



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid

Toelichting
Versie oktober 2020

Colofon

© RIVM 2020

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Contact:

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM)
Centrum Veiligheid
Postbus 1
3720 BA Bilthoven

Helpdesk Omgevingsveiligheid
omgevingsveiligheid@rivm.nl

Helpdesk Safeti-NL
safeti-nl@rivm.nl

Helpdesk Carola
carola@rivm.nl

Dit is een uitgave van:
**Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu**
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Inhoudsopgave

Inhoudsopgave—3

Inleiding—7

1 SAFETI-NL—8

- 1.1 Inleiding—8
- 1.2 Toelichting bij paragraaf modellering van de scenario's—8
 - 1.2.1 Massa betrokken in een vuurbal—8
 - 1.2.2 Modellering van de uitstroming—8
- 1.3 Toelichting bij paragraaf rapportagespecifieke parameters—9
 - 1.3.1 Meteorologische weerstations en parameters—9
 - 1.3.2 Ruwheidslengte van de omgeving—10
 - 1.3.3 Positie van de uitstroming—10
 - 1.3.3.1 Hoogte van de uitstroming ten opzichte van de omgeving—10
 - 1.3.3.2 Fase van de uitstroming—11
 - 1.3.3.3 Uitstroming uit reservoirs met een niet homogene inhoud—11
 - 1.3.4 Invloed van een krater—11
 - 1.3.5 Drukverlies ten gevolge van kleppen en bochten—11
 - 1.3.6 Tijdsafhankelijke uitstroming—11
 - 1.3.7 Uitstroom in een gebouw—12
 - 1.3.8 Faaldruk van een BLEVE—12
 - 1.3.9 Tankput—13
- 1.4 Toelichting bij ontstekingsparameters—13
 - 1.4.1 Gebeurtenissenbomen ontvlambare stoffen—13
 - 1.4.1.1 Instantane vrijzetting van een ontvlambaar gas—13
 - 1.4.1.2 Continue vrijzetting van een ontvlambaar gas—14
 - 1.4.1.3 Instantane vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas—15
 - 1.4.1.4 Continue vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas—16
 - 1.4.1.5 Vrijzetting van een ontvlambaar vloeistof—16
 - 1.4.1.6 Ingeterpte en ondergrondse tanks—17
 - 1.4.1.7 Kans op directe ontsteking—18
 - 1.4.1.8 Kans op vertraagde ontsteking—20
 - 1.4.1.8.1 Ontstekingsbronnen: overzicht—21
 - 1.4.1.8.2 Ontstekingsbronnen: transport—21
 - 1.4.1.8.3 Ontstekingsbronnen: bevolking—22
 - 1.4.1.8.3.1 Invoeren bevolkingsgegevens—23
 - 1.4.1.9 Fractie explosie—24
 - 1.5 Toelichting bij stofspecifieke parameters—24
 - 1.5.1 Probitwaarden giftige stoffen—24
 - 1.5.2 Inerte gassen en zuurstof—25
 - 1.5.3 Stoffen die zowel giftig als ontvlambaar zijn—26
 - 1.5.4 Mengsels van stoffen—27
 - 1.5.4.1 Vloeibare aardolieproducten klasse 1/klasse 22—27
 - 1.5.4.2 Overige mengsels—27
 - 1.6 Parameters specifiek voor risico- en effectberekeningen in Nederland—28
 - 1.6.1 Middelingstijd—28
 - 1.6.2 Maximum uitstroomtijd en blootstellingsduur—28

- 1.6.3 Geblokkeerde uitstroming—28
- 1.6.4 Explosieparameters—28
- 1.6.5 Hoogte voor de berekening van de effecten—28
- 1.6.6 Letaliteit—29
- 1.6.6.1 Blootstelling aan giftige stoffen—29
- 1.6.6.2 Ontvlambare stoffen - warmtestraling—30
- 1.6.6.3 Ontvlambare stoffen - overdruk—35

2 RBMII—36

3 CAROLA—37

4 Module I—38

- 4.1 Inleiding—38
- 4.2 Subselectie—38
- 4.2.1 Doelstelling en reikwijdte—38
- 4.2.1.1 Doelstelling van de subselectie—38
- 4.2.1.2 Reikwijdte van de subselectie—38
- 4.2.1.2.1 Verantwoordelijkheid van de subselectie en afwijkingen—38
- 4.2.1.2.2 Reactieproducten en giftige verbrandingsproducten—39
- 4.2.1.2.3 Bulkverladingsactiviteiten—39
- 4.2.1.2.4 Uitsluiting van bepaalde stoffen—40
- 4.2.2 De subselectie—40
- 4.2.2.1 De subselectie op hoofdlijnen—40
- 4.2.2.2 Verdeling van een inrichting in insluitsystemen—41
- 4.2.2.2.1 Definitie insluitsysteem—41
- 4.2.2.2.2 Begrenzing van insluitsystemen—42
- 4.2.2.3 Selectie op basis van effectafstanden—43
- 4.2.2.4 Selectie op basis van selectiegetallen—44
- 4.2.2.4.1 Methode op hoofdlijnen—44
- 4.2.2.4.2 Aanwijzingsgetal A—44
- 4.2.2.4.3 Berekening van het selectiegetal S—51
- 4.2.2.4.4 Selectie van insluitsystemen—51
- 4.2.2.5 Specifieke aandachtspunten voor de toepassing van de subselectie—52
- 4.2.2.5.1 Ontvlambare vloeistoffen—52
- 4.2.2.5.2 Transportleidingen—53
- 4.2.2.5.3 Gebruik van resultaten uit de subselectie—54
- 4.2.3 Voorbeeld—54
- 4.2.3.1 Beschrijving van de insluitsystemen—55
- 4.2.3.2 Berekening van het aanwijzingsgetal—56
- 4.2.3.2.1 Insluitsysteem I₁—56
- 4.2.3.2.2 Insluitsysteem I₂—56
- 4.2.3.2.3 Insluitsysteem I₃—57
- 4.2.3.2.4 Insluitsysteem I₄—57
- 4.2.3.2.5 Insluitsysteem I₅—57
- 4.2.3.2.6 Overzicht aanwijzingsgetallen—58
- 4.2.3.3 Berekening van het selectiegetal—58
- 4.2.4 Toelichting subselectie—60
- 4.2.4.1 Reikwijdte van de subselectie—60
- 4.2.4.1.1 Reactieproducten en giftige verbrandingsproducten—60
- 4.2.4.1.2 Bulkverladingsactiviteiten—60
- 4.2.4.2 De subselectie—61
- 4.2.4.2.1 Selectie op basis van effectafstand—61

- 4.2.4.2.2 Hoeveelheid stof, Q—61
- 4.2.4.2.3 Grenswaarde, G—61
- 4.2.4.2.4 Berekening van het aanwijzingsgetal—61
- 4.2.4.2.5 Berekening van het selectiegetal, S—61
- 4.2.4.2.6 Selectie van insluitsystemen—62
- 4.2.4.2.7 Transportleidingen—63
- 4.2.4.3 Voorbeeld—64
- 4.3 Scenario's en faalfrequenties—64
- 4.3.1 Aanvullende informatie over modellering—64
- 4.4 Rekenvoorbeelden—64
- 4.4.1 Destillatiekolom—64
- 4.4.2 Repressieve systemen—66
- 4.4.2.1 Tankput—66
- 4.4.2.2 Inbloksystemen—66
- 4.4.2.3 Doorstroombegrenzer—67
- 4.4.2.4 Terugslagklep—68
- 4.4.2.5 Ingrijpen door operators—68

5 Module II—70

6 Module III—71

7 Module IV—72

- 7.1 Inleiding—72
- 7.1.1 Welke personen en objecten lopen gevaar?—72
- 7.2 Bladbreek—72
- 7.2.1 Werpmodellen—72
- 7.2.1.1 Ballistisch model met luchtkrachten—73
- 7.2.1.1.1 Verdelingsfuncties—73
- 7.2.2 Ongevallenscenario's—74
- 7.2.3 Trefkansberekeningen—75
- 7.2.4 Wegen—75
- 7.2.4.1 Infrastructuur—75
- 7.2.4.2 Passanten—75
- 7.3 Mastbreek—76
- 7.3.1 Trefkansberekeningen—76
- 7.3.2 Infrastructuur—76
- 7.4 Incidenten binnen de rotordiameter—77
- 7.4.1 IJsafwerping—77
- 7.5 Incidenten met buisleidingen—78
- 7.5.1 Ondergrondse buisleidingen—78
- 7.5.1.1 Kansdichtheidsverdeling gondel en/of rotorafworp ondergrondse buisleidingen—78
- 7.5.1.2 Rekenvoorbeeld kansdichtheidsverdeling gondel en/of rotorafworp ondergrondse buisleiding—78
- 7.6 Ongevalsscenario's en faalstatistiek—81
- 7.6.1 Inleiding—81
- 7.6.2 Faalscenario's—81
- 7.6.3 Faalstatistiek—82
- 7.6.3.1 Update faalstatistiek—82
- 7.6.3.1.1 Dataverzameling—83
- 7.6.3.1.1 Casuïstiek Nederland (Informatief)—84
- 7.6.3.1.1 Caithness Windfarm—86

7.6.3.1.1	Faalstatistieken fabrikanten—89
7.6.3.1.1	Windkraft Journals—90
7.6.3.2	Bladbreuk—91
7.6.3.3	Mastbreuk—92
7.6.3.4	Gondel- en/of rotorafworp—93
7.6.3.5	Resultaat—94
7.7	Generieke gegevens—95
7.7.1	Inleiding—95
7.7.2	Turbineparameters als functie van het nominale vermogen—96
7.7.3	Generieke risicocontouren—102
7.7.4	Conclusies—108
8	Module V—109
9	Module VI—110
9.1	Civiele explosieaandachtsgebieden—110
9.1.1	Civiele explosieaandachtsgebieden voor opslag van ontplofbare stoffen en voorwerpen van gevarensklasse 1.1—111
9.1.2	Civiele explosieaandachtsgebieden voor opslag van ontplofbare stoffen en voorwerpen van gevarensklasse 1.4—111
10	Begrippenlijst—112
11	Referenties—113

Inleiding

Dit document bevat de toelichting op het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid. In deze toelichting is achtergrondinformatie te vinden over de rekenwijze van de verschillende softwareprogramma's die worden gebruikt: SAFETI-NL (Hoofdstuk 1), RBMII (Hoofdstuk 2) en CAROLA (Hoofdstuk 3). Daarnaast is in dit document de toelichting op de verschillende modules van het rekenvoorschrift opgenomen.

Dit document zal in de komende maanden verder worden aangevuld.

1 SAFETI-NL

1.1 Inleiding

Het rekenpakket SAFETI-NL wordt gebruikt voor berekeningen bij module I, II, en V (deel B en C). In deze toelichting staan de niet te wijzigen parameters en onderliggende rekenwijze.

1.2 Toelichting bij paragraaf modellering van de scenario's

1.2.1 Massa betrokken in een vuurbal

De massa betrokken in de vuurbal is gelijk aan $3 \times$ de flashfractie¹ bij de faaldruk, met een maximum van de volledige systeeminhoud. Bij het stand-alone vuurbalmodel moet de *vapour fraction* gelijk zijn aan de flashfractie.

Het Paarse Boek schrijft voor dat de volledige massa in de tank meegenomen moet worden in de vuurbal. Uit een review van de modellering van de vuurbal blijkt dat een waarde van $3 \times$ de flashfractie bij de faaldruk voldoende conservatief is [1]. Deze waarde is nu voorgeschreven.

1.2.2 Modellering van de uitstroming

Om te bepalen wat een significante bijdrage van nalevering is, is een testberekening gedaan voor een scenario waarbij 25 ton ammoniak (onder druk) vrijkomt in 10 minuten. Vervolgens is de uitstroomhoeveelheid verhoogd bij gelijkblijvend uitstroomdebiet om de nalevering uit andere systeemonderdelen te simuleren. Het resultaat is gegeven in Tabel 1.1. Hieruit blijkt dat een nalevering van 20% leidt tot een toename in risicoafstand van 4 – 7%.

Er zijn geen criteria vastgelegd om te bepalen welke toename in risico-afstand significant is. Wanneer als criterium een toename van de risicoafstand met meer dan 5 – 10% wordt aangehouden, betekent dit dat een nalevering van meer dan 10-20% meegenomen moet worden in de risico- en effectberekening. Op basis hiervan is 10% aangehouden.

Tabel 1.1 Invloed van de uitstroomhoeveelheid van ammoniak op het plaatsgebonden risico op 200 m en 400 m; weergegeven is de procentuele verandering in plaatsgebonden risico (PR) en in afstand.

Hoeveelheid	Nalevering	Toename op 200 m		Toename op 400 m	
		PR	afstand	PR	Afstand
25 ton	0%	0%	0%	0%	0%
30 ton	20%	8%	7%	22%	4%
35 ton	40%	14%	13%	35%	7%
40 ton	60%	18%	17%	47%	10%
50 ton	100%	27%	25%	67%	14%

¹ De flashfractie is de fractie van de massa die verdampt wanneer het systeem zonder interactie met de omgeving expandeert tot omgevingsdruk

Voor de keuze tussen het scenario 'line rupture' en 'long pipeline' geeft de Handleiding aan dat voor het scenario 'long pipeline' geldt dat $L/D \gg 300$ met L de leidinglengte 'upstream' van het gat. Dit is vertaald naar de keuze dat het lange pijpleiding model toegepast wordt voor (1) alleen lange transportleidingen tussen twee units op een locatie en (2) $L/D > 1000$, met L de leidinglengte en D de leidingdiameter.

In SAFETI-NL 6.54 werd de inhoud van de leiding (scenario 'line rupture') niet meegenomen in de berekening van de uitstroming, in SAFETI-NL 8 wel. Dezelfde invoer leidt dus tot een grotere bronterm in SAFETI-NL 8. Daarom is expliciet toegevoegd dat bij breuk van een leiding aan een vat (line rupture) de inhoud van de leiding automatisch wordt opgeteld bij de inhoud van het vat.

In SAFETI-NL 8 is een nieuwe optie toegevoegd, namelijk *fixed flow rate*. Hiermee kan de gebruiker direct een vast uitstroomdebiet invoeren, bijvoorbeeld wanneer de uitstroming bepaald wordt door een (verhoogd) pompdebiet.

1.3 Toelichting bij paragraaf rapportagespecifieke parameters

1.3.1 Meteorologische weerstations en parameters

De standaard waarden voor de meteorologische parameters zijn afgeleid uit de KNMI statistiek voor de normaalperiode 1971 – 2000, station De Bilt [2]. Omdat de berekeningen apart worden uitgevoerd voor de dag en de nacht, zijn de standaardwaarden nu ook gedefinieerd voor dag en nacht afzonderlijk. De volgende benadering is hierbij gevolgd:

Temperatuur

De KNMI statistiek geeft de etmaalgemiddelde dagtemperatuur (9,8 °C jaargemiddeld), het dagmaximum (13,7 °C jaargemiddeld) en het dagminimum (5,7 °C jaargemiddeld). De temperatuur voor de nachtperiode is berekend als het gemiddelde van het daggemiddelde en het dagminimum, de temperatuur voor de dagperiode is berekend als het gemiddelde van het daggemiddelde en het dagmaximum. Omdat in de berekeningen een verdeling 0,44 voor de dag en 0,56 voor de nacht wordt aangehouden, is de dagtemperatuur berekend als $9,8 + 0,56 \times (13,7 - 9,8) = 12$ °C en de nachttemperatuur als $9,8 - 0,44 \times (9,8 - 5,7) = 8,0$ °C. Met deze correctie is de daggemiddelde temperatuur gelijk $0,44 \times 12$ °C + $0,56 \times 8$ °C = 9,8 °C. Overigens is het gebruik van een jaargemiddelde dag- en nachttemperatuur niet erg zinvol: de variatie in temperatuur tussen zomer en winter is aanzienlijk groter dan de variatie in het jaargemiddelde dagmaximum of -minimum.

Voor de temperatuur van de bodem en het water wordt voorgesteld het jaargemiddelde aan te houden in verband met de bufferende werking van grote (water-) massa's.

Luchtdruk

De KNMI statistiek geeft de etmaalgemiddelde luchtdruk. De waarde is 101550 Pa. Deze waarde is genomen voor de dagperiode en de nachtperiode.

Luchtvochtigheid

De KNMI statistiek geeft de etmaalgemiddelde luchtvochtigheid (82% jaargemiddeld) en de luchtvochtigheid op 12 uur UT (72,2% jaargemiddeld). De luchtvochtigheid voor de dagperiode is berekend als het gemiddelde van het

daggemiddelde en de luchtvochtigheid op 12 uur UT, dat wil zeggen $82\% - 0,56 \times (82\% - 72,2\%) = 76,5\%$. De luchtvochtigheid voor de nachtperiode is zodanig dat het etmaalgemiddelde gelijk is aan 82% , dat wil zeggen $(82\% - 0,44 \times 76,5\%)/0,56 = 86,3\%$.

Zonne-instraling

De KNMI statistiek geeft de etmaalsom van de globale straling (950 J/cm^2). Deze waarde is volledig toegekend aan de dagperiode, zodat de zonne-instraling dan gelijk is aan $(950 \text{ J/cm}^2 \times 10.000 \text{ cm}^2/\text{m}^2)/(10,5 \times 3600 \text{ s}) = 0,25 \text{ kW/m}^2$.

Menglaaghoogte

De menglaaghoogte voor de verschillende weerklassen is berekend

Standaardwaarden voor een aantal meteorologische parameters zijn te vinden in Tabel 1.2. De waarden zijn jaargemiddelden.

Tabel 1.2 Standaardwaarden voor een aantal meteorologische parameters

Parameter	Standaardwaarde dag	Standaardwaarde nacht
Omgevingstemperatuur	12 °C	8 °C
Temperatuur bodem/tankput	9,8 °C	9,8 °C
Watertemperatuur	9,8 °C	9,8 °C
Luchtdruk	101550 N/m ²	101550 N/m ²
Luchtvochtigheid	76,5%	86,3%
Globale straling	0,25 kW/m ²	0 kW/m ²
Fractie van een etmaal	0,44 (8:00 – 18:30)	0,56 (18:30 – 8:00)
Menghoogte	Opmerking 1	

Opmerkingen:

1. De standaardwaarden van de menghoogte zijn in het model opgenomen, namelijk 1500 meter voor weerklassen B3, 500 meter voor weerklassen D1,5, D5 en D9, 230 meter voor weerklassen E5 en 50 meter voor weerklassen F1,5.

1.3.2 *Ruwheidslengte van de omgeving*

De standaardwaarde van 0,3 meter komt overeen met RBM II en is een gemiddelde over heel Nederland voor transport. In de praktijk zal gerekend moeten worden met voor de locatie geldende waarde.

Op de website van het Ministerie van IenW is een hulpmiddel beschikbaar waarmee de ruwheidslengte van een locatie bepaald kan worden. Zoek hiertoe op www.rijksoverheid.nl op de term 'ruwheidskaart' en download het zip-bestand *Ruwheidskaart.zip*. Hierin staat een tekstbestand waarin de x,y-coördinaten (RDM) van de linkeronderhoek (zuidwesthoek) van het vierkant van 1x1 km kan worden afgelezen. De derde kolom bevat de z₀-waarde (ruwheidslengte) in meters.

1.3.3 *Positie van de uitstroming*

1.3.3.1 Hoogte van de uitstroming ten opzichte van de omgeving

In het Parse Boek wordt een verdeling van uitstroomlocaties over de hoogte van een vat toegestaan. In het kader van een unificatie van de risico- en effectberekeningen is nu één locatie voorgeschreven. De minimum hoogte is gelijkgesteld aan één meter voor continue uitstromingen om te voorkomen dat een zeer groot gedeelte van de emissie direct uitregent. Voor instantane emissies

is de hoogte van de uitstroming gelijk aan het midden van de vloeistofkolom of het vat, in overeenstemming met het toegepaste model in versie 8.

Voor ondergrondse reservoirs en leidingen wordt uitgegaan van 0 meter hoogte.

1.3.3.2 Fase van de uitstroming

Het model voor instantane uitstroming in SAFETI-NL versie 6.54 rekende met een vaste, opwaartse hoek waarin de druppels bewegen voordat ze uitregenen.

In de 'modevaluatie Buncefield'[3] is gebleken dat de modellering van het scenario instantaan falen van atmosferische opslagtanks fysisch onrealistisch is als voor de hoogte van de vloeistofkolom wordt uitgegaan van de maximale hoogte. Voor ontvlambare atmosferische vloeistoffen is bovendien gebleken dat de bijbehorende effectafstanden afwijken van de effectafstanden die in de praktijk zijn opgetreden bij (bijna) instantane uitstromingen. Daarom is besloten om in SAFETI-NL 6.54 voor instantaan falen van atmosferische tanks te rekenen met een hoogte van de vloeistofkolom gelijk aan 0 meter.

Het model voor instantane uitstroming is in SAFETI-NL 8 geheel vernieuwd. In dit nieuwe model moet voor de locatie van instantaan falen het midden van de vloeistofkolom worden ingevoerd, en de hoogte van de vloeistofkolom als 'tank head'.

1.3.3.3 Uitstroming uit reservoirs met een niet homogene inhoud

In dit hoofdstuk is geprobeerd een praktische benadering te hanteren voor distillatiekolommen e.d. Een verdere opsplitsing van het 10 mm gat over meerdere locaties is niet zinvol gezien de geringe bijdrage van dit scenario aan het totale risico.

De stof in de rapportage wordt geselecteerd aan de hand van de effectafstand bij weerklasse D5. Hiermee is gekozen voor een gemiddelde weerklasse, zodat voor de meest voorkomende weerklassen de goede keuze is gemaakt.

1.3.4 *Invloed van een krater*

In Safeti-NL versie 8 is een kratermodel opgenomen. De consequenties hiervan zijn voor milieubelastende activiteiten beschreven met module I en II niet meegenomen in het consequentieonderzoek. Uit het consequentieonderzoek voor ondergrondse transportleidingen blijkt dat het kratermodel leidt tot grotere effect- en risicoafstanden. Omdat de consequenties nog onvoldoende in beeld zijn gebracht, heeft het ministerie van IenW besloten het kratermodel vooralsnog niet voor te schrijven.

1.3.5 *Drukverlies ten gevolge van kleppen en bochten*

In de standaard berekening wordt aangenomen dat er geen drukverlies optreedt door de aanwezigheid van kleppen en bochten in de leiding. Hierdoor wordt de uitstroming enigszins overschat.

1.3.6 *Tijdsafhankelijke uitstroming*

SAFETI-NL biedt de mogelijkheid te rekenen met tijdsafhankelijke uitstroming. In de keuze van de methode is een aantal overwegingen van belang.

- Het invoeren van een tijdsafhankelijke uitstroming is meer werk, omdat ook eigenschappen van het reservoir moeten worden ingevoerd.
- Wanneer de uitstroomduur aanzienlijk groter is dan 1800 s, is er weinig verschil tussen een tijdsafhankelijke uitstroming en een constante uitstroming, omdat het debiet niet veel verandert gedurende de eerste 1800 s.

- Wanneer de uitstroming uit een lange leiding gemodelleerd wordt als een tijdsafhankelijke uitstroming met (bijvoorbeeld) vijf segmenten, kan de situatie zich voordoen dat het plaatsen van een klep in de leiding leidt tot grotere effectafstanden, en dus een hoger risico. Immers, door het plaatsen van een klep eindigt de uitstroming na een bepaalde, korte tijd. Bij een gelijkblijvend aantal segmenten betekent dit dat de tijdsduur van één segment afneemt, en dus het gemiddeld debiet van het eerste segment toeneemt. Met name voor ontvlambare stoffen, waar het debiet van het eerste segment belangrijk is voor het risico, wordt op deze wijze een toename in het risico berekend. Dit speelt niet wanneer altijd uitgegaan wordt van een constant uitstroomdebiet op basis van bijvoorbeeld de eerste 20 s.

Gekozen is om uit te gaan van een constant debiet met de condities op tijdstip $t = 0$ s (vat, korte leiding) dan wel een constant debiet gemiddeld over 0 – 20 s (lange leiding). Dit is de eenvoudigste wijze van modelleren en een goede benadering voor kortdurende (< 50 s) en langdurige (> 1800 s) uitstromingen. Alleen wanneer een reservoir leegstroomt in de periode 50 – 1800 s geeft deze benadering een overschatting van de risico's. Voor een zo goed mogelijke risicoberekening wordt daarom toegestaan in dergelijke gevallen uit te gaan van een variërend uitstroomdebiet met een eerste benadering van vijf segmenten. De risico-analist dient wel een onderbouwing te geven van de gemaakte keuze.

N.B. Bij constante uitstroming stroomt de volledige inhoud van het reservoir uit, omdat uitgegaan wordt van de condities op tijdstip $t = 0$. Bij tijdsafhankelijke uitstroming kan de uitgestroomde hoeveelheid kleiner zijn omdat massa achterblijft na ontspanning tot atmosferische druk.

1.3.7 *Uitstroom in een gebouw*

Bij uitstroming van een vloeistof onder druk in een gebouw zal een gedeelte direct verdampen door afkoelen van de vloeistof tot het atmosferisch kookpunt (flash fractie) en een gedeelte verdampen door opname van warmte uit de omgeving (lucht, voorwerpen, vloer, wanden). Als vaste defaultwaarde is gekozen voor een totale hoeveelheid damp gelijk aan drie keer de flash fractie. Dit is hoger dan de waarde voor de verdampte hoeveelheid in het Paarse Boek [4], namelijk twee tot drie keer de flash fractie, om rekening te houden met de opname van warmte uit de omgeving.

1.3.8 *Faaldruk van een BLEVE*

De faaldruk van een BLEVE is van belang voor de warmtestraling die vrijkomt. Aangenomen wordt dat een BLEVE ontstaat ten gevolge van warmtestraling in de omgeving van de tank.

Voor LPG ketelwagens is de testdruk gelijk aan 28 bar. Een praktijktest uitgevoerd door BAM met een voor ca 20% gevulde propaan ketelwagen resulteerde in een faaldruk van 25 bar [5]. Het rekenprogramma RBM II hanteert een lagere faaldruk voor een warme BLEVE van een ketelwagen, namelijk 19,5 bar. Deze waarde is afgeleid op basis van de testdruk voor stationaire tanks. Er zijn argumenten om voor ketelwagens een lagere faaldruk te hanteren dan de testdruk. Zo kan de verzwakking van de metaalwand door aanstraling van de dampkamer boven de vloeistof een belangrijke rol spelen, waardoor een BLEVE bij een lagere druk kan optreden. Bij het vervoer van gevaarlijke stoffen speelt daarnaast ook de vraag of een plasbrand van een ketelwagen ontvlambare vloeistof voldoende lang duurt voor het opwarmen van de inhoud tot de temperatuur behorende bij de faaldruk.

Gezien bovenstaande is besloten aan te sluiten bij de RBMII benadering en voor ketelwagens uit te gaan van een faaldruk van 19,5 bar.

Voor tankauto's wordt in RBMII niet uitgegaan van een warme BLEVE, omdat de risico's van een warme BLEVE (falen t.g.v. een brand onder de tank) verwaarloosbaar zijn ten opzichte van een koude BLEVE (falen t.g.v. botsing). Voor de afstandentabel LPG tankstations is de referentie barstdruk voor de tankauto berekend op basis van de insteldruk van het veiligheidsventiel op de tankauto [6]. Deze insteldruk is gelijk aan 19,25 barg. Dit leidt tot een faaldruk van $1,21 \times 20,25 \text{ bara} = 24,5 \text{ bara}$.

Wanneer een veiligheidsklep ontbreekt, moet uitgegaan worden van falen bij de testdruk. Dit betekent dat hoe groter de testdruk is, hoe sterker een reservoir is, maar ook hoe groter de berekende effecten en risico's zijn. In de praktijk zullen veiligheidskleppen aanwezig zijn bij reservoirs die relevant zijn voor de externe veiligheid, zodat deze tegenstrijdigheid geen probleem is.

1.3.9 Tankput

De parameter '*whether the bund can overflow*' voor de tankput is nieuw in Safeti-NL 8. Voor beide invoeropties voor deze parameter is het uitgangspunt dat de inhoud van de tankput voldoende groot is om de vloeistofinhoud die vrijkomt te bevatten ('liquid overfill not possible'). De optie 'bund cannot fail' is gelijk aan de modellering in Safeti-NL 6.54. De vloeistof regent buiten de tankput uit als de (gemodelleerde) hoogte van de vloeistofstraal ter plaatse van de omwalling hoger is dan de hoogte van de omwalling. In dat geval is de tankput ook niet meer van invloed meer op de maximale omvang van de vloeistofplas. Bij de optie 'rainout always inside bund' vindt het uitregenen altijd binnen de tankput geplaatst en is de vloeistofplas nooit groter dan het oppervlak van de tankput, of 1,5 maal het oppervlak van de tankput (voor instantaan falen).

1.4 Toelichting bij ontstekingsparameters

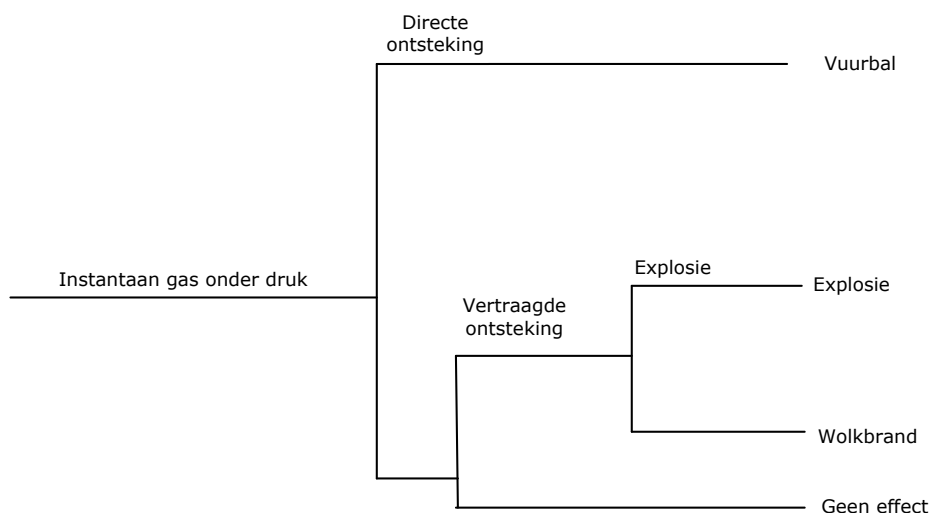
1.4.1 Gebeurtenissenbomen ontvlambare stoffen

Bij het vrijkomen van ontvlambare gassen en vloeistoffen zijn er verschillende vervolgeffecten mogelijk, namelijk een BLEVE en/of vuurbal, fakkel, plasbrand, gaswolkexplosie en wolkbrand (flash fire). Het optreden van deze fenomenen hangt af van de stof, de condities en het scenario. In deze paragraaf zijn de gebeurtenissenbomen voor de verschillende scenario's gegeven inclusief de vervolgekansen. Voor mijnbouwwerken en gastransportinstellingen geldt een afwijkende vervolgeffectenmodellering. Deze worden beschreven in module II.

De effecten van de plasbrand die ontstaat ten gevolge van het ontsteken van de ontvlambare wolk worden meegenomen in de berekening voor een wolkbrand, explosie en een BLEVE.

1.4.1.1 Instantane vrijzetting van een ontvlambaar gas

De gebeurtenissenboom voor de instantane vrijzetting van een ontvlambaar gas (zonder uitregenen) is weergegeven in Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Gebeurtenissenboom voor een instantane vrijzetting van een ontvlambaar gas

De volgende kansen en verdelingen zijn gedefinieerd:

$P_{\text{directe ontsteking}}$	de kans op directe ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.7)
$P_{\text{vertraagde ontsteking}}$	de kans op vertraagde ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.8)
F_{explosie}	de fractie gemodelleerd als explosie (zie paragraaf 1.4.1.9)

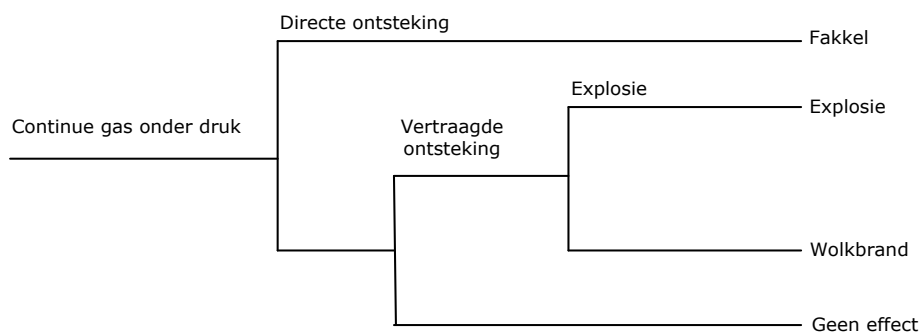
In SAFETI-NL 6.54 was in de gebeurtenissenboom opgenomen dat er, naast een vuurbal, ook een wolkbrand en explosie kan optreden bij directe ontsteking van het vrijgekomen ontvlambaar gas. Deze gebeurtenis heeft een historische achtergrond. In eerdere handleidingen is namelijk beschreven dat de kans op een BLEVE gelijk is aan 0,7, gegeven directe ontsteking van een instantane vrijzetting [4]. Dit betekent dat er een kans van 0,3 is op directe ontsteking van een instantane vrijzetting, zonder dat er een BLEVE optreedt. Hiervoor ontbreekt een goed model: een BLEVE is immers de verwachte uitkomst. Dit is in het Paarse Boek kunstmatig opgelost door hiervoor een apart model te ontwikkelen en toe te passen. In dit model expandeert de wolk eerst tot de UFL, waarna de (semi-) directe ontsteking optreedt. Dit resulteert in de wolkbrand en explosie. In SAFETI-NL 8 is deze onrealistische, niet-fysische uitkomst gecorrigeerd: bij directe ontsteking na instantaan falen van een vat met (tot vloeistof verdicht) ontvlambaar gas treedt altijd een BLEVE op.

1.4.1.2 Continue vrijzetting van een ontvlambaar gas

De gebeurtenissenboom voor de continue vrijzetting van een ontvlambaar gas (zonder uitregenen) is weergegeven in Figuur 1.2. De volgende kansen en verdelingen zijn gedefinieerd:

$P_{\text{directe ontsteking}}$	de kans op directe ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.7)
$P_{\text{vertraagde ontsteking}}$	de kans op vertraagde ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.8)

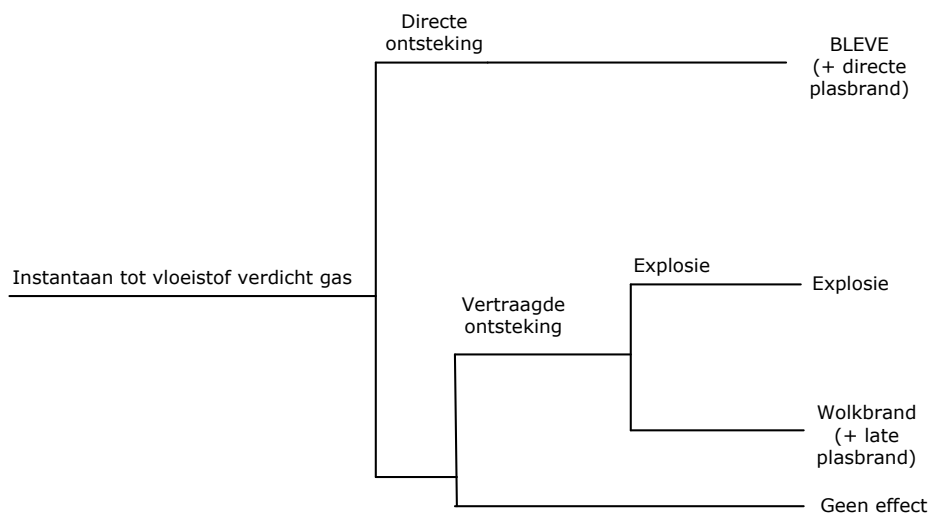
F_{explosie} de fractie gemodelleerd als explosie (zie paragraaf 1.4.1.9)



Figuur 1.2 Gebeurtenissenboom voor een continue vrijzetting van ontvlambaar gas

1.4.1.3 Instantane vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas

De gebeurtenissenboom voor de instantane vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas is weergegeven in Figuur 1.3.



Figuur 1.3 Gebeurtenissenboom voor een instantane vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas

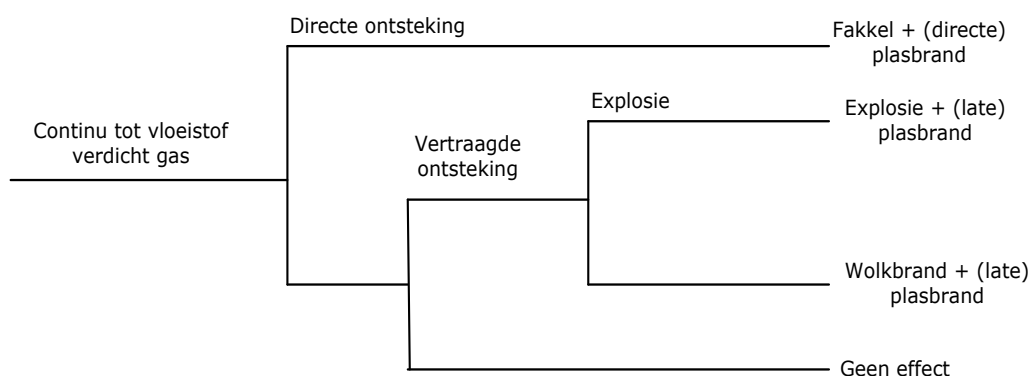
De volgende kansen en verdelingen zijn gedefinieerd:

$P_{\text{directe ontsteking}}$ de kans op directe ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.7)
 $P_{\text{vertraagde ontsteking}}$ de kans op vertraagde ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.8)
 F_{explosie} de fractie gemodelleerd als explosie (zie paragraaf 1.4.1.9)

Wanneer een gedeelte van de wolk uitregent vormt zich een vloeistofplas. Naast de genoemde effecten in de gebeurtenissenboom ontstaat dan ook een plasbrand. De effecten van de plasbrand worden opgeteld bij de genoemde effecten.

1.4.1.4 Continue vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas

De gebeurtenissenboom voor de continue vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas is weergegeven in Figuur 1.4.



Figuur 1.4 Gebeurtenissenboom voor een continue vrijzetting van een tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas

De volgende kansen en verdelingen zijn gedefinieerd:

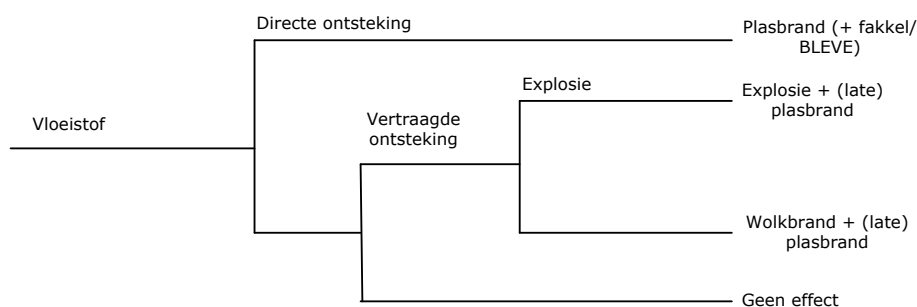
$P_{\text{directe ontsteking}}$	de kans op directe ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.7)
$P_{\text{vertraagde ontsteking}}$	de kans op vertraagde ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.8)
F_{explosie}	de fractie gemodelleerd als explosie (zie paragraaf 1.4.1.9)

Wanneer een gedeelte van de wolk uitregent vormt zich een vloeistofplas. Naast de genoemde effecten in de gebeurtenissenboom ontstaat dan ook een plasbrand. De effecten van de plasbrand worden opgeteld bij de genoemde effecten.

1.4.1.5 Vrijzetting van een ontvlambaar vloeistof

De gebeurtenissenboom voor de vrijzetting van een ontvlambare vloeistof is weergegeven in Figuur 1.5. De volgende kansen en verdelingen zijn gedefinieerd:

$P_{\text{directe ontsteking}}$	de kans op directe ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.7)
$P_{\text{vertraagde ontsteking}}$	de kans op vertraagde ontsteking (zie paragraaf 1.4.1.8)
F_{explosie}	de fractie gemodelleerd als explosie (zie paragraaf 1.4.1.9)



Figuur 1.5 Gebeurtenissenboom voor een vrijzetting van een ontvlambare vloeistof

Bij vertraagde ontsteking ontstaat, naast een wolkbrand en een explosie, ook een plasbrand. De effecten van de plasbrand worden opgeteld bij de genoemde effecten.

Opmerking:

1. Wanneer een ontvlambare vloeistof uitstroomt, kan een gedeelte van de vrijgekomen stof verdampen voordat deze de grond bereikt. Wanneer de fractie die uitregent kleiner is dan één, wordt ook een fakkel (of vuurbal) gemodelleerd. De massa in de fakkel (of vuurbal) is daarbij afhankelijk van de massa die in de dampfase blijft.

1.4.1.6 Ingeterpte en ondergrondse tanks

In SAFETI-NL 6.54 is $F_{\text{vuurbal}} = 0,7$ gedefinieerd voor de fractie die gemodelleerd wordt als een vuurbal bij directe ontsteking. Deze historisch gedefinieerde fractie leidt tot een onrealistische, niet-fysische uitkomst, namelijk een explosie/wolkbrand bij directe ontsteking na instantaan falen van een tank met tot vloeistof verdicht ontvlambaar gas. De volgende gebeurtenissen worden gemodelleerd:

- 0,7 BLEVE
- 0,18 wolkbrand
- 0,12 explosie

Aangenomen wordt dat het BLEVE scenario (voor een belangrijk deel) veroorzaakt wordt door aanstraling van de tank. Deze faaloorzaak is weggenomen voor een ingeterpte en ondergrondse tank. Voor ingeterpte en ondergrondse tanks werd daarom gemodelleerd dat het scenario BLEVE/vuurbal resulteert in 'geen effect'. Dit leidt tot de volgende gebeurtenissen voor directe ontsteking bij instantaan falen van een ingeterpte of ondergrondse tank met tot vloeistof verdicht gas:

- 0,7 geen effect
- 0,18 wolkbrand
- 0,12 explosie

In SAFETI-NL 8 is het optreden van de onrealistische, niet-fysische uitkomst gecorrigeerd en leidt directe ontsteking bij instantaan falen van een tank met tot vloeistof verdicht gas altijd tot een BLEVE/vuurbal. De volgende gebeurtenis wordt gemodelleerd:

- 1,0 BLEVE

Om in lijn te blijven met de eerdere modellering van ondergrondse/ingeterpte tanks, is besloten om aan te nemen dat ook nu een fractie 0,7 van de ongevalsoorzaken weggenomen wordt en resulteert in 'geen effect'. Dit leidt tot de volgende gebeurtenissen voor directe ontsteking bij instantaan falen van een ingeterpte of ondergrondse tank met tot vloeistof verdicht gas:

- 0,7 geen effect
- 0,3 BLEVE

Dit wordt in Safeti-NL ingevoerd ingevoerd door uit te gaan van de standaard faalfrequentie (5×10^{-7} per jaar voor instantaan falen) en *yes* te selecteren bij het veld *Reduced risks for mounded/underground tanks*. Hierdoor wordt in de

gebeurtenissenboom bij de directe ontsteking de vervolgcans op een vuurbal verlaagd van 1 naar 0,3. Dit betekent dat voor ondergrondse LPG tanks met een inhoud van meer dan 10 ton (kans op directe ontsteking is 0,7) de effectieve faalfrequentie voor instantaan vrijkomen gelijk is aan $2,55 \times 10^{-7}$ per jaar, met $1,05 \times 10^{-7}$ per jaar een vuurbal en $1,50 \times 10^{-7}$ per jaar vertraagde ontsteking.

1.4.1.7 Kans op directe ontsteking

In het Paarse Boek zijn de ontstekingskansen gedefinieerd voor gasen (laag reactief en gemiddeld/hog reactief) en klasse 1 vloeistoffen. De ontstekingskansen voor klasse 0 vloeistoffen en klasse 2, 3 en 4 vloeistoffen ontbraken. De ontstekingskansen zijn nu gedefinieerd voor alle ontvlambare gasen en vloeistoffen, waarbij de definitie in overeenstemming is gebracht met de WMS classificatie.

Hierbij is de volgende benadering gevolgd:

Klasse 0 Ontvlambare gasen vallen in klasse 0. Daarom zijn voor alle stoffen in klasse 0 de ontstekingskansen voor ontvlambare gasen aangehouden, dus ook de ontvlambare vloeistoffen.

In het Paarse Boek zijn geen ontstekingskansen gedefinieerd voor de scenario's van aanvaring van schepen. Hiervoor is aangesloten bij RBMII.

Klasse 1 Voor klasse 1 vloeistoffen definieert het Paarse Boek een directe ontstekingskans van 0,065. Voor wegtransport (categorie LF2, vlammpunt < 23 °C) wordt een directe ontstekingskans van 0,13 aangehouden (en 0,87 voor geen ontsteking). Dit is de combinatie van directe ontsteking (0,065) en vertraagde ontsteking (0,065) met dezelfde effecten (plasbrand). Voor spoortransport wordt een directe ontstekingskans van 0,25 aangehouden (en 0,75 voor geen ontsteking) [4].

In het Paarse Boek is ingevoerd dat voor het Plaatsgebonden Risico gerekend moet worden met een vertraagde ontstekingskans die gelijk is aan (1 – kans op directe ontsteking). Voor Klasse 1 vloeistof betekent dit dat de totale kans op ontsteking (direct + vertraagd) gelijk is aan één. De ontvlambare wolk is voor ontvlambare vloeistoffen vaak nauwelijks groter dan de plas: voor weerklasse D5 is er geen LFL-contour buiten de plas indien de dampspanning kleiner is dan 550 mbar [7]. De kans op vertraagde ontsteking is klein en de aanname van een totale kans op ontsteking gelijk aan 1 leidt tot een conservatieve benadering.

Klasse 2 Voor klasse 2 vloeistoffen is in het Paarse Boek geen directe ontstekingskans gedefinieerd. Voor wegtransport (categorie LF1, vlammpunt > 23 °C en < 61 °C) is de directe ontstekingskans 0,01 (en geen vertraagde ontsteking). Deze waarde is overgenomen.

Klasse 3 Gasolie heeft een vlammpunt > 55 °C [Chemiekaarten] en valt dus in klasse 3. In de S3b methodiek valt gasolie in categorie LF1. Daarom is voor klasse 3 een ontstekingskans van 0,01 aangehouden in de berekeningen voor bunkerstations [8]. Voorgesteld wordt nu aan klasse 3 geen ontstekingskans toe te kennen (en dus niet mee te nemen in de berekening), omdat de stof geen WMS classificatie heeft. Alleen wanneer de procestemperatuur hoger is dan de vlamtemperatuur dient de stof meegenomen te worden.

Klasse 4 Voorgesteld wordt aan klasse 4 geen ontstekingskans toe te kennen (en dus niet mee te nemen in de berekening), omdat de stof geen WMS classificatie heeft. Alleen wanneer de procestemperatuur hoger is dan de vlamtemperatuur dient de stof meegenomen te worden.

Andere aandachtspunten zijn:

- In het Paarse Boek zijn de ontstekingskansen voor transportmiddelen onafhankelijk van de stof. Vermoedelijk zijn deze ontstekingskansen alleen bedoeld voor klasse 0 stoffen. Voorgesteld wordt voor de niet-klasse 0 stoffen dezelfde benadering als voor stationaire installaties gevolgd.
- In het Paarse Boek wordt in de subselectie een ontvlambare stof gedefinieerd als een stof met een procestemperatuur gelijk aan of hoger dan het vlampunt. In de ontstekingskansen in het Paarse Boek wordt geen onderscheid gemaakt naar de procestemperatuur in relatie tot het vlampunt. Voorgesteld wordt voor klasse 2 - 4 stoffen de ontstekingskans van klasse 1 stoffen aan te houden wanneer de procestemperatuur gelijk aan of hoger dan het vlampunt.
- De ontstekingskansen voor klasse 0 stoffen zijn conform het Paarse Boek afhankelijk van de reactiviteit van de stof. De definitie van laag reactief is niet goed omschreven. Een aantal stoffen met een lage reactiviteit is in het Paarse Boek met name genoemd. Voor deze stoffen is onderzocht in hoeverre de reactiviteit van belang is voor het bepalen van de ontstekingskans.
 - **1-chloor-2,3-epoxypropan (epichloorhydrine, CAS nr 106-89-8)**
Deze stof is klasse 2 zodat de reactiviteit niet relevant is voor de bepaling van de ontstekingskans. De stof is wel vergiftig voor inhalatie, zodat deze genoemd moet worden bij de stoffen die ontvlambaar en giftig zijn.
 - **1,3-dichloorpropeen (CAS nr 542-75-6)**
Deze stof is klasse 2 en de reactiviteit is niet relevant voor de bepaling van de ontstekingskans. De stof is niet vergiftig voor inhalatie.
 - **3-chloor-1-propeen (synoniem allylchloride, CAS nr 107-05-1)**
Deze stof is klasse 1 en de reactiviteit is dus niet relevant voor de bepaling van de ontstekingskans. De stof is zeer giftig voor inhalatie, zodat deze genoemd moet worden bij de stoffen die ontvlambaar en giftig zijn.
 - **ammoniak (CAS nr 7664-41-7)**
Deze stof is klasse 0. De stof is giftig voor inhalatie, zodat deze genoemd moet worden bij de stoffen die ontvlambaar en giftig zijn.
 - **koolmonoxide (CAS nr 630-08-0)**
Deze stof is klasse 0. De stof is giftig voor inhalatie, zodat deze genoemd moet worden bij de stoffen die ontvlambaar en giftig zijn.
 - **chloorethaan (synoniem ethylchloride, CAS nr 75-00-3)**
Deze stof is klasse 0, zodat de reactiviteit de ontstekingskans bepaalt. De stof is niet geclassificeerd als giftig voor inhalatie en wordt daarom specifiek genoemd bij de ontvlambare stoffen.
 - **chloormethaan (synoniem methylchloride, CAS nr 74-87-3)**
Deze stof is klasse 0, zodat de reactiviteit de ontstekingskans bepaalt. De stof is niet geclassificeerd als giftig voor inhalatie en wordt daarom specifiek genoemd bij de ontvlambare stoffen.
 - **methaan (CAS nr 74-82-8)**
Deze stof is klasse 0, zodat de reactiviteit de ontstekingskans bepaalt. De stof wordt daarom specifiek genoemd bij de ontvlambare stoffen.
 - **tetra-ethyllood (CAS nr 78-00-2)**

Deze stof is klasse 3 en de reactiviteit is niet relevant voor de bepaling van de ontstekingskans. De stof is giftig voor inhalatie, zodat deze genoemd moet worden bij de stoffen die ontvlambaar en giftig zijn.

1.4.1.8 Kans op vertraagde ontsteking

Vertraagde ontsteking kan plaatsvinden op de locatie waarop de milieubelastende activiteit wordt verricht. De vertraagde ontsteking veroorzaakt door de aanwezigheid van een ontstekingsbron. De vertraagde ontsteking wordt als volgt gemodelleerd:

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

met

$P(t)$	de kans van een ontsteking in het tijdsinterval 0 tot t (-)
$P_{present}$	de kans dat de bron aanwezig is wanneer de ontvlambare wolk passeert (-)
ω	de effectiviteit van de ontsteking (s^{-1})
t	tijd (s).

In paragraaf 1.4.1.8.1 zijn voor enkele ontstekingsbronnen de ontstekingskans gegeven.

In de berekening van het plaatsgebonden risico wordt aangenomen dat een ontvlambare wolk buiten de locatie van de milieubelastende activiteit ontsteekt bij de grootste wolkomvang, wanneer het gaat om stofcategorie klasse 0 of klasse 1. In de berekening van de aandachtsgebieden wordt aangenomen dat een ontvlambare wolk altijd ontsteekt zodra deze buiten de 'plant boundary' komt.

In de eventuele berekening van de FN-curve wordt gerekend met alle aanwezige ontstekingsbronnen buiten de locatie, inclusief de ingevoerde populatie. Voor de FN-curve is het dus mogelijk dat, bij afwezigheid van ontstekingsbronnen, een ontvlambare wolk niet ontsteekt (zie Tabel 1.3 voor de situatie dat er geen ontstekingsbronnen aanwezig zijn op de locatie).

Tabel 1.3 Kans op vertraagde ontsteking voor de berekening van het PR en FN-curve als er geen ontstekingsbronnen binnen de begrenzing van de locatie zijn

Stofcategorie	Kans op vertraagde ontsteking bij grootste wolkomvang, PR ²	Kans op vertraagde ontsteking, FN-curve
Klasse 0	$1 - P_{directe\ ontsteking}$	Op basis van ontstekingsbronnen
Klasse 1	$1 - P_{directe\ ontsteking}$	Op basis van ontstekingsbronnen
Klasse 2	0	0
Klasse 3	0	0
Klasse 4	0	0

² Wanneer de LFL contour buiten de locatie van de milieubelastende activiteit(en) komt

1.4.1.8.1 Ontstekingsbronnen: overzicht

Tabel 1.4 geeft een overzicht van ontstekingsbronnen. In het Paarse Boek is een gedetailleerde tabel opgenomen voor allerlei ontstekingsbronnen. Omdat de achterliggende onderbouwing zeer beperkt is, is de tabel sterk vereenvoudigd. De opgenomen informatie is deels overgenomen uit het Paarse Boek (lijnbronnen, bevolking), deels uit de IPO Handleiding (procesinstallatie).

Ontstekingsbronnen buiten de locatie waarop de milieubelastende activiteit wordt verricht zijn alleen relevant voor de FN-curve.

Tabel 1.4 Kans van ontsteking van een ontvlambare wolk in een tijdsinterval van één minuut voor een aantal bronnen

Ontstekingsbron	Kans van ontsteking
Naburige procesinstallatie	0,5
Fakkel	1,0
Oven (buiten)	0,9
Oven (binnen)	0,45
Boiler (buiten)	0,45
Boiler (binnen)	0,23
hoogspanningskabel (per 100 m)	0,2
Motorvoertuig, trein	zie opmerking 1
Schip	0,5
Kantoren (per persoon)	0,01 (zie opmerking 2)

Opmerkingen:

1. De kans van een ontsteking voor een snelweg of spoorweg in de nabijheid van een milieubelastende activiteit of transportroute wordt bepaald door de gemiddelde verkeersdichtheid en de ontstekingskans per voertuig. Als standaard waarden kan voor een snelweg gerekend worden met een gemiddelde snelheid van 80 km/h en 1500 motorvoertuigen per uur (ontstekingskans per motorvoertuig 0,4 in één minuut) en voor een spoorweg met een gemiddelde snelheid van 80 km/h en 8 treinen per uur (ontstekingskans per trein 0,8 in één minuut). Voor lokale wegen wordt aangenomen dat deze inbegrepen zijn in de ontstekingskans van de huishoudens en kantoren. De rekenwijze is verder toegelicht in paragraaf 1.4.1.8.2.
2. De rekenwijze is verder toegelicht in paragraaf 1.4.1.8.3.
3. Binnen de begrenzing van de milieubelastende activiteit(en) worden de ontstekingsbronnen ingevoerd als puntbronnen, lijnbronnen dan wel als oppervlaktebronnen.
4. De hoogte van de ontstekingsbron is een invoerparameter. Ontsteking vindt alleen plaats als er een ontvlambare wolk aanwezig is op of boven de ingevoerde hoogte van de ontstekingsbron.

1.4.1.8.2 Ontstekingsbronnen: transport

Voor spoorwegen en snelwegen wordt de ontstekingskans berekend met:

$$d = \frac{N \cdot E}{v}$$

waarbij

N	aantal passerende voertuigen per uur	(h ⁻¹)
E	lengte van weg of spoorwegtraject	(km)
v	gemiddelde voertuigsnelheid	(km h ⁻¹)

Als $d \leq 1$, dan is de waarde van d gelijk aan de kans dat de bron aanwezig is wanneer de ontvlambare wolk passeert, P_{present} ; de kans van een ontsteking in het tijdsinterval 0 tot t , $P(t)$, is dan gelijk aan:

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

Als $d \geq 1$, dan is d het gemiddelde aantal bronnen dat aanwezig is wanneer de ontvlambare wolk passeert; de kans van een ontsteking in het tijdsinterval 0 tot t , $P(t)$, is dan gelijk aan:

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

waarbij de effectiviteit van de ontsteking voor één voertuig, ω , gelijk is aan $8,51 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ voor een weg en een niet-geëlectriceerde spoorlijn en $26,8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ voor een geëlectriceerde spoorlijn.

In de Handleiding zijn voor (snel-) wegen en spoorwegen standaard waarden opgenomen voor het aantal voertuigen per uur en de gemiddelde snelheid. Voor snelwegen is het aantal voertuigen een ruwe inschatting op basis van de categorisatie van snelwegen in de studie "Veilig Vervoer over Weg" [9]. Voor autosnelwegen (tweestrooks) wordt onderscheid gemaakt in drie intensiteiten, namelijk < 18000 , $18.000 - 30.000$ en > 30.000 voertuigen per etmaal. Voor autosnelwegen (drie- en vierstrooks) zijn de intensiteitsklassen < 44.000 , $44.000 - 64.000$ en > 64.000 voertuigen per etmaal. Als standaardwaarde is gekozen voor 36.000 voertuigen per etmaal. De overige standaardwaarden zijn niet onderbouwde schattingen.

1.4.1.8.3 Ontstekingsbronnen: bevolking

Ontsteking door de aanwezigheid van personen is vooral van belang voor de eventuele berekening van de FN-curve.

De kans van een ontsteking voor een oppervlak in een woongebied in het tijdsinterval 0 tot t , $P(t)$, is gegeven door:

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

waarbij:

ω	effectiviteit van de ontsteking voor één persoon, $0,168 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$
n	het gemiddelde aantal personen in het oppervlak

Aangenomen is dat de kans op ontsteking niet afhangt van de verdeling binnen – buiten.

In SAFETI-NL 6.54 werd de locatie (x,y) van de ontstekingsbron vergeleken met de locatie van de ontvlambare wolk (LFL-contour) op één meter hoogte: ontsteking kan plaatsvinden als de LFL-contour op één meter hoogte overlapt met de locatie van de ontstekingsbron.

In SAFETI-NL 8.1 wordt de locatie (x,y,z) van de ontstekingsbron vergeleken met de grenzen van de ontvlambare wolk (3D LFL-contour): ontsteking kan plaatsvinden als er een ontvlambare wolk aanwezig is boven de ontstekingsbron.

1.4.1.8.3.1 Invoeren bevolkingsgegevens

Voor de eventuele berekening van de FN-curve moet de bevolking worden ingevoerd. Ingevoerde populatie wordt in Safeti-NL automatisch als ontstekingsbron voor de FN-curve meegenomen.

1.4.1.8.3.1.1 Verdeling binnen en buiten

De verdeling van de bevolking over binnen en buiten is gegeven in Tabel 1.5. Deze waarden zijn van toepassing op woon- en industriegebieden, tenzij andere informatie beschikbaar is. Met betrekking tot recreatiegebieden is het type recreatie bepalend voor de verdeling bevolking binnen en buiten.

Tabel 1.5 Verdeling bevolking binnen en buiten gedurende de dag en de nacht.

	Binnen	Buiten
Dag	0,93	0,07
Nacht	0,99	0,01

Opmerkingen:

1. In het rekenpakket kan voor elke ingevoerde populatie een verdeling over binnen en buiten worden gekozen. Dit biedt de mogelijkheid een afwijkende verdeling in te voeren voor bijvoorbeeld recreatieterreinen.
2. Zie voor meer informatie over populatie de Handreiking Verantwoordingsplicht Groepsrisico [10].

1.4.1.8.3.1.2 Het modelleren van personen bij evenementen

Personen die slechts een gedeelte van het jaar (of van de dagperiode) aanwezig zijn, zoals in recreatiegebieden of bij evenementen, moeten worden meegenomen in de berekening wanneer de bijdrage aan de FN-curve relevant is. Het meenemen van dergelijke groepen wordt in Safeti-NL gedaan door verschillende rijen te definiëren voor de tijdsperiodes met verschillende aantallen aanwezigen, rekening houdend met de gewenste nauwkeurigheid.

Voorbeeld:

In de omgeving van een bedrijf ligt een woonwijk en een recreatieplas. Bij de recreatieplas zijn in de drie zomermaanden overdag gemiddeld 200 personen aanwezig gedurende acht uur; 's nachts en buiten de zomermaanden zijn er (vrijwel) geen bezoekers.

In Safeti-NL wordt dit gemodelleerd door uit te gaan van drie rijen, namelijk:

- Eén dagrij met factor 0,08. De aanwezige populatie is de woonwijk (dag) en de recreanten.
- Eén dagrij met factor 0,36. De aanwezige populatie is de woonwijk (dag).
- Eén nachtrij met factor 0,56. De aanwezige populatie is de woonwijk (nacht).

De factor 0,08 voor de dagrij wordt berekend uit de periode dat de personen aanwezig zijn bij de recreatieplas, namelijk drie maanden per jaar (3/12) en acht uur per dag (8/24).

1.4.1.9 Fractie explosie

Na de ontsteking van een vrije gaswolk, treedt een voorval op met kenmerken van zowel een wolkbrand als een explosie. Dit wordt gemodelleerd als twee afzonderlijke gebeurtenissen, namelijk als een zuivere wolkbrand en een zuivere explosie. De fractie die gemodelleerd wordt als een explosie, F_{explosie} , is gelijk aan 0,4.

1.5 Toelichting bij stofspecifieke parameters

1.5.1 Probitwaarden giftige stoffen

Tabel 1.6 geeft de probitrelaties voor een aantal giftige stoffen. De waarden voor a , b en n (eenheden mg/m^3 en minuten) zijn overgenomen uit Deel 4 van PGS 1 [11]³. Het rekenpakket Safeti-NL rekt in de eenheden ppmv en minuten. Daarom zijn ook de waarden voor a , b en n in de eenheden ppmv en minuten gegeven. Deze zijn berekend met de volgende formule:

$$a_{\text{ppm}} = a_{\text{mg}/\text{m}^3} + b \times \ln \left(\frac{M}{22,4 \times \frac{282}{273}} \right)^n$$

met M de molmassa (in g/mol).

³ Voor de beste probitrelaties volgens de actuele wetenschappelijke inzichten wordt verwezen naar de probitrelaties afgeleid door de toetsgroep probitrelaties. Deze probitrelaties zijn, met de stofbestanden voor Safeti-NL, beschikbaar op de website van het RIVM.

Tabel 1.6 Constanten voor de giftigheid van een stof, a, b en n. Deze waarden hebben betrekking op de probitrelatie met concentratie C (in mg m⁻³ of ppmv) en blootstellingstijd t (in min.).

Stof	Cas-nr	A (C in mg/m ³)	A (C in ppmv)	B	N
Acroleïne	107-02-8	-4,1	-3,22	1	1
Acrylnitril	107-13-1	-8,6	-7,52	1	1,3
Allylalcohol	107-18-6	-11,7	-9,86	1	2
Ammoniak	7664-41-7	-15,6	-16,21	1	2
Arsine	7784-42-1	-11,2	-8,78	1,61	1,24
Broom	7726-95-6	-12,4	-8,54	1	2
Chloor	7782-50-5	-6,35	-4,81	0,5	2,75
Ethyleenimine	151-56-4	-11,6	-10,36	1,77	1,13
Ethyleenoxide	75-21-8	-6,8	-6,16	1	1
Fosfine	7803-51-2	-6,8	-6,03	1	2
Fosgeen	75-44-5	-10,6	-7,69	2	1
Koolmonoxide	630-08-0	-7,4	-7,21	1	1
Methylbromide	74-83-9	-7,3	-5,75	1	1,1
Methylisocyaan	624-83-9	-1,2	-0,57	1	0,7
Methylmercaptaan	74-93-1	-17,8	-16,33	2,05	0,98
Stikstofdioxide	10102-44-0	-18,6	-16,06	1	3,7
Tetraethyllood	78-00-2	-9,8	-4,53	1	2
Waterstofchloride	7647-01-0	-37,3	-35,62	3,69	1
Waterstofcyanide	74-90-8	-9,8	-9,43	1	2,4
Waterstoffluoride	7664-39-3	-8,4	-8,62	1	1,5
Waterstofsulfide	7783-06-4	-11,5	-10,76	1	1,9
Zwavel dioxide	7446-09-5	-19,2	-16,76	1	2,4

1.5.2 Inerte gassen en zuurstof

De veiligheidsrapporten van Hoek Loos IJmuiden, Nederlandse Gasunie en Air Products zijn bekeken voor de toegepaste modellering van inerte gassen en zuurstof.

- In het Veiligheidsrapport van Hoek Loos IJmuiden [12] zijn geen risicoberekeningen opgenomen omdat "... het voor de stoffen zuurstof, stikstof en argon niet mogelijk is de zogenaamde kwantitatieve risico-analyse uit te voeren." Er zijn meerdere cryogene opslagtanks; de maximale opslaghoeveelheid (kleinste tank – grootste tank) is gelijk aan 570 – 1824 ton zuurstof, 17 – 714 ton argon en 2000 – 3200 ton stikstof.
- In het Veiligheidsrapport van de Nederlandse Gasunie [13] zijn de risico's beschreven van de cryogene opslag van stikstof (19.000 m³). In dit rapport staat beschreven dat een zuurstofpercentage van 6 – 8% gedurende 8 minuten 100% letaal is, gedurende 6 minuten 50% letaal en gedurende 4 – 5 minuten: na behandeling herstel optreedt. Direct letale effecten worden geassocieerd met 10% zuurstof in lucht. Voor de subselectie wordt aangehouden dat 50% stikstof in lucht (10,5% zuurstof) letaal is. De gehanteerde probit functie is a = -86,793, b = 1 en n = 6,995 voor de concentratie in ppmv.
- In het Veiligheidsrapport van Air Products [14] zijn inerte gassen en zuurstof niet meegenomen in de risicoberekeningen.
- TNO heeft in opdracht van Hoek Loos een onderzoek uitgevoerd naar Schadecriteria voor zuurstof en stikstof [15].

- De schadecriteria voor zuurstofverrijking zijn 10% letaliteit bij 40% zuurstof gedurende 10 minuten en 1% letaliteit bij 30% zuurstof gedurende 10 minuten. Deze waarden zijn gebaseerd op de veronderstelling dat ontsteking nodig is (ontstekingskans voor een persoon 0,01 in één minuut, bij benadering 0,1 in 10 minuten), en de kleding niet tijdig gedooft kan worden (kans op niet-doven is 1 bij 40% en 0,1 bij 30%).
- De schadecriteria voor zuurstofverarming zijn 100% letaliteit bij 10% zuurstof gedurende 10 minuten en 1% letaliteit bij 14% zuurstof gedurende 10 minuten.
- Het RIVM is betrokken bij het opstellen van AEGL grenswaarden voor asphyxie (zuurstofverarming). De AEGL-3 waarde ligt naar verwachting in de orde van 14 – 16%.

Het is duidelijk dat voor inerte gassen en zuurstof nog geen goede probitrelatie is vastgesteld en een goede onderbouwing ontbreekt. Om in voorkomende gevallen toch een eenduidige rekenwijze te hanteren is hier een voorstel voor de schadecriteria voor zuurstof en stikstof afgeleid.

- Voor zuurstofverrijking wordt gerekend op basis van de TNO benadering. De kans op sterfte is 0,1 bij 40% zuurstof of meer (10 minuten blootstelling) en 0,01 bij 30 % zuurstof (10 minuten blootstelling). Hierbij komt 40 (30) vol% zuurstof in lucht overeen met een extra hoeveelheid zuurstof van 24,1 (11,4) vol% uit de dispersieberekening. Het is niet goed mogelijk hiervoor een probitrelatie af te leiden, omdat de letaliteit niet groter wordt bij concentraties van 40% of meer. Daarom wordt voorgesteld te rekenen met de volgende schadecriteria:
 - 40% zuurstof of meer sterfttekans 10%
 - 30% zuurstof of meer sterfttekans 1%
 - Deze kans is gebaseerd op 10 minuten blootstelling, maar wordt toegepast voor alle blootstellingstijden.
- De probitrelatie voor stikstof wordt berekend op basis van twee punten, namelijk 1% letaliteit voor de AEGL-3 waarde van 16% zuurstof in lucht gedurende 60 minuten (23,6 vol% uit de dispersieberekening) en 50% letaliteit bij 10% zuurstof in lucht gedurende 10 minuten (52,3 vol% uit de dispersieberekening). Hierbij is gekozen voor 50% letaliteit in plaats van 100% letaliteit omdat dit beter overeenkomt met de informatie uit het rapport van de LNG maasvlakte, waar letale effecten beginnen bij 10% zuurstof.
- Met de keuze $b = 1$ wordt gevonden dat de waarden $a = -17,8$ en $n = 5,2$ de twee punten goed beschrijven (concentratie inert gas in vol%, tijd in minuten). De probitrelatie leidt tot de relatie tussen letaliteit, concentratie en tijdsduur zoals gegeven in Tabel 1.7. De hierin gevonden waarden lijken redelijk overeen te stemmen met de verschillende schadecriteria.

Tabel 1.7 Relatie tussen letaliteit, concentratie zuurstof in lucht en tijdsduur op basis van de probitrelatie met $a = -17,8$, $b = 1$ en $n = 5,2$.

Letaliteit	30 minuten	10 minuten	1 minuut
1%	15,4 vol%	14,1 vol%	10,2 vol%
50%	12,2 vol%	10,2 vol%	4,1 vol%
95%	9,0 vol%	6,1 vol%	-

Uitgedrukt in de eenheden ppmv en minuten is de probitrelatie $a = -65,7$, $b = 1$ en $n = 5,2$.

1.5.3 Stoffen die zowel giftig als ontvlambaar zijn

Er zijn stoffen geclassificeerd als zowel giftig als ontvlambaar. Stoffen met een lage reactiviteit worden gemodelleerd als een zuiver giftige stof. Dit betreft

(onder andere) allylchloride (CAS nr 107-05-1), ammoniak (CAS nr 7664-41-7), epichloorhydrine (CAS nr 106-89-8), koolmonoxide (CAS nr 630-08-0) en tetraethyllood (CAS nr 78-00-2).

Stoffen met een gemiddelde of hoge reactiviteit worden gemodelleerd met twee onafhankelijke gebeurtenissen, namelijk een zuiver ontvlambare en een zuiver giftige. Voorbeelden zijn acroleïne (CAS nr 107-02-8), acrylnitril (CAS nr 107-13-1), allylalcohol (CAS nr 107-18-6), cyaanwaterstof (CAS nr 74-90-8) en ethyleenoxide (CAS nr 75-21-8). De verdeling tussen ontvlambaar en giftig wordt bepaald door de kans van directe ontsteking, $P_{\text{directe ontsteking}}$. Een LOC met frequentie f wordt verdeeld in twee aparte gebeurtenissen:

- een zuiver ontvlambare gebeurtenis na directe ontsteking met frequentie $P_{\text{directe ontsteking}} \times f$;
- een zuiver giftige gebeurtenis met frequentie $(1 - P_{\text{directe ontsteking}}) \times f$.

1.5.4 *Mengsels van stoffen*

Voor mengsels dient de opsteller van de rapportage te verantwoorden of eventuele giftige, ontvlambare en/of ontplofbare eigenschappen relevant zijn voor de externe veiligheid. Als richtlijn kan de 'Selectiemethodiek toxische en ontvlambare producten' worden gebruikt, die beschikbaar is op de website van RIVM.

Voor zuivere, onvermengde vloeistoffen moet (onveranderd) gerekend worden met de stof zelf.

1.5.4.1 Vloeibare aardolieproducten klasse 1/klasse 22

De samenstelling van vloeibare aardolieproducten zoals benzine en kerosine, kan variëren. De vergunning betreft vaak een vergunning voor klasse 1 en/of klasse 2 in het algemeen, zonder verdere specificatie. In de 'modevaluatie Buncefield' [3] is gebleken dat n-hexaan een geschikte voorbeeldstof is voor aardoliemengsels van de klasse klasse 1 en dat n-nonaan een geschikte voorbeeldstof is voor aardoliemengsels van de klasse klasse 2.

1.5.4.2 Overige mengsels

Safeti-NL biedt de mogelijkheid om mengsels in te voeren en op basis van de samenstelling gemiddelde eigenschappen te berekenen voor het mengsel als geheel. Deze aanpak is alleen geschikt voor mengsels van onderling gelijkende componenten. In het bijzonder is deze invoerwijze niet geschikt voor mengsels van gassen en vloeistoffen met sterk uiteenlopend kookpunt. De invoerwijze is ook niet geschikt voor mengsels waarbij de componenten fysisch/chemische interacties aangaan die ze afzonderlijk niet vertonen, zoals oplossingen.

Het gebruik van een voorbeeldstof is alleen geschikt als de voorbeeldstof zowel wat betreft gevaarseigenschappen (toxiciteit en ontvlambaarheid) als fysisch/chemische eigenschappen (verdamping en verspreiding) representatief is voor de gevaarlijke stoffen die vrijkomen. Daarbij zijn zowel procescondities als omgevingscondities relevant.

Voor mengsels zoals waterige oplossingen, is bekend welke specifieke gevaarlijke stoffen relevant zijn, maar de bronterm voor deze componenten kan niet nauwkeurig worden berekend in Safeti-NL. Voor deze mengsels wordt de bronterm voor de gevaarlijke stoffen in het mengsel met een aparte berekening bepaald en op basis van maatwerk ingevoerd.

1.6 Parameters specifiek voor risico- en effectberekeningen in Nederland

Dit zijn parameters die de gebruiker niet kan wijzigen, maar die kenmerkend zijn voor risico- en effectberekeningen in Nederland.

1.6.1 Middelingstijd

Dispersiemodellen gaan uit van een middelingstijd die nodig is om de maximale concentratie en de pluimbreedte te berekenen. De standaardwaarden voor de middelingstijd t_{av} zijn:

- ontvlambare stoffen $t_{av} = 18,75$ s
- giftige stoffen $t_{av} = 600$ s

1.6.2 Maximum uitstroomtijd en blootstellingsduur

De maximum uitstroomduur is gelijk aan 1800 s. Dit geldt ook voor de maximum tijdsduur van de plasverdamping. Aangenomen wordt dat na 1800 s ingrijpen succesvol is.

De blootstellingsduur is voor warmtestraling maximaal 20 s. Voor giftige stoffen is in SAFETI-NL geen maximale blootstellingsduur vastgesteld. Omdat de uitstroomduur (inclusief plasverdamping) begrensd is op 1800 s is de blootstellingsduur in de praktijk ook maximaal ongeveer 1800 s.

1.6.3 Geblokkeerde uitstroming

De uitstroming kan geblokkeerd worden door het bodemoppervlak en objecten in de directe nabijheid. Voor een uitstroming wordt buiten gerekend met een ongehinderde uitstroming.

Het Paarse Boek schrijft voor te rekenen met geblokkeerde uitstroming wanneer aan twee voorwaarden is voldaan, namelijk wanneer de kans op een geblokkeerde uitstroming groter is dan 0,5 gemiddeld over alle uitstroomrichtingen. Het criterium voor geblokkeerde uitstroming is dat de lengte van de vrije jet groter is dan $3 \times$ de afstand tussen het uitstroompunt en het obstakel. In de praktijk wordt niet vaak gerekend met een geblokkeerde uitstroming. Voor een eenduidige benadering is daarom nu voorgeschreven dat voor uitstroming buiten altijd gerekend wordt met vrije uitstroming.

1.6.4 Explosieparameters

Voor de bepaling van de overdrukeffecten van een gaswolkexplosie wordt aangenomen dat 12,5% van de ontvlambare wolk zich in obstructed regions bevindt. De overdrukeffecten daarvan worden bepaald met curve 10 van het multi-energie model.

1.6.5 Hoogte voor de berekening van de effecten

De giftige dosis, warmtestralingsdosis en de drukeffecten worden berekend op een hoogte van één meter.

1.6.6 Letaliteit

De sterftekans, P_{letaal} , als gevolg van blootstelling aan giftige stoffen en warmtestraling wordt berekend met behulp van een probit, Pr , als

$$P_{\text{letaal}} = 0,5 \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Pr - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

waarbij

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

1.6.6.1 Blootstelling aan giftige stoffen

De probit wordt voor de blootstelling aan giftige stoffen gegeven door de relatie:

$$Pr = a + b \ln \left(\int C^n dt \right)$$

met

Pr	probit behorende bij de overlijdenskans	(-)
a, b, n	constanten voor de toxiciteit van een stof	(-)
C	concentratie op tijdstip t	(mg m ⁻³)
t	blootstellingstijd	(minuten)

De minimum waarde van P_{letaal} die nog meegenomen wordt in de berekening is gelijk aan 0,01.

De berekening van de letaliteit voor het plaatsgebonden risico en de FN-curve is gegeven in Tabel 1.8.

Tabel 1.8 Overlijdenskans voor giftige stoffen

Gebied	Plaatsgebonden Risico	FN-curve Binnen	FN-curve Buiten
$P_{\text{letaal}} \geq 0,01$	P_{letaal}	zie opmerking 2	P_{letaal}
$P_{\text{letaal}} < 0,01$	0	0	0

1. De waarde van de constante a is afhankelijk van de dimensies van de concentratie en de blootstellingstijd. In de probitrelatie moeten de dimensies van de concentratie en de blootstellingstijd aansluiten bij de waarde van constante a.
2. De sterftekans voor mensen binnen (FN-curve) wordt berekend met de probitrelatie op basis van de blootstelling binnen. De blootstelling binnen wordt berekend met een standaard ventilatievoud van één per uur. Aangenomen wordt dat mensen na verloop van tijd weer naar buiten gaan; zij doen dit 1800 s nadat de concentratie buitenshuis afneemt.

1.6.6.2 Ontvlambare stoffen - warmtestraling

De sterftekans, P_{letaal} , voor de blootstelling aan warmtestraling (plasbrand, fakkel, vuurbal) is gegeven door de probitrelatie:

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln \left(\int Q^{4/3} dt \right)$$

met

Pr	probit behorende bij de overlijdenskans	(-)
Q	warmtestraling op tijdstip t	(W m ⁻²)
t	blootstellingstijd	(s)

De minimum waarde van P_{letaal} die nog meegenomen wordt in de berekening is gelijk aan 0,01.

De berekening van de letaliteit voor het plaatsgebonden risico en de FN-curve is gegeven in Tabel 1.9. Hierbij is een dosis gedefinieerd als functie van de blootstellingsduur t en de intensiteit I, namelijk $t \cdot I^{4/3}$ met als eenheid $s \cdot (W/m^2)^{4/3}$. De waarde $D_{\text{grens}} = 2,29 \cdot 10^7 s \cdot (W/m^2)^{4/3}$ komt overeen met een blootstellingsduur $t = 20$ s en een intensiteit $I = 35$ kW/m²

Tabel 1.9 Overlijdenskans voor ontvlambare stoffen – vlamgebied en warmtestraling

Gebied	Plaatsgebonden Risico	FN-curve Binnen	FN-curve buiten
Vlamgebied	1	1	1
$t \cdot I^{4/3} > 2,29 \cdot 10^7$ $s \cdot (W/m^2)^{4/3}$	1	1	1
$t \cdot I^{4/3} < 2,29 \cdot 10^7 s \cdot (W/m^2)^{4/3}$	P_{letaal}	0	$0,14 \times P_{\text{letaal}}$

Opmerkingen:

1. Het vlamgebied is voor een wolkbrand gegeven door de contour van de onderste explosiegrens. Buiten het vlamgebied treedt geen sterfte op voor een wolkbrand.
2. De maximum blootstellingsduur aan warmtestraling is gelijk aan 20 s.

In SAFETI-NL 6.54 werd aangenomen dat 100% letaliteit optreedt bij warmtestraling gelijk aan 35 kW/m² of meer, ongeacht de blootstellingsduur. De blootstellingsduur aan warmtestraling van een plasbrand of fakkelbrand was gelijkgesteld aan 20 s.

In SAFETI-NL 8 wordt ook voor een plasbrand of fakkelbrand de werkelijke blootstellingsduur gebruikt met een maximum van 20 s. Ook is een dynamisch BLEVE-model geïmplementeerd, waarbij de warmtestraling varieert in de tijd. Het toepassen van 100% letaliteit bij 35 kW/m², ongeacht de blootstellingsduur, leidt voor kortdurende blootstellingen tot een overschatting van de risico's. Daarom is besloten over te gaan tot een dosiscriterium voor de berekening van sterfte door warmtestraling. Het dosiscriterium komt overeen met een stralingsintensiteit van 35 kW/m² gedurende 20 s blootstelling. Bij grotere doses is de letaliteit gelijk aan

één. Dit is goed in overeenstemming met de letaliteit op basis van de probitrelatie: deze is bij 35 kW/m² gedurende 20 s blootstelling gelijk aan 0,98.

Aangenomen is dat bij doses groter dan het dosiscriterium de letaliteit gelijk is aan één, en er dus geen beschermende werking meer is van kleding of verblijf binnenshuis. Er is een literatuurstudie uitgevoerd om te bepalen in hoeverre deze aanname correct is. De (literatuur)studie is voornamelijk gebaseerd op de informatie uit Lees [16], het Groene Boek [11], onderzoek uitgevoerd in opdracht van de HSE/HSL [17-19] en literatuuronderzoek met behulp van Scopus (zoektermen: heat-radiation-clothing; heat-radiation-probit; heat-radiation-lethality; heat-radiation-skin burn; radiation-ignition-clothing). Hieruit komt de volgende informatie naar voren.

Ontsteking van kleding

In Lees [16] wordt voor de ontsteking van kleding de volgende informatie gegeven:

Hymes states that for thermal radiation intensities greater than 75 kW/m² most clothing will undergo spontaneous ignition within about 5 s. Under conditions such as a BLEVE, piloted ignition is probable and the time to ignition will tend to be even shorter. The Green Book refers to the work of Hymes and proposes for the ignition of clothing the following threshold relation: $t \cdot I^2 = D_s$ where D_s is the clothing ignition load ($s(kW/m^2)^2$), I is the thermal radiation intensity (kW/m^2), and t is the time (s). It states that the value of D_s lies approximately in the range $2.5 \cdot 10^4$ and $4.5 \cdot 10^4 s \cdot (kW/m^2)^2$.

Bij een blootstellingsduur van 20 seconden zal de warmtestralingsintensiteit waarbij kleding ontsteekt dan tussen de 35 en 47 kW/m² liggen.

Experimentele data ondersteunen de aanname dat bij stralingsintensiteiten van meer dan 50 kW/m² kleding kan ontsteken. In onderzoek van de HSL [17] wordt voor kledingmaterialen tijden tot ontsteking bij verschillende stralingsintensiteiten gegeven (zie Tabel 1.10). In voor de HSE uitgevoerd onderzoek [18] worden de data gegeven in Tabel 1.11.

Tabel 1.10 Ontstekingstijd voor kleding

Material	Heat flux (kWm ⁻²)	Time to ignition (s)
Clothing Cotton	58	10
Clothing Cotton	81	6
Clothing Cotton	105	3
Clothing Nylon	58	22
Clothing Nylon	81	26
Clothing Nylon	105	7

Tabel 1.11 Ontstekingstijd voor kleding

Incident flux (kW/m ²)	Time to ignition, t _{ig} (s), for various material types			
	Cotton (white)	Cotton (white) Fire Retardant ¹	Polyester / Cotton(65/35)	Polyester / Cotton(50/50)
198	3	2	3	6
118	7	4	8	15
87	12	6	15	26

70	19	8	26	43
52	41	13	(no ignition)	(no ignition)

¹Fire retardant in this context refers to the resistance to flame spread and not the resistance to ignition. This explains why ignition of fire retardant cotton occurs before the untreated cotton.

Het literatuuronderzoek in Scopus geeft veel onderzoek naar het effect van beschermende kleding voor bijvoorbeeld de brandweer in het gebied met een stralingsintensiteit van 3-10 kW/m².

Voor het meenemen van het effect van het ontsteken van kleding zijn er twee benaderingen. In Lees wordt het effect van ontsteking van kleding als volgt benaderd: *With regard to fatal injury from ignited clothing, in a survey of five American hospitals by Schlapowsky (1967) of 179 people admitted to hospital suffering from burns from clothing, almost 40% had second degree burns or worse, requiring extensive surgery and skin grafts; 16% had third degree burns. In his survey, Lawrence states that there were 248 cases of ignition of ordinary clothing, excluding those involving flammable liquids, of whom 46 died, giving a mortality of 18.5%.*

Hierbij is het niet duidelijk of de slachtoffers ook aan warmtestraling zijn blootgesteld of dat het ontsteken van de kleding alleen te wijten was aan direct vlamcontact.

Atkins [19] volgt de volgende benadering: *In incidents involving radiation from a fire event, the radiation will be of a very high level in order to ignite clothing, and will remain as a substantial source of burn even if the clothing is removed. An equally important factor is that ignited clothing will significantly hamper escape, leading to an increased dose on the unclothed areas of skin. Thus, although acknowledging that it is potentially conservative, Hockey & Rew concluded that the assumption of 100% fatality in the event of clothing ignition from radiation is reasonable.*

Bij het vaststellen van een dosiscriterium wordt de benadering van Atkins gevolgd. Dit betekent dat de overall correctiefactor voor het dragen van kleding niet 0,14 maar 1 is voor het gebied waar kleding wel ontsteekt en 0,14 voor het gebied waar kleding niet ontsteekt.

Conclusie:

Het is verdedigbaar (wellicht conservatief) uit te gaan van een dosiscriterium voor het ontsteken van kleding op basis van een stralingsintensiteit van 35 kW/m² en 20 seconden blootstellingsduur (dosiscriterium $2,29 \cdot 10^7 \text{ s} \cdot (\text{W}/\text{m}^2)^{4/3}$).

Ontbranden huizen/bouwmaterialen

Casuïstiek

Bij het incident in Edison (VS) is een 36 inch (66,2 bar) aardgasleiding gefaald. Huizen ontbrandden op ongeveer 100 meter afstand [20]. Het bijbehorende warmtestralingsniveau zal ongeveer 55 kW/m² zijn geweest (*op basis van PipeSafe data*). Zover bekend zijn er geen slachtoffers gevallen.

Bij het incident in Gellingen is een 39 inch leiding (80 bar) aardgasleiding gefaald. Gebouwen ontbrandden tot op 210-240 meter [21]. Omdat de jet pas na enkele minuten is ontstoken, zal op basis van de actiekaart het warmtestralingsniveau op deze afstand ongeveer 10 kW/m² zijn geweest.

Ontsteking bouwmaterialen

Materiaaloppervlakken kunnen onder invloed van warmtestraling ontbranden. Van belang hierbij zijn de stralingsintensiteit en de expositieduur. Naar mate de expositie langer aanhoudt zal in beginsel een steeds geringere stralingsintensiteit voldoende zijn om het materiaaloppervlak tot ontbranding te brengen. Beneden een bepaalde waarde van de stralingsintensiteit zal ontbranding uitblijven, ongeacht de lengte van de expositieduur. Deze grenswaarde wordt uitgeduid met het begrip "kritische stralingsintensiteit" [11]. Een andere definitie is dat de temperatuur aan het oppervlak van het materiaal voldoende is voor het starten van het pyrolyse proces [18].

Verschillende bronnen geven kritische stralingsintensiteiten:

- Voor verschillende brandbare materialen ligt de kritische stralingsintensiteit (geen aansteekvlam) bij 25-35 kW/m² (hout, hennep, jute, vlas, textiel, zachtboard, hardboard en kurk). Voor staal⁴ ligt de kritische stralingsintensiteit op 100 kW/m² [11].
- In [18] worden de waarden gegeven uit Tabel 1.12:

Tabel 1.12 Kritische stralingsintensiteiten

Incident flux (kW/m ²)	Time to ignition, t _{ig} (s), for various material types			
	Particleboard (thermally thin)	Spruce (thermally thick)	PVC (extruded) 3mm (grey)	PVC (pressed) 5mm (white)
50	40	15	26	55
40	53	30	43	95
30	82	60	71	209
20	166	625	184	332
15	400	~1200	655	653
10	(no ignition)	(no ignition)	(no ignition)	(no ignition)

Conclusie:

Bouwmaterialen kunnen al bij relatief lage warmtestralingsintensiteiten ontsteken/branden. De gevonden data in de literatuur ondersteunen dat bij voldoende lange blootstellingstijden boven een warmtestralingsintensiteit van 10-15 kW/m² gebouwen kunnen ontbranden. Bij het vaststellen van de aandachtsgebieden wordt een ondergrens van 10 kW/m² gebruikt.

Echter, er zijn redenen om het dosis criterium op dit punt toch op basis van een warmtestralingsintensiteit hoger dan 15 kW/m² te kiezen.

1. Voor kortdurende scenario's als instantaan falen (en vuurbal) is de blootstellingstijd maximaal in de orde van een minuut en is de benodigde warmtestralingsintensiteit voor het ontbranden van bouwmaterialen in de orde van 30 – 50 kW/m².

⁴ Staal is onbrandbaar maar bij toenemende temperatuur nemen de sterkte en stijfheid van staal echter betrekkelijk snel af. Daarom is het denkbaar dat een stalen constructieonderdeel onder invloed van warmtestraling zal bezwijken

2. Bij het ontbranden van bouwmaterialen en daarmee ook mogelijk het gehele gebouw bij een stralingsintensiteit van 15 kW/m^2 , kunnen/zullen mensen het gebouw verlaten en buiten bloot worden gesteld aan warmtestraling. De kans op overlijden ligt, indien bij het verlaten van het brandende huis de oorspronkelijke warmtestralings-intensiteit nog steeds aanwezig is, dan maximaal in de grootte orde van 2-14% zolang kleding niet ontsteekt. Een dosiscriterium baseren op een warmstralingsintensiteit van 15 kW/m^2 is dan over-conservatief. Bij een plasbrand zal het warmtestralingsniveau buiten relatief laag zijn en is de vluchtweg naar een veilig warmtestralingsniveau relatief kort.
3. Kritische stralingsintensiteiten liggen in de orde van $25\text{-}35 \text{ kW/m}^2$ en ook de casuïstiek laat aanwijzingen zien dat pas bij hogere stralingsintensiteiten huizen ontbranden.

Een dosiscriterium van $2,29 \cdot 10^7 \text{ s} \cdot (\text{W/m}^2)^{4/3}$ is zeker voor kortdurende scenario's een verdedigbare keuze, maar ook voor langdurige scenario's.

Breken van glas

Het scheuren (springen) van glas, onder invloed van warmtestraling, wordt veroorzaakt door het optreden van een niet-homogene temperatuurverdeling in het glas [11]. (Enkelvoudig?) glas kan breken door warmtestraling bij een intensiteit van 4 kW/m^2 en een expositie van ongeveer een half uur. Het blijkt dat in het glas, blootgesteld aan een (kritische) stralingsintensiteit van 4 kW/m^2 al na ca. 10 minuten, 90% van de (kritieke) eindtemperatuur van 393 K wordt bereikt.

Andere studies geven voor het doel van dit onderzoek vergelijkbare resultaten [18]: *'A summary of the results from the study suggests that single pane wood frame windows always failed at heat fluxes above 10 kW/m^2 and did not fail at heat fluxes of less than 7 kW/m^2 . The unexposed (inside) panes of double glazed wood frame windows failed in all tests in which imposed fluxes ranged from 10 kW/m^2 to 18 kW/m^2 . If windows break or are open, then it is reasonable to assume that the effects of flame penetration on these people will be the same as if they were unprotected by the building and engulfed in the flash fire, i.e. they would have a 100% probability of fatality. For people not adjacent to the window, the direct effects of flame penetration are not so easily defined. This would suggest that, unless people are standing at the window, the effect of transmission of thermal radiation through windows can be neglected. If people are standing at the window then window breakage and flame penetration are likely to be the more serious event.*

Conclusie: glas kan breken⁵ na relatief geringe tijd. Echter, invloed van soort van glas (enkelvoudig, dubbel of HR++) is niet duidelijk. Na het breken van het glas mag worden verondersteld dat men ook binnen (gedeeltelijk) aan dezelfde stralingsintensiteit wordt blootgesteld als buiten. Verondersteld mag worden dat mensen na het breken van het glas niet achter het raam blijven staan maar naar een veiligere plek in huis gaan. Het te kiezen dosiscriterium is daarmee niet direct afhankelijk van glasbreuk.

Algemene conclusies

⁵ Verondersteld wordt dat door het breken van het glas geen (glas)projectielen ontstaan die letaal letsel kunnen veroorzaken

- Het dosiscriterium van $2,29 \cdot 10^7 \text{ s} \cdot (\text{W}/\text{m}^2)^{4/3}$ is bruikbaar. Bij het afleiden van dit dosiscriterium is rekening gehouden met de effecten van warmtestraling op mensen binnen (ontbranden van huizen en effecten aan glas) als buiten (ontsteken van kleding) en grotendeels met de duur van een scenario.
- De onderbouwing van het dosiscriterium is op basis van de beschikbare data niet kwalitatief beter dan de vaststelling van het stralingscriterium van $35 \text{ kW}/\text{m}^2$ omdat sinds de introductie van het Paarse Boek in 1999 niet veel nieuwe, voor dit onderwerp bruikbare, data beschikbaar zijn gekomen.

1.6.6.3 Ontvlambare stoffen - overdruk

De berekening van de letaliteit voor het plaatsgebonden risico en de FN-curve ten gevolge van een gaswolkexplosie is gegeven in Tabel 1.13.

Tabel 1.13 Overlijdingskans voor ontvlambare stoffen – overdruk

Gebied	Plaatsgebonden Risico	FN-curve Binnen	FN-curve buiten
overdruk $\geq 0,3$ bar	1	1	1
$0,3 \text{ bar} > \text{overdruk} \geq 0,1$ bar	0	0,025	0
overdruk $< 0,1$ bar	0	0	0

2 RBMII

Informatie volgt.

3 CAROLA

Informatie volgt.

4 Module I

4.1 Inleiding

Dit hoofdstuk bevat achtergrondinformatie over module I. Ook zijn enkele rekenvoorbeelden opgenomen.

4.2 Subselectie

Het aantal insluitsystemen⁶ op een Seveso-inrichting kan erg groot zijn. Omdat niet alle insluitsystemen significant zijn voor de externe veiligheid, is het niet zinvol om alle insluitsystemen in de berekening op te nemen. Daarom is voor Seveso-inrichtingen een selectiemethode ontwikkeld, de subselectie, om de insluitsystemen aan te wijzen die het meest bijdragen aan de externe gevaren en dus in de rapportage moeten worden opgenomen. Deze methode wordt hieronder toegelicht.

4.2.1 Doelstelling en reikwijdte

4.2.1.1 Doelstelling van de subselectie

De doelstelling van de subselectie is als volgt:

De subselectie heeft tot doel de insluitsystemen van een Seveso-inrichting aan te wijzen die bepalend zijn voor de externe gevaren en dus in de rapportage moeten worden meegenomen.

Dit betekent dat de subselectie bedoeld is om onderscheid tussen de insluitsystemen binnen één Seveso-inrichting te maken, zodat in de rapportage niet alle insluitsystemen hoeven te worden meegenomen.

De subselectie is uitdrukkelijk niet bedoeld om op basis van de resultaten van de subselectie te concluderen dat er voor de beschouwde Seveso-inrichting helemaal geen risico- en effectberekeningen hoeven te worden uitgevoerd. Alleen wanneer op basis van berekende effectafstanden wordt onderbouwd dat er geen effecten reiken buiten de locatie van de Seveso-inrichting, is het uitvoeren van berekeningen niet nodig.

4.2.1.2 Reikwijdte van de subselectie

4.2.1.2.1 Verantwoordelijkheid van de subselectie en afwijkingen

De subselectie heeft een algemeen karakter en dient daarom uitsluitend als leidraad te worden gehanteerd. De insluitsystemen worden geselecteerd na overleg tussen de exploitant en het bevoegd gezag. De exploitant voert de berekeningen uit, maar de subselectie zelf is de verantwoordelijkheid van het bevoegd gezag. Deze kan dan ook besluiten insluitsystemen op te laten nemen

⁶ Een insluitsysteem wordt omschreven als een of meerdere toestellen, waarvan de eventuele onderdelen blijvend met elkaar in open verbinding staan en bestemd om één of meerdere stoffen te omsluiten. Voor de subselectie is bepalend dat een Loss of Containment in één insluitsysteem niet leidt tot het vrijkomen van significante hoeveelheden gevaarlijke stof uit andere insluitsystemen (zie paragraaf 4.2.2.2).

in de rapportage die niet met behulp van de hier beschreven methode zijn geselecteerd.

Ook de uitvoerder kan afwijken van de subselectie wanneer hiervoor een sluitende onderbouwing wordt gegeven. Als bijvoorbeeld op basis van berekende effectafstanden aannemelijk kan worden gemaakt dat de effecten van een insluitsysteem niet reiken buiten de locatie, en dus geen relevante gevolgen hebben voor de externe veiligheid, hoeft het insluitsysteem niet te worden meegenomen in de berekeningen.

4.2.1.2.2 Reactieproducten en giftige verbrandingsproducten

De subselectie is niet geschikt voor alle typen insluitsystemen. Met name de vorming van ongewenste reactieproducten in run-away reacties en de vorming van giftige verbrandingsproducten in een brand van verpakte gevaarlijke stoffen in een opslagloods kunnen niet goed worden meegenomen in de subselectie en moeten daarom, naast de geselecteerde insluitsystemen, in de rapportage zelf worden beschouwd.

- *Risico's van reactieproducten en run-away reacties.*
Bij het evalueren van een mogelijk verlies van controle dient rekening te worden gehouden met het ontstaan van gevaarlijke reactieproducten en het optreden van run-away reacties. De insluitsystemen waarin dit kan voorkomen en de kans van optreden moeten worden beschouwd in de rapportage. Het ontstaan van onvoorzien, gevaarlijke reactieproducten wordt niet beoordeeld in de subselectie.
- *Opslagen van gevaarlijke stoffen die vallen onder de richtlijn PGS 15.*
Bij PGS 15 opslagplaatsen is het voornaamste risico het ontstaan van giftige verbrandingsproducten tijdens een brand in de betreffende opslag. Omdat de bijdrage van deze opslagen significant kan zijn voor het externe gevaar, dienen deze opslagplaatsen altijd te worden meegenomen in de rapportage. Wanneer op basis van berekende effectafstanden of met de standaard risicoafstanden uit Bijlage VII van het Bkl kan worden onderbouwd dat de bijdrage van een opslagplaats aan het externe risico van de inrichting verwaarloosbaar is, kan de betreffende opslagplaats worden weggelaten uit de rapportage.

4.2.1.2.3 Bulkverladingsactiviteiten

Door de combinatie van grote hoeveelheden gevaarlijke stoffen en de (relatief) hoge faalfrequenties voor de verladingsscenario's kunnen verladingen van bulkhoeveelheden een significante bijdrage aan het externe risico leveren. Daarom dient de bulkverlading (en de transporteenheden) in principe altijd geselecteerd te worden voor de rapportage, tenzij aangetoond wordt dat de bijdrage van (een deel van de) bulkverlading verwaarloosbaar is, bijvoorbeeld op basis van effectafstanden of onderlinge vergelijking.

Er zijn situaties waarin een ketelwagen alleen als opslagreservoir wordt gebruikt en een procesinstallatie direct gevoed wordt vanuit de transporteenheid. In een dergelijk geval moet de ketelwagen voor de subselectie als opslagreservoir worden beschouwd en als zodanig meegenomen worden in de subselectie.

4.2.1.2.4 Uitsluiting van bepaalde stoffen

De subselectie is alleen toepasbaar voor giftige stoffen, ontvlambare gevaarlijke stoffen en ontplofbare stoffen. Voor deze stoffen zijn grenswaarden opgenomen (zie paragraaf 4.2.2.4.2). Voor de aanwijzing van andere stoffen, zoals de gekoelde opslag van (zeer) grote hoeveelheden stikstof, zuurstof of kooldioxide, is de subselectie niet geschikt. Wanneer deze stoffen aanwezig zijn dienen over de beschouwing ervan met het bevoegd gezag afspraken te worden gemaakt. Op basis hiervan kan bijvoorbeeld besloten worden dat een opslag met een grote hoeveelheid stikstof wordt meegenomen in de rapportage.

4.2.2 *De subselectie*

4.2.2.1 De subselectie op hoofdlijnen

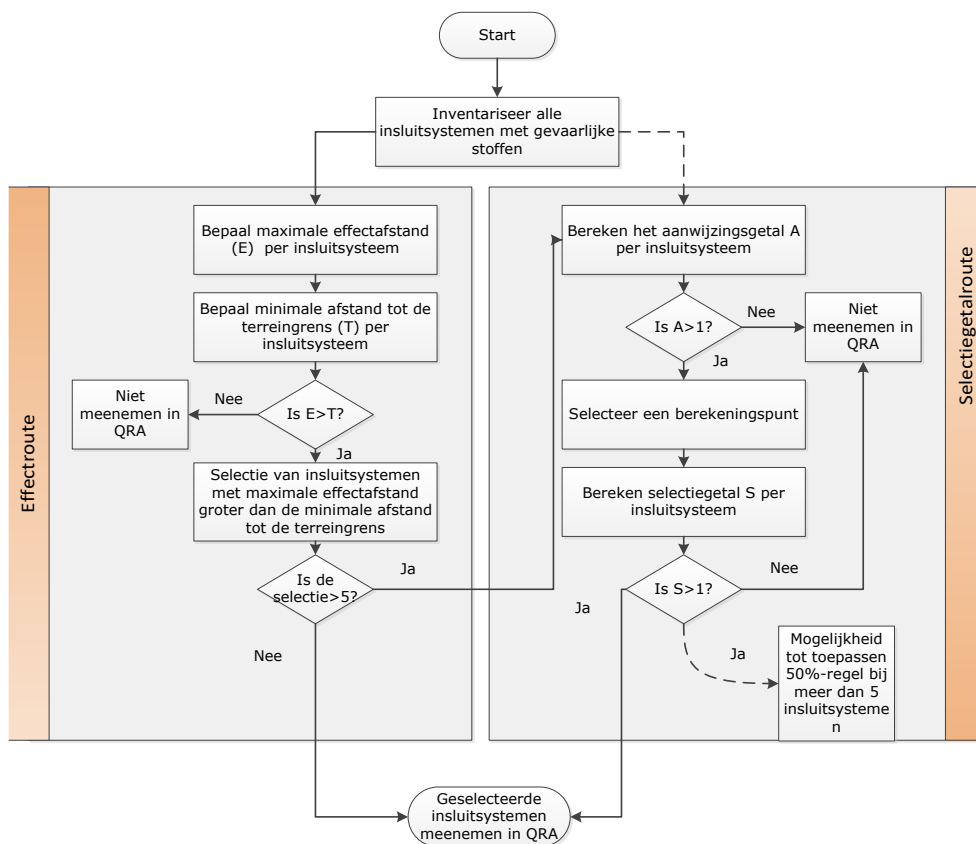
Om alle insluitsystemen mee te nemen die significant zijn voor de externe veiligheid, worden er verschillende stappen doorlopen. In hoofdlijnen komt de subselectie op het volgende neer:

1. De inrichting wordt verdeeld in insluitsystemen met gevaarlijke stoffen (zie paragraaf 4.2.2.2).
2. Op basis van effectafstanden vindt een selectie plaats van insluitsystemen waarvan de effecten raken tot buiten de locatie van de Seveso-inrichting⁷ (zie paragraaf 4.2.2.3). Deze insluitsystemen dragen zijn relevant voor de externe veiligheid en worden meegenomen in de rapportage.
3. Wanneer meer dan vijf insluitsystemen via de effectbenadering worden geselecteerd, kan er vervolgens een verdiepingstap worden gemaakt om het aantal insluitsystemen dat moet worden meegenomen in de rapportage te reduceren. Dit vindt plaats op basis van de soort en hoeveelheid stof in een insluitsysteem en de heersende procescondities. Hiervoor wordt per insluitsysteem een aanwijzingsgetal en selectiegetal berekend (zie paragraaf 4.2.2.4).

Bedrijven met meer dan 5 insluitsystemen kunnen ervoor kiezen stap 2 (de effectbenadering) over te slaan en direct via de aanwijzings- en selectiegetallen de subselectie uit te voeren. Hierbij moeten wel alle insluitsystemen worden beschouwd. Ook kan er voor gekozen worden om alle insluitsystemen met effectafstanden buiten de locatie mee te nemen in de rapportage, zonder de aanwijzings- en selectiegetallen te berekenen.

In Figuur 4.1 is de subselectie schematisch weergegeven.

⁷ Op een industrieterrein kunnen meerdere activiteiten worden verricht die sterk met elkaar verweven zijn. In plaats van alleen de locatie te beschouwen kan ook worden gerekend voor het hele industrieterrein wanneer het risico op het industrieterrein niet in de beoordeling wordt meegenomen. Dit betekent dat er geen (beperkt) kwetsbare objecten op het industrieterrein zijn en er geen personen aanwezig zijn die meegenomen moeten worden voor het vaststellen van de effectgebieden en de eventuele berekening van de FN-curve.



Figuur 4.1 Schematische weergave van de subselectie. Bedrijven met meer dan vijf insluitsystemen kunnen direct de selectiegetalroute volgen, zoals aangegeven.

4.2.2.2 Verdeling van een inrichting in insluitsystemen

4.2.2.2.1 Definitie insluitsysteem

Voor het selecteren van de installaties en installatie-onderdelen van een activiteit die van belang zijn voor de externe veiligheid, wordt een verdeling gedaan in een aantal afzonderlijke insluitsystemen. Deze insluitsystemen kunnen als aparte eenheden worden beschouwd in de rapportage.

De definitie van een insluitsysteem is gebaseerd op het volgende criterium:

Een Loss of Containment in één insluitsysteem leidt niet tot het vrijkomen van significante hoeveelheden gevaarlijke stof uit andere insluitsystemen.⁸

Hierbij moet de term 'significant' gezien worden in relatie tot de hoeveelheid die vrijkomt uit het insluitsysteem waarin de Loss of Containment gebeurt.

⁸ Domino-effecten, bijvoorbeeld ten gevolge van brand en explosie, worden hierbij niet meegenomen.

4.2.2.2.2 Begrenzing van insluitsystemen

Voor de praktische invulling van het definiëren van insluitsystemen in een inrichting kan gebruik worden gemaakt van de volgende leidraad⁹.

Een insluitsysteem wordt omschreven als een of meerdere toestellen, waarvan de eventuele onderdelen blijvend met elkaar in open verbinding staan en bestemd om één of meerdere stoffen te omsluiten. De grenzen van een insluitsysteem worden vastgelegd door de hoeveelheid stof te bepalen die bij Loss of Containment van enig onderdeel van dat insluitsysteem naar de omgeving wegstroomt: als bij de Loss of Containment toestroming plaatsvindt via kleppen, pompen en andere werktuigen vanuit andere ruimten dan behoren die ruimten tot het beschouwde insluitsysteem.

Systeembegrenzers zijn alle organen die gezien hun aard en functie de verbinding met andere insluitsystemen binnen een installatie sluiten bij het vrijkomen van de inhoud van het beoogde insluitsysteem. Zonder uitpuddend te zijn worden daaronder begrepen reciprocerende pompen en compressoren (geen roterende), regelkleppen die automatisch sluiten, intermitterende spuikleppen en afsluiters die bij de kenmerkende bedrijfssituatie gesloten zijn of in korte tijd op afstand gesloten worden. Afsluiters die normaal geheel geopend zijn en in de faalsituatie niet dichtsturen kunnen derhalve *niet* als systeembegrenzers worden beschouwd. Beveiligingsafsluiters die de toestroming vanuit andere insluitsystemen (automatisch) in korte tijd blokkeren, worden wel als systeembegrenzers beschouwd, ook wanneer deze beveiligingsafsluiters bij de kenmerkende bedrijfssituatie geheel zijn geopend.

De lijn kan ook worden doorgetrokken naar combinaties van organen die met elkaar hetzelfde doel bereiken. In deze situaties dient door de bevoegde instantie te worden vastgesteld of een dergelijke afsluiter als systeembegrenzer kan worden aangemerkt.

Tabel 4.1 biedt een overzicht van wat bepalend is voor de begrenzing van een insluitsysteem.

Opmerkingen:

1. Een doorstroombegrenzer blijft open bij een uitstroomdebiet onder de instelwaarde. Wanneer een debiet onder de instelwaarde een significante uitstroming betekent, is de doorstroombegrenzer niet te beschouwen als een systeembegrenzer.
2. Het is mogelijk meerdere insluitsystemen te combineren tot één groter insluitsysteem. Het combineren van insluitsystemen mag er echter niet toe leiden dat andere insluitsystemen ten onrechte niet worden geselecteerd voor de rapportage.

⁹ De hier genoemde richtlijnen zijn gebaseerd op een werkinstructie van Shell Nederland

Tabel 4.1 Kenmerken van insluitsystemen en hun onderdelen

<p>Insluitsysteem Een of meerdere toestellen, waarvan de eventuele onderdelen blijvend met elkaar in open verbinding staan en bestemd om één of meerdere stoffen te omsluiten.</p>
<p>Hulpregel het insluitsysteem omvat de ruimten die met elkaar zijn verbonden en tot eenzelfde drukniveau behoren (combinatie van ruimten met eigen overdrukbeveiliging).</p>
<p>Systeembegrenzer een orgaan dat in bedrijfssituaties insluitsystemen van elkaar scheidt door het onderhouden van een drukverschil of door het aanbrengen van een afsluiting, ofwel een orgaan dat, of een combinatie van organen die bij desintegreren van een willekeurige ruimte deze (automatisch) afsluit van andere, in bedrijfssituaties met die ruimte verbonden ruimten.</p>
<p>Voorbeelden van systeembegrenzers</p> <ul style="list-style-type: none"> – regelkleppen met een afdichtende functie – verdringingscompressoren (geen roterende), verdringingspompen (reciprocerende) – afsluiters die tijdens bedrijf gesloten zijn – veiligheidskleppen, breekveiligheden, vloeistofsloten – doorstroombegrenzers in combinatie met terugslagkleppen – beveiligingsafsluiters die normaal open staan en in korte tijd automatisch sluiten bij het optreden van een te lage druk stroomopwaarts of stroomafwaarts of vanuit een bemande regelzaal in korte tijd gesloten worden (Motor/Remote Operated Valves)
<p>Voorbeelden van drukhoudende delen</p> <ul style="list-style-type: none"> – wanden van toestellen onder druk – klephuizen, meetpotten – veiligheidskleppen – werktuigen die een drukverschil in stand houden tussen het insluitsysteem en de atmosfeer (luchtcompressoren en voedingspompen in combinatie met de nodige terugslagkleppen of beveiligingsafsluiters) – wanden die binnen toestellen insluitsystemen van elkaar scheiden (bijvoorbeeld in warmtewisselaars) – systeembegrenzers die insluitsystemen onder druk van elkaar scheiden

4.2.2.3 Selectie op basis van effectafstanden

Insluitsystemen die, wanneer een Loss of Containment (LOC) plaatsvindt, kunnen leiden tot een effect¹⁰ buiten de Seveso-inrichting dragen bij aan de externe gevaren. Daarnaast geldt natuurlijk dat alle insluitsystemen die niet tot een effect buiten de Seveso-inrichting kunnen leiden, geen bijdrage leveren aan de externe gevaren.

De selectie op basis van effectafstanden bestaat uit de volgende stappen:

1. Bepaal per insluitsysteem de maximale effectafstand (E), dat wil zeggen de grootste afstand tot 1% letaliteit. Deze afstand wordt bepaald voor de meteorologische situaties D5 of F1,5¹¹ in combinatie met het ongunstigste scenario, namelijk het instantaan vrijkomen van de gehele inhoud van het insluitsysteem of het vrijkomen van de gehele inhoud in 10 minuten.
2. Bepaal per insluitsysteem de minimale afstand tot de grens van de Seveso-inrichting (T).

¹⁰ acute sterfte ten gevolge van blootstelling aan giftige stoffen, warmtestraling of overdruk

¹¹ De meteorologische situatie D5 betekent stabiliteitsklasse D en windsnelheid 5 m/s. In het algemeen wordt voor giftige stoffen de grootste effectafstand gevonden voor stabiel weer, dat wil zeggen weerklasse F1,5 (stabiliteitsklasse F en windsnelheid 1,5 m/s).

3. Vergelijk de maximale effectafstand en minimale afstand tot de grens per insluitsysteem. Indien de maximale effectafstand groter is dan de minimale afstand tot de grens van de Seveso-inrichting is het betreffende insluitsysteem aangewezen voor de rapportage. Wanneer de maximale effectafstand kleiner is dan de minimale afstand tot de grens van de Seveso-inrichting levert het insluitsysteem geen bijdrage aan de externe gevaren en hoeft daarom niet te worden meegenomen in de rapportage.

Op deze wijze vindt de selectie van de insluitsystemen op basis van effectafstanden plaats. Alle geselecteerde insluitsystemen moeten worden beschouwd in de rapportage. Wanneer er meer dan vijf insluitsystemen worden aangewezen kan ervoor gekozen worden de aanwijzings- en selectiegetallen te berekenen om zo het aantal aangewezen insluitsystemen te reduceren, met dien verstande dat minimaal vijf insluitsystemen meegenomen moeten worden in de rapportage.

4.2.2.4 Selectie op basis van selectiegetallen

4.2.2.4.1 Methode op hoofdlijnen

Bij een groot aantal insluitsystemen kan een selectie plaatsvinden op basis van soort en hoeveelheid stof en procescondities. Deze selectiemethode bestaat uit drie stappen:

1. Van elk insluitsysteem wordt het intrinsieke gevaar bepaald, dat voortkomt uit de hoeveelheid aanwezige stof, de procescondities en de gevaarlijke eigenschappen van de stof. Het aanwijzingsgetal A is een maat voor het intrinsieke gevaar en wordt berekend volgens de in paragraaf 4.2.2.4.2 beschreven procedure.
2. Het gevaar van een insluitsysteem wordt berekend voor een aantal punten in de nabijheid van de inrichting. Het gevaar op een willekeurig punt wordt afgeleid uit het aanwijzingsgetal en de afstand tussen dat punt en het insluitsysteem, en uitgedrukt in een selectiegetal S; dit getal wordt volgens de in paragraaf 4.2.2.4.3 beschreven procedure berekend.
3. Insluitsystemen worden aangewezen wanneer het selectiegetal een bepaalde waarde overschrijdt. Wanneer het aantal aangewezen insluitsystemen omvangrijk is (groter dan vijf) bestaat de mogelijkheid om via de '50%-regel' het aantal aangewezen systemen te reduceren (zie paragraaf 4.2.2.4.4).

4.2.2.4.2 Aanwijzingsgetal A

Het intrinsieke gevaar van een insluitsysteem is afhankelijk van de hoeveelheid stof, de fysische en giftige eigenschappen van de stof en de specifieke procescondities. Als maat hiervoor wordt het aanwijzingsgetal A gebruikt.

Het aanwijzingsgetal A voor een insluitsysteem is een dimensieloos getal waarvoor geldt:

$$A = \frac{Q \times O_1 \times O_2 \times O_3}{G}$$

waarbij:

Q	de in het insluitsysteem aanwezige hoeveelheid stof (kg)
O ₁ , O ₂ , O ₃	de factoren voor de procescondities (-)
G	de grenswaarde (kg).

Hoeveelheid stof, Q

De hoeveelheid stof, Q, is de totale hoeveelheid stof binnen een insluitsysteem. De volgende regels zijn van toepassing:

1. Mengsels en preparaten kunnen in twee groepen worden ingedeeld: (1) een gevaarlijke stof in een niet-gevaarlijke oplossing en (2) een mengsel van gevaarlijke stoffen.
 - a. Indien een gevaarlijke stof is opgelost in een niet-gevaarlijke stof, hoeft alleen te worden gekeken naar de hoeveelheid gevaarlijke stof. Voorbeelden zijn ammoniak in water en chloorwaterstof in water. Mengsels en preparaten van giftige stoffen moeten bij het subselectieproces alleen worden beschouwd als ze te boek staan als (zeer) giftig.
 - b. Indien een mengsel van meerdere gevaarlijke stoffen zijn eigen fysische, chemische en giftige eigenschappen heeft, moet het op dezelfde wijze worden behandeld als zuivere stoffen.
2. Wanneer gevaarlijke stoffen als kleine verpakkingseenheden op één plaats worden opgeslagen en wanneer het waarschijnlijk is dat er uit een groot aantal verpakkingseenheden tegelijkertijd stoffen zullen vrijkomen, moet de totale hoeveelheid van de opgeslagen stof worden beschouwd.
3. Opslagreservoirs kunnen worden gebruikt om verschillende stoffen op verschillende tijdstippen op te slaan. In de subselectie dient gerekend te worden met dezelfde stoffen en stofhoeveelheden als in de risico- en effectberekeningen. Bepalend voor de berekening is de vergunde situatie. Wanneer grote hoeveelheden van verschillende stoffen worden opgeslagen, wordt gebruik gemaakt van voorbeeldstoffen. Gerekend wordt dan met de vergunde stof dan wel de voorbeeldstof van de gevaarlijkste vergunde categorie.

Procescondities, O1 – O3

Drie verschillende factoren worden gehanteerd om de procescondities te verdisconteren:

O ₁	: factor voor het type insluitsysteem: proces of opslag
O ₂	: factor voor de ligging van het insluitsysteem
O ₃	: factor voor de hoeveelheid stof in dampfase na vrijkomen, afhankelijk van de procestemperatuur, het atmosferisch kookpunt, de fasetoestand van de stof en de omgevingstemperatuur.

De factoren voor procescondities gelden alleen voor giftige en ontvlabbare stoffen; voor ontplofbare stoffen geldt: O₁ = O₂ = O₃ = 1.

De factor O₁ (zie Tabel 4.2) staat voor het type insluitsysteem: proces of opslag.

Tabel 4.2 Factor O_1 voor het type insluitsysteem

Type	O_1
Proces	1
Opslag	0,1

De factor O_2 (zie Tabel 4.3) staat voor de ligging van het insluitsysteem en de aanwezigheid van voorzieningen die de verspreiding van stoffen in de omgeving tegengaan.

Tabel 4.3 Factor O_2 voor de ligging van het insluitsysteem

Positie	O_2
Buiten	1
Binnen	0,1
Insluitsysteem gelegen in een tankput, bij een procestemperatuur T_p lager dan het atmosferisch kookpunt T_{kook} plus 5°C: $T_p \leq T_{kook} + 5^\circ\text{C}$	0,1
Insluitsysteem gelegen in een tankput, bij een procestemperatuur T_p hoger dan het atmosferisch kookpunt T_{kook} plus 5°C: $T_p > T_{kook} + 5^\circ\text{C}$	1

Opmerkingen:

1. Voor opslag is de procestemperatuur gelijk aan de opslagtemperatuur.
2. Het verschil tussen buiten- en binnenligging wordt bepaald door de aanwezigheid en effectiviteit van de omhulling. Voor binnen geldt dat de omhulling van het insluitsysteem dient te voorkomen dat stoffen in de omgeving worden verspreid. Dit betekent (a) dat de omhulling bestand moet zijn tegen de fysieke belasting die ontstaat wanneer de inhoud van het insluitsysteem instantaan vrijkomt en (b) dat de omhulling de directe afgifte in de atmosfeer aanzienlijk beperkt. Indien de omhulling de afgifte in de atmosfeer met meer dan een factor 5 reduceert of wanneer de omhulling de vrijgekomen stoffen veilig afvoert, dan spreken we van een binnenligging. Zo niet, dan hebben we te maken met een buiten gelegen insluitsysteem. Dit betekent bijvoorbeeld dat een insluitsysteem met een gevaarlijk gas dat is geplaatst in een gebouw met openingen naar buiten als buiten gelegen moet worden beschouwd.
3. Een tankput moet voorkomen dat vloeistoffen zich vrijelijk in de omgeving verspreiden.
4. Een tweede omhulling die de vloeistof kan bevatten en die alle mogelijke belastingen weerstaat, wordt beschouwd als een tankput: $O_2 = 0,1$. Dit geldt voor dubbel omsloten atmosferische tanks (double containment), volledig omsloten atmosferische tanks (full containment), membraamtanks, ingegraven atmosferische tanks en ingeterpte atmosferische tanks.

De factor O_3 (zie Tabel 4.4) is een maat voor de hoeveelheid vrijgekomen stof in gasfase.

Tabel 4.4 Factor O_3 voor de procescondities

Fase	O_3
Stof in gasfase	10
Stof in vloeibare fase	
- verzadigingsdruk bij procestemperatuur van 3 bar of meer	10
- verzadigingsdruk bij procestemperatuur tussen 1 en 3 bar	$X + \Delta$
- verzadigingsdruk bij procestemperatuur van minder dan 1 bar	$P_i + \Delta$
Stof in vaste fase	0,1

Opmerkingen:

1. Voor opslag is de procestemperatuur gelijk aan de opslagtemperatuur.
2. Drukwaarden zijn absoluut.
3. Factor X neemt lineair toe van 1 tot 10 naarmate de verzadigingsdruk bij procestemperatuur P_{sat} stijgt van 1 naar 3 bar. In formulevorm, waar P_{sat} wordt uitgedrukt in bar:

$$X = 4,5 \times P_{sat} - 3,5$$

4. P_i is gelijk aan de partiële dampspanning (in bar) van de stof bij procestemperatuur.
5. Als de stof zich in vloeibare fase bevindt, wordt een hoeveelheid Δ toegevoegd om de extra verdamping als gevolg van de warmtestroom vanuit de omgeving naar de vloeistofplas te verdisconteren. De waarde van Δ (zie Tabel 4.5) wordt uitsluitend bepaald door het atmosferisch kookpunt T_{kook} .

Tabel 4.5 Toegevoegde Δ voor de extra verdamping van de vloeistof

	Δ
$-25^\circ\text{C} \leq T_{kook}$	0
$-75^\circ\text{C} \leq T_{kook} < -25^\circ\text{C}$	1
$-125^\circ\text{C} \leq T_{kook} < -75^\circ\text{C}$	2
$T_{kook} < -125^\circ\text{C}$	3

Voor mengsels moet voor het kookpunt het zogenaamde 10% punt aangehouden worden, dat wil zeggen de temperatuur waarbij 10% van het mengsel overgedestilleerd is.

6. Voor gevaarlijke stoffen in niet-gevaarlijke oplossingen geldt de partiële dampspanning van de gevaarlijke stof bij procestemperatuur als de verzadigingsdruk bij procestemperatuur. De factor X neemt lineair toe van 1 tot 10 als de partiële dampspanning van de gevaarlijke stof bij procestemperatuur stijgt van 1 naar 3 bar.

7. De minimum waarde voor de factor O_3 is 0,1 en de maximum waarde is 10.

Grenswaarde G

De grenswaarde G is een maat voor de gevaarlijke eigenschappen van de stof gebaseerd op zowel de fysische als de giftige/explosieve/ onvlambare eigenschappen van de stof.

Ontplobbare stoffen¹²

De grenswaarde voor ontplobbare stoffen is de hoeveelheid stof (in kg) met een equivalente hoeveelheid energie van 1000 kg trinitrotolueen (TNT); de explosie-energie van TNT wordt gesteld op 4600 kJ/kg.

Voor ontplobbare stoffen wordt in Nederland in een aantal situaties regelgeving toegepast die op effectafstanden is gebaseerd. Toepassing van de subselectie is in dergelijke gevallen niet zinvol.

Ontvlambare stoffen

De grenswaarde voor onvlambare stoffen bedraagt 10.000 kg.

Ontvlambare stoffen worden binnen de subselectie gedefinieerd als onvlambare stoffen van klasse 0, 1 en 2 en stoffen die een procestemperatuur hebben die hoger is dan het vlampunt.

Giftige stoffen

De grenswaarde voor giftige stoffen (Tabel 4.6) wordt bepaald door de letale concentratie LC_{50} (rat, inh., 1u) en de fase-toestand bij 25 °C.

¹² Onder ontplobbare stoffen worden verstaan:

- a. 1°. stoffen en preparaten die ontploffingsgevaar opleveren door schok, wrijving, vuur of andere ontstekingsoorzaken (waarschuwingzin R2); 2°. pyrotechnische stoffen. Onder een pyrotechnische stof wordt verstaan een stof of een mengsel van stoffen die of dat tot doel heeft warmte, licht, geluid, gas of rook of een combinatie van dergelijke verschijnselen te produceren door middel van niet-ontploffende, zichzelf onderhoudende exotherme chemische reacties; 3°. ontplobbare of pyrotechnische stoffen en preparaten die in voorwerpen zijn vevat;
- b. stoffen en preparaten die ernstig ontploffingsgevaar opleveren door schok, wrijving, vuur of andere ontstekingsoorzaken (waarschuwingzin R3).

Tabel 4.6 Grenswaarde G voor giftige stoffen

LC ₅₀ (rat, inh., 1u) (mg/m ³)	Fase bij 25°C	Grenswaarde (kg)
LC ≤ 100	gas	3
	vloeibaar (ZL)	3
	vloeibaar (L)	10
	vloeibaar (M)	30
	vloeibaar (H)	100
	vloeibaar (ZH)	300
	vast	300
100 < LC ≤ 500	gas	30
	vloeibaar (ZL)	30
	vloeibaar (L)	100
	vloeibaar (M)	300
	vloeibaar (H)	1000
	vloeibaar (ZH)	3000
	Vast	3000
500 < LC ≤ 2000	gas	300
	vloeibaar (ZL)	300
	vloeibaar (L)	1000
	vloeibaar (M)	3000
	vloeibaar (H)	10.000
	vloeibaar (ZH)	∞
	vast	∞
2000 < LC ≤ 20.000	gas	3000
	vloeibaar (ZL)	3000
	vloeibaar (L)	10.000
	vloeibaar (M)	∞
	vloeibaar (H)	∞
	vloeibaar (ZH)	∞
	vast	∞
LC > 20.000	alle fasen	∞

Opmerkingen:

- De fasetoestand van de stof (gas, vloeibaar en vast) veronderstelt een temperatuur van 25°C. Verder geldt voor vloeistoffen de volgende onderverdeling:
 - Vloeistof (ZL): atmosferisch kookpunt $T_{\text{kook}} < 40^{\circ}\text{C}$
 - Vloeistof (L): $40^{\circ}\text{C} \leq$ atmosferisch kookpunt $T_{\text{kook}} < 80^{\circ}\text{C}$
 - Vloeistof (M): $80^{\circ}\text{C} \leq$ atmosferisch kookpunt $T_{\text{kook}} < 120^{\circ}\text{C}$
 - Vloeistof (H): $120^{\circ}\text{C} \leq$ atmosferisch kookpunt $T_{\text{kook}} < 160^{\circ}\text{C}$
 - Vloeistof (ZH): $160^{\circ}\text{C} \leq$ atmosferisch kookpunt T_{kook}
- LC₅₀(rat, inh., 1u) is de LC₅₀-waarde voor ratten die gedurende 1 uur via inhalatie worden blootgesteld aan stoffen. Voor een aantal giftige stoffen is deze waarde te vinden in de stofdocumenten [22]. Wanneer daar geen LC₅₀

waarde beschikbaar is, geeft de lijst toxiciteitsgegevens uit Serida LC₅₀ waarden [23].

Berekening van het aanwijzingsgetal

Het aanwijzingsgetal A_i voor een stof i wordt als volgt berekend:

$$A_i = \frac{Q_i \times O_1 \times O_2 \times O_3}{G_i}$$

waarbij:

Q_i	=	de in het insluitsysteem aanwezige hoeveelheid stof i (in kg)
O_1	=	de factor voor het type insluitsysteem (proces of opslag) (-)
O_2	=	de factor voor de ligging van het insluitsysteem: binnen, met tankput of buiten (-)
O_3	=	de factor voor de procescondities (-)
G_i	=	de grenswaarde van stof i (in kg).

Voor ontplofbare stoffen geldt: $O_1 = O_2 = O_3 = 1$ en dus: $A = Q / G$.

Binnen één insluitsysteem kunnen meerdere stoffen en procescondities aanwezig zijn. In dat geval wordt voor iedere stof i en voor iedere procesconditie p een aanwijzingsgetal $A_{i,p}$ berekend.

Het aanwijzingsgetal A voor een insluitsysteem is de som van alle aanwijzingsgetallen over alle stoffen i en procescondities p : $\sum_{i,p} A_{i,p}$. Deze som wordt apart berekend voor ieder van de drie verschillende stofcategorieën: ontvlambare stoffen (A^F), giftige stoffen (A^T) en ontplofbare stoffen (A^E):

A^T	=	$\sum_{i,p} A_{i,p}$, som van alle giftige stoffen en procescondities
A^F	=	$\sum_{i,p} A_{i,p}$, som van alle ontvlambare stoffen en procescondities
A^E	=	$\sum_{i,p} A_{i,p}$, som van alle ontplofbare stoffen en procescondities

Een insluitsysteem kan dus maximaal drie verschillende aanwijzingsgetallen krijgen.

Opmerking:

1. Indien een stof tot meerdere stofcategorieën behoort, wordt voor iedere categorie apart een aanwijzingsgetal berekend. Dus als een stof zowel giftig als ontvlambaar is, worden er twee aanwijzingsgetallen $A_{i,p}$ berekend:
 - a. $A^T_{i,p}$ voor de stof als giftige stof, waarbij gebruik wordt gemaakt van de totale hoeveelheid Q_i , en de grenswaarde G^T_i , corresponderend met de giftige eigenschappen.
 - b. $A^F_{i,p}$ voor de stof als ontvlambaar stof, waarbij gebruik wordt gemaakt van de totale hoeveelheid Q_i , en de corresponderende grenswaarde voor ontvlambare stoffen, G^F_i .

Voor de toekenning van een stof aan een stofcategorie moet worden aangesloten bij de berekening. Dit betekent dat bijvoorbeeld allylchloride, ammoniak, koolmonoxide en tetra-ethyllood in de subselectie als alleen giftig worden ingedeeld en acroleïne, acrylnitril, allylalcohol, cyaanwaterstof en ethyleenoxide als zowel giftig als ontvlambaar worden ingedeeld.

4.2.2.4.3 Berekening van het selectiegetal S

Het selectiegetal S is een maat voor het gevaar van een insluitsysteem op een specifieke locatie en wordt berekend door het aanwijzingsgetal A van een insluitsysteem te vermenigvuldigen met een factor $(100/L)^2$ voor giftige stoffen en een factor $(100/L)^3$ voor ontvlambare of ontplofbare stoffen:

$$S^T = \left(\frac{100}{L}\right)^2 A^T \quad \text{voor giftige stoffen}$$
$$S^F = \left(\frac{100}{L}\right)^3 A^F \quad \text{voor ontvlambare stoffen}$$
$$S^E = \left(\frac{100}{L}\right)^3 A^E \quad \text{voor ontplofbare stoffen}$$

L is de afstand van het insluitsysteem naar de specifieke locatie in meters en is minimaal 100 m.

Het selectiegetal moet voor iedere insluitsysteem worden berekend op ten minste acht punten op de grens van de Seveso-inrichting. De afstand tussen twee naast elkaar gelegen punten mag niet groter zijn dan 50 meter. Het selectiegetal moet worden berekend voor de grens van de Seveso-inrichting (zie voetnoot 7). Indien de Seveso-inrichting grenst aan oppervlaktewater, dan wordt het selectiegetal berekend aan de overzijde van het water.

Opmerking

1. De selectie van insluitsystemen vindt plaats op de grens van de Seveso-inrichting en aan de overzijde van het water. De selectie is bedoeld om de belangrijkste insluitsystemen voor de externe veiligheid te bepalen, dat wil zeggen buiten de Seveso-inrichting en op het land aan de overzijde van het water. Dit betekent dat de risicocontouren geen betrouwbaar beeld geven van het risico binnen de grens van de Seveso-inrichting en op het water.

4.2.2.4.4 Selectie van insluitsystemen

Een insluitsysteem wordt opgenomen in de rapportage indien:

- het selectiegetal van een insluitsysteem groter is dan één op een punt op de grens van de Seveso-inrichting (of op de tegenover gelegen oever).

Wanneer voor een Seveso-inrichting het aantal geselecteerde insluitsystemen via de bovenstaande selectie kleiner is dan vijf, moeten de vijf insluitsystemen met de grootste selectiegetallen meegenomen worden in de rapportage. Wanneer het aantal geselecteerde insluitsystemen via de bovenstaande selectie groter is dan vijf, dan is het mogelijk om via de '50%-regel' het aantal insluitsystemen dat moet worden meegenomen te reduceren. De 50%-regel is als volgt:

- Een insluitsysteem wordt opgenomen indien het selectiegetal van een insluitsysteem groter is dan één op een punt op de grens van de Seveso-inrichting (of op de tegenover gelegen oever) en groter is dan 50% van het grootste berekende selectiegetal van alle insluitsystemen op dit punt.

Bij toepassing van deze 50%-regel gelden de volgende regels:

1. Voor elk punt op de grens van de Seveso-inrichting worden ten minste drie¹³ insluitsystemen met een selectiegetal groter dan één geselecteerd.
2. De toepassing van de 50%-regel moet inzichtelijk worden gemaakt door per punt op de grens van de Seveso-inrichting aan te geven welke insluitsystemen worden geselecteerd en welke insluitsystemen met een selectiegetal groter dan één niet worden geselecteerd.
3. Insluitsystemen met een verwaarloosbaar kleine faalfrequentie (kleiner dan 1×10^{-8} per jaar) moeten buiten beschouwing worden gelaten bij de toepassing van de 50%-regel. Hetzelfde geldt voor insluitsystemen met voor de externe veiligheid verwaarloosbare effecten als gevolg van aanwezige voorzieningen.
4. Er worden voor een Seveso-inrichting minimaal vijf insluitsystemen geselecteerd.

Opmerkingen:

1. Effectafstanden van giftige stoffen kunnen aanzienlijk groter zijn dan de effectafstanden van ontvlambare stoffen. Het kan daarom voorkomen dat op de grens het risico bepaald wordt door de ontvlambare stoffen, terwijl op grotere afstand van de Seveso-inrichting ook de giftige stoffen een aanzienlijke bijdrage aan het risico geven. Indien met de beschreven methode alleen insluitsystemen met ontvlambare stoffen worden geselecteerd, terwijl ook giftige stoffen aanwezig zijn met een selectiegetal in dezelfde orde van grootte als het maximum berekende (ontvlambare) selectiegetal, dan moet ook het insluitsysteem met giftige stoffen in de rapportage worden opgenomen.
2. Wanneer voor een milieubelastende activiteit alle selectiegetallen kleiner zijn dan 1, mag niet worden geconcludeerd dat er helemaal geen risico- en effectberekeningen hoeven worden uitgevoerd (zie paragraaf 4.2.2.5.3).
3. Het is mogelijk minder dan vijf insluitsystemen mee te nemen in een rapportage, wanneer voor de andere insluitsystemen op basis van effectberekeningen is aangetoond dat de effecten niet reiken buiten de grens van de Seveso-inrichting.

4.2.2.5 Specifieke aandachtspunten voor de toepassing van de subselectie

4.2.2.5.1 Ontvlambare vloeistoffen

De grenswaarde voor ontvlambare vloeistoffen is gelijk voor K1- en K2-vloeistoffen, hoewel de ontstekingskans en het risico aanzienlijk kunnen verschillen. De subselectie mag er niet toe leiden dat opslagtanks met K1 vloeistof worden weggelaten uit de rapportage door de aanwezigheid van opslagtanks met K2-vloeistof of door de aanwezigheid van opslagtanks met stoffen die een procestemperatuur hebben die gelijk is aan of hoger is dan het vlampunt.

¹³ Wanneer er op een bepaald punt op de grens slechts één of twee insluitsystemen zijn met een selectiegetal groter dan één, dan worden alleen die insluitsystemen geselecteerd voor dat punt.

4.2.2.5.2 Transportleidingen

Transportleidingen op de Seveso-inrichting kunnen in belangrijke mate bijdragen aan het risico van de activiteit omdat ze nabij de grens kunnen liggen, een relatief hoge faalkans hebben en grote hoeveelheden gevaarlijke stof kunnen vrijkomen door de eigen inhoud en de voeding vanuit het reservoir.

Transportleidingen met vloeistoffen

Transportleidingen met vloeistoffen kunnen in de subselectie meegenomen worden. De aanwezige hoeveelheid is gelijk aan de hoeveelheid in de ingeblokte leiding met een minimum van 250 meter¹⁴. De factoren $O_1 - O_3$ zijn van toepassing. Een transportleiding op de Seveso-inrichting moet worden beschouwd als een proceseenheid, $O_1 = 1$. De factoren O_2 en O_3 zijn vermeld in Tabel 4.3 en Tabel 4.4. Een ondergrondse transportleiding op de Seveso-inrichting geldt als binnen ($O_2 = 0,1$).

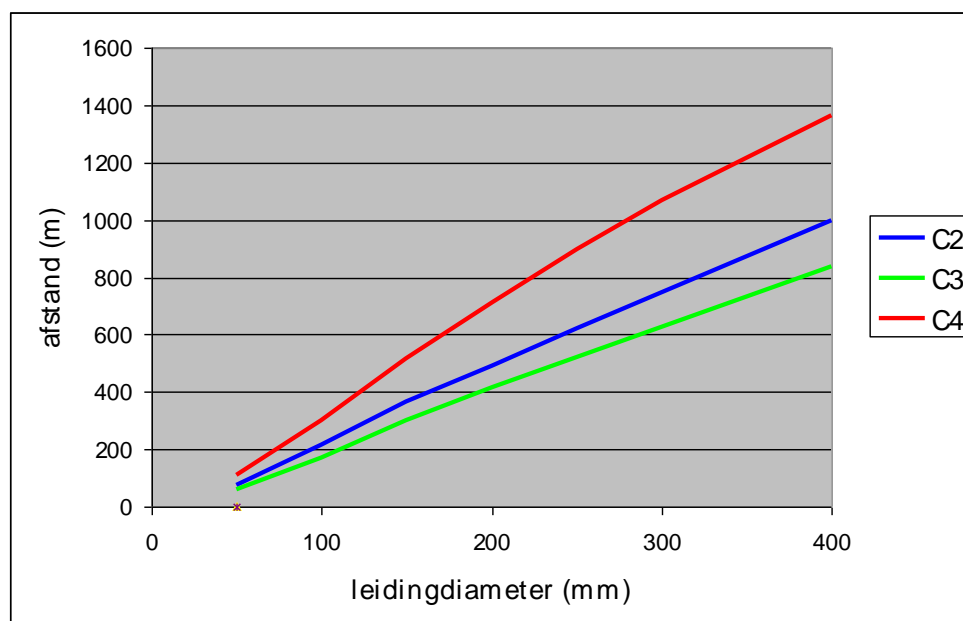
Bij het berekenen van het selectiegetal worden verschillende ontsnappingspunten op de transportleiding gebruikt als locatie van de totaal aanwezige hoeveelheid stof, waarbij de afstand tussen twee naast elkaar gelegen punten maximaal 50 meter is.

Een transportleiding op de Seveso-inrichting die wordt geselecteerd op basis van het selectiegetal van een of meer ontsnappingspunten, dient in haar geheel te worden opgenomen in de rapportage.

Transportleidingen met (tot vloeistof verdichte) gassen

Transportleidingen met giftige (tot vloeistof verdichte) gassen moeten standaard in de rapportage worden opgenomen, tenzij wordt aangetoond dat de leiding niet significant bijdraagt aan het risico, bijvoorbeeld op basis van effectafstanden. Voor transportleidingen met ontvlambare (tot vloeistof verdichte) gassen zijn effectafstanden opgenomen in Figuur 4.2.

¹⁴ Deze waarde is gebaseerd op een stroomsnelheid van 2 m/s en een sluittijd van 120 s voor de inblokafsluiters. Wanneer de sluittijd aanzienlijk langer is, moet uitgegaan worden van de uitstroomhoeveelheid op basis van de stroomsnelheid en de sluittijd plus de inhoud van de leiding.



Figuur 4.2 Effectafstand van leidingen met ontvlambare koolwaterstoffen van het type C2, C3 en C4

4.2.2.5.3 Gebruik van resultaten uit de subselectie

De subselectie van de insluitsystemen is bedoeld om tussen insluitsystemen onderscheid te maken gebaseerd op effectafstanden (buiten of binnen de grens van de Seveso-inrichting) en/of selectiegetallen (groter of kleiner dan 1). Hieronder wordt ingegaan hoe met de resultaten moet worden omgegaan als er geen onderscheid uit de subselectie naar voren komt.

- Alle effectafstanden liggen binnen de grens van de Seveso-inrichting.
Wanneer uit de vaststelling van de maximale effectafstanden per insluitsysteem naar voren komt, dat bij geen enkel insluitsysteem de effecten over de grens van de Seveso-inrichting liggen, dan is de conclusie dat geen van de insluitsystemen een bijdrage levert aan het externe risico. Als dat zo is hoeft er voor de betreffende Seveso-inrichting geen QRA te worden uitgevoerd.
- Alle aanwijzingsgetallen en selectiegetallen zijn kleiner dan of gelijk aan 1.
Wanneer uit de berekening van de aanwijzingsgetallen en de selectiegetallen blijkt dat voor alle insluitsystemen de berekende getallen kleiner zijn dan of gelijk aan 1, dan mag niet de conclusie worden getrokken dat een QRA niet hoeft te worden uitgevoerd. Dit mag alleen als de effectafstanden liggen binnen de grens van de Seveso-inrichting. De resultaten van de subselectie kunnen in dit geval wel worden gebruikt om de vijf belangrijkste insluitsystemen aan te wijzen voor het doen van de effectberekeningen dan wel voor de QRA.

4.2.3 Voorbeeld

Dit voorbeeld laat voor een Seveso-inrichting zien hoe de aanwijzingsgetallen en selectiegetallen berekend moeten worden. Er zijn vijf insluitsystemen. Omdat er

minimaal vijf insluitsystemen meegenomen moeten worden, is er geen selectie uitgevoerd.

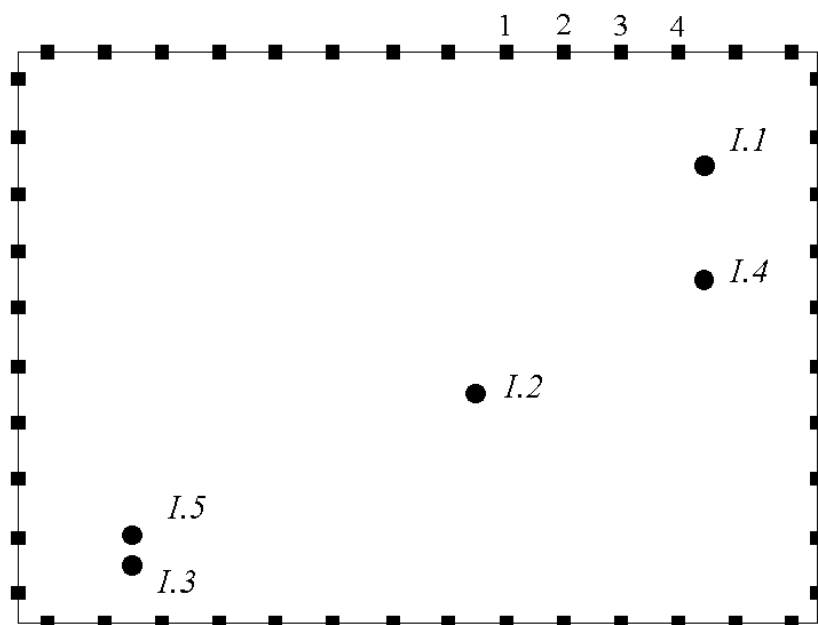
4.2.3.1 Beschrijving van de insluitsystemen

De Seveso-inrichting omvat vijf afzonderlijke insluitsystemen; het terrein is rechthoekig tussen het punt linksonder (–400 m, –200 m) en het punt rechtsboven (+300 m, +300 m). De insluitsystemen I₁ – I₅ zijn weergegeven in Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Insluitsystemen I1 – I5 op het terrein

Nr	Punt	Proces
I ₁	(200, 200)	Proceseenheid binnen, met 2100 kg zuiver chloor bij een procestemperatuur van 35°C (dampspanning 10 bar)
I ₂	(0, 0)	Proceseenheid buiten. Het insluitsysteem bevat verscheidene ontvlambare stoffen bij verschillende procescondities:
		Ethyleen 200.000 kg, vloeibaar bij –30°C (dampspanning 20 bar) Ethaan 100.000 kg, gas bij 80°C Butaan 10.000 kg, gas bij 30°C Propyleen 10.000 kg, vloeibaar bij –35°C (dampspanning 1,75 bar) Propaan 50.000 kg, vloeibaar bij 80°C (dampspanning 31 bar)
I ₃	(–300, –150)	Opslag voor zuiver chloorwaterstof. De opslag ligt buiten en bevat 4500 kg bij een temperatuur van 25°C (dampspanning 47 bar).
I ₄	(200, 100)	Proceseenheid binnen, waar 10.000 kg van een 30% zoutzuuroplossing in water bij een temperatuur van 100°C wordt verwerkt (vloeibaar, partiële dampspanning chloorwaterstof P _i = 1,1 bar).
I ₅	(–300, –125)	Een buiten gelegen proceseenheid met zuiver ammoniak (gas, 12.000 kg), een 60% ammoniakoplossing in water (9000 kg oplossing bij 43°C, met een partiële dampspanning P _i = 9,4 bar). In het insluitsysteem wordt benzine gebruikt (1000 kg) bij een temperatuur van 150°C.

De ligging van de insluitsystemen en grens van de Seveso-inrichting zijn gegeven in Figuur 4.3.



Figuur 4.3 Ligging van de insluitsystemen (I1 – I5) op de locatie en de punten op de grens van de Seveso-inrichting (weergegeven door vierkantjes) waar de selectiegetallen zijn berekend. De locaties 1, 2, 3, ... corresponderen met de punten in Tabel 4.11.

4.2.3.2 Berekening van het aanwijzingsgetal

4.2.3.2.1 Insluitsysteem I₁

Insluitsysteem I₁ is een proceseenheid ($O_1 = 1$) in een gebouw ($O_2 = 0,1$). Eén stof, chloor, is aanwezig in een hoeveelheid $Q = 2100$ kg. De dampspanning van chloor is groter dan 3 bar ($O_3 = 10$). Chloor is een giftige stof; in gasfase bij 25°C; $LC_{50}(\text{rat, inh., 1u}) = 866 \text{ mg/m}^3$ [23]. De grenswaarde is $G = 300$ kg, zodat $A^F_1 = 7$.

4.2.3.2.2 Insluitsysteem I₂

Insluitsysteem I₂ is een procesinsluitsysteem ($O_1 = 1$) buiten het gebouw ($O_2 = 1$). Er zijn vijf verschillende combinaties van stoffen en procescondities, zoals te zien is in Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Combinaties van stoffen en procescondities bij Insluitsysteem I₂

Stof	Q	O ₃	G	A ^F	Opm.
Ethyleen	200.000 kg	10	10.000 kg	200	1
Ethaan	100.000 kg	10	10.000 kg	100	2
Butaan	10.000 kg	10	10.000 kg	10	3
Propyleen	10.000 kg	5,4	10.000 kg	5,4	4
Propaan	50.000 kg	10	10.000 kg	50	5

Opmerkingen:

1. Ethyleen is een ontvlambare stof met een dampspanning groter dan 3 bar onder de procescondities.
2. Ethaan is een ontvlambare stof in gasfase onder de procescondities.
3. Butaan is een ontvlambare stof in gasfase onder de procescondities.
4. Propyleen is een ontvlambare stof met een dampspanning P_i van 1,75 bar bij de procestemperatuur $T_p = -35^\circ\text{C}$. Dus $X = 4,5 \times 1,75 - 3,5 = 4,4$. Het kookpunt T_{kook} is gelijk aan -48°C . Dus $\Delta = 1$ en $O_3 = 5,4$.
5. Propaan is een ontvlambare stof met een dampspanning groter dan 3 bar onder de procescondities.

4.2.3.2.3 Insluitsysteem I3

Insluitsysteem I₃ is bestemd voor opslag ($O_1 = 0,1$) en ligt buiten ($O_2 = 1$). De aanwezige hoeveelheid chloorwaterstof (Q) bedraagt 4500 kg. De dampspanning van chloorwaterstof is 47 bar ($O_3 = 10$). Chloorwaterstof is een giftige stof, in gasfase bij 25°C ; $\text{LC}_{50}(\text{rat, inh., 1u}) = 4746 \text{ mg/m}^3$ [23] zodat de grenswaarde $G = 3000 \text{ kg}$ en $A^T_3 = 1,5$.

4.2.3.2.4 Insluitsysteem I4

Zoutzuur (30%) is geclassificeerd als bijtend, en niet als giftig. Daarom wordt deze oplossing niet meegenomen in de subselectie.

4.2.3.2.5 Insluitsysteem I5

Insluitsysteem I₅ is een procesinsluitingsysteem ($O_1 = 1$) en ligt buiten ($O_2 = 1$). Drie combinaties van stoffen en procescondities zijn aanwezig. Omdat ammoniak in alleen als giftig wordt meegenomen, is alleen het giftige aanwijzingsgetal van belang. De combinaties van stoffen en procescondities zijn weergegeven in Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Combinaties van stoffen en procescondities bij Insluitsysteem I5

Stof	Q	O ₃	G	A ^F	A ^T	Opm.
Ammoniak, zuiver	12.000 kg	10	3.000 kg		40	1
Ammoniak, oplossing	5400 kg	10	3.000 kg		18	2
Benzine	1000 kg	10	10.000 kg	1		3

Opmerkingen:

1. Ammoniak is onder de procescondities een gas. De grenswaarde voor deze giftige stof bedraagt 3000 kg omdat ammoniak een gas is bij 25°C ; $\text{LC}_{50}(\text{rat, inh., 1u}) = 6000 \text{ mg m}^{-3}$ [23].
2. De hoeveelheid ammoniak, Q, in de oplossing bedraagt 60% van 9000 kg = 5400 kg. Aangezien de partiële dampspanning groter is dan 3 bar, is $O_3 = 10$.
3. Benzine is een ontvlambare stof. De procestemperatuur is hoger dan het 10%-punt. De dampspanning bij 150°C moet worden bepaald. In het voorbeeld nemen we aan dat het groter dan 3 bar is, zodat $O_3 = 10$.

4.2.3.2.6 Overzicht aanwijzingsgetallen

Een overzicht van de aanwijzingsgetallen is opgenomen in Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Aanwijzingsgetallen van de insluitsystemen

Inst	Stof	Type	O ₁	O ₂	O ₃	Q	G	A _i
I ₁	Chloor	T	1	0.1	10	2100 kg	300 kg	7
I ₂	Ethyleen	F	1	1	10	200.000 kg	10.000 kg	200
	Ethaan	F	1	1	10	100.000 kg	10.000 kg	100
	Butaan	F	1	1	10	10.000 kg	10.000 kg	10
	Propyleen	F	1	1	5,4	10.000 kg	10.000 kg	5,4
	Propaan	F	1	1	10	50.000 kg	10.000 kg	50
I ₃	HCl	T	0,1	1	1	45.000 kg	3000 kg	1,5
I ₄	30%-HCl	-	-	-	-	-	-	-
I ₅	Ammoniak (g)	T	1	1	10	12.000 kg	3000 kg	40
	Ammoniak (v)	T	1	1	10	5400 kg	3000 kg	18
	Benzine	F	1	1	10	1000 kg	10.000 kg	1

De aanwijzingsgetallen voor de verschillende insluitsystemen zijn:

insluitsysteem I ₁	$A^T = 7$
insluitsysteem I ₂	$A^F = 365$
insluitsysteem I ₃	$A^T = 1,5$
insluitsysteem I ₅	$A^T = 58, A^F = 1$

4.2.3.3 Berekening van het selectiegetal

Het selectiegetal moet worden berekend voor punten op de grens van de Seveso-inrichting. In dit geval zijn 48 punten op de grens geselecteerd, met een onderlinge afstand van 50 meter (zie Figuur 4.3). Het selectiegetal is berekend voor de afstand van ieder punt tot het insluitsysteem (minimaal 100 meter). De resultaten zijn weergegeven in Tabel 4.11.

De insluitsystemen die per locatie geselecteerd worden zijn **vet** aangegeven. Omdat het minimum aantal insluitsystemen voor de QRA gelijk is aan vijf moeten in de QRA alle vier insluitsystemen met gevaarlijke stoffen meegenomen worden, tenzij op basis van effectberekeningen nog aangetoond wordt dat de effecten niet buiten de grens van de Seveso-inrichting komen.

Tabel 4.11 Selectiegetallen bij de geselecteerde punten

nr	X (m)	Y (m)	S ₁	S ₂	S ₃	S ₅
			A ₁ ^T = 7	A ₂ ^F = 365	A ₃ ^T = 1,5	A ₅ ^T = 58
1	25	300	1,7	13,4	0,0	2,0
2	75	300	2,7	12,3	0,0	1,8
3	125	300	4,5	10,6	0,0	1,6
4	175	300	6,6	8,7	0,0	1,4
5	225	300	6,6	6,9	0,0	1,3
6	275	300	4,5	5,4	0,0	1,1
7	300	275	4,5	5,4	0,0	1,1
8	300	225	6,6	6,9	0,0	1,2
9	300	175	6,6	8,7	0,0	1,3
10	300	125	4,5	10,6	0,0	1,4
11	300	75	2,7	12,3	0,0	1,5
12	300	25	1,7	13,4	0,0	1,5
13	300	-25	1,2	13,4	0,0	1,6
14	300	-75	0,8	12,3	0,0	1,6
15	300	-125	0,6	10,6	0,0	1,6
16	300	-175	0,5	8,7	0,0	1,6
17	275	-200	0,4	9,3	0,0	1,7
18	225	-200	0,4	13,4	0,1	2,1
19	175	-200	0,4	19,4	0,1	2,5
20	125	-200	0,4	27,8	0,1	3,1
21	75	-200	0,4	37,5	0,1	4,0
22	25	-200	0,4	44,6	0,1	5,2
23	-25	-200	0,3	44,6	0,2	7,1
24	-75	-200	0,3	37,5	0,3	10,3
25	-125	-200	0,3	27,8	0,5	16,0
26	-175	-200	0,2	19,4	0,8	27,3
27	-225	-200	0,2	13,4	1,8	51,6
28	-275	-200	0,2	9,3	4,8	92,8
29	-325	-200	0,2	6,6	4,8	92,8
30	-375	-200	0,1	4,8	1,8	51,6
31	-400	-175	0,1	4,4	1,4	46,4
32	-400	-125	0,2	5,0	1,4	58,0
33	-400	-75	0,2	5,4	1,0	46,4
34	-400	-25	0,2	5,7	0,6	29,0
35	-400	25	0,2	5,7	0,4	17,8
36	-400	75	0,2	5,4	0,2	11,6
37	-400	125	0,2	5,0	0,2	8,0
38	-400	175	0,2	4,4	0,1	5,8
39	-400	225	0,2	3,8	0,1	4,4
40	-400	275	0,2	3,2	0,1	3,4
41	-375	300	0,2	3,3	0,1	3,1
42	-325	300	0,2	4,2	0,1	3,2
43	-275	300	0,3	5,4	0,1	3,2
44	-225	300	0,4	6,9	0,1	3,1
45	-175	300	0,5	8,7	0,1	3,0
46	-125	300	0,6	10,6	0,1	2,7
47	-75	300	0,8	12,3	0,1	2,5
48	-25	300	1,2	13,4	0,1	2,3

4.2.4 *Toelichting subselectie*

De subselectie is hoofdzakelijk gebaseerd op het systeem uit het Paarse Boek en het rapport 'Onderzoek naar uniformering subselectiemethodiek QRA' [24] van Tebodin. Ten opzichte van de beschreven methodiek in PGS 3 zijn de belangrijkste aanpassingen de selectie op basis van maximale effectafstanden, het verfijnen van de indeling van giftige vloeistoffen naar kookpunt en de voorwaarden voor de toepassing van de 50%-regel. Naast deze verschillen zijn er tekstuele aanpassingen en aanvullingen gedaan om het geheel te verduidelijken.

4.2.4.1 Reikwijdte van de subselectie

Het rapport 'Onderzoek naar uniformering subselectiemethodiek QRA' [24] van Tebodin stelt voor een lijst met 'extreem gevaarlijke stoffen' op te nemen, zoals fosgeen, ethyleenoxide, fluorwaterstof en LPG. In het rapport is ook aangegeven dat deze lijst overbodig is, wanneer de andere maatregelen worden toegepast. Op grond hiervan is besloten geen lijst met 'extreem gevaarlijke stoffen' op te nemen.

4.2.4.1.1 Reactieproducten en giftige verbrandingsproducten

In het rapport 'Onderzoek naar uniformering subselectiemethodiek QRA' van Tebodin wordt voorgesteld: "Verwoord in CPR 18 dat het bedrijf moet onderzoeken waar mogelijk gevaarlijke verbrandingsproducten en reactieproducten kunnen ontstaan en 'run-away' reacties kunnen optreden. De insluitsystemen waarin deze producten en reacties voor kunnen komen dienen te worden meegenomen in de subselectie." Als reactieproducten en 'run-away' reacties kunnen leiden tot letale effecten buiten de inrichting, is dit een belangrijk aandachtspunt in de rapportage, waarbij ook de kans van optreden een belangrijke rol kan spelen. De subselectie is hiervoor minder geschikt, omdat de kans van optreden hierin niet tot uiting komt. Daarom is besloten op te nemen dat reactieproducten en 'run-away' reacties in de rapportage zelf beschouwd moeten worden.

4.2.4.1.2 Bulkverladingsactiviteiten

Bulkverlading was een aandachtspunt in de subselectie omdat in de subselectie geen rekening wordt gehouden met de faalfrequentie. Voor de verlading en de aanwezigheid van transporteenheden in een inrichting kon dit op twee manieren verkeerd uitwerken. Ten eerste bestond de mogelijkheid dat de verlading niet geselecteerd werd door de aanwezigheid van een groot opslagreservoir, hoewel de verlading wel een significante bijdrage aan de risico's heeft ten gevolge van de relatief hoge faalfrequentie. Ten tweede was er de mogelijkheid dat een opslagreservoir niet geselecteerd werd doordat een transporteenheid een groter selectiegetal had, hoewel de transporteenheid misschien maar een fractie van de tijd aanwezig was. In het rapport 'Onderzoek naar uniformering subselectiemethodiek QRA' [24] van Tebodin is daarom voorgesteld bulkverlading altijd mee te nemen in de QRA.

Dit voorstel is overgenomen. Enkele grote chemische bedrijven passen in overleg met het bevoegd gezag wel een subselectie toe voor de bulkverlading. Daarom is de mogelijkheid open gehouden een (deel van de) bulkverlading niet mee te nemen in de QRA wanneer aangetoond wordt dat deze bijdrage verwaarloosbaar is. Ook is toegevoegd dat in een situatie dat een transporteenheid als opslagreservoir wordt gebruikt, deze wel in de subselectie kan worden beschouwd. De faalfrequenties van de transporteenheid zelf zijn namelijk vergelijkbaar met de faalfrequenties van een opslagreservoir.

4.2.4.2 De subselectie

Het stappenplan is gebaseerd op het Tebodin-rapport (waar de effectbenadering stap 1 is en de selectiegetallen stap 2 vormen) met de aanpassingen zoals in de werkgroep Unificatie is besproken. Dit laatste houdt vooral in dat de mogelijkheid bestaat om niet de effectbenadering toe te passen, maar direct met de selectiegetallen te beginnen (verslag van bijeenkomst 21 oktober 2004). Daarnaast is gekozen voor de waarde $X = 5$ voor het minimum aantal geselecteerde insluitsystemen.

4.2.4.2.1 Selectie op basis van effectafstand

De maximale effectafstand en de methode voor het bepalen van deze afstand zijn hier gedefinieerd. Hierbij is gekozen voor 1% letaliteit bij D5 (als vaak voorkomende, gemiddelde weerklasse) en F1,5 (als ongunstigste weerklasse voor giftige stoffen) en het ongunstigste scenario. Vaak levert het zogenaamde '10 minuten scenario' grotere effectafstanden dan het 'instantaan scenario'. Voor de kleinere systeeminhouden is het beter uit te gaan van het 'instantaan scenario'. Binnen een insluitsysteem kunnen meerdere temperaturen en drukken optreden. Hiervoor is niet expliciet aangegeven hoe hiermee moet worden omgegaan. Aangenomen wordt dat dit in de praktijk zichzelf wijst en niet leidt tot grote discussies.

4.2.4.2.2 Hoeveelheid stof, Q

In het Paarse Boek was opgenomen dat "Voor giftige stoffen in vaste vorm is alleen de hoeveelheid respirabel poeder van belang". Omdat dit PGS 15 opslagen betreft die nu buiten de subselectie worden gelaten is dit punt vervallen.

4.2.4.2.3 Grenswaarde, G

In paragraaf 4.2.2.4.2 is de indeling van giftige vloeistoffen naar kookpunt weergegeven. Deze indeling is een verfijning van de indeling in Paarse Boek. In bijlage J van het onderzoek door Tebodin wordt de herindeling onderbouwd. In het kort komt het erop neer dat sommige giftige vloeistoffen bij de bestaande indeling uit Paarse Boek geen grenswaarde hebben (grenswaarde oneindig), terwijl de stoffen wel gevolgen hebben voor de externe risico's. Een voorbeeld hiervan is acrylonitril. Deze stof krijgt volgens de indeling van Paarse Boek een grenswaarde van oneindig, terwijl het dikwijls als voorbeeldstof voor giftige vloeistoffen wordt gehanteerd. Door de herindeling is dit probleem aangepakt.

De definitie van ontplofbare stoffen is overgenomen uit het Brzo.

4.2.4.2.4 Berekening van het aanwijzingsgetal

In het Paarse Boek is geen relatie gelegd tussen het meenemen van stoffen die zowel giftig als ontvlambaar zijn in de subselectie en in de rapportage. Dit had tot gevolg dat een insluitsysteem met ammoniak zowel een ontvlambaar als giftig aanwijzingsgetal heeft, maar vervolgens alleen doorgerekend wordt als een giftige stof. Dit is onlogisch. Daarom is nu een één-op-één relatie gelegd tussen de classificatie in de rapportage en in de subselectie.

4.2.4.2.5 Berekening van het selectiegetal, S

Het voorstel in het Tebodin rapport om het selectiegetal niet meer aan de overzijde van water te berekenen is *niet* opgenomen, conform de bespreking van de werkgroep van 21 oktober 2004. Daarvoor in de plaats is een opmerking opgenomen over de waarde van de risicocontouren op het water. Door de aanpassing van de selectie hoeft het selectiegetal S niet meer worden berekend

voor iedere insluitsysteem op het dichtstbijzijnde punt in een (bestemde) woongebied.

4.2.4.2.6 Selectie van insluitsystemen

In paragraaf 4.2.2.4.4 is aangegeven onder welke voorwaarden deze 50%-regel mag worden toegepast:

1. Voor elk punt op de grens van de Seveso-inrichting worden ten minste drie insluitsystemen met een selectiegetal > 1 geselecteerd.
2. De toepassing van de 50%-regel moet inzichtelijk worden gemaakt door per punt op de grens van de Seveso-inrichting aan te geven welke insluitsystemen worden geselecteerd en welke insluitsystemen met een selectiegetal groter dan 1 niet worden geselecteerd.
3. Insluitsystemen met een verwaarloosbaar kleine faalfrequentie ($< 1 \times 10^{-8}$ per jaar) moeten buiten beschouwing worden gelaten bij de toepassing van de 50%-regel. Hetzelfde geldt voor insluitsystemen met voor de externe veiligheid verwaarloosbare effecten als gevolg van aanwezige voorzieningen.

In het onderzoek van Tebodin worden deze voorwaarden als volgt toegelicht:

“Ad 1. Indien door toepassing van de 50%-regel slechts 1 of 2 insluitsystemen op een punt van de terreingrens worden aangewezen, dan mag de 50%-regel niet worden toegepast voor dit punt, maar worden de drie insluitsystemen met de grootste selectiegetallen geselecteerd. Hierbij blijft wel gelden dat de insluitsystemen een selectiegetal groter dan één moeten hebben om aangewezen te kunnen worden.

Met deze maatregel wordt de kans kleiner dat insluitsystemen met een bijdrage aan het risico niet beschouwd worden in een QRA omdat deze door de aanwezigheid van een in de subselectie overheersend insluitsysteem niet zouden worden aangewezen.

Het minimum aantal insluitsystemen per punt op de terreingrens komt voort uit de ervaring met ranking van de bijdrage van scenario's aan berekende risico's. Vrijwel altijd worden de risico's op een bepaald punt bepaald door enkele scenario's (minder dan 10 scenario's). Aangenomen dat in een QRA er minimaal 3 scenario's per insluitsysteem worden beschouwd, is de ondergrens per punt op de terreingrens op 3 insluitsystemen gesteld.

Ad 2. In de rapportage van de QRA dient te worden beschreven welke insluitsystemen met een selectiegetal groter dan één niet worden beschouwd in de QRA en door welke insluitsystemen ze worden overschaduwd. Dit kunnen dus meerdere insluitsystemen zijn. Daarnaast dient voor deze 'overheersende' insluitsystemen te worden aangegeven welke tijdsfractie per jaar de kans aanwezig is dat ongevalsscenario's kunnen plaatsvinden. Aan de hand van deze informatie kan de uitvoerder en controleur van de subselectie een inschatting maken van de relatieve bijdrage van de geselecteerde insluitsystemen aan het te berekenen risico. Wanneer een, gezien de mogelijke effecten, overheersend insluitsysteem een verwaarloosbare bijdrage aan het risico heeft, dan mag een dergelijk insluitsysteem andere insluitsystemen niet elimineren bij de toepassing van de 50%-regel.

Ad 3. Bij het uitvoeren van de QRA worden voor de geselecteerde insluitsystemen scenario's uitgewerkt. Hierbij wordt rekening gehouden met vervolgcansen en aanwezige voorzieningen. Conform PGS 3 (paragraaf 3.1) is de bijdrage van een scenario aan het externe risico verwaarloosbaar indien de faalkans van het scenario kleiner dan 10^{-8} per jaar is of indien letaal letsel ten gevolge van het

scenario niet buiten de terreingrens kan optreden. Indien bij de uitwerking van scenario's van een insluitsysteem blijkt dat de faalkansen of voorziene effecten dusdanig klein zijn dat er geen significante bijdrage aan de te berekenen externe risico's wordt verwacht, dan mag dit insluitsysteem niet worden beschouwd bij de toepassing van de 50%-regel. In dit geval moet de subselectie opnieuw worden uitgevoerd waarbij dit insluitsysteem niet wordt beschouwd."

4.2.4.2.7 Transportleidingen

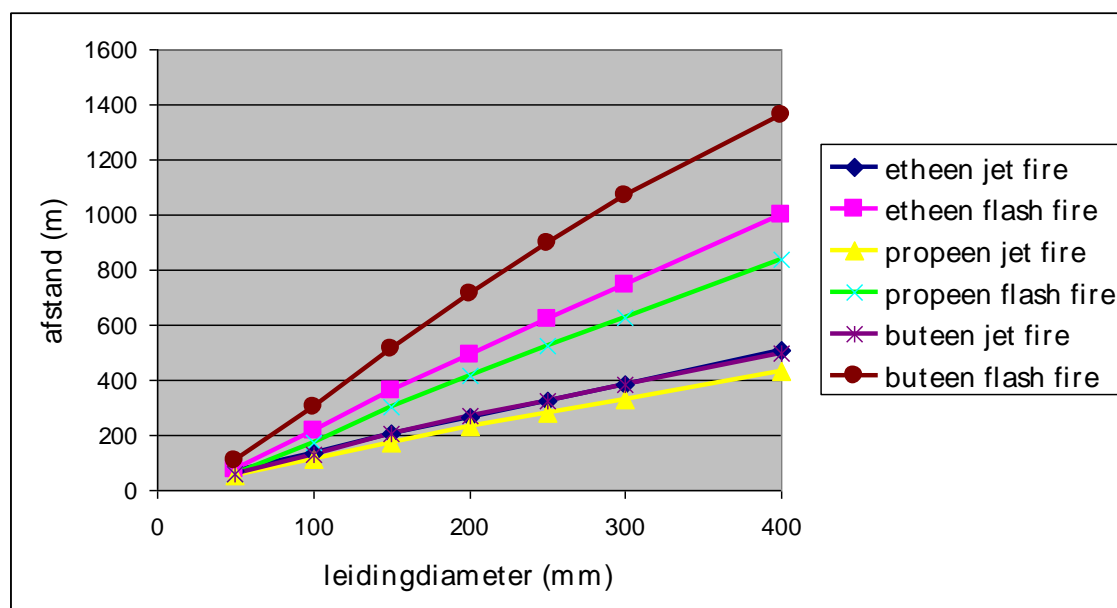
Voor transportleidingen is voor ontvlambare vloeistoffen gekozen voor een hoeveelheid op basis van de inhoud van een leiding. Het uitgangspunt is een stroomsnelheid van 1 – 2 m/s en een sluitijd van 120 s voor de afsluiters. Dit betekent dat de uitstroomhoeveelheid in de orde van 240 m leiding is (afgerond naar 250 meter).

Voor giftige en ontvlambare (tot vloeistof verdichte) gassen is gekozen voor een eenvoudige benadering op basis van effectafstanden. Voor ontvlambare gassen zijn hiervoor berekeningen uitgevoerd met Safeti-NL versie 6.51. De belangrijkste keuzes zijn gegeven in Tabel 4.12.

De effectafstand is bepaald voor de jet fire (afstand tot 1% letaliteit) en de 'flash fire envelope'; de resultaten zijn gegeven in Figuur 4.4. Hieruit blijkt dat de effectafstanden voor de flash fire envelope een factor 2 – 3 groter zijn dan voor de jet fire. Voor het rapport is gekozen voor de grootste afstand, dat wil zeggen de grootste afstand tot de 'flash fire envelope'.

Tabel 4.12 Scenario's voor de berekening van effectafstanden.

Parameter	Waarde	Opmerking
Scenario	Breuk leiding aan vat met leidinglengte 10 m	Leidingbreuk (korte leiding) met continue uitstroming
Conditie	Verzadigde vloeistof onder druk bij 20 °C	Een hogere temperatuur dan de standaard temperatuur als conservatieve benadering; alleen voor etheen is 8 °C aangehouden, d.w.z. net onder de kritische temperatuur.
	Pump head 20 m Liquid head 0 m	Verhoogde druk in de leiding ten gevolge van een pomp
Uitstroming	Hoogte 1 m Richting horizontaal	
Ruwheidslengte	0,3 m	Default voor Nederland
Stof	Etheen Propeen Buteen	Deze stoffen geven grotere effectafstanden dan ethaan, propaan en butaan



Figuur 4.4 Effectafstanden voor ethene, propaan en buteen voor een jet fire (grootste 1% letaliteitsafstand) en een flash fire (grootste afstand tot de 'flash fire envelope')

4.2.4.3 Voorbeeld

Het voorbeeld is aangepast in overeenstemming met de wijzigingen. In tegenstelling tot het voorbeeld in het PGS 3 is nu voor zoutzuur opgenomen dat een 30% oplossing niet giftig is, en dus niet hoeft te worden meegenomen.

4.3 Scenario's en faalfrequenties

De scenario's faalfrequenties in module I zijn afkomstig uit het Paarse Boek [4].

4.3.1 Aanvullende informatie over modellering

Voor de invoerwijze van een tankput, zie paragraaf 1.3.9.

Voor meer informatie over het weglaten van het BLEVE-scenario bij ingeterpte/ondergrondse opslagtanks, zie paragraaf 1.4.1.6.

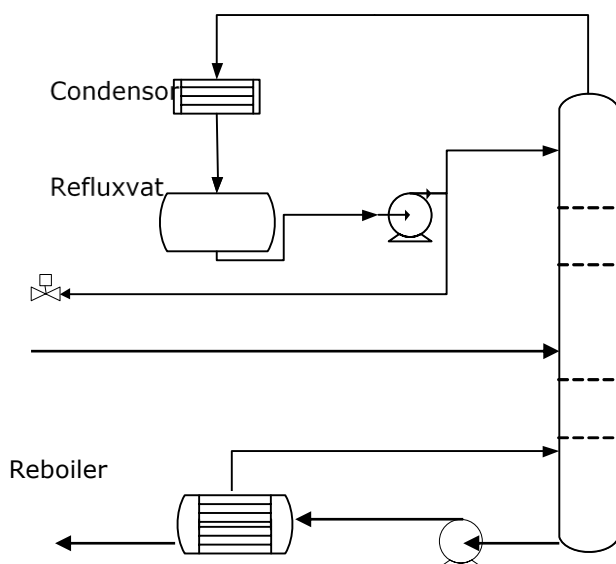
4.4 Rekenvoorbeelden

4.4.1 Destillatiekolom

De volgende elementen zijn standaard aanwezig bij een destillatiekolom (zie ook Figuur 4.5).

- Kolom
- Condensor en refluxvat
- Reboiler
- Pomp
- Leidingen tussen de kolom en de condensor, tussen kolom en refluxvat, tussen de kolom en de reboiler en tussen condensor en refluxvat
- Aanvoerleiding voor het mengsel, afvoerleidingen voor het topproduct en bodemproduct

- Drukveiligheid
- Snelafsluiters (optioneel)
- Instrumentatie voor niveau, druk, reflux, temperatuur



Figuur 4.5 Schema van een destillatiekolom

Voor de destillatie unit zoals gegeven in Figuur 4.5 zijn de scenario's uitgewerkt in Tabel 4.13.

Opmerkingen bij Tabel 4.13:

1. Bij het falen van de verschillende onderdelen, zoals het refluxvat, moet rekening worden gehouden met de toestroom uit andere installatieonderdelen, zoals de kolom.
2. Het 10 mm gat in de kolom dient standaard verdeeld te worden over de twee secties.
3. Voor de condensor is aangenomen dat de ontwerpdruk van de mantel lager is dan de druk in de leiding. Omdat de inhoud van de condensor beperkt is, is de uitstroming uit het verbindend leidingwerk bepalend.
4. De faalfrequenties van leidingen zijn afhankelijk van de leidingdiameter. Zie module I voor meer informatie.
5. De faalfrequenties van de pompen zijn afhankelijk van de soort pomp. Zie module I voor meer informatie.

Tabel 4.13 Scenario's voor de destillatie unit van Figuur 4.5

Onderdeel	Scenario	Frequentie (per jaar)
Kolom	1. Instantaan vrijkomen	5×10^{-6}
	2. Vrijkomen in 10 min.	5×10^{-6}
	3a. 10 mm gat, rectificerende sectie	5×10^{-5}
	3b. 10 mm gat, strippende sectie	5×10^{-5}
Condensor	1. Breuk 10 leidingen	1×10^{-5}
	2. Breuk leiding	1×10^{-3}
	3. lekkage	1×10^{-2}
Refluxvat	1. Instantaan vrijkomen	5×10^{-7}
	2. Vrijkomen in 10 min.	5×10^{-7}
	3. 10 mm gat	1×10^{-5}
Reboiler	1. Instantaan vrijkomen	5×10^{-6}
	2. Vrijkomen in 10 min.	5×10^{-6}
	3. 10 mm gat	1×10^{-4}
Leidingen: Kolom – Condensor, Condensor – Refluxvat, Refluxvat – Kolom, Kolom – Reboiler, Reboiler – Kolom	Breuk	(1×10^{-7} tot 1×10^{-6})
	Lekkage	(5×10^{-7} tot 5×10^{-6})
Pompen	Catastrofaal falen	(1×10^{-5} tot 1×10^{-4})
	Lekkage	(5×10^{-4} tot $4,4 \times 10^{-3}$)

4.4.2 Repressieve systemen

4.4.2.1 Tankput

Een atmosferische tank met acrylonitril is geplaatst in een tankput van 2000 m². Er moet gerekend worden met de scenario's zoals gegeven in Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Scenario's voor een acrylonitril tank in een tankput van 2000 m²

Scenario	Frequentie (per jaar)	Grootte vloeistofplas (m ²)
Instantaan	5×10^{-6}	3000
10 minuten uitstroming	5×10^{-6}	2000
10 mm gat	1×10^{-4}	2000

4.4.2.2 Inbloksystemen

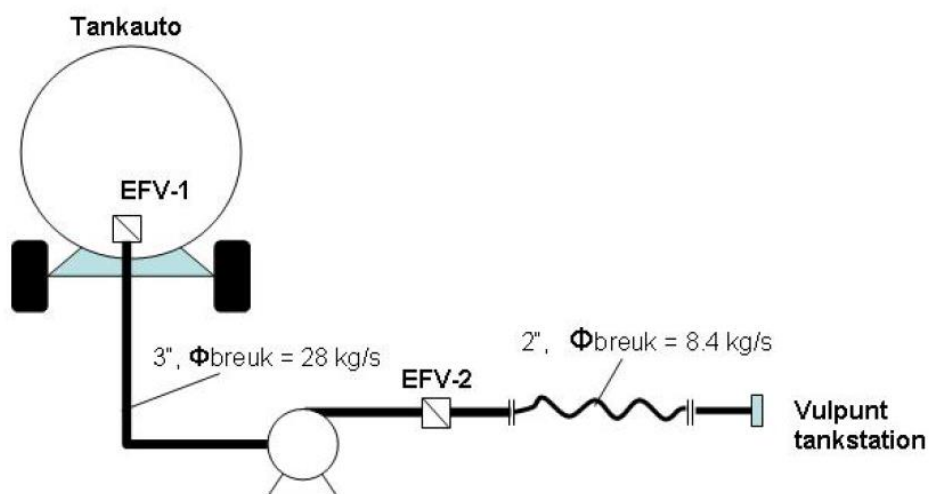
Een 10 meter leiding (3") is verbonden met de vloeistoffase van een druktank ammoniak (inhoud 100 ton). Er is een inlokafsluiter aanwezig tussen de leiding en de tank. De scenario's voor breuk van de leiding zijn voor de verschillende systemen gegeven in Tabel 4.15.

Tabel 4.15 Scenario's voor leidingbreuk (3", 10 meter) aan een ammoniak druktank (inhoud 100 ton) voor verschillende typen inbloksystemen

Inbloksysteem	Werking	Frequentie	Debiet	Uitstroomduur
Geen	n.v.t.	3×10^{-6} per jaar	16,5 kg/s	1800 s
Automatisch inbloksysteem	faalt werkt	3×10^{-9} per jaar $2,997 \times 10^{-6}$ per jaar	16,5 kg/s 16,5 kg/s	1800 s 120 s
Semi-automatisch inbloksysteem	faalt werkt	3×10^{-8} per jaar $2,97 \times 10^{-6}$ per jaar	16,5 kg/s 16,5 kg/s	1800 s 600 s
Niet-automatisch inbloksysteem	n.v.t.	3×10^{-6} per jaar	16,5 kg/s	1800 s

4.4.2.3 Doorstroombegrenzer

Bij de verlading van een tankauto met 20 ton LPG (zie Figuur 4.6) zijn twee doorstroombegrenzers aanwezig, namelijk inwendig (EFV-1 tussen tankauto en pomp, instelwaarde 13,1 kg/s) en na de pomp (EFV-2 tussen pomp en vulpunt, instelwaarde 7,4 kg/s). Op basis van de uitstroomdebieten [6] zijn de faalkansen voor de verschillende LOC's gegeven in Tabel 4.16, de resulterende scenario's zijn gegeven in Tabel 4.17.



Figuur 4.6 Verlading van een LPG tankauto [6]

Tabel 4.16 LOC's voor de verlading en de faalkansen voor de doorstroombegrenzers

LOC	Debiet (kg/s)	Kans op sluiten EFV-1	Kans op sluiten EFV-2
Breuk bodemleiding	28	0,94	n.v.t.
Lekkage bodemleiding	1,1	0	n.v.t.
Breuk losslang	8,4	0	0,88
Lekkage losslang	0,5	0	0

Tabel 4.17 Scenario's voor de verlading

LOC	Systeemreactie	Vervolgkans	Debiet	Tijdsduur
Breuk bodemleiding	EFV-1 sluit	0,94	28,0 kg/s	5 s
Breuk bodemleiding	EFV-1 faalt	0,06	28,0 kg/s	714 s
Lekkage bodemleiding	EFV-1 sluit niet	1	1,06 kg/s	1800 s
Breuk losslang	EFV-2 sluit	0,88	8,4 kg/s	5 s
Breuk losslang	EFV-2 faalt	0,12	8,4 kg/s	1800 s
Lekkage losslang	EFV-2 sluit niet	1	0,46 kg/s	1800 s

Opmerkingen:

1. De uitstroomduur van 5 s dient nog verlengd te worden met de tijd benodigd voor de uitstroom van de inhoud van de slangen met het gegeven uitstroomdebiet.
2. Er dient nog rekening gehouden te worden met de bijdrage van de uitstroming vanuit de opslagtank.

4.4.2.4 Terugslagklep

Bij de verlading van een LPG tankauto naar een opslagtank treedt bij breuk van de verlaadslang ook terugstroming op. Het uitstroomdebiet vanuit de opslagtank is gelijk aan 7 kg/s. Bij aanwezigheid van een terugstroomklep is de bijdrage van de terugstroming aan het breukscenario gegeven in Tabel 4.18.

Tabel 4.18 Bijdrage van de terugstroming uit de opslagtank aan het breukscenario

LOC	Systeemreactie	vervolgkans	Debiet	Tijdsduur
Breuk losslang	Terugslagklep sluit	0,94	7 kg/s	5 s
Breuk losslang	Terugslagklep faalt	0,06	7 kg/s	1800 s

4.4.2.5 Ingrijpen door operators

Bij de verlading van ammoniak naar een tankauto (uitstroomdebiet 8,4 kg/s) is continu toezicht door de operator. De aanwezigheid van de operator is gewaarborgd door een procedure. De operator heeft de mogelijkheid direct een noodknop in te drukken, die de verlading stopt en kleppen sluit. De scenario's voor de verlading zijn gegeven in Tabel 4.19.

Tabel 4.19 Verlading scenario's bij continue aanwezigheid van een operator

LOC	systeemreactie	vervolgkans	Debiet	Tijdsduur
Breuk laadslang	Ingrijpen operator	0,9	8,4 kg/s	120 s
Breuk laadslang	Geen ingrijpen operator	0,1	8,4 kg/s	1800 s
Lek laadslang	Ingrijpen operator	0,9	0,46 kg/s	120 s
Lek laadslang	Geen ingrijpen operator	0,1	0,46 kg/s	1800 s

Opmerkingen:

1. De uitstroomduur dient nog verlengd te worden met de tijd benodigd voor de uitstroom van de inhoud van de slangen met het gegeven uitstroomdebiet.

-
2. Er dient nog rekening gehouden te worden met een eventuele bijdrage van de uitstroming vanuit de tankauto.

5 Module II

Informatie volgt.

6 Module III

Informatie volgt.

7 Module IV

7.1 Inleiding

7.1.1 *Welke personen en objecten lopen gevaar?*

De activiteiten en objecten in de nabijheid van windturbines moeten in kaart worden gebracht. In principe worden alle activiteiten en objecten beschouwd die mogelijk door een afbrekend onderdeel getroffen kunnen worden. De maximale afstand die door een afbrekend rotorblad tijdens overtoeren situatie overbrugd kan worden, wordt de maximale werpafstand genoemd. Bevindt er zich geen object of activiteit binnen de berekende maximale werpafstand, dan is het verder uitvoeren van een risicoanalyse niet noodzakelijk.

De maximale werpafstand is afhankelijk van het type turbine en wordt onder andere bepaald door de diameter van de turbine, het rotortoerental en de ashoogte. Als richtlijn kunnen vuistregels (zie paragraaf 7.7.4) worden gebruikt. De werpafstanden kunnen ook berekend worden zoals beschreven in Hoofdstuk 2 van Module IV.

Wanneer een object of activiteit zich wel binnen de maximale werpafstand bevindt, kan het risico voor personen of objecten worden bepaald. Het uitdrukken van risico's voor personen gebeurt door het aangeven van de kans op overlijden ten gevolge van het falen van een windturbine. De trefkans voor objecten wordt per object bepaald. Voor een overzicht van overige wet- en regelgeving en beleid met betrekking tot windturbines voor de omgeving zie [25].

7.2 Bladbreek

In Module IV zijn het ballistisch model zonder luchtkrachten en het ballistisch model met luchtkrachten beschreven. Ballistisch model met luchtkrachten gecombineerd met zweefvlucht [26] wordt niet beschreven. Bij dit model wordt de vlucht van het afgebroken blad(deel) in eerste instantie beschreven met bovenstaand ballistisch model met luchtkrachten, waarbij na verloop van tijd het blad in een stabiele zweefvlucht terechtkomt, waarbij de liftkrachten bepalend zijn en niet de luchtkrachten. In de referentie [26] is uiteengezet onder welke condities de overgang naar een zweefvlucht mogelijk is en het blijkt dat de kans hierop zeer klein is, vandaar dat dit model verder niet beschouwd zal worden.

7.2.1 *Werpmodellen*

Liftkrachten

Ten gevolge van de aerodynamische lift ondervindt het blad een kracht loodrecht op zijn oppervlak. Direct na breek zal het blad in het vlak van de rotor wegvliegen, waarbij het zal roteren om zijn zwaartepunt.

Tijdens dit tuimelen, kan de gemiddelde waarde van de lift worden verwaarloosd [27].

Liftkrachten zijn wel van belang als het blad gaat zweven. Echter, bij de huidige kunststof bladen ligt het zwaartepunt op circa 1/3 van de bladlengte, waardoor het onwaarschijnlijk is dat een blad vanuit tuimelen overgaat in zweven, omdat dit een instabiele toestand is [26].

Bij beide modellen wordt dus verondersteld dat door de ligging van het zwaartepunt het blad tot inslag zal blijven tuimelen en dat de liftkrachten kunnen worden verwaarloosd.

Weerstandskrachten in rotorvlak

De luchtkrachten in het rotorvlak hebben tot gevolg dat de werpafstand volgens de kogelbaanberekeningen wordt beperkt. Verwaarlozing van deze weerstandskracht levert dus een conservatieve werpafstand op bij het kogelbaanmodel. De weerstandskracht is evenredig met het kwadraat van de relatieve snelheid van het blad ten opzichte van de lucht, zodat bij een overtoerensituatie de invloed van de luchtkrachten erg groot kan worden.

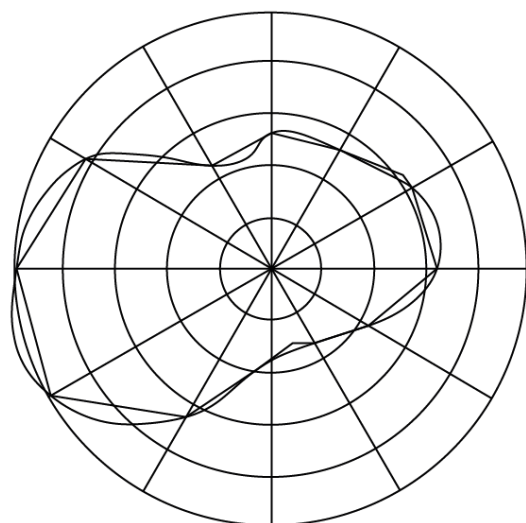
Weerstandskrachten loodrecht op rotorvlak

De luchtkracht loodrecht op het rotorvlak zal er voor zorgen dat het blad naar achteren wordt verplaatst. Dit aspect is alleen van belang als de invloed van de windrichting en windsnelheid in beschouwing wordt genomen, zoals bij het ballistisch model met luchtkrachten. Bij het kogelbaanmodel wordt dus impliciet aangenomen dat de invloed van de windrichting is te verwaarlozen. Daarnaast wordt voor de positie van de rotor aangenomen dat deze uniform verdeeld is. Deze aanname is gerechtvaardigd voor locaties waar de windrichtingverdeling vergelijkbaar is met die van Nederland. Voor locaties waar een bepaalde windrichting dominant is, zoals bij passaatwinden, is het wel van belang de windroos in de berekening mee te nemen.

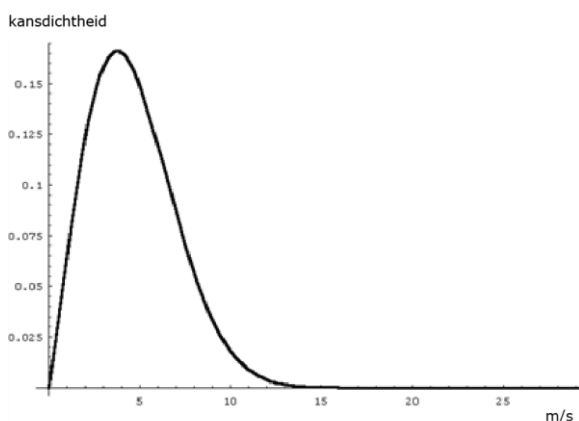
7.2.1.1 Ballistisch model met luchtkrachten

7.2.1.1.1 Verdelingsfuncties

De windrichtingverdeling en windsnelheidsverdeling zijn voor een groot aantal plaatsen in Nederland bekend [28] of te berekenen [29]. In onderstaande figuren is een voorbeeld van beide verdelingen gegeven voor de locatie Vlissingen.



Figuur 7.1: Relatieve windrichtingverdeling Vlissingen [28].



Figuur 7.2: Windsnelheidsverdeling (noord), Vlissingen [28]

7.2.2 Ongevallenscenario's

Om de kans op bladbreuk te kunnen specificeren moeten eerst alle scenario's en initiërende gebeurtenissen worden bepaald die kunnen leiden tot ongewenste situaties. Voor een specifieke turbine kan dit worden gedaan door een systeemanalyse. Hiermee wordt geanalyseerd wat de kans is dat een remsysteem faalt, dat een bladverstelsysteem faalt, dat een blad breekt onder bepaalde condities, etc. uitgaande van de faalfrequenties van de afzonderlijke componenten. In het algemeen is dit een arbeidsintensief proces en het is niet gebruikelijk dit speciaal t.b.v. een risicoanalyse voor bladbreuk te doen.

Op basis van gepubliceerde gegevens (zoals de Windkraft journals en gegevens van fabrikanten) en eerder uitgevoerde studies kunnen de risicoanalyses worden gebaseerd op bladbreuk bij normaal bedrijf, bladbreuk bij mechanisch remmen en bladbreuk bij overtoeren. Mechanisch remmen komt bij moderne windturbines niet meer voor. Er is hierdoor geen onderscheid meer te maken tussen bladbreuk bij normaal bedrijf of tijdens

mechanisch remmen. DNV KEMA onderscheidt daarom slechts twee categorieën: bladbreuk bij normaal bedrijf en bladbreuk tijdens overtoeren. Bij de nieuwste windturbines komt ook bladbreuk tijdens overtoeren niet meer voor. De faalfrequentie van bladbreuk door overtoeren is statistisch zeer klein (zie paragraaf 7.6).

7.2.3 Trefkansberekeningen

7.2.4 Wegen

7.2.4.1 Infrastructuur

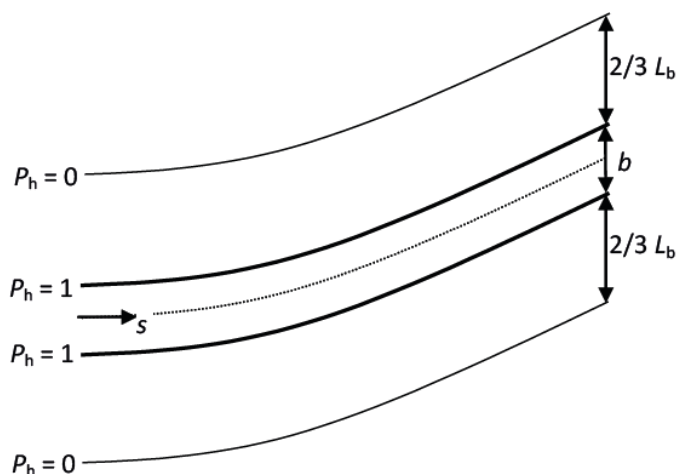
De kans dat een weg met breedte b wordt getroffen door een afgebroken blad is (zie Figuur 7.3):

$$p_w = F_a \int_s p_{ZWP_T}(s) ds \quad (7.1)$$

Waarbij s de contour langs de weg weergeeft en:

$$F_a = \left(b + \frac{2}{3} L_b \right) \quad (7.2)$$

Een factor is die de effectieve breedte van de weg verdisconteert.



Figuur 7.3: Overzicht parameters infrastructuur.

7.2.4.2 Passanten

De kans dat een passerende auto, trein of schip wordt geraakt kan uit vergelijking (7.1) worden afgeleid door de factor F_a te baseren op de breedte van het passerende object en tevens de verblijfstijd van het passerende object in rekening te brengen:

$$F_a = \frac{L_0}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \left(1,5 \cdot b_0 + \frac{2}{3} L_b \right) \quad (7.3)$$

Met

L_0 : lengte van het passerende object [m]
 v_0 : snelheid van het passerende object [m/s]
 b_0 : breedte van het passerende object [m].

De factor 1,5 in bovenstaande vergelijking is weer de schaduwfactor, waarmee in rekening wordt gebracht dat de passerende objecten een bepaalde hoogte hebben.

De lengte van het passerende object (trein, auto of schip) is de som van de echte lengte van het object vermeerderd met de remweg.

Bij berekening van het individueel passantenrisico en het maatschappelijk risico volgens de richtlijnen van ProRail en RWS [30] dient ook een persoon te worden beschouwd die onbeschermd voorbij komt. Op basis van vergelijking (7.1) en vergelijking (2.18) uit Module IV, kan dus worden afgeleid dat de kans dat een passerend individu wordt geraakt, kan worden berekend met:

$$F_a = \frac{1}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} 1,5 \cdot A_c \quad (7.4)$$

Met

v_0 : snelheid van de passant [m/s]
 A_c : kritiek oppervlak van het afgebroken blad [m²].

7.3 Mastbreuk

7.3.1 Trefkansberekeningen

7.3.2 Infrastructuur

Passanten

De kans dat een passerende auto, trein of schip wordt geraakt, kan worden afgeleid door de trefkans te vermenigvuldigen met de verblijfsfactor:

$$\tau = \frac{L_0}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (7.5)$$

Met:

L_0 : lengte van het passerende object [m]
 v_0 : snelheid van het passerende object [m/s]

De lengte van het passerende object (trein, auto of schip) is de som van de echte lengte van het object vermeerderd met de remweg.

Bij berekening van het individueel passanten risico en het maatschappelijk risico volgens de richtlijnen van ProRail en RWS [30] dient ook een persoon te worden beschouwd die onbeschermd voorbij komt. De kans dat een passant wordt getroffen kan worden berekend door de trefkans uit vergelijking (7.5) te vermenigvuldigen met de verblijfsfactor:

$$\tau = \frac{0,3}{v_0} \frac{1}{365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (7.6)$$

Met:

v_0 : snelheid van passant [m/s]

7.4 Incidenten binnen de rotordiameter

7.4.1 IJsafwerping

Uit ervaring is bekend dat in Nederland ijsafzetting op de bladen meestal ontstaat tijdens stilstand van de turbine. Bij kans op ijsvorming worden de turbines automatisch stilgezet (beveiliging), tot de oorzaak van het buiten werking stellen is opgeheven. Observaties van dit fenomeen hebben laten zien dat bij een kleine beweging of doorbuiging van het blad, wat al optreedt bij zeer geringe windsnelheid, het ijs in grote brokken naar beneden valt en dat langwerpige platen ijs in een strook onder het rotorvlak terecht komen. De brokken hebben een oppervlak dat kleiner is dan het blad zelf en een dikte van enkele millimeters tot een centimeter. Door het "dwarrelen" van de brokken ijs kunnen deze, afhankelijk van de hoogte van de windturbine in een strook van enkele tientallen meters breed terecht komen. Bij een turbine met een masthoogte van circa 65 m is waargenomen dat de stukken ijs op 10 - 15 m van het rotorvlak terecht kwamen.

Indien het gebied onder de rotor vrij toegankelijk is zal het aspect van afvallend ijs in de risicobeoordeling meegenomen moeten worden. De impact op een object is vergelijkbaar met die van brokken ijs die bijvoorbeeld van een vrachtwagen afwaaien en een achteropkomende auto treffen; meestal is de achteropkomende auto niet beschadigd. Onbeschermden personen kunnen mogelijk gewond raken. Het aantal keren per jaar dat ijs aangroeit aan een blad is sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden. Volgens schattingen van de opstellers van het handboek (2005) [31] komt de situatie in Nederland maximaal twee keer per jaar voor. Indien nodig of gewenst kan dit risico worden vermeden door bij ijsafzetting de turbine zodanig te kruien dat de strook onder het rotorvlak niet meer toegankelijk is voor onbeschermden personen.

In het het Bal, Artikel 4.428 is opgenomen dat indien een windturbine buiten bedrijf is gesteld, deze pas weer in werking wordt gesteld nadat de oorzaak van het buiten werking stellen is opgeheven. Mocht het in werking stellen van een windturbine met ijs op bladen toch gebeuren dan zijn de risico's voor de omgeving minimaal omdat het om kleine brokstukken gaat die relatief ver weg geslingerd kunnen worden. Het PR hiervan is verwaarloosbaar klein.

7.5 Incidenten met buisleidingen

7.5.1 *Ondergrondse buisleidingen*

7.5.1.1 Kansdichtheidsverdeling gondel en/of rotorafworp ondergrondse buisleidingen

Om het scenario van gondel en/of rotorafworp in een risicoanalyse mee te kunnen nemen, dient een kansdichtheidsverdeling van de trefkanslocatie bekend te zijn. Er is echter onvoldoende casuïstiek bekend om een verdeling af te kunnen leiden van incidenten. Wel kunnen er foto's van dergelijke incidenten gevonden worden, waarop te zien is dat de gondel of rotor direct naast de mast is neergekomen. Vanwege de massa van de gondel en rotor is het ook zeer aannemelijk dat deze niet ver van de voet van de windturbine valt. In de handleiding komt naar voren dat het effectgebied van het vallen van de gondel/rotor gelijk is aan de bladlengte (halve rotordiameter).

Het meest voor de hand liggende effectgebied is een cirkel rondom de voet van de windturbine. Er is niet genoeg data beschikbaar om een kansverdeling te kiezen voor dit tweedimensionale domein. Een bivariate normale verdeling lijkt, bij gebrek aan data, een acceptabele keuze aangezien hierbij de kans dat de gondel/rotor op een bepaalde afstand terecht komt groter wordt naarmate men dichter bij de voet van de windturbine komt (nog zonder rekening te houden met het bijbehorende oppervlak). Voor deze bivariate normale verdeling kan in beide richtingen x en y dezelfde standaarddeviatie σ gekozen worden en een verwachting van 0: waarden van constante kansverdeling zijn dan concentrische cirkels om de oorsprong.

Deze kansverdeling is gegeven in Module IV.

7.5.1.2 Rekenvoorbeeld kansdichtheidsverdeling gondel en/of rotorafworp ondergrondse buisleiding

Rekenvoorbeeld kansdichtheidsverdeling

Ter verduidelijking van de kansdichtheidsverdeling gondel en/of rotorafworp bij ondergrondse buisleidingen volgt een voorbeeld. Stel, een windturbine heeft een bladlengte van 40 m. Een buisleiding ligt op minimale afstand van 16 meter en heeft breedte b en lengte l . De kansdichtheid op 16 meter afstand kan uit de grafiek of tabel worden afgelezen bij $R = 16/40 = 0,4$ en betreft circa 0,7. De bovenkans voor het raken van dit element kan benaderd worden met deze genormaliseerde kansdichtheid maal het oppervlak van het kleine element met eveneens geschaalde breedte en lengte:

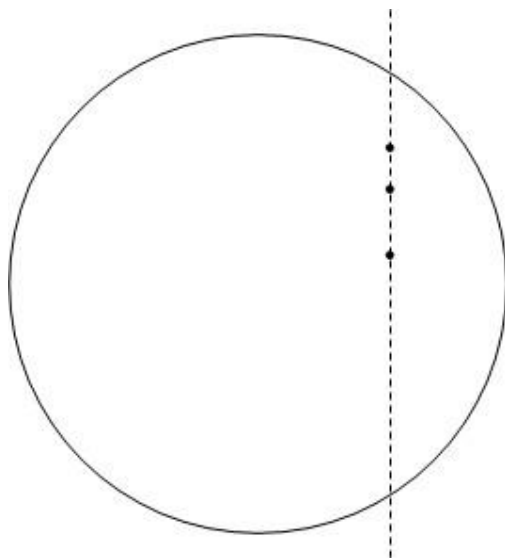
$$0,7 \cdot \frac{l}{L_b} \cdot \frac{b}{L_b} = 0,7 \cdot l \cdot b \cdot \frac{1}{40^2} \quad (7.7)$$

Om de kansbenadering per vierkante meter te vinden dient de kansdichtheid gedeeld te worden door de bladlengte in het kwadraat; dit

is volgens bovenstaand voorbeeld voor een afstand van 16 meter van de windturbine gelijk aan $0,7 / (40^2) = 4,4 \times 10^{-4}$. Voor toepassing in een kwantitatieve risicoanalyse van een buisleiding kan de raakkans van de buisleiding dan worden afgeschat door de kritische oppervlakte te verdelen in kleine stukjes en afzonderlijk de raakkans per stukje te berekenen aan de hand van bovenstaande bovenafschatting. Deze afschatting dient dan nog te worden vermenigvuldigd met de frequentie van het afvallen van de gondel/rotor, om tot een frequentie per vierkante meter per jaar te komen.

Rekenvoorbeeld effectgebied

Beschouw onderstaand bovenaanzicht van het effectgebied rondom een windturbine. De cirkel representeert het effectgebied van de gondel, welke de kleinste effectafstand heeft van gondel, mast en afworp van het blad (dus zowel mast, gondel als bladafworp zal in dit voorbeeld bijdragen aan het falen van de gasleiding). Gestippeld is het tracé van de gasleiding. Voor het middelste punt zullen de bijdragen van gondel, mast en blad worden bepaald.



Figuur 16: Schematisch bovenaanzicht van de voorbeeldberekening: een gasleiding doorkruist het effectgebied van de gondel, mast en blad van een windturbine. De gasleiding wordt gerepresenteerd door een reeks x en y coördinaten en bijbehorende dekking, waarvan drie opvolgende sets coördinaten in de figuur met stippen zijn weergegeven.

In dit voorbeeld wordt uitgegaan van een windturbine met mast met hoogte 90 m van 160 ton, een gondel van 50 ton en een blad met lengte 45 m van 7 ton en een nominaal toerental van 18 rpm (omwentelingen per minuut). Voor de pijpleiding wordt uitgegaan van een diameter van 900 mm, wanddikte 14 mm, inwendige druk 6,6 MPa, elasticiteit 210 GPa, SMYS 414 MPa en een diepteligging van 1,3m.

Leidinggegevens worden doorgaans opgeslagen in tabelvorm, waarbij x- en y-coördinaten, diepteligging, druk en materiaalspecificaties zoals de SMYS, wanddikte en diameter van de leiding staan vermeld. In dit voorbeeld zijn drie opvolgende coördinaten weergegeven. Elk x,y punt

van de leiding vertegenwoordigt een stukje leidinglengte, welke wordt bepaald door de halve afstand tot beide naburige punten. De punten zijn aangegeven in Figuur 16. Voor dit voorbeeld wordt uitgegaan van x,y-coördinaten van (0,0) voor de plaats van de windturbine en (20,17), (20,20) en (20,22) voor de opvolgende punten. De onderlinge afstanden van deze punten zijn dus respectievelijk 3 en 2 meter. Het middelste punt vertegenwoordigt daarmee effectief een segmentlengte van 2,5 meter. Deze berekening moet worden herhaald voor die sectie van de buis die binnen het invloedgebied van de turbine ligt.

Rekenvoorbeeld turbineblad

Uit de specificaties van het turbineblad en de leidingparameters kunnen de volgende waarden van de toelaatbare stress en de schokgolffergieën worden bepaald:

$$\sigma_{\text{toelaatbaar}} = SMSY - \frac{P \cdot D}{2 \cdot t} = 414 \cdot 10^6 - \frac{6,6 \cdot 10^6 \cdot 900}{2 \cdot 14} = 202 \text{ MPa} \quad (7.8)$$

Indien wordt uitgegaan van $f = 0.5$, worden E_{schok} voor het nominaal en 2x nominaal toerental als volgt berekend:

$$\begin{aligned} E_{\text{schok,nom}} &= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{4} \cdot m \cdot v^2 & (7.9) \\ &= 7000 \cdot 9,81 \cdot 90 + \frac{1}{4} \cdot 7000 \cdot \left(\frac{18}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{45}{3} \right)^2 \\ &= 7,6 \text{ MJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{schok,2-nom}} &= m \cdot g \cdot h + \frac{1}{4} \cdot m \cdot v^2 & (7.10) \\ &= 7000 \cdot 9,81 \cdot 90 + \frac{1}{4} \cdot 7000 \cdot \left(\frac{36}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{45}{3} \right)^2 \\ &= 11,8 \text{ MJ} \end{aligned}$$

Met deze waarden kan de formule voor de kritische afstand worden ingevuld:

$$\begin{aligned} R_{\text{nom}} &= 0,3048 \cdot \left(\frac{4,44 \cdot 210 \cdot 10^9}{202 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,925}} \cdot \left(\frac{2,03 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 7,6 \cdot 10^6}{\sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 14}} \right)^{\frac{1}{2,5}} & (7.11) \\ &= 1,48 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{2\text{-nom}} &= 0,3048 \cdot \left(\frac{4,44 \cdot 210 \cdot 10^9}{202 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,925}} & (7.12) \\ &\cdot \left(\frac{2,03 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 11,8 \cdot 10^6}{\sqrt{210 \cdot 10^9 \cdot 14}} \right)^{\frac{1}{2,5}} = 1,76 \text{ m} \end{aligned}$$

Omdat de leiding op 1,3 m diepte ligt is de breedte van de kritische strook ten aanzien van het blad $2 \cdot \sqrt{1,48^2 - 1,3^2} = 1,41 \text{ m}$ respectievelijk $2 \cdot \sqrt{1,76^2 - 1,3^2} = 2,37 \text{ m}$.

Voor het nominale toerental betreft de kansdichtheid op 28 meter (afstand tussen (0,0) en (20,20)) afstand ca. $3 \cdot 10^{-5} / \text{m}^2$, (berekende

trek kans op 28 meter). Voor 2 x nominaal toerental betreft het circa $2,5 \cdot 10^{-5}/m^2$.

De bijdrage van het turbineblad aan de faalfrequentie van dit punt van de leiding betreft per toerentalsituatie de vermenigvuldiging van de lengte van het leidingsegment, de breedte van de kritische strook, de kans afgelezen uit de kansdichtheidsverdeling en de faalfrequentie:

Bijdrage faalfrequentie nominaal toerental
 $= 2,5 \text{ m} \times 1,41 \text{ m} \times 3 \times 10^{-5}/m^2 \times 8,4 \times 10^{-4}/\text{jaar} = 8,9 \times 10^{-8}/\text{jaar}$.

Bijdrage faalfrequentie 2x nominaal toerental
 $= 2,5 \text{ m} \times 2,37 \text{ m} \times 2,5 \times 10^{-5}/m^2 \times 5,0 \times 10^{-6}/\text{jaar} = 7,4 \times 10^{-10}/\text{jaar}$.

De autonome faalfrequentie (dus zonder invloed van buiten) van een gasleiding met deze parameters betreft circa (afhankelijk van de exploitant) $1 \times 10^{-9}/m/\text{jaar}$.

7.6 Ongevalseenario's en faalstatistiek

7.6.1 Inleiding

In opdracht van Gasunie en TenneT heeft DNV KEMA in 2011 onderzoek verricht naar risicovolle incidenten van windturbines. Doel van dit onderzoek was onder andere het actualiseren van de faalfrequenties van windturbines op basis van actuele statistiek. Dit hoofdstuk geeft de resultaten weer van dit onderzoek en is overgenomen uit hoofdstuk 2 van het rapport "Rekenmethodiek zonering windturbines" (2012)[32].

Dit hoofdstuk geeft de scenario's en faalkansen weer zoals bepaald uit historische Deense, Duitse, Engelse en Nederlandse faalgegevens in de periode 2001-2010. De hier gepresenteerde faalscenario's en bijbehorende faalfrequenties zijn van toepassing op moderne windturbines van 1 tot 5 MW. Volgens het analagon principe[33] zijn de faalfrequenties ook toepasbaar op windturbines met een hoger geïnstalleerd vermogen. Het Ministerie van I&M (nu het Ministerie van I&W) heeft (in samenspraak met het RIVM) bepaald dat het 95% betrouwbaarheidspercentiel voor de faalfrequenties gehanteerd moet worden.

Van windturbines met betonnen of hybride masten ontbreekt faalstatistiek. De generieke waarden van de Handleiding zijn alleen van toepassing op windturbines met stalen masten.

7.6.2 Faalscenario's

Bij het falen van een windturbine zijn vier faalscenario's te onderscheiden: het naar beneden vallen van kleine onderdelen (bouten, blad- en tipdelen, ijs), bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafworp.

De faalfrequentie van het naar beneden vallen van kleine onderdelen (bouten, blad- en tipdelen, ijs) mag kwalitatief bepaald worden. Het

naar beneden vallen van kleine turbineonderdelen of ijs zijn incidenten die vooral risico's vormen voor het gebied onder de rotor (er van uitgaande dat een windturbine wordt stilgezet bij ijsvorming aan de bladen). De frequenties van ijsafwerping zijn zeer locatieafhankelijk en hiervoor is ook geen generieke waarde te bepalen. Bij kans op ijsvorming worden de turbines automatisch stilgezet (beveiliging), tot de oorzaak van het buiten werking stellen is opgeheven.

Bladdelen kunnen wel ver van de turbine terecht komen. De relatief kleine onderdelen hebben een kleine massa. De kans op schade aan een object is dan veel kleiner dan van een heel blad. De risico's voor de infrastructuur worden volledig gedomineerd door bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafwerp.

De volgende faalscenario's worden in dit rapport geadresseerd:

a. Bladbreuk

Het blad breekt in de wortel af en wordt als geheel weggeworpen. Breuk van een bladtip of gedeelte van een blad wordt niet beschouwd.

b. Mastbreuk

Mastbreuk vindt plaats doordat de mast bij de voetflens afbreekt of dat de mast knikt op een hoger gedeelte. In het Handboek 2005 is geen onderscheid gemaakt tussen deze twee faalscenario's. De impact van de twee faalscenario's verschilt dusdanig dat er bij deze versie is gekozen om onderscheid te maken tussen deze faalscenario's. Volledig falen van de mast waarbij de mast loskomt van het fundament of waarbij de mast breekt in de onderste helft. Een ander mogelijk scenario is knikken van de mast in de bovenste helft. Bij knikken van de bovenste masthelft is er sprake van een geringere neerwaartse snelheid van masttop en gondel. De rotor/gondel kan aan de mast blijven hangen of met geringe impact alsnog op de bodem terechtkomen.

c. Gondel/rotorafwerp

Gondel en/of rotor komen als geheel naar beneden. De mast blijft staan.

7.6.3 *Faalstatistiek*

Voor de drie faalscenario's wordt een update gegeven van de faalstatistiek voor windturbines vanaf 1 MW tot 5 MW. De faalfrequenties worden gedefinieerd als kans op falen per windturbine per jaar.

7.6.3.1 Update faalstatistiek

De faalcijfers voor windturbines in het Handboek (2005) zijn gebaseerd op gegevens van 30.000 bedrijfsjaren van windturbines tussen 0 en 1300 kW in de periode 1984 - 2000. Van de 30.000 bedrijfsjaren hadden ruim 24.000 bedrijfsjaren betrekking op de vermogensklasse

tussen 51 en 300 kW. Deze vermogensklasse ligt ver onder de tegenwoordig gebruikelijke windturbinevermogens van één tot enkele MW. De faalcijfers zijn hierdoor gedateerd en liggen buiten het toepassingsbereik. Bovendien zijn hierin veel gegevens van prototypen verwerkt.

Momenteel worden juist veel windturbines met een vermogen van minimaal 3 MW geplaatst. Bij het bouwen van moderne windturbines wordt steeds meer aandacht besteed aan veiligheid. In de studie naar faalfrequenties is onderzocht of de faalfrequenties van moderne windturbines afwijken van de faalfrequenties die in het Handboek van 2005 zijn gehanteerd. Nieuwe faalstatistieken van moderne windturbines moeten uitwijzen of - en zo ja, hoeveel - de faalkansen daadwerkelijk kleiner zijn.

7.6.3.1.1 Dataverzameling

Opvallend is dat faalgegevens van windturbines niet centraal worden bijgehouden: er bestaan geen (openbare) wetenschappelijke databases die incidenten met windturbines of windturbineonderdelen registreren. In het Handboek (2005) hebben zowel ISET (Institut für Solare Energiesystemen) uit Duitsland en EMD (Energie- og Miljodata) uit Denemarken data aangeleverd voor het bepalen van de faalfrequenties van bladen, masten, rotors en gondels. Van deze databases kon geen gebruik gemaakt worden bij het opstellen van nieuwe faalfrequenties, aangezien zowel EMD als ISET (nu IWES van Fraunhofer) geen database met incidenten van windturbines meer hebben. Voorheen werd deze database bijgehouden in het kader van een onderzoeksprogramma vanuit de Duitse overheid. Dit onderzoeksprogramma is gestopt en daarmee ook het bijhouden van faalincidenten. Ook veel van de kennisinstellingen, windturbinefabrikanten, onderhoudsbedrijven en verzekeringsmaatschappijen die DNV KEMA heeft benaderd konden of wilden geen faalgegevens van moderne windturbines leveren. Deze informatie wordt als vertrouwelijk en concurrentiegevoelig beschouwd.

Een database die wel openbaar beschikbaar is, is de Caithness Windfarm database[34]. Deze uitgebreide database wordt bijgehouden door tegenstanders van windenergie. Hoewel niet alle referenties die de database gebruikt te achterhalen zijn, wordt deze database ook aangewend door andere partijen die de risico's van windturbines in kaart willen brengen[35]. De database wordt beschouwd als bron van waardevolle data waar zoveel mogelijk wereldwijde incidenten zijn genoemd.

Via NWEA (Nederlandse Wind Energie Associatie) heeft DNV KEMA van een fabrikant faalgegevens ontvangen van hun windturbines. Een andere grote fabrikant heeft ook gegevens bekend gemaakt. Beide geven de faalgegevens weer van moderne windturbines. Als laatste bron is gebruik gemaakt van de Windkraft-journals, die een (niet volledig) overzicht geven van incidenten binnen de windindustrie.

In landen die van oudsher al bezig zijn met windenergie zijn meer gegevens bekend over faalstatistieken van windturbines. Dit zijn

Duitsland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk. Om zoveel mogelijk recente gegevens te verkrijgen van moderne windturbines, is DNV KEMA bij de Caithness Windfarm database en de Windkraft journals uitgegaan van de faalgegevens uit deze drie landen gedurende de periode 2001 – 2010. Ook is er gekeken naar de Nederlandse casuïstiek voor windturbines. Nederland heeft echter een relatief beperkte omvang van het aantal geplaatste MW-turbines. De nieuw geplaatste windturbintypes in Nederland wijken niet af van de in Duitsland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk nieuw geplaatste turbines. Hiervoor gelden dan ook dezelfde faalfrequenties.

De faalfrequenties zijn berekend aan de hand van faalincidenten die zijn vermeld in de drie genoemde bronnen in combinatie met het aantal geïnstalleerde turbines per jaar per land. Voor het geïnstalleerde vermogen per jaar in Duitsland is IWES Fraunhofer als bron gebruikt [36]. Voor het jaarlijkse windvermogen in Denemarken is gebruik gemaakt van de Deense Stamdataregister for vindkraftanlæg beheerd door de Danish Energy Agency[37]. Het aantal windturbines in Groot-Brittannië is weergegeven door Renewable UK, de Britse windenergie associatie [38]. Voor het aantal windturbines in Nederland is gebruikt gemaakt van de database van Windenergie-nieuws.nl[39].

7.6.3.1.1 Casuïstiek Nederland (Informatief)

De in deze paragraaf gepresenteerde faalstatistiek is enkel bedoeld ter informatie en niet voor toepassing in risicoanalyses.

DNV KEMA heeft onderzoek gedaan naar faalincidenten van windturbines in Nederland. Hierbij is gebruik gemaakt van de Caithness database voor de periode van 2001 tot 2010. De Windkraft Journals maakten geen melding van ongevallen in Nederland. Informatie over het aantal windturbines in Nederland is afkomstig van Windenergie Nieuws. Bij DNV KEMA zijn geen andere incidenten bekend dan vermeld in de Caithness database. Tabel 7.1 geeft het aantal faalincidenten weer per jaar in Nederland voor bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafworp.

Tabel 7.1: Aantal faalincidenten per jaar van windturbines in Nederland

Faalincidenten Caithness Windfarm Database											
Nederland		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Totaal 2001-2010										
Aantal turbines	14954	812	966	1165	1330	1444	1601	1730	1939	1970	1997
Blad	7	0	0	0	2	2	0	0	2	1	0
Mast	7	0	0	0	0	3	3	0	1	0	0
Gondel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabel Tabel 7.2 geeft weer waar en wanneer de faalincidenten plaatsvonden.

Tabel 7.2: Overzicht van de faalincidenten in Nederland (gebaseerd op Caithness database 2011)

Datum	Plaats	Incident	Turbinevermogen
15/01/2004	Windpark Sas, Wilhelminadorp	Bladbreuk	80kW
22/12/2004	Friese Pingjum	Bladbreuk	80kW
08/01/2005	Visafslag Lauwersoog	Bladbreuk	75kW
22/01/2005	Wijnaldum	Bladbreuk	75kW
12/02/2005	Hornhuizen	Mastbreuk	225kW
15/02/2005	Maasvlakte	Mastbreuk	1MW
31/10/2005	Kreekraksluizen	Mastbreuk	500kW
10/01/2006	Eemmeerdijk, Zeewolde	mastbreuk (knikken)	1MW
28/03/2006	Den Haag	Mastbreuk	80 kW
06/07/2006	Flevoland	Mastbreuk	1MW
07/02/2008	Texel	Bladbreuk	<1MW
03/03/2008	Biddinghuizen	Mastbreuk	80kW
14/05/2008	Schagen	Bladbreuk	<1MW
27/05/2009	Lelystad	Bladbreuk	750kW

Uit de gevonden faalstatistiek voor Nederland over de periode 2001-2010 volgt dat de faalfrequenties in de orde van grootte of zelfs hoger zijn dan de waarden uit het Handboek (2005) [31]: uitgaande van Tabel 7.1 volgt dat het aantal ervaringsjaren (turbinejaren) vanaf 2001 bijna $1,5 \times 10^4$ betreft. De verwachtingswaardes voor de verschillende scenario's worden op basis van deze tabel circa 5×10^{-4} per jaar voor zowel blad als mastbreuk en ordegrootte 7×10^{-5} per jaar (aannahme dat er 1 ongeval heeft plaatsgevonden) voor het falen van de gondel.

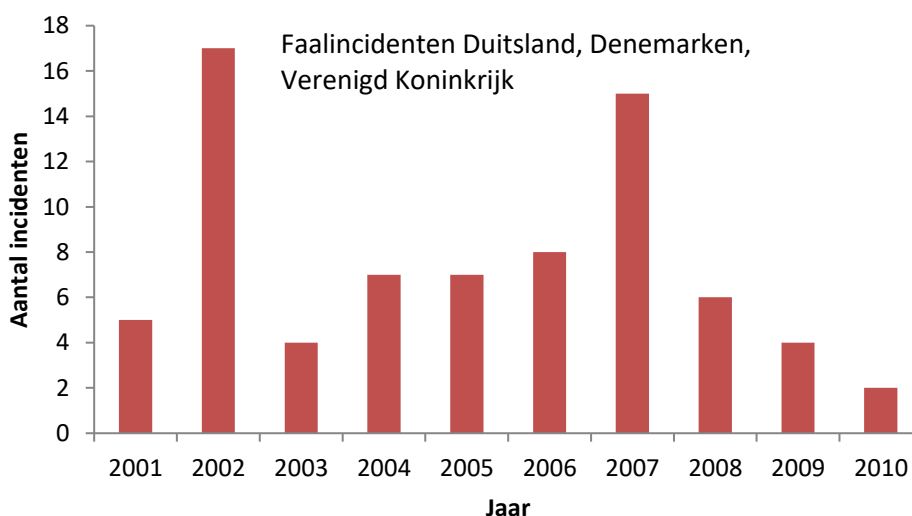
Opvallend is dat de gefaalde windturbines zonder uitzondering oudere windturbines zijn. De gefaalde windturbines zijn geplaatst in de jaren '90 met vermogens kleiner of gelijk aan 1 MW. Er zijn geen faalincidenten met turbines groter dan 1 MW gevonden (in de onderzochte periode), maar er is ook maar een beperkt aantal van deze categorie geplaatst. Met betrekking tot de vorige alinea volgt mede dat met dezelfde methode faalfrequenties voor windturbines van $> 1\text{MW}$ zullen resulteren van minimaal 5×10^{-5} per jaar. Hierbij is dan de voltallige hoeveelheid turbine-ervaringsjaren van $1,5 \times 10^4$ toegepast. De werkelijke hoeveelheid ervaringsjaren van turbines $> 1\text{MW}$ is hiervan slechts een fractie, waardoor veel hogere verwachtingswaarden zullen resulteren (en nog veel grotere waarden voor eventuele 95% betrouwbaarheidspercentielen).

Omdat de afleiding van faalfrequenties voor windturbines boven 1 MW op basis van de getoonde Nederlandse casuïstiek niet goed mogelijk is, wordt gekeken naar andere landen. Denemarken, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk beschikken over een groot aantal turbine-ervaringsjaren. Bovendien wijken de geplaatste windturbinetypes niet af

van andere Europese landen, waardoor de resulterende faalfrequenties ook voor Nederland toepasbaar zijn.

7.6.3.1.1 Caithness Windfarm

Caithness Windfarm Information Forum (CWIF) (www.caithnesswindfarms.co.uk) wordt beheerd door een groep mensen die zich zorgen maken over de toename van windturbines in de Schotse Hooglanden. The Caithness Windfarm Accident database is de meest uitgebreide database met ongevallen die publiekelijk beschikbaar is. Deze organisatie verzamelt incidenten van windturbines. Wanneer deze bevestigd zijn door persberichten of andere media worden deze in de database opgenomen. Veel van de opgegeven referenties zijn echter niet meer te controleren omdat de links naar de nieuwsartikelen of opgegeven websites niet meer werken. De faalincidenten die Caithness voor Nederland weergeeft zijn door DNV KEMA gecontroleerd. Op basis van KEMA's expertise blijkt dat het merendeel van de incidenten in de Caithness database zijn opgenomen. De verwachting is dat dit ook geldt voor de landen om ons heen. Het gemiste aantal incidenten acht KEMA niet groter dan 10 tot 20%. Dit wordt gedekt door bovenwaardes te gebruiken en conservatieve cijfers te hanteren.



Figuur 7.4: Faalincidenten in de periode 2001-2010.

De database geeft slechts in een enkel geval aan om welk turbinetype het gaat. In deze database zijn dan ook incidenten van oude turbinetypes meegenomen, zonder dat een splitsing kan worden gemaakt tussen oude en moderne windturbines. Figuur 7.4 geeft het totaal aantal bij Caithness bekende faalincidenten per jaar voor de landen Duitsland, Denemarken en Verenigd Koninkrijk.

DNV KEMA heeft de gegevens uit de Caithness Windfarm Accident database vanaf 2001 tot en met 2010 geanalyseerd voor de landen Denemarken, Duitsland en het Verenigd Koninkrijk. In deze drie landen is het aantal windturbines, en dus het aantal turbinejaren, het grootst. Dit vergroot de betrouwbaarheid van de gegevens.

In Tabel 7.3 staan de faalincidenten die de Caithness Windfarm database rapporteert. De faalfrequentie van een component is gedefinieerd per windturbine per jaar. Van deze incidenten wordt verreweg het grootste deel toegeschreven aan bladbreuk.

Tabel 7.3: Faalincidenten voor windturbines in Duitsland, Denemarken en Verenigd Koninkrijk zoals beschreven in de Caithness Windfarm database

Faalincidenten Caithness Windfarm Database											
Nederland		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Totaal 2001-2010										
Totaal Duitsland, Denemarken, VK											
	Totaal 2001-2010										
Aantal turbines	227264	12948	16385	18884	20499	22098	24139	25359	27041	29029	30882
Blad	63	5	11	3	7	6	8	12	5	4	2
Mast	8	0	3	1	0	1	0	3	0	0	0
Gondel	4	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0
Faalfrequentie											
	Gemiddeld 2001-2010										
Blad	2,77x10 ⁻⁴	3,86x10 ⁻⁴	6,71x10 ⁻⁴	1,59x10 ⁻⁴	3,41x10 ⁻⁴	2,72x10 ⁻⁴	3,31x10 ⁻⁴	4,73x10 ⁻⁴	1,85x10 ⁻⁴	1,38x10 ⁻⁴	6,48x10 ⁻⁵
Mast	3,52x10 ⁻⁵	0	1,83x10 ⁻⁴	5,30x10 ⁻⁵	0	4,53x10 ⁻⁵	0	1,18x10 ⁻⁴	0	0	0
Gondel	1,76x10 ⁻⁵	0	1,83x10 ⁻⁴	0	0	0	0	0	3,70x10 ⁻⁵	0	0
Duitsland											
Aantal turbines		9647	12681	14952	16405	17588	19042	19891	20626	21531	22016
Blad		4	10	3	7	2	4	8	1	1	0
Mast		0	3	1	0	1	0	2	0	0	0
Gondel		0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Denemarken											
Aantal turbines		2774	3091	3212	3107	3007	2916	2814	2762	2951	3088
Blad		0	1	0	0	3	0	0	1	1	1
Mast		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gondel		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Verenigd Koninkrijk											
Aantal turbines		527	613	720	987	1503	2181	2654	3653	4547	5778
Blad		1	0	0	0	1	4	4	3	2	1
Mast		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Gondel		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

De resultaten van de faalfrequenties uit de Caithness Windfarm database zijn vergeleken met de verwachtingswaardes uit het Handboek (2005) [31]. De vergelijking is weergegeven in Tabel 7.4. Het blijkt dat de faalfrequenties voor bladafworp en mastbreuk volgens de Caithness Windfarm database iets lager zijn dan waar het Handboek (2005) [31] vanuit gaat, maar dat ze in dezelfde range liggen. De Caithness Windfarm database bevat weinig incidenten waarbij de gondel is afgebroken. De faalfrequentie voor gondel/rotorafworp is dan ook lager

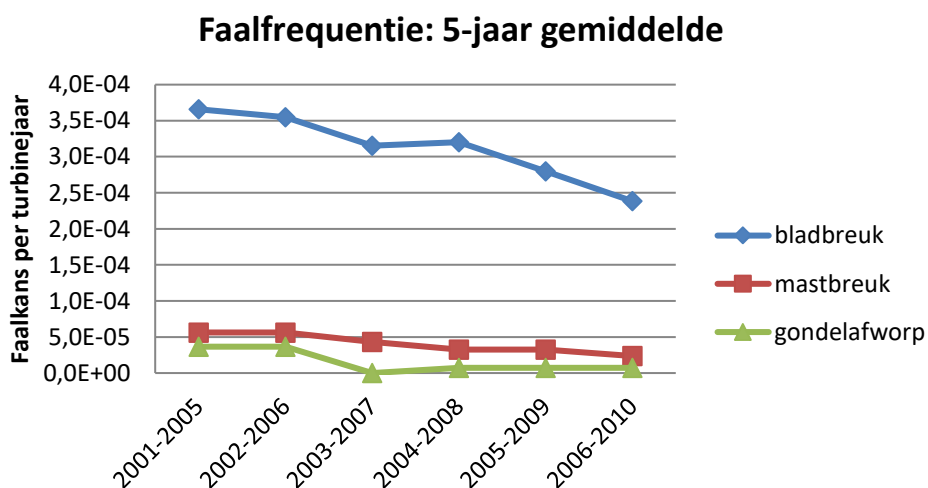
dan waar het Handboek (2005) [31] vanuit gaat; bijna een factor 10 kleiner.

Van de Caithness database zijn de verwachtingswaarde en de 95% betrouwbaarheidswaarde opgenomen. De 95% waarden zijn gebaseerd op de Poisson verdeling. Omdat de Caithness database alle windturbintypes weergeeft (groter en kleiner dan 1 MW) worden deze faalfrequenties als conservatief beschouwd voor moderne windturbines.

Tabel 7.4: Vergelijking van de faalfrequenties (per turbinejaar) uit het Handboek (2005) en de Caithness database

Faalfrequentie per turbine 2001-2011			
	Handboek [31]	Caithness database	Caithness database
	Verwachtingswaarde	Verwachtingswaarde	95% betrouwbaarheid
Blad	$6,3 \times 10^{-4}$	$2,8 \times 10^{-4}$	$3,4 \times 10^{-4}$
Mast	$5,8 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$	$5,8 \times 10^{-5}$
Gondel	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$

Figuur 7.5 laat de vijf jaar gemiddelde cijfers zien van de faalfrequentie voor bladbreuk, mastbreuk en gondelafworp. De grafiek toont een neerwaartse trend voor de vijf jaar gemiddelde faalfrequentie voor de faalscenario's.



Figuur 7.5: Vijf jaar gemiddelde faalfrequentie van bladbreuk, mastbreuk en gondelafworp

Moderne windturbines hebben een substantieel aandeel in het opgestelde windvermogen vanaf ongeveer 2005. Het effect van moderne windturbines op de statistieken is vooral na die tijd zichtbaar. Dit betekent dat de faalfrequenties bovenwaardes zijn. Hierdoor is de genoemde verwachtingswaarde conservatief te noemen.

Uit Figuur 7.5 volgt een dalende trend in bladbreuk en mogelijk ook in mastbreuk. Voor gondelafworp is een dalende trend niet duidelijk.

Echter, doordat de bijdrage van de MW-klasse windturbines hierin niet duidelijk gefilterd kan worden, is dit spoor voor het vaststellen van faalfrequenties voor moderne windturbines niet verder gevolgd.

7.6.3.1.1 Faalstatistieken fabrikanten

DNV KEMA heeft verschillende windturbinefabrikanten benaderd om mee te werken aan de update van de faalfrequenties. Belangrijke fabrikanten voor de Nederlandse markt zijn benaderd via het Ministerie van I&M, via NWEA en zijn uiteindelijk ook allemaal rechtstreeks door DNV KEMA benaderd. Van twee fabrikanten zijn faalgegevens verkregen. Dit zijn representatieve fabrikanten in Nederland met windturbines in de MW-klasse van het type dat momenteel veelvuldig in Nederland wordt geplaatst. Opgemerkt wordt dat DNV KEMA de fabrikantendata heeft verkregen onder de voorwaarde van vertrouwelijkheid, de gegevens mogen niet rechtstreeks gepubliceerd worden.

De fabrikanten hebben voor bladbreuk, mastbreuk en gondel/rotorafworp opgegeven hoe vaak falen is voorgekomen en in hoeveel turbinejaren. De faalcijfers voor windturbines die DNV KEMA van fabrikanten heeft gekregen zijn gebaseerd op gegevens van ongeveer 47.000 bedrijfsjaren tussen 2001 en 2010 voor windturbines van 1,5 MW tot 3 MW.

Beide fabrikanten hebben geen faalincidenten van gondel/rotorafworp of mastbreuk. Volgens inschatting van de fabrikanten zijn daardoor de faalfrequenties voor mastbreuk en gondel/rotorafworp lager dan waar het Handboek (2005) [31] vanuit gaat.

Eén van de fabrikanten gaf aan dat bladbreuk bij de wortel van het blad nauwelijks meer voorkomt en dat vooral tippen afbreken. Deze fabrikant heeft daarom tipafworp als aparte categorie gedefinieerd. Onder "tippen" werden ook grotere bladdelen verstaan, i.e. als het blad niet in zijn geheel afbreekt heeft de fabrikant dat onder tipafworp gedefinieerd. Het is niet mogelijk om in te schatten welk deel van tipafworp onder bladafworp verstaan zou kunnen worden en welk deel daadwerkelijk tipafworp betreft. Wanneer alle getallen van tipafworp als bladafworp worden gerekend, komt de faalkans significant hoger uit dan de waarde die in het Handboek (2005) [31] genoemd wordt. In het Handboek (2005) [31] wordt bij het scenario bladafworp geen faalfrequentie van afworp van tippen meegenomen. In deze update is bij de berekeningen daarom alleen bladafworp meegenomen, zoals de fabrikant dat heeft gedefinieerd. Bij een andere fabrikant is de faalfrequentie van bladbreuk in dezelfde range als waar het Handboek (2005) [31] vanuit gaat.

De faalfrequenties op basis van de data van de twee fabrikanten kunnen als volgt kwalitatief worden samengevat:

- Gondelbreuk : nihil
- Mastbreuk : nihil
- Bladbreuk : in de orde van grootte van het Handboek (2005) [31].

Voor zowel de frequentie van mastbreuk als gondelbreuk kan gesteld worden dat deze met 95% betrouwbaarheid lager is (op basis van een Poisson verdeling) dan $6,4 \times 10^{-5}$ per turbinejaar. Hieruit kan (met 95% zekerheid) geconcludeerd worden dat de waarde voor gondelbreuk in het Handboek (2005) [31] meer dan een factor 3 te hoog is voor moderne turbines.

7.6.3.1.1 Windkraft Journals

In de "Windkraft Journals" zijn wereldwijde incidenten met windturbines vermeld. Uit de analyse is gebleken dat in Windkraft Journals aanzienlijk minder faalincidenten worden weergegeven dan in de Caithness database. De Windkraft Journals geven aan, geen allesomvattende database te hebben, maar vermelden incidenteel falen van windturbines. Tabel 7.5 geeft het aantal incidenten weer die vermeld zijn in de Windkraft Journals. De faalfrequentie van een component is gedefinieerd per windturbinejaar.

Tabel 7.5: Faalincidenten voor windturbines in Duitsland, Denemarken en het Verenigd Koninkrijk zoals beschreven in Windkraft Journals

Faalincidenten Windkraft journal											
Nederland		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	Totaal 2001-2010										
Totaal Duitsland, Denemarken, VK											
	Totaal 2001-2010										
Aantal turbines	227264	12948	16386	18884	20499	22099	24139	25360	27042	29028	30881
Blad	15	0	0	0	1	0	2	3	3	3	3
Mast	3	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0
Gondel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Faalfrequentie											
	Gemiddeld 2001-2010										
Blad	$6,60 \times 10^{-5}$	0	0	0	$4,88 \times 10^{-5}$	0	$8,29 \times 10^{-5}$	$1,18 \times 10^{-4}$	$1,11 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-4}$	$9,71 \times 10^{-5}$
Mast	$1,32 \times 10^{-5}$	0	0	0	0	0	0	$7,89 \times 10^{-5}$	0	$3,44 \times 10^{-5}$	0
Gondel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Duitsland											
Aantal turbines		9647	12681	14952	16405	17588	19042	19891	20626	21531	22016
Blad		0	0	0	1	0	2	3	1	1	1
Mast		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Gondel		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Denemarken											
Aantal turbines		2774	3091	3212	3107	3007	2916	2814	2762	2951	3088
Blad		0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Mast		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gondel		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verenigd Koninkrijk											

Aantal turbines		527	613	720	987	1503	2181	2654	3653	4547	5778
Blad		0	0	0	0	0	0	0	2	1	1
Mast		0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
Gondel		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

De faalincidenten uit de Windkraft Journals leiden tot behoorlijk lagere faalfrequenties dan de huidige faalfrequenties in het Handboek (2005) [31].

In Tabel 7.6 worden de faalfrequenties uit het Handboek (2005) [31] en de Windkraft Journals vergeleken. Van de Windkraft Journals zijn de verwachtingswaarde en de 95% betrouwbaarheidswaarde opgenomen. In de Journals worden geen incidenten van afgebroken gondels gemeld. Ook is de faalfrequentie voor bladafworp meer dan een factor 10 lager dan in het Handboek (2005) [31]. Voor mastbreuk is dit een factor van ruim 4. Hierbij moet in ogenschouw worden genomen dat de onvolledigheid van de geregistreerde faalincidenten bijdraagt aan een mogelijk positiever beeld van de faalfrequenties dan de werkelijkheid. Daarnaast volgt uit deze tabel een relatief hoog faalcijfer voor de UK ten opzichte van Denemarken en Duitsland. Het is speculeren wat de oorzaak is. Mogelijk speelt de weersituatie (grotere extremen) hierin een rol. Mede doordat de populatie van de UK niet heel groot is, volgen uit de voorvallen relatief hoge gemiddelden.

Tabel 7.6: Vergelijking van de faalfrequenties (per turbinejaar) uit het Handboek [31] en de Windkraft journals

Faalfrequentie per turbine 2001-2011			
	Handboek (2005) [31]	Windkraft journal	Windkraft journal
	Verwachtingswaarde	Verwachtingswaarde	95% betrouwbaarheid
Blad	$6,3 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-4}$
Mast	$5,8 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-5}$
Gondel	$2,0 \times 10^{-4}$	0	$1,3 \times 10^{-5}$

7.6.3.2 Bladbreek

Uit zowel de gegevens van de fabrikanten als uit de Caithness Windfarm database en bekende incidenten, komt naar voren dat bladbreek het incident is dat het meest frequent voorkomt. In het Handboek (2005) [31] wordt onderscheid gemaakt naar bladbreek bij normaal bedrijf, bladbreek bij mechanisch remmen en bladbreek bij overtoeren.

Mechanisch remmen komt bij moderne windturbines niet meer voor. Er is hierdoor geen onderscheid meer te maken voor bladbreek bij normaal bedrijf of tijdens mechanisch remmen. DNV KEMA onderscheidt daarom slechts twee categorieën: bladbreek bij normaal bedrijf en bladbreek tijdens overtoeren. De faalfrequentie van bladbreek door overtoeren is volgens het Handboek (2005) [31] zeer klein.

Zoals Tabel 7.7 laat zien, verschilt de faalfrequentie van bladbreuk niet veel met de faalfrequentie voor bladbreuk uit de andere onderzochte bronnen, waarbij rekening gehouden moet worden met het feit dat Windkraftjournal geen volledig overzicht houdt van falen. De faalkansen van de fabrikanten zijn onder geheimhouding aan DNV KEMA verstrekt. De gevonden faalfrequenties komen overeen met de verwachtingswaarde voor bladbreuk uit het Handboek (2005) [31].

Tabel 7.7: Faalfrequentie (per turbine per jaar) voor bladbreuk uit verschillende bronnen

Faalfrequentie windturbines			
	Handboek (2005) [31]	Windkraftjournal	Caithness
	Verwachtingswaarde (=50% betrouwbaarheidspercentiel)	(Duitsland, Denemarken, Verenigd Koninkrijk)	(Duitsland, Denemarken, Verenigd Koninkrijk)
Bladbreuk	$6,3 \times 10^{-4}$	$6,6 \times 10^{-5}$	$2,77 \times 10^{-4}$
<i>Normaal bedrijf</i>	$3,1 \times 10^{-4}$		
<i>Tijdens rem-actie</i>	$3,1 \times 10^{-4}$		
<i>Tijdens overtoeren</i>	$< 5,0 \times 10^{-6}$		

Uit de gegevens van zowel de database als uit de gegevens van de fabrikanten blijkt dat er geen aanleiding is de faalfrequentie voor bladbreuk aan te passen. Ook voor moderne windturbines kan dus gerekend worden met een faalfrequentie van $6,3 \cdot 10^{-4}$ per jaar voor bladbreuk.

In Tabel 7.8 wordt het voorstel weergegeven voor de faalfrequentie van bladbreuk.

Tabel 7.8: Faalfrequenties bladbreuk

Faalfrequenties bladbreuk per turbine per jaar		
	Handboek (2005) [31]	DNV KEMA
	Verwachtingswaarde	Voorstel verwachtingswaarde
Bladbreuk	$6,3 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$
<i>Normaal bedrijf</i>	$3,1 \times 10^{-4}$	$6,2 \times 10^{-4}$
<i>Tijdens rem-actie</i>	$3,1 \times 10^{-4}$	<i>Nvt</i>
<i>Tijdens overtoeren</i>	$< 5,0 \times 10^{-6}$	$< 5,0 \times 10^{-6}$

De gegevens doen vermoeden dat de faalfrequentie van bladbreuk bij normaal bedrijf bijna is verdubbeld. Dit is zeker niet het geval, in de DNV KEMA gegevens wordt geen onderscheid meer gemaakt tussen normaal bedrijf en remmen.

7.6.3.3 Mastbreuk

Mastbreuk vindt plaats doordat de mast in het onderste deel afbreekt dan wel bezwijkt. Bij bezwijken van de bovenste helft van de mast is sprake van knikken. Uit een kwalitatieve analyse van de Caithness Windfarm database blijkt dat in het merendeel van de gevallen (85%)

volledig falen van de mast optreedt. In 15% van de gevallen is er sprake van knikken van het bovenste mastdeel. Door de sterkte van de mast, die gedimensioneerd is op basis van verwachte weersomstandigheden, blijkt dat bij knikken van de mast de rotor/gondel niet (direct) op de bodem zullen vallen. Dit scenario is daarmee niet relevant voor falen van gas- en elektriciteitsinfrastructuur.

Tabel 7.9: Faalfrequenties mastbreuk per jaar uit verschillende bronnen

Faalfrequenties windturbines			
	Handboek (2005) [31]	Windkraftjournal	Caithness
	Verwachtingswaarde	Beperkte gegevens, totaal van Duitsland, Denemarken en Verenigd Koninkrijk	totaal van Duitsland, Denemarken en Verenigd Koninkrijk
Mastbreuk	$5,8 \times 10^{-5}$	$1,32 \times 10^{-5}$	$3,52 \times 10^{-5}$

De statistiek is gebaseerd op stalen masten. Er is te weinig betrouwbare faalinformatie bekend over windturbines met betonnen masten om enige statistiek op toe te passen.

De gevonden faalfrequenties zijn in lijn met de verwachtingswaarde voor mastbreuk uit het Handboek (2005) [31]. Ook voor moderne windturbines kan dus een faalkans van $5,8 \times 10^{-5}$ per jaar als verwachtingswaarde voor mastbreuk toegepast worden. Op basis van de verhouding in de Caithness Windfarm database, worden faalfrequenties voor respectievelijk volledig falen en knikken van het bovenste mastdeel afgeleid van $5,0 \times 10^{-5}$ per jaar en $8,3 \times 10^{-6}$ per jaar, zie Tabel 7.10:

Tabel 7.10: Faalfrequenties mastbreuk

Faalfrequenties windturbines per turbine per jaar		
	Handboek (2005) [31]	DNV KEMA
	Verwachtingswaarde	Voorstel verwachtingswaarde
Mastbreuk	$5,8 \times 10^{-5}$	$5,8 \times 10^{-5}$
<i>Knikken van de Mast</i>		$8,3 \times 10^{-6}$
<i>Volledig falen</i>		$5,0 \times 10^{-5}$

7.6.3.4 Gondel- en/of rotorafworp

De verwachtingswaarde die in het Handboek (2005) [31] wordt weergegeven voor gondel- en rotorafworp betreft $2,0 \times 10^{-4}$ per turbine per jaar. Uit de faalgegevens van fabrikanten en uit de databases volgt een aanzienlijke lagere verwachtingswaarde. Tabel 7.11 biedt een overzicht van de faalfrequenties uit verschillende bronnen.

Tabel 7.11: Faalfrequenties gondel- en rotorafworp uit verschillende bronnen per turbinejaar

Faalfrequenties windturbines per turbine per jaar			
	Handboek (2005) [31]	Windkrachtjournal	Caithness
	Verwachtingswaarde		
Afvallen van gondel en/of rotor	$2,0 \times 10^{-4}$	0	$1,76 \times 10^{-5}$

De faalfrequenties voor gondel/rotorbreek, zoals blijkt uit Caithness database, is 10 keer lager dan in het Handboek (2005) [31]. Uit de gegevens van de fabrikanten en uit de Windkracht journals blijkt dat de verwachtingswaarde zelfs nihil is. De faalfrequentie kan worden vervangen door de (conservatieve) verwachtingswaarde van $1,8 \times 10^{-5}$ per jaar (zie Tabel 7.12).

Tabel 7.12: Faalfrequenties gondel en rotorbreek

Faalfrequenties windturbines per turbine per jaar		
	Handboek (2005) [31]	DNV KEMA
	Verwachtingswaarde	
		Voorstel verwachtingswaarde
Afvallen van gondel en/of rotor	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-5}$

7.6.3.5 Resultaat

Tabel 7.13 geeft concluderend de actuele faalfrequenties voor de drie faalscenario's, bladbreuk, mastbreuk en afworp gondel/rotor voor windturbines vanaf 1 MW tot en met 5 MW. DNV KEMA meent dat de faalstatistieken voldoende conservatisme bevatten om niet de 95% betrouwbaarheidspercentielen te hanteren, maar de verwachtingswaarde. Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft echter besloten dat ook voor de faalfrequenties van windturbines het 95% betrouwbaarheidspercentiel moet worden gehanteerd. Tabel 7.13 geeft de geactualiseerde faalfrequentie aan voor windturbines. De nieuwe rekenwaarde is gebaseerd op de 95% bovengrens.

Tabel 7.13: Overzicht van scenario's en faalfrequenties (per turbine per jaar)

Faalfrequenties windturbines per turbine per jaar		
	Verwachtingswaarde	95% betrouwbaarheidspercentiel
Bladbreuk	$6,3 \times 10^{-4}$	$8,4 \times 10^{-4}$
<i>Normaal bedrijf</i>	$6,2 \times 10^{-4}$	$8,4 \times 10^{-4}$
<i>Tijdens overtoeren</i>	$< 5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$
Mastbreuk	$5,8 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$
<i>Falen gedeelte van de mast</i>	$8,3 \times 10^{-6}$	
<i>Volledig falen</i>	$5,0 \times 10^{-5}$	
Afvallen van gondel en/of rotor	$1,8 \times 10^{-5}$	$4,0 \times 10^{-5}$

Voor bladbreuk wijzigen de faalfrequenties niet ten aanzien van het Handboek (2005) [31], enkel de kans op bladbreuk bij verhoogd toerental tijdens remmen wordt niet meer beschouwd. Ook de faalfrequentie van mastbreuk blijft ongewijzigd. Hierbij is wel onderscheid gemaakt tussen volledig falen en knikken van het bovenste mastdeel. Uit de gegevens blijkt de kans op gondel- en/of rotorafworp beduidend lager te zijn, te weten een factor tien.

7.7 Generieke gegevens

7.7.1 Inleiding

Vaak komt het voor dat projectontwikkelaars in de beginfase van een project waarin de vergunningen aangevraagd worden, nog geen definitief besluit hebben genomen over het type turbine dat ze willen toepassen. Soms is alleen de maximaal toegestane masthoogte of de vermogensklasse bekend. Om in dit stadium toch een risicoanalyse te kunnen uitvoeren met als doel inzicht te verkrijgen in de mogelijkheden en de beperkingen ten gevolge van de optredende risico's, kan gebruik gemaakt worden van generieke windturbinegegevens.

De turbineparameters die van belang zijn voor de risicoanalyses, met name voor de trefkansberekening ten gevolge van bladbreuk zijn:

- ashoogte
- rotordiameter en lengte van het blad
- nominaal toerental
- ligging van het zwaartepunt van het blad
- bladoppervlak.

De bovenstaande parameters zijn bepaald op basis van de hoofdkenmerken van 82 commercieel verkrijgbare windturbines in de range van 1 MW tot 5 MW (paragraaf 7.7.2). Met deze parameters is een aantal analyses uitgevoerd op basis waarvan generieke conclusies zijn getrokken ten aanzien van de volgende aspecten:

- Maximale werpafstand bij bladbreuk als functie van het turbinevermogen en ashoogte.
- Ligging van de risicocontouren ($PR = 10^{-5}$ per jaar en $PR = 10^{-6}$ per jaar) voor bladbreuk, mastbreuk en vallende gondel of rotor als functie van het turbinevermogen en ashoogte.

Dankzij de generieke conclusies kunnen gebruikers in vele gevallen uitvoerig analysewerk achterwege laten. De generieke resultaten zijn geschikt om een eerste inschatting te maken van de optredende risico's en te beoordelen of en voor welk doel een risicoanalyse nodig is. Indien gewenst kan een risicoanalyse uitgevoerd worden die gebruik maakt van specifieke windturbinegegevens in plaats van generieke data.

In paragraaf 7.7.3 zijn generieke afstanden afgeleid voor de ligging van de risicocontouren $PR = 10^{-5}$ per jaar en $PR = 10^{-6}$ per jaar.

7.7.2 Turbineparameters als functie van het nominale vermogen

In Nederland worden drie windklassen onderscheiden. De hoofdparameters van de turbine zoals de diameter, ashoogte en rotoerental zijn bij gelijkblijvend vermogen afhankelijk van de windklasse waarvoor de turbine is geoptimaliseerd. Het windklimaat in het binnenland is in overeenstemming met windklasse 3 (ook wel IEC klasse 3 genoemd). Het windklimaat op zee en op grote hoogte aan de kust komt overeen met windklasse 1 (IEC klasse 1). Turbines in het binnenland hebben over het algemeen een grotere diameter, een grotere ashoogte en een lager nominaal toerental. Voor het toepassen van generieke windturbinegegevens tijdens het uitvoeren van risicoanalyses zijn in deze bijlage turbines opgenomen die vallen in IEC klasse 1, 2, en 3.

De kenmerken van 82 commercieel verkrijgbare driebladige turbines zijn weergegeven in Tabel 7.14. Veel windturbine modellen zijn verkrijgbaar met verschillende ashoogtes. Door de grote variatie in ashoogtes waarin een individueel windturbine model kan worden uitgevoerd is er voor gekozen om in Tabel 7.14 de minimale en maximale ashoogte waarin de turbine uitgevoerd kan worden weer te geven.

Tabel 7.14: Hoofdparameter van commercieel verkrijgbare driebladige turbines met een vermogen in de range tot 5 MW. NB.: sommige gegevens ontbreken.

Turbine type	Vermogen [MW]	Diameter [m]	Toerental [RPM]	Masthoogte minimaal [m]	Masthoogte maximaal [m]
Leitwind LTW77-1000	1	77	18	65	*
Fuhrlander FL 1250/62	1,25	62	18,9	50	70
Acciona AW-70/1500	1,5	70	20,2	60	80
Acciona AW-77/1500	1,5	77	18,3	60	80
Acciona AW-82/1500	1,5	82	16,7	60	80
Fuhrlander FL 1500/70	1,5	70	22	65	100
Fuhrlander FL 1500/77	1,5	77	19	65	100
Fuhrlander FL MD/70	1,5	70	21	65	114,5
Fuhrlander FL MD/77	1,5	77	19	61,5	114,5
Leitwind LTW77-1500	1,5	76,8	17,8	61,5	80
Leitwind LTW80-1500	1,5	80,3	17,8	60	100
Leitwind LTW86-1500	1,5	86	15,8	80	100
STX Windpower STX82 1.5 MW	1,5	82,7	17	65	101
Vensys 70	1,5	70	19	65	85
Vensys 77	1,5	77	17,3	61,5	100
Vensys 82	1,5	82,3	17,3	85	100
M Torres MT TWT 70/1650	1,65	70	17	71	
M Torres MT TWT 77/1650	1,65	77	20	71	81
M Torres MT TWT 82/1650	1,65	82	18	71	81
Alstom Power 80	1,67	80	18,4	80	*
Alstom Power 86	1,67	85,5	17,21	80	*

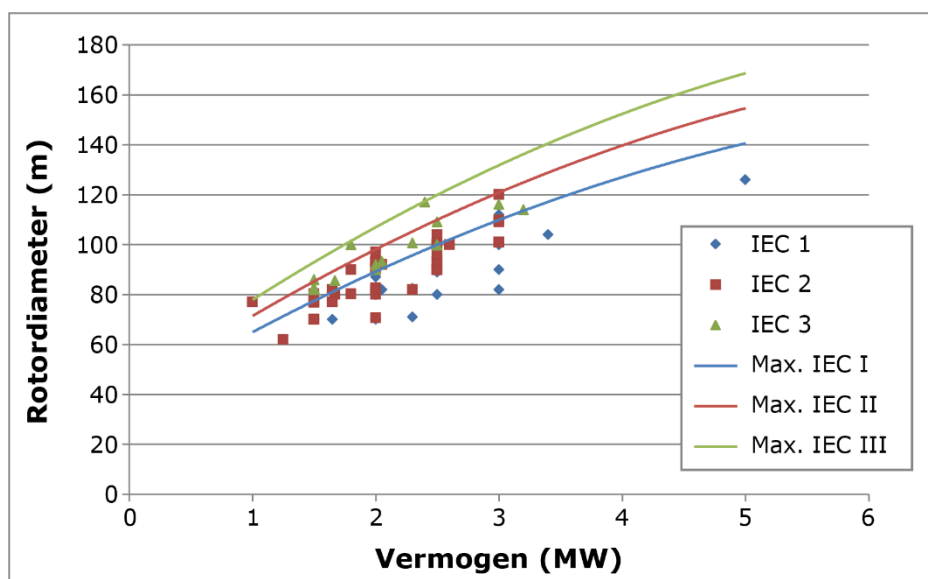
Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Toelichting – versie oktober 2020

Leitwind LTW80-1800	1,8	80,3	17,8	60	80
Repower MM100	1,8	100	13,9	80	100
Vestas V90/1800	1,8	90	14,5	80	105
Dewind D8.2	2	80	18,6	80	*
Dewind D9	2	93	16	80	100
Dewind D9.1	2	93	16	80	100
Dewind D9.2	2	93	16,3	80	100
Enercon E82/2000	2	82	18	78	138
EWT Directwind 2000/90	2	90,5	15,75	85	105
Gamesa G80/2000	2	80	19	60	100
Gamesa G87/2000	2	87	19	67	100
Gamesa G90/2000	2	90	19	67	100
Gamesa G97/2000	2	97	17,8	78	120
Leitwind LTW70-2000	2	70	20,8	60	*
STX Windpower STX72	2	70	22,5	65	100
STX Windpower STX82 2.0	2	83	18,5	80	88
STX Windpower STX92 2.0	2	92	16,5	60	88
Vestas V80/2000	2	80	16,7	60	100
Vestas V90/2000	2	90	14,5	80	125
Eviag ev2.93	2,05	93	17,7	85	140
Repower MM82/2050	2,05	82	17,1	59	100
Repower MM92/2050	2,05	92	15	68,5	100
Avantis AV 1010	2,3	101	14,3	99	*
Enercon E70/2300	2,3	71	21,5	57	113
Enercon E82/2300	2,3	82	18	78	138
Siemens SWT-2.3-82 VS	2,3	82	18	80	*
Siemens SWT-2.3-93	2,3	93	16	63,3	78,3
Siemens SWT-2.3-101	2,3	101	16	73,5	78,3
Siemens SWT-2.3-108	2,3	108	16	96	115
Siemens SWT-3.0-101	3	101	16	74,5	99,5
Siemens SWT-3.2-101	3,2	101	16	74,5	94
Siemens SWT-3.0-108	3	108	16	74,5	94
Siemens SWT-3.2-108	3,2	108	15,5	74,5	94
Siemens SWT-3.0-113	3	113	14,3	83,5	142,5
Siemens SWT-3.2-113	3,2	113	14,4	83,5	142,5
Siemens SWT-3.3-130	3,3	130	12,2	85	150
Siemens SWT-3.6-120	3,6	120	13,4	89,5	*
Siemens SWT-4.0-130	4	130	13,4	100	*
Nordex N117/2400	2,4	117	13,2	91	140
Avantis AV 928	2,5	93	16	80	*
Clipper Liberty C89	2,5	89	15,5	80	*
Clipper Liberty C93	2,5	93	15,5	80	*
Clipper Liberty C96	2,5	96	15,5	80	*
Eviag ev100	2,5	100	16,5	85	100
Eviag ev90	2,5	90	18,1	85	160
Fuhrlander FL 2500/100	2,5	100	17,1	85	160

Fuhrlander FL 2500/104	2,5	104	17,1	85	161
Fuhrlander FL 2500/90	2,5	90	18,1	85	160
M Torres MT TWT 100/2500	2,5	100	17	103	*
M Torres MT TWT 109/2500	2,5	109	17	103	*
M Torres MT TWT 90/2500	2,5	90	17	103	*
Nordex N100/2500	2,5	100	14,8	75	100
Nordex N80/2500	2,5	80	18,9	60	*
Nordex N90/2500	2,5	90	18,1	65	80
PowerWind 100	2,5	100	14	80	100
PowerWind 90	2,5	90	15,5	80	98
Vensys 100	2,5	100	14,5	100	*
Vensys 90	2,5	90	16	80	*
Vestas V100/2600	2,6	100	13,4	80	*
Acciona AW3000-100	3	100	14,2	100	120
Acciona AW3000-109	3	109	13,2	100	120
Acciona AW3000-116	3	116	12,3	100	120
Alstom Power 100	3	101	14,2	75	100
Alstom Power 110	3	110	13,6	75	101
Enercon E101/3000	3	101	14,5	99	135
Enercon E82/3000	3	82	18,5	78	138
Fuhrlander FL 3000/120	3	120	14,8	90	140
Leitwind LTW101-3000	3	101	14,5	97	*
Vestas V112/3000	3	112	12,8	84	94
Vestas V90/3000	3	90	16,1	65	80
Repower 3.2M114	3,2	114	12,1	93	123
Repower 3.4M104	3,4	104	13,8	90	128
Repower 5M	5	126	12,1	117	*

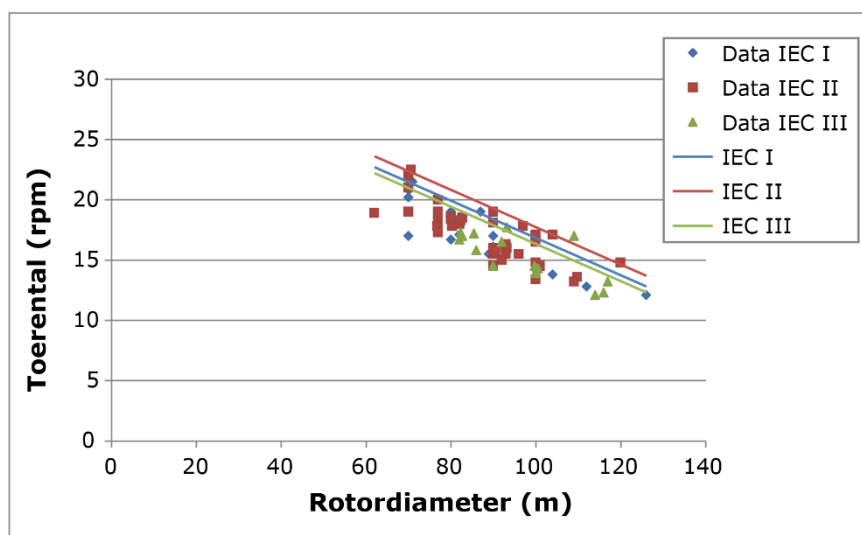
*gegevens ontbreken

In Figuur 7.6 is de rotordiameter weergegeven als functie van het nominaal vermogen. De data punten zijn de turbine specifieke gegevens zoals deze in Tabel 7.14 staan beschreven. Naast de turbine specifieke data zijn er 3 functies weergegeven in Figuur 7.6. Deze functies geven de maximale waarden weer van de rotordiameter van turbine met een IEC 1, 2 en 3 klasse. Deze functies zijn bepaald door gebruik te maken van vergelijking (7.13) en de constante waardes zoals weergegeven in Tabel 7.15.

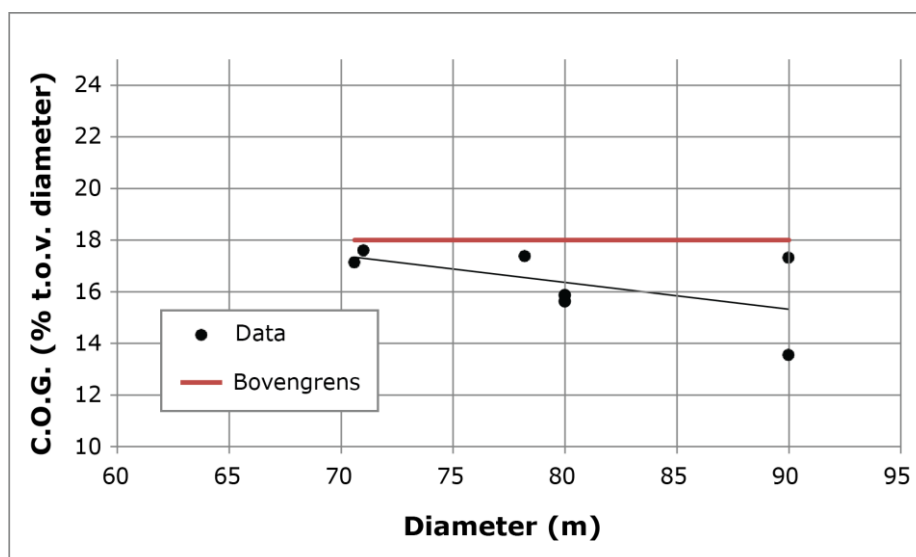


Figuur 7.6: Diameter als functie van het nominaal vermogen.

In Figuur 7.7 is het toerental als functie van de rotordiameter weergegeven. De datapunten zijn de turbine specifieke gegevens zoals deze in Tabel 7.14 zijn beschreven. Naast de turbine specifieke data zijn er 3 functies weergegeven in Figuur 7.7. Deze functies geven de maximale waarden weer van de rotordiameter van turbine met een IEC 1, 2 en 3 klasse. Deze functies zijn bepaald door gebruik te maken van vergelijking (7.14) en de constante waarden zoals weergegeven in Tabel 7.15.



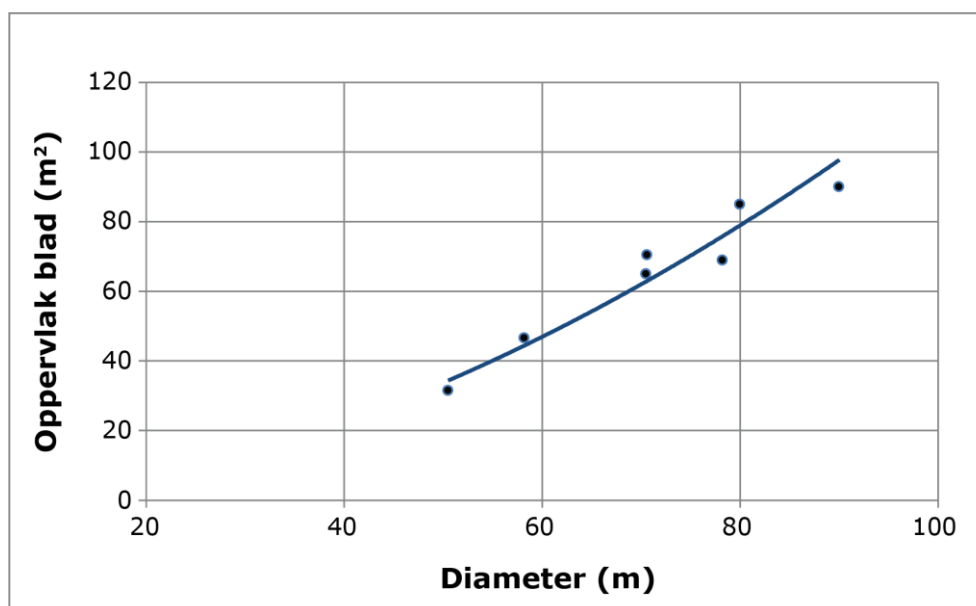
Figuur 7.7: Toerental als functie van rotordiameter



Figuur 7.8: Ligging van het zwaartepunt van een rotorblad als functie van de diameter

Voor de parameters zwaartepunt van het blad en bladoppervlak van het blad zijn de kenmerken van een aantal turbinebladen geanalyseerd. De ligging van het zwaartepunt is in Figuur 7.8 gegeven als functie van de diameter. Het blijkt dat bij met name de grotere turbines de ligging van het zwaartepunt een grote spreiding vertoont. Als conservatieve waarde wordt de getoonde bovengrens van 18% van de rotordiameter aangehouden. Deze waarde is weergegeven met vergelijking (7.15) en de constante uit Tabel 7.15.

Het oppervlak van het blad is in Figuur 7.9 gegeven als functie van de diameter. Deze gegevens zijn gefit met vergelijking (7.16). De lengte van het blad kan worden berekend met vergelijking (7.17).



Figuur 7.9: Bladoppervlak als functie van de diameter

De vergelijkingen van boven beschreven parameters zijn gegeven in vergelijking (7.13) t/m (7.17). De bijbehorende constanten zijn gegeven in Tabel 7.15.

Diameter [m]

$$D = c_1 \cdot \sqrt{P_{\text{nom}}} \quad (7.13)$$

Nominaal Toerental [rpm]

$$n = \frac{c_2}{D} + c_3 \quad (7.14)$$

Zwaartepunt t.o.v. rotorcentrum [m]

$$r_{zw} = c_4 \cdot D \quad (7.15)$$

Kritiek bladoppervlak [m²]

$$A_c = 1,1 \cdot c_5 \cdot D^{c_6} \quad (7.16)$$

Lengte blad [m]

$$L_b = \frac{D}{2} - c_7 \cdot D \quad (7.17)$$

Tabel 7.15: Constanten voor de vgl. 2.1 t/m 2.5 per IEC klasse

Constante	IEC-3	IEC-2	IEC-1
C1	2,4	2,2	2
C2	1250	1250	1250
C3	3,7	5,1	4,2
C4	0,18	0,18	0,18
C5	0,029	0,029	0,029
C6	1,81	1,81	1,81
C7	0,0132	0,0132	0,0132

7.7.3 Generieke risicocontouren

Met de paragraaf 967.7.2 berekende generieke windturbinegegevens en op basis van de faalgegevens in Hoofdstuk 6 van Module IV, de rekenmethode in Hoofdstuk 2 tot en met 4 (kogelbaanmodel) van Module IV, en de van toepassing zijnde risicocriteria zijn in dit hoofdstuk een aantal generieke resultaten en conclusies uitgewerkt.

Het gaat uitsluitend om 3-bladige turbines, geoptimaliseerd voor IEC klasse 1 en voor IEC klasse 2, met bladhoekverstelling (dus zonder remtippen), in de vermogensklasse van 1000 kW tot 5000 kW. De hoofdkenmerken zijn afgeleid uit de vergelijkingen (7.13) t/m (7.17) en gegeven in Tabel 7.16 en Tabel 7.17 voor IEC klasse 1 en 2 turbines respectievelijk.

Tabel 7.16: Hoofdkenmerken van generieke turbines (IEC klasse 1)

Turbine type	WT1000	WT2000	WT3000	WT4000	WT5000
Vermogen [kW]	1000	2000	3000	4000	5000
Diameter [m]	63	89	110	126	141
Afstand zwaartepunt afgebroken bladdeel tot rotor centrum [m]	11,4	16,1	19,7	22,8	25,5
Nominaal toerental	24,0	18,2	15,6	14,1	13,0
Lengte afgebroken bladdeel [m]	30,8	43,5	53,3	61,6	68,8
Kritiek bladoppervlak afgebroken bladdeel [m ²]	58	109	157	203	249

Tabel 7.17: Hoofdkenmerken van generieke turbines (IEC klasse 2)

Turbine type	WT1000	WT2000	WT3000	WT4000	WT5000
Vermogen [kW]	1000	2000	3000	4000	5000
Diameter [m]	70	98	120	139	156
Afstand zwaartepunt afgebroken bladdeel tot rotor centrum [m]	12,5	17,7	21,7	25,0	28,0
Nominaal toerental	23,1	17,8	15,5	14,1	13,1
Lengte afgebroken bladdeel [m]	33,9	47,9	58,7	67,7	75,7
Kritiek bladoppervlak afgebroken bladdeel [m ²]	69	129	186	242	296

In de analyses zijn de scenario's en faalkansen meegenomen zoals gegeven in Hoofdstuk 6 van Module IV.

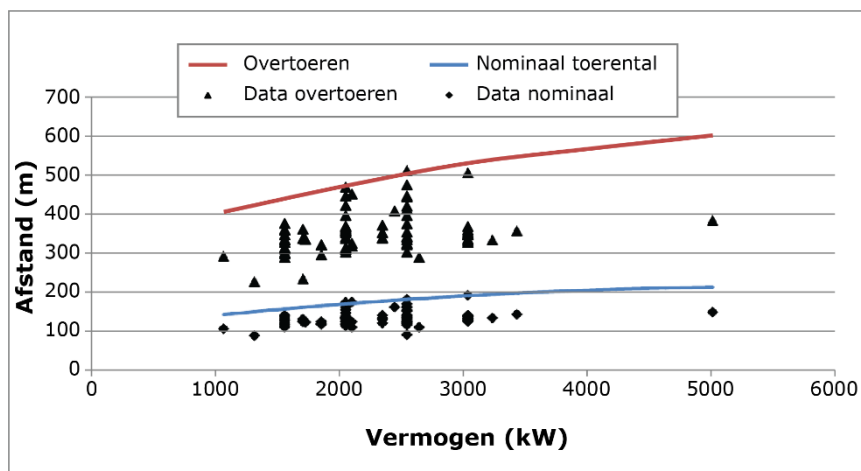
Allereerst zijn de maximale werpafstanden bij bladbreuk berekend. De resultaten voor IEC klasse 1 windturbines zijn weergegeven in Tabel 7.18 en Figuur 7.10. Voor IEC 2 klasse turbines zijn de maximale werpafstanden weergegeven in Tabel 23 en Figuur 7.11. In zowel Figuur 7.10 als Figuur 7.11 zijn ook de maximale werpafstanden van bladen van de turbines uit Tabel 7.14 weergegeven. Door de conservatieve benadering van de generieke turbinegegevens liggen de turbine specifiek werpafstanden lager dan de generieke werpafstanden uit Tabel 7.18.

Tabel 7.18: Generieke waarden voor werpafstanden
IEC1

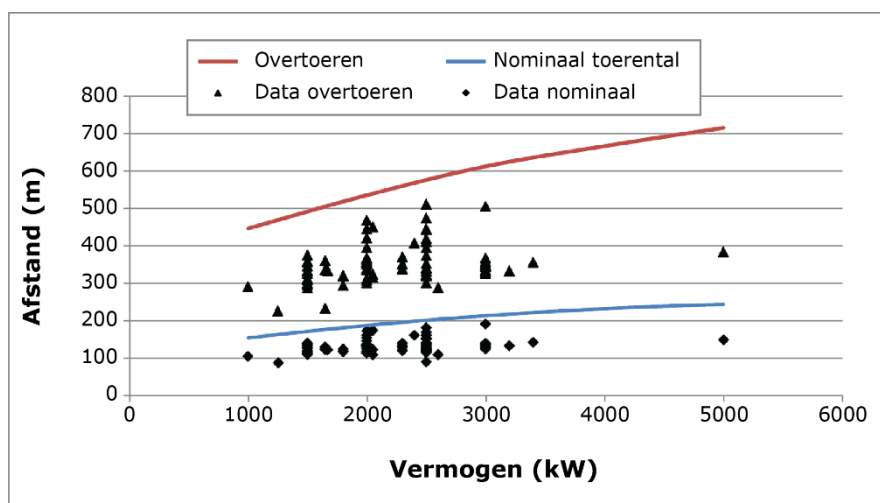
Turbine type	WT1000		WT2000		WT3000		WT4000		WT5000	
Vermogen [kW]	1000		2000		3000		4000		5000	
Ashoogte [m]	60	80	80	100	90	120	90	120	100	120
Max Werpafstand [m]										
Bij nominaal toerental	131	143	158	170	176	193	186	204	202	214
Bij overtoeren	389	406	457	473	507	531	543	568	585	602

IEC2

Turbine type	WT1000		WT2000		WT3000		WT4000		WT5000	
Vermogen [kW]	1000		2000		3000		4000		5000	
Ashoogte [m]	60	80	80	100	90	120	90	120	100	120
Max Werpafstand [m]										
Bij nominaal toerental	142	155	175	187	198	216	213	231	233	245
Bij overtoeren	430	447	519	536	588	613	641	667	699	716



Figuur 7.10: Maximale werpafstanden van bladen, per vermogensklasse (IEC I)



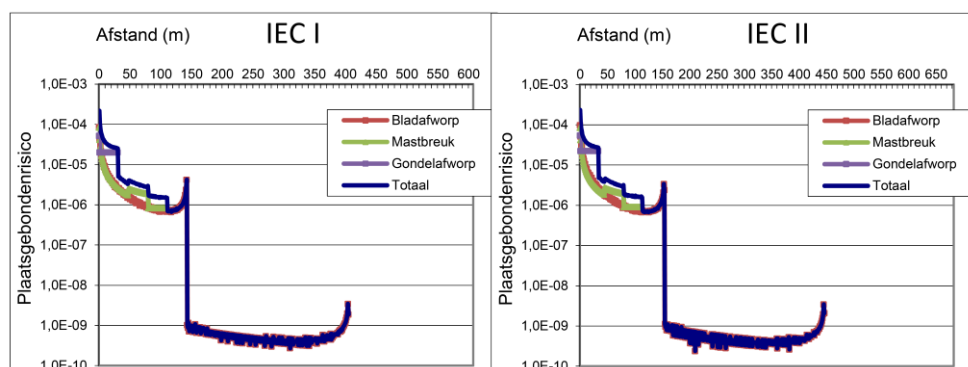
Figuur 7.11: Maximale werpafstanden van bladen, per vermogensklasse (IECII)

Het risico van mastbreuk voor de omgeving beperkt zich tot een afstand die gelijk is aan de ashoogte plus de halve rotordiameter. Voor het naar beneden vallen van de gondel of rotor is deze afstand gelijk aan de halve diameter. Aanvullende turbinekenmerken voor het berekenen van het PR bij mastbreuk zijn gegeven in Tabel 7.19.

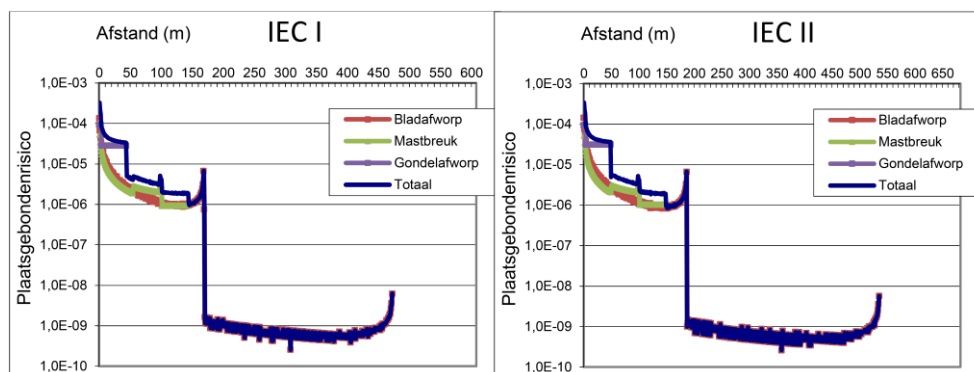
Tabel 7.19: Aanvullende generieke turbinekenmerken voor berekenen van het PR t.g.v. mastbreuk en gondelafworp

Turbine type	WT1000	WT2000	WT3000	WT4000	WT5000
Vermogen [kW]	1000	2000	3000	4000	5000
diameter mast [m]	4	5	5	7,5	10
Max lengte gondel [m]	5	10	15	17	18
Hoogte gondel [m]	2	4	5	5	6
solidity	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

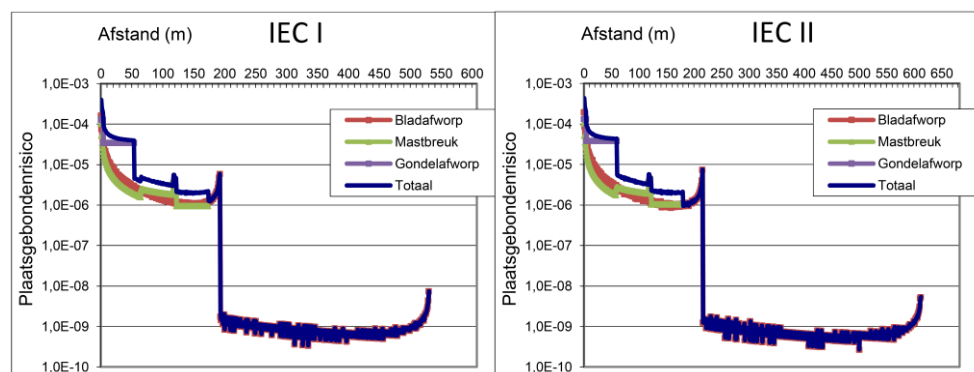
Op basis van de generieke gegevens van windturbines met een vermogen van 1000 kW, 2000 kW, 3000 kW, 4000 kW en 5000 kW en de faalfrequenties (zie Hoofdstuk 6 van Module IV), is het PR berekend als functie van de afstand tot de turbine. Beschouwd zijn het falen van de bladen, de mast en de gondel of rotor afzonderlijk en het totale PR van deze drie faalmechanismen gezamenlijk. De resultaten zijn weergegeven voor zowel IEC klasse 1 als klasse 2 turbines in de Figuur 7.12 t/m Figuur 7.16.



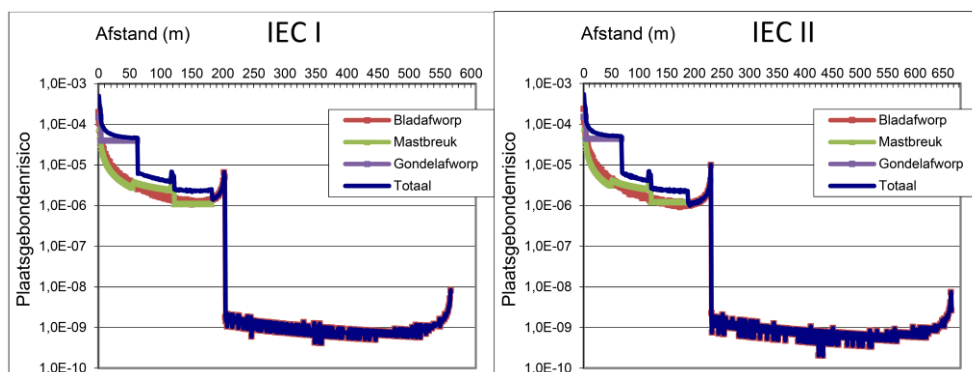
Figuur 7.12: PR als functie van de afstand tot de windturbine (1000 kW)



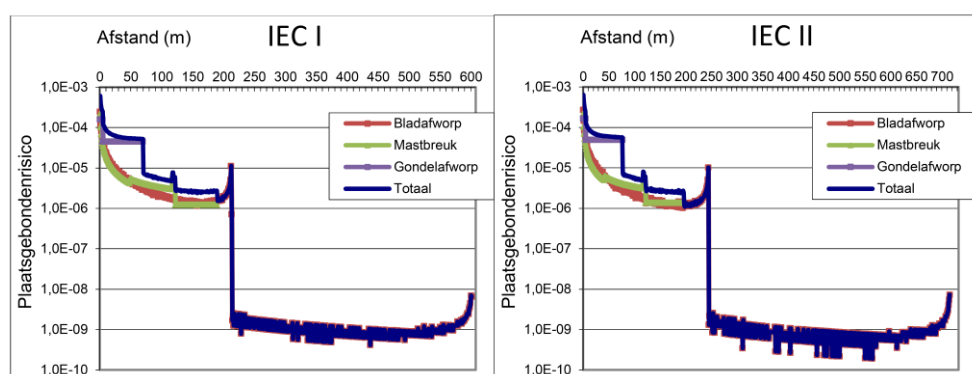
Figuur 7.13: PR als functie van de afstand tot de windturbine (2000 kW)



Figuur 7.14: PR als functie van de afstand tot de windturbine (3000 kW)



Figuur 7.15: PR als functie van de afstand tot de windturbine (4000 kW)



Figuur 7.16: PR als functie van de afstand tot de windturbine (5000 kW)

Zoals in Hoofdstuk 2 tot en met 4 van Module IV is uiteengezet treden scherpe pieken op bij de maximale werpafstanden voor de gebeurtenissen 'normaal bedrijf' en 'overtieren'. Deze zijn een gevolg van het gebruikte rekenmodel. Bij het kogelbaanmodel wordt er van uitgegaan dat het toerental voor de gebeurtenissen waarbij bladbreuk optreedt een constante waarde is. In werkelijkheid zal het toerental niet constant zijn, maar variëren met als gevolg dat de pieken zullen afvlakken.

Als generiek uitgangspunt voor een risicoanalyse kan worden gesteld dat de afstand van de PR = 10^{-6} contour tot de turbine gelijk is aan het maximum van ashoogte plus halve rotordiameter en de maximale werpafstand bij 'normaal bedrijf'.

Verder blijkt dat de afstand van de PR = 10^{-5} contour tot de turbine gelijk is aan de halve rotordiameter.

De volgende generieke conclusies kunnen worden getrokken:

- 1 de PR = 10^{-6} contour is gelijk aan het maximum van ashoogte plus halve rotordiameter en maximale werpafstand bij nominaal rotortoerental
- 2 de PR = 10^{-5} contour is gelijk aan de halve rotordiameter

De waarden voor de verschillende vermogensklassen zijn gegeven in Tabel 7.20. Merk op dat deze generieke conclusies geldig zijn voor:

- driebladige turbines met een maximaal vermogen van 5000 kW
- met stalen mast

- met kunststof bladen (geen stalen bladwortel)
- gecertificeerde turbines.

Tabel 7.20: Afstand [m] $PR = 10^{-6}$ en $PR = 10^{-5}$ contouren

IEC 1

Turbine type	WT1000		WT2000		WT3000		WT4000		WT5000	
Vermogen [kW]	1000		2000		3000		4000		5000	
Ashoogte [m]	60	80	80	100	90	120	90	120	100	120
$PR = 10^{-6}$	13	14	15	17	17	19	18	20	20	21
	1	3	8	0	6	3	6	4	2	4
$PR = 10^{-5}$	32	32	45	45	55	55	63	63	71	71

IEC 2

Turbine type	WT1000		WT2000		WT3000		WT4000		WT5000	
Vermogen [kW]	1000		2000		3000		4000		5000	
Ashoogte [m]	60	80	80	100	90	120	90	120	100	120
$PR = 10^{-6}$	142	155	175	187	198	216	213	231	233	245
$PR = 10^{-5}$	35	35	49	49	60	60	70	70	78	78

7.7.4 Conclusies

De volgende generieke conclusies kunnen worden getrokken, deze kunnen worden gebruikt als vuistregels::

- de $PR = 10^{-6}$ contour is gelijk aan het maximum van ashoogte plus halve rotordiameter en maximale werpafstand bij nominaal rotortoerental
- de $PR = 10^{-5}$ contour is gelijk aan de halve rotordiameter.

De generieke windturbinegegevens zijn op conservatieve wijze bepaald, zodat er wezenlijke verschillen mogelijk zijn met een bepaald type windturbine uit dezelfde vermogensklasse. Er wordt dan ook aanbevolen om een risicoanalyse ten behoeve van de vergunningsaanvraag te baseren op specifieke windturbinegegevens in plaats van generieke data. De generieke resultaten zijn met name geschikt om een eerste inschatting te maken ten aanzien van de optredende risico's en zodoende te beoordelen of en voor welk doel een risicoanalyse nodig is.

8 Module V

Informatie volgt.

9 Module VI

De wetenschappelijke onderbouwing voor Module VI is te vinden in NATO richtlijn AAST [40].

9.1 Civiele explosieaandachtsgebieden

Deze afstanden in het Bkl komen overeen met de Circulaire opslag ontplofbare stoffen voor civiel gebruik [41]. De methode om deze afstanden te bepalen is gegeven in Module VI. Voor deze methode zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- De ontplofbare stoffen en voorwerpen voor civiel gebruik zijn afhankelijk van de specifieke gevaarsaspecten ingedeeld in de gevarensklasse 1.1, 1.2, 1.3 en 1.4. Daarnaast worden de ontplofbare stoffen en voorwerpen ingedeeld in een aantal compatibiliteitsgroepen. Deze groepsindeling is ontworpen om ervoor te zorgen dat geen stoffen en/of artikel worden samengeladen die een ongunstige uitwerking op elkaar hebben of waarbij het totale risico toeneemt. De compatibiliteit van een ontplofbare stof of voorwerp wordt met een letter aangegeven. In de NATO-richtlijn AASTP-1 [40] is gedetailleerde informatie gegeven over deze compatibiliteitsgroepen, de diverse gevarensklassen en de maatgevende effecten per gevarensklasse.
- Opslag van ontplofbare stoffen en voorwerpen voor civiel gebruik uit verschillende gevarensklassen en compatibiliteitsgroepen in dezelfde bewaarplaats moet plaatsvinden overeenkomstig de daarvoor geldende samenladingsregels uit de NATO-richtlijn AASTP-1 [40]. Een indeling in compatibiliteitsgroep heeft geen invloed op het vaststellen van de grootte van de explosie aandachtsgebieden
- Bij de opslag van ontplofbare stoffen en voorwerpen in meerdere bewaarplaatsen, moeten interne veiligheidsafstanden worden aangehouden om sympathische reacties te voorkomen. De aanbevolen veiligheidsafstanden zijn vermeld in de NATO-richtlijn AASTP-1 [40].
- Voor het bepalen van de explosie aandachtsgebieden moet worden uitgegaan van de totale opgeslagen hoeveelheden ontplofbare stoffen en voorwerpen per bewaarplaats.
- De opslag van ontplofbare stoffen en voorwerpen vindt plaats in één bewaarplaats die niet-gecompartimenteerd is.
- De opslag vindt plaats in een bovengrondse licht geconstrueerde bewaarplaats.
- Een bovengrondse bewaarplaats is op het maaiveld gesitueerd.
- Een licht geconstrueerde bewaarplaats: de wanden zijn vervaardigd van beton met een dikte van minder dan 20 cm of baksteen met een dikte van minder dan 23 cm. Het dak is vervaardigd van een licht materiaal en de vloer is van beton vervaardigd.

9.1.1 Civiele explosieaandachtsgebieden voor opslag van ontplofbare stoffen en voorwerpen van gevarensklasse 1.1

Voor de uitworp van brokstukken, ofwel scherfwerking, door ontplofbare stoffen en voorwerpen van gevarensklasse 1.1 is in het Bkl, bijlage IX is een conservatieve afstand gebruikt van 62 meter voor Q kleiner dan of gelijk aan 14,1 kg.

9.1.2 Civiele explosieaandachtsgebieden voor opslag van ontplofbare stoffen en voorwerpen van gevarensklasse 1.4

De afstand van 20 meter voor het civiel explosieaandachtsgebied B voor gevarensklasse 1.4 is ontleend aan het Vuurwerkbesluit en geldt als minimale afstand die moet worden aangehouden tussen een grootschalige opslag van consumentenvuurwerk (meer dan 10 ton) en een beperkt kwetsbaar of kwetsbaar object en een geprojecteerd beperkt kwetsbaar of kwetsbaar object.



Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

10 Begrippenlijst

Informatie volgt.

11 Referenties

1. Martinsen, W.E. en J.D. Marx. *An improved model for the prediction radiant heat from fireballs*, International Conference and Workshop on Modelling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, CCPS. San Francisco, California, September 28 – October 1, pp. 605-621. 1999.
2. Institute), K.R.D.M., *Klimaatatlas van Nederland – normaalperiode 1971 - 2000*, ed. E. B.V., Rijswijk.
3. E.S. Kooi, M.B. Spoelstra, en P.A.M. Uijt de Haag, *Evaluation of the Dutch QRA directives for storage and transportation of flammable liquids (RIVM rapport 620550001)*, 2010.
4. VROM, Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties, and Ministerie van Verkeer en Waterstaat. *Guidelines for quantitative risk assessment (purple book)*. Publicatiereeks gevaarlijke stoffen 3. 2005.
5. *Untersuchung der versagensgrenzen eines mit Flüssiggas gefüllten Eisenbahnkesselwagens bei Unterfeuerung*. Abschlussbericht van 13/9/99
6. J.M. Ham, A.W.T.v.B., *Invloed systeemreacties LPG-tankinstallatie op risico LPG-tankstation (ligging PR-contour)*, TNO rapport R 2004/107, 2004.
7. Instrument domino-effecten, www.rivm.nl.
8. Uijt de Haag, P.A.M. en J.G. Post, *Risicoanalyse brandstofpontons*, RIVM rapport 610066013, 2001.
9. AVIV, *Veiligheid Vervoer over de Weg. Eindrapport deelnota 1. Basisgegevens en kerncijfers zwaar verkeer*, 2006.
10. *Handreiking verantwoordingsplicht groepsrisico*. (Geraadpleegd www.groepsrisico.nl)
11. Ministeries VROM, et al. *Methoden voor het bepalen van mogelijke schade: Aan mensen en goederen door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen (Groene Boek)*, Publicatiereeks gevaarlijke stoffen 1 (PGS1). December 2003.
12. IJmuiden, H.L., *Veiligheidsrapport BRZO '99*, 2001.
13. DNV, *Veiligheidsrapportage LNG-installatie Maasvlakte*, april 2003.
14. Tebodin, *Veiligheidsrapport Air Products Nederland B.V. locatie Rotterdam (Botlek)*, 2001.
15. A. Kruithof en K. Ham, *Schadecriteria zuurstof en stikstof. TNO rapport R 2004/458*, R 2004/458,
16. Lees, F.P., *Loss Prevention in the Process Industries* Butterworth Heinmann. Vol. 2. 1999
17. HSL, *Review of HSE Building Ignition Criteria (HSL/2006/33.2006)*, 2006.
18. WS Atkins Consultants Ltd for the Health and Safety Executive, *Effects of flashfires on building occupants (Research Report 084)*, 2003.

19. WS Atkins Consultants Ltd for the Health and Safety Executive, *Thermal radiation criteria for vulnerable populations (Contract Research Report 285/2000)*. 2000.
20. National Transportation Safety Board, *Addendum (Reconsideration Request to:) Texas Eastern Transmission Corporation Natural Gas Pipeline Explosion and Fire, Edison, New Jersey March 23, 1994.* , 1994.
21. http://www.safety-sc.com/862_Gasramp%20Gellingen.pdf.
22. *Probitrelaties*. (Geraadpleegd
23. *Safeti-nl*. (Geraadpleegd
http://www.rivm.nl/Onderwerpen/S/SAFETI_NL
24. Sluijs, L.P. en W.J. Oudshoorn, *Onderzoek naar uniformering subselectiemethodiek QRA*, Tebodin document 3800317, 2004.
25. *Handreiking windturbines*. (Geraadpleegd
<https://www.infomil.nl/onderwerpen/veiligheid/windturbines/>
26. A.J. Eggers, et al. *Exploratory study of HAWT blade throw risk to nearby people and property*, AIAA. pp. 355-367. 2001.
27. Turner, D.M., *A Monte Carlo method for determining the risk presented by wind turbine blade failures*. Wind Engineering, 1986. **11**(1).
28. J. Wieringa en P.J. Rijkoort, *Windklimaat van Nederland, SDU1983*, 1983.
29. *Handboek energieopbrengsten van windturbines*, 1989.
30. *Windturbines langs auto-, spoor- en vaarwegen; Beoordeling van veiligheidsrisico's, Rijkswaterstaat en NS Railinfrabeheer, Doc. Nr. VRWP-99004*, 15 april 1999.
31. H. Braam, G.J.v.M., R.W. Smit, *Handboek Risicozonering Windturbines, 2e geactualiseerde versie*. 2005: SenterNovem.
32. *Rekenmethodiek zonering windturbines, in opdracht van NV Nederlandse Gasunie en Tennet TSO B.V. (74101452 GCS 12.R.53190)*, 2012.
33. RIVM, *Protocol voor aanpassing van de rekenmethodieken risicoanalyse*, 2012.
34. *Caithness windfarms information forum*. (Geraadpleegd
<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/>
35. B.J.M. Sharples, *Damage and Critical analysis of accidents to assist in avoiding accidents on offshore wind farms on the OCS*. 2010.
36. *Fraunhofer Iwes* (Geraadpleegd
<http://windmonitor.iwes.fraunhofer.de/> (niet meer bereikbaar)
37. *Energi Styrelsen* (Geraadpleegd <http://www.ens.dk/>
38. *Renewable UK* (Geraadpleegd <http://www.renewableuk.com/>
39. *Windenergienieuws.nl* (Geraadpleegd <http://www.windenergie-nieuws.nl/>
40. NATO, *NATO guidelines for the storage of military ammunition and explosives - Edition B Version 1*. 2015.
41. *Circulaire opslag ontplofbare stoffen voor civiel gebruik*. (Geraadpleegd <https://wetten.overheid.nl/BWBR0020120/2006-07-26>