



Laan van Westenenk 501  
Postbus 342  
7300 AH Apeldoorn

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T 055 549 34 93

F 055 541 98 37

**TNO-rapport**

**2007-A-R0303/B**

**Bufferzone Kampstraat  
op zoek naar een veiligheidsverhogende inrichting van  
het gebied tussen chemische industrie en woonwijk**

Datum	maart 2007
Auteur(s)	Ir. T. Wiersma Ir. S.I. Wijnant-Timmerman Ing. J. Kamperveen Ir. B. Boonstra
Projectnummer	034.64333
Opdrachtgever	Gemeente Sittard-Geleen Postbus 18 6130 AA Sittard
Aantal pagina's	85 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	5

Alle rechten voorbehouden. Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van TNO.

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

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



# Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Beschrijving van de situatie .....</b>	<b>7</b>
2.1	Studiegebied .....	7
2.2	Ongevalscenario's.....	8
<b>3</b>	<b>Brainstormbijeenkomst.....</b>	<b>9</b>
3.1	Beïnvloedingsopties.....	10
3.1.1	Muur/dispersiescherm, langs gehele terrein.....	10
3.1.2	Diepe greppel/ kanaal .....	10
3.1.3	Waterscherm .....	10
3.1.4	Een rij hoge gebouwen .....	10
3.1.5	Ventilatoren .....	11
3.1.6	Windmolens.....	11
3.1.7	Warmtebronnen .....	12
3.1.8	Afzuigsystemen .....	12
3.1.9	Begroeiing bomen.....	12
3.1.10	Biologische opties, bacteriën .....	12
3.1.11	Vergroten overdrachtsgebied.....	13
3.1.12	Sproeivliegtuigen.....	13
3.1.13	Regenwolken .....	13
3.1.14	Injecteren van neutraliserende stoffen .....	13
3.1.15	Verbranden/vuurgoot.....	14
3.1.16	Luchtgordijnen.....	14
3.1.17	Stoomgordijnen.....	14
3.1.18	“Echte” (rol)gordijnen/zepelins .....	14
3.1.19	Adsorptie/absorptie/biologische omzetting.....	14
3.1.20	Koeltoren .....	14
3.2	Samenvattend Overzicht .....	15
3.3	Interessante combinaties .....	16
3.4	Geselecteerde opties .....	17
<b>4</b>	<b>Passieve inrichtingsmogelijkheden van de bufferzone .....</b>	<b>19</b>
4.1	Beschouwde configuraties .....	19
4.2	Opzet windtunnelmetingen.....	25
4.3	Resultaten windtunnelonderzoek bij loodrechte aanstroming .....	26
4.4	Randeffecten en aanstroming onder een hoek .....	29
4.5	Effecten bufferzone op de reductie van de concentraties en het percentage slachtoffers .....	31
4.5.1	Overzicht aannames.....	31
4.5.2	Reductie van effectafstanden en letaliteit door bufferzone.....	32
4.6	Stedenbouwkundige inpassing.....	35
<b>5</b>	<b>Actieve schermen .....</b>	<b>37</b>
5.1	Toepassingen .....	37
5.2	Mitigerende werking.....	38
5.3	Uitvoering.....	40
5.4	Effectiviteit .....	41

5.5	Kostenraming.....	45
5.6	Beschouwing.....	47
<b>6</b>	<b>Samenvatting, conclusies en aanbevelingen.....</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>Referenties .....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Verantwoording .....</b>	<b>57</b>

**Bijlage(n)**

- 1 Overzicht deelnemers brainstormbijeenkomst
- 2 Opzet windtunnelmetingen
- 3 Resultaten windtunnelmetingen
- 4 Probit functies
- 5 Watergordijnen parameters

# 1 Inleiding

De gemeente Sittard-Geleen heeft in december 2004 een subsidie verworven in het kader van het Innovatie Programma Stedelijke Vernieuwing (IPSV) voor het project “Veiligheid voorop in Lindenheuvel”. Een van de deelonderzoeken in dit project betreft de mogelijkheden voor het inrichten van een Bufferzone tussen enerzijds de wijk Lindenheuvel en anderzijds het chemisch bedrijventerrein Chemelot. Uitgaande van diverse mogelijke rampscenario's kan een toxische wolk afkomstig van het bedrijventerrein Chemelot zich via het overdrachtsgebied (gebied tussen bedrijventerrein en de wijk) verplaatsen naar de wijk Lindenheuvel.

Het idee is dat de inrichting van dit overdrachtsgebied invloed kan uitoefenen op de wijze waarop deze toxische wolk zich verplaatst. Normaal gesproken ziet men de inrichting van het overdrachtsgebied als een gegeven. Het doel van dit onderzoek is juist om het overdrachtsgebied te zien als een fase in de voltrekking van een scenario waarop invloed mogelijk is. De belangrijkste vraag luidt:

*Is het mogelijk om door een specifieke wijze van inrichting van het overdrachtsgebied de negatieve effecten in het effectgebied te verminderen?*

Dit project wordt tevens als een nationale pilot gezien. Dit betekent dat de resultaten ook vertaalbaar moeten zijn naar toepassing elders in Nederland. Voor de uitwerking in dit project betekent dit dat ook opties die voor de situatie in Geleen minder geschikt zijn, in het project toch beschouwd kunnen worden omdat deze opties elders wel toepasbaar kunnen zijn. Ook de keuze en uitwerking van de ongevalsscenario's en omgevingskenmerken kan generieker worden opgezet, indien dit de vertaalbaarheid van de resultaten ten goede komt.

Het project is gefaseerd uitgevoerd. In fase 1 zijn de verschillende beïnvloedingsopties geïnventariseerd. In hoofdstuk 3 wordt verslag gedaan van de inventarisatie van beïnvloedingsopties. Onderdeel van fase 1 is ook het bestuderen van de omgevingskenmerken en selectie en uitwerking van de voorbeeldscenario's. Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van het studiegebied en de ongevalsscenario's die als referentie zijn gekozen voor het beoordelen van de beïnvloedingsopties.

Bij de eerste globale uitwerking van de beïnvloedingsopties is op basis van criteria zoals effectiviteit, technische haalbaarheid en inpasbaarheid een tweetal soorten beïnvloedingsopties geselecteerd voor de verdere uitwerking. Deze twee opties zijn in de fasen 2 en 3 van het project verder uitgewerkt. Dit betreft enerzijds de optie om in het overdrachtsgebied obstakels in de vorm van gebouwen of wanden te plaatsen en anderzijds de optie om in het gebied actieve schermen te plaatsen. Bij dit laatste is de uitwerking in de vorm van waterschermen het meest reëel. De mogelijkheden van waterschermen zijn uitgewerkt in hoofdstuk 5.

De verschillende opties t.a.v. fysieke obstakels (gebouwen en wanden) en het onderzoek naar de effectiviteit hiervan is beschreven in hoofdstuk 4.

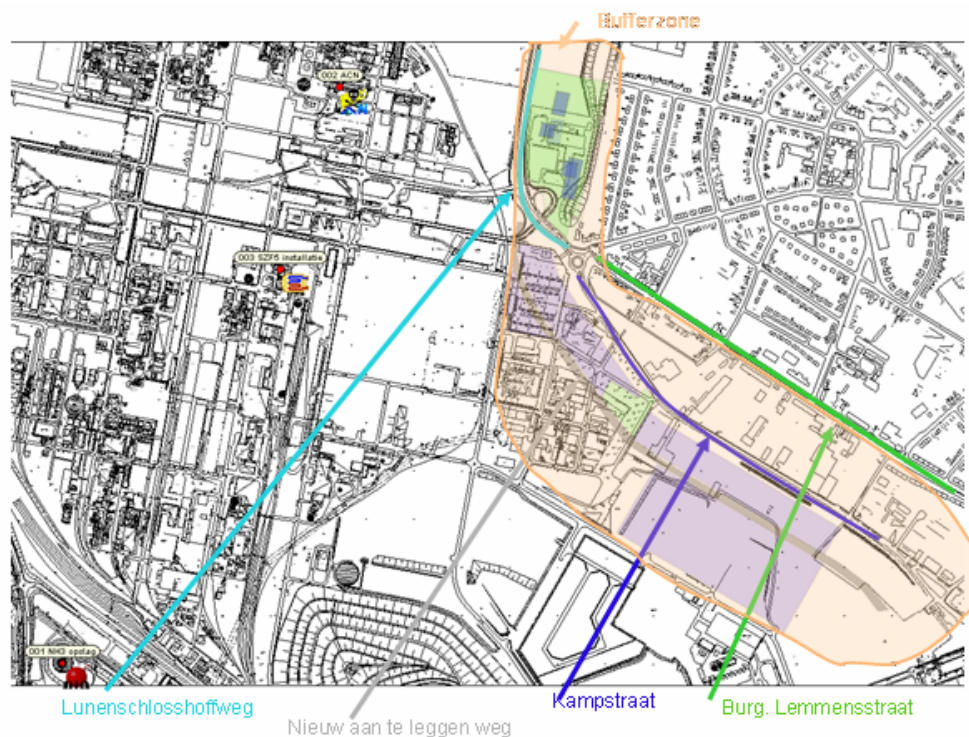
In hoofdstuk 6 worden ten slotte de conclusies en aanbevelingen gepresenteerd. Dit hoofdstuk is tevens de samenvatting van de studie.



## 2 Beschrijving van de situatie

### 2.1 Studieggebied

In onderstaande figuur is het studiegebied weergegeven.



Figuur 2-1 Het studiegebied: de Chemelotsite (deels), de bufferzone en de wijk Lindenheuvel.

Links op de kaart is een deel van de Chemelot-site gegeven. Op de kaart zijn een drietal installaties ingetekend waarbij ongevalsscenario's met vrijkomen van toxische stoffen denkbaar zijn.

Het oranje gearceerde gebied is het gehele gebied dat in deze studie verder wordt aangeduid als de "bufferzone".

Ten oosten van de Chemelot-site ligt een gebied dat de komende jaren zal worden herontwikkeld. De deelgebieden waarvoor al plannen worden ontwikkeld zijn in de figuur met paars en groen aangegeven. Het gebied ten zuiden en zuidwesten van de Kampstraat vormt onderdeel van het Chemelot-terrein. Het paars gearceerde gebied (zie Figuur 2-1) zal de komende jaren worden herontwikkeld. Voor het paarsgearceerde gebied ten zuiden van de Kampstraat wordt in het "Masterplan Herstructurering en ontsluiting Chemelot Noord" gedacht aan ruimte voor een lokaal bedrijventerrein, uitbreiding van het bedrijventerrein aan de noordzijde van de Kampstraat. Het deel op de Chemelot site is bedoeld voor chemie gerelateerde bedrijvigheid. Het deel tussen de Kampstraat en de Burg. Lemmensstraat is bedoeld als lokaal bedrijventerrein.

Tijdens de brainstormbijeenkomst die in fase 1 is gehouden (18-8-2006), is aangegeven dat ook het gebied ten noorden van de Kampstraat (tussen Kampstraat en burgemeester Lemmensstraat) in de gedachtevorming kan worden meegenomen. Ook het gebied ten oosten van de Lunenschlossweg tot aan de geluidswal kan worden meegenomen in de bufferzone (groen met paarse blokken in de figuur).

Tijdens de brainstorm is door de deelnemers van de gemeente en Chemelot aangegeven dat het voor het aantonen van de effectiviteit van de gekozen beïnvloedingsoptie niet noodzakelijk is om de geometrie van de Chemelot-site en de woonwijk Lindenuel precies na te bouwen (voor de windtunnelproef). Omdat het ook van belang is om de resultaten te kunnen vertalen naar toepasbaarheid elders in Nederland kunnen algemenere uitgangspunten worden genomen. Voor de wijk Lindenuel kan een generieke woonwijk worden gebruikt. De geometrie van de Chemelot-site kan buiten beschouwing worden gelaten. Wel moet er in de uitwerking rekening mee worden gehouden dat de risicobronnen op het Chemelot-terrein al op enige afstand van de overdrachtszone liggen. Dit is van invloed op de vorm en grootte van de te beschouwen toxische wolken.

## 2.2 Ongevalseenario's

In het veiligheidsrapport van Chemelot is aangegeven welke ongevalsscenario's van invloed zijn op de externe veiligheid. Uit het overzicht van scenario's in hoofdstuk 7 van het Veiligheidsrapport deel 1 zijn ter illustratie de volgende drie scenario's gekozen, die in het kader van de beschouwing van de externe veiligheid in de wijk Lindenuel relevant zijn en waar een bufferzone invloed op zou kunnen uitoefenen:

- vrijkomen van 32 ton ammoniak ten gevolge van het falen van de NH<sub>3</sub> buffertank T3 van de ammoniak ringleiding;
- vrijkomen van 1044 kg blauwzuur veroorzaakt door een leidingbreuk van de toevoerleiding AS191 van de ACN1-installatie;
- vrijkomen van 2,9 ton NO<sub>x</sub> ten gevolge van leidingbreuk van de gastoevoerleiding van absorptiekolom C201 van de SZF5 –installatie.

Deze voorbeeldscenario's spelen een rol in het toetsen van de effectiviteit van de bufferzone. De beschrijving van de effectiviteit van de verschillende beïnvloedingsopties zal worden beschouwd met het oog op de reductie van de schadelijke effecten van bovengenoemde scenario's. De uitwerking hiervan is opgenomen in paragraaf 4.5.



### 3 Brainstormbijeenkomst

Op 18 augustus 2006 is een brainstormbijeenkomst gehouden waarin de mogelijke beïnvloedingsopties zijn geïnventariseerd. Bij de bijeenkomst waren aanwezig: 2 vertegenwoordigers van de Gemeente Sittard-Geleen, een vertegenwoordiger van de brandweer, 3 vertegenwoordigers van Chemelot en 7 TNO'ers met uiteenlopende expertises. In de bijlage is een overzicht gegeven van de deelnemers.

Na een korte uiteenzetting van de doelstelling van het project en de achterliggende problematiek, is gebrainstormd over mogelijke beïnvloedingsopties. Vervolgens is het gezelschap opgesplitst in 3 groepen. Verdeeld over de drie groepen zijn de haalbaarheid en effectiviteit van de geïnventariseerde opties besproken. Deze zijn vervolgens plenair teruggerapporteerd en bediscussieerd. Hieronder volgt de lijst van beïnvloedingsopties. Deze worden vervolgens per paragraaf toegelicht. In deze toelichtingen zijn de bevindingen uit de workshop verwerkt.

#### **Overzicht geïnventariseerde beïnvloedingsopties:**

1. Muur/dispersiescherm, langs gehele terrein
2. Diepe greppel/ kanaal
3. Waterscherm
4. Een rij hoge gebouwen als aaneen gesloten wand of verspringend
5. Ventilatoren/windmolens
6. Warmtebronnen
7. Stofzuigers/afzuigers
8. Begroeiing bomen
9. Biologische opties, bacteriën
10. Vergroten overdrachtsgebied
11. Sproeivliegtuigen
12. Regenwolken
13. Injecteren van neutraliserende stoffen
  - a. Affiniteit van de stoffen bekijken
  - b. Dichtheidseffecten benutten
14. Verbranden/vuurgoot
15. Luchtgordijnen
16. Stoomgordijnen
17. "Echte" (rol)gordijnen
18. Inzet van zeppelins
19. Adsorptie
  - a. door vegetatie
  - b. op schermen
20. Koeltorens

Enkele opties zijn in de uitwerking meteen gecombineerd. Andere combinatiemogelijkheden zullen aan het eind van dit hoofdstuk worden besproken.

### 3.1 Beïnvloedingsopties

#### 3.1.1 *Muur/dispersiescherm, langs gehele terrein*

Langs het gehele overdrachtgebied zou een lange, hoge wand kunnen worden gebouwd die als een soort barrière werkt voor de gaswolk. Bij de wand zal er turbulentie ontstaan, de wolk zal omhoog en opzij verspreiden en er zal opmenging met de omringende lucht ontstaan. De wolk zal dus iets worden afgeleid en verdund. Nadeel van deze optie is dat een lange kale wand vanuit ruimtelijk perspectief niet fraai is. Het heeft ook geen andere toegevoegde waarde. Een combinatie met bebouwing (zie optie 3.1.4) is daarom te prefereren. In technische zin is deze optie wel eenvoudig te realiseren, de kosten zijn beperkt. De optie is ook relatief eenvoudig in de windtunnel uit te testen.

In het verlengde van deze optie kan ook worden gedacht aan de geluidswal die nu al langs een deel van de Chemelot-site ligt. De geluidswal zou kunnen worden geïntegreerd in de te kiezen beïnvloedingsoptie. Daarbij zou kunnen worden nagegaan wat de effectiviteit van de huidige geluidswal is en hoe deze kan worden verhoogd door de geluidswal te combineren met een of meerdere van de te selecteren beïnvloedingsopties.

#### 3.1.2 *Diepe greppel/ kanaal*

Een diepe greppel of een soort kanaal langs het overdrachtgebied kan ook als een soort barrière werken, zeker in geval van een ontsnapping van zwaar gas. Een wolk van zwaar gas wordt ‘verzameld’ in een verdiept stuk van het terrein, en kan daaruit gemakkelijker worden afgevoerd of naar een veilige locatie worden getransporteerd. De optie is ruimtelijk inpasbaar en zou goed gecombineerd kunnen worden met een waterscherm (optie 3.1.3). Hierbij is het wel de vraag of een greppel met voldoende afmeting realiseerbaar om de totale hoeveelheid ontsnapte stof op te vangen. Dit is uiteraard afhankelijk van het ongevalsscenario. Bij een grote gaswolkontsnapping (bijv. de ammoniakopslag) is veel opvangcapaciteit nodig. Ook de afvoer van het gas is dan problematisch.

In het verlengde van deze optie is gesuggereerd om de gebouwen in het water te bouwen. Dit is in feite een soort combinatie van optie 3.1.2 en 3.1.4.

#### 3.1.3 *Waterscherm*

Een waterscherm zal voor turbulentie zorgen waardoor verdunning van de wolk wordt gecreëerd. Bij sommige toxische wolken kan het water ook nog reageren waardoor de wolk deels uitregent. Dit zorgt voor een verdere reductie van de concentratie. Dit zal echter niet in alle gevallen optreden (afhankelijk van de soort stof en de concentratie). Het waterscherm zou kunnen worden vormgegeven door leidingen langs het overdrachtgebied neer te leggen en op regelmatige afstanden injectiepunten aan te brengen. In de bediening dient dan instelbaar te zijn welke injectiepunten worden ingeschakeld. Deze optie gaat daarmee wel gepaard met een zekere responstijd. Voor opvang van het water zou het eerder genoemde kanaal (optie 3.1.2) kunnen worden gebruikt.

#### 3.1.4 *Een rij hoge gebouwen*

Een rij hoge gebouwen lijkt een effectieve optie. Dit kan zowel een lang gebouw zijn dat als een soort muur/barrière werkt als een rij afwisselende en eventueel licht verspringende configuratie. De rij gebouwen zal er met name voor zorgen dat er meer opmenging en turbulentie optreedt. Dit zorgt voor verdunning van de wolk. De werking

is vergelijkbaar met optie 3.1.1. Belangrijk voordeel van deze optie is de mogelijkheid van functionele toepassingen. Kantoorbebouwing is voor de bufferzone daarbij één van de gewenste functies. Een configuratie met meerdere gebouwen kan effectiever zijn doordat er meer opmenging en turbulentie ontstaat. Het ontwerp zou zo kunnen worden gekozen dat het gebouw zelf ook extra turbulentie genereert. Normaal gesproken worden gebouwen juist zo ontworpen dat het gebouw juist zo weinig mogelijk windhinder geeft.

Nadeel van deze optie is dat deze juist bij de lage windsnelheden het minste effect zal hebben. Dit zijn juist wel de omstandigheden die het meest bedreigend zijn voor de achterliggende woonwijk.

Een ander aandachtspunt is dat grote gebouwen ook kwetsbaar kunnen zijn voor explosieoverdrukken. Hier wordt bij de verdere uitwerking ook op in gegaan (paragraaf 4.1). In deze paragraaf wordt ook aangegeven welke configuraties verder zijn onderzocht.

### 3.1.5 *Ventilatoren*

Een rij met ventilatoren, langs het overdrachtsgebied geplaatst, kan zorgen voor mechanische inmenging van lucht en kan een opwaartse luchtstroom creëren. Deze optie zorgt dus ook voor extra turbulentie en verdunning van de toxische wolk. Het aantal benodigde ventilatoren en de capaciteit van de ventilatoren zou nog moeten worden bepaald aan de hand van de scenario's en de grootte van het gebied. Voordeel van de optie t.o.v. de passieve barrières is dat deze optie ook bij lage windsnelheden effectief kan zijn. Nadeel van deze optie is dat deze relatief duur is, regelmatig onderhoud behoeft en geen aanvullende toegevoegde waarde in de ruimtelijke invulling heeft. Bovendien gaat deze optie gepaard met een responstijd.

De effectiviteit van de ventilatoren zal vermoedelijk sterk beïnvloed worden door de plaats waar de aangezogen lucht vandaan wordt gehaald. Bij benedenwindse aanzuiging treedt opmenging van de wolk met 'zichzelf' op en zal vermoedelijk alleen de extra gecreëerde luchtstroming door de ventilator voor verdunning zorgen. Bij bovenwindse aanzuiging kan de wolk worden opgemengd met 'frisse' lucht en treedt extra verdunning op. Nadeel zou kunnen zijn dat bovenwindse aanzuiging de wolk, nadat deze de ventilator is gepasseerd, versterkt naar onderen trekt waardoor de concentraties op grondniveau juist weer toe zouden nemen. Dit zou onderzocht moeten worden.

De optie zou eventueel kunnen worden gecombineerd met de optie "injecteren van neutraliserende stoffen" (optie 3.1.14) of toevoegen van stoom (optie 3.1.17).

### 3.1.6 *Windmolens*

Het plaatsen van aandrijfbare windmolens is een variant op de optie "ventilatoren". De gedachte is windmolens te plaatsen die, met name bij lage windsnelheden, ook zelf kunnen worden aangedreven, zodat ze fungeren als een soort ventilator. Het voordeel van deze optie is dat de optie ook nog nuttig kan worden toegepast onder normale omstandigheden en het een positief, groen imago heeft. Mogelijk kunnen hiermee de kosten van de investering worden terugverdiend.

De effectiviteit is sterk afhankelijk van de mogelijkheden om windmolens als ventilator te laten fungeren. Het zou nader onderzocht moeten worden of de gewenste positionering van de ventilatoren (niet te hoog) te combineren is met de vaak hoge

positionering van windmolens. Zijn de windmolens wel efficiënt in te zetten als de effectiviteit van ventilatoren in geval van een calamiteit leidend is in het ontwerp?

Windmolens stuiten mogelijk net als ventilatoren op esthetische bezwaren. Bij de plaatsing zal ook voldoende afstand van de chemische installaties moeten worden gehouden om het risico van afbrekende wieken te vermijden.

### 3.1.7 *Warmtebronnen*

Warmtebronnen in een rij langs het overdrachtgebied lijken heel effectief om opwaartse stroming te genereren. Hierdoor zal een verdunning van de wolk ontstaan. Dit zou bijvoorbeeld kunnen worden uitgevoerd door hete lucht uit te stoten. In feite hebben we dan te maken met een variant op optie 3.1.16 (luchtgordijn). Wellicht is het problematisch om snel genoeg voldoende warmte/energie aangevoerd te krijgen.

Een mogelijkheid is het inzetten van vuur. Vuur is een snelle warmte generator en zou wat dat betreft dus goed kunnen voldoen. In feite hebben we het dan over optie 3.1.15 (vuurgoot). Voordeel hier van is dat het een snelle en effectieve methode is, die naast turbulentie mogelijk ook nog een deel van de toxische stoffen verbrandt. Belangrijk nadeel zijn de extra risico's die hiermee worden geïntroduceerd (bijvoorbeeld bij het vrijkomen van brandbare en explosieve wolken).

### 3.1.8 *Afzuigsystemen*

Een afzuigstelsel zou op regelmatige afstand langs het overdrachtsgebied afzuigpunten moeten hebben, juist zoals bij lucht- of stoomgordijnen een aantal inblaaspunten op een rij ligt. De effectiviteit van dit stelsel wordt laag ingeschat. Dit heeft een fysische reden: bij afzuiging treedt alzijdige toestroming op, zodat het rendement laag is. Denk hierbij aan stofzuigen; ondanks het grote motorvermogen (meer dan 1000 W) kan goed opzuigen een probleem zijn. Op korte afstand van de afzuigpunten is al geen effect meer waar te nemen.

Het lijkt technisch niet of zeer moeilijk uitvoerbaar om voldoende afzuigcapaciteit te creëren zodat de wolk voldoende kan worden gereduceerd. Dimensionering, opvangcapaciteit voor de afgezogen lucht, inpassing in de omgeving, risico's bij (deels) brandbare of explosieve mengsels maken dat deze oplossing als niet realistisch wordt gezien en verder buiten beschouwing zal worden gelaten.

### 3.1.9 *Begroeiing bomen*

Een bossage langs de rand van het overdrachtsgebied bevordert ook de turbulentie in de lucht. Zware gassen zouden bovendien een tijdje in het bos kunnen blijven hangen. Een bossage heeft bovendien een positief, groen imago. De verwachting is wel dat bomen minder turbulentie veroorzaken dan gebouwen of muren en daarmee minder effectief zijn dan de opties 3.1.1 en 3.1.4. Bomen vertragen bovendien de verspreiding en hebben daarmee een concentratieverhogend effect.

De effectiviteit en de benodigde dimensies (hoe breed moet de bosstrook zijn) van deze optie zouden nog nader onderzocht moeten worden. De optie is goed te combineren met andere bouwkundige maatregelen (gebouwen, muur/schermbank) en verdiepte zones (kanaal, plas).

### 3.1.10 *Biologische opties, bacteriën*

De gedachte van deze optie is dat door middel van inzet van biologische alternatieven, zoals inzetten van bacteriën, de toxische stoffen worden omgezet, en daarmee de

toxische concentraties in de wolk worden verminderd. Deze optie wordt als weinig realistisch te zien. Los van de vraag of er geschikte bacteriën zijn, geldt dat een dergelijke strategie niet de benodigde verwerkingssnelheid en –capaciteit tijdens een calamiteit heeft.

#### 3.1.11 *Vergroten overdrachtsgebied*

De optie “vergroten van het overdrachtsgebied” valt in feite niet binnen de vraagstelling. De vraag is immers hoe het overdrachtsgebied zo effectief mogelijk kan worden ingericht. Vergroten van overdrachtsgebied betekent in feite meer afstand scheppen tussen de risicobron en de risico-ontvangers. Dit is altijd positief voor de externe veiligheid.

#### 3.1.12 *Sproeivliegtuigen*

Met behulp van sproeivliegtuigen zou water kunnen worden uitgestort boven de toxische wolk. Dit zorgt in ieder geval voor een zekere mate van verdunning en zal in sommige gevallen (afhankelijk van de toxische stof en de concentratie) tot het gedeeltelijk “uitregenen” van de toxische wolk leiden.

In principe is de methode uitvoerbaar, zonder dat het tot ingrepen in het gebied hoeft te leiden. Nadeel van deze optie is dat de inzet een zekere opstarttijd vraagt: na alarmering moeten de vliegtuigen nog worden opgestart. De respons is in dit geval vrij traag, waarschijnlijk te traag. Bovendien is ook de veiligheid van de piloot in het geding.

De effectiviteit is mogelijk beperkt omdat niet alle toxische stoffen met water reageren.

#### 3.1.13 *Regenwolken*

De verwachte werking bij regenwolken is het zelfde als bij sproeivliegtuigen. Het actief ingrijpen en laten uitregenen van regenwolken is echter niet onder alle omstandigheden mogelijk. Verder geldt voor deze optie ook het nadeel van de benodigde responstijd.

Deze optie wordt als weinig realistisch en effectief gekenschetst.

#### 3.1.14 *Injecteren van neutraliserende stoffen*

In of langs het overdrachtsgebied zou een leidingensysteem kunnen worden gelegd in een lange lijn of in een soort raster. Dit raster zou dan de lijnen/structuur van de indeling van het overdrachtsgebied kunnen volgen.

Vanuit de leidingen zouden neutraliserende stoffen in de wolk gespoten kunnen worden. Dit zou dan gekoppeld kunnen worden aan een automatische detectie of zou een op afstand te besturen systeem kunnen zijn. Dit laatste vereist dan ook een zeer snelle respons.

Nadeel is dat de te injecteren stof voor elke toxische wolk verschillend kan zijn. Er zal ook nog moeten worden uitgezocht welke stof dit zou kunnen zijn. Naast de reacties die er optreden zal deze techniek ook voor turbulentie in de wolk zorgen en verdere verdunning.

De methode wordt als behoorlijk effectief ingeschat (op voorwaarde dat geschikte, snelwerkende stoffen beschikbaar zijn) en is bovendien ruimtelijk goed inpasbaar. Een nadeel zouden de kosten kunnen zijn, mede omdat het systeem niet voor andere doeleinden kan worden benut. Bovendien zal de uitvoering erg situatie-specifiek moeten worden voorbereid, waarbij waarschijnlijk meerdere neutraliserende stoffen in

grote hoeveelheden op voorraad gehouden moeten worden. Deze stoffen brengen zelf mogelijk ook risico's met zich mee.

### 3.1.15 *Verbranden/vuurgoot*

Door het aanleggen van een "goot" met brandbaar materiaal, dat vlak voordat de wolk passeert wordt ontstoken, wordt een soort "vuurmuur" gecreëerd. Deze methodiek heeft als voordeel dat hiermee veel turbulentie wordt gecreëerd. Tevens zou in bepaalde gevallen verbranding van het toxische materiaal kunnen optreden. De vuurmuur zou daarmee erg effectief kunnen zijn.

Nadeel is dat de vuurmuur weer andere risico's introduceert (bijvoorbeeld ontsteking van brandbare mengsels). Het middel is daarmee mogelijk erger dan de kwaal. Ook heeft deze optie als nadeel dat er enige responstijd overheen gaat voordat het vuur ontstoken wordt. Indien als brandstof aardgas zou worden gekozen (pijpleiding met ventielen) kan mogelijk een voldoende snelle responstijd worden gehaald. Testen van de effectiviteit van deze optie in de windtunnel is lastig.

### 3.1.16 *Luchtgordijnen*

Het luchtgordijn kan, qua technische uitvoering, worden gezien als een vereenvoudigde versie van optie 3.1.14. Er wordt een lijn of raster van leidingen aangelegd. Vanuit de leidingen wordt dan (onder hoge druk) lucht omhoog gespoten in de toxische wolk. Net als bij optie 3.1.14 zal dit voor veel turbulentie zorgen waardoor er verdunning van de wolk ontstaat. Voordeel van deze optie is dat deze optie eenvoudiger te realiseren is en er in de bediening ook geen onderscheid naar soort toxische wolk hoeft te worden gemaakt.

### 3.1.17 *Stoomgordijnen*

Het stoomgordijn is een variant op het luchtgordijn (3.1.16) en optie 3.1.14. Stoom heeft t.o.v. het luchtgordijn het voordeel dat het opdrijvende effect groter is en daarmee de effectiviteit ook groter. Stoom is (net als lucht) bij Chemelot beschikbaar. De optie is ruimtelijk goed inpasbaar. Wel zal de inzet een responstijd vergen (wie zet de gordijnen aan, hoe snel kan dit).

### 3.1.18 *"Echte" (rol)gordijnen/zeppelins*

Deze opties werden afgedaan als: leuk maar niet realistisch. Gordijnen moeten ergens aan worden opgehangen. Dit is ruimtelijk niet goed inpasbaar en ook moeilijk te realiseren. Voor zeppelins geldt bovendien dat deze niet direct beschikbaar zijn.

### 3.1.19 *Adsorptie/absorptie/biologische omzetting*

Toepassingen van adsorptielagen aangebracht op geluidsschermen worden al ontwikkeld tegen luchtvervuiling langs snelwegen. Het is niet waarschijnlijk dat deze techniek voldoende snel en effectief is, om de concentratie van een passerende wolk met een hoge concentratie toxische stof, voldoende te reduceren. Adsorptie, absorptie of biologische omzetting zijn methoden die veel te traag werken en dus voor calamiteuze lozingen niet effectief zijn.

### 3.1.20 *Koeltoren*

In de tweede ronde van de brainstorm is deze optie nog naar voren gekomen. Koeltorens vormen goede barrières die een luchtstroom omhoog veroorzaken. Chemelot heeft al enkele koeltorens. De optie is alleen te overwegen als deze koeltoren verplaatst zou kunnen worden. Nadeel van deze optie is dat koeltorens ook veel geluidhinder veroorzaken en dat de kosten vrij hoog zijn.

### 3.2 Samenvattend Overzicht

In onderstaande tabel worden de beschouwde opties gekwalificeerd op de criteria:

- Technische haalbaarheid,
- Effectiviteit,
- Inpasbaarheid (in de omgeving),
- Kosten,
- Responstijd (tijd tot dat de optie effectief wordt rekening houdend met opstarttijd),
- Neveneffecten. Het criterium neveneffecten heeft betrekking op de positieve of negatieve neveneffecten die een optie kan hebben, zoals geluidshinder, esthetische waarde, imago.

Met + of ++ is aangegeven dat een optie op een criterium positief scoort (dus goed of zeer goed haalbaar, lage of zeer lage kosten etc). Met - of -- is een negatieve score aangeduid (moeilijk of zeer moeilijk haalbaar, lage effectiviteit, hoge kosten). Een neutrale score is aangegeven met een 0.

Tabel 3-1 Overzicht beïnvloedingsopties.

	Technische haalbaarheid	Effectiviteit	Inpasbaar	Kosten	Respons-tijd	Neven-effecten
Muur/dispersiescherm	++	+	-/+ <sup>1</sup>	+	+	0
Diepe greppel/ kanaal	++	0	+/- <sup>2</sup>	+/ <sup>5</sup>	+	0
Waterscherm	+	+	+	0	-	0
Een rij hoge gebouwen	++	+	+	+/ <sup>3</sup>	+	+/- <sup>6</sup>
Ventilatoren/windmolens	0	+/ <sup>0</sup>	0	-	-	-
Warmtebronnen	0	+	-	-	-	0
Stofzuigers/afzuigers	0	-	-	--	-	-
Begroeiing bomen	++	+/ <sup>0</sup>	+	0	0	+
Biologische opties, bacteriën	-	-	0	-	-	-
Vergroten overdrachtsgebied	-	+	-	-	+	-
Sproeivliegtuigen	+	+/ <sup>0</sup>	+	-	--	-
Regenwolken	+	+/ <sup>0</sup>	+	-	--	-
Injecteren van neutraliserende stoffen	0?	0?	0	-	--	0
Verbranden/vuurgoot	+	++	0	0	0	--
Luchtgordijnen	+	+	+	0?	-	0
Stoomgordijnen	+	++	+	0?	-	0
"Echte" (rol)gordijnen	-	0	--	--	-	-
Inzet van zeppelins	--	-	-	--	--	0
Adsorptie	-	-	0	-	--	0
Koeltorens	++	+	-	-	+	-

<sup>1</sup> Wel uitvoerbaar in combinatie met gebouwen

<sup>2</sup> Afhankelijk van benodigde capaciteit van de greppel, dit is weer afhankelijk van de hoeveelheid gas die moet worden opgevangen. De kosten en mogelijkheid voor afvoer van de toxische gas kunnen wel een probleem zijn, de greppel zelf niet.

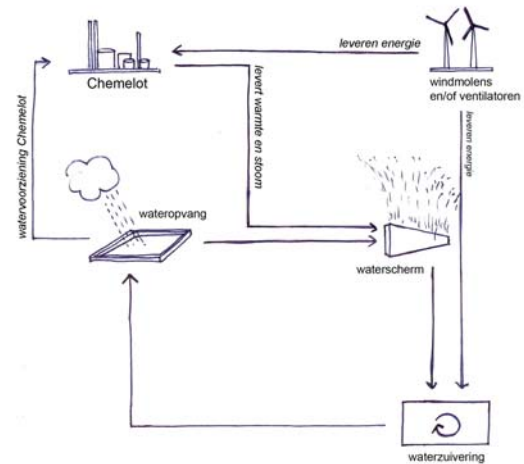
<sup>3</sup> In principe leveren gebouwen geld op, maar dan moet daar uiteraard wel voldoende vraag naar zijn. De extra kantoorruime is een positief neveneffect. Nadelige neveneffecten zijn de extra risico's bij explosiescenario's en de verminderde zelfredzaamheid. Ook zal niet tot elke hoogte kunnen worden gebouwd (afhankelijk van bestemmingsplan, bederven van het uitzicht)

### 3.3 Interessante combinaties

In de toelichting is bij verschillende beïnvloedingsopties al aangegeven of deze goed te combineren zijn met andere opties. Zo zijn een aantal fysieke inrichtingsmaatregelen goed te combineren (bijvoorbeeld begroeiing en bebouwing) en zijn bijvoorbeeld waterschermen goed te combineren met een kanaal.

Wateropvang (aanwezig in de bufferzone in bijvoorbeeld de vorm van een kanaal) levert water voor waterschermen. Afvalwater kan via een waterzuivering weer in de wateropslag worden opgenomen. Gebruikmakend van restwarmte en bijvoorbeeld stoom uit Chemelot, kan het water dat vanuit de wateropvang naar het waterscherm wordt gepompt worden verwarmd.

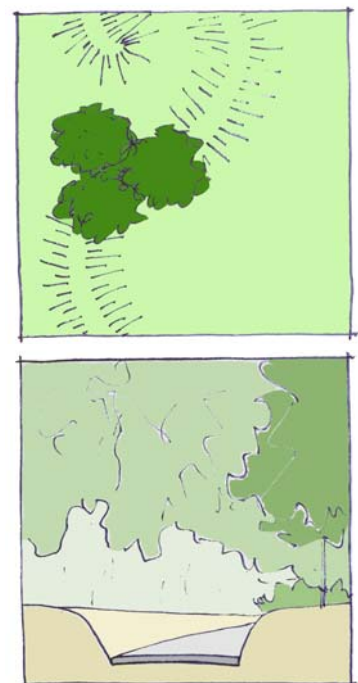
Windmolens kunnen als ventilatoren dienen, maar tevens energie leveren voor kleinere ventilatoren, aan Chemelot zelf en aan bijvoorbeeld het waterzuiveringssysteem.



Naast het effect van bepaalde veiligheidssystemen op de risicobeperking van de achterliggende woonwijk Lindenheuvel, lenen passieve ruimtelijke systemen zich ook bij uitstek voor het verhogen van de ruimtelijke kwaliteit van het gebied.

Een hoogteverschil, een greppel of een muur vormen niet alleen barrières tegen toxische wolken, maar kunnen ook als visuele of mentale barrière gaan werken. Dit kan voorkomen worden door bijvoorbeeld te kijken naar de landschappelijke en stedenbouwkundige potenties van een ruimtelijk veiligheidssysteem. Te denken valt aan:

- door het aanleggen van hoogteverschillen kan in de bufferzone een heuvelslandschap worden gecreëerd, in combinatie met turbulentie-verhogende vegetatie;
- een greppel kan geïntegreerd worden met een weg, waardoor een holle weg ontstaat, deze kan met turbulentieverhogende vegetatie worden beplant;
- de wateropvang kan tevens als visvijver gebruikt worden, en rondom de plas kan (op beperkte schaal) gerecreëerd worden.



Door deze oplossingen met elkaar te combineren, kan een interessant **‘Veiligheidslandschap’** ontstaan in de bufferzone. Dit biedt naast de nodige bescherming aan de omliggende wijken en de bedrijven die zich in het Veiligheidslandschap vestigen, ook recreatieve potenties voor de bewoners van de woonwijken en voor de werknemers van de bedrijven. Zeker als in het heuvelslandschap paadjes worden aangelegd (uiteraard



afsluitbaar in geval van calamiteiten) verhoogt de bufferzone ook de waarde van de aangrenzende wijk.

### **3.4 Geselecteerde opties**

In Tabel 3-1 zijn de verschillende beïnvloedingsopties op een aantal criteria gekwalificeerd. Op basis van dit overzicht kan worden geconcludeerd dat een aantal opties meteen afvallen omdat ze op vrijwel alle criteria slecht scoren.

De overige, meer kansrijke opties kunnen in 2 groepen worden ingedeeld:

- de passieve inrichtingsmogelijkheden zoals bebouwing, begroeiing met bomen, geluidswal, greppel/kanaal;
- de actieve schermen (de opties watergordijn, luchtgordijn, stoomgordijn, luchtgordijn met injectie neutraliserende stoffen).

Een nadere uitwerking van de passieve inrichtingsmogelijkheden is gegeven in hoofdstuk 4, terwijl in hoofdstuk 5 verder in wordt gegaan op de uitwerking de actieve schermen.



## 4 Passieve inrichtingsmogelijkheden van de bufferzone

### 4.1 Beschouwde configuraties

De verwachting is dat de inrichting van de bufferzone met (passieve) obstakels mogelijk effectief is bij het beïnvloeden van de verspreiding van de toxische wolk, zodanig dat de concentratie achter de obstakels lager is. In het vorige hoofdstuk zijn als obstakels muren of wanden genoemd en gebouwen. De effectiviteit van de obstakels zal daarbij uiteraard afhankelijk zijn van de vorm, hoogte en configuratie van de obstakels. Om een idee te krijgen van de invloed van diverse configuraties op de verspreiding van de gaswolk wordt een aantal configuraties op schaal doorgemeten in de windtunnel. Middels metingen in de windtunnel wordt getracht om uitspraken te doen met betrekking tot de effectiviteit van een configuratie.

Bij het definiëren van een goede configuratie is getracht:

- het op voorhand verwachte meest effectief obstakel te definiëren en te testen (zie paragraaf 1.2);
- een configuratie uit te testen die ook uit het oogpunt van stedenbouwkundige aspecten realistisch is.

Uit overleg met stromingsdeskundigen is gebleken dat bij het vinden van een optimale configuratie rekening gehouden moet worden met de volgende effecten:

#### ***Maximale gewenste hoogte gebouw***

Wanneer een gebouw wordt geplaatst van hoogte  $L$  dan geldt dat er over een afstand van circa  $14 \cdot L$  windafwaarts van het gebouw vrijwel geen concentratie wordt gemeten van een toxische wolk. De wijk stroomafwaarts van het gebouw, heeft een lengte van circa 1 km. Dit houdt dus in dat het gebouw niet hoger hoeft te worden dan: 1000 meter gedeeld door 14, dus ca 70 meter. Dit komt overeen met een gebouw van ca 20 verdiepingen. Een dergelijke hoogte is moeilijk realiseerbaar op deze locatie, daarom wordt hier uitgegaan van een hoogte van 50 meter.

#### ***Verspringen van gebouwen***

Door de gebouwen verspringend ten opzichte van elkaar te plaatsen zal de wolk niet zo tussen de gebouwen door kunnen waaien.

#### ***Hier en daar een hoog gebouw***

Een aantal gebouwen met hier en daar een hoger gebouw heeft ook al een versturende werking op de verspreiding van een wolk

#### ***Oplopende hoogte van gebouwen***

Het laten oplopen van de hoogte van gebouwen is naar verwachting gunstig voor een effectieve werking van de buffer.

#### ***Bomen***

Volgens de stromingstechnici heeft een rij bomen een concentratieverhogende werking achter de bomen tot gevolg. Dit komt doordat de bomen de snelheid van de stroming afremmen, waardoor direct na de bomen de concentratie toeneemt.

Naast een aantal wensen op het gebied van stromingstechnische eigenschappen van de configuratie, zijn er ook vanuit het oogpunt van stedenbouwkundige aspecten eisen/wensen. Bijvoorbeeld:

- maximale (realistische) lengte van het gebouw: een te lang gebouw is niet wenselijk;
- onderlinge afstand van de gebouwen;
- parkeerruimte;
- enz.

De voorgestelde configuraties zijn om bovengenoemde redenen ook voorgelegd aan een stedenbouwkundige. Deze heeft met name gekeken naar de mogelijke oppervlakte van de gebouwen in relatie tot de functie van de gebouwen. Aangezien de verwachting is dat het met name om bedrijfsfuncties zal gaan, zijn gebouwen met grote oppervlaktes en beperkte hoogtes voorzien. De oppervlaktes zijn verwerkt in de hieronder opgesomde configuraties. Ten aanzien van de hoogtes is aangegeven dat 50 meter wel erg hoog is en op de meeste locaties niet realistisch. Twintig meter hoog is op zich niet extreem hoog (ongeveer 6 verdiepingen) maar is op de beschouwde locatie wellicht wel vrij hoog. Om de hoogte beter te laten inpassen in de omgeving is ook voorgesteld om gebouwen op een talud te bouwen, hierdoor kan met een beperktere bouwhoogte toch de gewenste bouwhoogte van de bufferzone worden verkregen. In hoofdstuk 6 wordt ook nog weer verder ingegaan op de inpasbaarheid van de gekozen configuratie.

Ten slotte zijn de positieve dan wel negatieve effecten van scenario's voor de gebouw-configuraties een belangrijk aandachtspunt. Bij een explosiescenario bijvoorbeeld zou een hoog gebouw mogelijk niet bestand zijn tegen de overdrukeffecten. Dit is echter sterk afhankelijk van de uiteindelijke constructie van het gebouw en de overdruk ter plaatse. In het Veiligheidsrapport van Chemelot is een overzicht gegeven van de verschillende scenario's met overdrukeffecten. Hierin is aangegeven dat de schade-afstanden met een overdruk van 0,3 bar varieert tussen de 80 en 790 meter voor verschillende installaties, afhankelijk van de weerscondities. Uit deze overzichten kan niet worden afgeleid wat de afstand van deze bronnen tot de bufferzone is. Bij een overdruk van 0,3 bar zal glas breken, ernstige schade optreden aan houten en bakstenen gebouwen en lichte schade aan betonnen gebouwen. In de literatuur wordt de invloed van de hoogte van bouwwerken op de schade niet nader gespecificeerd. Dit zal voor een specifieke situatie moeten worden uitgezocht. Dit betekent dat op het moment dat er een inrichting voor de bufferzone is gekozen, er dan nog nader moet worden uitgewerkt wat de overdrukken ter plaatse zijn en wat dit voor eisen aan de constructie stelt. Dan kan ook rekening worden gehouden met de eisen die aan de constructie worden gesteld, van bijvoorbeeld een wand of een bomerij is het optreden van schade geen ernstig probleem, terwijl voor een kantoorgebouw het wel van belang is dat de aanwezigen in het gebouw veilig zijn.

Op basis van bovenstaande overwegingen is in eerste instantie de volgende lijst met configuraties voorgesteld:

- Configuratie 1: lange aaneengesloten wand (gebouwgevel) 50 m. hoog
- Configuratie 2: lange aaneengesloten wand (gebouwgevel) 20 m. hoog
- Configuratie 3: lange aaneengesloten rij bomen (20 m. hoog)
- Configuratie 4: 3 rijen gebouwen achterelkaar, verspringend, 20 m. hoog, 100 m. lang
- Configuratie 5: 3 rijen gebouwen achterelkaar, oplopend 10, 30, 50 m. hoog, 500 m. lang
- Configuratie 6: 3 rijen gebouwen achterelkaar, oplopend 10, 30, 50 m. hoog, 100 m. lang

- Configuratie 7: 3 rijen gebouwen achterelkaar, 20 m. hoog en enkele 50 m hoog, 100 m. lang
- Configuratie 8: als configuratie 5 of 6, eerste rij gebouwen vervangen door bomen
- Configuratie 9: configuratie 6, maar dan op een heuvel van 15 m. hoog.

Op voorhand werd verwacht dat er wel een vrij hoge bufferzone nodig zou zijn om voldoende effect te sorteren. Hierdoor bevat bovenstaande lijst betrekkelijk veel configuraties met redelijk hoge gebouwen. Bovenstaande lijst is aan de projectgroep voorgelegd, waarbij de projectgroep een keuze van 4 configuraties mocht maken. Uit bovenstaande lijst werden de volgende 4 configuraties gekozen:

- Configuratie 2: aaneengesloten wand (gebouwgevel) 20 m. hoog
- Configuratie 3: aaneengesloten rij bomen (20 m. hoog)
- Configuratie 6: rijen gebouwen achterelkaar, oplopend 10, 30, 50 m. hoog, 100 m. lang
- Configuratie 8: identiek aan configuratie 6, eerste rij gebouwen vervangen door bomen

Hier zijn vervolgens door TNO de volgende configuraties aan toegevoegd voor onderzoeksdoeleinden;

- Configuratie 0: geen bufferzone (nodig voor referentie)
- Configuratie 1: aaneengesloten wand (gebouwgevel) 50 m. hoog
- Configuratie 8a: eerste rij bomen (10 m), rij huizen (30 m hoog), rij huizen 10 m hoog (hiermee wordt tegemoet gekomen aan het bestemmingsplan, nl. maximale bouwhoogte van 10 meter in nabijheid van de woonwijk)
- Configuratie 9: 1 rij bebouwing, hoogte 30 meter, afstand gebouwen 25 m
- Configuratie 10: 1 rij bebouwing, hoogte 30 meter, afstand gebouwen 50 m
- Configuratie 11: rijen gebouwen achterelkaar, aflopend 50, 30, 10 m. hoog, 100 m. lang 3 rij bebouwing;  
Deze is identiek aan configuratie 6, maar dan aflopend.

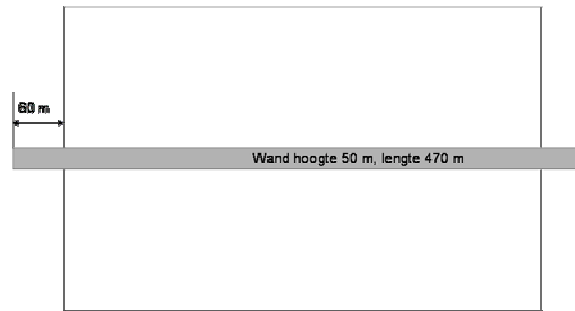
Op de volgende pagina's worden deze configuraties nader toegelicht. In onderstaande schetsen zijn de afmetingen weergegeven volgens ware schaal. Uitgangspunt is dat de geometrie zich bevindt op een plaat met afmetingen van 0,5 meter \* 1 meter (geschaalde afmetingen), wat in werkelijkheid overeen komt met een strook van 175 m \* 350 m.

#### **Configuratie 0: vrije veld meting**

Geen configuratie

#### **Configuratie 1: Lange aaneengesloten wand (gebouwgevel) 50 m. hoog**

Aaneengesloten wand van 50 meter hoog (1700 meter lang), 15 meter breed (breedte van een kantoor of flat)



Figuur 4-1 Configuratie 1.

### Configuratie 2: Lange aaneengesloten wand (gebouwgevel) 20 m. hoog

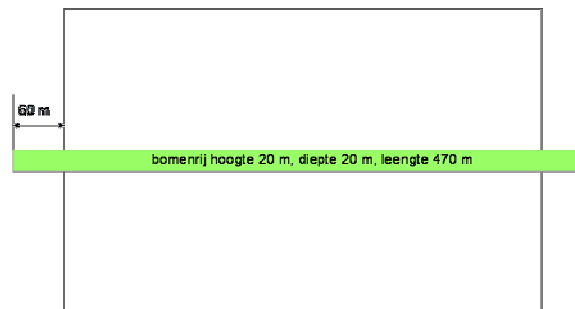
Aaneengesloten wand van 20 meter hoog (1700 meter lang), 15 meter breed (breedte van een kantoor of flat)



Figuur 4-2 Configuratie 2.

### Configuratie 3: Lange aaneengesloten rij bomen (20 m. hoog)

Aaneengesloten rij van bomen 20 meter hoog (1700 meter lang). Hiermee kan het effect van bomen vergeleken worden met een wand van 20 meter hoogte. De bomenrij is 20 meter breed en er is bij de bomen ook laaggroeiende bossage aangebracht.



Figuur 4-3 Configuratie 3.

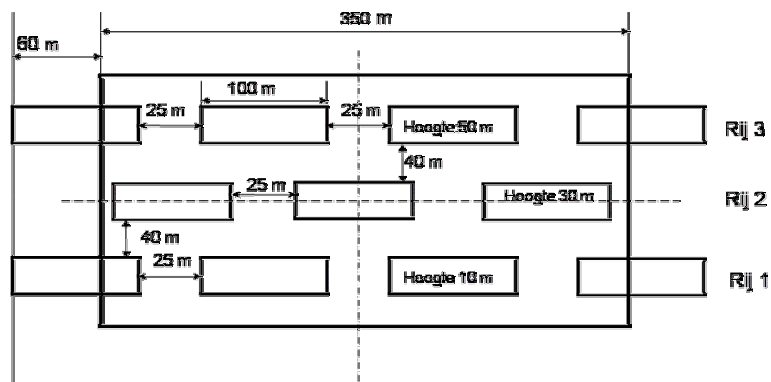
### Configuratie 6: 3 rijen gebouwen achterelkaar, oplopend 10, 30, 50 m. hoog, 100 m. lang

Hierbij wordt uitgegaan van een drietal rijen met kantoren in oplopende hoogte tot 50 meter

Rij 1: 4 gebouwen hoogte 10 meter

Rij 2: 3 gebouwen hoogte 30 meter

Rij 3: 4 gebouwen hoogte 50 meter  
Lengte van de gebouwen: 100 meter



Figuur 4-4 Configuratie 6.

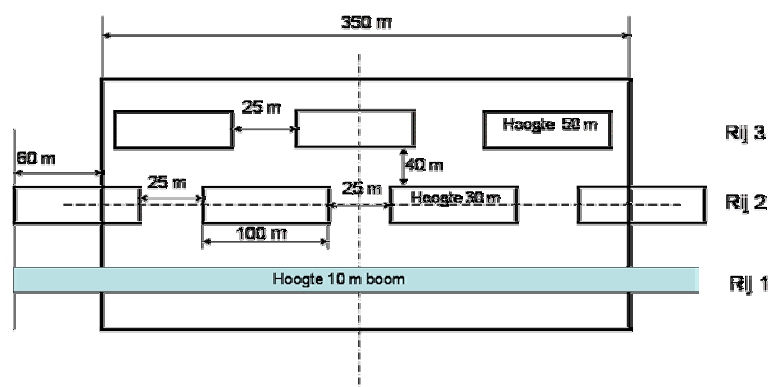
**Configuratie 8: 1 rij bomen 10 meter, 2 rijen gebouwen achterelkaar, oplopend 30, 50 m. hoog, 100 m. lang**

De configuratie is gelijk aan die van configuratie 6, echter nu is rij 1 vervangen door bomen van 10 meter hoog, met onderbegroeiing.

Rij 1: bomenrij hoogte 10 meter

Rij 2: 4 gebouwen hoogte 30 meter

Rij 3: 3 gebouwen hoogte 50 meter



Figuur 4-5 Configuratie 8.

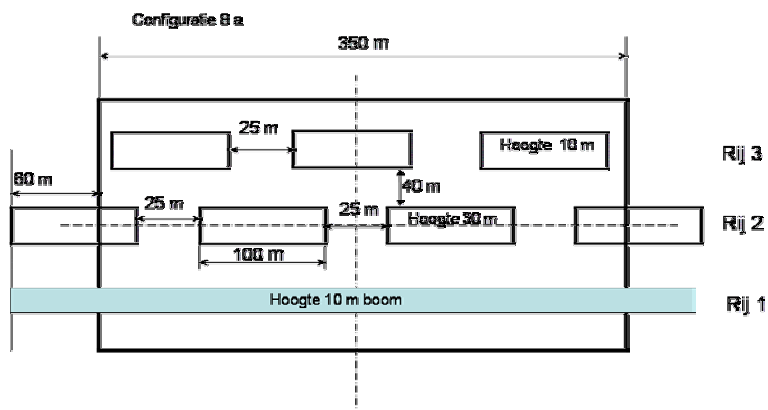
**Configuratie 8A: 1 rij bomen 10 meter, 2 rijen gebouwen achterelkaar, van 30, 10 m. hoog, 100 m. lang**

De configuratie is gelijk aan die van configuratie 8a, echter nu is rij 3 vervangen door gebouwen met een hoogte van 10 meter, dit in verband met het bestemmingsplan.

Rij 1: bomenrij hoogte 10 meter

Rij 2: 4 gebouwen hoogte 30 meter

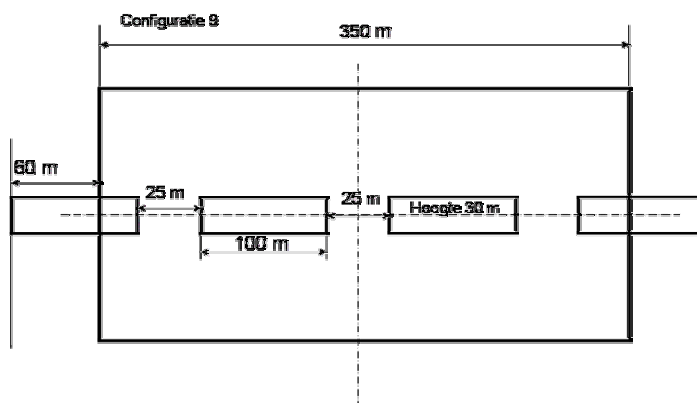
Rij 3: 3 gebouwen hoogte 10 meter



Figuur 4-6 Configuratie 8a.

**Configuratie 9: 1 rij gebouwen van 30 meter hoog, afstand gebouwen 25 meter.**

Deze configuratie bestaat uit 1 rij bebouwing, met een hoogte van hoogte 30 meter, de afstand tussen de gebouwen bedraagt 25 meter. De gebouwenrij van deze configuratie is identiek aan die van de configuraties 6, 8 en 8a.

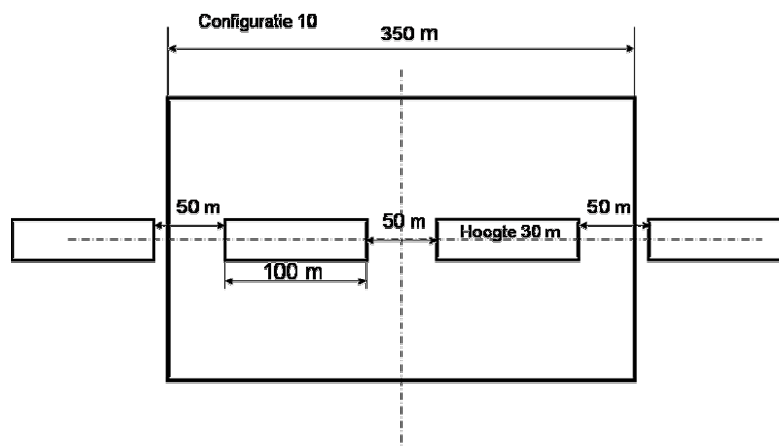


Figuur 4-7 Configuratie 9.

**Configuratie 10: 1 rij gebouwen van 30 meter hoog, afstand gebouwen 50 meter.**

Deze configuratie bestaat uit 1 rij bebouwing, hoogte 30 meter, afstand gebouwen 50 meter. De afstand tussen de gebouwen verschilt met een factor 2 van die in configuratie 9.





Figuur 4-8 Configuratie 10.

### Configuratie 11: 3 rijen gebouwen achterelkaar, aflopend 10, 30, 50 m. hoog, 100 m. lang

Hierbij wordt uitgegaan van een drietal rijen met kantoren in aflopende hoogte van 50 tot 10 meter

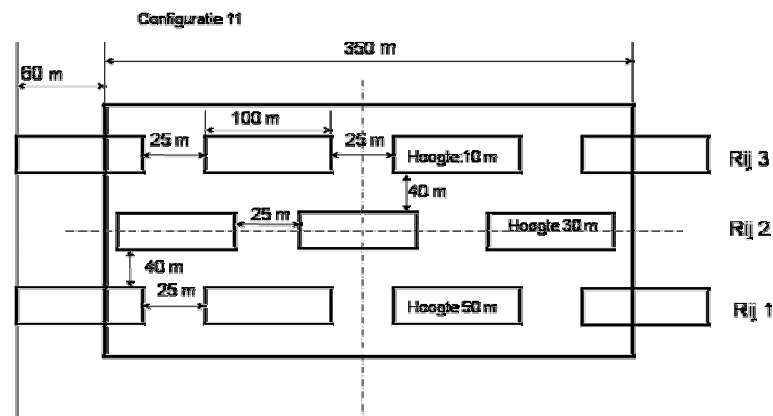
De configuratie is identiek aan configuratie 6 maar dan aflopend

Rij 1: 4 gebouwen hoogte 50 meter

Rij 2: 3 gebouwen hoogte 30 meter

Rij 3: 4 gebouwen hoogte 10 meter

Lengte van de gebouwen: 100 meter



Figuur 4-9 Configuratie 11.

## 4.2 Opzet windtunnelmetingen

De effectiviteit van de in de vorige paragraaf beschreven configuraties is getest in de atmosferische grenslaagwindtunnel van TNO Apeldoorn. De doorsnede van deze windtunnel is 2 meter in hoogte en 3 meter in breedte. De gekozen configuraties zijn op schaal gebouwd op een ronde draaischijf met een diameter van 2,3 meter.

Hierbij is een gasontsnapping vanuit een puntbron gesimuleerd, waarbij de afstand tot de bufferzone kan worden varieerd. Achter de configuratie zijn een aantal meet-

punten aangebracht waarmee de concentratie van het ingebracht gas wordt gemeten. In bijlage 2 wordt in meer detail ingegaan op de opzet van de windtunnelmetingen.

Het experiment in de windtunnel is zodanig uitgevoerd dat de situatie van de calamiteuze lozing bij Chemelot zo goed mogelijk wordt nagebootst. Een beperking hierbij is dat in de windtunnel van TNO op dit moment alleen de verspreiding van neutrale gassen kan worden gemeten. Het meten van de verspreiding zware gassen vereist speciale meetapparatuur. Deze apparatuur is sinds 10 jaar niet meer beschikbaar. Sommige van de mogelijke ongevalsscenario's hebben betrekking op zwaar gas, dat een ander verspreidingspatroon heeft. Bij de vertaling van de windtunnelexperimenten naar de invloed op de beschouwde ongevalsscenario's (in paragraaf 4.5) zal nader op dit fenomeen worden ingegaan.

Bij het analyseren van de windtunnelmetingen zijn de volgende situaties beschouwd:

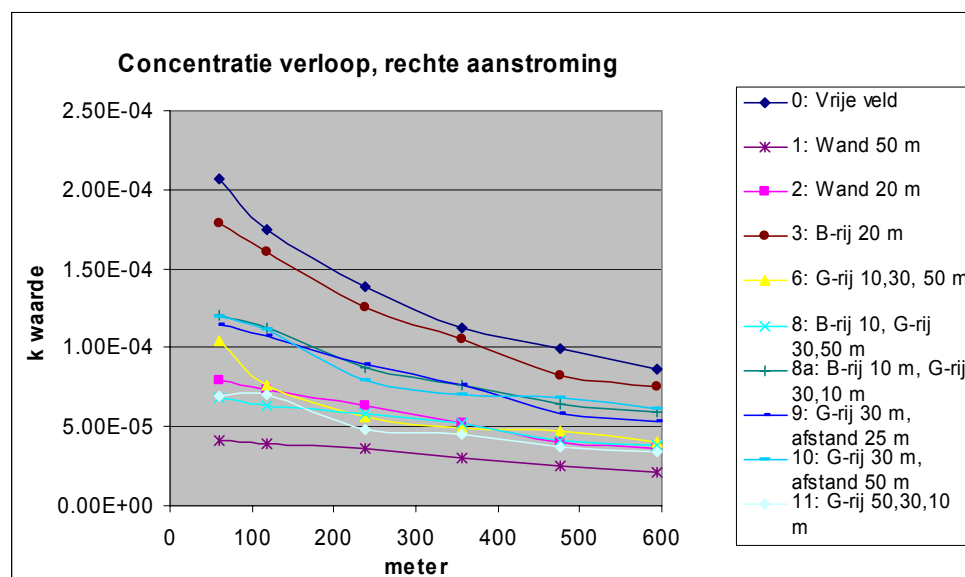
- Het concentratieverloop loodrecht achter de bufferzone, in het verlengde van de gaswolkuitstroming (dus in het centrum van de wolk), waarbij de gaswolk loodrecht op de bufferzone wordt angeblazen.
- Het concentratieverloop op een afstand van 140 en 280 meter uit de centrale as van de wolk. Hiermee kan inzicht worden verkregen in de randeffecten.
- Het concentratieverloop indien de gaswolk de bufferzone niet loodrecht nadert maar onder een hoek.

De focus heeft in het project gelegen op het onderzoek naar het concentratieverloop in de situatie waarbij de gaswolk de bufferzone loodrecht nadert. Er is met name onderzoek gedaan naar het concentratieverloop achter de bufferzone. De resultaten van deze metingen zijn beschreven in de volgende paragraaf.

In de bijlage wordt dieper ingegaan op de randeffecten en op het concentratieverloop bij aanstroming onder een hoek. De belangrijkste conclusies worden weergegeven in paragraaf 4.4. Hierbij moet worden opgemerkt dat voor een goede bestudering van het concentratieverloop bij aanstroming onder een hoek nog meer, en andere meetgegevens nodig zijn. Dit paste helaas niet binnen het kader van dit onderzoek.

### **4.3 Resultaten windtunnelonderzoek bij loodrechte aanstroming**

Onderstaande grafiek geeft een overzicht van de concentratieprofielen bij rechte aanstroming. Hierin wordt een overzicht gegeven van alle doorgemeten configuraties. De termen in de legenda staan voor het volgende: B-rij staat voor bomenrij, en G-rij staat voor gebouwenrij. De wand, staat voor de massieve wand zonder onderbreking. De getallen die genoemd staan in het overzicht hebben betrekking op de hoogte van de betreffende bomen- of gebouwenrij. De term afstand, staat voor de afstand tussen de gebouwen in de gebouwenrij in de richting loodrecht op de wind. Deze is standaard 25 meter, bij configuratie 10 is deze een factor 2 vergroot tot 50 meter.



Figuur 4-10 Overzicht configuraties, concentratieverloop rechte aanstroming.

Bij de analyse wordt voor de verschillende configuraties bekeken wat de concentratiereductie is ten opzichte van de situatie in het vrije veld. Hoe hoger de concentratiereductie, hoe groter het effect van een blokkade. Dit is een maat voor de effectiviteit van de blokkade.

Op grond van dit overzicht volgen de volgende bevindingen:

De bovenste concentratielijn (de blauwe) is die in het vrije veld. Zoals verwacht is de concentratie in het vrije veld het hoogst, omdat er geen obstakels zijn die het concentratieprofiel beïnvloeden.

Wat opvalt in de figuur is dat voor alle configuraties een zekere concentratiereductie optreedt. Daarnaast is gebleken dat deze reductie (dit is de verhouding tussen concentratieprofiel voor een configuratie en die in het vrije veld) voor de gehele afstand redelijk constant is, zowel dichtbij als verder weg van het obstakel. Daarom wordt de concentratieafname door de blokkade bij de uitwerkingen weergegeven in een gemiddelde concentratiereductie, gemiddeld over de 6 meetpunten waarover gemeten is. Deze reductie wordt weergegeven ten opzichte van het vrije veld (configuratie 0).

In onderstaande tabel is de concentratiereductie van elk van de configuraties gegeven.

Tabel 4-1 Concentratie reductie van t.o.v. het vrije veld.

Configuratie	Gemiddelde concentratie-reductie t.o.v. vrije veld
Configuratie 1: massieve wand 50 meter hoog	76%
Configuratie 2: massieve wand 20 meter hoog	58%
Configuratie 3: bomenrij 20 meter hoog	11%
Configuratie 6: gebouwenrijen met oplopende hoogte 10 m, 30 m, 50 m	55%
Configuratie 8: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30, 50 meter	59%
Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30, 10 meter	36%
Configuratie 9: 1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)	38%
Configuratie 10: 1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 50 m)	36%
Configuratie 11: 3 gebouwenrijen met aflopende hoogte 50 m, 30 m, 10 m	62%

De configuratie met het laagste concentratieprofiel is de massieve wand van 50 meter. Door het plaatsen van deze wand wordt de concentratie een factor 4 à 5 gereduceerd. De configuratie met de bomenrij ligt qua concentratieverloop vrijwel direct onder het concentratieverloop in het vrije veld. De bomenrij doet wel iets met de concentratie, maar het effect is niet erg groot. Daarnaast zijn er een aantal lijnen te onderscheiden voor de diverse configuraties met gebouwen.

De configuraties zijn zo gekozen dat verschillende parameters onderling vergeleken kunnen worden. In bijlage 3 worden hiervoor verschillende grafieken gegeven waarbij per parameter de invloed van de parameter is onderzocht. Hierbij zijn de volgende parameters onderzocht:

- massieve wand versus bomenrij;
- hoogte van de wand;
- oplopende of aflopende bebouwing;
- geheel gesloten wand of openingen in het bouwpatroon;
- invloed bomen in plaats van gebouwen.

Uit de beschouwingen zijn de volgende conclusies te trekken:

- De effecten van een bomenrij op het concentratieprofiel zijn gering, ze hebben wel een positief effect.
- Een massieve wand heeft een groot effect op de concentratie waarbij geldt, hoe hoger de wand, hoe groter de concentratiereductie.
- De maximale hoogte die in de configuratie optreedt, is bepalend is voor de mate van concentratiereductie.
- Een verloop van gebouwen van hoog naar laag (gezien van de bron naar de woonwijk), is iets gunstiger dan van laag naar hoog. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de afstand van de hoogste blokkade ten opzichte van de woonwijk. Het lijkt gunstig om het hoogste gebouw zo dicht mogelijk bij de bron te plaatsen.

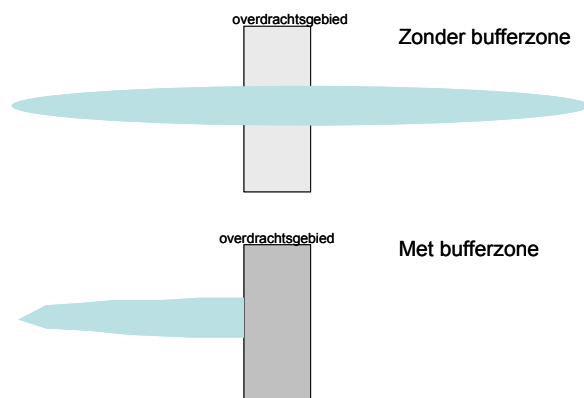
- Het al dan niet onderbroken zijn van een gebouwenrij heeft grote invloed op het concentratie profiel. Een ononderbroken gebouwenrij (of wel een massieve wand) resulteert in een grotere concentratiereductie.
- Het heeft bij de configuraties weinig invloed of de gaten tussen (hogere) gebouwen afgeschermd wordt door lagere gebouwen (10 meter) en bomen (10 meter) of niet.
- Vergroten van de afstanden tussen de gebouwen met een factor 2 heeft bij deze configuratie weinig invloed. Het feit of dit wel of geen invloed heeft hangt af van de inrichting van de configuratie. Factoren die een rol spelen zijn: onderlinge afstand van de gebouwen (zowel in windrichting als loodrecht op de windrichting) en de dimensie van de gebouwen (hoogte, breedte). Als de afstand tussen de gebouwen breed genoeg wordt, zal dit uiteindelijk wel uitmaken.
- Het maakt niet veel uit, als in een combinatie van gebouwrijen een lagere rij vervangen wordt door bomen.

#### 4.4 Randeffecten en aanstroming onder een hoek

##### **Randeffecten**

De verwachting is dat door de obstakels de gaswolk deels om de obstakels heen zal bewegen en dat er dus langs de randen hogere concentraties zijn waar te nemen. Dit is aan de hand van de windtunnelmetingen nagegaan door ook de concentraties op 140 meter en 280 meter uit de centrale as (het verlengde van de gaswolk) te beschouwen. In bijlage 3 zijn de meetresultaten weergegeven. Hieruit blijkt dat er met obstakels inderdaad sprake is van hogere concentraties op de 140 meter en 280 meter lijn dan zonder obstakels. Zonder obstakels was op deze locatie geen concentratie meer meetbaar, terwijl dit met obstakels bij alle configuraties wel het geval is. De concentraties op de 280 meter lijn zijn lager dan die op de 140 meter lijn. Het blijkt dat, bekeken over alle configuraties, de concentraties op 140 meter hooguit 13% bedraagt ten opzichte van de concentratie op de hoofdas, in het vrije veld, en dat dit voor 280 meter hooguit 3% bedraagt.

Het blijkt dat hoe beter de configuratie de concentratie reduceert op de centrale as, hoe hoger de concentratie wordt op de parallelle lijnen op 140 m en 280 m van de as: de wolk wordt uitgespreid over een groter gebied. Het maximum van de wolk blijft echter gelegen op de as van de wolk en is lager dan wanneer er geen configuratie wordt geplaatst in de bufferzone. Dit betekent dat de blokkades de gaswolk wel verspreiden maar niet in zijn geheel verplaatsen. In zijn totaliteit gezien dalen de concentraties wel en zijn er positieve resultaten t.a.v. de veiligheid te verwachten. In paragraaf 4.5 wordt verder ingegaan op de relatie tussen de concentratiereductie en het sterftepercentage. Het effect van de bufferzone op de verspreiding wordt schematisch geïllustreerd in Figuur 4-11.



Figuur 4-11 Illustratie van de invloed van de bufferzone op de verspreiding van de gaswolk: na de bufferzone een bredere, maar kortere wolk met lagere concentratie.

### Aanstroming onder een hoek

Naast de rechte aanstroming zijn de configuraties ook aangestroomd onder een hoek van 30 graden. De metingen en de opstelling van de configuraties waren niet specifiek hier op gericht. Hierdoor zijn voor een aantal configuraties geen geschikte meetresultaten beschikbaar.

Voor alle configuraties geldt dat er een concentratiereductie behaald wordt ten opzichte van het vrije veld, voor zowel aanstroming onder een hoek als rechte aanstroming.

Voor de volgende configuraties is de concentratiereductie bij aanstroming onder een hoek lager dan bij rechte aanstroming:

- Configuratie 2: 20 meter massieve wand
- Configuratie 6: 3 gebouwenrijen met oplopende hoogte 10 m, 30 m, 50 m
- Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 m, 2 gebouwenrijen 30 m, 10 m

Voor de volgende configuraties is de concentratiereductie bij aanstroming onder een hoek vergelijkbaar met die bij rechte aanstroming:

- Configuratie 1: 50 meter massieve wand
- Configuratie 3: Bomenrij van 20 meter hoog
- Configuratie 9: 1 gebouwenrij hoogte 30 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)
- Configuratie 10: 1 gebouwenrij hoogte 30 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 50 m)

De metingen aan de configuraties 8 en 11 zijn niet uitgewerkt voor aanstroming onder een hoek omdat de kwaliteit van de meting onvoldoende was. Dit wordt verder toegelicht in bijlage 3.3.

Geconstateerd is dat voor alle configuraties bij aanstroming onder een hoek van 30 graden, een concentratiereductie optreedt ten opzichte van het vrije veld (dus zonder obstakel). Wel blijkt dat bij aanstroming onder een hoek de concentratiereductie voor een aantal configuraties (2,6 en 8a) afneemt ten opzichte van de loodrechte aanstroming. Voor de overige configuraties (1, 3, 9 en 10) is er niet of nauwelijks verschil in de concentratiereductie voor loodrechte aanstroming of aanstroming onder een hoek.

Het effect dat onder een hoek de concentratiereductie afneemt kan worden verklaard doordat bij schuine aanstroming de gaswolk dan schuin over de barrière heen zou

rollen, een soort kurkentrekkereffect. Uit de windtunnelexperimenten bleek echter dat dit negatieve effect bij een aantal configuraties niet of nauwelijks optreedt. Blijkbaar treedt het effect niet op als de eerste rij voldoende hoog is of bij hoge bomen. Bij een definitief ontwerp zou hier nog rekening mee kunnen worden gehouden.

Een uitgebreider literatuur of experimenteel onderzoek naar maatregelen om dit kurkentrekkereffect te reduceren of te voorkomen is tevens aan te bevelen.

#### **4.5 Effecten bufferzone op de reductie van de concentraties en het percentage slachtoffers**

Uiteindelijk is het van belang om te weten in hoeverre het percentage slachtoffers wordt gereduceerd in het achter de bufferzone liggende woongebied. Hiervoor wordt voor de voorbeeldscenario's uitgewerkt in hoeverre de concentraties van de toxische stoffen worden gereduceerd en wat de daarbij behorende letaliteitspercentages zijn. In de uitwerking worden daarbij de afstanden van de geselecteerde voorbeeld-bronnen tot de bufferzone gebruikt.

In paragraaf 4.5.1 wordt een overzicht gegeven van de aannames die gedaan zijn. De uitwerking van het effect van de bufferzone op het letaliteitspercentage wordt gegeven in paragraaf 4.5.2. Bij de uitwerking in deze paragraaf is uitgegaan van configuratie 2: een lange massieve (geheel gesloten) wand van 20 meter hoog. De keuze voor configuratie 2 is tijdens het project gemaakt op basis van de geschatte effectiviteit van de verschillende configuraties en de inpasbaarheid in het gebied. In hoofdstuk 6 wordt hier nader op ingegaan.

##### *4.5.1 Overzicht aannames*

De verkregen concentratiereducties, die volgen uit de windtunnelmetingen, worden toegepast om nieuwe concentratieprofielen te berekenen. Hiervoor wordt eerst een concentratieprofiel berekend, zonder obstakel. Vervolgens wordt de concentratie reductiefactor toegepast, en wordt het gecorrigeerde concentratieprofiel afgeschat, rekening houdend met een obstakel.

Bij deze extrapolatie zijn een aantal aannames en vereenvoudigingen gedaan:

##### *Concentratiereductie voor neutraal gas wordt toegepast op zwaar gas*

De scenario's uit paragraaf 2.2 zijn zwaar gas scenario's. De windtunnel experimenten zijn gedaan voor neutraal gas. Dit is gedaan omdat er geen apparatuur beschikbaar is om in de windtunnel zwaar gas experimenten uit te voeren. In de praktijk zal het echter zo zijn dat zwaar gas dispersie na enige tijd over gaat in neutraal gasdispersie, waarmee het gedrag van de wolk weer overeen komt met de condities zoals die heersen in de windtunnel.

Een zwaar gas wolk, zal in vergelijking met een neutrale gaswolk laag bij de grond blijven en zo moeilijker over een obstakel heenkomen. Een zwaar gas wolk zakt meer uit dan een neutrale gaswolk en wordt breder en korter. Verwacht wordt dat een obstakel voor zwaar gas wolken een groter effect zal hebben dan voor neutraal gas wolken.

##### *De concentratie reductie geldt voor het centrum van de pluim*

De concentratie reductie is gebaseerd op de concentraties die gelden op de as van de pluim.

##### *Rechte aanstroming*

De concentratie reductie geldt voor loodrechte aanstroming van de bufferzone.

#### *Vaste afstand van bron tot obstakel*

Er is aangenomen dat de concentratie reductie onafhankelijk is van de afstand van de bron tot aan de configuratie. Uit uitgebreidere metingen aan configuratie 6 is evenwel gebleken dat deze concentratie reductie iets afneemt, naarmate de bronafstand toeneemt van ca 400 tot 850 meter (d.i. de afstand van de NO<sub>2</sub> en HCN bronnen tot de bufferzone, zie tabel 4.4). Het verdient daarom de aanbeveling om in de ontwerpfase van de bufferzone, aanvullende metingen te verrichten aan de gekozen configuratie en dan ook de afstand van de bron tot aan het obstakel als variabele mee te nemen.

#### *Effecten weercondities*

De windtunnel wordt bedreven met de weercondities van Pasquill klasse D. Er wordt aangenomen dat de concentratie reductie onafhankelijk is van de weerklasse. De reductiefactor volgt uit de verhoudingen van concentratieprofielen. Aan de hand van de windtunnelexperimenten kan deze aanname niet getoetst worden (de tunnel wordt bedreven bij Pasquill klasse D). Het verdient de aanbeveling om deze aanname in vervolgonderzoek te toetsen m.b.v. CFD berekeningen of aan de hand van bestaande experimenten. De verrekening van de windsnelheid komt wel terug in de schaling van de windtunnel resultaten. (in bijlage 2a). Dit heeft echter geen effect op de concentratiereductie. Het gaat daarbij om verhoudingen, bij de zelfde windcondities, en dan wordt de snelheid eruit gedeeld.

#### 4.5.2 *Reductie van effectafstanden en letaliteit door bufferzone*

In de voorgaande paragrafen is onderbouwd dat de aanwezigheid van obstakels in de bufferzone resulteert in een reductie van de concentratie. In deze paragraaf wordt uitgewerkt wat het effect van deze concentratiereductie is op de effectafstand en de letaliteit. Dit wordt uitgewerkt voor de drie voorbeeldscenario's, genoemd in paragraaf 2.2, namelijk:

- vrijkomen van 32 ton ammoniak ten gevolge van het falen van de NH<sub>3</sub> buffertank T3 van de ammoniak ringleiding;
- vrijkomen van 1044 kg blauwzuur veroorzaakt door een leidingbreuk van de toevoerleiding AS191 van de ACN1-installatie;
- vrijkomen van 2,9 ton NO<sub>x</sub> ten gevolge van leidingbreuk van de gastoevoerleiding van absorptiekolom C201 van de SZF5 –installatie.

Er is hierbij uitgegaan van de gegevens die destijds voor het Veiligheidsrapport zijn toegepast en door Chemelot beschikbaar zijn gesteld. Deze scenario's zijn door het RIVM opnieuw berekend met SAFETI-NL. Voor de ontbrekende gegevens heeft TNO zelf met SAFETI-NL aanvullende berekeningen uitgevoerd. Deze berekeningen zijn gemaakt om de situatie met bufferzone en de situatie zonder bufferzone te kunnen vergelijken en om een indicatie te krijgen van de daling in letaliteitspercentages.

Naast de gevolgen van de concentratie reductie op de letaliteit, zijn ook de effectafstanden bepaald voor de levensbedreigende waarden (LBW) en de alarmeringsgrenswaarden (AGW), deze zijn afkomstig uit [2].



Tabel 4-2 Levensbedreigende waarde en alarmeringsgrenswaarden<sup>1</sup> voor HCN, NO<sub>2</sub> en NH<sub>3</sub>.

stof	LBW	AGW
	Alarmeringsgrenswaarde [ppm]	Levensbedreigende waarde [ppm]
HCN	50	10
NO <sub>2</sub>	42	10
NH <sub>3</sub>	417	100

De concentratiereductie heeft tot gevolg dat de letaliteit afneemt. De letaliteit wordt bepaald op basis van de Probit (zoals beschreven in het Paarse Boek [3]). De SAFETI-NL berekening levert als resultaat van de berekening een Probit en een letaliteit als functie van de afstand.

In bijlage 4 is beschreven hoe een gereduceerde Probit en letaliteit kan worden afgeleid uit de concentratieverhouding  $f$  (gereduceerde concentratie/ongewijzigde concentratie) en op basis van de probit constanten. De LBW en de AGW zijn bepaald op basis van de concentraties.

In onderstaande tabel zijn de effectafstanden weergegeven voor de 1% letaliteitsgrens, de LBW en de AGW. Dit is gedaan voor configuratie 2, de massieve wand van 20 meter hoog, waarvoor een concentratieverhouding  $f=0,42$  is afgeleid.

Tabel 4-3 Schadeafstanden bij 3 scenario's met en zonder invulling bufferzone.

Afstand [m]						
	1% let.		LBW		AGW	
	D5	F2	D5	F2	D5	F2
<b>NH<sub>3</sub> ringleiding</b>						
Zonder bufferzone	625	775	1600	1700	> 50 km	> 50 km
20 meter hoge muur	125	400	1250	1300	> 50 km	2 km
% reductie	80%	48%	22%	24%	-	96%
<b>ACN1 (HCN)*</b>						
Zonder bufferzone	360	2300	-	-	-	-
20 meter hoge muur	175	1000	-	-	-	-
% reductie	42%	43%	-	-	-	-
<b>SZF5 (NO<sub>2</sub>)</b>						
Zonder bufferzone	900	900	1430	3780	> 50 km	9700
20 meter hoge muur	650	700	940	2300	2250	6150
% reductie	28%	22%	34%	40%	96%	37%

\* De berekening van LBW en AGW van ACN1(HCN) gaven onbetrouwbare resultaten.

<sup>1</sup> LBW: de concentratie van een stof waarboven mogelijk sterfte of een levensbedreigende aandoening door toxische effecten kan optreden binnen enkele dagen bij een blootstelling van één uur.

<sup>1</sup> AGW: de concentratie van een stof waarboven irreversibele of andere ernstige gezondheidsschade kan optreden door directe toxische effecten bij een blootstelling van één uur.

In bovenstaande tabel wordt aangegeven wat de effectafstanden zijn, als er sprake is van een barrière. Hierbij is aangenomen dat de werking van de barrière resulteert in een concentratiereductie met de (constante) factor  $f$ , over het gehele profiel, vanaf de bron. In werkelijkheid staat de bufferzone op enige afstand van de bron. Deze afstanden variëren voor de drie gekozen scenario's, omdat de installaties op verschillende plekken op de site zijn gelegen. Tabel 4.4 geeft weer wat de kortste afstand is van de bron tot aan de bufferzone, en van de bron tot het begin van de woonwijk.

Tabel 4-4 Afstand tussen bron en bufferzone.

Scenario	Kortste afstand tot bufferzone [m]	Kortste afstand tot woonwijk [m]
NH <sub>3</sub>	1150	1350
ACN1 (HCN)	400	600
SZF5 (NO <sub>2</sub> )	600	800

In tabel 4.5 en tabel 4.6 wordt aangegeven wat de letaliteit is ter plekke van de bufferzone. Tabel 4.5 geeft de letaliteit weer aan het begin van de bufferzone en de en gevolgen van de reductie voor de letaliteit. Tabel 4.6 geeft weer wat er gebeurt net na de bufferzone aan het begin van de woonwijk.

Tabel 4-5 Letaliteitpercentage in het vrije veld net voor en na de bufferzone en achter de massieve wand.

Installatie	Vrije veld voor bufferzone			Vrije veld net na bufferzone			Na bufferzone met wand 20 meter	
	Afstand tot bron	D5	F2	Afstand tot bron	D5	F2	D5	F2
NH <sub>3</sub>	1150	< 1%	< 1%	1350	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%
ACN1 (HCN)	400	< 1%	98%	600	< 1%	88%	< 1%	19%
SZF5 (NO <sub>2</sub> )	600	94%	98%	800	18%	19%	< 1%	< 1%

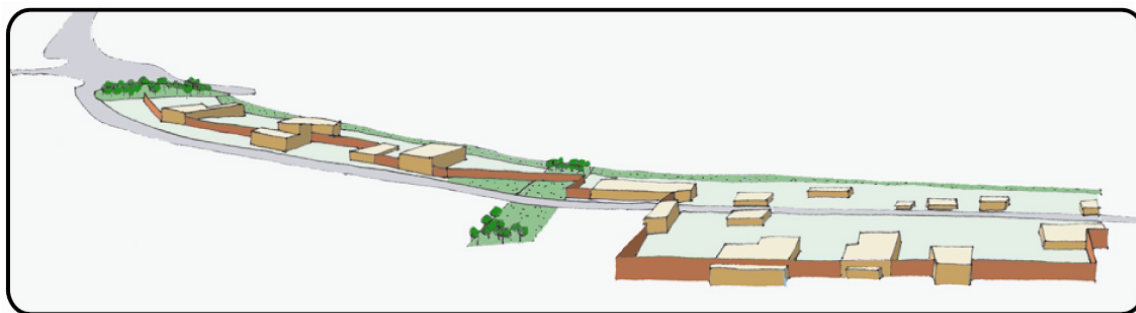
Uit deze tabel is dus af te lezen dat met name bij het NO<sub>2</sub> en het HCN scenario de bufferzone erg effectief is om het aantal letale slachtoffers te reduceren. Bij het gekozen ammoniakscenario zijn de concentraties nabij de bufferzone al lager dan 1% (aangeduid als < 1%). Uit Tabel 4-3 kan beter worden afgelezen dat de bufferzone ook bij dit scenario een positief effect heeft: ten gevolge van de bufferzone neemt de LBW en de AGW afstand af. De LBW –afstand komt op circa 1300 meter te liggen. Dit is net niet meer in de woonwijk achter de bufferzone.

Uit de letaliteitbepaling voor de assen op 140 meter en 280 meter parallel aan de hoofdas, is gebleken dat voor alle scenario's geldt dat de concentratie daar weliswaar toeneemt ten opzichte van het vrije veld, maar dat het letaliteitpercentage wel lager is dan 1%. Zoals al aangegeven in paragraaf 4.4 is er ten gevolge van de bufferzone sprake van een kortere, maar bredere wolk met een lagere concentratie. Hierbij is het aannemelijk dat (uitgaande van een min of meer homogene verdeling van de bevolking) dit tot een lager aantal slachtoffers leidt.

Om de reductie in aantal slachtoffers beter te kunnen kwantificeren, zouden er windtunnelmetingen gedaan moeten worden, waarbij concentraties worden gemeten op een fijnmaziger rooster. Daarnaast zijn gegevens over de aanwezige bevolking noodzakelijk. Het inschatten van het aantal gewonden is lastig, omdat daar geen goede, wetenschappelijk onderbouwde kwantitatieve rekenregels voor het berekenen van gewonden beschikbaar zijn.

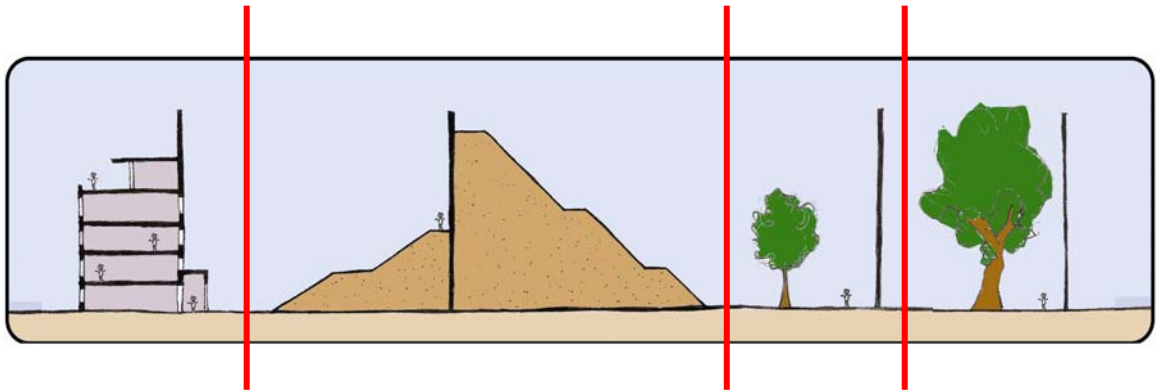
#### 4.6 Stedenbouwkundige inpassing

Voor de bufferzone Kampstraat is als oplossing gekozen een muur over de volle lengte van het plangebied, met een constante hoogte van 20 meter. De muur kan op verschillende plaatsen worden geïntegreerd met gebouwen van 20 meter hoog (of evt. hoger). Deze hoogte staat gelijk aan een gebouw van zes verdiepingen. Voor deze locatie in gemeente Sittard-Geleen is dat vrij hoog, omdat de locatie Kampstraat geen hoogbouwlocatie is. Om de muur zo veel mogelijk uit het zicht te houden (en wegens effectiviteit in het weren van toxische gassen) kan deze muur zo ver mogelijk af komen te liggen van de Kampstraat en de aangrenzende woonwijk, dus aan de kant van Chemelot (Figuur 4-12).



Figuur 4-12 Mogelijke ligging wand van de wand.

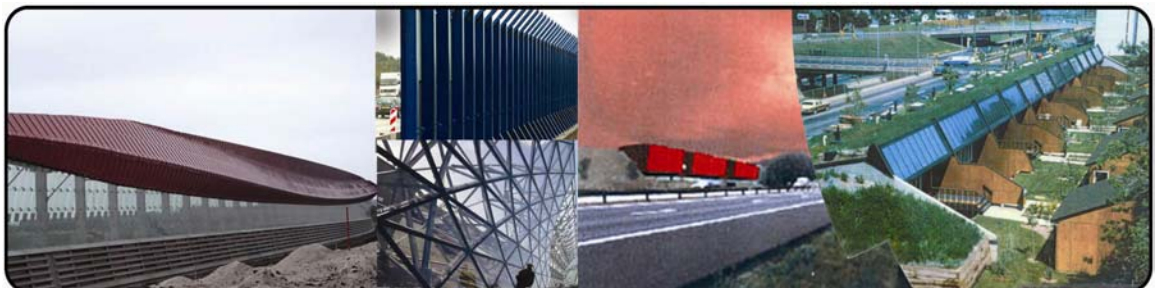
Daar waar de muur, wegens de smalte van de strook op dat stuk, wel dicht langs de weg komt te liggen, kan er voor manieren worden gekozen om het zicht op de hoge muur zo veel mogelijk te beperken of juist aangenaam te maken. Hiervoor zijn verschillende mogelijkheden, waarvan er een paar in Figuur 4-13 zijn weergegeven. Gekozen kan worden de muur te integreren met de gebouwen die zich op het bedrijventerrein zullen vestigen. Het kan zijn dat deze gebouwen zelf ook 20 meter of meer hoog zijn, waardoor de gevel van het gebouw onderdeel van de muur kan worden. Wanneer een gebouw lager is dan 20 meter, kan de gevel nog steeds in de muur geïntegreerd worden, en het stuk muur dat boven het gebouw uitsteekt bijvoorbeeld voor reclame worden gebruikt. Door muur en gebouwen zoveel mogelijk met elkaar te integreren, kan er aanzienlijk worden bespaard op de kosten van de aanleg van de muur.



Figuur 4-13 Mogelijkheden om de muur uit het zicht te onttrekken.

Andere mogelijkheden zijn de muur omgeven met een talud (parkachtig ingericht kan het een aangename plek worden om te verblijven), of de muur omgeven met bomen en begroeiing. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat alleen volwassen bomen van de eerste soort, zoals platanen, eiken, kastanjes e.d. een hoogte van 20 meter of meer bereiken. Bij keuze voor een talud (aarden wal) moet wel rekening worden gehouden met het extra ruimtebeslag (afhankelijk van de gekozen helling, in dit voorbeeld 25 tot 30 meter aan beide zijden).

De muur laten verspringen, her en der onderbreken met waterschermen e.d. kan ook een manier zijn om de muur beter in zijn omgeving te integreren. Ook kan er gekozen worden om de muur integraal met zijn omgeving mee te ontwerpen. Inspiratie kan gehaald worden uit een aantal voorbeelden van geluidsschermen langs snelwegen, waarbij niet alleen het scherm zelf ontworpen is, maar ook gebouwen in het scherm zijn geïntegreerd (afbeelding 3). Aan een dergelijke oplossing zijn uiteraard wel hoge kosten verbonden.



Figuur 4-14 v.l.n.r. geluidswal langs A2, geluidsscherm met luchtfilter, geluidswal volgens ontwerp van Kas Oosterhuis, geluidswal met geïntegreerd mediacentrum in Ede-Wageningen volgens ontwerp van Mecanoo, voorbeeld van gebouwen in een wal.

De kosten van de wand zijn sterk afhankelijk van de gekozen uitvoering. Aangezien de muur bijvoorbeeld wordt gecombineerd met gebouwen die in de bufferzone zijn voorzien, kunnen de kosten worden gedekt door de opbrengsten die uit de gebouwen voortkomen.

## 5 Actieve schermen

Actieve (sproei)systemen zoals waterschermen, mist/nevel- en stoomgeneratoren kunnen een barrière-effect hebben op de dispersie van de gaswolk en daardoor ongewenste gevolgen voor de omgeving verminderen dan wel voorkomen. In dit hoofdstuk wordt een beschrijving gegeven van de toepassing, werking, uitvoering en effectiviteit van sproeisystemen. Aangezien de meeste toepassingen betrekking hebben op waterschermen, en stoom- en luchtschermen ook enkele nadelen hebben t.o.v. waterschermen ligt het accent bij de uitwerking op waterschermen. Hierbij wordt ook een beschouwing gemaakt van de technische en financiële haalbaarheid van het plaatsen/beheren van watersystemen in de bufferzone.

### 5.1 Toepassingen

In de chemische industrie, offshore, scheepsvaart en door de brandweer worden watersproeisystemen hoofdzakelijk gebruikt om materialen, installaties, opslagtanks, gebouwen, e.d. te beschermen tegen warmtestraling en tegen het ontstaan van brandbare gasmengsels. Hierbij kan een opslagtank worden beschermd door direct contact met water (deluge- of sprinklersysteem<sup>1</sup>) of door een barrière (waterscherm/gordijn). Ter voorkoming van het ontstaan van een brandbaar gasmengsel moet de concentratie onder de LEL worden gebracht, in de regel een aantal volumepercenten (vol%).

Een andere toepassing van watersproeisystemen, het voorkomen van blootstelling aan toxische gassen, wordt toegepast om beperkte vrijgekomen hoeveelheden te neutraliseren. Voor toxische gassen is de schadelijke concentratie in ordegrootte van 'part per million' (ppm = 0,0001 vol%). Deze watersproeisystemen worden over het algemeen dichtbij en rondom mogelijke bron(nen) van uitstroming geplaatst. In de literatuur zijn geen voorbeelden bekend waarbij watersproeisystemen buiten de fabrieksgrenzen op afstand van de bron worden toegepast om de omgeving te beschermen. Ingeval een watersproeisysteem in de bufferzone zou worden geïnstalleerd, zou dat een innovatieve toepassing zijn.

Het verschil tussen het reduceren naar 'part per million' en naar volumepercenten bedraagt een factor 1.000 tot 10.000, afhankelijk van het gewenste niveau. Vanwege dit feit is de mitigerende werking van de watersproeisystemen bij toxische gassen moeilijker te bewerkstelligen dan bij brandbare gasmengsels.

In de literatuur en op internet, zie referenties, is gezocht naar de toepassingen van watersproeisystemen in de chemische en petrochemische industrie. Kort samengevat worden watersproeisystemen in de volgende situaties toegepast:

- Het voorkomen van de vorming van een brandbaar gasmengsel (verdunding van de concentratie beneden de LEL);
- Het voorkomen van het in contact komen van een brandbaar gasmengsel met een ontstekingsbron (barrière);
- Het reduceren van de effecten van een brandende of exploderende gaswolk in het geval een brandbaar gasmengsel wordt ontstoken (blussing);
- Het voorkomen van opwarming van een object bij warmtestraling (barrière);
- Het voorkomen van opwarming van een object bij warmtestraling (koeling<sup>1</sup>);

<sup>1</sup> In korte tijd worden grote hoeveelheden water (kleine druppels) losgelaten op een brand. Deluge- en sprinklersystemen worden verder niet uitgewerkt in dit rapport.

- Het voorkomen van blootstelling aan een toxische gaswolk na een gasontsnapping (concentratie beneden de schadelijke concentratie brengen).

Behalve hiervoor genoemde situaties worden watersproeisystemen ook toegepast om geluids- c.q. schokgolven te absorberen. Tijdens de start van de spaceshuttle motoren worden grote hoeveelheden water gedumpt om te voorkomen dat de lanceertoren en de spaceshuttle zelf beschadigd raken. Om de geluidsoverlast bij Schiphol te verminderen wordt op dit moment onderzocht of watergordijnen langs de start- en landingsbanen geluidsgolven kunnen absorberen. De verdere uitwerking in volgende paragrafen is gericht op het beïnvloeden van de effecten van een toxische gaswolk.

## 5.2 Mitigerende werking

Een watersproeisysteem kan de vloeistof op verschillende manieren verspreiden, fijn verneveld of dikke druppels, zowel verticaal (van boven naar beneden of andersom) als horizontaal of onder een hoek. De door de gaswolk bewegende vloeistofdruppels kunnen een aantal effecten teweegbrengen, te weten:

1. *Barrière-effect(mechanisch)*.  
Een barrièrewerking treedt op als de impuls van de nevel groter is dan die van de gaswolk.
2. *Verdunningseffect (mechanisch)*.  
De impuls van de nevel veroorzaakt turbulentie, waardoor de opmenging met de omringende lucht wordt vergroot.
3. *Opwaarts impulseffect (mechanisch)*.  
Een omhooggaande impuls van de nevel wordt overgedragen aan de gaswolk, die daardoor omhoog wordt 'geduwd'.
4. *Opwarmingseffect (thermisch)*.  
De warmtecapaciteit van de vloeistof wordt overgedragen aan de gaswolk, waardoor verticale dispersie van de wolk wordt bevorderd.
5. *Koeffect (thermisch)*.  
De warmtecapaciteit van de gaswolk wordt overgedragen aan de vloeistof, waardoor hete gassen afkoelen en branden/explosies doven.
6. *Absorptie/neutralisatie-effect (fysisch/chemisch)*.  
Diffusie van gas en vloeistof na een verblijftijd via beschikbare oppervlakte (massatransport), met of zonder een neutraliserende (chemische) reactie.

### Ad 1.) Barrière-effect

Een gericht water/nevelgordijn kan dienen als barrière voor een aandrijvende gaswolk dan wel de voortgang van de wolk vertragen. Het gordijn kan zowel op- als benedenwaarts gericht zijn. Een naar beneden gericht nevelgordijn heeft een groter vertragend effect op de wolk dan een naar boven gericht systeem en kan de wolk voor een korte periode tegenhouden. Een benedenwaarts gordijn sleept lucht mee naar beneden en verplaatst de lucht na contact met de grond horizontaal naar de buitenkant (lateraal). Zolang de snelheid van de in beweging gezette luchtstroom groter is dan die van de gaswolk, kan het gordijn een effectieve barrière zijn. Een ander voordeel van een naar beneden gericht systeem is dat uitregening altijd op de gewenste locatie plaats zal vinden, namelijk op grondniveau.

### Ad 2.) Verdunningseffect

Verdunning van de schadelijke gaswolk wordt bewerkstelligd, via een water/ nevelgordijn, door turbulentie te creëren in de omringende lucht.

De turbulentie in de omringende lucht leidt er toe dat lucht wordt meegeslept in de gaswolk, wat zal resulteren in meer verdunning en dispersie.

Hoe dichter het sproeisysteem zich bevindt bij de bron, hoe kleiner het systeem kan worden uitgevoerd en hoe effectiever het systeem is in het verdunnen van de concentratie. Een opwaarts systeem zal in de regel efficiënter zijn in het creëren van turbulentie, daarmee efficiënter in het verdunnen van de concentratie aan schadelijk gas, dan een naar beneden gericht systeem. Een horizontale sproei-installatie, tegenwinds geïnstalleerd, geeft voor zwaar gas het meest verdunnende effect. Hierbij wordt opgemerkt dat verdunning van een zwaar gaswolk leidt tot een verlaging van de dichtheid en daarmee een reductie van de laterale verspreiding (opzij langs het scherm). De laterale verspreiding is weer gekoppeld aan het meeslepen van omgevingslucht.

### **Ad 3.) Opwaarts impulseffect**

Bij naar boven gerichte sproeisystemen wordt een effect gecreëerd, waarbij de hoogte van de gaswolk boven de grond wordt verhoogd en gedwongen wordt met de wind meegaand te stijgen. Het gevolg is een verlaging van de concentratie aan schadelijk gas op grondniveau of een verlaagde kans op ontsteking van een brandbaar gas. De opwaartse impuls van de vloeistoffase wordt overgedragen aan de gaswolk, die daardoor als het ware omhoog wordt 'geduwd'.

### **Ad 4.) Opwarmingseffect**

Het opwarmen van gekoelde toxische gassen bevordert de verticale dispersie doordat de dichtheid van de wolk wordt gereduceerd met als gevolg een grotere opwaartse druk van de wolk ten opzichte van de omringende lucht. Op grondniveau wordt de concentratie dan verlaagd. Tot vloeistof verdichte gassen, als ammoniak en stikstofdioxide, gedragen zich in eerste instantie als zwaar gassen. Bij de lage opslagtemperaturen van de gassen is de dichtheid groter dan die van de omringende lucht. Zodra warmteoverdracht plaatsvindt tussen de gaswolk, omringende lucht en vloeistofdruppels, wordt het zwaar gas opgewarmd en lichter dan lucht.

### **Ad 5.) Koeffect**

Bij offshore modules wordt veelal gebruik gemaakt van de koelende en smorende eigenschappen van water om ontsteking van brandbare gaswolken te voorkomen, de verbranding te onderdrukken en de brand te blussen. Een ander effect is een reductie van vlamsnelheden in explosies, waarbij wel voorkomen moet worden dat de vlamsnelheid juist wordt versneld door de, door het water/nevelgordijn gegenereerde turbulentie.

### **Ad 6.) Absorptie/neutralisatie-effect**

Watergordijnen kunnen zeer effectief zijn in het absorberen van sterk in water oplosbare gassen zoals ammoniak, zwaveldioxide en waterstofcyanide. Voor deze gassen heeft een watergordijn zowel een verdunnend als absorberend effect.

Voorwaarde voor een effectieve verwijdering van de schadelijke componenten is dat het gordijn zodanig moet zijn ontworpen dat het contactoppervlakte en de verblijftijd met het gas en de vloeistof gemaximaliseerd worden. De oppervlakte is een functie van druppelgrootteverdeling.

Het effect van de absorptie kan versterkt worden door additieven te gebruiken die een chemische reactie aangaan met de toxische stof, waardoor deze wordt geneutraliseerd. Alkalische vloeistoffen zoals natronloog of kalkmelk kunnen een neutraliserende

werking hebben. Er dient rekening te worden gehouden met het feit dat reactieproducten ook nog een schadelijke werking kunnen hebben. Bijvoorbeeld de reactie tussen water en stikstofdioxide onder vorming van salpeterzuur.

### 5.3 Uitvoering

Over het geheel genomen wordt bij een watersproeisysteem een mitigerende vloeistof onder druk via een aantal straalpijpen (nozzles) in een bepaalde richting gedispergeerd of verstoven. Een tweetal voorbeelden is in onderstaande figuur afgebeeld.



Figuur 5-1 Ketelwagen losstation (bron: TNO) en offshore platform (bron: www.rigcooling.com).

In de chemische industrie worden watersproeisystemen voornamelijk toegepast bij laad- en losplaatsen van toxische bulkproducten als ammoniak, chloor en zwaveldioxide, e.d. en bij procesinstallaties waarin reactanten als waterstofcyanide of -arseen, waterstof-fluoride en fosgeen in voorkomen. Het waterscherm dient dan als second containment ingeval de integriteit van de omhulling faalt. Anderzijds worden bij ongewenste procesafwijkingen gaswassers of scrubbers, in combinatie met een breekplaat, toegepast om toxische gassen af te vangen.

#### Algemeen

Door een pomp wordt de vloeistof vanuit het voorraadvat of blusvijver door de verdeelleiding (manifold) naar de straalpijpen gepompt. Op de verdeelleiding zijn de straalpijpen gemonteerd, die de vloeistof verstuiven in de omgeving (in contact brengen met de gaswolk). De pomp kan aangedreven worden door zowel een elektrische als gasgedreven motor. Wanneer sprake is van schadelijke reactieproducten of additieven wordt het gesproeide water weer opgevangen en desnoods weer teruggevoerd naar het voorraadvat. Een watersproeisysteem bestaat uit de volgende onderdelen:

- Straalpijpen (nozzles);
- Verdeelleiding (manifold);
- Voorraad(vat);
- Pomp;
- Opvangsysteem + zuurneutralisatie (optioneel);
- Detectie- en activeringsysteem.

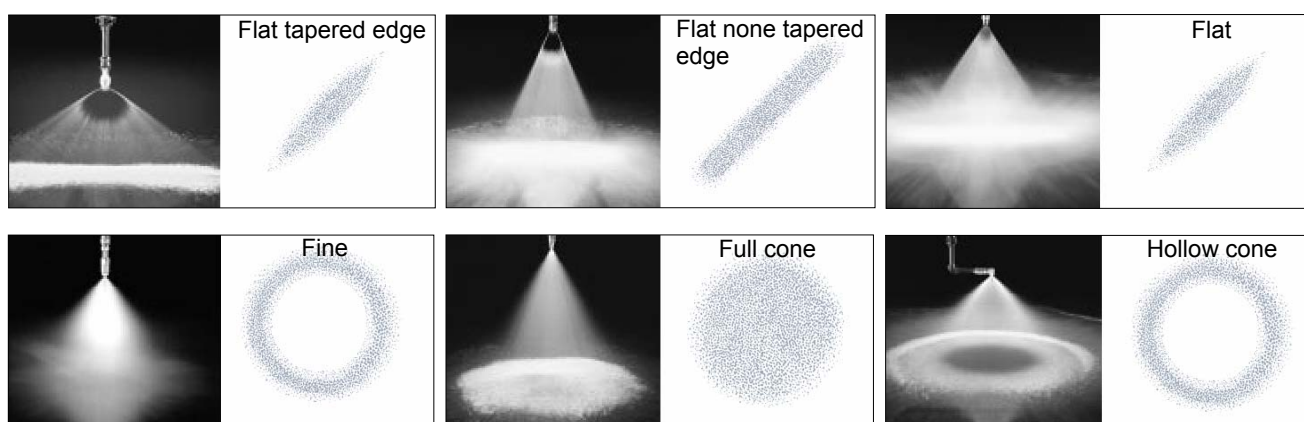


### Straalpijpen

De grootte van door de straalpijpen geproduceerde druppels is een belangrijke parameter van een sproeisysteem.

De druppelgrootteverdeling is bepalend voor het beschikbare contactoppervlak voor absorptie en voor de hoeveelheid beweging van de druppels voor impulsoverdracht. Afhankelijk van het straalpijptype wordt een bepaald sproeipatroon, druppelgrootteverdeling, vloeistofcapaciteit of/en initieel impulstempo geproduceerd.

Een variëteit aan straalpijpen wordt toegepast bij sproeisystemen. In de onderstaande figuur zijn een aantal voorbeelden van verschillende types en sproeipatronen weergegeven. De verschillende types worden geclassificeerd door de vorm van de nevel (kegelvormig, in het platte vlak liggend, waaivormig of mistvorming, hol dan wel volledig gevuld).



Figuur 5-2 Diverse sproeipatronen van straalpijpen (bron: www.spray.com).

De capaciteit van een straalpijp is gekoppeld aan de waterdruk en een uitstroomcoëfficiënt van de straalpijp. De druppelgrootte is afhankelijk van de waterdruk, de capaciteit en het sproeipatroon. Verder zijn temperatuur, dichtheid, viscositeit en oppervlaktenspanning belangrijke parameters die de performance van de straalpijp bepalen.

## 5.4 Effectiviteit

Uit veldexperimenten en literatuur blijkt dat water/nevelgordijnen een hoog verwijderingsrendement, uiteenlopend van 40% tot 90%, kunnen bereiken, maar dat het rendement sterk afhangt van gordijnconfiguratie, nozzle parameters, release condities en meteorologische omstandigheden. Rekening houdend met deze factoren is een beperking van de schaalgrootte wenselijk. In bijlage 5 is een overzicht gegeven van de parameters die in ogenschouw moeten worden genomen. In het kort gaat het meest efficiënte watergordijn uit van:

- Groot waterdebiet<sup>1</sup> met hoge pompdruk (watersnelheid);
- Dicht bij de bron of bij het te beschermen object;

<sup>1</sup> De verhouding vrijgekomen stof ten opzichte van de hoeveelheid benodigd water wordt volgens de literatuur geschat op een factor 20 tot 40. Deze vuistregel is gebaseerd op het afvangen van waterstof-fluoride

- In het veld verticaal naar boven gericht;
- Bij de bron verticaal naar beneden of horizontaal van links of rechts;
- Opgesteld in een dubbele configuratie met een ander type gordijn;
- Geen additieven gebruiken bij goed in water oplosbare gassen;
- Absorptie-effect bij druppelgroottes tussen 100 en 300 µm;
- Barrière-effect bij grote waterdruppels.

In de meest ideale situatie kan een watergordijn worden vergeleken een scrubberinstallatie. Een scrubberinstallatie is ontworpen om te allen tijde een bepaald gasaanbod te reduceren tot een bepaald niveau. Dit is mogelijk omdat belangrijke parameters als contactoppervlak, menging, verblijftijd, absorptie niet worden beïnvloed door onzekere omstandigheden als het weer.

### **Rendement**

Gezien het feit dat de ideale situatie in dit geval (in een bufferzone op enige afstand van de bron) niet kan worden gerealiseerd, wordt (conservatief) aangenomen dat een enkelvoudig waterscherm een verwijderingrendement van 50% zal bereiken. Een dubbel uitgevoerd waterscherm heeft dan een gecombineerd rendement van 75%. Een rendement tussen 50% en 75% is vergelijkbaar met de effectiviteit van de in het vorige hoofdstuk beschreven passieve inrichtingsmaatregelen.

### **Configuratie**

Hoe dichter het systeem bij de bron wordt geplaatst, hoe beter de onzekere (met name meteorologische) factoren kunnen worden beheerst. Voor de bufferzone is dit niet mogelijk. Wel kan de bufferzone zodanig worden ingericht zodat de onzekere factoren beter worden beheerst. Bijvoorbeeld door te zorgen dat het watergordijn beter wordt afgeschermd tegen weersinvloeden of zorgen voor een schaalverkleining waardoor het aantal vrijheidsgraden wordt verminderd. In de projectgroep is er daarom voor gekozen om de optie waterschermen te beschouwen in combinatie met de inrichting van de bufferzone. Hierbij zou dan met name op die locaties waar afscherming door een massieve wand niet mogelijk is, omdat er bijvoorbeeld een verbindingsweg nodig is tussen het bedrijventerrein en de achterliggende omgeving, dit “gat in de wand” wordt opgevuld met een waterscherm, dat op het moment van een calamiteit wordt geactiveerd. De lengte van het watergordijn is daarmee afhankelijk van de breedte van dergelijk “gat in de wand”. De verwachting is dat er locaties zijn waarbij ten minste een afstand van 40 tot 150 m moet worden overbrugd.

De configuratie van een watergordijn wordt daarmee in wezen bepaald door de inrichting en gebruiksfunctie van de bufferzone. Een naar boven gericht systeem bevindt zich op grondniveau en dient te worden vrijgehouden van externe invloeden als voetgangers of gemotoriseerd verkeer. Een naar beneden gericht systeem kan op hoogte worden geïnstalleerd vrij van alle invloeden op de begane grond.

De minimale hoogte wordt bepaald door de hoogte van een mogelijke gaswolk of door de gebruiksfunctie (bijv. doorgang voor vrachtwagens). In dit kader is bijvoorbeeld het loslaten van hete stoom (temperatuur circa 180 - 200°C) of alkalische additieven in een omgeving waar personen onbeschermd kunnen lopen niet wenselijk. Het is aannemelijk dat een waterscherm zal worden toegepast voor ontsluiting van de bufferzone, waardoor de hoogte tenminste 4,5 m zal bedragen.

De configuratie (en daarmee ook de waterhoeveelheid) wordt bepaald door de functionele eisen die worden gesteld aan het waterscherm. Met de gekozen passieve buffer, een wand van 20 meter hoog, wordt een concentratiereductie van ruim 50%

gehaald. Op grond hiervan zou ook voor het waterscherm kunnen worden geëist dat het scherm gedurende 30 minuten de schadelijke concentratie van een gaswolk met minimaal 50% moet reduceren. Om onzekerheden te minimaliseren is een dubbele uitvoering van het waterscherm wenselijk. Het lengtedeel waarmee de bufferzone zal worden uitgerust zal liggen tussen 40 en 150 m. Het waterscherm heeft dan een lengte hebben die ligt tussen 80 en 300 m en een hoogte van minimaal 4,5 m. Deze vereisten zullen als uitgangspunt worden genomen in de verdere uitwerking t.a.v. de benodigde waterhoeveelheid en de kosten.

### **Beperkende factoren**

Ongeacht de gekozen configuratie of schaalgrootte is de afvoer van met zuren verontreinigd water naar het oppervlakte water een punt van aandacht. Rioolwaterzuiveringsinstallaties (gemeentelijk dan wel Chemelot) kunnen een plotseling aanbod van grote hoeveelheden met zuur verontreinigd water niet aan.

De opvang van verontreinigd sproeiwater dient te worden gebufferd en gescheiden (van de stadsriolering) opgevangen. De buffering kan worden gecombineerd met de watervoorraad, waarbij het verontreinigde sproeiwater wordt teruggevoerd naar de voorraad. Hierbij moet rekening worden gehouden met mogelijke verzadiging van de watervoorraad, waardoor de effectiviteit zal verminderen. Deze recyclingoptie zal de benodigde waterhoeveelheid met circa een factor 3 reduceren. Indien de riolering waarin het vervuilde water wordt getransporteerd, is aangesloten op het rioleringsstelsel van Chemelot en de hieraan verbonden Integrale waterzuiveringsinstallatie (IAZI) van Chemelot, kan gebruik worden gemaakt van een aantal grote calamiteitenbuffers (7.550, 20.000 en 50.000 m<sup>3</sup>). Deze kan voorkomen dat de zuivering nadelig wordt beïnvloed.

Een belangrijk aandachtspunt is de hoogte van het waterscherm. In het vorige hoofdstuk wordt voor de gebouwde wanden uitgegaan van hoogtes van 20 meter of meer. Indien deze hoogte ook voor een waterscherm zou moeten worden toegepast, zou dit zeer grote waterhoeveelheden vergen en zou het effect van verwaaiing ook een grotere rol gaan spelen. In de verdere uitwerking wordt daarom uitgegaan van minder hoge waterschermen (van ca. 4,5 meter, vergelijkbaar met de doorrijhoogte van een viaduct). Bij enkel een waterscherm van 4,5 meter hoog geldt dat een deel van de wolk ook over het scherm heengaat. Er zijn geen goede gegevens beschikbaar over of en hoe snel deze wolk dan weer naar de grond daalt. Hierbij zijn vergelijkbare effecten als bij een (lage) muur te verwachten. Het (lage) waterscherm zou ook kunnen worden aangevuld door boven het scherm de gebouwde wand door te trekken. Het waterscherm vult dan in feite het gat in de poort op.

Een ander punt dat in beschouwing moet worden genomen, betreft de bedrijfszekerheid van het waterscherm. De bedrijfszekerheid is gekoppeld aan de reactietijd, de kans op falen gegeven een vraag, en het inspectie- en testinterval. Hierbij wordt opgemerkt dat de wijze van signalering en activering (automatisch of handmatig) niet is beschouwd. Dit is wel een belangrijk aspect in de uiteindelijke effectiviteit.

Aangezien het systeem zich in de openlucht zal bevinden, dienen de straalpijpen en bovengronds leidingwerk watervrij te worden gehouden om bevrozing te voorkomen. Dit betekent dat het sproeisysteem enige tijd niet beschikbaar zal zijn tot alle meters leiding gevuld en op druk zijn. Deze reactietijd kan in orde grootte liggen van tientallen

seconden. Indien de snelheid van de gaswolk groot en de afstand tot de bufferzone klein zijn, kan een te lange reactietijd leiden tot blootstelling aan hogere waarden.

Uit ervaring van TNO blijkt dat de faalkans, gegeven een blusvraag, van pompgedreven blussystemen ligt tussen 5 en 15%. Een en ander is afhankelijk van het inspectie- en testinterval waarbij het systeem daadwerkelijk functioneel wordt getest. De betrouwbaarheid van de pomp/motorcombinatie is de bepalende factor voor de bedrijfszekerheid van het totale systeem. Gecertificeerde blussystemen gaan uit van een tweewekelijkse functionele test van de pomp(en) uitgevoerd door gekwalificeerd personeel in combinatie met een jaarlijkse onderhoudsbeurt. Omdat het sproeisysteem zich in de openlucht zal bevinden, zal periodiek een volledige test moeten plaatsvinden die alle componenten beproeft. Een aannemelijk testinterval is één keer per drie jaar. Ingeval bovengenoemde faalkans te groot wordt bevonden, moeten redundante pompconfiguraties in ogenschouw worden genomen.

Een slijtage van de straalpijpen is niet te verwachten bij een totaal van 4 draaiuren over een periode van 20 jaar. De straalpijpen kunnen theoretisch wel verstopt raken.

### Benodigde waterhoeveelheid

De berekening van de hoeveelheid water is gerelateerd aan de concentratie schadelijk gas. Afhankelijk van de concentratie toxische gas in de gaswolk kan worden uitgerekend hoeveel water nodig om de concentratie met 75% te reduceren.

Voor de berekeningen wordt aangenomen dat de schadelijke dosis wordt bepaald door de maximum concentratie ter plaatse van de bufferzone<sup>1</sup>. Hierbij zijn dezelfde drie scenario's beschouwd als in de voorgaande hoofdstukken. In Tabel 5-1 is de concentratie van de gaswolk gegeven voor de drie scenario's ter hoogte van de bufferzone. Deze gegevens zijn afgeleid uit de in het vorige hoofdstuk vermelde berekeningen met SAFETI-NL.

Tabel 5-1 Concentraties ter hoogte van de bufferzone.

Stof	Kortste afstand tussen bron en bufferzone (m)	concentratie bij D5 (ppm)	concentratie bij F2 (ppm)
HCN	400	58	490
NO <sub>2</sub>	600	6.935	5.530
NH <sub>3</sub>	1.150	3.182	2.037

Op basis van deze concentraties is berekend wat voor de verschillende scenario's de benodigde hoeveelheid water is voor een waterschermlengte van 40 respectievelijk 150 meter lengte. De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in tabel 5-2. In bijlage 5 is een voorbeeldberekening gegeven.

<sup>1</sup> De schadelijke concentratie waaraan personen worden blootgesteld verloopt gedurende de blootstellingstijd. Voor de berekeningen is sprake van een overschatting.

Tabel 5-2 Benodigde waterhoeveelheden voor een dubbel uitgevoerd watergordijn.

Stof	Weerklasse D5						Weerklasse F2					
	Debiet (dm <sup>3</sup> /s)		Voorraad (m <sup>3</sup> )		Buffer (m <sup>3</sup> )		Debiet (dm <sup>3</sup> /s)		Voorraad (m <sup>3</sup> )		Buffer (m <sup>3</sup> )	
	40 m	150 m	40 m	150 m	40 m	150 m	40 m	150 m	40 m	150 m	40 m	150 m
HCN	2	9	4	16	1	5	8	29	14	53	5	17
NO <sub>2</sub>	280	1.051	504	1.891	161	603	89	335	161	603	51	192
NH <sub>3</sub>	<b>128</b>	<b>478</b>	<b>203</b>	<b>861</b>	<b>73</b>	<b>275</b>	33	122	59	220	19	70

Uit de tabel is af te lezen dat de benodigde watercapaciteit verschilt per scenario. Dit betekent dat de kosten van het systeem ook afhangen van de gekozen scenario's die effectief bestreden moeten worden. De tabel geeft aan dat het mitigeren van een stikstofdioxidewolk de grootste watercapaciteit behoeft, waarbij geldt bij een 75% reductie de concentratie nog niet voldoende naar beneden is gebracht om dodelijk letsel helemaal te voorkomen. In de verdere uitwerking van de specificaties van het watersproeisysteem is er voor gekozen om dit af te stemmen op het vrijkomen van een ammoniakwolk (zie vetgedrukte waarden in de tabel).

Een ander aspect dat de waterhoeveelheid beïnvloedt is de keuze van mitigerende effecten (barrière, absorptie, e.d.) en de drijvende kracht (concentratieverschillen in relatie tot mogelijke vloeistofverzadiging). Hierdoor kan de benodigde capaciteit hoger uitkomen dan hierboven is berekend.

## 5.5 Kostenraming

Voor het nagaan van de financiële haalbaarheid van waterschermen is uitgegaan van globale kostenramingen (ordegroottes). Hierbij is uitgegaan van courante systemen, ramingen van leveranciers en het DACE-prijzenboekje. De opgegeven kosten zijn exclusief BTW en montagekosten, tenzij anders is aangegeven. De volgende schermconfiguraties zijn uitgewerkt:

- 40 m configuratie (460 m<sup>3</sup>/hr),
- 150 m configuratie (1.720 m<sup>3</sup>/hr).

Hierbij is uitgegaan van een schermhoogte van 4,5 meter.

Gezien de stijgende staalpijzen van de afgelopen jaren kunnen de materiaalkosten voor buisleidingen sterk fluctueren, in het bijzonder de grotere diameters. Hierdoor kunnen de uiteindelijke kosten hoger uitkomen dan de geraamde kosten. De engineeringkosten bedragen ruwweg 10 tot 20% van het totale bedrag.

De kostenraming heeft betrekking op een dubbel uitgevoerd waterscherm met een lengte van 40 of 150 m. De beoogde sproeiers hebben een werkdruk van 7 bar. Maximale snelheid in de leidingen is 3,5 m/s. Alle materialen die worden blootgesteld aan de buitenlucht worden uitgevoerd in roestvaststaal (AISI 304). De pomp(en), elektromotor(en), afsluiters e.d. bevinden zich samen met de schakeltechnische installaties in een verwarmde pompkamer. Ter vergelijking wordt een dieselmotorgedreven pomp ook beschouwd. In een prefab pompkamer kunnen maximaal twee pomp/motorcombinaties worden geplaatst. De energievoorziening voor de pompen (transforma-

toren, hoogspanningskabels, overige bekabeling, e.d.) is niet meegenomen in de begroting.

#### 40 m configuratie

– 104 sproeiers, flat tapered edge, onderlinge afstand 800 mm	€4.000
– 1 manifold (80 m) + 1 buisleiding (150 m), diameter 10", gelaste pijp, inclusief montage, exclusief 3/4" aansluitingen	€75.000
– 1 centrifugaalpompe, 570 m <sup>3</sup> /hr, 80 mwk + 1 elektromotor, 250 kW	€24.000
of + 1 dieselmotor 250 kW	(optie) €31.000
– 1 prefab pompkamer, inclusief afsluiters, schakelkasten, e.d.	€40.000
	<u>Totaal €143.000</u>

#### 150 m configuratie

– 380 sproeiers, flat tapered edge, onderlinge afstand 800 mm	€14.000
– 1 manifold (300 m) + 1 buisleiding (150 m), diameter 16", gelaste pijp, inclusief montage, exclusief 3/4" aansluitingen	€243.000
– 3 centrifugaalpompen, 570 m <sup>3</sup> /hr, 80 mwk + 3 elektromotoren, 250 kW	€72.000
of + 3 dieselmotoren 250 kW	(optie) €93.000
– 2 prefab pompkamers, inclusief afsluiters, schakelkasten, e.d.	€80.000
	<u>Totaal €409.000</u>

#### Operationele kosten per jaar

– Waterverbruik, industrieel water; circa 110 m <sup>3</sup> /jaar (verdamping) + 60 m <sup>3</sup> /jaar (functionele test per 3 jaar)	€100
– Stroomverbruik, industrieel tarief, 40.500 kWh/jaar	€4.000
– Onderhoudscontract pomp, inclusief testen	€2.500
– Slijtage en corrosie (weinig bedrijfsuren en rvs)	€ beperkt
	<u>Totaal €6.600/jr</u>

#### Riolering/grondwerken

– Voorraad/bufferbassin, circa 500 m <sup>3</sup> , 15 x 15 x 2 m, EPDM-folie	€4.000
– Opslagtank, staal HII, inclusief montage	(optie) €121.000
– Opslagtank, AISI 304, inclusief montage	(optie) €260.000
– Riolering, 150 m lengte	€ civiel
– Grondwerken	€ civiel
– Materieel	€ civiel
– Terreinafwerking	€ civiel

#### Totaal (incl. 15% engineeringkosten)

– 40 m configuratie	€170.000
– 150 m configuratie	€475.000

Uit de bovenstaande beschouwing blijkt dat de pomp/motor combinatie en de buisleidingen de voornaamste kostenposten te zijn. Onzekere factoren zijn de materiaalkosten van de grotere 16" buisleidingen. In verhouding tot de investeringskosten zijn de operationele kosten beperkt. Het systeem heeft een technische levensduur van ca. 30 jaar. Bij een afschrijftermijn van 10 jaar zouden de kosten 22.000 tot 52.500 per jaar komen.

In deze kosteninschatting is nog geen rekening gehouden met apparatuur voor detectie, alarmering en activering van het scherm. De kosten voor een signaleringssysteem waar-

mee wordt aangegeven dat het scherm in werking is, en doorgang niet mogelijk is, zijn zeer beperkt. De kosten om de inwerkingstelling automatisch te koppelen aan het detectie- en alarmeringssysteem van Chemelot zijn op dit moment nog niet in te schatten. Hiervoor zal eerst moeten worden vastgesteld wat de mogelijkheden zijn en hoe men de alarmering en activering wenst uit te voeren.

## **5.6 Beschouwing**

Doorgaans zijn watersproeisystemen in staat om de gevolgen van een schadelijke gaswolkontsnapping te mitigeren voor de omgeving. Globale berekeningen en ramingen hebben aangetoond dat het haalbaar is om een waterscherm in de bufferzone te realiseren. De effectiviteit is echter afhankelijk van een aantal factoren, welke op afstand van de bron en in het open veld moeilijk worden beheerst (dynamische gedrag van de wolk, meteorologische variabelen, e.d.). Verzadiging van de watervoorraad zal de effectiviteit zeker verminderen en dient in ogenschouw te worden genomen.

Om de onzekerheden te minimaliseren is een schaalverkleining en een dubbele uitvoering van het waterscherm wenselijk. Schaalverkleining betekent dat een waterscherm niet over de volle lengte (en hoogte) van de bufferzone kan worden toegepast, maar in combinatie met een passieve beschermingsmaatregel zoals een rij aaneen gesloten hoge gebouwen. Het is onbekend hoe de gaswolk zich zal gedragen als een gebouw in verhouding hoger is dan het waterscherm.

Het sproeisysteem zal enige tijd niet beschikbaar zijn tot alle meters leiding gevuld en op druk zijn. De reactietijd kan in orde grootte liggen van tientallen seconden.





## 6 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

In het kader van dit onderzoek is gekeken naar de mogelijkheden voor het invullen van een bufferzone tussen een site met chemische installaties en een woonwijk. Uitgaande van diverse mogelijke rampscenario's kan een toxische wolk afkomstig van het bedrijventerrein zich via het overdrachtsgebied (gebied tussen bedrijventerrein en de wijk ook wel de bufferzone genoemd) verplaatsen naar de achterliggende woonwijk. De vraagstelling in het onderzoek was:

*Is het mogelijk om door een specifieke wijze van inrichting van het overdrachtsgebied de negatieve effecten in het effectgebied te verminderen?*

Bij de uitwerking van deze vraagstelling heeft het chemisch bedrijventerrein Chemelot, met daarop de bedrijven DSM en SABIC als voorbeeld gediend. Dit houdt in dat in eerste instantie in algemene zin is gekeken naar de mogelijke opties voor een bufferzone. De uitwerking en conclusies ten aanzien van de mogelijke reductie van de concentraties in giftige gaswolken zijn algemeen toepasbaar. Vervolgens is voor deze algemene conclusies bekeken wat dit betekent voor de reductie van het aantal doden en gewonden. Deze vertaling zal steeds situatiespecifiek moeten worden gedaan. Belangrijke factoren hierin zijn de afstand tussen risicobron, bufferzone en woongebied en de ongevalsscenario's die op de locatie relevant zijn. Ter illustratie van de effectiviteit zijn hier een aantal voorbeeld ongevalsscenario's van de Chemelot-site genomen en situering van de bufferzone zoals deze bij Chemelot zou kunnen worden ingevuld.

In het onderzoek is als eerste een inventarisatie gemaakt van mogelijke beïnvloedingsopties. In deze inventarisatie zijn een twintigtal opties naar voren gekomen. Er is een kwalitatieve beoordeling uitgevoerd op de volgende criteria:

- technische haalbaarheid,
- effectiviteit,
- inpasbaarheid (in de omgeving),
- kosten,
- responstijd (tijd tot dat de optie effectief wordt rekening houdend met opstarttijd),
- neveneffecten. Het criterium neveneffecten heeft betrekking op de positieve of negatieve neveneffecten die een optie kan hebben, zoals geluidshinder, esthetische waarde, imago.

Vervolgens zijn een tweetal opties geselecteerd voor een verdere uitwerking.

Een van de opties is om de bufferzone in te richten met fysieke barrières in de vorm van gebouwen en/of wanden. De tweede geselecteerde mogelijkheid is het plaatsen van actieve schermen (zoals waterschermen) in het gebied. Op de effectiviteit en mogelijkheden van beide wordt hieronder ingegaan.

### **Inrichting van de bufferzone met fysieke barrières**

De effectiviteit van fysieke barrières zoals gebouwen en muren is onderzocht in de windtunnel van TNO in Apeldoorn. Om inzicht te krijgen in de meest optimale indeling van het gebied zijn een negental configuraties uitgewerkt en getest in de windtunnel. Uit de resultaten van het windtunnelonderzoek blijkt dat de fysieke barrières tot een behoorlijke reductie van de concentratie in de gaswolk kan leiden. Afhankelijk van de beschouwde configuraties ligt dit tussen de 11 en 76%. Daarbij is het effect in het verlengde van de oorspronkelijke verspreidingsrichting in een lijn loodrecht op de bufferzone beschouwd. Uit deze metingen kunnen de volgende conclusies worden getrokken t.a.v. de effectiviteit van de configuratie:

- hoe hoger de barrière hoe effectiever,
- een aaneengesloten wand is effectiever dan een onderbroken lijn gebouwen,
- een aaneengesloten wand is effectiever dan een aaneengesloten rij bomen (van 20 meter diep),
- vergroten van de afstand tussen de gebouwen met een factor 2 was (bij de hier bestudeerde configuraties) niet van invloed op het concentratie reducerend vermogen van de configuratie,
- bij een aantal achter elkaar gelegen gebouwen van verschillende hoogte is het het meest effectief om de hoogste rij gebouwen zo dicht mogelijk aan de zijde van de bufferzone te plaatsen.

In eerste instantie werd gedacht dat er vrij hoge barrières noodzakelijk zouden zijn voor een effectieve reductie. Om die reden zijn in het onderzoek voornamelijk hoge barrières meegenomen. Uit de windtunnelproeven bleek dat ook een minder hoge, aaneengesloten barrière (een 20 meter hoge wand) ook al bijzonder effectief is (58% reductie). Achteraf bekeken was het ook interessant geweest om lagere wanden (10 en 15 meter hoog) te onderzoeken. Lagere wanden zijn immers wel makkelijker in te passen in de omgeving.

Tevens is onderzocht wat voor effecten optreden aan de randen van de configuraties, op de lijnen parallel aan de verspreidingsas van de gaswolk. Hieruit blijkt dat de barrières de gaswolk wel verspreiden. Er treden buiten de as iets hogere concentraties op dan zonder barrière: er zal door de invloed van de bufferzone sprake zijn van een kortere, iets bredere gaswolk met een lagere concentratie. In zijn totaliteit gezien dalen de concentraties in het gebied achter de bufferzone en zijn er positieve resultaten t.a.v. de veiligheid te verwachten.

Opgemerkt moet worden dat het windtunnelonderzoek is uitgevoerd met verspreiding van neutraal gas. Dit terwijl bij verschillende van de ongevalsscenario's sprake is van een zwaar gas. Een zwaar gas wolk, zal in vergelijking met een neutrale gaswolk laag bij de grond blijven en zo moeilijker over een obstakel heenkomen. Een zwaar gas wolk zakt meer uit dan een neutrale gaswolk en wordt breder en korter. Verwacht wordt dat een obstakel voor zwaar gas wolken een groter effect zal hebben dan voor neutraal gas wolken.

Daarnaast is gekeken naar het effect van een andere windrichting, waarbij de aanstroming van de configuratie onder een hoek plaats vindt. Geconstateerd is dat voor alle configuraties bij aanstroming onder een hoek van 30 graden, een concentratiereductie optreedt ten opzichte van het vrije veld (dus zonder obstakel). Wel blijkt dat bij aanstroming onder een hoek de concentratie voor een aantal configuraties afneemt ten opzichte van de loodrechte aanstroming. Voor de overige configuraties is er niet of nauwelijks verschil in de concentratiereductie voor loodrechte aanstroming of aanstroming onder een hoek. Het effect dat onder een hoek de concentratiereductie afneemt kan worden verklaard doordat bij schuine aanstroming de gaswolk dan schuin over de barrière heen zou rollen, een soort kurkentrekkereffect. Uit de windtunnelexperimenten bleek echter dat dit negatieve effect bij een aantal configuraties niet of nauwelijks optreedt. Blijkbaar treedt het effect niet op als de eerste rij voldoende hoog is of bij hoge bomen. Bij een definitief ontwerp zou hier nog rekening mee kunnen worden gehouden.

Een uitgebreider literatuur of experimenteel onderzoek naar maatregelen om dit kurkentrekkereffect te reduceren of te voorkomen is tevens aan te bevelen.

Binnen het beschouwde gebied in dit voorbeeld (Chemelot en de inrichtingsmogelijkheden rondom de Kampstraat in Geleen) geldt in het huidige bestemmingsplan op sommige delen een maximale bebouwingshoogte van 30 meter aangegeven. Meer richting de woonwijk geldt een bebouwingshoogte van 10 meter. Om die reden is de meeste effectieve optie (een wand van 50 meter hoog) niet reëel. Ook in andere situaties elders in Nederland zal dit een weinig reële optie zijn.

Eén van de effectiefste opties is een aaneengesloten wand van 20 meter hoog. Deze optie levert een concentratiereductie van 58%. Een wand van 20 meter hoog is qua hoogte wel toegestaan en door middel van het combineren met gebouwen en begroeiing is deze optie nog redelijk inpasbaar. Wat de effectiviteit van een lagere wand zou zijn is binnen dit onderzoek niet onderzocht. Op die plaatsen waar de wand toch onderbroken moet worden door bijvoorbeeld een weg en de toegang tot het industrieterrein zou de gesloten wand kunnen worden vervangen door een waterscherm dat in werking wordt gesteld op het moment van een gaswolk ontsnapping. Onder het kopje stedelijke inpassing (paragraaf 4.6) is verder ingegaan op de inrichtingsmogelijkheden van het gebied met een wandachtige constructie. Hierbij zijn opties aangegeven hoe de wand zo goed mogelijk geïntegreerd kan worden in de omgeving en de “zichthinder” zoveel mogelijk kan worden beperkt, zoals combinatie met een aarden wal, combineren met gebouwen, laten verspringen, en het plaatsen van bomen.

### **Waterschermen**

In de chemische industrie, offshore, scheepsvaart en door de brandweer worden watersproeisystemen hoofdzakelijk gebruikt om materialen, installaties, opslagtanks, gebouwen, e.d. te beschermen tegen warmtestraling en tegen het ontstaan van brandbare gasmengsels. Hierbij kan een opslagtank worden beschermd door direct contact met water (deluge- of sprinklersysteem<sup>1</sup>) of door een barrière (waterscherm/gordijn). Een andere toepassing van watersproeisystemen, het voorkomen van blootstelling aan toxische gassen, wordt toegepast om beperkte vrijgekomen hoeveelheden te neutraliseren. In de literatuur zijn geen voorbeelden bekend waarbij watersproeisystemen buiten de fabrieksgrenzen op afstand van de bron worden toegepast om de omgeving te beschermen. Ingeval een watersproeisysteem in de bufferzone zou worden geïnstalleerd, zou dat een innovatieve toepassing zijn.

Uit veldexperimenten en literatuur blijkt dat water/nevelgordijnen een hoog verwijderingrendement, uiteenlopend van 40% tot 90%, kunnen bereiken, maar dat het rendement sterk afhangt van gordijnconfiguratie, nozzle parameters, release condities en meteorologische omstandigheden. Rekeninghoudend met deze factoren is een beperking van de schaalgrootte wenselijk. Watersproeisystemen worden over het algemeen dichtbij en rondom mogelijke bron(nen) van uitstroming geplaatst.

Ook vanuit kosten oogpunt is een watergordijn over de hele lengte geen aantrekkelijke optie, zeker in vergelijking met barrières zoals wanden en gebouwen waarvan de kosten zeer beperkt zijn. Op basis hiervan is door de projectgroep de voorkeur uitgesproken om watergordijnen over beperkte lengtes toe te passen, waarbij het kan worden toegepast op die locaties waar afscherming door een massieve wand niet mogelijk is, omdat er bijvoorbeeld een verbindingsweg nodig is tussen het bedrijventerrein en de achterliggende omgeving. Dit “gat in de wand” wordt dan opgevuld met een waterscherm, dat op het moment van een calamiteit wordt geactiveerd. De lengte van het watergordijn is daarmee afhankelijk van de breedte van dergelijk “gat in de wand”.

---

<sup>1</sup> In korte tijd worden grote hoeveelheden water (kleine druppels) losgelaten op een brand. Deluge- en sprinklersystemen worden verder niet uitgewerkt in dit rapport.

De verwachting is dat er locaties zijn waarbij ten minste een afstand van 40 tot 150 m moet worden overbrugd. Een globale inschatting van de kosten van een systeem van 40 tot 150 meter lang laat zien dat de kosten tussen ca. tweehonderd en vijfhonderd duizend euro liggen.

Uit de kosteninschatting voor de waterschermen blijkt dat de extra kosten die een effectieve buffer met zich mee brengen, vooral zullen worden bepaald door de waterschermen die in het ontwerp mee worden genomen.

### Reductie van het aantal slachtoffers

Bij een wand van 20 meter hoog over de hele lengte van de bufferzone leidt tot een reductie van de concentratie van ruim 50%. In onderstaande tabel is aangegeven wat dit betekent voor de sterftekans vlak voor en vlak na de buffer. Hieruit kan het effect van de buffer worden afgelezen.

Tabel 6-1 Letaliteitpercentage in het vrije veld net voor en na de bufferzone en achter de massieve wand.

Installatie	Vrije veld voor bufferzone			Vrije veld net na bufferzone			Na bufferzone met wand 20 meter	
	Afstand tot bron	D5	F2	Afstand tot bron	D5	F2	D5	F2
NH <sub>3</sub>	1150	< 1%	< 1%	1350	< 1%	< 1%	< 1%	< 1%
ACN1 (HCN)	400	< 1%	98%	600	< 1%	88%	< 1%	19%
SZF5 (NO <sub>2</sub> )	600	94%	98%	800	18%	19%	< 1%	< 1%

Uit deze tabel is dus af te lezen dat met name bij het NO<sub>2</sub> en het HCN scenario de bufferzone erg effectief is. Bij het gekozen ammoniakscenario zijn de concentraties nabij de bufferzone al dusdanig laag dat dit voor het letaliteitpercentage in de achterliggende woonwijk niet meer uitmaakt. Naast een lagere sterftekans heeft een lager concentratie ook een positief effect op de niet-letale effecten (gewonden) in het gebied. Dit geldt voor alle toxische scenario's.

### Résumé:

Op basis van dit onderzoek kan worden vastgesteld dat een aanzienlijke reductie van de schadelijke concentratie van een gaswolk kan worden bereikt, indien er een rij obstakels tussen de potentiële ongevalsbron en het ontvangende gebied wordt gebouwd. Daarbij is een lange aaneengesloten wand het meest effectief, waarbij geldt: hoe hoger hoe beter. In dit onderzoek is vervolgens voor een 20 meter hoge wand na gegaan wat dit voor reductie in letaliteitspercentages en andere shadeafstanden zou betekenen bij een aantal voorbeeld ongevalsscenario's. Op basis hiervan mag worden verwacht dat een dergelijke invulling van de bufferzone tot een aanzienlijke reductie van het (groeps)risico kan leiden.

Hierbij is uitgegaan van een aaneengesloten wand (20 m) over de hele lengte. Aangezien het aannemelijk is, dat bij daadwerkelijke inpassing in het gebied er toch nog openingen in de wand noodzakelijk zullen zijn (voor bijvoorbeeld toegangswegen), is nagegaan of deze openingen kunnen worden "opgevuld" met waterschermen. De waterschermen zijn daarmee beschouwd als een integraal onderdeel van de "gesloten wand". Een waterscherm wordt daarbij nog wel realistisch gezien als een mogelijkheid om de gaten in de wand op te vullen, maar niet als een 'stand-alone' oplossing voor de

invulling van de gehele bufferzone (een gebied met een lengte van meer dan een kilometer). Dit zou te hoge waterhoeveelheden en kosten met zich meebrengen. Bovendien zijn er ook nog diverse factoren die betrouwbaarheid, effectiviteit en inpasbaarheid van een waterscherm beperken.

**Aanbevelingen:**

Met deze studie is een indicatie gegeven van de concentratiereductie die mogelijk is bij verschillende gebouwconfiguraties. Toepassing hiervan in de praktijk is mogelijk, maar dit zal ongetwijfeld leiden tot aanpassingen op de configuratie (bijvoorbeeld een lagere wand, of toch enkele openingen in de wand). Het is daarom aan te bevelen om bij de definitieve invulling van de bufferzone, voor de gekozen configuratie opnieuw na te gaan wat het reducerend effect van de gekozen inrichting is.

Bij deze nadere uitwerking verdient het de aanbeveling om de gekozen configuratie in de windtunnel te testen en de uitwerking bijvoorkeur ook nog te ondersteunen met CFD-berekeningen. Daarbij verdienen de volgende punten aandacht:

- Beschouw in de windtunnel zowel rechte als schuine aanstroming vanuit de bron.
- Varieer de afstand van de bron tot de bufferzone (afhankelijk van de bronlocaties in het studiegebied).
- Neem voldoende meetpunten op om ook de randeffecten te kunnen beschouwen.
- Ga na of de resultaten door CFD-berekeningen kunnen worden ondersteund en of op basis hiervan de conclusies ook kunnen worden onderbouwd voor zwaar gas verspreiding.



## 7 Referenties

- [1] Vermeulen, P.E.J.; Hooftman, P. (1980) Methode ter bepaling van het verband tussen de windsnelheid bij een gebouw en de lokale windsnelheden zoals gemeten bij een maquette in de windtunnel. MT-TNO rapport 80-02760, 1980.
- [2] Interventiewaarden gevaarlijke stoffen 2006, Ministerie van VROM, april 2006
- [3] Purple Book, Guidelines for quantitative risk assessment, Committee for the Prevention of Disasters, CPR-18E, The Hague, The Netherlands, First edition, 1999.
- [4] Gandemer (1975), Wind environment around buildings: Aerodynamic concepts. Proc. 4th Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, Heathrow, 1975.
- [5] Hydrogen fluoride study (1992), EPA-report to Congress
- [6] M. Molag, H.H. Schouten, M. Powel-Price (2000), The use of fluid sprays to mitigate gas dispersion, TNO-report, draft, orderno. 301197.
- [7] A. Dandrieux, G. Dusserre, J. Ollivier, H. Fournet (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, artikel, volume 14, pages 349-355.
- [8] A. Dandrieux, G. Dusserre, J. Ollivier (2002) Small scale field experiments of chlorine dispersion, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, artikel, volume 15, pages 5-10.
- [9] K. Hald, J. Buchlin, A. Dandrieux, G. Dusserre (2005), Heavy gas dispersion by water spray curtains - a research methodology, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, artikel, volume 18, pages 506-511.
- [10] S.E. Gant (2006, CFD modelling of water spray barriers, HSL-report, HSL/2006/79. [http://www.hse.gov.uk/RESEARCH/hsl\\_pdf/2006/hsl0679.pdf](http://www.hse.gov.uk/RESEARCH/hsl_pdf/2006/hsl0679.pdf)
- [11] Dutch Association of Cost Engineers, Prijzenboekje, 24<sup>ste</sup> editie, november 2006

Benaderde leveranciers:

- Ravebo Supply B.V.
- Van wijk en Boerma Firepacks B.V.
- EHM Stainless Nederland BV
- Geotop





## 8 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever:

Gemeente Sittard-Geleen

Postbus 18

6130 AA Sittard

Namen en functies van de projectmedewerkers:

Ir. T. Wiersma

Ir. S.I. Wijnant-Timmerman

Ing. J. Kamperveen

Ir. B. Boonstra

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad:

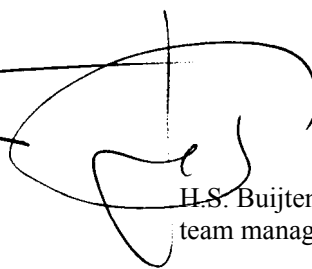
juli 2006 – maart 2007

Ondertekening:

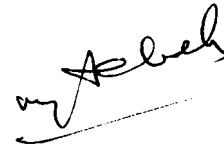
Goedgekeurd door:



T. Wiersma  
projectleider



H.S. Buijtenhek  
team manager





## Bijlage 1 Overzicht deelnemers brainstormbijeenkomst

Raymond Dumont	-	gemeente Sittard-Geleen
Ronald Geurts	-	gemeente Sittard-Geleen
Sjirk Meijer	-	Gemeenschappelijk Brandweerbureau Westelijke Mijnstreek
André van den Berg	-	Chemelot
Theo Gielkens	-	Chemelot - SABIC
Peter Janssen	-	Chemelot
TNO Bouw en Ondergrond:		
Claudia Basta	-	stedebouwkundige
Beitske Boonstra	-	stedebouwkundige
Koos Ham	-	industriële en externe veiligheid, risicoanalyse
Freddy Kootstra	-	risicoanalyse, chemische en fysische effectmodellering
Jan Meulenbrugge	-	industriële en externe veiligheid
Reinier van der Welle	-	stromingstechniek en Computational Fluid Dynamics (CFD)
Tineke Wiersma	-	externe veiligheid, rampenbestrijding



## Bijlage 2 Opzet windtunnelmetingen

### 2.1 Beschrijving windtunnel

Het onderzoek is uitgevoerd in de atmosferische grenslaagwindtunnel van TNO Apeldoorn. De doorsnede van deze windtunnel is 2 meter in hoogte en 3 meter in breedte. Het model is opgebouwd op een ronde draaischijf met een diameter van 2,3 meter. Door de draaischijf te draaien kan elke gewenste windrichting worden ingesteld. Er zijn een tweetal foto's zichtbaar van de binnen- en buitenzijde van de windtunnel.



Figuur B2-1 Foto windtunnel, buitenzijde.



Figuur B2-2 Foto windtunnel, binnenzijde.

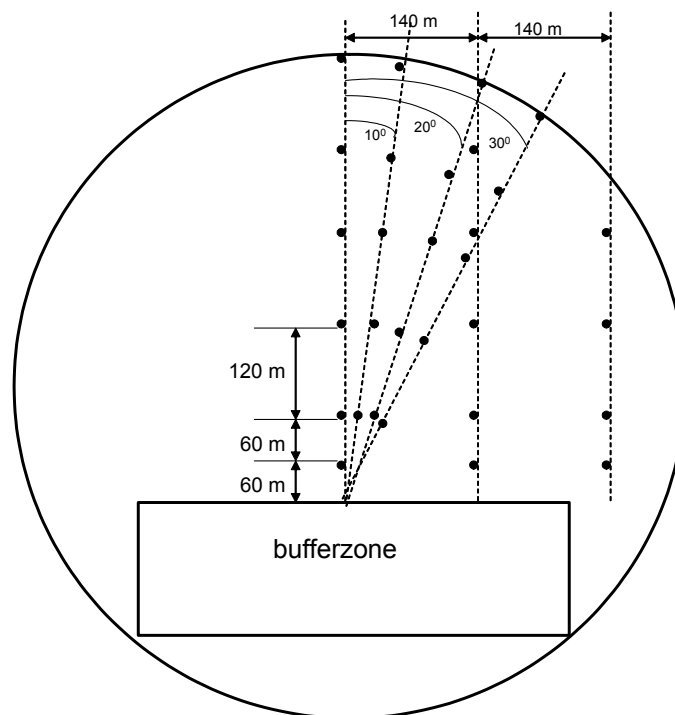
## 2.2 Model in de windtunnel

De bufferzone is bedoeld als afscherming tussen de Chemelot site en woonwijk Lindenheuvel. Voor de bufferzone worden verschillende uitvoeringsvormen beproefd. Hoofdstuk 4.1 van het hoofdrapport geeft een overzicht van de doorgemeten varianten. De relevante bronnen met de voorbeeldscenario's op de Chemelot site bevinden zich op 400 m tot 1500 m van de bufferzone en is niet in de windtunnel gemodelleerd. Er is ook geen woonwijk in de windtunnel gemodelleerd, omdat de concentraties in de wijk dan af zullen hangen van de specifieke verkaveling en hoogteverdeling in de wijk. Wel is ter plaatse van de locatie van de woonwijk de draaischijf voorzien van gezeefd metselzand. Hiermee wordt voorkomen dat er na de bufferzone, ter plaatse van de woonwijk, een interne grenslaag over de draaischijf ontstaat met een te lage ruwheid.

Er is gekozen voor een modelschaal 1:350. Op deze schaal kan een gebied met een diameter van ruim 800 m op de draaischijf worden weergegeven. De varianten voor de bufferzone zijn op deze schaal gemodelleerd en ook de eigenschappen van de wind zijn op deze schaal gemodelleerd. Hiertoe is een voorland toegepast bestaande uit lego board duplo platen. Dit geeft een ruwheidslengte  $z_0$  van 0,11 m op ware grootte. Deze ruwheid komt overeen met weiland.

Door het draaien van de draaischijf kunnen verschillende windrichtingen worden ingesteld. De emissiebron bevond zich stroomopwaarts, ver buiten de draaischijf.

De receptorpunten (meetpunten) zijn allemaal op de draaischijf geplaatst. Figuur B2-3 geeft hiervan een overzicht.



Figuur B2-3 Ligging van de meetpunten op de draaischijf in de windtunnel.

De stippen in de figuur geven de meetpunten weer. Deze zijn zowel in een recht rooster geplaatst als onder hoeken. De lijnen van het rechte rooster, zijn loodrecht op de windrichting 140 meter (in werkelijke afstanden) uit elkaar gelegen. Deze meetpunten verschaffen informatie over de concentraties, zowel op de hoofdas van de wolk als parallel aan de hoofdas. Deze geven hiermee inzicht in de verspreiding van de wolk in de wijk.

De meetpunten zijn, in de richting van de wind, op 120 meter afstand van elkaar gelegen (met uitzondering van de eerste meetpunten achter de bufferzone, die op 60 meter van elkaar liggen). Daarnaast zijn er meetpunten geplaatst onder hoeken van de te meten windrichtingen (10, 20 en 30 graden), om de verwerking gemakkelijker te maken.

Er zijn een aantal configuratie uitgetest in de windtunnel. Om het effect van een configuratie op de concentratiereductie te kunnen meten wordt er een schaalmodel van de werkelijkheid gemaakt. Hiervoor is het noodzakelijk dat de layout van de wijk/bufferzone en de afmetingen bekend zijn.

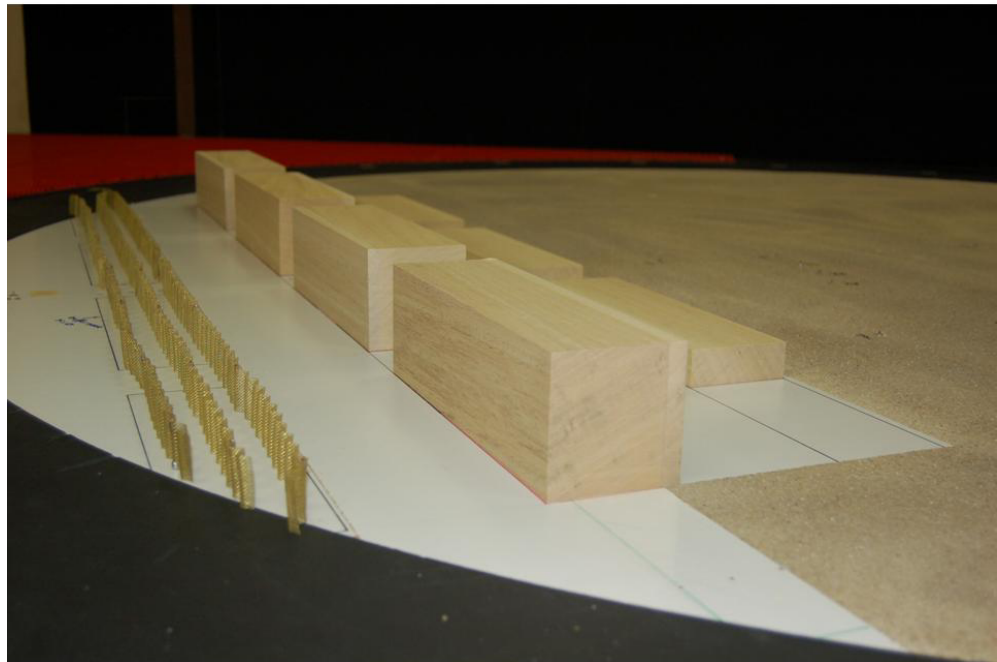
Voor de situatie in Sittard gelden de volgende kentallen:

Breedte bufferzone:	140 m (smalste deel) – 280 m: neem aan 200 meter gemiddeld
Lengte van de bufferzone:	1,7 km
Grootte van de wijk Lindeheuvel:	ca 1 km vanaf de buffer
Afstand van de bron tot de bufferzone:	400 m (dichtst bij gelegen bron)- 1600 m (verst weggelegen bron)
Aard van terrein tussen bron en buffertunnel:	grasland

Om de bovenstaande geometrie van de situatie bij Geleen te kunnen modelleren in de windtunnel, is een geschaald model gemaakt (1:350). Daarnaast is ook maar een gedeelte van de bufferzone gemeten: niet de gehele lengte van 1.7 km van de bufferzone is gemodelleerd, maar een gedeelte daarvan (470 meter). Er is uitgegaan van het volgende:

- Bij alle schetsen is uitgegaan dat de configuraties op een verwisselbare plaat staan met de volgende afmetingen:  
0,5 meter \* 1 meter (komt overeen met strook van 175 m \* 350 m).
- De gebouwen steken over ten opzichte van de plaat met 17,5 cm, hiermee komt de totale breedte van de strook overeen met 135 cm (470 m).
- De configuraties zijn symmetrisch t.o.v. het midden van de plaat.

Figuur B2-4 is foto van één van de configuraties geplaatst op de draaischijf in de windtunnel.



Figuur B2-4 Meting aan configuratie 8a in de windtunnel.

### 2.3 Modelling van de bron

Bij een ongeval kunnen verschillende soorten gaswolken vrijkomen, variërend van een neutraal gas tot een zwaar gas. Er mag aangenomen worden dat de emissie bij een ongeval als een jet vrijkomt. De oriëntatie van de emissie is uiteraard niet bekend, dat kan verticaal omhoog, verticaal omlaag, horizontaal met de wind mee, horizontaal tegen de wind in of loodrecht op de wind zijn. Om of in de directe nabijheid van het emissiepunt zullen allerlei obstakels staan die de vrijkomende emissie snel verspreiden. Ook een zwaar gas wolk zal in een complexe omgeving snel verdunnen en opmengen met lucht. Er is daarom als emissiebron uitgegaan van een neutraal gas met geringe impuls, waarbij is aangenomen dat er al enige initiële verspreiding heeft plaatsgevonden, zodat de wolk al enige omvang heeft.

Als emissiebron is een verticale pijp gekozen met uitblaas naar beneden, zodat de straal uit de pijp op de windtunnelvloer botst, zijn impuls kwijtraakt en zich vervolgens horizontaal zal verspreiden. De afmeting van de pijp wordt bepaald door de mogelijke verstoring van de stroming en de wens om tot op grote afstand van de draaischijf nog concentraties te kunnen meten. Bij een te grote pijp gaat de pijp de stroming te veel verstoren en bij een te kleine pijp neemt de emissie zoveel af dat er op grotere bronafstanden geen concentraties ter plaatse van de draaischijf meer gemeten kunnen worden.

Er is uitgegaan van een bron bestaande uit een verticale pijp met een inwendige diameter van 22 mm, die eindigt op een hoogte van 22 mm boven de windtunnelvloer. Aan het uiteinde van de pijp is een plaatje met een diameter van 52 mm aangebracht met rondom fijnmazig gaas tot op de tunnelfloer. De emissie is verticaal naar beneden gericht.

Over de lego board duplo platen van het voorland is een plaat met een diameter van 200 mm aangebracht, om te voorkomen dat de emissie zich in eerste instantie tussen de noppen van de lego board duplo plaat zal verspreiden. De straal botst op deze plaat,



raakt zijn impuls kwijt, verspreidt zich vervolgens momentaan initieel horizontaal in alle richtingen, alvorens door de wind te worden meegenomen. Het gaas aan de omtrek van het 52 mm plaatje zorgt voor een zo uniform mogelijk emissie over de omtrek. Omdat de meetpunten in de tijd gezien na elkaar meten gedurende ca 50 seconden, is de windtunnel niet geschikt voor het meten aan een instantane bron. Er wordt daarom gekozen voor een continue bron.



Figuur B2-5 Bron in de windtunnel, met uitstroming naar beneden.

Bij de uitwerking van de resultaten zal vervolgens weer een terugvertaling worden gemaakt naar de ongevallen scenario's, benoemd in paragraaf 2.2 van het hoofd rapport.

## 2.4 Metingen

De metingen zijn uitgevoerd met een windsnelheid van 3,6 m/s op een referentiehoogte van 10 cm (35 m op ware grootte). Deze windsnelheid is steeds stroomopwaarts van de draaischijf gemeten.

De metingen zijn uitgevoerd met een totaal debiet van 2700 l/h. Dit geeft een snelheid door de gazen omtrek van circa 0,2 m/s, een geringe impuls dus.

Uit de bronpijp wordt lucht geblazen waaraan een bekende hoeveelheid tracergas is toegevoegd. In dit geval bedroeg de hoeveelheid tracergas steeds 46,5 l/h, ofwel 1,7% van het totale debiet. De concentratie van dit tracergas is vervolgens ter plaatse van de meetpunten op de draaischijf op 1,5 m hoogte (op ware grootte) gemeten.

De methode waarop de meetresultaten verkregen in de windtunnel kunnen worden teruggerekend via schalingsregels, wordt uitgewerkt in bijlage 2a. In de windtunnel worden de K-waarden van de verschillende meetpunten bepaald, op grond waarvan de werkelijke concentraties zijn terug te rekenen.

Hiertoe worden de concentraties bij het model in de windtunnel (C) gemeten met de windsnelheid  $U(10)$  en bij de ingestelde bronsterkte tracergas (Q). Hiermee kan

voor elk meetpunt en bij elke windrichting de concentratiecoëfficiënt  $K$  bepaald worden met de volgende relatie

$$C = \frac{K \cdot Q}{U(10)} \quad [3]$$

Wanneer men nu wil weten wat de werkelijke concentratie zou zijn, indien er sprake is van een bronsterkte  $Q$  bij windsnelheid  $U$ , dan kan met bovenstaande vergelijking de concentratie worden bepaald.

Omdat de concentratie lineair is met de  $k$ -waarde, is de effectiviteit (of wel het concentratiereducerende vermogen) van de diverse configuraties met elkaar vergeleken door de  $k$  waarde te vergelijken.

## Bijlage 2a Verwerking van resultaten windtunnel metingen

Indien de stromingen (en de verspreiding van gassen) bij het model en in de werkelijkheid gelijkvormig zijn, dan kunnen de in de windtunnel bij het model gemeten concentraties herleid worden naar de werkelijke situatie met behulp van de volgende modelregel:

$$\left(\frac{C.U.L^2}{Q}\right)_m = \left(\frac{C.U.L^2}{Q}\right)_{f.s} \quad [1]$$

hierin is:

C concentratie

U windsnelheid

L karakteristieke lengtemaat

Q bronsterkte

Het is voor de hand liggend om voor U de windsnelheid op 10 m hoogte in een representatief weerstation te kiezen, omdat hiervoor statistische windgegevens bekend zijn. De windtunnelsnelheid op referentiehoogte is hiertoe omgerekend naar de windsnelheid op 10 m hoogte in een meteostation via de in Vermeulen/Hoofman (1980) beschreven koppelingmethode.

Vergelijking [1] kan dan ook geschreven worden als:

$$\frac{1}{s^2} \left(\frac{C.U(10)}{Q}\right)_m = \left(\frac{C.U(10)}{Q}\right)_{f.s} = K \quad [2]$$

hierin is:

s de schaalfactor ( $L_{fs}/L_m$ )

U(10) de windsnelheid op 10 m hoogte in een meteostation

K concentratiecoëfficiënt

De concentraties bij het model in de windtunnel (C) zijn gemeten bij de uit de gemeten windsnelheid in de windtunnel bepaalde U(10) en bij de in het model ingestelde bronsterkte tracergas (Q). Daarnaast is uiteraard ook de schaalfactor (s) bekend. Hiermee kan voor elk meetpunt en bij elke windrichting de concentratiecoëfficiënt bepaald worden.

De in werkelijkheid te verwachten concentraties van de uitgeblazen uitlaatgascomponenten kunnen dan berekend worden met:

$$C = \frac{K.Q}{U(10)} \quad [3]$$

### Referentie

Vermeulen, P.E.J.; Hoofman, P. (1980)

Methode ter bepaling van het verband tussen de windsnelheid bij een gebouw en de lokale windsnelheden zoals gemeten bij een maquette in de windtunnel. MT-TNO rapport 80-02760, 1980.



## Bijlage 3 Resultaten windtunnelmetingen

### 3.1 Rechte aanstroming

Om inzicht te krijgen in diverse elementen die aanwezig zijn in een configuratie van de bufferzone, is de invloed van de volgende parameters onderzocht:

- massieve wand versus bomenrij;
- hoogte van de wand;
- oplopende of aflopende bebouwing;
- geheel gesloten wand of openingen in het bouwpatroon;
- invloed bomen in plaats van gebouwen.

Dit wordt achtereenvolgens in de volgende paragrafen uitgewerkt en besproken.

#### 3.1.1 Effecten van massieve wand en bomenrij

Het effect op het concentratieprofiel van de volgende configuraties wordt vergeleken:

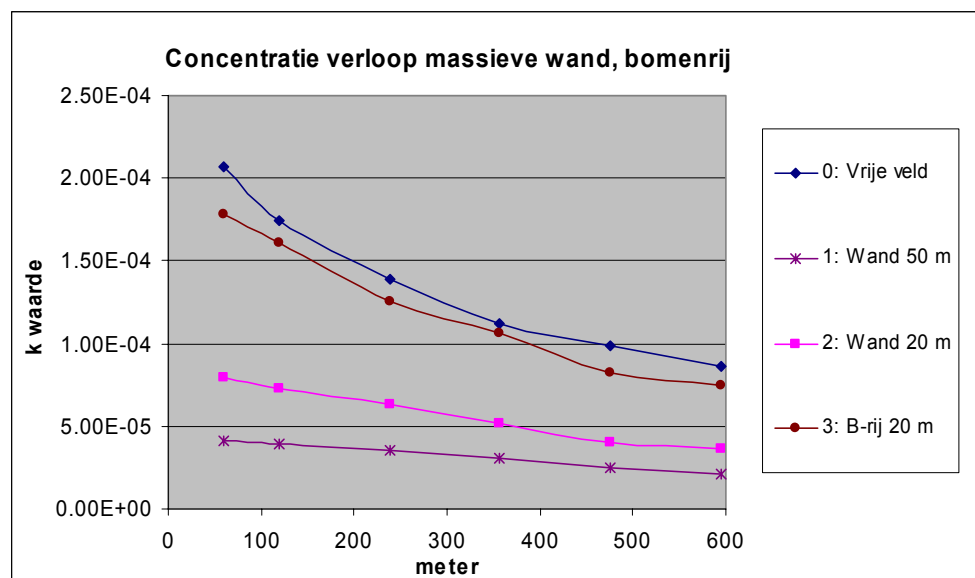
Configuratie 0: Geen obstakel

Configuratie 1: Massieve wand, 50 meter hoog

Configuratie 2: Massieve wand 20 meter

Configuratie 3: Bomenrij van 20 meter hoog

Onderstaande figuur geeft de concentratieprofielen weer.



Figuur B3-1 Concentratieprofielen configuratie 0 (geen obstakel), 1 ( wand 50 meter), 2 (wand 20 meter), 3 (bomenrij 20 m meter).

Wat opvalt, is dat een bomenrij (bruine lijn in de figuur) relatief weinig invloed heeft op het concentratie profiel. De concentratie wordt gereduceerd tot 0,83-0,94, wat gemiddeld uitkomt op 89%, een reductie van 11%. De gemiddelde reductie is bepaald over de 6 meetpunten langs de lijn waar gemeten is. De berekeningswijze van dit gemiddelde zal bij deze verder uitwerking van ook de andere meetseries gehanteerd worden.

De bomenrij van configuratie 3 heeft de zelfde hoogte als de wand van configuratie 2. Hoewel ze de zelfde hoogte hebben, veroorzaakt de wand een aanzienlijke hogere reductie van 58%. De beperkte invloed van de bomenrij op de concentratiereductie is als volgt te verklaren: door bomen wordt de luchtstroom afgeremd. Hierdoor is de luchtsnelheid direct na de bomen lager en is de concentratie direct achter de bomen hoger. Het effect van toename van concentratie door de bomenrij is niet te zien, maar het is wel verklaarbaar waarom er maar een geringe afname van het concentratieprofiel is te zien.

De aanwezigheid van gebouwen daarentegen, zorgt voor een hogere turbulentie en de verspreiding van de pluim over de hoogte van het gebouw, waardoor op de grond, achter de gebouwen lagere concentraties worden gemeten. Bij toenemende gebouwhoogte verspreidt de pluim zich over groter oppervlak (of volume) waardoor de concentraties verder afnemen.

Dit blijkt als configuratie 2 beschouwd wordt: bij de massieve wand van 50 meter hoogte vindt de meeste reductie van de concentratie plaats: namelijk 76%, waarmee de concentratie resulteert in ca 24 procent t.o.v. de oorspronkelijke waarde (reductie met een factor 4).

Tabel B3-1 Concentratie reductie van configuraties 1, 2, 3 t.o.v. het vrije veld.

configuratie	Gemiddelde concentratie reductie t.o.v. vrije veld
Configuratie 1: massieve wand 50 meter hoog	76%
Configuratie 2: massieve wand 20 meter hoog	58%
Configuratie 3: bomenrij 20 meter hoog	11%

*Conclusie:*

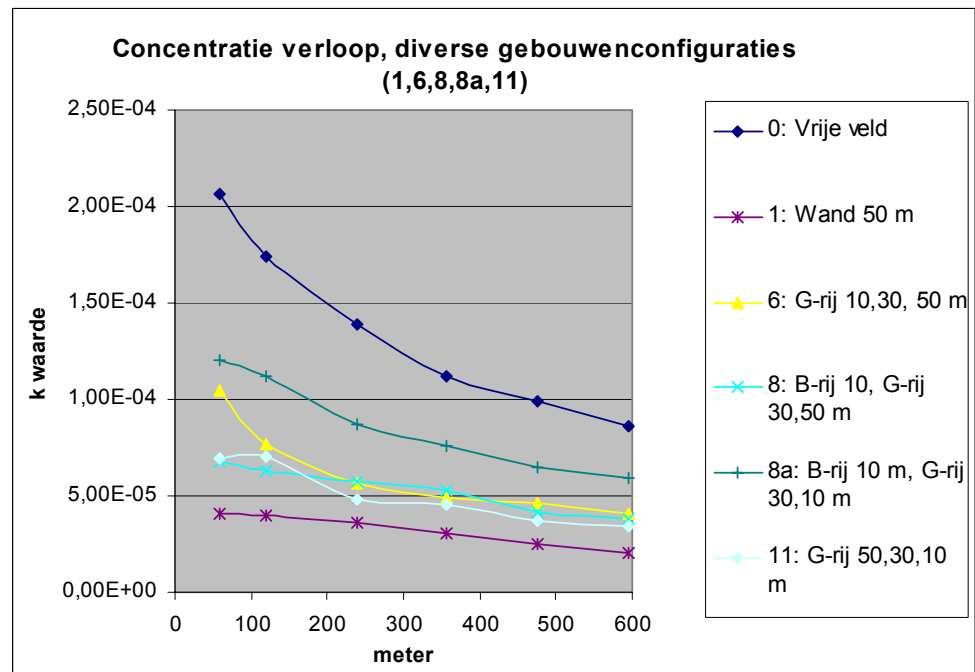
- De effecten van een bomenrij op het concentratieprofiel zijn gering.
- Een massieve wand heeft een groot effect op de concentratie waarbij geldt, hoe hoger de wand, hoe groter de concentratiereductie.

3.1.2 *Effecten van diverse opties gebouwenconfiguraties*

Het effect op het concentratieprofiel van de volgende configuraties wordt vergeleken:

- Configuratie 0: geen obstakel
- Configuratie 1: massieve wand 50 m
- Configuratie 6: 3 gebouwenrijen met oplopende hoogte 10 m, 30 m, 50 m
- Configuratie 8: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30 m, 50 m
- Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30 m, 10 m
- Configuratie 11: 3 gebouwenrijen met aflopende hoogte 50 m, 30 m, 10 m (omgekeerde volgorde van configuratie 6)

Onderstaande figuur geeft de concentratieprofielen weer.



Figuur B3-2 Concentratie verloop gebouwenconfiguraties 1, 6, 8, 8a, 11.

In de figuur zijn de volgende trends zichtbaar:

#### *Invloed gebouw hoogte*

De concentratieprofielen van configuraties 6, 8 en 11 liggen dicht bij elkaar, en komen in de buurt van de configuratie met de massieve wand van 50 m. Configuratie 8a ligt bij benadering tussen het concentratie profiel van het vrije veld in, en de configuraties 6, 8 en 11. Configuraties 6, 8, en 11 hebben met elkaar gemeen, dat de maximale gebouwhoogte hier 50 m bedraagt. De maximale hoogte voor configuratie 8a bedraagt 30 meter. Hieruit wordt geconcludeerd dat de maximale hoogte die in de configuratie optreedt bepalend is voor de mate van concentratiereductie.

#### *Invloed bomen i.p.v. gebouw*

Als de concentratieprofielen van configuratie 8 en 6 worden vergeleken blijkt dat deze vrijwel gelijk lopen, met uitzondering van net na de blokkade. Hieruit blijkt dat het vervangen van de eerste rij gebouwen door een bomenrij een iets gunstiger concentratieprofiel oplevert, met name net na de blokkade. Dit is opmerkelijk, omdat bij vergelijking van een bomenrij met een massieve wand bleek dat de massieve wand effectiever is. In dit geval blijkt dus dat de gesloten bomenrij gunstiger is dan een (deels open) gebouwenrij van de zelfde hoogte.

#### *Oplopend of aflopend*

Vervolgens is het effect van oplopende gebouwhoogte versus aflopende gebouwhoogte bekeken, met oplopend wordt hierbij bedoeld oplopend in hoogte vanaf de bron, richting de wijk (dus met de windrichting mee). Vergelijken van configuratie 6 en 11 leidt tot de conclusie dat een configuratie, waarbij de hoogte van gebouwen aflopend is, een iets voordeliger concentratieprofiel oplevert dan van wanneer de rij oplopend is. Verklaring kan zijn, dat de plaatsing van de grootste gebouwenrij bepalend is voor het

verloop van het profiel. Hoe eerder dit gebouw in de stroming geplaatst is, hoe eerder deze concentratie sprong optreedt, waarna de concentratie verder afneemt.

#### *Massieve of deels open wand*

Het feit dat de configuraties 6, 8 en 11 verschillen van configuratie 1, wordt veroorzaakt doordat de 50 meter lange wand (configuratie 1) niet onderbroken wordt, terwijl deze met de gebouwen rijen (configuratie 6, 8 en 11) wel onderbroken worden, waardoor de stof zich door de gebouwenrij heen kan verspreiden.

Dit resulteert in een hogere concentratie in het achterland.

Tabel B3-2 Concentratie reductie t.o.v. vrije veld voor configuraties 1, 6, 8, 8a, 11.

Configuratie	Gemiddelde concentratie reductie t.o.v. vrije veld
Configuratie 1: massieve wand 50 meter hoog	76%
Configuratie 6: gebouwenrijen met oplopende hoogte 10 m, 30 m, 50 m	55%
Configuratie 8: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30, 50 meter	59%
Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30, 10 meter	36%
Configuratie 11: 3 gebouwenrijen met aflopende hoogte 50 m, 30 m, 10 m	62%

#### *Conclusie:*

- De maximale hoogte die in de configuratie optreedt, is bepalend is voor de mate van concentratiereductie.
- Het maakt niet veel uit, als in een combinatie van gebouwenrijen een lagere rij vervangen wordt door bomen.
- Het al dan niet onderbroken zijn van een gebouwenrij heeft grote invloed op het concentratie profiel.
- Een verloop van gebouwen van hoog naar laag (gezien van de bron naar de woonwijk), is iets gunstiger dan van laag na hoog. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door de afstand van de hoogste blokkade ten opzichte van de woonwijk. Het lijkt gunstig om het hoogste gebouw zo dicht mogelijk bij de bron te plaatsen.

#### 3.1.3 *Effecten uitvoeringsvormen gebouwoptie hoogte 30 meter*

Het effect op het concentratieprofiel van de volgende configuraties wordt vergeleken:

Configuratie 0: geen obstakel

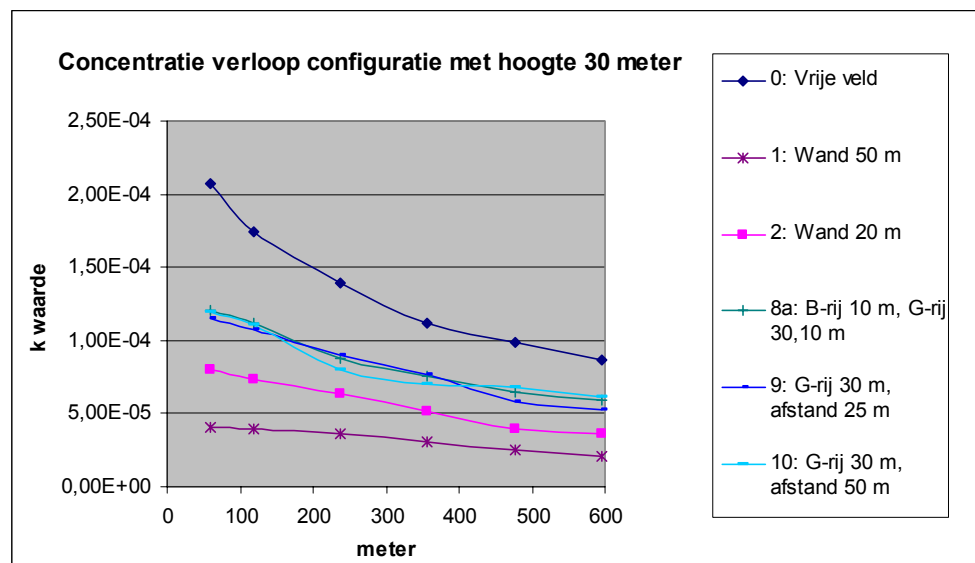
Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30 m, 10 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)

Configuratie 9: 1 gebouwenrij hoogte 30 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)

Configuratie 10: 1 gebouwenrij hoogte 30 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 50 m)

Ter vergelijking is ook configuratie 1 (massieve wand 50 m) en 2 (massieve wand 20 m) in de tekening weergegeven.





Figuur B3-3 Concentratieverloop voor configuraties 1, 2, 8a, 9, 10.

Uit de figuur blijkt het verschil tussen optie 8a en 9 minimaal is: het heeft weinig invloed of de gaten tussen de gebouwen afgeschermd worden door lagere gebouwen (10 meter) en bomen (10 meter) of niet. Ook maakt het voor het concentratieprofiel weinig uit als de afstand tussen de gebouwen vergroot wordt met een factor 2. Dit is opmerkelijk, omdat de meetpunten, die hier beschouwd werden in het verlengde van de opening liggen. Blijkbaar is het versturende effect van de hoge gebouwen dusdanig, dat ook de stroming tussen de gebouwen door in hoge mate wordt beïnvloed. Het is echter niet zo dat het niet uitmaakt of er wel of geen openingen tussen de gebouwen zitten (zie ook conclusie vorige paragraaf). Een massieve wand van 30 meter verschilt wel met de situatie waarbij openingen tussen de gebouwen aanwezig zijn: het concentratieprofiel voor een wand van 30 meter, zal liggen tussen die van 20 en 50 meter (de roze en paarse lijn in de grafiek). Dat verschilt wel aanzienlijk van de concentratieprofielen van de configuraties met onderbroken wand van 30 meter hoog.

In bovenstaande gevallen is er weinig invloed merkbaar als de gebouwen verder van elkaar staan. Er zal een optimum zijn tussen de lengte van de gebouwen en de onderlinge afstanden, in relatie tot het concentratieprofiel. Op het moment dat de inrichtingswensen van de bufferzone bekend zijn, zal hiernaar geoptimaliseerd kunnen worden.

Daarnaast is nu gekeken naar een centrale lijn, achter de configuratie, mogelijk zijn deze invloeden op een andere plek in het achterveld anders.

Tabel B3-3 Concentratiereductie configuratie 1, 2, 8a, 9, 10.

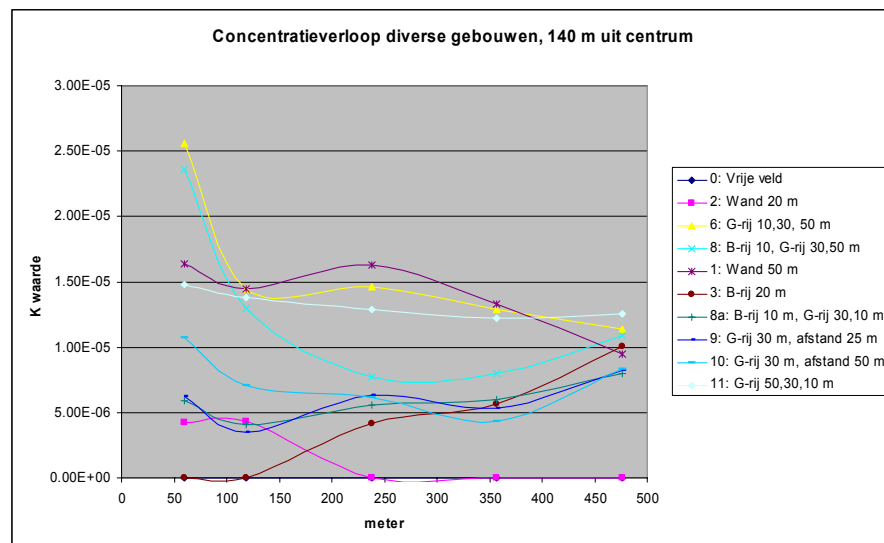
Configuratie	Gemiddelde concentratie reductie t.o.v. vrije veld
Configuratie 1: massieve wand 50 meter hoog	76%
Configuratie 2: Massieve wand 20 meter hoog	58%
Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30, 10 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)	36%
Configuratie 9: 1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)	38%
Configuratie 10: 1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 50 m)	36%

*Conclusie:*

- Het heeft bij de configuraties (8a en 9) weinig invloed of de gaten tussen (hogere) gebouwen afgeschermd wordt door lagere gebouwen (10 meter) en bomen (10 meter) of niet.
- Vergroten van de afstanden tussen de gebouwen met een factor 2 heeft bij deze configuratie (9) weinig invloed. Het feit of dit wel of geen invloed heeft hangt af van de inrichting van de configuratie. Factoren die een rol spelen zijn: onderlinge afstand van de gebouwen (zowel in windrichting als loodrecht op de windrichting) en de dimensie van de gebouwen (hoogte, breedte). Als de afstand tussen de gebouwen groot genoeg wordt, zal dit uiteindelijk wel uitmaken.
- Het feit of een wand al dan niet onderbroken is heeft een duidelijke invloed op de concentratie.

### 3.2 Randeffecten

Naast een meetpuntenserie in het centrum van de wolk, is er ook een meetpuntenserie op een afstand van 140 meter en op 280 m vanaf de centrale as van de wolk (zie figuur B2-3 in bijlage 2). In onderstaande grafiek zijn de concentratieprofielen op 140 meter vanaf de as weergegeven.



Figuur B3-4 Concentratieprofielen 140 meter uit het centrum.

Op 140 meter vanuit het centrum van de wolk worden in het vrije veld geen concentraties gemeten, het concentratieverloop valt dan in de grafiek samen met de x-as. De wolk in het vrije veld is een geconcentreerde smalle langgerekte wolk. In de richting haaks op de wind loopt deze concentratie snel af, waardoor er geen meetbare concentratie meer is op 140 meter afstand vanaf de as.

Voor de overige configuraties worden er wel concentraties gemeten op 140 meter vanaf de as. De wolk wordt door de obstakels verdund en verspreid over het gebied erachter.

Op de parallelle lijn 140 m vanaf het centrum van de wolk neemt de concentratie op deze lijn door de obstakels toe ten opzichte van de concentratie in het vrije veld. Aangezien de concentratie zonder obstakels 0 was is dit niet verwonderlijk. De concentraties blijven wel lager dan de concentraties op de as in het verlengde van de gaswolk.

Omdat er geen sprake is van reductie ten opzichte van het vrije veld, is het niet mogelijk om reductiefactoren aan te geven, zoals gedaan in voorgaand hoofdstuk, bij concentratiereductie op de hoofd-as. Daarom worden de concentratielijnen van de diverse configuraties hier kwalitatief vergeleken.

Hieronder zijn de configuraties genoemd, in afnemende hoogte van het concentratieprofiel, op een lijn van 140 meter vanaf het centrum van de wolk:

Configuratie 6: rijen gebouwen achterelkaar, oplopend 10 m, 30 m, 50 m

Configuratie 1: aaneengesloten wand (gebouwegevel) 50 m

Configuratie 8: 1 rij bomen gevolgd door 3 gebouwen rijen van 30 m, 50 m

Configuratie 11: 3 rijen gebouwen achterelkaar, aflopend 50 m, 30 m, 10 m

Configuratie 10: 1 rij bebouwing, hoogte 30 m, afstand gebouwen 50 m

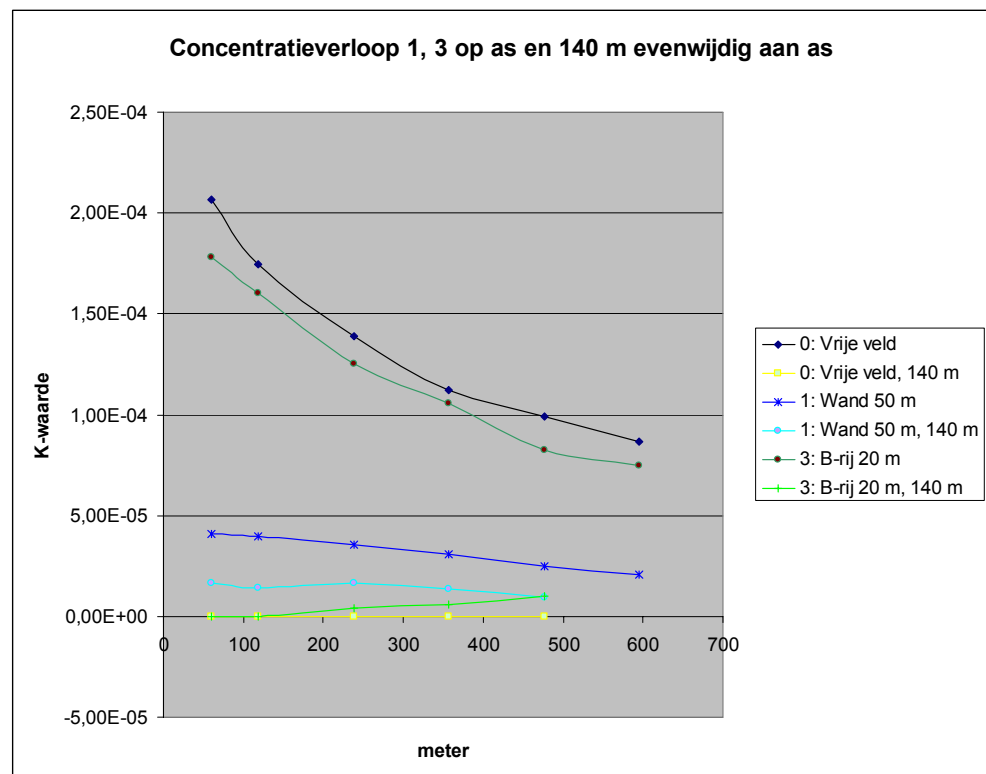
Configuratie 8a: 1 rij bomen (10 m) gevolgd door 2 rijen gebouwen 30 m, 10 m

Configuratie 9: 1 rij bebouwing, hoogte 30 m, afstand gebouwen 25 m

Configuratie 3: aaneengesloten rij bomen (20 m. hoog)

Configuratie 2: aaneengesloten wand (gebouwegevel) 20 m hoog

In onderstaand figuur worden de concentratieprofielen van een tweetal configuraties, met de hoogste en de laagste reductiefactor op de hoofd-as (1 en 3), met elkaar te vergeleken, de bomenrij en de 50 meter hoge massieve wand.



Figuur B3-5 Concentratieverloop configuratie 1 en 3 op de as en 140 meter.

De blauwe lijnen geven concentratieprofielen van de 50 meter hoge wand weer. De donkerblauwe op de hoofdas en de lichtgroene op de lijn 140 meter vanaf de as. De donkerblauwe lijn (op de as) gaf de laagste concentraties (vergeleken met de overige configuraties). De groene lijnen geven de concentratieprofielen weer van de bomerrij. De donkergroene op de hoofdas en de lichtgroene op de lijn 140 meter vanaf de as. De lichtblauwe lijn ligt beduidend hoger dan de lichtgroene lijn. Dus op 140 meter vanaf de hoofdas laat een goed reducerende configuratie een hogere concentratieprofiel zien dan een minder goed reducerende configuratie.

Uit figuur B3-5 en de rangschikking van configuraties (eerder genoemd in deze paragraaf) kan worden afgeleid dat hoe beter de configuratie de concentratie reduceert op de centrale as, hoe hoger de concentratie wordt op de parallelle lijnen op 140 m. Een uitzondering hierop is de wand van 20 meter. Deze scoorde bij de concentratiereductie in het centrum van de wolk vrij goed, echter op een afstand vanaf het centrum is de concentratie eveneens relatief laag vergeleken met de overige configuraties.

Om kwantitatief inzicht te krijgen in de verspreiding van de wolk in het achterliggende gebied is gekeken hoe de concentraties aan de randen van de wijk, op 140 meter vanuit de as, zich verhouden tot de concentraties op de hoofdas. In onderstaande tabel staan een tweetal verhoudingen uitgezet: ten eerste de concentratieverhouding voor 140 meter uit de as, ten opzichte van de concentratie in het vrije veld op de hoofdas, en ten tweede de verhouding van de concentratie op 140 meter uit de as, ten opzichte van de concentratie op de hoofdas van een betreffende configuratie.

Tabel B3-4 Concentratieverhouding op 140 meter t.o.v. concentratie op de hoofdas.

Configuratie	Concentratieverhouding op 140 meter ten opzichte van de hoofdas	
	t.o.v. het vrije veld	t.o.v. hoofdas met buffer
Configuratie 1: massieve wand 50 meter hoog	0,12	0,46
Configuratie 2: massieve wand 20 meter hoog	0,02	0,06
Configuratie 3: bomenrij 20 meter hoog	0,1	0,12
Configuratie 6: gebouwenrijen met oplopende hoogte 10 m, 30 m, 50 m	0,12	0,26
Configuratie 8: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30, 50 meter	0,11	0,34
Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30, 10 meter	0,08	0,12
Configuratie 9: 1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)	0,08	0,14
Configuratie 10: 1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 50 m)	0,08	0,12
Configuratie 11: 3 gebouwenrijen met aflopende hoogte 50 m, 30 m, 10 m	0,13	0,34

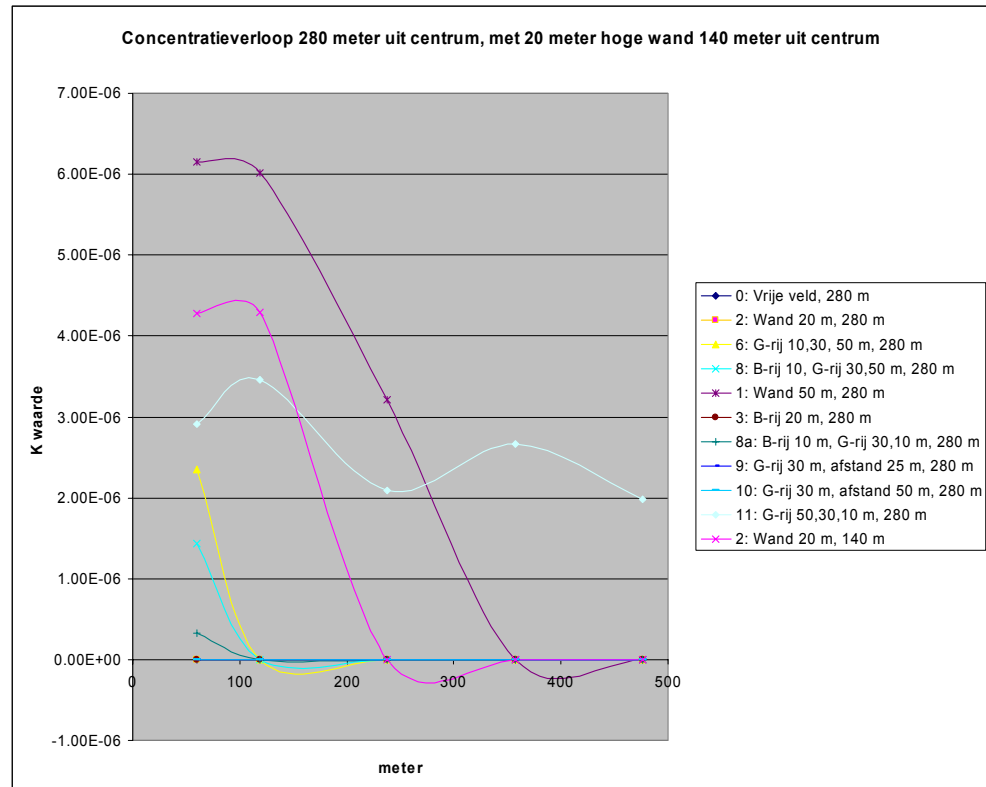
De tabel kan als volgt worden gelezen: voor bijvoorbeeld configuratie 2 geldt dat de concentratie op 140 meter vanuit de as 2% is van de oorspronkelijke concentratie op de as bij een vrije veld situatie. De concentratie op 140 meter bedraagt 6% van de concentratie op de as met een bufferzone (configuratie 2). Dit laatste geeft dus de mate van spreiding van concentratie aan na een bufferzone.

Uit de tweede kolom in de tabel (verhouding t.o.v. vrije veld) blijkt dat de concentratie op 140 meter afstand van de as 10%-13% bedraagt van de concentratie op de hoofdas in het vrije veld. Eerder was geconstateerd dat de wolk meer verspreid wordt over een groter gebied, en dat op de randen de concentratie toeneemt ten opzichte van het vrije veld. Uit deze verhouding blijkt dat de concentratie weliswaar toeneemt, maar uiteindelijk circa 10% bedraagt van de concentratie die er heerst op de hoofdas, in het vrije veld.

Het getal in de derde kolom is een maat hoe de concentratie verspreiding is in de wijk erachter, bekeken loodrecht op de as: hieruit blijkt dat de configuraties met hoge gebouwen (tot 50 meter) minder grote verschillen tonen in concentratieverschillen van de randen ten opzichte van de assen. Dit was reeds eerder geconstateerd: de configuraties die goed reduceren op de hoofdas, hebben een relatief hogere concentratie op de randen.

De lijn met meetpunten op 280 meter vanaf de as valt naast de configuratie. In principe wordt de stroming daar dus niet geblokkeerd, de meetpunten kunnen slechts bereikt worden doordat de wolk langs de configuratie stroomt. Voor alle configuraties geldt dat de concentraties op 280 meter vanaf de as lager liggen dan de concentraties op 140 m. Dit is zichtbaar in figuur B3-6. Om de profielen op 280 meter te kunnen refereren aan

de profielen op 140 meter vanuit de as, is als referentie het concentratieprofiel met de wand van 20 meter ook weergegeven op 140 meter (dit is de roze lijn). Dit was één van de lagere concentratieprofielen op 140 meter. Hieruit blijkt dat de concentratieprofielen op 280 meter vergelijkbaar zijn, of lager liggen als het laagste profiel op 140 meter.



Figuur B3-6 Concentratie lijnen van configuraties op 280 m vanuit centrum, met wand 20 op 140 meter vanuit het centrum.

Ook op 280 meter van de as is gekeken hoe de concentraties zich verhouden tot de concentraties op de hoofdas.

Hieruit blijkt dat op 280 meter, voor alle concentratie geldt dat deze maximaal 2% is ten opzichte van de concentratie op de hoofdas, voor de vrije veld situatie.

Ook is op 280 meter van de as is gekeken hoe de concentraties zich verhouden tot de concentraties op de hoofdas per configuratie. Dan blijkt dat voor alle configuratie geldt dat deze maximaal 3% bedraagt, met uitzondering van configuratie 1 (wand van 50 m) daar bedraagt de maximum concentratie 15% t.o.v. de concentratie op de hoofdas.

#### *Conclusie:*

Hoe beter de configuratie de concentratie reduceert op de centrale as, hoe hoger de concentratie wordt op de parallelle lijnen op 140 m en 280 m van de as: de wolk wordt uitgespreid over een groter gebied. Het maximum van de wolk blijft echter gelegen op de as van de wolk en heeft een lagere concentratie dan wanneer er geen configuratie wordt geplaatst in de bufferzone.

Door dit gedrag kan het zijn dat er op plekken in het vrije veld geen concentratie op zou treden, terwijl dit na invulling van de bufferzone wel zo is. Het blijkt dat de

concentraties op 140 meter hooguit 13% bedragen ten opzichte van de concentratie op de hoofdas, in het vrije veld, en dat dit voor 280 meter hooguit 3% bedraagt.

In de totaliteit worden de concentraties wel lager en heeft een configuratie een positief effect op de veiligheid.

Het blijkt dat configuratie 2 er relatief voordelig uitkomt: Deze is één van de gunstigste configuraties met betrekking tot concentratiereductie op de hoofdas. Daarnaast zijn de concentraties op de randen, vergeleken de overige configuraties, zeer laag.

### 3.3 Aanstroming onder een hoek (30 graden)

Naast de rechte aanstroming zijn de configuraties ook aangestroomd onder een hoek van 30 graden. Bij de uitwerking van de metingen is gebleken dat bij een aantal configuraties sprake is geweest van versturende effecten op de metingen. Dit werd veroorzaakt door dat de meetpunten niet op de juiste plek lagen om de effecten onder een hoek goed te kunnen meten.

Er is hier sprake van een tweetal versturende effecten in de metingen.

1. Randeffecten die veroorzaakt worden doordat de stroming langs de configuratie stroomt.
2. Versturende effecten, doordat één of meerdere rijen van de configuratie niet volledig in de wolk liggen. Dit wordt veroorzaakt doordat als gevolg van roteren van de draaischijf een deel van de configuratie uit de wolk wegdraait. Hierdoor is de meting niet meer representatief voor de configuratie.

Dit tweede punt geldt in principe voor vrijwel alle configuraties, het effect zal voor de ene configuratie echter groter zijn dan voor de ander. Door roteren draait rij 1 vrijwel volledig uit de stroming weg, dus als op rij 1 de grootste gebouwen staan, dan is de metingen niet meer representatief voor het effect van de configuratie.

Hierdoor zullen niet alle configuraties in deze paragraaf worden uitgewerkt. De configuraties die hier uitgewerkt worden voldoen aan de volgende 2 criteria:

1. De hoogste (voor de concentratiereductie dominante) gebouwen liggen op rij 2 of rij 3
2. De rij met het hoogste gebouw is tevens een verlengde rij (dit is een rij die over de plaat heen steekt, zoals toegelicht in hoofdstuk 4.1 van het hoofd rapport)

Als deze criteria worden toegepast dan vallen de configuraties 8 en 11 af voor verdere uitwerking.

Omdat de metingen echter toch nuttige informatie verstrekken over de effecten die spelen bij aanstroming onder een hoek, is wel besloten de metingen uit te werken. De resultaten zullen echter kwalitatief worden uitgewerkt en niet worden omgerekend tot een reductiefactor ten opzichte van het vrije veld. De concentratieprofielen worden kwalitatief vergeleken en de trends worden besproken.

Daarnaast zijn de meetpunten zo geselecteerd, dat er zo min mogelijk invloed van randeffecten bestaat, het gevolg is wel dat de metingen onder een hoek, gebaseerd zijn op een kleinere hoeveelheid meetpunten dan voor loodrechte stroming.

#### 3.3.1 *Effecten van massieve wand en bomenrij onder 30 graden*

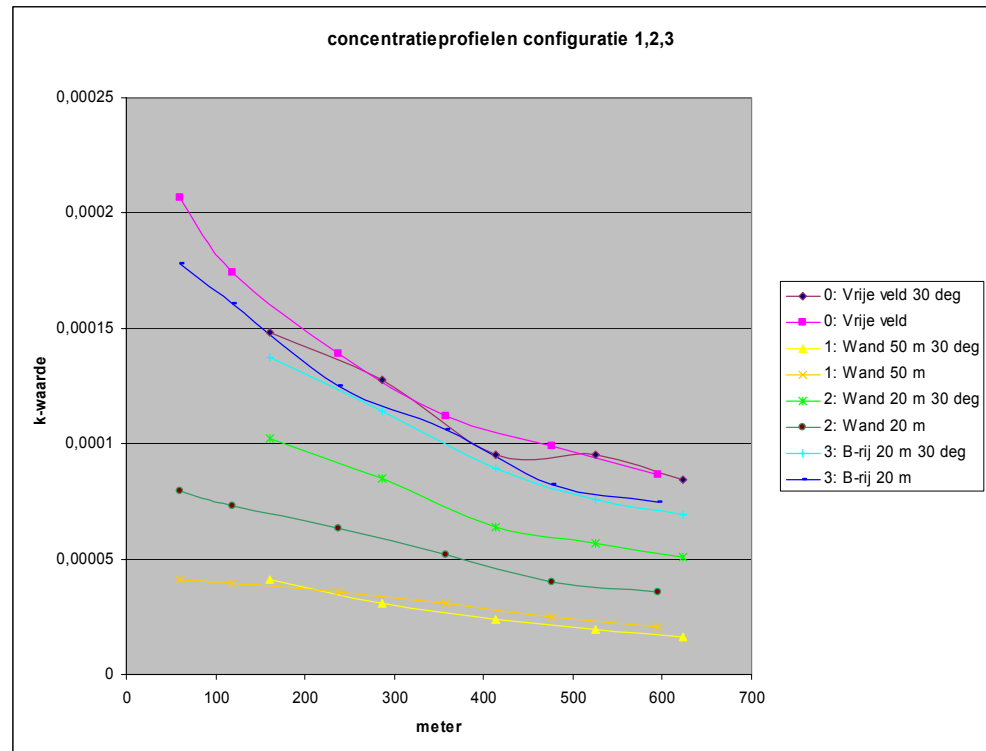
Het effect op het concentratieprofiel van de volgende configuraties wordt vergeleken:

Configuratie 0: Geen obstakel

Configuratie 1: Massieve wand, 50 meter hoog

Configuratie 2: Massieve wand 20 meter  
 Configuratie 3: Bomenrij van 20 meter hoog

Onderstaande figuur geeft de concentratieprofielen weer.



Figuur B3-7 Configuraties 1, 2 en 3 recht aangestroomd en onder een hoek.

Uit de figuur blijkt dat voor alle configuraties (1, 2 en 3) geldt dat ook bij een aanstroming onder een hoek een concentratiereductie optreedt ten opzichte van het vrije veld.

Tevens blijkt dat voor de massieve wand van 50 meter hoogte er nauwelijks effect merkbaar is van de aanstroming onder een hoek, de concentratieprofielen voor aanstroming onder een hoek (de licht gele lijn) en rechte aanstroming (donker gele lijn) liggen nagenoeg over elkaar heen.

Bij de wand van 20 meter hoog is er een duidelijker verschil zichtbaar: Hierbij ligt het concentratieprofiel bij aanstroming onder een hoek (licht groene lijn) beduidend hoger dan het concentratieprofiel onder rechte aanstroming (donker groene lijn). Het is opmerkelijk dat er bij de 50 meter wand het concentratie profiel door aanstroming onder een hoek niet verandert ten opzichte van de rechte aanstroming, terwijl dit bij 20 meter hoge wand wel gebeurt. Het feit dat er bij aanstroming onder een hoek een hogere concentratie optreedt dan bij rechte aanstroming is reeds bekend uit eerdere praktijkonderzoeken aan massieve wanden [4]. Als de stroming onder een hoek aankomt, draait deze als een soort kurkentrekker over de wand heen en veroorzaakt dan achter de wand een hogere concentratie dan bij rechte aanstroming. Het feit dat dit verschijnsel bij een hogere wand van 50 meter niet optreedt, betekent dat de wand van 50 meter schijnbaar te hoog is voor dit verschijnsel.



Mogelijk heeft het een gunstige invloed als er achter de wand van 20 meter nog gebouwen worden geplaatst die de stroming nog verder kunnen verstoren. Het is niet bekend of dit daadwerkelijk zo is, dat zal onderzocht moeten worden.

Voor de bomenrij is er nauwelijks een verschil tussen de aanstroming onder een hoek (licht blauwe lijn) en de rechte aanstroming (donker blauwe lijn).

*Conclusie:*

Bij de massieve wand van 20 meter treedt er een concentratiereductie op ten opzichte van het vrije veld voor zowel de rechte aanstroming als de aanstroming onder een hoek van 30 graden. Onder aanstroming onder een hoek treedt er een hogere concentratie op dan bij rechte aanstroming.

Bij een massieve wand van 50 meter en bij een bomenrij van 20 meter treedt er voor zowel rechte als aanstroming onder een hoek een concentratiereductie op. Tevens valt op dat er voor deze configuraties nauwelijks verschil bestaat tussen rechte aanstroming en aanstroming onder een hoek.

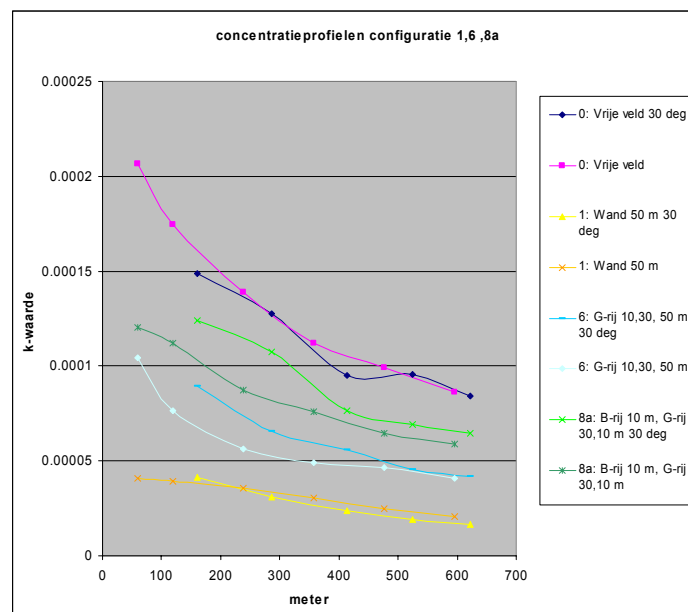
### 3.3.2 Effecten van diverse opties gebouwen configuraties onder 30 graden

Het effect op het concentratieprofiel van de volgende configuraties wordt vergeleken:

- Configuratie 0: geen obstakel
- Configuratie 1: massieve wand 50 m
- Configuratie 6: 3 gebouwenrijen met oplopende hoogte 10 m, 30 m, 50 m
- Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 m, 2 gebouwenrijen 30 m, 10 m

Bij alle configuraties blijkt dat voor zowel rechte aanstroming als aanstroming onder een hoek een concentratiereductie optreedt ten opzichte van het vrije veld.

Voor zowel configuratie 6 als 8 geldt dat door aanstroming onder een hoek de concentratie toeneemt ten opzichte van een rechte aanstroming. Dit is zichtbaar in onderstaande figuur waar de concentratieprofielen voor configuratie 6 (de blauwe lijnen) en configuratie 8 (de groene lijnen) zijn weergegeven. De toename is relatief gezien voor beide configuraties vergelijkbaar qua orde grootte.



Figuur B3-8 Concentratieprofielen configuraties 1, 6, 8a.

*Conclusie:*

Voor de configuraties 1,6 en 8a bestaande diverse gebouwenrijen, eventueel gecombineerd met een bomenrij geldt:

Voor zowel rechte aanstroming als aanstroming onder een hoek treedt een concentratiereductie op ten opzichte van het vrije veld.

De concentratie wordt bij aanstroming onder een hoek minder gereduceerd dan bij rechte aanstroming.

### 3.3.3 *Effecten uitvoeringsvormen gebouwoptie hoogte 30 meter onder 30 graden*

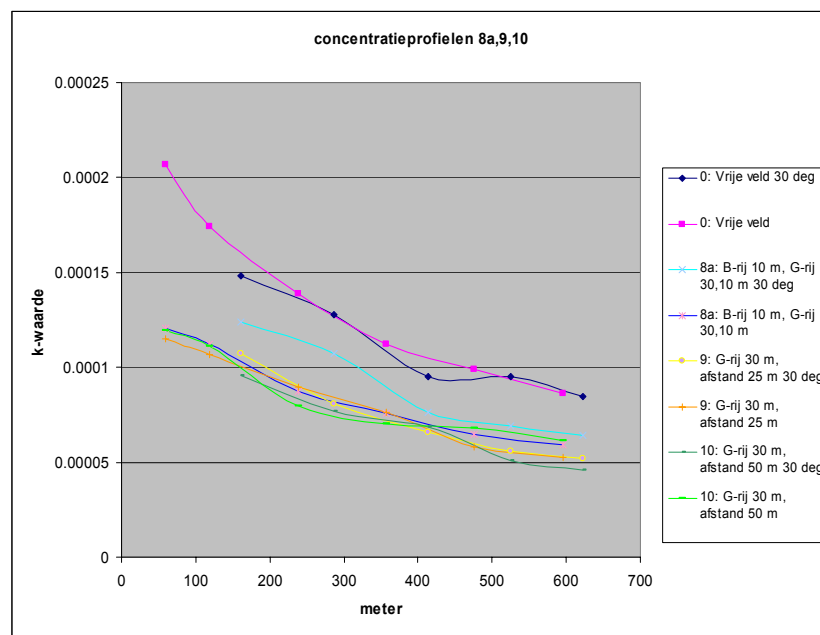
Het effect op het concentratieprofiel van de volgende configuraties wordt vergeleken:

Configuratie 0: geen obstakel

Configuratie 8a: 1 bomenrij hoogte 10 meter, 2 gebouwenrijen 30 m, 10 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)

Configuratie 9: 1 gebouwenrij hoogte 30 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)

Configuratie 10: 1 gebouwenrij hoogte 30 m  
(onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 50 m)



Figuur B3-9 Concentratieprofielen configuratie 8a, 9 en 10.

Uit de grafieken blijkt dat ook bij de configuraties 8a, 9 en 10 er zowel voor rechte als voor aanstroming onder een hoek een reductie optreedt ten opzichte van het vrije veld.

Ook is zichtbaar dat bij configuratie 8a dat de concentratie bij aanstroming onder een hoek hoger is dan bij rechte afstroming. Dit is de configuratie die bestaat uit meerdere gebouwenrijen en een bomenrij. Dit in tegenstelling tot de configuraties 9 en 10, waarbij nauwelijks invloed zichtbaar is van aanstroming onder een hoek. Configuratie 9 is identiek aan configuratie 8a, maar dan zonder de bomenrij ervoor en zonder de gebouwenrij van 10 meter hoog erachter. De configuraties 9 en 10 ondervinden nauwelijks invloed van de aanstroming onder een hoek: de concentratie neemt nauwelijks toe.

Ook bij de voorgaande configuratie met gebouwenrijen (dit is configuratie 6) bleek een duidelijke concentratiename van aanstroming onder een hoek t.o.v. rechte aanstroming. Er is geen verklaring gevonden hoe het kan dat een configuratie, bestaande uit meerdere gebouwenrijen (evt. gecombineerd met bomen) een grotere toename in de concentratie laten zien bij aanstroming onder een hoek dan een enkele rij zoals configuratie 9 en 10.

*Conclusie:*

Voor alle configuraties geldt dat er een concentratiereductie behaald wordt ten opzichte van het vrije veld, voor zowel aanstroming onder een hoek als rechte aanstroming.

Configuratie 8a, bestaande uit meerdere rijen gebouwen en een bomenrij laat bij een aanstroming onder een hoek een lagere concentratiereductie zien dan ten opzichte van een rechte aanstroming.

De configuraties bestaande uit 1 gebouwenrij (configuratie 9 en 10) laten nauwelijks verschil zien tussen een rechte aanstroming en een aanstroming onder een hoek.

3.3.4 *Conclusies aanstroming onder een hoek*

Voor alle configuraties geldt dat er een concentratiereductie behaald wordt ten opzichte van het vrije veld, voor zowel aanstroming onder een hoek als rechte aanstroming.

Voor de volgende configuraties is de concentratiereductie bij aanstroming onder een hoek lager dan bij rechte aanstroming:

Configuratie 2	20 meter massieve wand
Configuratie 6:	3 gebouwenrijen met oplopende hoogte 10 m, 30 m, 50 m
Configuratie 8a:	1 bomenrij hoogte 10 m, 2 gebouwenrijen 30 m, 10 m

Voor de volgende configuraties is de concentratiereductie bij aanstroming onder een hoek vergelijkbaar met die bij rechte aanstroming:

Configuratie 1	50 meter massieve wand
Configuratie 3	Bomenrij van 20 meter hoog
Configuraties bestaande uit 1 gebouwenrij:	
Configuratie 9:	1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 25 m)
Configuratie 10:	1 gebouwenrij hoogte 30 m (onderlinge afstand gebouwen loodrecht op wind: 50 m)

De metingen aan de configuraties 8 en 11 zijn niet uitgewerkt voor aanstroming onder een hoek omdat de kwaliteit van de meting onvoldoende was.



## Bijlage 4 Bepaling letaliteit bij concentratiereductie

De reductie van het aantal (letale) slachtoffers wordt gedaan door voor de gewijzigde situatie (met gereduceerd concentratieprofiel) een gewijzigde letaliteit te bepalen. De letaliteit wordt bepaald op basis van de Probit. Er is een gereduceerde Probit afgeleid die een functie is van de berekende (ongewijzigde) Probit en de concentratieverhouding (gereduceerde concentratie/ongewijzigde concentratie).

De letaliteit wordt berekend volgens de methode genoemd in het paarse boek. Hierbij wordt voor toxische blootstelling gebruik gemaakt van de volgende Probit relatie:

$$Pr = a + b * \ln(C^n * t)$$

waarin:

Pr:	Probit	[-]
a,b,n:	constanten die de toxiciteit van een stof weergeven	[-]
C:	concentratie	[mg/m <sup>3</sup> ]
t:	blootstellingtijd	[min]

De probit is een functie van de toxische dosis. De toxische dosis, D, is gelijk aan

$$D=C^n*t$$

Deze dosis is eenvoudig te bepalen, als de concentratie constant is gedurende de blootstelling. Als de concentratie niet constant is, wordt de dosis bepaald met de volgende formule:

$$D = \int C^n dt$$

In dit geval wordt de volgende Probit relatie verkregen:

$$Pr = a + b \ln \int C^n dt$$

Als nu de concentratie door aanwezigheid van een buffer gereduceerd wordt met fractie f, dan geldt voor de gereduceerde concentratie:

$$C_r = C * f$$

Voor deze concentratie wordt nu de gereduceerde Probit bepaald. Deze luidt dan als volgt:

$$Pr_r = a + b \ln \int C_r^n dt$$

Invullen van de gereduceerde concentratie geeft:

$$Pr_r = a + b \ln \int (C * f)^n dt$$

dit is

$$Pr_r = a + b \ln \int (C^n * f^n) dt =$$

$$Pr_r = a + b \ln f^n \int C^n dt =$$

$$Pr_r = a + b \ln \int C^n dt + b \ln f^n =$$

$$Pr_r = Pr + b \ln f^n$$

De gereduceerde Probit wordt bepaald op basis van de huidige Probit met de volgende relatie:

$$Pr_r = Pr + n * b \ln f$$

hierbij is:

Pr: Probit

Pr<sub>r</sub>: gereduceerde Probit

n,b: constanten in de Probit relatie toxische blootstelling

f: fractie waarmee de concentratie gereduceerd wordt, onder invloed van het obstakel

Met behulp van de tabel 5.1 in het paarse boek [3], wordt vervolgens de gereduceerde letaliteit bepaald.

Voor de Probit constanten van NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> en HCN is uitgegaan van de volgende waarden (tabel 5.2 paarse boek [3]).

stof	A	B	n
NO <sub>2</sub>	-18,6	1	3,7
NH <sub>3</sub>	-15,6	1	2
HCN	-9,8	1	2,4

Voor de diverse configuraties en de verschillende toxische stoffen kan dus nu bepaald worden in welke mate de Probit afneemt. Vervolgens kan worden bepaald wat de corresponderende letaliteit wordt. Onderstaande tabel geeft weer wat er gebeurt als de letaliteit 99, 90, 50, 10 en 1% is, afhankelijk van de chemische stof.

Dit is gedaan voor de situatie met de massieve wand van 20 meter hoog, die een concentratie reductie van 58 procent veroorzaakt, en daarmee een vermenigvuldiging van de concentratie met een fractie f van 0,42.

Tabel B4-1 Reductie van letaliteit voor NO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> en HCN als gevolg van een concentratiereductie.

voor reductie		na reductie					
		NO <sub>2</sub>		NH <sub>3</sub>		HCN	
letaliteit %	Probit	Probit	letaliteit %	Probit	letaliteit %	Probit	letaliteit %
99	7,33	4,15	20%	5,61	73%	5,27	61%
90	6,28	3,10	3%	4,56	33%	4,22	22%
50	5,00	1,82	< 1%	3,28	4%	2,94	2%
25	4,33	1,15	< 1%	2,61	< 1%	< 2,67	< 1%
10	3,72	0,54	< 1%	2,00	< 1%	< 2,67	< 1%
1	2,67	-0,51	< 1%	0,95	< 1%	< 2,67	< 1%

Deze tabel is heel algemeen toepasbaar: op het moment dat de n waarde van de stof bekend is, en de reductiefactor voor de concentratie (als gevolg van een obstakel) dan kan voor ieder punt in een gebied, waar de letaliteit van bekend is, een nieuwe (gereduceerde ) letaliteit bepaald worden.

Met behulp van bovenstaande tabel kan nu afgelezen worden dat op de plekken waar de letaliteit 50% bedraagt, deze door een wand van 20 meter voor NO<sub>2</sub> gereduceerd kunnen worden tot minder dan 1%, bij NH<sub>3</sub> gereduceerd kunnen worden tot 4% en voor HCN gereduceerd kan worden tot 2%.

Uit tabel 3.4 blijkt dat voor de stoffen met de hoogste n waarde het effect van een concentratiereductie het grootst is. Dit is ook duidelijk zichtbaar in bovenstaande relatie voor de gereduceerde Probit: hoe hoger de n waarde, hoe groter het effect is van een bepaalde reductie fractie.





## Bijlage 5 Watergordijnen parameters

### 5.1 Overzicht parameters

#### Gordijnconfiguratie

- Vast of mobiele installatie
- Water of stoomgordijn
- Afstand gordijn tot bron
- Spreierichting
- Spreihoogte
- Meerdere gordijnen
- Reactietijd

#### Nozzle parameters

- Vloeistofdebiet
- Druppelgrootte
- Nozzle druk
- Nozzle type
- Afstand tussen nozzles
- Gebruik van additieven

#### Release condities

- Stoftype
- Hoeveelheid materiaal
- Fase
- Dichtheid
- Druk
- Temperatuur

#### Meteorologische omstandigheden

- Windsnelheid
- Windrichting
- Atmosferische stabiliteit
- Relatieve luchtvochtigheid

### 5.2 Voorbeeldberekening watercapaciteit

Ter illustratie, uitgaande van een verwijderingrendement van 75% vermindert een dubbel uitgevoerd watergordijn, bij weerklasse D5, de waterstofcyanide concentratie van 58 ppm naar 15 ppm. Op basis van dit uitgangspunt kan de watercapaciteit als volgt worden berekend:

- 2,0 m hoog, te bestrijden oppervlakte 1 x 1 m  $\longrightarrow$  2,0 m<sup>3</sup> gaswolk (aanname)
- Dichtheid gaswolk = 1,25 kg gaswolk per m<sup>3</sup> gaswolk
- 58 ppm = 58 mg HCN per kg gaswolk
- 58 ppm = 73 mg HCN per m<sup>3</sup> gaswolk
- 2,0 m<sup>3</sup> gaswolk bevat 0,146 g HCN

- Verhouding water/HCN = 40 : 1 (vuistregel)
- Hoeveelheid water = 6 g = 0,00601 dm<sup>3</sup> water per m<sup>3</sup> gaswolk
- Windsnelheid 5,0 m/s → hoeveelheid water = 0,0301 dm<sup>3</sup> per s per m
- 2 x gordijnlengte 150 m → **waterdebiet = 9 dm<sup>3</sup> per s (of l/s)**
- Missieduur 30 min → **watervoorraad = 16 m<sup>3</sup>**

Indien het verontreinigde sproeiwater wordt teruggevoerd naar de watervoorraad:

- Afstand tussen scherm en voorraad = 150 m
- Stroomsnelheid afvoerkanaal/riolering = 0,7 m/s (aanname)
- Holdup sproeiwater → 3,6 min
- Holdup sproeiwater → 1,9 m<sup>3</sup>
- Verlies sproeiwater = 20% = 3,2 m<sup>3</sup> (aanname)
- Minimale watervoorraad (**buffer**) → **5,1 m<sup>3</sup>**