for mitigating chlorine gaseous releases escaping from a storage shed. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 16, pp. 259 – 269.
- Dimbour, J., Gilbert, D., Dandrieux, A., & Dusserre, G. (2003). Assessment of the effectiveness of downward water sprays for mitigating gaseous chlorine releases in partially confined spaces. *Journal of Hazardous Materials A96*, pp. 127 – 141.
- Guo, W., Yue, T., Wang, R., Hua, M., Liu, Y., Jiang, Z., & Pan, X. (2012). Experimental study on mechanism of the water-insoluble heavy gas diluted with water curtain. *Procedia Engineering* 45, pp. 378 - 383.
- Hald, K., Buchlin, J., Dandrieux, A., & Dusserre, G. (2005). Heavy gas dispersion by water spray curtains: A research methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18, pp. 506 – 511.
- Houben, D. (2004). *Water spray curtains scaled models experiments and simulations*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- Kern, H. (2015). *Projekt GASRESPONSE: Steigerung der Effektivität von Maßnahmen zur Abwehr von Freisetzungen toxischer Gase*. Leoben, Oostenrijk: Universiteit van Leoben.
- Kern, H. (2016). Gefahrenabwehr beim Austritt toxischer Gase – Forschungsprojekt GASRESPONSE. *Onbekend*, pp. 74 - 79.
- Mukherjee, S., S. D., & Jaskolka, S. (2017). Effectiveness of Water Sprays in Mitigating Toxic Releases. *Wiley Online Library*. doi:10.1002/prs.11948
- Palazzi, E., Currò, F., & Fabiano, B. (2009). From laboratory simulation to scale-up and design of spray barriers mitigating toxic gaseous releases. *Process safety and environment protection* 87, pp. 26 – 34.
- Rana, M., Cormier, B., Suardin, J., Zhang, Y., & Sam Mannan, M. (2008). Experimental Study of Effective Water Spray Curtain Application in Dispersing Liquefied Natural Gas Vapor Clouds. *Process Safety Progress (Vol.27, No.4)*, pp. 345 - 353.
- Rana, M., Guo, Y., & Sam Mannan, M. (2010). Use of water spray curtain to disperse LNG vapor clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 23, pp. 77 – 88.
- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). (2022). *Interventiewaarden voor incidentbestrijding: interventiewaarden, stofdocumenten en handleiding*. Bilthoven: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM).

- Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). (2023). *Interventiewaarden voor de incidentbestrijding*. Opgehaald van <https://rvs.rivm.nl/onderwerpen/normen/rampen-en-incidenten/interventiewaarden>
- Uznanski, D., & Nédelka, D. (2001). Water spray curtains: A promising technique to fight against major industrial hazards. *Onbekend*.
- Wesierski, T., & Majder-Łopatka, M. (2018). Comparison of Water Curtain Effectiveness in the Elimination of Airborne Vapours of Ammonia, Acetone, and Low-Molecular Aliphatic Alcohols. *Applied Sciences* 8.
- Wesierski, T., Majder-Łopatka, M., Matuszkiewicz, R., & Porowski, R. (2012). Study on the effectiveness of water curtains to control of ammonia vapors during its uncontrolled release. *Przemysł Chemiczny* 91, pp. 1424 - 1426.
- Zhu, P., Wang, X., a, G. L., a, Y. L., a, X. K., a, Y. H., . . . Yuan, J. (2017). Experimental study on interaction of water mist spray with high-velocity gas jet. *Fire Safety Journal*, 93, pp. 60-73.

# Bijlage 1 Gebruikte zoektermen

Hieronder is een overzicht opgenomen van de gebruikte Nederlandstalige en Engelstalige zoektermen, zowel als enkele zoekterm als combinatie van zoektermen.

Nederlandstalig	Engelstalig
Effectiviteit	Effectiveness
Waterschermb	Water curtain
Watergordijn	Fire monitor
Waterkanon	Water spray
Lagedruk straal	Water spray curtain
	Jet stream
	Hose line
	Nozzle
	Fluid curtains
Ammoniak	Ammonia
Damp/wolk	Vapor cloud
Toxische damp/wolk	Toxic vapor cloud
Brandbare damp/wolk	Flammable vapor cloud
Gevaarlijke wolk	Hazardous cloud
Verspreiding van wolken	Cloud dispersion
Gasverspreiding	Gas dispersion
Brand	Fire
Incident	Incident
Verdunnen/verduunning	Diluting/dilution
Verspreiden/verspreiding	Dispersing/dispersion
Mitigeren	Mitigation