

TNO-rapport

Risico-analyse methodiek CPR-15/2 bedrijven

Referentienummer 94-316
Dossiernummer 112327-24514
Datum juni 1994
NP

Auteurs
M. Molag
D. de Weger

Trefwoorden
— opslagen gevaarlijke stoffen
— risico-analyse
— scenario's

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

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO', dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Bestemd voor
Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening
en Milieubeheer
Directoraat-Generaal Milieubeheer
Afdeling Industrie en Overige Bedrijfstakken
t.a.v. Ing. C.M. Moons
Den Haag

Voorwoord

Gevaarlijke stoffen kunnen onderling zeer verschillende gevaarseigenschappen bezitten en daardoor bij ongewenste situaties externe veiligheidsrisico's veroorzaken. Afhankelijk van de gevaarseigenschappen en het soort verpakkingsmateriaal worden chemicaliën onder een passend beschermingsniveau opgeslagen. Het voorliggende rapport bevat een methodiek om risico's van gevaarlijke stoffen die onder verschillende beschermingsniveaus worden opgeslagen te berekenen.

Hiervoor is gedetailleerd uitgewerkt welke kansfactoren voor het falen van brandbestrijdingssystemen in rekening worden gebracht. Bovendien is rekening gehouden met recente inzichten bij de vorming van toxische verbrandingsprodukten van stikstofhoudende chemicaliën. In het rapport is weergegeven hoe de externe veiligheidsrisico's van stikstofhoudende verbrandingsprodukten worden verminderd. Het rapport bevat tevens een voorbeeld risico-analyse.

De beschreven methodiek waarmee een kwantitatieve risico-analyse kan worden uitgevoerd voor opslagen die onder CPR-15/2 vallen, wordt in de volgende gevallen toegepast:

- Een bedrijf valt onder het Besluit Risico's Zware Ongevallen. Voor opslagen moet altijd een kwantitatieve risico-analyse worden opgesteld, ook al voldoet de opslag aan de afstanden in de afstandentabel uit de circulaire betreffende werkprogramma aanpassing opslagplaatsen gevaarlijke stoffen en chemisch afval van 31 augustus 1992. Deze risico-analyse voor de opslag(en) hoeft echter niet te worden uitgevoerd als binnen het subselectiesysteem voor het uitvoeren van een kwantitatieve risico-analyse van een inrichting de opslag niet wordt geselecteerd.
- Een bedrijf is van mening dat op grond van de opgeslagen gevaarlijke stoffen in combinatie met de geïnstalleerde veiligheidsvoorzieningen een kortere afstand tot woningen van derden of gevoelige objecten categorie II kan worden aangehouden dan vermeld in de circulaire betreffende werkprogramma aanpassing opslagplaatsen gevaarlijke stoffen en chemisch afval van 31 augustus 1992.
- Het bevoegd gezag is van mening dat de afstanden in de circulaire ontoereikend zijn. In de circulaire staat vermeld dat dit het geval kan zijn als er brandbare stikstofverbindingen zijn opgeslagen of als er meer dan 100 personen per hectare wonen binnen de afstanden in de tabel.
- Het bevoegd gezag is voornemens in bestaande situaties nieuwe woningen toe te staan binnen de afstanden in de afstandentabel.

Voor de toetsing van de rekenresultaten aan de externe veiligheidsnormen, wordt verwezen naar de circulaire betreffende werkprogramma aanpassing opslagplaatsen gevaarlijke stoffen en chemisch afval van 31 augustus 1992.

Het hoofd van de afdeling
Industrie en Overige Bedrijfstakingen

Ing. C.M. Moons

Inhoudsopgave

	Voorwoord	3
1	Inleiding	7
2	Randvoorwaarden	9
2.1	Wanneer risico-analyse	9
2.2	Stoffen en stofcategorieën	10
2.3	Regelgeving CPR-15/2	11
2.3.1	Beschermingsniveaus	11
2.3.2	Overige randvoorwaarden	11
2.4	Risico voor de omgeving	11
3	Risico-berekening vrijkomen van de opgeslagen producten	13
3.1	Inleiding	13
3.2	Vrijkomen toxische vaste stoffen	13
3.2.1	Algemeen	13
3.2.2	Bronsterkte	14
3.2.3	Effect- en schadeberekeningen	14
3.2.4	Kansen	16
3.2.5	Voorbeeldberekening vrijkomen toxische vaste stoffen (poeders)	16
3.3	Vrijkomen toxische vloeistoffen	19
3.3.1	Algemeen	19
3.3.2	Bronsterkte	19
3.3.3	Effect- en schadeberekeningen	20
3.3.4	Kansen	20
3.3.5	Voorbeeldberekening vrijkomen toxische vloeistoffen	21
4	Brand	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Risico-methodiek voor een brand	25
4.2.1	Brandscenario's	26
4.2.2	Opgeslagen stoffen	28
4.2.3	Brandsnelheid	30
4.2.4	Bronsterkte toxische verbrandingsproducten en onverbrande zeer toxische stoffen	31
4.2.5	Toxiciteit	35
4.2.6	Dispersie	36
4.3	Kansschattingen	36
4.3.1	Inleiding	36
4.3.2	Factoren die van invloed zijn op brandfrequentie en branduitbreiding	37
4.3.3	Brandfrequentie chemicaliënopslag	38
4.3.4	Kans op een brandscenario voor de verschillende beschermingsniveaus/systemen	39

4.4	Berekening individueel- en groepsrisico	47
4.5	Voorbeeldberekening brand in chemicaliënopslag	47
4.5.1	Beschrijving van de opslag.....	47
4.5.2	Effect- en schadeberekeningen brand.....	48
4.5.3	Kansschattingen	54
4.5.4	Risicoberekening en presentatie.....	56
5	Referenties	57
6	Verantwoording	59

Bijlage 1 Representatieve meteorologische condities West Nederland

Bijlage 2 Samenstelling Begeleidingscommissie

1 Inleiding

In de CPR-richtlijn 15/2 worden regels gesteld voor de opslag van gevaarlijke stoffen in hoeveelheden vanaf 10 ton. Indien de afstand van de chemicaliënopslag tot de woonbebouwing kleiner is dan aangegeven in de VROM circulaire IBP 03892009 d.d. 31 augustus 1992 [13] zal voor dergelijke opslagen een kwantitatieve risico-analyse moeten worden uitgevoerd. In dit rapport wordt de door het ministerie van VROM aanbevolen methode beschreven om deze risico-analyse uit te voeren. De veronderstellingen en uitgangspunten voor de risicoberekeningen worden in dit rapport beschreven. Het betreft onder meer:

- de te beschouwen ongevalsscenario's;
- brandontwikkeling en bronsterktes aan schadelijke stoffen en toxische verbrandingsprodukten;
- te hanteren schademodelen;
- kansen voor de diverse ongevalsscenario's.

In veel gevallen hoeft geen risico-analyse voor een CPR-15/2 opslag worden uitgevoerd. In hoofdstuk 2.1 is aangegeven onder welke omstandigheden een risico-analyse moet worden uitgevoerd en wanneer een risico-analyse niet vereist wordt.

Tevens wordt in hoofdstuk 2 op grond van de inhoud van CPR-15/2 nagegaan welke ongevalstypen en fysische effecten relevant zijn voor het externe risico van een chemicaliënopslag. De mogelijk relevante ongevalstypen worden toegekend aan elk van de elementen uit de matrix uit CPR-15/2. De input voor de risicoberekeningen wordt gegeven voor elk van de relevante scenario's.

In hoofdstuk 3 en 4 wordt voor elk van de geïdentificeerde ongevalstypen aangegeven welke berekeningen moeten worden uitgevoerd. De risico's voor de omgeving van een ongeval met gevaarlijke stoffen worden bepaald door de hoeveelheid stof die wordt gevormd en/of vrijkomt, de verspreiding van de stof in de omgeving en de schade als gevolg van blootstelling van aanwezigen. Daarnaast is de kans op een ongeval en op het optreden van schade een belangrijk gegeven. Aangegeven wordt welke parameters belangrijk zijn bij het berekenen van de bronsterkte, of er rekening moet worden gehouden met gebouwinvloed (en zo ja waar), en wat de relevante kansen zijn. Voor elk ongevalsscenario wordt steeds een voorbeeldberekening gegeven.

Deze risico-analyse methodiek CPR-15/2 bedrijven is opgesteld door de Afdeling Industriële Veiligheid van TNO Milieu- en Energietechnologie in opdracht van de Afdeling Industrie en Overige Bedrijfstakken van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. Bij het opstellen van de methodiek werd TNO begeleid door een hiervoor ingestelde werkgroep. De samenstelling van de werkgroep is gegeven in bijlage 2.

2 Randvoorwaarden

2.1 Wanneer risico-analyse

De richtlijn CPR-15/2 heeft betrekking op opslagen met een capaciteit van tenminste 10 ton, waarin gevaarlijke stoffen, chemische afvalstoffen of bestrijdingsmiddelen in emballage liggen opgeslagen.

Indien de afstand van een CPR-15/2 chemicaliënopslag tot de woningen van derden en objecten categorie II kleiner is dan de indicatieve afstanden aangegeven in de VROM circulaire IBP 03892009 d.d. 31 augustus 1992 [13] dient voor dergelijke opslagen een kwantitatieve risico-analyse te worden uitgevoerd. Indien wel aan deze indicatieve afstanden is voldaan, maar stoffen zijn opgeslagen die een hoger risico geven, moet ten behoeve van het bevoegd gezag inzicht worden gegeven in het afwijkend risico. Dit is het geval bij de opslag van brandbare stikstofverbindingen zoals bijvoorbeeld nitro- en aminoverbindingen en brandbare stikstofverbindingen met amine, cyanide, cyaanhydrine, aniline en isocyanaat. De indicatieve afstanden die in de circulaire IBP 03892009 d.d. 31 augustus 1992 zijn vermeld, zijn gebaseerd op een N-gehalte van 1,5% waarbij sprake is van 100% actieve stof. Indien het N-gehalte van de totale hoeveelheid opgeslagen chemicaliën (waarbij sprake is van 100% actieve stof) hoger is dan 1,5%, is een kwantitatieve risico-analyse vereist. Voor een opslag waarin geformuleerde actieve stoffen zijn opgeslagen is het risico lager. Voor deze opslagen ligt de drempelwaarde van het stikstofgehalte voor het uitvoeren van een kwantitatieve risico-analyse op $1,5/F\%$, waarbij F de voor de opslag gemiddelde actieve stof fractie is. Bijvoorbeeld bij een voor de opslag gemiddeld actief stofgehalte van 30% (actieve stoffractie 0,3) bedraagt de drempelwaarde $1,5/0,3 = 5\%$. Voor het bepalen van het percentage stikstof en het gemiddelde actieve stof percentage wordt verwezen naar hoofdstuk 4 en de voorbeeldberekening.

Een kwantitatieve risico-analyse hoeft niet te worden uitgevoerd als er geen toxische stoffen zijn opgeslagen en er geen toxische verbrandingsprodukten kunnen worden gevormd. Dit is het geval als er geen stoffen zijn opgeslagen met een LD_{50} (rat) $< 25 \text{ mg/kg}$ en aan een van onderstaande voorwaarden is voldaan:

- Alleen chemicaliën zijn opgeslagen die geen zwavel, stikstof, chloor, fluor of broom bevatten;
- Alleen opslag van waterige anorganische zuren en basen plaatsvindt, tenzij toxische dampen kunnen ontwijken;
- Alleen opslag van anorganische zouten plaatsvindt;
- Alleen opslag van niet brandbare materialen plaatsvindt;
- Combinaties van a, b, c en d.

Bedrijven die onder het Besluit Risico's Zware Ongevallen vallen zijn te allen tijde verplicht een kwantitatieve risico-analyse op te stellen. Deze risico-analyse voor de opslag(en) hoeft echter niet te worden uitgevoerd als binnen het subselectiesysteem voor het uitvoeren van een kwantitatieve risico-analyse van een inrichting de opslag niet wordt geselecteerd.

Voor alle opslagen geldt echter dat het noodzakelijk is om een afstand van 20 meter aan te houden ten opzichte van woningen van derden of gevoelige objecten categorie II [13].

2.2 Stoffen en stofcategorieën

De werkingssfeer van CPR-15/2 strekt zich uit tot de volgende Wet Milieu-gevaarlijke Stoffen (WMS) stofcategorieën:

- oxiderende stoffen NIET: peroxiden, nitraten;
- licht ontvlambare (K1) stoffen NIET: zelfontbrandende stoffen, ontvlambare gassen, stoffen die na reactie met water brandbare gassen ontwikkelen;
- ontvlambare (K2) stoffen;
- zeer toxische stoffen;
- toxische stoffen;
- schadelijke stoffen;
- corrosieve stoffen;
- irriterende stoffen;
- voor het milieu gevaarlijke stoffen.

Bij de bepaling van de beschermingsniveaus (zie 2.3.1) is elk van deze categorieën onderverdeeld op grond van brandbaarheid. De hierbij gebruikte indeling is:

- K1/K2-vloeistoffen;
- K3-vloeistoffen;
- K4-vloeistoffen (vlampunt > 100 °C);
- brandbare vaste stoffen;
- onbrandbare vaste stoffen.

Tevens is bij de vaststelling van het beschermingsniveau rekening gehouden met de aard van de verpakking. Hierbij wordt niet-metalen verpakking verondersteld brandbaarder te zijn dan metalen verpakking.

De WMS-categorieën vormen samen met de indeling op brandbaarheid een matrix die als basis dient voor de vaststelling van scenario's in deze studie.

In het kader van deze studie wordt uitsluitend gekeken naar extern 'humaan' risico. Scenario's voor brandbare stoffen en (zeer) toxische stoffen worden beschouwd. Omdat op grond van eerdere studies is geconstateerd dat ook het ontstaan van toxische verbrandingsprodukten een belangrijke oorzaak kan zijn van letaliteit in de omgeving, worden ook scenario's beschouwd voor stoffen die toxische verbrandingsprodukten kunnen vormen.

Gassen vallen niet onder CPR-15/2, en worden derhalve in het kader van deze studie niet in de beschouwing betrokken.

2.3 Regelgeving CPR-15/2

2.3.1 Beschermingsniveaus

In CPR-15/2 zijn op basis van het brandrisico van een opslag en de mogelijke milieuschade van eventueel vrijkomende stoffen de volgende beschermingsniveaus vastgesteld:

1. (semi-)automatisch blussysteem dan wel brandbestrijdingssysteem met bedrijfsbrandweer, branddetectie, bluswateropvangvoorziening, preventieve maatregelen;
2. branddetectie, bluswateropvangvoorziening, preventieve maatregelen;
3. preventieve maatregelen.

Deze beschermingsniveaus dienen als uitgangspunt voor deze studie.

2.3.2 Overige randvoorwaarden

Naast een beschermingsniveau worden er in CPR-15/2 maatregelen verlangd ten aanzien van:

- compartimentering;
- produktopvang;
- bluswateropvang.

Compartimentering kan invloed hebben op de ontwikkeling van de brand, en daarmee op de effecten voor de omgeving. Produktopvang en bluswateropvang zijn voor het extern risico en dus voor deze risico-analyse methodiek niet relevant.

2.4 Risico voor de omgeving

Aangezien de stoffen in emballage worden opgeslagen, zijn de hoeveelheden die tegelijkertijd bij een ongeval betrokken kunnen raken beperkt. Ongevallen waarbij gevolgen voor de omgeving kunnen optreden zijn:

1. Het vrijkomen en ontsteken van een brandbare vloeistof
Het vrijkomen en ontsteken van brandbare vloeistoffen kan letsel in de nabije omgeving veroorzaken. Directe ontsteking van de gevormde plas heeft een plasbrand tot gevolg. Uitgaande van een maximaal plasoppervlak van 1500 m² is met het warmtestralingsmodel uit het Gele Boek [6] de warmtebelasting in de omgeving berekend voor xyleen, methanol en benzine. Het blijkt dat bij een plasbrand een thermische belasting van 16,5 kW/m² (overeenkomend met 1% letaal letsel) kan optreden tot op afstanden van 30 m.

Wanneer de vrijkomende vloeistof niet direct wordt ontstoken kan door verdamping een brandbare gaswolk wordt gevormd. Het oppervlak van de gaswolk komt overeen met het gebied waarbinnen de gasconcentratie boven de LEL (Lower Explosion Limit) ligt. Voor methanol bedraagt de verdamping uit een plas van 1500 m² bij een omgevingstemperatuur van 20 °C 0,65 kg/s. Bij een windsnelheid

van 2 m/s wordt bij deze bronsterkte de LEL bereikt op een afstand van 30 m [6]. Aangenomen wordt dat er bij ontsteking geen letaal letsel buiten de wolk zal optreden.

Op grond van de beperkte schade-afstanden voor warmtestraling en een gaswolkverbranding wordt deze bijdrage aan het externe risico van de opslag van brandbare vloeistoffen in emballage verwaarloosbaar geacht. De invloed van de opslag van brandbare vloeistoffen in emballage op de vorming van toxische verbrandingsproducten wordt in punt 3 meegenomen.

2. Het vrijkomen van toxische vloeistoffen of poeders

3. Een brand in de opslag met vorming van toxische verbrandingsproducten

In tabel 2.1 zijn de tengevolge van de ongevallen optredende fysische effecten samengevat en is aangegeven of een omgevingsrisico optreedt.

Tabel 2.1 De fysische effecten en de mogelijke bijdrage aan het risico voor de omgeving van ongevallen in een chemicaliënopslag

Ongevalstype	Fysische effecten	Omgevingsrisico
Falen verpakking: - toxische vaste stof - toxische vloeistof	poederdispersie plasvorming/verdamping	ja ja
Brand	warmtestraling vrijkomen en dispersie onverbrande toxische producten vrijkomen en dispersie toxische verbrandingsproducten	nee ja ja

Hieruit volgt dat de volgende ongevalstypen een bijdrage aan het omgevingsrisico kunnen leveren:

- vrijkomen toxische vaste stoffen (hoofdstuk 3.2);
- vrijkomen toxische vloeistoffen (hoofdstuk 3.3);
- brand (hoofdstuk 4).

3 Risico-berekening vrijkomen van de opgeslagen produkten

3.1 Inleiding

Onder vrijkomen van de pure stof wordt verstaan het ontsnappen van (zeer) toxische stoffen uit hun omhulling. Hierbij worden onderscheiden:

- het falen van verpakkingen van toxische vaste stoffen waarbij de wind vat krijgt op het produkt en dit verwaait in de omgeving;
- het vrijkomen van toxische vloeistoffen waarbij een plas wordt gevormd, gevolgd door verdamping uit deze plas en blootstelling van de omwonenden aan toxische dampen.

Bij de kansen wordt onderscheid gemaakt tussen:

- gegevens over de aanwezigheid van het betreffende produkt in de opslaginrichting;
- faalgegevens van de verpakking;
- de ontwikkelingskansen van het ongeval, dat wil zeggen de kans op vervolgeffecten (bijvoorbeeld ontsteking), de kans op een bepaald concentratiepatroon (onder meer bepaald door meteorologische omstandigheden), etc.

De meteorologische omstandigheden worden gevormd door:

- de windrichting;
- de windsnelheid;
- de stabiliteitsklasse (Pasquill-klasse).

Voor de windrichting zijn voor de weerstations in Nederland frequentieverdelingen bekend [10]. Er dient te worden uitgegaan van de frequentieverdeling van het weerstation dat het dichtst bij de opslag ligt. Het voorkomen van verschillende typen weerklassen is overdag en 's nachts niet gelijk. Bij het vaststellen van de mogelijke weerklassen dient daarom rekening te worden gehouden met de bedrijfstijden (alleen dagploeg of (vol)continudienst).

Voor de voorbeeldberekeningen wordt gebruik gemaakt van de representatieve weerscondities voor West Nederland (zie bijlage 1).

3.2 Vrijkomen toxische vaste stoffen

3.2.1 Algemeen

Wanneer een verpakking van een vaste stof faalt, kan de inhoud vrijkomen, opwaaien en zich in de omgeving verspreiden. Dit scenario is alleen relevant als de deeltjesgrootte van de vaste stof zodanig is, dat de stof door de wind kan worden meegevoerd naar de omgeving. Dit houdt in dat alleen poeders voor dit scenario in aanmerking komen. Vaste stoffen in grovere vorm, zoals korrels, pellets, kristallijne verbindingen, etc. zullen bij vrijkomen geen bijdrage aan het extern risico leveren. In het vervolg van deze studie zullen dan ook alleen poeders worden beschouwd.

Vaste stoffen worden vervoerd in verschillende verpakkingen (zakken, big bags, IBC's). De vrijkomende hoeveelheid is onder meer afhankelijk van de verpakkingsgrootte. In het kader van VLG/ADR zijn voor het wegtransport maximale verpakkingsgroottes vastgesteld. Voor transporten van toxische vaste stoffen is voor zeer toxische stoffen (dit zijn stoffen met een $LD_{50}(\text{oraal, rat}) \leq 5 \text{ mg/kg}$) een maximale verpakkingsgrootte van 400 kg vastgesteld. Stoffen met een geringere toxiciteit mogen in IBC's worden vervoerd. De verpakkingsgrootte is in dat geval maximaal 3 m³.

3.2.2 Bronsterkte

De bronsterkte bij vrijkomen van poeders is gelijk aan het produkt van:

- de inhoud van de beschadigde verpakking(en);
- de fractie actieve stof;
- de fractie van de inhoud welke uit de verpakking vrijkomt;
- de fractie deeltjes die voldoende klein zijn om gedispergeerd en geïnhaleerd te worden.

De fractie actieve stof is afhankelijk van het produkt. Bestrijdingsmiddelen worden veelal in formuleringen opgeslagen; hierbij is een percentage actieve stof van 10 - 20% gebruikelijk. Chemicaliën worden vaak in pure vorm opgeslagen; dan is het percentage actieve stof 100%. Bij de risicoberekeningen dient gebruik gemaakt te worden van de actuele waarde.

Niet de volledige inhoud van een verpakking zal bij beschadiging vrijkomen. Wat betreft de fractie deeltjes die vrijkomen, is het uitgangspunt 10%. Deze waarde komt overeen met wat in het kader van het Knelpuntenoverleg is vastgesteld [9].

Alleen kleine deeltjes worden gedispergeerd. Daarnaast kunnen alleen deeltjes met een diameter $\leq 10 \mu\text{m}$ worden geïnhaleerd en kunnen daardoor bij blootstelling mogelijk schade toebrengen [4]. Voor dit scenario wordt er daarom van uitgegaan dat de bronsterkte aan verspreidend poeder gelijk is aan de hoeveelheid met een deeltjesgrootte kleiner of gelijk aan $10 \mu\text{m}$; deze fractie dient door middel van een analyse te worden bepaald, of wordt opgegeven door de fabrikant.

3.2.3 Effect- en schadeberekeningen

Dispersie

Bij de dispersie van het vrijgekomen poeder mag worden aangenomen dat poeder met deeltjes kleiner dan $10 \mu\text{m}$ Gaussisch wordt gedispergeerd [5]. Bij de dispersie wordt onderscheid gemaakt tussen de dispersie in de onmiddellijke nabijheid van het gebouw tengevolge van de optredende lijwervel van het gebouw en de verdere Gaussische dispersie.

Concentratie in de lijwervel van het gebouw

Aangenomen wordt dat de stof in nabijheid van de opslag wordt geëmitteerd waardoor het poeder in het recirculatie gebied van het gebouw tengevolge van de lijwervel

wordt opgemengd. De concentratie in de lijwervel wordt bepaald met behulp van het dispersiemodel voor korte afstand met gebouw invloed [14].

Voor een instantane bron bedraagt de maximale concentratie in het recirculatiegebied tengevolge van de lijwervel [14]:

$$c = \frac{m}{K \cdot B \cdot H \cdot 3H} \quad (3.1)$$

Waarin:

- c = maximale concentratie in het recirculatiegebied [mg/m³]
- m = bronsterkte [kg]
- K = constante; voor een aanstroomhoek van de wind van 45°: 0,2
- H = hoogte van het gebouw [m]
- 3H = lengte van het recirculatiegebied van de lijwervel [m]
- B = breedte van het gebouw loodrecht op de windrichting [m]

De maximale homogene concentratie treedt op in het gebied van de lijwervel. Dit gebied heeft een omvang met een breedte van 0,2 × de gebouwbreedte, een hoogte gelijk aan de gebouwhoogte en een afstand in de windrichting van 3 × de gebouwhoogte.

Gaussische dispersie

Vanuit het recirculatiegebied, dat als een oppervlaktebron met een hoogte kan worden beschouwd, vindt vervolgens Gaussische dispersie plaats naar de omgeving. Dit kan gezien worden als een tijdsafhankelijke bron. Met behulp van het Gaussische dispersie model [6] zijn voor deze tijdsafhankelijke bron de concentraties in de omgeving te berekenen.

Schadeberekening

Voor de risico-analyse methodiek CPR-15/2 opslagen is voor stoffen met een LD₅₀(rat, oraal) van 5 respectievelijk 25 mg/kg een probitfunctie voor inhalatoire blootstelling afgeleid volgens de methodiek van het Schadeboek [7] c.q. het EVR-Knelpuntenoverleg [8]. Uitgaande van een n van 2 en een helling b van 1 wordt de probitfunctie:

- voor LD₅₀ = 5 mg/kg:

$$Pr = -5.53 + \ln C^2 t \quad (3.2)$$

- voor LD₅₀ = 25 mg/kg:

$$Pr = -5.75 + \ln C^2 t \quad (3.3)$$

Waarin:

- C = concentratie [mg/m³]
- t = blootstellingsduur [min]

3.2.4 Kansen

Bij de bepaling van de kans op een ongevalsscenario worden met name calamiteiten beschouwd waarbij de effecten in de omgeving merkbaar zullen zijn. Een calamiteit is in dit verband het scheuren van de verpakking, waarbij de wind vat krijgt op de inhoud en het poeder zich in de omgeving verspreidt. Wanneer een verpakking echter binnen het opslaggebouw scheurt, is een ongevalsscenario met schade buiten de opslag niet waarschijnlijk. Daarom zijn alleen ongevallen buiten van belang, wat neer komt op ongevallen tijdens verlading. Bij de vaststelling van de faalfrequentie van de verschillende verpakkingen is hiermee rekening gehouden.

De faalfrequentie van de betreffende verpakkingen is afhankelijk van het aantal keren dat een verpakking tijdens de verlading faalt, bijvoorbeeld door een aanrijding of door onzorgvuldig positioneren op de vorkheftruck, en van de kans op lekraken per val. In [11] wordt voor stukgoed een faalfrequentie van 10^{-2} - 10^{-4} per verpakking gegeven. Deze waarden gelden voor standaardverpakkingsmaterialen en bij een normale handling. Vanwege de transportvoorschriften (VLG/ADR) moeten toxische stoffen in goedgekeurde verpakkingen vervoerd worden, daarnaast wordt er meer aandacht aan de handling van gevaarlijke stoffen dan van normaal stukgoed besteed. Om deze reden wordt voor vaste chemische stoffen een geringere faalfrequentie met vrijkomen van de inhoud aangenomen; namelijk 10^{-5} per gehandelde verpakking (zak, doos, big bag, IBC). Indien zakken of drums door middel van krimpfolie of banden op een pallet zijn bevestigd, geldt de faalfrequentie per pallet, dat wil zeggen dat de faalfrequentie van een verpakking gelijk is aan 10^{-5} gedeeld door het aantal verpakkingen op de pallet.

De overall-kans voor het vrijkomen van toxische vaste stof uit een verpakking is gelijk aan het produkt van de faalfrequentie (10^{-5} /per gehandelde verpakking) en het gemiddelde aantal gehandelde verpakkingen per jaar in de inrichting. Hierbij moet rekening gehouden worden met de correctie voor verpakkingen die door middel van banden of krimpfolie vast op een pallet zijn geplaatst.

3.2.5 Voorbeeldberekening vrijkomen toxische vaste stoffen (poeders)

Scenario

Het ongevalsscenario dat in dit voorbeeld wordt uitgewerkt is het falen een verpakking van 400 kg. Er wordt vanuit gegaan dat tengevolge van onjuiste handling de verpakking beschadigd waarbij de inhoud gedeeltelijk vrijkomt. Het ongeval vindt plaats in de nabijheid van een opslaggebouw van 2500 m² met een hoogte van 6 m, een breedte van 20 m en een lengte van 125 m.

Bronsterkte

De totale inhoud van de verpakking bedraagt 400 kg.

In deze voorbeeldberekening wordt een actief stof gehalte van 50% gehanteerd.

Van de totale inhoud zal 10% vrijgekomen.

Het percentage van de inhaleerbare deeltjes (kleiner dan 10 µm) bedraagt 50%.

Deze aannames geven de volgende bronsterkte:

$$400 \text{ kg} \times 0,5 \times 0,1 \times 0,5 = 10 \text{ kg.}$$

Dispersie

De 10 kg toxische stof komt in de nabijheid van de opslagruimte vrij op grondniveau, bij de dispersie moet dus rekening gehouden worden met de invloed van de lijwervel.

Opmenging lijwervel

Formule 3.1 geeft de maximale concentratie voor een instantane bron in het gebied van de lijwervel:

$$c = \frac{m}{K \cdot B \cdot H \cdot 3H}$$

Waarin:

c = maximale concentratie in het recirculatiegebied [mg/m^3]

m = bronsterkte; 10 kg

K = constante; voor een aanstroomhoek van de wind van 45° : 0,2

H = hoogte van het gebouw; 6 m

$3H$ = lengte van het recirculatiegebied van de lijwervel; 18 m

B = breedte van het gebouw loodrecht op de windrichting; 125 m

Ingevuld geeft dit de volgende maximale concentratie:

$$c = \frac{10}{0,2 \times 125 \times 6 \times 18} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^3$$

Gaussische dispersie

Vanuit het recirculatiegebied wordt met een tijdsafhankelijk Gaussisch dispersiemodel [6] de verdere dispersie in de omgeving berekend. In onderstaande tabel zijn de maximale dosis die personen tijdens de wolkpassage zullen inhaleren gegeven. De dosisberekeningen zijn gebaseerd op het onder 4.3 gegeven schademodel voor toxische stoffen: $\text{Pr} = -8,75 + \ln c^2 \cdot t$

Tabel 3.1 Maximale concentratie op de pluimas en geïnhaleerde dosis voor een instantane bron van 10 kg azinfosmethyl poeder

Afstand	A tot en met D, 5 m/s		E en F, 2 m/s	
	maximale		maximale	
[m]	conc. [mg/m^3]	dosis [$(\text{mg}/\text{m}^3)^2 \cdot \text{min}$]	conc. [mg/m^3]	dosis [$(\text{mg}/\text{m}^3)^2 \cdot \text{min}$]
≤ 18	3700	$10,7 \cdot 10^5$	3700	$4,3 \cdot 10^5$
25	3200	$10,0 \cdot 10^5$	3200	$4,0 \cdot 10^5$
50	2300	$8,2 \cdot 10^5$	2100	$2,6 \cdot 10^5$
100	1400	$4,7 \cdot 10^5$	800	$0,6 \cdot 10^5$
200	640	$2,6 \cdot 10^5$		
300	360	$0,7 \cdot 10^5$		

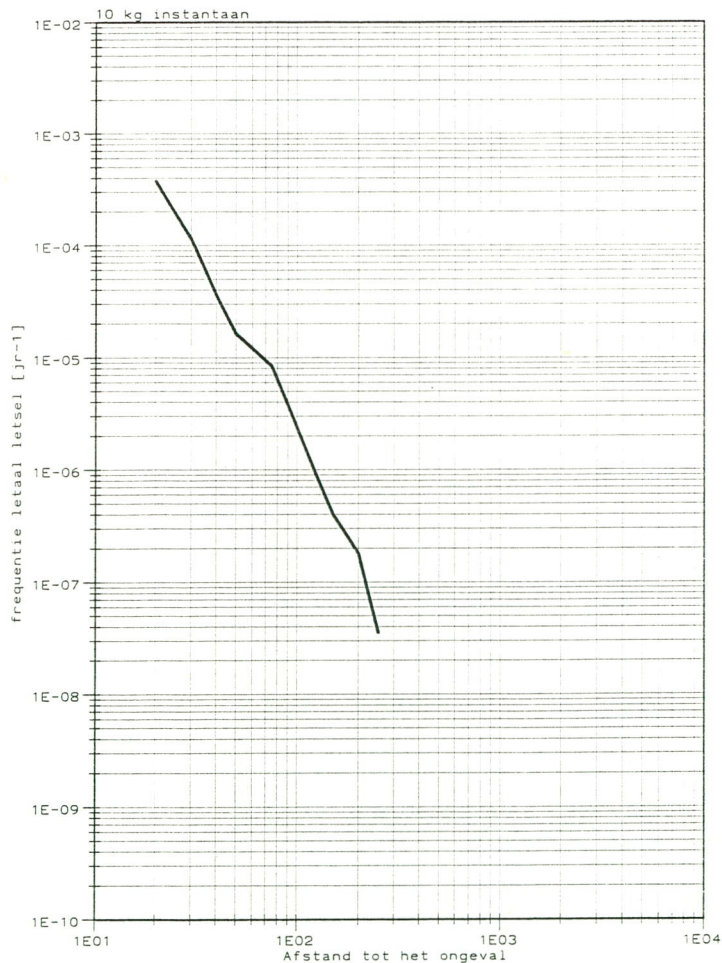
Kansen

Voor het berekenen van de kans op het betreffende scenario wordt uitgegaan van de faalfrequentie voor een big bag (10^{-5} per gehandelde big bag). Het aantal gehandelde big bags met toxische vaste stoffen wordt gesteld op 50 per jaar. De overall-kans is dus $5 \cdot 10^{-4}$ per jaar.

Individueel risico

Voor een instantane bron zoals boven omschreven zijn risicoberekeningen uitgevoerd. Hierbij is gebruik gemaakt van een neutraal gas-dispersiemodel [6]. De gebruikte meteorogegevens zijn gegeven in bijlage 1.

Het individueel risico wordt gepresenteerd in de vorm van een F,X-kromme (figuur 3.1) voor de windrichting $230 - 250^\circ$ (sector 2: westzuidwest, frequentie zie bijlage 1). Hieruit blijkt dat voor dit specifieke voorbeeld een individueel risico van 10^{-6} per jaar nog kan voorkomen op een afstand van circa 100 m, en dat een individueel risico van 10^{-7} per jaar nog op een afstand van 200 m wordt bereikt.



Figuur 3.1 Individueel risico-afstandskromme voor falen van een verpakking met 400 kg toxische vaste stof, instantane bron 10 kg (windrichting $230^\circ - 250^\circ \approx$ west-zuidwest)

3.3 Vrijkomen toxische vloeistoffen

3.3.1 Algemeen

Of en zo ja in welke mate een stof zal bijdragen aan het risico voor de omgeving, is afhankelijk van de concentratie die in de omgeving zal optreden en van de toxiciteit van de stof. De concentratie wordt bepaald door de bronsterkte en door de meteorologische omstandigheden. De bronsterkte van een verdampende vloeistof is afhankelijk van de verdamping uit de plas. Deze wordt bepaald door het plasoppervlak, en is ook afhankelijk van de omgevingstemperatuur en de dampspanning van de vloeistof. Bij risico-analyses wordt vaak een standaard-omgevingstemperatuur aangehouden van 15 °C.

In [1] wordt afgeleid bij welke combinaties van dampspanning en toxiciteit er nog let-aal letsel kan optreden met een kans van 1% op een afstand van 100 m (weerklass D5, temperatuur 20 °C). Deze gegevens zijn opgenomen in tabel 3.2. Wanneer de toxiciteit van een bepaalde stof groter of gelijk is aan de toxiciteit die bij de betreffende dampspanning wordt gegeven (dat wil zeggen de LD- of LC-waarde van de stof is lager dan de gegeven waarde) kan de stof een bijdrage leveren aan het extern risico.

Tabel 3.2 Relevante dampspanning en toxiciteitscriteria (grenswaarden) voor beschouwing in risico-analyse

Dampspanning bij 20 °C [bar]	LC ₅₀ (oraal, rat) [mg/kg] of LC ₀₁ (mens, 30 min) [mg/m ³]
< 0,001	< 2,3
0,001 - 0,005	< 13
0,005 - 0,01	< 25
0,01 - 0,03	< 70
0,03 - 0,05	< 1,2·10 ²
0,05 - 0,1	< 2,4·10 ²
0,1 - 0,2	< 5,2·10 ²
0,2 - 0,5	< 1,6·10 ³

Vloeistoffen worden vervoerd en opgeslagen in kleinverpakking, drums, IBC's en in tanks van diverse afmetingen. De maximale verpakkingsgrootte bij opslag binnen is een IBC van 3 m³. Stoffen met een LC₅₀ van ten hoogste 1000 ppm mogen in verpakkingsgrootten van maximaal 450 kg (vaten) worden vervoerd. Dit geldt voor de meeste toxische vloeistoffen.

3.3.2 Bronsterkte

Voor de berekening van de bronsterkte als invoer in het dispersiemodel wordt aan de hand van het plasoppervlak en de fysische eigenschappen van de stof

(met name de dampspanning) de verdamping uit de plas bepaald. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van de modellen uit het Gele Boek [6].

3.3.3 Effect- en schadeberekeningen

Dispersie

Bij de berekening van de dispersie dient rekening te worden met de door het gebouw optredende lijwervel en de verdere Gaussische dispersie.

Concentratie in het recirculatiegebied

Voor een continue bron bedraagt de concentratie in het recirculatiegebied tengevolge van de lijwervel [14]:

$$c = \frac{m}{K \cdot H \cdot B \cdot U} \quad (3.4)$$

Waarin:

c = concentratie in het recirculatiegebied [mg/m^3]

m = bronsterkte [kg/s]

K = constante; voor een aanstroomhoek van de wind van 45° : 0.2

H = hoogte van het gebouw [m]

B = breedte van het gebouw [m]

U = windsnelheid [m/s]

Deze concentratie is homogeen aanwezig in de gehele gebied van de lijwervel. Dit gebied heeft een omvang met een breedte van $0,2 \times$ de breedte van het gebouw loodrecht op de windrichting, een hoogte van 6 meter en een lengte in de windrichting van $3 \times$ de gebouwhoogte.

Gaussische dispersie

Vanuit het recirculatiegebied, dat als een oppervlaktebron met een hoogte kan worden beschouwd, vindt vervolgens Gaussische dispersie plaats naar de omgeving. Met behulp van een Gaussische dispersie model [7] wordt voor deze semi-continue bron de verdere dispersie berekend.

Schadeberekening

Voor de toxiciteit van de stof moet gebruik worden gemaakt van de probitfunctie voor de vrijgekomen stof [7].

3.3.4 Kansen

In [11] wordt voor een vloeistoftank een frequentie voor volledig falen van $5 \cdot 10^{-5}$ - $3 \cdot 10^{-7}$ per jaar gegeven. Deze getallen gelden voor drukloze opslag en voor sta-

tionaire tanks. Voor drukvaten wordt in een notitie van het Knelpuntenoverleg [15] een faalkans van 10^{-6} per jaar gegeven. Voor mobiele tanks en vaten wordt een faalfrequentie van een factor 10 hoger aangehouden. Voorts zal een vloeistoftank in de regel sterker zijn dan een drum of vat; daar staat tegenover dat een drum bij een ongeval in een overmaats vat kan worden geplaatst, waardoor de uitstroming beperkt kan worden. Derhalve wordt de uitstroombrequentie voor drums in dit verband gelijk gesteld aan 10^{-5} per jaar.

De overall-kans wordt gegeven door het produkt van de betreffende faalfrequentie en het jaargemiddelde aantal aanwezige verpakkingseenheden in de inrichting.

3.3.5 Voorbeeldberekening vrijkomen toxische vloeistoffen

Algemeen

Voor het ongevalsscenario wordt uitgegaan van het falen van 2 vaten met 200 liter acroleïne. Bij het vrijkomen van toxische vloeistoffen wordt een vloeistofplas gevormd met een laagdikte van 5 mm en een oppervlak van 80 m².

Bronsterkte

Met behulp van het verdampingsmodel uit het Gele Boek [6] is berekend dat de verdamping van acroleïne uit de plas voor de weerklassen A tot en met D, representatieve windsnelheid 5 m/s, 0,093 kg/s bedraagt. Voor de weerklassen E en F, representatieve windsnelheid 2 m/s, bedraagt de verdamping 0,068 kg/s.

Dispersie

Concentratie in het recirculatiegebied

Voor een continue bron bedraagt de maximale concentratie in het recirculatiegebied tengevolge van de lijwervel (3.4):

$$c = \frac{m}{K \cdot H \cdot B \cdot U}$$

Waarin:

c = concentratie in het recirculatiegebied [mg/m³]

m = bronsterkte 0,093 (A tot en met D) of 0,068 (E en F) kg/s

K = constante; voor een aanstroombhoek van de wind van 45°: 0.2

H = hoogte van het gebouw: 6 m

B = breedte van het gebouw loodrecht op de windrichting: 125 m

U = windsnelheid 5 m/s (A tot en met D), 2 m/s (E, F)

De maximale concentratie in de lijwervel bedraagt:

weerklassen A tot en met D 124 mg/m³

weerklassen E en F 227 mg/m³

Deze concentraties zijn homogeen aanwezig in de gehele gebied van de lijwervel. Dit gebied heeft een omvang met een breedte van $0,2 \times 125 = 25$ meter, een hoogte van 6 meter en een diepte van 18 meter ($3 \times$ de gebouwhoogte).

Gaussische dispersie

Vanuit het recirculatiegebied, dat als een oppervlaktebron met een hoogte kan worden beschouwd, vindt vervolgens Gaussische dispersie plaats naar de omgeving. Met behulp van het Gaussische dispersie model [7] zijn, voor deze semi-continue bron, de concentraties op de pluimas berekend. De resultaten van de dispersie vanuit de lijwervel naar de omgeving zijn hieronder gegeven.

Tabel 3.3 Maximale concentraties acroleïne (op de pluimas)

Afstand tot de bron m	Concentraties op de pluimas [mg/m ³] weerklasse	
	A tot en met D, 5 m/s	E en F, 2 m/s
≤ 18	120	230
50	90	220
100	40	190
200	20	120
500		40
600		30

Schadeberekening

De toxiciteit van de stof wordt gegeven door de probitfunctie voor acroleïne uit het Schadeboek [7], te weten

$$Pr = -4.1 + \ln Ct \quad (3.5)$$

Waarin:

c = concentratie acroleïne in mg/m³

t = blootstellingsduur in minuten

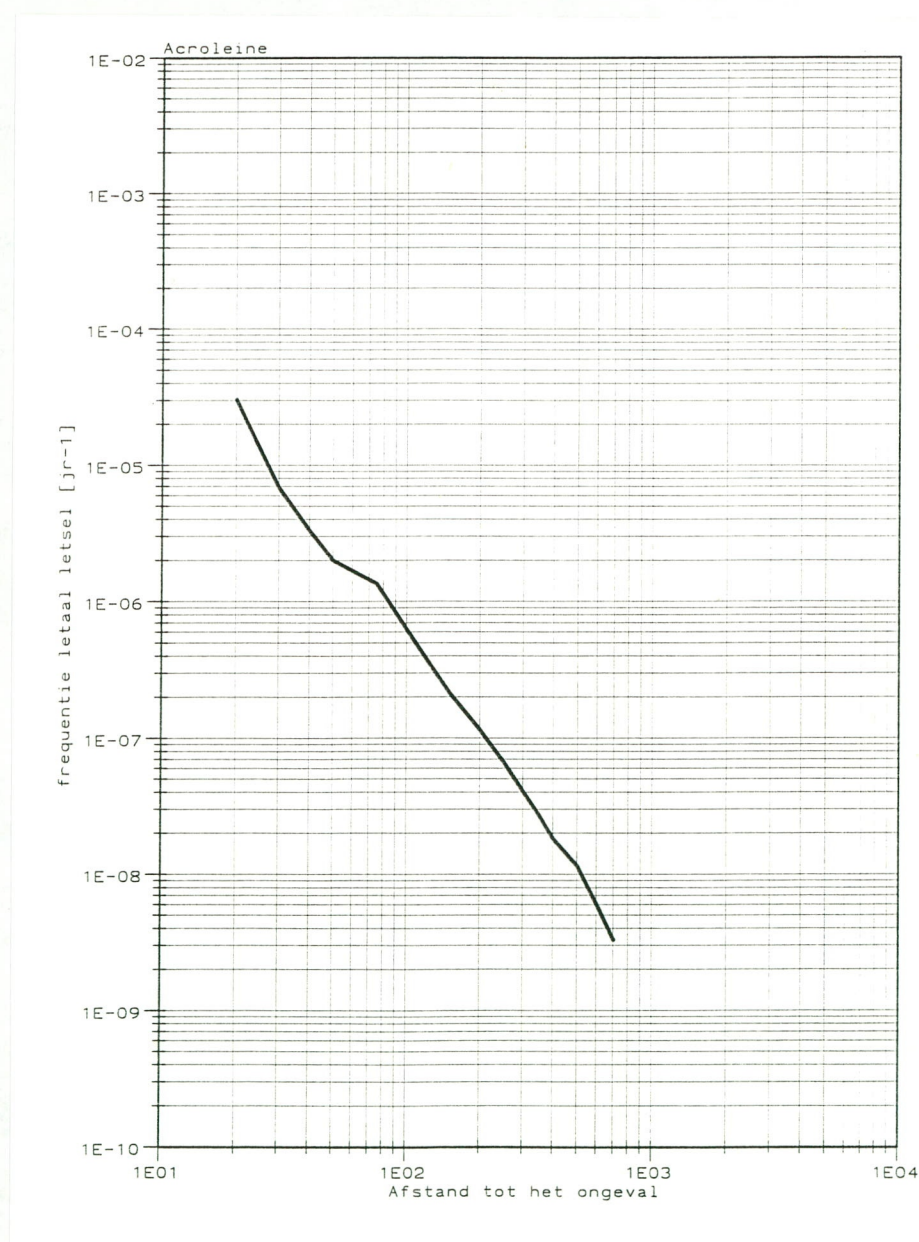
Kansen

Voor het berekenen van de kans op het betreffende scenario wordt uitgegaan van de bovenvermelde faalfrequentie van een vloeistofvat van 10^{-5} per gehandeld vat. Aangezien het hier om gelijktijdig falen van twee vaten gaat wordt een 10 keer kleinere faalkans genomen: $0,1 \times 10^{-5} = 10^{-6}$. Deze faalkans wordt vermenigvuldigd met het aantal gehandelde acroleïne vaten per jaar; dit wordt gesteld op 100. De overall-frequentie van het optreden van dit ongeval is dus 10^{-4} per jaar.

Individueel risico

Voor een bron zoals boven omschreven zijn risicoberekeningen uitgevoerd. De gebruikte meteogegevens zijn gegeven in bijlage 1.

De resultaten zijn weergegeven in de F,X-kromme in figuur 3.2 (windrichting 230 - 250°, zie bijlage 1). Zoals blijkt kan voor plasverdamping van toxische vloeistoffen een individueel risico van 10^{-6} per jaar nog voorkomen op een afstand van 80 m, en kan een individueel risico van 10^{-7} per jaar nog op een afstand van 200 m worden bereikt. Deze uitkomsten zijn verklaarbaar op grond van de hoge dampspanning van acroleïne en de grote giftigheid. Door deze combinatie van eigenschappen kan acroleïne een grote bijdrage leveren aan het externe risico.



Figuur 3.2 Individueel risico-afstandskromme (F,X-kromme) voor plasverdamping van 2 x 200 liter acroleïne (windrichting 230 - 250° ≈ westzuidwest)

4 Brand

4.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt het risico van een brand in een chemicaliënopslag uitgewerkt. Het risico van een brand in een chemicaliënopslag worden bepaald door het vrijkomen van onverbrand vast materiaal en het ontstaan van gasvormige toxische verbrandingsprodukten.

Emissie onverbrande toxische stoffen

Bij een brand kunnen de opgeslagen stoffen onverbrand geëmitteerd worden. Indien deze stoffen toxisch zijn kan dit een risico voor mensen in de omgeving zijn. Het vrijkomen van onverbrande stof is afhankelijk van:

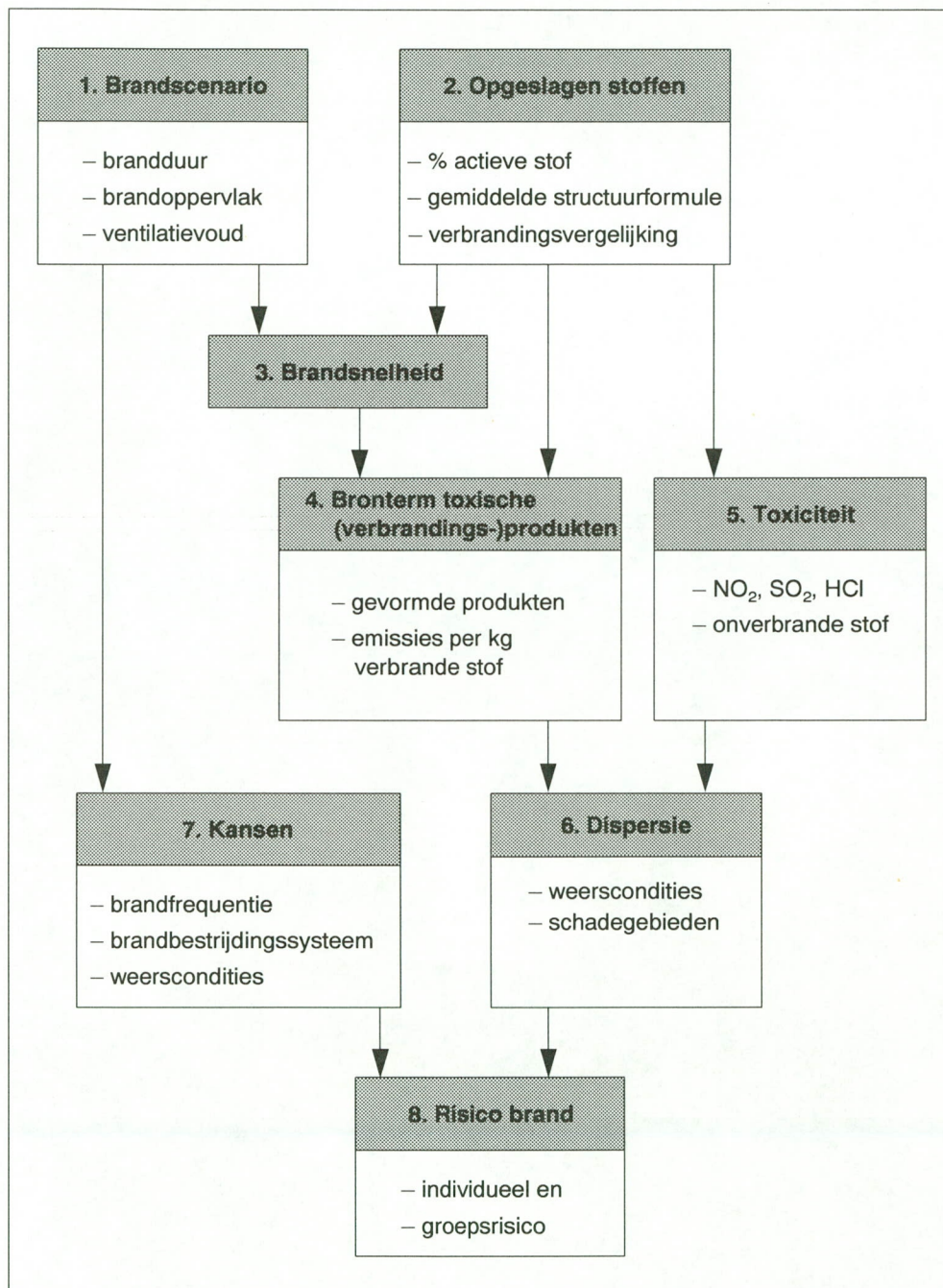
- de hoeveelheid opgeslagen stof die bij de brand betrokken is;
- het vlampunt van de stof;
- het percentage actieve stof.

Emissie toxische verbrandingsprodukten

Toxische verbrandingsprodukten zoals HCl, HF, HBr, SO₂ en NO₂ enzovoort worden tijdens de brand gevormd indien de opgeslagen chemicaliën hetero atomen zoals Cl, F, Br, S en N enzovoort bevatten. Onder punt 4.2.4 wordt hier nader op in gegaan.

4.2 Risico-methodiek voor een brand

Het risico van een brand in een chemicaliënopslag wordt bepaald met een risico-analyse methodiek welke vergelijkbaar is aan de risico-analyse methodiek voor bestrijdingsmiddelenopslagen [1]. Het kenmerk van deze methodiek is dat het risico van een brand wordt bepaald aan de hand van verschillende brandscenario's die een bepaalde kans van optreden hebben. Een brandscenario wordt gekarakteriseerd door de brandduur, het brandoppervlak en de brandsnelheid. De brandsnelheid is afhankelijk van de samenstelling van de opgeslagen stoffen en de hoeveelheid zuurstof die tijdens de brand beschikbaar is. De samenstelling van de opgeslagen stof(fen) is mede bepalend voor de aard en de hoeveelheid van de gevormde toxische verbrandingsprodukten. In het algemeen geldt dat de aspecten die bij een brand een rol spelen elkaar op diverse manieren beïnvloeden. Een en ander is weergegeven in figuur 4.1.



Figuur 4.1 Brandbepalende factoren en hun onderlinge relaties

4.2.1 Brandscenario's

Branden in opslagen kunnen zich afhankelijk van de omstandigheden op het moment van de brand (brandoorzaak, opgeslagen stoffen, wijze van opslag enzovoort) met een verschillende snelheid uitbreiden tot een grotere brand. Dit kan het

beste tot uitdrukking worden gebracht door voor een brand in een bepaalde opslag verschillende brandscenario's te definiëren die elk een bepaalde kans van optreden hebben.

Een brandscenario wordt omschreven door de volgende drie grootheden:

- brandduur;
- brandoppervlak (grootte van de brand);
- ventilatievoud (zuurstoftoevoer tot de brand).

Brandduur

De brandduur wordt enerzijds bepaald door de omstandigheden tijdens de brand en anderzijds door de toegepaste brandbestrijding. Op de invloed van de brandbestrijding wordt in paragraaf 4.3 nader ingegaan.

Er wordt in deze studie vanuit gegaan dat de brandduur gelijk is aan de tijd die nodig is om de brand te blussen. Deze is onder meer afhankelijk van de wijze van brandbestrijding. Aan de brandduur wordt echter (conform [12]) een maximum gesteld dat gelijk is aan de veronderstelde maximale blootstellingsduur van mensen in de omgeving, te weten 30 minuten. Voor niet-brandwerende gebouwen en brandbestrijding waarbij rookluiken of andere ventilatiesystemen worden toegepast, is de maximale blootstellingsduur 20 minuten, omdat wordt aangenomen dat daarna pluimstijging optreedt. Wanneer dit effect eenmaal optreedt, stijgen de rookgassen van de brand op tot grote hoogten. Voordat ze vervolgens het aardoppervlak weer bereiken zijn ze sterk verdund, waardoor schadelijke effecten te verwaarlozen zijn.

Analoog aan [1] wordt hier aangenomen dat de aanloopfase van een brand circa 20 minuten duurt. Binnen deze periode zal geen pluimstijging optreden, omdat de verbrandingsprodukten door het nog niet opgewarmde gebouw worden gekoeld. In de loop van het eerste half uur van de brand zal het gebouw min of meer geleidelijk worden beschadigd. Aangenomen mag worden dat de overgang van een situatie zonder pluimstijging naar een situatie met pluimstijging geleidelijk zal verlopen. De effecten van een dergelijke geleidelijke verandering zijn echter moeilijk te kwantificeren. Derhalve wordt er hier vanuit gegaan dat pluimstijging in de aanloopfase volledig achterwege zal blijven.

Brandoppervlak

De grootte van het brandoppervlak wordt voor een belangrijk deel bepaald door de zuurstoftoevoer, en is tevens afhankelijk van het brandbestrijdingssysteem. Op grond van deze gegevens kan voor een aantal brandoppervlakken een kansverdeling worden opgesteld. Hierop wordt in 4.3 nader ingegaan. Bij de bepaling van de kansverdeling is er vanuit gegaan dat het brandoppervlak maximaal gelijk is aan de oppervlakte van de opslagruimte. Uit berekeningen is echter gebleken dat bij een zuurstofbeperkte brand (laag ventilatievoud) het brandoppervlak maximaal 300 m² bedraagt.

Ventilatievoud

Het verloop van een brand wordt mede bepaald door de hoeveelheid beschikbare zuurstof. Deze komt uit de lucht die in de opslagruimte aanwezig is, en uit de lucht die via de ventilatie-openingen wordt aangevoerd. De mate van luchttoevoer wordt

uitgedrukt in het ventilatievoud (aantal keren per uur dat de lucht in het gebouw wordt ververst). Met name het aantal kilogrammen per seconde dat verbrandt is hiervan afhankelijk.

Indien er voldoende zuurstof wordt aangevoerd, is de verdamping tijdens de brand van de aanwezige brandstof (i.c. het brandende produkt) de beperkende factor. Deze verdamping wordt uitgedrukt in $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ en is daardoor rechtstreeks gerelateerd is aan het brandoppervlak. Deze verdampingssnelheid bedraagt voor de meeste chemicaliën maximaal $0,025 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ (K1 en K2 oplosmiddelen maximaal $0,1 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$) en komt dus overeen met de maximale brandsnelheid. Indien de verdampingssnelheid de brandsnelheid bepaald wordt de brand 'oppervlakte-beperkt' genoemd.

Wanneer er te weinig zuurstof aan de brand wordt toegevoerd om deze maximale brandsnelheid te bereiken, is de brand 'zuurstof-beperkt'.

In CPR-15/2 wordt ingegaan op het ventilatievoud van opslagen. Aanbevolen wordt om in een opslaggebouw een ventilatievoud van 1 tot 4 te realiseren. Aangenomen wordt dat bij een brand door de aanzuigende werking van het vuur het ventilatievoud 4 per uur bedraagt. Dit geldt voor een standaard-gebouw. Uitzonderingen hierop zijn:

- Het toepassen van rookluiken (bij automatische hi-ex installatie en bij bedrijfs-brandweer met binnenaanval), waarbij de ventilatie onbeperkt is (ventilatievoud ∞);
- Bij toepassing van een automatische gasblusinstallatie is sprake van een gasdichte ruimte, en is het ventilatievoud dus nul;
- Indien aannemelijk gemaakt kan worden dat er speciale voorzieningen aan het gebouw zijn getroffen om de ventilatie in geval van een brand te beperken, kan een lager ventilatievoud worden gehanteerd.

4.2.2 Opgeslagen stoffen

De opgeslagen stoffen vormen de brandstof voor de brand. Als er zeer toxische stoffen ($\text{LD}_{50\text{rat,oraal}} \leq 25 \text{ mg/kg}$) in de opslag aanwezig zijn kunnen deze bij vrijkomen een gevaar voor de omgeving vormen. Voorts kunnen stoffen bij verbranding toxische verbrandingsprodukten vormen. Er wordt vanuit gegaan dat alleen stoffen die de elementen N, S, F, Cl of Br bevatten een bijdrage kunnen leveren aan de vorming van toxische verbrandingsprodukten. Chloorhoudende verbindingen kunnen in principe ook dioxines vormen (PCDD/PCDF's); uit eerdere studies is echter gebleken dat de gevormde hoeveelheden zo klein zijn, dat deze geen acuut gevaar voor de bevolking in de omgeving tot gevolg hebben [2]. Voor de emissie van toxische verbrandingsprodukten (HCl , SO_2 , NO_2) worden alle stoffen in een categorie ingedeeld (categorie₀). De opgeslagen zeer toxische stoffen uit categorie₀ worden voor de bepaling van de emissie van zeer toxische stoffen ook nog in de (sub)categorie₁ ingedeeld.

Categorie	Omschrijving
0	Alle opgeslagen stoffen
1	Hoog toxische stoffen ($\text{LD}_{50\text{rat,oraal}} \leq 25 \text{ mg/kg}$)

Voor het bepalen van de brandsnelheid en de emissie van toxische verbrandingsproducten en zeer toxische stoffen moet de gemiddelde structuurformule van de opgeslagen stoffen bepaald worden.

Bepaling gemiddelde structuurformule per categorie

In de Bestrijdingsmiddelenstudie [1] is als uitgangspunt voor de vorming van toxische verbrandingsproducten gekozen voor de 'gemiddelde structuurformule' van de opgeslagen stoffen.

De gemiddelde structuurformule bevat bijvoorbeeld de elementen C, H, O, N, S, Cl, F en Br. Verondersteld wordt dat verpakkingsmaterialen, de oplosmiddelen en andere hulpstoffen even snel verbranden als de chemicaliën. Daarvoor nemen we aan dat structuurformule van de hulpstoffen gelijk is aan die van de chemicaliën.

De aanwezige aantallen van de diverse elementen in de gemiddelde structuurformule voor een categorie worden als volgt bepaald uit de hoeveelheden (kmol) en de structuurformules van al de opgeslagen actieve stoffen.

$$\bar{n} = \frac{\sum n_i N_i}{\sum N_i} \quad (4.1)$$

Waarin:

n = gemiddeld aantal atomen van een element in de gemiddelde structuurformule

N_i = kmol van bepaalde stof i

Deze wordt bepaald door de geïnventariseerde opgeslagen hoeveelheid (kg) van stof i te vermenigvuldigen met het percentage actieve stof i en te delen door de molmassa van stof i

n_i = aantal atomen van een element in de structuurformule van stof i .

Tevens wordt de gemiddelde mol massa M van de opgeslagen stoffen in een categorie bepaald uit de totale hoeveelheid opgeslagen kg in een categorie gedeeld door de totale aantal opgeslagen molen stof ($= \sum N_i$).

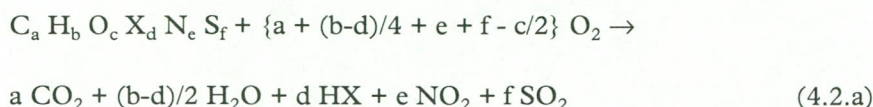
Met behulp van formule 4.1 wordt de volgende structuurformule voor een categorie bepaald:



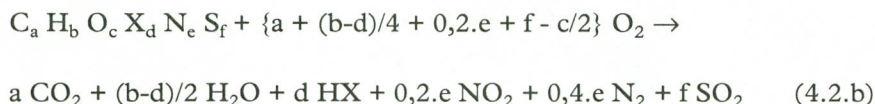
Hierin is $X = \text{Cl, Br, F}$ en zijn $a, b, c, \dots$ de gemiddelde aantallen atomen A voor de elementen C, H, O, ... zoals berekend met vergelijking (4.1).

Verbrandingsformule

Aan de hand van de gemiddelde structuurformule wordt een verbrandingsvergelijking opgesteld. Daarbij wordt uitgegaan van een kwantitatieve omzetting. De verbrandingsformule ziet er als volgt uit:



Indien stikstof voor 20% in NO₂ wordt omgezet (zie 4.2.4.1) geldt de volgende verbrandingsvergelijking:



Uit deze verbrandingsformules wordt de hoeveel chemische stof afgeleid die kan verbranden bij een bepaalde zuurstoftoevoer naar de brand (brandsnelheid, zie 4.2.3) en welke emissies optreden (bronsterkte, zie 4.2.4).

4.2.3 Brandsnelheid

De brandsnelheid is een maat voor de hoeveelheid stof die per tijdseenheid verbrandt. Hierbij wordt er vanuit gegaan dat de verbranding volledig is; smeulende branden worden niet beschouwd. De brandsnelheid is afhankelijk van de aanwezige hoeveelheid brandstof (met andere woorden: de benodigde hoeveelheid zuurstof) en van de beschikbare hoeveelheid zuurstof.

Oppervlakte-beperkte brand

Als de beschikbare hoeveelheid zuurstof groter is dan de benodigde hoeveelheid zuurstof is de zuurstof geen beperkende factor, en is er sprake van een oppervlakte-beperkte brand (zie 4.2.1). De brandsnelheid per oppervlakte-eenheid zal in dat geval maximaal gelijk zijn aan de verdampingssnelheid van de stof; deze bedraagt voor chemicaliën circa 0,025 kg.s⁻¹.m⁻² [7]. De maximale brandsnelheid is gelijk aan het produkt van de verdampingssnelheid en het brandoppervlak A:

$$B_{\max} = 0,025 \cdot A \quad [\text{kg/s}] \quad (4.3)$$

Zuurstofbeperkte brand

Wanneer de beschikbare hoeveelheid zuurstof kleiner is dan de benodigde hoeveelheid zuurstof, is de brand zuurstof-beperkt. De brandsnelheid wordt dan bepaald aan de hand van de beschikbare hoeveelheid zuurstof; deze wordt als volgt berekend:

$$m_{O_2} = 0,2 (1 + 0,5.F) V / (24 \times 1800) \quad [\text{kmol/s}] \quad (4.4)$$

met

- m_{O_2} = beschikbare (of toegevoerde) hoeveelheid zuurstof [kmol/s];
- F = ventilatievoud van de ruimte (aantal verversingen van de lucht per uur);
- V = volume van de ruimte [m³];
- 0,2 = gehalte zuurstof in de lucht;
- 24 = molair volume lucht [m³/kmol];
- 1800 = toevoertijd van de zuurstof [s].

De benodigde hoeveelheid zuurstof (Z_0) is gelijk aan de term $\{a + (b-d)/4 + e + f - c/2\}$ of $\{a + (b-d)/4 + 0,2.e + f - c/2\}$ uit de verbrandingsvergelijking van de opgeslagen stof(fen) (4.2.a of 4.2.b). De brandsnelheid B in kg/s is dan gelijk aan:

$$B_0 = mO_2 \times M/Z_0 \quad (4.5)$$

met

- B_0 = brandsnelheid categorie 0 stoffen [kg/s];
- mO_2 = beschikbare (of toegevoerde) hoeveelheid zuurstof [kmol/s];
- M = gemiddelde molecuulmassa van de opgeslagen stof(fen) [kg/kmol];
- Z_0 = benodigde hoeveelheid zuurstof voor de verbranding van 1 mol van de opgeslagen stof (stoffen) [mol/mol].

Onderscheid oppervlakte-beperkt vs. zuurstofbeperkt

Om vast te stellen of er sprake is van een oppervlakte beperkte of van een zuurstofbeperkte brand wordt eerst gekeken naar het betreffende ventilatievoud. Bij onbeperkte ventilatie ($F = \infty$) is de brand altijd oppervlakte beperkt. Wanneer het ventilatievoud eindig is, is de brand oppervlakte beperkt tot aan een bepaald brandoppervlak. Bij grotere oppervlakken zal de brand zuurstofbeperkt zijn. Het omslagpunt wordt bepaald door $B_{\max}$ te vergelijken met B_0 :

- indien $B_{\max} \leq B_0$: oppervlaktebeperkt;
- indien $B_{\max} > B_0$: zuurstofbeperkt.

4.2.4 Bronsterkte toxische verbrandingsprodukten en onverbrande zeer toxische stoffen

4.2.4.1 Vorming toxische verbrandingsprodukten

Toxische verbrandingsprodukten worden tijdens de brand gevormd indien de opgeslagen chemicaliën hetero atomen zoals N, S, Cl, F, Br, Mn, Zn enzovoort bevatten. Bij de vorming van toxische verbrandingsprodukten wordt alleen gekeken naar de vorming van NO_2 , SO_2 , HCl, HF en HBr. Hierbij wordt er, analoog aan het Schadeboek [7], vanuit gegaan dat de berekende vorming van NO_2 representatief is voor de gevormde hoeveelheid stikstofoxiden in het algemeen (NO_x) en tevens voor het eventueel gevormde HCN. De toxiciteit van NO_2 en die van HCN zijn vergelijkbaar.

De hoeveelheid toxische verbrandingsprodukten die vrijkomt, wordt niet alleen bepaald door de hoeveelheid materiaal die bij de brand betrokken is, maar ook door de mate waarin NO_2 , SO_2 en HCl (en/of HF en/of HBr) gevormd worden. Deze is weer afhankelijk van de samenstelling van de brandende stoffen, en van de condities tijdens de brand. Voor de omzetting van S in SO_2 , Cl in HCl, F in HF en Br in HBr wordt in een brand een omzetting van 100% aangenomen. Op de omzetting van N in NO_2 wordt hieronder nader ingegaan.

Vorming van NO_2 in een brand

Voor de berekening van het individueel en groepsrisico voor distributiebedrijven van bestrijdingsmiddelen [2] is uitgegaan van 100% omzetting van de in de bestrijdingsmiddelen aanwezige stikstof in NO_2 . Deze veronderstelling is conform het Schadeboek [7] en de in opdracht van VROM ontwikkelde risico-analyse methodiek voor opslagen van bestrijdingsmiddelen [1]. Deze veronderstelling is conservatief; een der-

gelijke opstelling wordt verantwoord geacht omdat in de gehele berekening van individueel en groepsrisico uitgangspunten worden gehanteerd die een bepaalde onzekerheid hebben.

Mede op basis van een discussie in het Knelpunten Overleg [16] is voor een CPR-15/2 opslag de volgende benadering ten aanzien van de NO_2 vorming in deze risico-analyse methodiek opgenomen. Omdat voor een brand in een heterogene chemicalie-opslag dezelfde onzekerheden gelden als in een bestrijdingsmiddelenopslag, wordt voor de berekening van het risico van een chemicaliënopslag ook een 100% omzetting aangenomen. Indien er geen sprake is van een heterogene chemicaliënopslag zijn de onzekerheden minder groot en kan een andere stikstofomzetting worden aangenomen. Dit betreft de volgende gevallen:

– **Mono-opslag**

Een uitzondering hierop wordt gevormd door brand in een opslag waarin slechts één, stikstofhoudend, produkt (mag ook Cl, F, Br en S bevatten) is opgeslagen. Sommige van de bovengenoemde onzekerheden worden dan kleiner. Voor mono-opslagen wordt met 20% NO_2 -vorming gerekend.

– **Mono-opslag in één vak**

Indien in een geïsoleerd vak (door middel van muren of gangpaden met sprinkler) slechts één, stikstofhoudend, produkt (mag ook Cl, F, Br en S bevatten) is opgeslagen mag ook met 20% NO_2 -vorming voor dat vak gerekend worden. Interactie met de andere stoffen in de opslag is dan onmogelijk en daardoor worden sommige van de bovengenoemde onzekerheden kleiner. Voor het vak en de rest van de opslag worden aparte brandscenario's gedefinieerd.

– **Alleen stikstofhoudende chemicaliën**

Indien de opslag alleen stikstofhoudende chemicaliën bevat (dus geen Cl, Br, F en S houdende chemicaliën) dan wordt ook met 20% NO_2 omzetting gerekend.

Dit geldt ook als meerdere stikstofhoudende chemicaliën (zonder Cl, F, Br, en S) in een geïsoleerd vak (door middel van muren of gangpaden met sprinkler) zijn opgeslagen. Voor het vak en de rest van de opslag worden aparte brandscenario's gedefinieerd.

Tabel 4.1 Omzettings- of conversiefactoren verbrandingsprodukten

Element	Verbrandingsprodukt	Conversiefactor
C	CO_2	1
H	H_2O	1
Cl	HCl	1
Br	HBr	1
F	HF	1
N	NO_2	1 of 0,2 (zie boven)
S	SO_2	1

4.2.4.2 Emissie niet verbrand toxisch produkt

De hoeveelheid onverbrand materiaal die bij een brand vrijkomt is sterk afhankelijk van de eigenschappen van de brandende stoffen en van de omstandigheden

tijdens de brand. Met de huidige stand der techniek voert een kwantitatieve evaluatie in dit kader te ver. Daarom wordt volstaan met het geven van de volgende vuistregels [1]:

- van stoffen met een vlampunt ≤ 100 °C zal 10% vrijkomen;
- van stoffen met een vlampunt > 100 °C zal 2% vrijkomen.

4.2.4.3 Bronsterkte

Inleiding

De bronsterkte van de verschillende vrijkomende stoffen wordt naast bovengenoemde omzettingen bepaald door de brandsnelheid (zie 4.3) en door het aandeel van de chemicaliën uit desbetreffende stofcategorie in de brand. Het is moeilijk te kwantificeren wat precies het aandeel van de diverse stofcategorieën in een brand zal zijn. Dit hangt onder andere af van de brandbaarheid van de stoffen en de zuurstofbehoefte voor de verbranding van de stoffen. Daarom wordt aangenomen dat het aandeel van een categorie in de brand evenredig is met de zuurstofbehoefte voor volledige verbranding van de stoffen in die categorie (formule 4.8).

Bij een brand in een opslagplaats zullen ook de verpakkingsmaterialen en de brandbare formuleringsmiddelen meebranden. Voor de chemicaliën die geformuleerd zijn met niet brandbare stoffen zal de brandsnelheid lager zijn, omdat niet alle chemicaliën op voldoende hoge temperatuur komen om te kunnen verdampen en aan de brand deel te nemen.

Zowel de invloed van meebrandende verpakkingsmaterialen en formuleringsmiddelen als de invloed van inerte vulmaterialen op de uiteindelijke brandsnelheid van de actieve stoffen is met de huidige kennis niet te kwantificeren. In dit onderzoek is aangenomen dat de brandsnelheid van de verpakkingsmaterialen en hulpstoffen gelijk is aan de brandsnelheid van de chemicaliën.

Op basis van de gemiddelde structuurformule kan de emissie voor een bepaald toxisch verbrandingsprodukt per kg verbrand product worden berekend als:

Emissie verbrandingsprodukten HCl, NO₂, SO₂

Stofcategorie 0 bevat alle opgeslagen stoffen. De hoeveelheid vrijkomende verbrandingsprodukten wordt afgeleid uit de verbrandingsvergelijking (4.2).

Uit de verbrandingsvergelijking (4.2) zijn de volgende omzettingen in kg per kg verbrande stof afgeleid. Vanwege de vergelijkbare toxische effecten worden de emissies van HF en HBr beschouwd als HCl emissies en bij de HCl emissie opgeteld.

$$\text{HCl:} \quad (\text{cl} \times 36,5 + \text{f} \times 20 + \text{br} \times 81)/M$$

$$\text{NO}_2: \quad (\text{n} \times 46)/M$$

$$\text{SO}_2: \quad (\text{s} \times 64)/M$$

$$\eta = (\text{cl} \times 36,5 + \text{f} \times 20 + \text{br} \times 81 + \text{n} \times 46 \times (1 \text{ of } 0,2) + \text{s} \times 64)/M \quad (4.6)$$

waarin:

η	=	totale omzetting in kilogrammen HCl, NO ₂ en SO ₂ per kg verbrande chemicaliën
M	=	gemiddelde molmassa van de opgeslagen stoffen (kg/kmol)
cl	=	aantal gevormde molen HCl per mol verbrand (mol/mol)
f	=	aantal gevormde molen HF per mol verbrand (mol/mol)
br	=	aantal gevormde molen HBr per mol verbrand (mol/mol)
n	=	aantal gevormde molen NO ₂ per mol verbrand (mol/mol)
s	=	aantal gevormde SO ₂ per mol verbrand (mol/mol)
36,5	=	molmassa HCl (kg/kmol)
20	=	molmassa HF (kg/kmol)
81	=	molmassa HBr (kg/kmol)
46	=	molmassa NO ₂ (kg/kmol)
64	=	molmassa SO ₂ (kg/kmol)

De bronsterkte aan NO₂, HCl en SO₂ wordt berekend uit bovenstaande omzetting en de brandsnelheid:

$$m = \eta \times B_0 \quad (4.7)$$

waarin:

m	=	bronsterkte toxische verbrandingsprodukten NO ₂ , HCl en SO ₂ (kg/s)
B ₀	=	brandsnelheid categorie 0 stoffen bepaald met formule 4.5

Emissie onverbrande stof

Dit scenario is van belang voor de chemicaliën die ook vallen in de subcategorie 1: hoog toxische stoffen (LD₅₀ rat,oraal ≤ 25 mg/kg).

De brandsnelheid van subcategorie 1 stoffen wordt als volgt bepaald:

- Met behulp van formule 6.1 wordt voor de subcategorie 1 stoffen een gemiddelde structuurformule bepaald.
- De zuurstofbehoefte voor de verbranding van 1 mol gemiddeld subcategorie 1 stof wordt met behulp van formule 6.2 bepaald.
- De brandsnelheid van subcategorie 1 stoffen is gelijk aan de brandsnelheid van categorie 0 vermenigvuldigd met de relatieve zuurstofbehoefte van subcategorie 1 ten opzichte van de zuurstofbehoefte van categorie 0:

$$B_1 = [O_2]_1 / [O_2]_2 \times B_0 \quad (4.8)$$

waarin:

B ₁	=	brandsnelheid subcategorie 1 stoffen (kg/s)
B ₀	=	brandsnelheid categorie 0 stoffen (kg/s)
[O ₂] ₀	=	zuurstofbehoefte voor volledige verbranding van de categorie 0 stoffen; deze is gelijk aan het totaal aantal molen categorie 0 stoffen vermenigvuldigd met de zuurstofbehoefte per mol categorie 0 stof (formule 4.2.a of 4.2.b)
[O ₂] ₁	=	zuurstofbehoefte voor volledige verbranding van de subcategorie 1 stoffen; deze is gelijk aan het totaal aantal molen subcategorie 1 stoffen vermenigvuldigd met de zuurstofbehoefte per mol subcategorie 1 stof (formule 4.2.a of 4.2.b)

De bronsterkte aan onverbrande stof wordt als volgt bepaald:

$$m = 0,02 \text{ of } 0,1 \times \% \text{actief}_1 \times B_1 \quad (4.9)$$

waarin:

m = bronsterkte onverbrande zeer toxische stof (kg/s)

$\% \text{actief}_1$ = gewogen gemiddeld gewichtsperscentage aan actieve stof categorie 1

B_1 = brandsnelheid subcategorie 1 stoffen (kg/s)

4.2.5 Toxiciteit

In deze paragraaf wordt ingegaan op de toxiciteit van de verschillende stoffen die bij brand vrij kunnen komen, namelijk de toxische verbrandingsprodukten NO_2 , HCl , SO_2 en onverbrand, zeer toxische stof.

Toxische verbrandingsprodukten NO_2 , HCl , SO_2

In 4.2.4 is de bronsterkte aan toxische verbrandingsprodukten bepaald. De bronsterkte bestaat uit een mengsel van NO_2 , HCl en SO_2 .

De berekening van de schade als gevolg van blootstelling aan een bepaalde concentratie van een toxische stof gedurende zekere tijd vindt plaats met gebruikmaking van de betreffende probitfunctie. In het Schadeboek [7] wordt een methodiek gegeven voor het berekenen van probitfuncties voor mensen. Voor een kleine 30 stoffen zijn deze probitfuncties daar ook afgeleid.

Wanneer er sprake is van blootstelling aan een mengsel van stoffen (zoals bij toxische verbrandingsprodukten veelal het geval zal zijn) dient een speciale probit gebruikt te worden. In [4] is afgeleid dat voor mengsels van stoffen met een vergelijkbare toxische werking de gezamenlijke probit wordt gegeven door

$$\text{Pr} = a_1 + \ln \{ [(f_1 C)^{n_1} + \sum_i \delta_i (f_i C)^{n_i}] \times t \} \quad (4.10)$$

waarin:

Pr = probitwaarde;

a_1, n_1 = probitconstanten stof 1;

a_i, n_i = probitconstanten stof i ($i = 2, 3, \dots$);

f_1, f_i = gewichtsfractie van de betreffende stof in het mengsel;

C = som van de concentraties van de stoffen [mg/m^3];

δ_i = $\exp(a_i - a_1)$.

Voor een mengsel van NO_2 , SO_2 en HCl betekent dit uitgaande van de probitrelaties uit het Groene Boek [7]:

$$\text{Pr} = -18,6 + \ln \{ [(f_{\text{NO}_2} C)^{3,7} + 0,549 (f_{\text{SO}_2} C)^{2,4} + 1,47 \times 10^5 (f_{\text{HCl}} C)] \times t \} \quad (4.11)$$

Zeer toxische stof

Voor de berekening van de schade tengevolge van blootstelling aan onverbrande zeer toxische producten kunnen de schademodelen uit het Groene Boek [7] gebruikt worden.

4.2.6 Dispersie

Een belangrijk aspect van de dispersie van stoffen als gevolg van een brand is de mogelijke pluimstijging van de stoffen. In 4.2.1 is reeds aangegeven dat de emissie naar de omgeving van de brandscenario's zijn gerelateerd aan de tijdsduur van de brand, waarbij geen pluimstijging optreedt. Bij de dispersieberekeningen in deze studie speelt pluimstijging dus geen rol.

De bronhoogte voor de dispersie van uit de opslagruimte vrijkomende stoffen, wordt gelijk gesteld aan de hoogte van de ventilatie-uitlaten. Indien de ventilatie-uitlaten aan de bovenzijde van de opslagruimte zijn aangebracht, is de bronhoogte gelijk aan de hoogte van de opslagruimte.

Aangezien er vanuit wordt gegaan dat de vrijkomende producten zich als een neutraal gas in de omgeving zullen verspreiden, kan voor de dispersieberekeningen een neutraal gas-dispersiemodel worden gebruikt. Omdat de release plaatsvindt vanuit een (brandend) gebouw, dient er rekening te worden gehouden met opmenging van het vrijkomende materiaal in de lijwervel van het gebouw. De resulterende concentratie en de afmetingen van de bron worden op analoge wijze berekend als in 3.3.3.

Met behulp van het dispersiemodel worden de concentraties van de toxische stoffen berekend die in de omgeving kunnen optreden. De optredende concentraties worden binnen het dispersiemodel gemiddeld over een tijdsduur gelijk aan de blootstellingsduur voor mensen in de omgeving.

De berekende concentraties worden gerelateerd aan de schademodelen uit 4.2.5. Daaruit volgen de te verwachten schadegebieden als gevolg van een brand in een chemicaliënopslag.

4.3 Kansschattingen**4.3.1 Inleiding**

In de risico-analyse methodiek wordt onderscheid gemaakt tussen de frequentie (aantal keren per jaar) dat een brand in een opslag optreedt en de (ontwikkelings)kans, gegeven een brand, dat de brand een bepaald brandoppervlak krijgt. Deze ontwikkeling van een brand tot een bepaalde omvang wordt uitgedrukt in brandscenario. Hoe snel een brand zich ontwikkelt is afhankelijk van de effectiviteit en betrouwbaarheid van het blussysteem. Bij een snel reagerend effectief brandblussysteem, zoals bijvoorbeeld een gasblussysteem, is de kans op branduitbreiding gering, dit resulteert in een hoge kans op een klein brandoppervlak en een lage kans op een groot brandoppervlak. Bij een langzaam reagerend blussysteem, zoals bijvoorbeeld een brandweer met binnenaanval, zal de kans op een klein brandoppervlak gering zijn

aangezien de brand veel tijd heeft om zich te ontwikkelen. Een lage kans op een klein brandoppervlak en een hoge kans met een groot brandoppervlak zal het gevolg zijn. Om deze mogelijke verschillende brandontwikkelingen tot uitdrukking te brengen zijn voor elk blussysteem verschillende brandscenario's gedefinieerd, die elk een kans van optreden hebben. Indien de brandfrequentie voor een opslag vermenigvuldigd wordt met de kans van op een bepaald brandscenario krijgt men de frequentie op het brandscenario. Indien de frequenties voor alle brandscenario's voor een bepaalde opslag worden opgeteld krijgt men weer de brandfrequentie voor de opslag.

In CPR-15/2 wordt voor elk beschermingsniveau aangegeven welke brandbestrijdingssystemen zijn toegestaan c.q. worden vereist; voor elk van deze systemen zijn eisen ten aanzien van de opslag geformuleerd, die onder andere betrekking hebben op het toegestane opslagoppervlak en op de brandwerendheid van de opslag.

In paragraaf 4.3.2 wordt ingegaan op de factoren die een rol spelen bij de bepaling van het brandoppervlak voor de verschillende bestrijdingssystemen.

In 4.3.3 wordt de brandfrequentie voor een chemicaliënopslag gegeven.

In 4.3.4 worden de verschillende kansen op en bepaald brandscenario voor de verschillende brandbestrijdingssystemen gegeven.

4.3.2 Factoren die van invloed zijn op brandfrequentie en branduitbreiding

De volgende factoren zijn van invloed op de brandfrequentie en de branduitbreiding.

Ontvlambare stoffen (K1 en K2)

Ontvlambare stoffen zullen als ze vrijkomen door de vorming van een zich uitbreidende brandende vloeistofplas in sterke mate bijdragen aan de brand uitbreiding. Indien dit het geval kan zijn moet hiermee bij de bepaling van de kans op een brandoppervlak rekening houden.

Ontvlambare vloeistoffen zullen bij een brand vrijkomen wanneer tengevolge van de warmtestraling van een brand de verpakking faalt. Hierbij moet een onderscheid gemaakt worden tussen metalen verpakkingen en kunststof verpakkingen. Voor metalen verpakkingen blijkt uit berekeningen dat indien zich een metalen vat, gevuld met een ontvlambare stof, bevindt boven een vloeistofbrand van 800 l (lekkage 4 vaten) het vat niet zal falen. Voor kunststof verpakkingen wordt wel aangenomen dat deze zullen smelten en door het vrijkomen van de ontvlambare inhoud zullen bijdragen aan de brandontwikkeling. Op grond van bovenstaande overwegingen wordt in de risico-analyse methodiek aangenomen dat:

- K1 en K2 stoffen in metaal opgeslagen hebben geen invloed op de branduitbreiding;
- K1 en K2 stoffen in kunststofverpakkingen, indien opgeslagen in een vak met vloer op afschot, hebben geen invloed op de branduitbreiding;
- Indien het blussysteem niet voor koeling zorgt zal de opslag van K1 en K2 stoffen in kunststofverpakkingen in een vak zonder afschot wel invloed op de branduitbreiding hebben. Dit betekent een hogere kans op een groter brandoppervlak.

Al of niet aanwezig zijn van ontvlambare stoffen heeft ook invloed op de brandkans, dit komt bij brandkans aan de orde.

Opslaggrootte

De maximale opslaggrootte voor de verschillende blussystemen is in CPR-15/2 gegeven. Het brandoppervlak is maximaal gelijk aan de maximale opslaggrootte (zie ook 4.2.1).

De kans op het optreden op een brandoppervlak kleiner dan 300 m² is afgeleid uit gegevens van het Bureau Sprinklerbeveiliging (zie 4.3.4.1).

Bij het vaststellen van de kansverdeling over de grotere brandoppervlakken voor de verschillende systemen is er vanuit gegaan dat de kans op de grootste brandoppervlakken het kleinst is voor de snelst reagerende systemen. Voor de snellere systemen is daarom gekozen voor een verdeling over de oppervlakken 300, 900, 1500 en 2500 m² van 50:40:9:1. Voor de systemen met binnenaanval is de verdeling ongeveer omgekeerd evenredig aan de oppervlakken ($P(300):P(900):P(1500) = 5:3:1$). Het verschil tussen de bedrijfsbrandweer en de lokale brandweer is gelegen in de kans op het ontstaan van een brandoppervlak van 300 m² of meer.

Ventilatievoud

Gedurende de beschouwde brandduur wordt de constructie van gebouw niet door de brand aangetast. Indien de deuren gedurende de brandduur gesloten zijn, bedraagt het ventilatievoud 4 (zie ook 4.2.1).

Indien tijdens een brand de deuren niet sluiten is het ventilatievoud onbeperkt. De kans dat deuren niet sluiten is afhankelijk van het type deur:

- Automatische, bij brand, zelfsluitende deuren: 0,02;
- Hand bediende deuren: 0,10.

Automatisch zelfsluitende deuren zijn vereist als de opslagruimte brandwerend uitgevoerd moet zijn.

4.3.3 Brandfrequentie chemicaliënopslag

De kans op brand in een chemicaliënopslag is gelijk gesteld aan de kans op brand in een bestrijdingsmiddelenopslag. Deze is in de Bestrijdingsmiddelenstudie op grond van casuïstiek gesteld op $8.8 \cdot 10^{-4}$ per jaar [1].

In een chemicaliënopslag kunnen stoffen worden opgeslagen onder 3 verschillende beschermingsniveaus. Voor de beschermingsniveaus 1 en 2 wordt dezelfde brandkans verondersteld als voor een bestrijdingsmiddelenopslag, te weten $8.8 \cdot 10^{-4}$ per jaar. De reden hiervoor is dat chemicaliën opgeslagen onder de beschermingsniveaus 1 en 2 vergelijkbaar zijn in gevaarszetting met bestrijdingsmiddelen.

Voor chemicaliën, opgeslagen onder beschermingsniveau 3 is een lagere brandkans vastgesteld. De reden hiervoor is dat onder beschermingsniveau 3 geen K1, K2 en zelfs nagenoeg geen K3 produkten (behalve irriterend) mogen worden opgeslagen, met andere woorden stoffen met een hoge initiële brandkans zijn niet aanwezig. In chemicaliënopslagen uitgerust met voorzieningen zoals verplicht onder beschermingsniveau 3 mogen brandbare stoffen met een vlampunt boven 100 °C in metalen verpakking worden opslagen, de onbrandbare stoffen mogen wel in niet-metalen verpakking worden opgeslagen. De kans dat een ontstekingsbron in een dergelijke opslag zonder K1, K2 en nagenoeg geen K3 een brand veroorzaakt is geringer. Hierdoor wordt verondersteld dat in opslagen onder beschermingsniveau 3 de kans op het ont-

staan van een brand een factor 5 lager ligt dan de kans op het ontstaan van brand in opslagen onder beschermingsniveau 1 of 2.

4.3.4 Kans op een brandscenario voor de verschillende beschermingsniveaus/systemen

In CPR-15/2 wordt onderscheid gemaakt tussen drie beschermingsniveaus. Binnen beschermingsniveau 1 worden negen verschillende brandbestrijdingssystemen onderscheiden. Achtereenvolgens worden voor de negen brandbestrijdingssystemen en de beschermingsniveaus 2 en 3 de overwegingen voor de keuzes van de verschillende kansen op een bepaald brandoppervlak gegeven.

4.3.4.1 Systeem 1: automatische sprinklerinstallatie

Op basis van praktijkgegevens van het Bureau Sprinklerbeveiliging is voor de bestrijdingsmiddelenopslagen een empirische kansverdeling afgeleid over een aantal mogelijk brandoppervlakken die bij sprinklerinstallaties kunnen optreden. Aan oppervlakken van 20, 50, 100 en 300 m² wordt een kans toegekend van respectievelijk 0,45, 0,44, 0,10 en 0,01; hierbij worden grotere brandoppervlakken gelijk gesteld aan 300 m².

Indien bij stapeling in een de sprinklers in de rekken zijn aangebracht wordt een iets hogere kans op kleinere brandoppervlakken verondersteld, gelijk aan de automatische deluge (systeem 2).

Bij oneindig ventilatievoud kunnen ook grotere brandoppervlakken dan 300 m² bijdragen aan het risico, daarom wordt in het kader van deze studie de bovengenoemde kansverdeling uitgebreid met brandoppervlakken van 900, 1500 en 2500 m². Bij het vaststellen van de kansverdeling over de grotere brandoppervlakken is er vanuit gegaan dat de kans op de grootste brandoppervlakken het kleinst is. Voor de automatische blussystemen is een verdeling over de oppervlakken 300, 900, 1500 en 2500 m² van 50:40:9:1 verondersteld (zie 4.3.2).

De kans op de verschillende brandoppervlakken moet vermenigvuldigd worden met de kans op gesloten deuren: $1-P_{do}$ (ventilatievoud 4) of de kans op deuren open: P_{do} (ventilatievoud ∞).

Opslag van ontvlambare produkten heeft, gegeven het blussysteem, geen invloed op de kans op een bepaald brandoppervlak, wel op de kans van ontstaan van brand.

Tabel 4.2 Brandscenario's systeem 1: automatische sprinkler

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud [uur ⁻¹]			
	4		∞	
	brandduur [min.]	kans [-]	brandduur [min.]	kans [-]
20	30	0,45 (1-P _{do}) 0,63 ³⁾ (1-P _{do})	30	0,45 P _{do} 0,63 ³⁾ P _{do}
50	30	0,44 (1-P _{do}) 0,26 ³⁾ (1-P _{do})	30	0,44 P _{do} 0,26 ³⁾ P _{do}
100	30	0,1 (1-P _{do})	30	0,1 P _{do}
300	20 ²⁾	0,01 (1-P _{do})	20 ²⁾	0,005 P _{do}
900 ¹⁾			20 ²⁾	0,004 P _{do}
1500			20 ²⁾	0,0009 P _{do}
2500			20 ²⁾	0,0001 P _{do}

Noten:

- 1) Indien K1 en K2 in kunststof wordt opgeslagen zonder een vloer met afschot bedraagt het maximale oppervlak 800 m², kans op dit brandoppervlak is 0,005.
- 2) Indien de brandwerendheid van de opslagruimte groter dan 20 minuten is, bedraagt de brandduur 30 minuten.
- 3) Deze kansen gelden voor een sprinklerinstallatie die in opslagrekken is aangebracht.

4.3.4.2 Systeem 2: automatische deluge-installatie

Ten opzichte van de automatische sprinkler heeft de automatische deluge het voordeel dat na branddetectie onmiddellijk een hele sectie wordt natgehouden. Een sprinkler loopt achter de brand (warmte) ontwikkeling aan. Met name bij compactere stapelingen en plasbranden komt dit voordeel tot uiting. In de tabel is dit aangegeven door een iets hogere kans op een klein brandoppervlak dan bij de sprinkler.

Tabel 4.3 Brandscenario's systeem 2: automatische deluge

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud [uur ⁻¹]			
	4		∞	
	brandduur [min.]	kans [-]	brandduur [min.]	kans [-]
20	30	0,63 (1-P _{do})	30	0,63 P _{do}
50	30	0,26 (1-P _{do})	30	0,26 P _{do}
100	30	0,1 (1-P _{do})	30	0,1 P _{do}
300	20 ¹⁾	0,01 (1-P _{do})	20 ¹⁾	0,005 P _{do}
900			20 ¹⁾	0,004 P _{do}
1500			20 ¹⁾	0,0009 P _{do}
2500			20 ¹⁾	0,0001 P _{do}
Noten: 1) Indien de brandwerendheid van de opslagruimte groter dan 20 minuten is, bedraagt de brandduur 30 minuten.				

4.3.4.3 Systeem 3: automatische gasblusinstallatie

Een automatische gasblusinstallatie mag alleen worden geïnstalleerd in een opslag van maximaal 600 m² die 30 minuten-brandwerend is uitgevoerd en waarin geen rookluiken mogen worden toegepast; de ruimte wordt dan ook als gasdicht beschouwd.

In afwijking van de kansverdeling voor sprinklerinstallaties wordt er bij een gasblusinstallatie vanuit gegaan dat door de kleine opslagruimte en de beperkte zuurstoftoevoer, bij normaal functioneren slechts een kleine zuurstofbeperkte brand mogelijk is. In dat geval wordt de brandduur op 5 minuten gesteld.

De kans op falen van de gasblusinstallatie is gelijk aan die voor een sprinkler, te weten 0,01. De faaloorzaak kan zijn geen blussing (kans 0,005) of niet sluiten van de deuren (kans 0,005). Indien de faaloorzaak het niet automatisch sluiten van de deuren is zal een maximale oppervlakte beperkte brand optreden.

Tabel 4.4 Brandscenario's systeem 3: automatische gasblussing

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud [uur ⁻¹]			
	4		∞	
	brandduur [min.]	kans [-]	brandduur [min.]	kans [-]
20	5	0,99		
600	30	0,005	30	0,005

4.3.4.4 Systeem 4: lokale brandweer met droog deluge-systeem

Bij brandbestrijding door de lokale brandweer mag de opslag niet groter zijn dan 500 m² met een brandwerendheid van 60 minuten (30 minuten indien de inzet-tijd van de lokale brandweer < 6 minuten is). Er wordt vanuit gegaan dat de brand, in de periode totdat de brandweer inzetbaar is, de maximale omvang bereikt. Dit kan zijn een zuurstofbeperkte brand kans: $1-P_{do}$, of een oppervlakte beperkte brand met kans: P_{do} . Indien er onbeperkte ventilatie is (kans P_{do}), kan de brand zich uitbreiden tot 500 m². Aangenomen is dat de kans op een 300 m² of een 500 m² brand omgekeerd evenredig met het oppervlak is voor systemen waarbij de brandweer moet han-delen. Voor dit systeem betekent dit kans op 300 m²: 0,6 kans op 500 m²: 0,4.

Tabel 4.5 Brandscenario's systeem 4: lokale brandweer met droge deluge

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud [uur ⁻¹]			
	4		∞	
	brandduur [min.]	kans [-]	brandduur [min.]	kans [-]
300 500 ¹⁾	30	$1 \cdot (1-P_{do})$	20 ²⁾ 20 ²⁾	0,6. P_{do} 0,4. P_{do}
Noten: 1) Indien opslag van K1 en K2 stoffen in kunststofverpakking is de maximale opslagagrootte 100 m ² . 2) Indien de brandwerendheid van de opslagruimte groter dan 20 minuten is, bedraagt de brandduur 30 minuten.				

4.3.4.5 Systeem 5: automatische hi-ex installatie

Wanneer een automatische hi-ex installatie wordt gebruikt moet de opslag 30 minuten brandwerend worden uitgevoerd, en is het opslagoppervlak maximaal 1500 m². De opslag is voorzien van een rook- en warmte-afvoerinstallatie (rookluiken).

Een hi-ex installatie blust de brand met high-expansion schuim; dit houdt in dat voor een goede bluswerking de rookluiken geopend moeten zijn en er een onbeperkte zuurstof toevoer naar de brand is. De bluseffectiviteit is ongeveer gelijk aan een gasblusinstallatie. Aangezien het systeem iets complexer is dan een gasblusinstallatie liggen de kansen tot 100 m² iets hoger.

Tabel 4.6 Brandscenario's systeem 6: automatische hi-ex installatie

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud ∞	
	brandduur [min.]	kans [-]
20	10	0,89
50	10	0,09
100	10	0,01
300	30	0,005
900	30	0,004
1500	30	0,001

4.3.4.6 Systeem 6: bedrijfsbrandweer met handbediende deluge-installatie

Bij toepassing van dit brandbestrijdingssysteem is de opslag 30 minuten brandwerend uitgevoerd. Het oppervlak is maximaal 2500 m².

Bij het bepalen van de kansverdeling over de brandoppervlakken is er vanuit gegaan dat het meer tijd kost om een handbediende deluge-installatie aan te zetten dan om een automatische deluge-installatie in werking te stellen.

De kans op falen betreft in dit geval het niet in werking gesteld worden van de installatie. Aangezien het hier menselijk falen betreft, is deze kans afgeleid van gegevens over menselijk falen onder stress [3] en op 0,1 gesteld.

Indien de deuren niet gesloten worden (kans: P_{do}), zal ook een grotere oppervlakte beperkte brand kunnen ontstaan. Deze kans wordt, op dezelfde wijze als bij de sprinkler, verdeeld over de brandoppervlakken van 300 m² en meer.

Tabel 4.7 Brandscenario's systeem 6: bedrijfsbrandweer met handbediende deluge

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud [uur ¹]			
	4		∞	
	brandduur [min.]	kans [-]	brandduur [min.]	kans [-]
20	30	0,35 (1- P_{do})	30	0,35 P_{do}
50	30	0,45 (1- P_{do})	30	0,45 P_{do}
100	30	0,1 (1- P_{do})	30	0,1 P_{do}
300	30	0,1 (1- P_{do})	30	0,05 P_{do}
900 ¹⁾			30	0,04 P_{do}
1500			30	0,009 P_{do}
2500			30	0,001 P_{do}
Noten: 1) Maximaal opslag oppervlakte 600 m ² bij opslag van K1 en K2 stoffen in kunststofverpakkingen (kans: 0,05).				

4.3.4.7 Systeem 7: bedrijfsbrandweer met droog systeem

Ook bij toepassing van dit brandbestrijdingssysteem is de opslag 30 minuten brandwerend uitgevoerd en bedraagt het opslagoppervlak maximaal 2500 m². Bij het vaststellen van de kansverdeling is er vanuit gegaan dat het blussen met een droog systeem trager is dan met een deluge-installatie; er is daarom een grotere kans op grote brandoppervlakken.

Indien de deuren niet gesloten worden (kans: P_{do}), zal ook een grotere oppervlakte beperkte brand kunnen ontstaan. Deze kans wordt, op dezelfde wijze als bij de sprinkler, verdeeld over de brandoppervlakken van 300 m² en meer.

Tabel 4.8 Brandscenario's systeem 7: bedrijfsbrandweer met droogsysteem

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud [uur ⁻¹]			
	4		∞	
	brandduur [min.]	kans [-]	brandduur [min.]	kans [-]
50	30	0,2 ($1-P_{do}$)	30	0,2 P_{do}
100	30	0,3 ($1-P_{do}$)	30	0,3 P_{do}
300 ¹⁾	30	0,5 ($1-P_{do}$)	30	0,25 P_{do}
900			30	0,2 P_{do}
1500			30	0,045 P_{do}
2500			30	0,005 P_{do}
Noten: 1) Maximaal opslag oppervlakte 300 m ² bij opslag van K1 en K2 stoffen in kunststofverpakkingen (kans: 0,5).				

4.3.4.8 Systeem 8: bedrijfsbrandweer met ter plaatse blussen (binnenaanval)

Wanneer dit brandbestrijdingssysteem (bedrijfsbrandweer met binnenaanval) wordt toegepast, dient de opslag 60 minuten brandwerend uitgevoerd te zijn. Het oppervlak is maximaal 1500 m². De opslag is voorzien van rookluiken.

Bij inzet van de brandweer dienen de rookluiken geopend te zijn. De ventilatie is dan onbeperkt. De kansverdeling over de verschillende brandoppervlakken voor geopende rookluiken (ventilatievoud ∞) is vastgesteld op analoge wijze als voor systeem 7, er rekening mee houdend dat het u nog moeilijker blussen is. De kans op branden ≥ 300 m² is verdeeld over 300, 900 en 1500 m² als 5:3:1, ongeveer omgekeerd evenredig met de oppervlakken.

Indien bij dit systeem ontvlambare vloeistoffen zijn opgeslagen wordt een minimale brandomvang van 300 m² verondersteld.

Tabel 4.9 Brandscenario's systeem 8: bedrijfsbrandweer met binnen aanval

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud ∞	
	brandduur [min.]	kans [-]
50	30	0,2
100	30	0,3
300 ¹⁾	30	0,28
900	30	0,16
1500	30	0,06

Noten:
1) Maximaal opslag oppervlakte 300 m² bij opslag van K1 en K2 stoffen in kunststofverpakkingen (kans: 0,5).

4.3.4.9 Systeem 9: automatische hi-ex met inside air

Bij dit systeem is geen rook- en warmte-afvoerinstallatie aanwezig. De blus-effectiviteit is ongeveer gelijk aan een gasblusinstallatie. Aangezien het systeem iets complexer is dan een gasblusinstallatie liggen de kansen tot 100 m² iets hoger.

Tabel 4.10 Brandscenario's systeem 9: automatische hi-ex met inside air

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud [uur ⁻¹]			
	4		∞	
	brandduur [min.]	kans [-]	brandduur [min.]	kans [-]
20	10	0,89 (1-P _{do})	30	0,89 P _{do}
50	10	0,09 (1-P _{do})	30	0,09 P _{do}
100	10	0,01 (1-P _{do})	30	0,01 P _{do}
300	30	0,01 (1-P _{do})	30	0,005 P _{do}
900			30	0,004 P _{do}
1500			30	0,0009 P _{do}
2500			30	0,0001 P _{do}

4.3.4.10 Beschermingsniveau 2: < 6 minuten

De kansverdeling voor de brandoppervlakken voor beschermingsniveau 2 met een uitruktijd voor de overheidsbrandweer kleiner dan 6 minuten is gelijk gesteld aan de bedrijfsbrandweer met binnenaanval (systeem 8).

Tabel 4.11 Brandscenario's beschermingsniveau 2: inzetijd < 6 minuten

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud ∞		
	brandduur [min.]	kans [-] geen K1 en K2 in kunststof	kans [-] K1 en K2 in kunststof
50	30	0,2	0,72 0,28
100	30	0,3	
300	30	0,28	
800	30		
900	30	0,16	
1500 ¹⁾	30	0,04	
2500	30	0,02	

Noten:

1) Maximaal opslag oppervlakte 1500 m² bij opslag van K1 en K2 stoffen in metaalverpakkingen (kans: 0,06).

4.3.4.11 Beschermingsniveau 2: < 15 minuten

De kansverdeling voor de brandoppervlakken voor beschermingsniveau 2 met een uitruktijd voor de overheidsbrandweer kleiner dan 15 minuten is iets conservatiever verondersteld dan voor beschermingsniveau 2 met een uitruktijd van 6 minuten.

Tabel 4.12 Brandscenario's beschermingsniveau 2: inzetijd < 15 minuten

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud ∞		
	brandduur [min.]	kans [-] geen K1 en K2 in kunststof	kans [-] K1 en K2 in kunststof
300	20 ²⁾	0,78	0,55
800	20 ²⁾		0,45
900	20 ²⁾	0,16	
1500 ¹⁾	20 ²⁾	0,04	
2500	20 ²⁾	0,02	

Noten:

1) Maximaal opslag oppervlakte 1500 m² bij opslag van K1 en K2 stoffen in metaalverpakkingen (kans: 0,06).

2) Brandduur is 30 minuten indien de brandwerendheid $\geq$ 30 minuten is.

4.3.4.12 Beschermingsniveau 3

Bij beschermingsniveau 3 wordt niet verondersteld dat de brandweer de brand zal beperken tot kleiner dan 300 m². De kansen op een bepaald brandoppervlak zijn omgekeerd evenredig met het oppervlak verondersteld.

Zoals in 4.3.3 is aangegeven, bedraagt de brandfrequentie voor beschermingsniveau 3: $1,8 \cdot 10^{-4}$ per jaar.

Tabel 4.13 Brandscenario's Beschermingsniveau 3

Brandoppervlakte [m ²]	Ventilatievoud ∞	
	brandduur [min.]	kans [-]
300	20 ¹⁾	0,78
900	20 ¹⁾	0,16
1500	20 ¹⁾	0,04
2500	20 ¹⁾	0,02
Noten: 1) Brandduur is 30 minuten indien de brandwerendheid $\geq$ 30 minuten is. 2) Brandfrequentie $1,8 \cdot 10^{-4}$ per jaar.		

4.4 Berekening individueel- en groepsrisico

Voor de risicoberekening zijn naast bovenstaande gegevens enkele vervolgekansen van belang. Deze vervolgekansen hebben betrekking op het voorkomen van meteorologische condities. De meteorologische condities: stabiliteit van de atmosfeer, windsnelheid en windrichting zijn van belang voor de dispersieberekeningen. Voor West Nederland zijn representatieve gegevens in bijlage 1 opgenomen. De risicoberekening bestaat uit het te zamen beschouwen van de schadegebieden van de onderscheiden brandscenario's en de bijbehorende kansen op optreden, ontwikkeling en letaliteit.

4.5 Voorbeeldberekening brand in chemicaliënopslag

4.5.1 Beschrijving van de opslag

Voor het bepalen van het risico van een brand in een chemicaliënopslag wordt in deze voorbeeldberekening uitgegaan van de volgende opslag. De opslagruimte heeft een totaal oppervlak van 1500 m²; lengte maal breedte van 50 * 30 m en een hoogte van 6 m. Het ventilatievoud van de ruimte bedraagt 4. De opslagruimte is

voorzien van een automatische hi-ex installatie met inside air (systeem 9, zie paragraaf 4.3.4). De ruimte is voorzien van handbediende deuren.

In de opslag zijn de volgende stoffen aanwezig:

aniline	200 ton
chloroform	320 ton
ethyleenglycol	250 ton
fenol	200 ton
furfural	100 ton
hexaandiol	185 ton
mierezuur	140 ton
salicylzuur	320 ton
sulfurylchloride	200 ton
tetrachlooretheen	305 ton
ureum	100 ton

De stoffen worden random verdeeld over de opslagruimte opgeslagen, met uitzondering van de stikstofhoudende stoffen aniline en ureum, die apart wordt opgeslagen in een afzonderlijk vak van 400 m².

4.5.2 Effect- en schadeberekeningen brand

De effect- en schadeberekeningen vinden plaats volgens het schema in figuur 4.1 uit paragraaf 4.2.

4.5.2.1 Brandscenario's

Aangezien er sprake is van opslag van de stikstofhoudende stoffen (aniline en ureum), betekent dit dat er voor dit vak en de voor de rest van de opslag aparte brandscenario's worden uitgewerkt. De brandscenario's wordt gekenmerkt door de volgende drie grootheden:

Brandduur

De brandduur voor een brand, waarbij een automatische hi-ex installatie in werking treedt is gesteld op 10 minuten (= tijd om brand te blussen).

Indien de blusinstallatie faalt wordt de brandduur maximum op 30 minuten gesteld (zie tabel 4.7).

Brandoppervlak

De grootte van het brandoppervlak wordt voor een belangrijk deel bepaald door de zuurstoftoevoer, en is tevens afhankelijk van het brandbestrijdingssysteem. De voor

een hi-ex installatie met inside air opgestelde kansverdeling voor een aantal brandoppervlakken is gegeven in tabel 4.7. Het brandoppervlak is maximaal gelijk aan de oppervlakte van de opslagruimte. Voor de twee brandscenario's betekent dit:

- Brand in vak met N-houdende stoffen : maximum brandoppervlak van 400 m²
- Brand in de overige ruimte : maximum brandoppervlak van 1100 m².

Ventilatievoud

Het ventilatievoud (het aantal luchtverversingen per uur) van de opslagruimte bedraagt 4. Dit ventilatievoud is van toepassing indien de deuren van de opslagruimte gesloten zijn. Indien de deuren (handbediend) open staan tijdens de brand, is de ventilatie onbeperkt.

De uitwerking van bovenstaande uitgangspunten ten aanzien van brandduur, brandoppervlak en ventilatievoud zijn voor de twee brandscenario's in tabel 4.14 samengevat.

Tabel 4.14 Ventilatievoud, brandoppervlak en brandduur voor de brandscenario's

Brandscenario	Ventilatievoud	Brandoppervlak [m ²]	Brandduur [min]
1. Brand in vak met N-houdende stoffen	deuren gesloten: 4	20	10
	4	50	10
	4	100	10
	4	300	30
	deuren open: ∞	20	10
	∞	50	10
	∞	100	10
	∞	300	30
	∞	400	30
2. Brand in overige ruimte	deuren gesloten: 4	20	10
	4	50	10
	4	100	10
	4	300	30
	deuren open: ∞	20	10
	∞	50	10
	∞	100	10
	∞	300	30
	∞	900	30
	∞	1100	30

4.5.2.2 Opgeslagen stoffen

Uit de lijst van opgeslagen producten gegeven in paragraaf 4.5.1 volgt dat:

- geen brandbare K1 of K2 stoffen worden opgeslagen;
- geen hoog toxische stoffen (LD₅₀rat,oraal ≤ 25 mg/kg) worden opgeslagen.

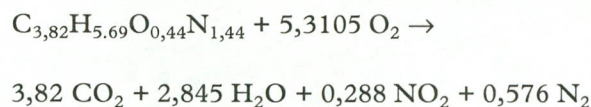
Alle opgeslagen stoffen behoren tot categorie 0: stoffen die (toxische) verbrandingsproducten vormen.

De opslag betreft technisch zuivere stoffen, dat wil zeggen 100% actieve stof.

Vanwege de compartimentering tussen stikstofhoudende stoffen en de overige stoffen worden de twee brandscenario's beschouwd:

1. Brand in vak met N-houdende stoffen

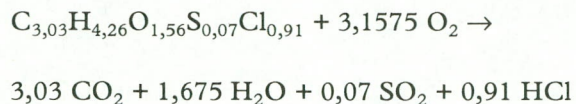
Stoffen	: aniline en ureum
Opslaghoeveelheid	: 300 ton
Gemiddelde structuurformule (volgens formule 4.1)	: $C_{3,82}H_{5,69}O_{0,44}N_{1,44}$
Gemiddeld molecuulgewicht	: 78,67 kg/kmol
Verbrandingsformule	: 20% omzetting N in NO_2 , zie formule 4.2.b



Zuurstofbehoefte Z_0	: 5,3105 kmol O_2 /kmol N-houdende stof
------------------------	---

2. Brand in overige ruimte

Stoffen	: 'mix': zie 4.5.1 uitgezonderd aniline en ureum
Opslaghoeveelheid	: 2020 ton
Gemiddelde structuurformule (volgens formule 4.1)	: $C_{3,03}H_{4,26}O_{1,56}S_{0,07}Cl_{0,91}$
Gemiddeld molecuulgewicht	: 100,40 kg/kmol
Verbrandingsformule	: kwantitatieve omzetting, zie formule 4.2.a



Zuurstofbehoefte Z_0	: 3,1575 kmol O_2 /kmol 'mix'
------------------------	---------------------------------

4.5.2.3 Brandsnelheid

Onder de brandsnelheid wordt verstaan de hoeveelheid van de stof (of 'mix' van stoffen) die verbrand per tijdseenheid (kg/s). In paragraaf 4.2.3 is beschreven hoe de brandsnelheid wordt berekend.

Oppervlakte-beperkte brand

Er is sprake van een oppervlakte-beperkte brand indien de beschikbare hoeveelheid zuurstof geen beperking is voor de brand (ingeval van onbeperkte ventilatie door open

deuren of bij gesloten deuren en klein brandoppervlak). De brandsnelheid per oppervlakte-eenheid zal in dat geval maximaal gelijk zijn aan de verdampingssnelheid van de stof, welke in het algemeen $0,025 \text{ kg/s.m}^2$ bedraagt. De maximale brandsnelheid wordt vervolgens berekend door vermenigvuldiging met het brandoppervlak A (formule 4.3):

$$B_{\max} = 0,025 \cdot A \text{ kg/s}$$

Zuurstof-beperkte brand

Wanneer de beschikbare hoeveelheid zuurstof kleiner is dan de benodigde hoeveelheid zuurstof voor een oppervlakte-beperkte brand (de maximale brandsnelheid), is de brand zuurstof-beperkt (Dit treedt al snel op bij gesloten deuren). De beschikbare hoeveelheid zuurstof komt uit de lucht die in de opslagruimte ($1500 \text{ m}^2 \cdot 6 \text{ m}$) aanwezig is en uit de aangevoerde ventilatielucht (ventilatievoud = 4). De beschikbare hoeveelheid zuurstof bij gesloten deuren wordt bepaald aan de hand van formule 4.4:

$$\begin{aligned} mO_2 &= 0,2 (1 + 0,5 \cdot F) V / (24 \times 1800) = \\ &0,2 (1 + 0,5 \cdot 4) \times (1500 \times 6) / (24 \times 1800) = 0,125 \text{ kmol/s} \end{aligned}$$

De brandsnelheid wordt vervolgens berekend uitgaande van de zuurstofbehoefte voor de verbranding Z_0 (zie paragraaf 4.5.2.2). Berekend zijn de volgende brandsnelheden voor een zuurstof-beperkte brand (volgens formule 4.5).

Brand in vak met N-houdende stoffen:

$$B_0 = mO_2 \times M/Z_0 = 0,125 \times 78,67/5,3105 = 1,85 \text{ kg/s}$$

Brand in overige ruimte:

$$B_0 = mO_2 \times M/Z_0 = 0,125 \times 100,40/3,1575 = 3,97 \text{ kg/s}$$

Brandsnelheden voor de scenario's

De brandsnelheden voor de scenario's worden verkregen door het brandoppervlak van het scenario te vermenigvuldigen met de maximale brandsnelheid ($0,025 \text{ kg/m}^2$), met dien verstande dat de brandsnelheid bij het ventilatievoud 4 nooit groter kan worden dan de hierboven berekende brandsnelheid groter is dan hierboven berekende brandsnelheid voor een zuurstofbeperkte brand. De brandsnelheden zijn in tabel 4.15 gegeven.

4.5.2.4 Bronsterkte

Uit paragraaf 4.5.2.2 volgt dat geen hoog toxische stoffen worden opgeslagen. Hierdoor draagt het vrijkomen van toxisch onverbrand produkt niet significant bij aan het risico voor de omgeving van een brand in de opslagruimte. Bepalend voor het risico is het vrijkomen van de volgende toxische verbrandingsprodukten: NO_2 , SO_2 en HCl . De vorming van deze produkten volgt uit de verbrandingsformule, zoals

die is opgesteld in paragraaf 4.5.2.2. Over het algemeen wordt uitgegaan van een kwantitatieve omzetting. Echter doordat de stikstofhoudende stoffen afzonderlijk worden opgeslagen in een apart vak wordt gerekend met een 20% omzetting, doordat hierbij de onzekerheden in de risico-analyse methodiek kleiner zijn (zie paragraaf 4.2.4.1).

Voor de twee brandscenario's zijn volgens formule 4.6 de emissies van toxische verbrandingsprodukten (in kg per kg verbrand produkt) berekend:

$$\eta = (cl \times 36,5 + n \times 46 \times (1 \text{ of } 0,2) + s \times 64)/M \quad (4.6)$$

Vak met N-houdende stoffen:

$$\eta = (n \times 46 \times 0,2)/M = (1,44 \times 46 \times 0,2)/78,67 = 0,1684 \text{ kg NO}_2/\text{kg verbrande stof}$$

Vak met overige stoffen:

$$\eta = (cl \times 36,5 + s \times 64)/M = (0,91 \times 36,5 + 0,07 \times 64)/100,40 = 0,3754 \text{ kg verbrandingsprodukt/kg verbrande stof}$$

Fractie HCl in het verbrandingsprodukt:

$$0,91 \times 36,5 / (0,91 \times 36,5 + 0,07 \times 64) = 88,1\%$$

Fractie SO₂ in het verbrandingsprodukt:

$$0,07 \times 64 / (0,91 \times 36,5 + 0,07 \times 64) = 11,9\%$$

De bronsterkte in kg/s (formule 4.7) wordt vervolgens bepaald door vermenigvuldiging met de brandsnelheid, die bepaald is in paragraaf 4.5.2.3. De resulterende waarden zijn gegeven in tabel 4.17 respectievelijk 4.18.

4.5.2.5 Toxiciteit

Conform de methodiek beschreven in 4.2.5 zijn schademodellen afgeleid voor de in paragraaf 4.5.2.4 bepaalde toxische verbrandingsprodukten.

1. Brand in vak met N-houdende stoffen

Toxisch verbrandingsprodukt : 100% NO₂, 0% HCl, 0% SO₂
ingevuld in formule 4.11 geeft dit:

$$Pr = -18,6 + \ln \{ [(f_{\text{NO}_2}C)^{3,7} + 0,549 (f_{\text{SO}_2}C)^{2,4} + 1,47 \times 10^5 (f_{\text{HCl}}C)] \times t \}$$

$$Pr = -18,6 + \ln \{ C^{3,7} \cdot t \}$$

Uit deze probitfunctie zijn de volgende letale concentraties voor een blootstellingsduur van 10 en 30 minuten berekend:

$t = 10 \text{ min}$	$LC_{50} = 316 \text{ mg/m}^3$	$t = 30 \text{ min}$	$LC_{50} = 235 \text{ mg/m}^3$
	$LC_{01} = 168 \text{ mg/m}^3$		$LC_{01} = 125 \text{ mg/m}^3$

2. Brand in overige ruimte

Toxisch verbrandingsproduct : 0% NO₂, 88,1% HCl, 11,9% SO₂
 ingevuld in formule 4.11 geeft dit:

$$Pr = -18,6 + \ln \{ [(f_{\text{NO}_2}C)^{3,7} + 0,549 (f_{\text{SO}_2}C)^{2,4} + 1,47 \times 10^5 (f_{\text{HCl}}C)] \times t \}$$

$$Pr = -18,6 + \ln \{ [3,32 \cdot 10^{-3} C^{2,4} + 1,295 \cdot 10^5 \cdot C] \times t \}$$

Uit deze probitfunctie zijn de volgende letale concentraties voor een blootstellingsduur van 10 en 30 minuten berekend:

$t = 10 \text{ min}$	$LC_{50} = 13.500 \text{ mg/m}^3$	$t = 30 \text{ min}$	$LC_{50} = 4.560 \text{ mg/m}^3$
	$LC_{01} = 1.330 \text{ mg/m}^3$		$LC_{01} = 445 \text{ mg/m}^3$

4.5.2.6 Dispersie

De emissies naar de omgeving van de brandscenario's zijn gerelateerd aan de tijdsduur van de brand, waarbij geen pluimstijging optreedt. Bij de dispersieberekeningen in deze studie speelt pluimstijging dus geen rol. Voor de berekening van de verspreiding in de omgeving wordt aangenomen dat de rookgassen eerst in de lijwervel van het opslaggebouw worden opgemengd. De afmetingen van de lijwervel zijn gesteld op (zie paragraaf 3.3.5):

- lengte (diepte) = 3 * hoogte gebouw
- breedte = 0,2 * breedte van het gebouw loodrecht op de windrichting (= 30 m)
- hoogte = hoogte gebouw (= 6 m)

Hierin is 0,2 een correctiefactor voor de aanstroomrichting, waarbij uitgegaan wordt van 45°.

Vanuit deze lijwervel vindt verspreiding in de omgeving plaats. In dit voorbeeld een continue y-z bron ($y = 30 \text{ m}$, $z = 6 \text{ m}$), op een x afstand van 18 m van het gebouw. De verspreiding is berekend met het neutraal gasdispersiemodel uit [6]. Berekend zijn de concentraties van de toxische verbrandingsproducten die in de omgeving kunnen optreden. De optredende concentraties worden binnen het dispersiemodel gemiddeld over een tijdsduur gelijk aan de blootstellingsduur voor mensen in de omgeving. De berekende concentraties zijn gerelateerd aan de probitfuncties voor letaliteit uit 4.5.2.5, waaruit de te verwachten schadegebieden volgen voor een brand in de chemaliënopslag.

De resultaten van de dispersieberekeningen zijn samengevat in tabel 4.16 en 4.17.

4.5.3 Kansschattingen

In paragraaf 4.3 is de kansschatting uitgewerkt voor diverse brandbestrijdingssystemen. Daar de beschouwde opslag voorzien is van een automatische hi-ex installatie met inside air zijn de gegeven kansen voor systeem 9 van toepassing.

Dit betreft de volgende kansaspecten:

- Brandfrequentie = $8,8 \cdot 10^{-4}$ per jaar
De brandfrequentie is van toepassing voor de gehele opslagruimte. Voor de twee onderscheiden scenario's wordt de brandfrequentie vastgesteld op basis van het opslagoppervlak:
 1. Brand in vak met N-houdende stoffen - oppervlak = 400 m²:
Brandfrequentie $400/1500 \times 8,8 \cdot 10^{-4} = 2,35 \cdot 10^{-4}$ per jaar
 2. Brand in overige ruimte - oppervlak = 1100 m²:
Brandfrequentie $1100/1500 \times 8,8 \cdot 10^{-4} = 6,45 \cdot 10^{-4}$ per jaar.
- Kansverdeling voor de twee beschouwde ventilatievouden:
Ventilatievoud = 4, handbediende deuren gesloten : kans = $1 - P_{do} = 0,90$
Ventilatievoud = ∞ (= onbeperkt), deuren open : kans = $P_{do} = 0,10$.
- Kans op branduitbreiding ingeval van een automatische hi-ex installatie met inside air. De kansen op de onderscheiden brandoppervlakken uit tabel 4.14 zijn afgeleid uit tabel 4.7.

Tabel 4.15 Kansen op optreden van diverse brandoppervlakken

Brandscenario	V.V	Brandoppervlak [m ²]	Brandsnelheid [kg/s]	Kans [-] (* P_{do} of $1 - P_{do}$)
1. Brand in vak met N-houdende stoffen	4	20	0,5	$0,89 \times 0,9$
	4	50	1,25	$0,09 \times 0,9$
	4	100	1,85	$0,01 \times 0,9$
	4	300	1,85	$0,01 \times 0,9$
	∞	20	0,5	$0,89 \times 0,1$
	∞	50	1,25	$0,09 \times 0,1$
	∞	100	2,5	$0,01 \times 0,1$
	∞	300	7,5	$0,005 \times 0,1$
	∞	400	10	$0,005 \times 0,1$
2. Brand in overige ruimte	4	20	0,5	$0,89 \times 0,9$
	4	50	1,25	$0,09 \times 0,9$
	4	100	2,5	$0,01 \times 0,9$
	4	300	3,97	$0,01 \times 0,9$
	∞	20	0,5	$0,89 \times 0,1$
	∞	50	1,25	$0,09 \times 0,1$
	∞	100	2,5	$0,01 \times 0,1$
	∞	300	7,5	$0,005 \times 0,1$
	∞	900	22,5	$0,004 \times 0,1$
	∞	1100	27,5	$0,001 \times 0,1$

De resulterende frequenties zijn gepresenteerd voor de twee onderscheiden brand-scenario's in tabel 4.16 respectievelijk 4.17.

Naast bovenstaande frequenties en kansen zijn voor de risicoberekeningen de frequentieverdelingen van de weerklassen en de windrichtingen relevant. De gebruikte gegevens zijn gegeven in bijlage 1.

Tabel 4.16 Resultaten voor scenario 1: Brand in vak met N-houdende stoffen

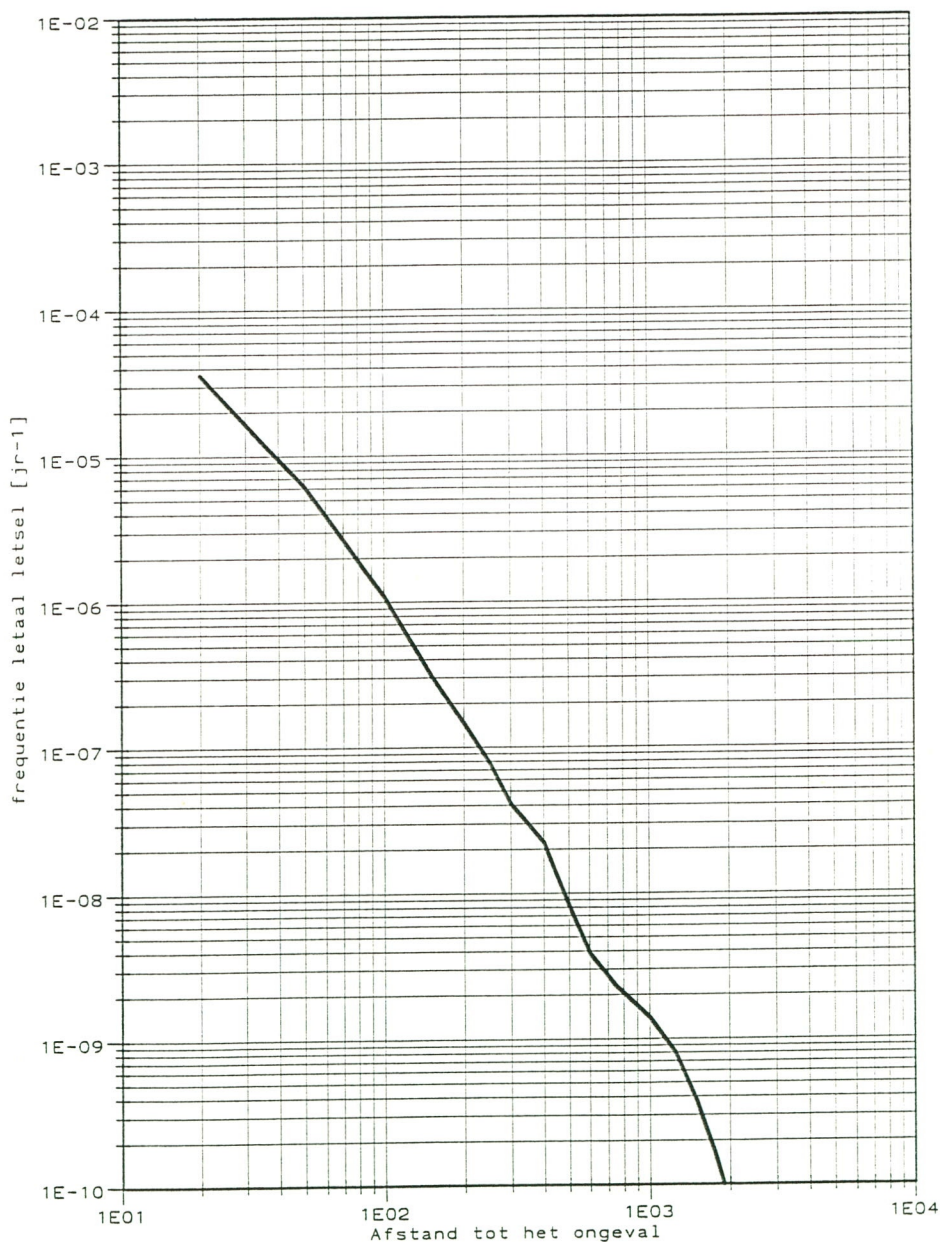
Ventilatievoud	Brand-oppervlak [m ²]	Brand-duur [min]	Frequentie [per jaar]	Bron-sterkte [kg/s]	Toxische schade-afstand [m]			
					D5 neutraal		F2 zeer stabiel	
					LC ₅₀	LC ₀₁	LC ₅₀	LC ₀₁
4 deuren gesloten	20	10	1,88.10 ⁻⁴	0,084	55	75	180	280
	50	10	1,90.10 ⁻⁵	0,211	85	115	340	525
	100	10	2,12.10 ⁻⁶	0,312	100	140	445	680
	300	30	2,12.10 ⁻⁶	0,312	105	145	470	720
∞ deuren open	20	10	2,09.10 ⁻⁵	0,084	55	75	180	280
	50	10	2,12.10 ⁻⁶	0,211	85	115	340	525
	100	10	2,35.10 ⁻⁷	0,421	115	165	545	830
	300	30	1,18.10 ⁻⁷	1,263	225	330	1190	1805
	400	30	1,18.10 ⁻⁷	1,684	270	395	1440	2180

Tabel 4.17 Resultaten voor scenario 2: Brand in overige ruimte

Ventilatievoud	Brand-oppervlak [m ²]	Brand-duur [min]	Frequentie [per jaar]	Bron-sterkte [kg/s]	Toxische schade-afstand [m]			
					D5 neutraal		F2 zeer stabiel	
					LC ₅₀	LC ₀₁	LC ₅₀	LC ₀₁
4 deuren gesloten	20	10	5,17.10 ⁻⁴	0,188	-	-	-	110
	50	10	5,22.10 ⁻⁵	0,469	-	60	-	220
	100	10	5,81.10 ⁻⁶	0,939	-	85	-	355
	300	30	5,81.10 ⁻⁶	1,490	55	170	180	870
∞ deuren open	20	10	5,74.10 ⁻⁵	0,188	-	-	-	110
	50	10	5,81.10 ⁻⁶	0,469	-	60	-	220
	100	10	6,45.10 ⁻⁷	0,939	-	85	-	355
	300	30	3,23.10 ⁻⁷	2,816	75	250	280	1325
	900	30	2,58.10 ⁻⁷	8,447	125	485	590	2730
	1100	30	6,45.10 ⁻⁸	10,324	135	545	670	3115

4.5.4 Risicoberekening en presentatie

Op basis van de resultaten van de effect- en schadeberekeningen en de kansschatting voor de twee onderscheiden brandscenario's, zoals samengevat in tabel 4.16 en 4.17, zijn met behulp van het door TNO ontwikkelde risico-analyse software pakket RISKCURVES de risicoberekeningen uitgevoerd. De resultaten voor het individueel risico zijn in onderstaande diagram weergegeven.



Figuur 4.1 Individueel risico-afstandskromme (F,X-kromme) voor een brand in de voorbeeldopslag van 1500 m², met Hi-Ex inside air (windrichting 230 - 250° ≈ westzuidwest)

5 Referenties

- [1] M. Molag en J.M. Blom-Bruggeman (1991).
Onderzoek naar de gevaren van de opslag van bestrijdingsmiddelen - risico-analyse methodiek.
TNO-rapport 90-424, TNO-MT, Apeldoorn, 1991.
- [2] M. Molag en J.M. Blom-Bruggeman (1990).
Individueel en groepsrisico opslag bestrijdingsmiddelen voor verschillende brandbestrijdingssystemen.
Ministerie VROM (Publikatiereeks Milieubeheer, nr. 1990/9),
's-Gravenhage, 1990.
- [3] TNO (1983).
LPG-Integraal. Vergelijkende risico-analyse van de opslag, de overslag, het vervoer en het gebruik van LPG en benzine (i.o.v. Ministerie VROM).
TNO-MT, Apeldoorn, 1983.
- [4] D. de Weger (1990).
Onderzoek naar de gevaren van de opslag van bestrijdingsmiddelen - Deelrapport 1: Toxiciteitsgegevens.
TNO-rapport 88-174, TNO-MT, Apeldoorn, 1990.
- [5] A.H. Heemskerk et al.
Onderzoek naar de gevaren van de opslag van bestrijdingsmiddelen - Deelrapport 2: Dispersie, brand en explosie eigenschappen.
Prins Maurits laboratorium TNO.
Ref.nr. 1991-C61, Rijswijk, februari 1991.
- [6] TNO (1988).
Methoden voor het berekenen van fysische effecten (Gele Boek).
Commissie Preventie van Rampen door Gevaarlijke Stoffen, CPR-14.
Directoraat-Generaal van de Arbeid (Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid), Voorburg, 1988 (2e druk).
- [7] TNO (1989).
Methoden voor het bepalen van mogelijke schade (Schadeboek).
Commissie Preventie van Rampen door Gevaarlijke Stoffen, CPR-16.
Directoraat-Generaal van de Arbeid (Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid), Voorburg, 1989.
- [8] *Notitie Knelpuntenoverleg EVR (KO 18-2) - Gebruik toxiciteitsgegevens.*
Ministerie VROM, Leidschendam, 1990.
- [9] *Notitie Knelpuntenoverleg EVR - KO 20*
Ministerie VROM, Leidschendam, 1990.
- [10] *Klimatologische gegevens van Nederlandse Stations, No. 8 - Frequentietabellen van de stabiliteit van de atmosfeer.*
KNMI, De Bilt, 1972.

- [11] C.L. van Deelen (1990).
Een methodiek voor de bepaling van het risico van bodemverontreiniging door bedrijven (2 deelrapporten).
TNO-rapport 87-044/85-013205, TNO-MT, Apeldoorn, 1990.
- [12] Ministerie VROM.
Omgaan met risico's.
Tweede Kamer 1988-1989, 21137, nr. 5.
- [13] *Circulaire betreffende werkprogramma aanpassing opslagplaatsen gevaarlijke stoffen en chemisch afval.*
Ministerie VROM, Hoofddirectie Ketenbeheer en Milieuzorg, directie Industrie, Bouw, Produkten, Consumenten, kenmerk IBP 0389009, 31 augustus 1992.
- [14] *Short Distance Immissions.*
Publikatie S37-1,
Directoraat-Generaal van de Arbeid,
Voorburg, 1989.
- [15] *Notitie Knelpuntenoverleg EVR - KO 37-2.*
Ministerie VROM, Leidschendam, 1990.
- [16] *Notitie Knelpuntenoverleg t.a.v. de Rookgassenproblematiek.*
Ministerie VROM, Leidschendam, 29 april 1992.

6 Verantwoording

Naam en adres van de opdrachtgever

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer
Directoraat-Generaal Milieubeheer
Afdeling Industrie en Overige Bedrijfstakken
t.a.v. Ing. C.M. Moons
Den Haag

Namen en functies van de medewerkers

M. Molag
D. de Weger

Namen van instellingen waaraan een deel van het onderzoek is uitbesteed

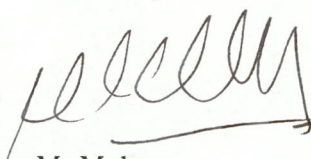
N.v.t.

Datum waarop, of tijdsbestek waarin, het onderzoek heeft plaatsgehad

januari - augustus 1991

januari 1993 - juni 1994

Ondertekening



M. Molag
onderzoekleider

Goedgekeurd door



P.E.J. Vermeulen
afdelingshoofd

Bijlage 1 Representatieve meteorologische condities West Nederland

Frequentie verdeling windrichting														
Windrichting			W		N		O		Z					
Sector			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Stabiliteitsklasse	dag	nacht												
A t/m D	40.0	40.0	13.0	11.0	9.0	9.0	8.0	7.0	7.0	8.0	7.0	7.0	8.0	9.0
E en F	0.0	20.0	5.0	6.0	5.0	6.0	9.0	13.0	9.0	7.0	10.0	12.0	10.0	9.0

Bijlage 2 Samenstelling Begeleidingscommissie

Ir. P.J. Barends,	Ministerie van Binnenlandse Zaken, Directie Brandweer, Afdeling Preventiebeleid
Ir. F.A.O. Buys,	Provincie Noord Holland, Dienst Milieu en Water
Ir. P.A. Dekker,	Ministerie van Binnenlandse Zaken, Directie Brandweer, Afdeling Preventiebeleid
Ing. S.G.J. van der Doorn,	Ministerie van Binnenlandse Zaken, Directie Brandweer, Afdeling Preventiebeleid
Ing. R. Garvelink,	namens de Vereniging Nederlandse Chemi- sche Industrie
Ir. M.M. Kruiskamp,	Dienst Centraal Milieubeheer Rijnmond
Dr. R.O.M. van Loo, voorzitter,	Ministerie VROM/DGM, Afdeling Stoffen en Risico Evaluatie
Ing. P. Pasveer,	Ministerie VROM/DGM afdeling Industrie en Overige Bedrijfstakken
Dhr. J.A.G. Verhoef,	namens de Vereniging Nederlandse Chemi- sche Industrie
Ir. A.A.G. Verhulst,	namens de Vereniging Nederlandse Chemi- sche Industrie
Ir. F. van Woerden, secretaris,	Ministerie VROM/DGM