

# ACHTERGROND- INFORMATIE

## BIJLAGE BIJ

### HANDBOEK FAALFREQUENTIES 2009

voor het opstellen van een  
veiligheidsrapport

05/05/2009



Vlaamse overheid  
Departement LNE  
Afdeling Milieu-, Natuur- en Energiebeleid  
Dienst Veiligheidsrapportering



# **ACHTERGROND- INFORMATIE**

## **BIJLAGE BIJ**

### **HANDBOEK FAALFREQUENTIES 2009**

voor het opstellen van een  
veiligheidsrapport



Vlaamse overheid  
Departement LNE  
Afdeling Milieu-, Natuur en Energiebeleid  
Dienst Veiligheidsrapportering



# Inhoudstafel

HOOFDSTUK 1: INLEIDING	9
HOOFDSTUK 2: DRUKTANKS	15
HOOFDSTUK 3: VERPLAATSBARE DRUKHOUDERS	22
HOOFDSTUK 4: ATMOSFERISCHE TANKS	24
HOOFDSTUK 5: WARMTEWISSELAARS	41
HOOFDSTUK 6: POMPEN EN COMPRESSOREN	46
HOOFDSTUK 7: LEIDINGSYSTEMEN	51
HOOFDSTUK 8: VERLADINGSACTIVITEITEN	61
HOOFDSTUK 9: BRAND IN MAGAZIJNEN	63
HOOFDSTUK 10: STUKGOEDEREN	65
HOOFDSTUK 11: GEVOLGBEPERKENDE MAATREGELEN	67
HOOFDSTUK 12: VERVOLGGEBEURTENISSEN	73
HOOFDSTUK 13: REFERENTIES	79



## Voorwoord

Het Handboek Faalfrequenties 2009 bevat enkel nog de faalfrequenties voor de verschillende installaties. In vorige versies van het handboek werd ook de achtergrondinformatie in het Handboek Kanscijfers zelf opgenomen. Nu is er voor de eenvoud en het gebruiksgemak voor gekozen om het Handboek Faalfrequenties te beperken tot de faalfrequenties zelf.

Bijgevolg wordt de achtergrondinformatie in een afzonderlijk document verzameld. Deze informatie mag immers niet verloren gaan en dient te allen tijde beschikbaar te zijn om te kunnen achterhalen hoe de faalfrequenties bepaald zijn.





## Hoofdstuk 1: Inleiding

Voor de bepaling van de faalwijzen en faalfrequenties voor atmosferische en druktanks werd gesteund op onderstaande informatie.

### 1.1. ALGEMEEN (SERTIUS)

Voor de keuze van de faalwijzen dient men zich rekenschap te geven van het feit dat standaard dispersiemodellen (2D-modellen) in de praktijk opgebouwd zijn rond 2 basismodellen, nl. rond een model voor instantane vrijzettingen enerzijds en rond een model voor lekken anderzijds. Tusseliggende situaties (kortstondige vrijzetting, al dan niet met sterk variërend debiet) worden via een “handigheidje” gemodelleerd, nl. door de vrijzetting voor te stellen als een reeks opeenvolgende “puffs”.

Door deze manier van werken levert de modellering van tusseliggende situaties vaak erg vreemde resultaten op. Dit wordt versterkt door het feit dat in de voorafgaande modellering van de vrijzetting ook slechts 2 uitersten gekend zijn, nl. modellen voor breuk en modellen voor vrijstralen (continue vrijzettingen). Belangrijke fenomenen, zoals de initiële opmenging van lucht, worden daarbij op sterk uiteenlopende wijze behandeld. Voor overgangssituaties tussen breuk en continue vrijzettingen zijn de resultaten van de dispersieberekeningen erg onbetrouwbaar.

Om dit effect op te vangen, is voorgesteld om een instantaan falen van een houder op 2 manieren te modelleren, nl. eenmaal als “breuk” en eenmaal als een “vrijzetting van de totale inhoud in 10 minuten”. De frequentie voor instantaan falen wordt daarbij verdeeld over de 2 vrijzettingsscenario’s (zie §1.2). De invoering van het “10 minuten” scenario is dus puur rekentechnisch.

Er wordt uitgegaan van twee basisprincipes:

- De faalfrequentie van een onderdeel bestaat uit 2 deelfrequenties, m.n. uit de frequentie voor instantaan falen “ $P_I$ ” en uit de frequentie voor lekkage “ $P_L$ ”. Beide frequenties worden bepaald aan de hand van statistisch onderzoek.
- Onder “instantaan falen” wordt verstaan het falen van een onderdeel waardoor de inhoud ervan in zeer korte tijd wordt vrijgezet. Onder “lekkage” wordt verstaan het falen van een onderdeel waardoor de inhoud ervan over langere tijd wordt vrijgezet.  
De grens tussen “zeer korte tijd” en “langere tijd” wordt op 10 minuten gelegd. Vrijzettingen gedurende meer dan 10 minuten komen t.o.v. de receptoren eerder over als continue vrijzettingen, vrijzettingen van minder dan 10 minuten eerder als instantane vrijzettingen.

De keuze van de faalwijzen en de verdeling van de frequenties over de faalwijzen start met het bepalen van de lekdiаметer die aanleiding geeft tot een vrijzetting in 10 minuten,

$D_{10}$ . Afhankelijk van deze diameter en de diameter van de grootste aansluiting,  $D_{max}$ , wordt volgende basisverdeling gebruikt (Tabel 1):

Tabel 1: Basisverdeling voor faalfrequenties

$D_{10} > D_{max}$		$D_{10} \leq D_{max}$	
Faalwijze	Frequentie	Faalwijze	Frequentie
Breuk	$P_I/2$	Breuk	$P_I$
Vrijzetting in 10 min	$P_I/2$		
Lek $\leq D_{L, max}$	$P_L$	Lek $\leq D_{L, max}$	$P_L$

$D_{L, max}$  = maximale lekdiаметer (=  $\min(D_{10}, D_{max})$ )

Voor lekkage worden in het algemeen 3 faalwijzen beschouwd:

- een klein lek representatief voor lekken met  $d \leq d_K$  en met frequentie  $\alpha \cdot P_L$ ;
- een middelgroot lek representatief voor lekken met  $d_K < d \leq d_M$  en met frequentie  $\beta \cdot P_L$ ;
- een groot lek representatief voor lekken met  $d_M < d \leq D_{L, max}$  en met frequentie  $\gamma \cdot P_L$ .

Hierbij is  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ .

Afhankelijk van de grootte van  $D_{L, max}$ , worden de faalwijzen voor lekkage uit Tabel 2 voor de kwantitatieve risicoanalyse weerhouden.

Tabel 2: Faalwijze en frequentie voor lekkage

$D_{L, max} \leq d_K$		$d_K < D_{L, max} \leq d_M$		$d_M < D_{L, max}$	
Faalwijze	Frequentie	Faalwijze	Frequentie	Faalwijze	Frequentie
Klein lek $d_{eq} = 10 \text{ mm}$	$(\alpha + \beta + \gamma) \cdot P_L$	Klein lek	$\alpha \cdot P_L$	Klein lek	$\alpha \cdot P_L$
		Middelgroot lek $d_{eq} = D_{L, max}$	$(\beta + \gamma) \cdot P_L$	Middelgroot lek	$\beta \cdot P_L$
				Groot lek $d_{eq} = D_{L, max}$	$\gamma \cdot P_L$

Bemerk dat voor kleine lekken steeds een lekdiаметer van 10 mm aangenomen wordt.

## 1.2. INSTANTAAN FALEN

Als frequentieverdeling tussen “breuk” en “vrijzetting van de volledige inhoud in 10 minuten” wordt uitgegaan van een verhouding van 50 - 50. In het rapport van Smith en Warwick (1981) worden 2 instantane vrijzettingen gerapporteerd. Eén hiervan is duidelijk een breuk, de andere is eerder te beschouwen als een uitstroom in 10 minuten. Een verdeling 50 - 50 tussen “breuk” en “uitstroom in 10 minuten” lijkt daarom aangewezen.

### 1.3. LEKKAGES (SGS)

In het “Handboek Faalfrequenties 2009” worden voor de lekkages bepaalde equivalente lekdiameters gedefinieerd en een bepaalde verdeling tussen de verschillende lekkages toegepast. Beide zijn gebaseerd op onderstaande redenering.

Voor installaties die als atmosferische tanks of druktanks kunnen beschouwd worden, dienen lekkages met een representatieve lekdiаметer doorgerekend te worden. Elk van deze representatieve lekdiameters wordt geassocieerd met een bereik aan lekdiameters.

In de verdere afleiding van de equivalente diameters en diameterintervallen worden volgende twee voorwaarden vooropgesteld:

- Er dient voldaan te worden aan de voorwaarde dat de vrijgestelde hoeveelheid aan de equivalente diameter representatief moeten zijn voor de vrijgestelde hoeveelheden gekoppeld aan de diameters binnen het interval. De vrijgestelde hoeveelheid is evenredig met de equivalente diameter in het kwadraat.
- Bovendien moet voldaan worden aan de vereiste dat de som van de frequenties voor de lekkages gelijk is aan de totale lekfrequentie.

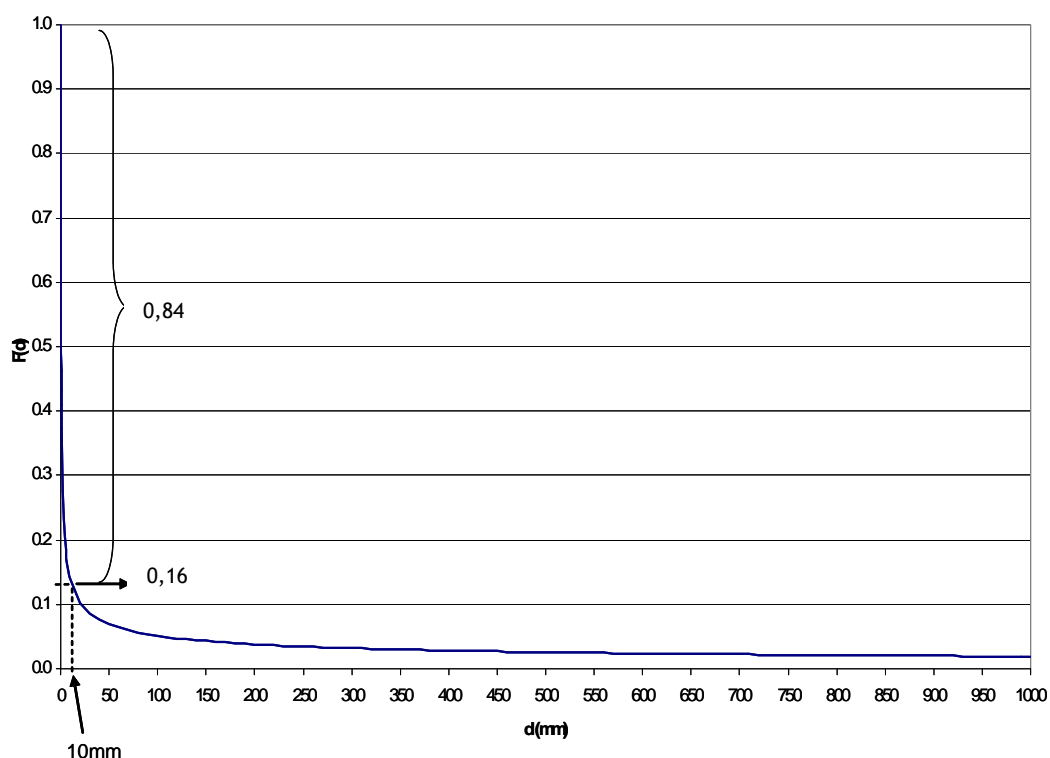
Op basis van deze voorwaarden en de informatie uit (HSE, 1997) met betrekking tot de verdeling van de lekdiameters voor drukvaten kan de equivalente diameter voor een diameterinterval bepaald worden. Hierbij worden volgende symbolen gebruikt:

$\alpha$	0,43
$d$	lekdiаметer waarvoor $F$ bepaald wordt
$d_0$	0,1 mm
$d_1$	minimale diameter van de lekgrootte categorie
$d_2$	maximale diameter van de lekgrootte categorie
$d_{eq}$	equivalente diameter
$F$	frequentie (per jaar) dat een lek optreedt met een diameter $\geq d$
$F'(d)$	afgeleide van de verdelingsfunctie
$f_0$	totale lekfrequentie
$\Delta F$	faalfrequentieinterval voor de lekgrootte categorie $[d_1;d_2]$

De verdelingsfunctie bekomen uit (HSE, 1997) en opgenomen in de (DNV), wordt gegeven als:

$$F(d) = f_0 \left( \frac{d_0}{d} \right)^\alpha$$

De fractie van de lekken met een lekdiаметer groter dan  $d$ , wordt gegeven door de factor  $(d_0/d)^\alpha$ . Dit wordt voorgesteld in Figuur 1. Hieruit blijkt dat 16% van de lekken aanleiding geeft tot een lekdiаметer groter dan 10 mm.



Figuur 1: Verdeling van de lekdiameters

De equivalente diameter voor een lekgrootte categorie  $[d_1; d_2]$  rekening houdende met voorgaande verdeling en de bovenstaande voorwaarden wordt dan:

$$d_{eq}^2 = \frac{\int_{d_1}^{d_2} F'(d) d^2 \delta d}{\Delta F}$$

Uitwerking van voorgaande formule wordt:

$$d_{eq}^2 = \frac{\alpha f_0 d_0^\alpha (d_2^{2-\alpha} - d_1^{2-\alpha})}{2 - \alpha \Delta F}$$

Bovenstaande vergelijking kan eveneens geschreven worden in functie van de diameter door substitutie van  $\Delta F$  aan de hand van de verdelingsfunctie in het interval  $[d_1; d_2]$ . Dit wordt dan:

$$d_{eq}^2 = \frac{\alpha (d_2^{2-\alpha} - d_1^{2-\alpha})}{2 - \alpha (d_1^{-\alpha} - d_2^{-\alpha})}$$

Het totale bereik, van 0,1 mm tot de grootste aansluiting, wordt opgedeeld in 3 lek-grootte categorieën.

De equivalente diameter, die representatief is voor de gekozen lek-grootte categorieën, wordt berekend aan de hand van de verbanden afgeleid in voorgaande paragraaf. Bovendien wordt het groot lek afhankelijk gemaakt van de diameter van de grootste aansluiting.

#### Klein lek

Het diameterinterval voor het klein lek wordt vastgelegd op 0,1 - 10 mm. Rekening houdende met voorgaande paragraaf wordt volgende faalfrequentie en equivalente diameter afgeleid (zie tevens Figuur 1):

$$\begin{aligned} F &= 84\% f_0 \\ d_{eq} &= 2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Rekening houdende met de onbetrouwbaarheid van de verdelingsfunctie binnen het diameterinterval, wordt de equivalente lek-diameter voor het klein lek gelijkgesteld aan de bovengrens van het interval namelijk 10 mm.

#### Middelgroot lek

Het diameterinterval voor het middelgroot lek wordt vastgelegd op 10 - 50 mm, aangezien de meeste aansluitingen groter zijn dan 50 mm. Bovendien wordt aangenomen dat de faalfrequentie van het middelgroot lek 8% van de lek-frequentie bedraagt (zie Figuur 1). Rekening houdende met voorgaande paragraaf, kan volgende faalfrequentie en equivalente diameter afgeleid worden:

$$\begin{aligned} F &= 8\% f_0 \\ d_{eq} &= 25 \text{ mm} \end{aligned}$$

#### Groot lek

Het groot lek wordt gemodelleerd met een diameter gelijk aan de maximale lek-diameter ( $D_{L, \max}$ ). Bovendien wordt aangenomen dat de faalfrequentie van het groot lek de resterende 8% van de lek-frequentie bedraagt. Rekening houdende met voorgaande paragraaf, kan volgende faalfrequentie en equivalente diameter afgeleid worden:

$$\begin{aligned} F &= 8\% f_0 \\ d_{eq} &= D_{L, \max} \end{aligned}$$

## 1.4. BESLUIT – HBFF2009

Het Handboek Faalfrequenties 2009 is gebaseerd op bovenstaande redenering, waarbij de faalwijzen en faalfrequenties bepaald moeten worden volgens Tabel 1 en Tabel 2.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van volgende waarden, volgend uit bovenstaande afleiding:

- $d_K = 10$  mm en  $d_M = 50$  mm;
- $\alpha = 0,84$ ,  $\beta = 0,08$  en  $\gamma = 0,08$ .

$P_I$  en  $P_L$  worden in de volgende hoofdstukken afgeleid.

## Hoofdstuk 2: Druktanks

### 2.1. BASISFAALDATA VOLGENS SMITH & WARWICK

Daar tal van faaldata i.v.m. drukvaten gebaseerd zijn op het oorspronkelijk onderzoek van Smith & Warwick (1981) wordt hiervan een bondige samenvatting gegeven.

Dit onderzoek liep in de periode 1962-1978 ( $\pm$  16 jaar) over 310.000 vatjaren en 20.000 drukvaten.

In dit onderzoek waren begrepen:

- Steam extractors, receivers, drums, heaters, generators, pipes;
- Hot Gas heat exchangers;
- Super heaters;
- Water tube boiler bottom heaters;
- Jacketed autoclaves;
- Re-heat pipeworks;
- Cylinders;
- Ammonia storage tank;
- Gas cooled reactors;
- Nuclear accelerator tank;
- Cyclo Hexane reactor vessel;
- Evaporator vessel;
- HMT Boiler;
- Chemical reactor vessel.

Smith & Warwick definieerde twee faalcategorieën:

- Catastrofaal falen (catastrophic failure): dit houdt in dat het vat of de component lek slaat of de faling zo erg is dat een omvangrijke (major) herstelling of zelfs een vervanging zich opdringt;
- Potentieel gevaarlijk falen (potentially dangerous): is een defect dat een remediërende actie vergt en waarbij het verder in dienst (onder druk) houden zou kunnen resulteren in een gevaarlijke uitbreiding van het defect.

De voor het onderzoek geselecteerde installatietypes waren:

- Gelaste of gesmede, niet vuurverhitte drukvaten, boileromhulsels en vaten/tanks (drums) die niet blootgesteld werden aan omhullende/inslaande brand. De wanddikte was groter dan 9,5 mm (3/8") met een werkdruk van meer dan 725 kPa. De vaten werden gebouwd volgens de vereisten van een erkende ontwerpcode;
- Leeftijd bereik kleiner dan 40 jaar;
- Installatie waarvan niet herstelde defecten onder controle bleven gedurende de werking;
- Leidingstel gebouwd volgens vergelijkbare drukvatstandaarden, dit was echter niet representatief voor het geheel aan leidingstellen van de betrokken installatie.

De faalverdeling volgens oorzaak was als volgt:

Scheurpropagatie	216	94%
Bestaande defecten vóór oplevering	5	2%
Corrosie	1	<2%
Slechte werking - menselijke fout enz.	3	<2%
Kruip	3	<2%
Niet geverifieerd	1	<2%
<i>Totaal</i>	<i>229</i>	<i>100 %</i>

De meest voorkomende faaloorzaak is het optreden van scheurvorming (94%) in de installatie.

De onderliggende oorzaken van deze scheurvorming waren:

Materiaalmoetheid	52	24%
Corrosie	30	14%
Defecten vóór indienststelling	63	29%
Niet geverifieerd	61	28%
Diverse (kruip, slechte werking enz.)	10	5%
<i>Totaal</i>	<i>216</i>	<i>100%</i>

De verdeling van de primaire faaloorzaken van barsten was niet gebaseerd op een gedetailleerd metallurgisch onderzoek maar wel op de visuele inspectiebeoordeling van controleurs.

Verder kwam uit dit onderzoek o.a. eveneens naar voor dat in de beginjaren van de installatie de meest betekenisvolle falingen optraden: 64% falingen kwamen voor bij componenten met een leeftijd minder dan 10 jaar.

Tabel 3 toont de faalfrequenties die uit dit onderzoek afgeleid werden.

*Tabel 3: Originele faaldata voor alle type vaten (UK alleen) van Smith & Warwick (1981)*

Gebeurtenissen	Aantal*	Faalfrequenties per vatjaar en 99% betrouwbaarheidsintervallen
Aantal potentiële falingen	159	$4,1 \cdot 10^{-4} - 5,1 \cdot 10^{-4} - 6,3 \cdot 10^{-4}$
Aantal falingen met lekkage	57	$1,3 \cdot 10^{-4} - 1,8 \cdot 10^{-4} - 2,6 \cdot 10^{-4}$
Aantal catastrofale falingen	13**	$1,9 \cdot 10^{-5} - 4,2 \cdot 10^{-5} - 8,2 \cdot 10^{-5}$
<i>Totaal aantal</i>	<i>229</i>	<i><math>6,2 \cdot 10^{-4} - 7,4 \cdot 10^{-4} - 8,7 \cdot 10^{-4}</math></i>

\* Aantal gebeurtenissen hebben betrekking op 310.000 tankjaren.

\*\* 2 van de 13 incidenten hadden betrekking op ernstige schade van de tankstructuur met omvangrijke uitstroming tot gevolg, de overige 11 incidenten werden veroorzaakt door ernstige schade aan leidingaansluitingen en appendages.



## 2.2. FAALFREQUENTIES

In Tabel 4 worden de aanbevolen faaldata gegeven voor lekken kleiner dan 25 mm tot en met lekken van 150 mm. De instantane falingen in de laatste kolom omvatten alle lekken groter dan 150 mm inclusief catastrofaal falen. Deze faaldata zijn gebaseerd op de door Technica (Project F424) (intern document DNV) gewijzigde dataset van Smith & Warwick (1981). De weerhouden lekken zijn beperkt tot het drukvat, met inbegrip van het mangat, aansluitingen voor instrumentatie en leidingaansluitingen tot aan de eerste flens. Lekken in het bijhorend leidingstelsel zijn hierin niet opgenomen.

Tabel 4: Faalfrequentie bij drukvaten volgens lek grootte (HKC94, ARF99)

Lekgrootte (mm)	< 25	25 - 50	50 - 150	Instantaan
Aantal falingen	25	16	3	2
Faalfrequentie per vatjaar*	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$9,7 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-6}$
99 % betrouwbaarheidsintervallen				
Ondergrens	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$
Bovengrens	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-5}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$

\*Aantal gebeurtenissen hebben betrekking op 310.000 tankjaren.

De allesomvattende lek frequentie bedraagt  $1,4 \cdot 10^{-4}$  per vatjaar met een 99 % betrouwbaarheidsinterval van  $9,5 \cdot 10^{-5}$  tot  $2,1 \cdot 10^{-4}$  per vatjaar. Als generieke faalfrequentie voor instantaan falen van drukvaten wordt een faalfrequentie van  $6,5 \cdot 10^{-6}$  per vatjaar aanbevolen.

## 2.3. FAALWIJZEN EN -OORZAKEN

De belangrijkste wijzen van falen voor drukvaten (ARF99) zijn:

- externe lekken (met inbegrip van breuken) van de wand, lassen, flenzen of montagestukken;
- verhittingsbreuken ten gevolge van omhullende/inslaande brand (met mogelijks BLEVE als gevolggebeurtenis).

De belangrijkste oorzaken van falen bij drukvaten zijn van mechanische aard (materiaal- en constructiedefecten, operationele overbelasting en materiaalmoetheid) en corrosie. Bij procesvaten en reactoren is de faaloorzaak dikwijls verbonden met de vloeistofinhoud.

In 94% van de gevallen is het falen van drukvaten het gevolg van scheuren die in het vat gevormd worden. Voor 71% ontstaan deze barsten in de lasnaden of in een door verhitting aangetaste zone (Smith, 1986).

Tabel 5 geeft een overzicht van de verdeling van de faaloorzaken per lek grootte bij drukvaten (ARF99, HKC94).

Tabel 5: Faaloorzaak bij drukvaten volgens leksgrootte (HKC94, ARF99)

Faaloorzaak	Leksgrootte (mm)			Instantaan	Totaal	Aandeel*
	< 25	25 - 50	50 - 150			
Ontwerpfout	2	1	0	0	3	6,5%
Materiaal- en/of constructiedefect, broosheid waarschijnlijk inbegrepen	5	3	1	0	9	19,5%
Slijtage	1	0	0	0	1	2%
Metaalmoetheid	6	3	0	0	9	19,5%
Corrosie	1	3	0	0	4	9%
Thermische moetheid	1	0	0	0	1	2%
Kruip	2	0	1	0	3	4%
Overbelasting	1	2	0	2	5	11%
Onbekend	6	4	1	0	11	24%
Aantal falingen volgens leksgrootte	25	16	3	2	46	100%
Procentueel aandeel	54%	35%	6,5%	4%		100%

\*Aantal gebeurtenissen hebben betrekking op 310.000 tankjaren.

Deze gegevens zijn gebaseerd op een door Technica (Project F424) (intern document DNV) gewijzigde dataset van Smith & Warwick (1981), waarbij alleen rekening gehouden werd met de volgende faalgegevens:

- de falingen die beschreven werden als catastrofale falingen of lekken;
- de falingen die plaatsgrepen in het drukvat zelf en dit tot bij de eerste flensverbinding op de leidingen, de lekken van andere leidingen werden niet weerhouden;
- de lekken werden geklasseerd volgens een equivalente gatdiameter die door Smith & Warwick aangenomen werd.

Terwijl de originele dataset van Smith & Warwick respectievelijk 12 catastrofale falingen en 76 lekken omvat bestaat de DNV gescreende, tengevolge van de eliminatie van leidinglekken, uit 2 catastrofale breuken en 44 lekken op een totaal van 20.000 drukvaten geaccumuleerd over 310.000 vatjaren.

## 2.4. INVLOEDSFACTOREN OP DE LEKFREQUENTIE VAN SPECIFIEKE TANKS (ARF99)

### Effect van werkingsmiddelen

Vergelijking van procesvaten in de “onshore procesindustrie” (Arulanantham & Reeves 1981) met deze van de “offshore industrie” (OREDA92; HSE, 1997) toont aan dat de lekfrequenties ongeveer dezelfde zijn. Daarom wordt verondersteld dat gelijksoortige drukvaten in verschillende industrieën eveneens ongeveer dezelfde lekfrequenties hebben.

### Effect van vatmateriaal

Hier wordt verwezen naar generieke lekfrequenties van conventionele stalen vaten. Door verglazing zou de lekfrequentie van vaten met zuren tweemaal groter zijn dan die van stalen vaten met dezelfde productinhoud (Technica C1151, intern document DNV).

## Effect van vatinhoud

Het nadeel dat sommige vloeistoffen zoals b.v. ammoniak corrosiever zijn dan anderen zou gecompenseerd moeten worden door extra inspecties van het vat.

De lekfrequentie bij vaten waarin toxische vloeistoffen opgeslagen zijn is 10 keer groter dan bij procesvaten waarin andere producten opgeslagen zijn (Arumalatham & Reeves, 1981).

Ondervinding met reactoren en kolommen wijst uit dat de faalfrequentie groter is bij hoog reactieve vloeistoffen.

## Effect van ondergrondse tanks

Daar voor de meeste ondergrondse opslagtanks weinig of geen faaldata voorhanden zijn worden ze hoofdzakelijk geschat uit gegevens over bovengrondse tanks. Hierbij wordt echter abstractie gemaakt van impact en brandescalaties.

De enige faalwijze van opslagtanks die van belang is voor de kwantitatieve risicoanalyse is het ongewenst vrijkomen van gevaarlijke stoffen ten gevolge van tanklekken of -breuken (ARF99).

Oorzaken die aan de basis kunnen liggen van deze faalwijzen zijn:

- ondergrondse lekkage door corrosie van de tankwanden;
- overvulling waardoor een lek ontstaat aan het tankoppervlak;
- impact, vb. door het vallen van een vliegtuig, onderhoudsactiviteiten of brokstukken van aangrenzende ongevallen;
- aardbevingen of aardverschuivingen;
- beschadiging tijdens graafwerken;
- constructiefout(en), materiaaldefect(en) of foutieve exploitatie.

Daar ondergrondse opslagtanks minder door impact beschadigd worden dan bovengrondse zullen bij eerstgenoemde minder beschadigingen optreden dan bij de bovengrondse tanks. Nochtans kunnen schokken beschadigingen aanbrengen aan de bovengrondsliggende leidingen van de ondergrondse opslagtank. In het algemeen hebben schokeffecten slechts een klein aandeel in het tot stand brengen van lekken en breuken en dit zowel voor ondergrondse als bovengrondse tanks.

Alhoewel ondergrondse tanks moeilijker te inspecteren zijn gaat men er van uit dat, door de roestwerende en kathodische bescherming, roest niet meer voorkomt dan bij bovengrondse.

Mechanisch falen tengevolge van menselijke fouten heeft slechts een klein effect op de globale faalfrequentie van ondergrondse opslagtanks.

Het elimineren van warme BLEVE is de belangrijkste reden waarom opslagtanks ondergronds geplaatst worden.

## Effect van passieve brandbescherming

Teneinde de moeilijkheden door “coating” te compenseren moeten tanks met passieve brandbescherming nauwkeurig geïnspecteerd worden. In dit geval wordt het effect van brandbescherming slechts herleid tot het reduceren van BLEVE. Het hoofddoel van deze inspecties is het voorkomen van corrosie.

## Effect van tankdoorlichting (radiografie)

Radiografie (10% in UK en 100% in Hong Kong) zou de frequentie van catastrofale breuken bij LPG-vaten met 30% reduceren (Whittle, 1993).

## Effect van uitglorieien (stress relief)

Hierdoor wordt de reductie van de catastrofale breukfrequenties op 25% geschat (Whittle, 1993). De combinatie van drukontlading en 100% radiografie, zoals vereist voor ondergrondse tanks in Hong Kong zou de breukfrequentie met 50% reduceren.

## Effecten van andere bedrijfspecifieke factoren

Standaarden i.v.m. veiligheidsbeheer, inspectie, ontwerp codes, werkingsdruk en -temperatuur, lage buitentemperaturen, leeftijd en procescontinuïteit hebben eveneens een invloed op de lek- en/of breukfrequentie van drukvaten.

## 2.5. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009

### Procesinstallaties

Als basis voor de berekening van de faalfrequentie werd de data van Smith & Warwick (1981) weerhouden. De populatie waarop de studie van Smith & Warwick gebaseerd is, bestaat voornamelijk uit stoomvaten. Deze populatie werd beschouwd als een populatie van procesdrukvaten.

De totale faalfrequentie voor het instantaan falen van een procesdrukvat werd berekend op  $6,5 \cdot 10^{-6}$ /vatjaar. De totale faalfrequentie voor de lekfaalwijzen werd bepaald op  $1,4 \cdot 10^{-4}$ /vatjaar.

### Opslaginstallaties

In de in Vlaanderen gehanteerde subselectiemethodiek (RIVM) wordt een onderscheid gemaakt tussen opslag- en procesinstallaties. Hierbij is de omstandigheidsfactor voor opslaginstallaties een factor 10 lager dan deze voor procesinstallaties. Om in lijn te blijven met deze subselectiemethodiek is besloten om ook voor de faalfrequenties een 10 maal lagere faalfrequentie te hanteren voor opslaginstallaties in vergelijking met procesinstallaties.

Voor de ingegraven en ingeterpte opslagdruktanks wordt uitgegaan van de veronderstelling dat er geen thermisch geïnduceerde BLEVE kan voorkomen. Hierdoor wordt de faalfrequentie voor instantaan falen herleidt tot 30% van de faalfrequentie voor bovengrondse opslagdruktanks (PB), zodat de totale faalfrequentie voor instantaan falen  $2,0 \cdot 10^{-7}$  bedraagt.

### Tankwagens en spoorwagens

Voor tankwagens en spoorwagens worden de faalfrequenties gelijk genomen aan deze voor de opslaginstallaties.

## Hoofdstuk 3: Verplaatsbare drukhouders

### 3.1. GASFLESSEN

Het gebruik van flessen voor het verhandelen van vloeibare gassen dateert van de jaren 1870-1880. Cavrois (Cavrois, 1985) geeft een historisch overzicht van het in gebruik nemen van flessen en de evolutie tot op heden.

Er zijn diverse ontwerpcodes (DOT 3AA (VS), BS 5045 (UK), ISO 4705, ...), maar vanuit risicoteknisch standpunt kan men stellen dat het grootste aantal oorzaken van het falen voor nagenoeg alle flessen vergelijkbaar is.

De flessen zijn altijd gebouwd uit koolstofstaal (eventueel gelegeerd met nikkel, chroom, molybdeen en/of mangaan) of aluminium en zijn (las)naadloos. De technologische evolutie is van die aard dat er inzake materiaalkarakteristieken, grote verschillen zijn tussen de flessen gebouwd vóór 1930, tussen 1930 en 1950 en ná 1950.

In de schoot van het *Industrial Gases Committee* worden sedert 1977 alle gerapporteerde ongevallen verzameld. Marchal (Marchal, 1985) bespreekt de resultaten van een grondige analyse die draagt op ongeveer 10.000.000 flessen voor de periode van 1977-1984. In deze periode werden 74 ongevallen gemeld waarbij een fles begaf.

In 13 gevallen lag de oorzaak bij de fles zelf, in de andere gevallen was er een externe invloed.

Marchal deelde de 74 ongevallen in naar volgende oorzaken:

- Oorzaken eigen aan de fles:
  - Fabricagefout (3);
  - Materiaalfout (10).
  
- Externe oorzaken
  - Mechanische belasting (6);
  - Corrosie (6);
  - Overvulling (2);
  - Verkeerde opstelling (1);
  - Afkoppelen van een niet lege fles (4);
  - Niet compatibel materiaal bij aansluiting (6);
  - Vallen (van een camion) (6);
  - Andere, voornamelijk menselijke fout (30).

Tabel 6 herneemt de verschillende oorzaken en geeft aan welke de kans op voorkomen is per oorzaak en de oorzaken die geacht worden aanleiding te kunnen geven tot explosie van de fles (E) en/of lek (L) aan de fles.

Tabel 6: Oorzaken van het falen van een fles

Oorzaak	Lek (L) of explosie (E)	Kans op voorkomen (per fles.jaar)
Fabricage fout (3)	E en L	$4,8 \cdot 10^{-9} - 4,3 \cdot 10^{-8} - 1,6 \cdot 10^{-7}$
Materiaalfout (10)	E en L	$5,3 \cdot 10^{-8} - 1,4 \cdot 10^{-7} - 3,1 \cdot 10^{-7}$
Mechanische belasting (6)	E en L	$2,2 \cdot 10^{-8} - 8,6 \cdot 10^{-8} - 2,2 \cdot 10^{-7}$
Corrosie (6)	E en L	$2,2 \cdot 10^{-8} - 8,6 \cdot 10^{-8} - 2,2 \cdot 10^{-7}$
Overvulling (2)	E en L	$1,5 \cdot 10^{-9} - 2,9 \cdot 10^{-8} - 1,6 \cdot 10^{-7}$
Verkeerde opstelling (1)	E en L	$7,1 \cdot 10^{-11} - 1,4 \cdot 10^{-8} - 1,1 \cdot 10^{-7}$
Afkoppelen van een fles (4)	L	$9,6 \cdot 10^{-9} - 5,7 \cdot 10^{-8} - 1,8 \cdot 10^{-7}$
Materiaal bij aansluiting (6)	L	$2,2 \cdot 10^{-8} - 8,6 \cdot 10^{-8} - 2,2 \cdot 10^{-7}$
Val (6)	L	$2,2 \cdot 10^{-8} - 8,6 \cdot 10^{-8} - 2,2 \cdot 10^{-7}$
Andere (30)	E en L	$2,5 \cdot 10^{-7} - 4,3 \cdot 10^{-7} - 6,7 \cdot 10^{-7}$
<i>Totaal (74)</i>	<i>E en L</i>	$7,4 \cdot 10^{-7} - 1,1 \cdot 10^{-6} - 1,4 \cdot 10^{-6}$

Uitgaande van de aannames die zijn gesteld in de tweede kolom van Tabel 6 resulteert dit in volgende faaldata:

- Lek aan een fles:  $7,4 \cdot 10^{-7} - 1,1 \cdot 10^{-6} - 1,4 \cdot 10^{-6}$  per fles.jaar
- Explosie van een fles:  $6,1 \cdot 10^{-7} - 9,0 \cdot 10^{-7} - 1,2 \cdot 10^{-6}$  per fles.jaar

Deze faalfrequenties mogen echter niet samengeteld worden, vermits de meeste oorzaken dan tweemaal meegenomen worden.

### 3.2. DRUKVATEN

Voor drukvaten (tot 1000 l) wordt voor breuk uitgegaan van dezelfde faalfrequentie als voor gasflessen. Voor de drukvaten wordt echter de faalwijze lek toegevoegd. Arbitrair wordt gezegd dat de faalfrequentie voor lek 10 keer hoger ligt dan die voor breuk.

### 3.3. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009

Voor de gasflessen (tot 150 l) wordt uitgegaan van de data van Marchal, waarbij gesteld wordt dat de faalfrequentie voor een gasfles  $1,1 \cdot 10^{-6}$  per fles.jaar bedraagt. Hierbij wordt uitgegaan van het volledig vrijkomen van de inhoud.

Voor de drukvaten (tot 1000 l) wordt dezelfde faalfrequentie voor breuk gehanteerd. Voor lek wordt de faalfrequentie arbitrair een factor 10 hoger gesteld.

## Hoofdstuk 4: Atmosferische tanks

### 4.1. DEFINITIES

Atmosferische opslagtank	Een atmosferische opslagtank is ontworpen om te functioneren aan drukken gaande van atmosferische druk tot en met een inwendige overdruk van 34,47 mbar en dit gemeten vanaf de top van de tank (NFPA30, 1987). Deze tanks zijn vaak bestand tegen overdrukken van meer dan 70 mbar, zeker wanneer, zoals vaak het geval is, een stikstofdeken toegepast wordt. De definitie van atmosferische opslagtanks is echter afhankelijk van de gebruikte code. Er zijn tanks in gebruik van 350 mbar en bij sommige gekoelde opslagtanks kan dit nog hoger zijn.
Atmosferische tank met vast dak	Atmosferische tank met een dampruimte tussen het vloeistofoppervlak en het dak dat koepel- ( $\emptyset$ tot 20 m) of kegelvormig ( $\emptyset$ tot 76 m) kan zijn (ARF99). Een atmosferische opslagtank met kegelvormig dak heeft dakplaten die ondersteund worden door interne daksparran, gordingen, zuilen en de top van het cilindervormige tankgeraamte. Een atmosferische opslagtank met koepelvormig dak heeft gewelfde dakplaten die volledig ondersteund worden door het cilindervormige tankgeraamte.
Atmosferische tank met uitwendig vlottend dak	Atmosferische tank waarbij het dak op een vloeistofoppervlak drijft om dampverliezen te reduceren. Het dak vereist een sluiting rond de rand tegen de wanden van de tank. Dergelijke dakconstructies worden ondergebracht in drie types: panvormig, ringvormig pontondak en dubbeldeksdak (ARF99). Nu en dan wordt aan de top van het tankgeraamte een aluminiumdak bevestigd dat de opgeslagen vloeistof beschermt tegen nadelige gevolgen van hevige regen- en sneeuwbuien.
Enkelwandige atmosferische tank	Atmosferische tank die bestaat uit een primaire container voor vloeistof die al dan niet omgeven is door een buitenomhulsel. De aanwezigheid van zulk omhulsel heeft als enig doel de isolatie tegen te houden en te beschermen. Het doet geen dienst als secundaire container die de vloeistof opvangt en binnen de tank houdt ingeval de primaire container zou falen.



Atmosferische tank met beschermend buitenomhulsel	Atmosferische tank die bestaat uit een primaire container voor vloeistof die omgeven is door een buitenomhulsel, bedoeld om de vloeistof binnen de tank te houden bij falen van de primaire container. Het omhulsel is echter niet ontworpen om damp binnen te houden. Daarenboven is het niet bestand tegen explosie (statische drukbelasting van 0,3 bar gedurende 300 ms), binnenvallende brokstukken en lage temperaturen.
Dubbel omsloten atmosferische tanks	Atmosferische tank met dezelfde functie als de atmosferische tank met beschermend buitenomhulsel en die bovendien bestand is tegen explosie, binnenvallende brokstukken en lage temperaturen. Dit soort tank is ook niet aangepast om alle dampsoorten binnen te houden.
Volledig omsloten atmosferische tanks	Atmosferische tank die bestaat uit een primaire container voor vloeistof en een secundaire container om zowel vloeistof als damp bij falen van de primaire container binnen te houden. Deze tanks zijn bestand tegen explosie, binnenvallende brokstukken en lage temperaturen. Het buitendak wordt ondersteund door de secundaire omsluiting die bestand is tegen allerhande belastingen zoals explosie.
Membraantank	Atmosferische tank die bestaat uit een primaire en secundaire container. De primaire bestaat uit een niet-zelfdragend membraan dat vloeistof en damp onder normale werkingsomstandigheden houdt. De secundaire container is uit beton gemaakt en ondersteunt de primaire container. De inhoud van de secundaire container is groot genoeg om bij falen van de primaire container gans het vloeistofvolume op te vangen en binnen te houden. Bovendien kunnen de dampen op een gecontroleerde wijze ontsnappen. Het buitendak en de secundaire omsluiting vormen een geheel.
Ingeterpte atmosferische tank	Atmosferische opslagtank onder een terp.
Ingegraven atmosferische tank	Atmosferische opslagtank die aan alle kanten omgeven is met inert materiaal, zoals aarde, waarbij het maaiveld niet hoger is dan het grondniveau.

## 4.2. FAALFREQUENTIE VOOR TANKS MET UITWENDIG VLOTTEND DAK (DNV)

### Faalfrequenties voor lekken

De meest recente, meest omvattende en statistisch best onderbouwde studie in verband met de lek- en brandincidentie van dit soort tanks is gepubliceerd in het LASTFIRE project 1997 (LFP97). Tabel 7 geeft een overzicht van de LFP97-waarnemingen i.v.m. uitstroming van vloeibare koolwaterstoffen (KWS) bij tanks met uitwendig vlottend dak en dit voor de drie hoofdcategorieën van lekken. In Tabel 8 worden de details gegeven voor de uitstromingen buiten het tankomhulsel.

Tabel 7: Uitstroomfrequentie van opgeslagen vloeistoffen bij uitwendig vlottende daktanks (LFP97; ARF99)

Type van uitstroming	Gebeurtenis per 33.909 tankjaren	Frequentie en 99% betrouwbaarheidsintervallen ( $\times 10^{-3}$ /tankjaar)		
Uitstroming op dak	55	1,1	1,6	2,3
Ingezakt dak (uitgezonderd stutbreuken)	37 (30)	0,7 (0,5)	1,1 (0,9)	1,6 (1,4)
Uitstroming buiten tankomhulsel	96	2,1	2,8	3,7

Tabel 8: Detaillering van de uitstroomfrequenties buiten het tankomhulsel van tanks met uitwendig vlottend dak (LFP97; ARF99)

Type van uitstroming	Gebeurtenis per 33.909 tankjaren	Frequentie en 99% betrouwbaarheidsintervallen ( $\times 10^{-3}$ /tankjaar)		
Lekken van tankstructuur (corrosie)	19	0,3	0,56	1,0
Lekken van tankstructuur, inclusief drainage	33	0,6	1,0	1,5
Lekken van tankstructuur en operationeel overvullen	47	0,94	1,4	2,0
Lekken van tankstructuur, overvullen en breuk stoomspoel	50	1,0	1,5	2,1
Uitstroming buiten tankomhulsel - alle oorzaken (incl. leidingen en uitrusting in inkuiping)	96	2,1	2,8	3,7

Omwille van de verfijnde indeling, de stevige onderbouw qua steekproefgrootte (33.909 tankjaren) en betrouwbaarheidsintervallen kunnen de gegevens van Tabel 7 en Tabel 8 zonder meer door de veiligheidsdeskundige aangewend worden. In de allesomvattende faaldata voor uitstroming buiten het tankomhulsel zijn zowel lekken van de tank als van de leidingen en appendages, evenals operationele fouten opgenomen. Daarom wordt aanbevolen de faalfrequenties van Tabel 8 te hanteren, waarbij de faalfrequentie dient gekozen overeenkomstig de kenmerken van de specifieke installatie. De generieke faalfrequenties opgenomen in Tabel 8 zijn basisfaalfrequenties voor alle lekkages, gaande van 0,1 mm tot catastrofaal falen, van deze laatste categorie kwamen in de LFP97 studie geen incidenten voor.

- Indien enkel de falingen door corrosie in rekening gebracht worden, worden nog maar 19 incidenten weerhouden, hetgeen een faalfrequentie van  $5,6 \cdot 10^{-4}$  per tankjaar oplevert.

- Indien enkel de falingen door lekkage van de tankstructuur (door corrosie of breuk en falen van de dakdrainage) in rekening gebracht worden, met uitsluiting van lekken door operationele fouten (overvullen), worden nog 33 incidenten weerhouden, hetgeen een faalfrequentie van  $1,0 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar oplevert.
- Indien enkel lekkages van de tank, inclusief lekken stoomspool en operationele fouten zoals overvullen in rekening gebracht worden, maar met uitsluiting van lekken aan leidingen en appendages en van niet geregistreerde oorzaken, worden 50 incidenten meegerekend, hetgeen een lekfrequentie van  $1,5 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar oplevert.
- Indien alle lekken binnen de inkuiping worden meegenomen, worden 96 incidenten bekomen. Dit levert een lekfrequentie van  $2,8 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar.

Deze faalfrequenties worden aanbevolen als generieke waarden voor lekken met een lekdiameter groter dan 0,1 mm.

## Oorzaken van lekken

Tabel 9 en Tabel 10 geven een overzicht van de oorzaken van de in Tabel 7 aangehaalde gebeurtenissen in verband met de verschillende soorten tankuitstromingen.

Tabel 9: Oorzaken van uitstroming van vloeibare KWS binnen de dakruimte (LFP97)

Oorzaak	Dakoverstroming (Roof spills)		Dakverzakking (Sunken roofs)	
	Aantal	%	Aantal	%
Beschadigde dichting	1	2	-	-
Stutbreuk	-	-	7	19
Beschadigde pontons	-	-	2	5,5
Gebarsten dak naast pontons	3	5,5	-	-
Gebroken dak	10	18	3	8
Falen van dakdrainage	7	13	1	3
Product op dak	1	2	1	3
Gas in leiding	4	7	2	5,5
Product onder hoge dampdruk	3	5,5	-	-
Oververhit product	1	2	4	11
Overvulling	11	20	-	-
Neergekomen dak met enkele stutten in onderhoudspositie	1	2	-	-
Hevige regenval	1	2	10	27
Water op dak	-	-	1	3
Niet geregistreerd	12	22	6	16
<i>Totaal</i>	<i>55</i>	<i>100</i>	<i>37</i>	<i>100</i>

-: geen gegevens

De belangrijkste oorzaken voor dakoverstromingen zijn respectievelijk overvulling van tanks (20%), dakbreuken (18%) en in mindere mate breuken van de regenwater afvoer (13%).

De meest voorkomende oorzaken van dakverzakking zijn hevige regenval (27%) en stutbreuken (19%). Bij deze laatste oorzaak dient de bemerking gemaakt dat alle

stutbreuken zich voordeden bij eenzelfde onderneming. Aan het LFP97 project namen 16 ondernemingen deel, zodat de representativiteit van deze faaloorzaak in vraag dient gesteld. Bij uitsluiting van de 7 stutbreuken wordt de faalfrequentie gereduceerd tot  $9,0 \cdot 10^{-4}$  per tankjaar met een 99% betrouwbaarheidsinterval van  $5,0 \cdot 10^{-4}$  en  $1,4 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar.

Tabel 10 geeft een overzicht van de oorzaken voor het uitstromen/vrijkomen van vloeibare KWS buiten het tankomhulsel van open top vlottende daktanks.

Tabel 10: Oorzaak van uitstroming van vloeibare KWS buiten het tankomhulsel (LFP97)

Oorzaak	Aantal	%
Corrosie van tankbodem	15	16
Breuk van daksteunen	1	1
Corrosie ringvormige bodemplaat	4	4
Breuk van stoomspoel	3	3
Falen dakdrainage	13	14
Lek van menger	9	9
Lek van leidingnetwerk, flenzen of kleppen	16	17
Overvullen	14	15
Niet geregistreerd	21	22
<i>Totaal</i>	<i>96</i>	<i>100</i>

De belangrijkste oorzaken van de productuitstroom buiten het tankomhulsel zijn lekken in het leidingnetwerk (17%), corrosie van de tankbodem (16%) en overvulling van tanks (15%).

De meest voor de hand liggende faalwijzen voor productuitstroming zijn van mechanische of corrosieve aard (dichting- of pontonschade), proces- of procedureproblemen (vb. overvulling van tank) en/of natuurlijke overbelastingsproblemen (hevige regenval).

### Invloed van beschermingsmaatregelen op lekfrequentie

De invloed van constructieve beschermingsmaatregelen op de lekfrequentie wordt uitgedrukt in reductiefactoren. Het gebruik van deze reductiefactoren dient geval per geval door de veiligheidsdeskundige beoordeeld te worden. In geval van lekken van de tankstructuur worden volgende reductiefactoren aanbevolen. Deze factoren zijn niet gesteund op statistisch onderbouwde faaldata, maar op een beoordeling van experts (PB99).

- Met beschermend buitenomhulsel                      geen lekkage buiten secundaire container
- Dubbel omsloten    geen lekkage buiten secundaire container
- Volledig omsloten    geen lekkage buiten secundaire container
- Ingegraven (bodem als dubbel omhulsel)              500, vrijzetting in omliggende bodem
- Ingeterpt    500

## Faalfrequenties voor instantaan falen

Indien het expliciet om breuken gaat van opslagtanks met een grote capaciteit ( $> 159 \text{ m}^3$ ) wordt slechts één statistisch onderbouwde faalfrequentie aangehaald (ARF99, US survey (1970-1997)). De breukfrequentie is gebaseerd op een populatie van 33.000 tanks voor een periode van 1970 tot 1997, d.w.z. een levensduur van 28 jaar. Tijdens deze waarnemingsperiode werden 3 breuken in de petroleumindustrie geregistreerd, hetgeen aanleiding geeft tot een faalkans van  $3,2 \cdot 10^{-6}$  per tankjaar met een 99% betrouwbaarheidsinterval van  $5 \cdot 10^{-7}$  en  $1,2 \cdot 10^{-5}$  per tankjaar. Een vroegere studie van E&P Forum (1996) kwam door combinatie van belangrijke lekken en tankpopulaties tot een faalfrequentie van  $6,9 \cdot 10^{-6}$  per tankjaar. Een studie van Davies in de UK (1996) kwam tot de bevinding dat de voorbije 50 jaar er geen incidenten met breuken opgetreden zijn voor een tankpopulatie van 150.000 tanks, hetgeen een breukfrequentie oplevert van minder dan  $7 \cdot 10^{-6}$  per tankjaar.

Daar LFP97 geen melding maakt van tankbreuken, ofschoon ze voorkwamen tijdens LFP97-bemonsteringsperiode maar niet bij de LFP-leden, schat ARF99 de frequentie van tankbreuken op minder dan  $3 \cdot 10^{-5}$  per tankjaar.

Op basis van bovenstaande referenties wordt aanbevolen om voor breuk van tanks met vlottend dak dezelfde waarde te nemen als aanbevolen door PB99 voor tanks met vast dak, zoals gegeven in Tabel 13. De kans op breuk wordt geschat op  $5,0 \cdot 10^{-6}$  per tankjaar, hetgeen in overeenstemming is met de hogervermelde ramingen. Gecombineerd met de kans op het in korte tijd (10 minuten) vrijkomen van de tankinhoud bij een ernstig lek van eveneens  $5,0 \cdot 10^{-6}$  per tankjaar, resulteert dit een globale faalkans van een omvangrijk lek van een tank van  $1,0 \cdot 10^{-5}$  per tankjaar. Het 99% betrouwbaarheidsinterval wordt op basis van de statistiek van de US survey geraamd op  $3,0 \cdot 10^{-6}$  -  $1,0 \cdot 10^{-5}$  -  $2,6 \cdot 10^{-5}$  per tankjaar.

## Invloed van beschermingsmaatregelen op frequentie voor instantaan falen

Door (PB99) wordt aangenomen dat bescherming de volgende invloed heeft op de faalfrequentie voor instantaan falen van installaties:

- de faalfrequentie van een atmosferische opslagtank met beschermend buitenomhulsel, ook secundaire container genoemd, is 5 keer kleiner dan die van een enkel omsloten atmosferische opslagtanks die  $2,0 \cdot 10^{-6}$  per jaar bedraagt. Verder wordt verondersteld dat bij de helft van de instantane faalgebeurtenissen het beschermend buitenomhulsel ongeschonden blijft. Het vrijgekomen product wordt in dit omhulsel (secundaire container) opgevangen, de faalfrequentie hiervan bedraagt  $1,0 \cdot 10^{-6}$  per jaar. Bij de overige helft van de instantane faalgebeurtenissen is het beschermend buitenomhulsel eveneens geschonden en komt de vrijgekomen inhoud rechtstreeks in de omgeving terecht, de faalfrequentie is hier eveneens  $1,0 \cdot 10^{-6}$  per jaar.
- de faalfrequentie van een dubbel omsloten atmosferische opslagtank 80 keer kleiner is dan de faalfrequentie van een enkel omsloten atmosferische opslagtank d.w.z.  $1,25 \cdot 10^{-7}$  per jaar. Verder wordt verondersteld dat in 80% van de instantane faalgebeurtenissen de secundaire container ongeschonden blijft en de faalfrequentie

van de inhoud die alzo door de secundaire container opgevangen wordt  $1,0 \cdot 10^{-7}$  per jaar bedraagt. In de overige 20% instantane faalgebeurtenissen wordt de secundaire container eveneens geschonden en komt de inhoud rechtstreeks in de omgeving terecht, de faalfrequentie hiervan bedraagt  $2,5 \cdot 10^{-8}$  per jaar.

- de faalfrequentie van volledig omsloten atmosferische opslagtanks waarbij instantaan falen van binnen- en buitencontainer optreedt wordt op  $1,0 \cdot 10^{-8}$  per jaar geschat. Daar bij uitsluitend falen van de binnentank de inhoud volledig opgevangen wordt door de secundaire tank en aldus niet in de omgeving vrijkomt wordt hiervoor geen faalfrequentie gegeven (geschat). Voor de continue vrijzetting van de inhoud in 10 minuten werd dezelfde faalfrequentie toegevoegd als voor breuk.
- de faalfrequentie van een ingegraven of respectievelijk een ingeterpte atmosferische opslagtank dezelfde is als de faalfrequentie van een volledig omsloten atmosferische opslagtank, dus  $1,0 \cdot 10^{-8}$  per jaar. Falen van een ingegraven atmosferische opslagtank leidt slechts tot plasverdamping terwijl dit bij ingeterpte atmosferische opslagtank leidt tot rechtstreeks vrijkomen van de tankinhoud in de atmosfeer. Voor de continue vrijzetting van de inhoud in 10 minuten werd dezelfde faalfrequentie toegevoegd als voor breuk.

Samenvattend worden voor breuk en vrijzetting van de tankinhoud binnen de 10 minuten van atmosferische tanks volgende reductiefactoren aanbevolen. Deze factoren zijn niet gesteund op statistisch onderbouwde faaldata, maar op een beoordeling van experts (PB99).

- Met beschermend buitenomhulsel	10
- Dubbel omsloten	400
- Volledig omsloten	500
- Ingegraven (bodem als dubbel omhulsel)	500, flash verdamping
- Ingeterpt	500

### 4.3. FAALFREQUENTIE VOOR TANKS MET VAST DAK (DNV)

#### Faalfrequenties voor lekken

Daar waar LFP97 een solide onderbouw geeft voor de lekfrequenties van atmosferische opslagtanks met vlottend dak, geven (PB99) en (ARF99) een vrij uitgebreide, weliswaar statistisch zwak onderbouwde compilatie van lekfrequenties van atmosferische opslagtanks met vast dak.

Voor tanks met vast dak berekende HSE een lekfrequentie van  $2,5 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar voor atmosferische opslagtanks op offshore platformen, de faalfrequentie is gebaseerd op 8 lekken en een populatie van 3241 tankjaren (HSE, 1997). Deze lekfrequentie is vergelijkbaar met deze voor tanks met vlottend dak, indien ook de lekken van de uitrusting in de inkuiping mee in rekening wordt gebracht, waarvoor de lekfrequentie  $2,8 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar (LFP97) bedraagt.

Omwille van de degelijke statistische onderbouwing werden de faalfrequenties voor tanks met vast dak afgeleid van deze voor uitwendig vlottend dak (LFP97), waarbij enkel die falingen in rekening werden gebracht die met de tankstructuur, operationeel overvullen en eventuele aanwezigheid van een stoomspoel te maken hebben.

Tabel 11: Uitstroomfrequenties buiten het tankomhulsel van tanks met vast dak (LFP97; ARF99)

Type van uitstroming	Gebeurtenis per 33.909 tankjaren	Frequentie & 99% betrouwbaarheidsinterval (x10 <sup>-3</sup> /tankjaar)		
Lekken van tankstructuur (corrosie)	19	0,3	0,56	1,0
Lekken van tankstructuur en operationeel overvullen	33	0,6	1,0	1,5
Lekken van tankstructuur, overvullen en breuk stoomspoel	36	0,7	1,1	1,6
Uitstroming buiten tankomhulsel - alle oorzaken (incl. leidingen en uitrusting in inkuiping)	82	1,8	2,4	3,2

### Invloed van beschermingsmaatregelen op lekfrequentie

Voor de tanks met vast dak wordt door het Paarse Boek (PB99) uitgegaan van dezelfde reductiefactoren als voor tanks met uitwendig vlottend dak.

### Faalfrequenties voor instantaan falen

Op basis van de onder 4.2 aangehaalde referenties voor breuk van tanks met vlottend dak wordt aanbevolen om voor tanks met vast dak eveneens de waarden te nemen als aanbevolen door PB99, zoals gegeven in Tabel 13 (kolommen G1 en G2). De kans op breuk wordt geschat op  $5,0 \cdot 10^{-6}$  per tankjaar. Gecombineerd met de kans op het in korte tijd (10 minuten) vrijkomen van de tankinhoud bij een ernstig lek van eveneens  $5,0 \cdot 10^{-6}$  per tankjaar, resulteert dit een globale faalkans van een omvangrijk lek van een tank van  $1,0 \cdot 10^{-5}$  per tankjaar.

Volgens PB99 worden de faalwijzen ingedeeld op basis van de ontsnappingswijze van de tankinhoud (breuk of continu) en de diameter van de lekopening (Tabel 12).

Tabel 12: Indeling van faalwijzen volgens (PB99)

G.1	Onmiddellijk vrijgeven van de volledige inhoud (breuk) a) Rechtstreeks in de atmosfeer b) van de primaire container in de ongeschonden secundaire container of buitenste omhulsel
G.2	Continu vrijgeven van de volledige inhoud in minder dan 10 minuten bij een constante ontsnappingsnelheid a) rechtstreeks in de atmosfeer b) van de primaire container in de ongeschonden secundaire container of buitenste omhulsel
G.3	Continu vrijgeven via een opening (gat) met een effectieve diameter van 10 mm a) rechtstreeks in de atmosfeer b) van de primaire container in de ongeschonden secundaire container of buitenste omhulsel

Tabel 13 geeft een samenvatting van de frequentie per installatie en manier van falen.

Tabel 13: Faalfrequentie per tankjaar van atmosferische opslagtanks met vast dak (PB99; DNV)

Tank	G.1a Breuk  Vrijkomen in atmosfeer	G.1b Breuk  Vrijkomen in secundaire container	G.2a Continu 10 min Vrijkoming in atmosfeer	G.2b Continu 10 min Vrijkoming in secundaire container	G.3a Continu Ø 10 mm Vrijkoming in atmosfeer	G.3b Continu Ø 10 mm Vrijkoming in secundaire container
Enkel omsloten	$5,0 \cdot 10^{-6}$	-	$5,0 \cdot 10^{-6}$	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$	-
Met beschermend buitenhulsel	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Dubbel omsloten	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Volledig omsloten	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	-	-
Ingegraven	-	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	-
Ingeterpt	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	$1,0 \cdot 10^{-8}$	-	-	-

Opmerkingen bij Tabel 13:

- Alhoewel een tank of een vat bestaat uit een wand en gelaste stompen (steunpijlers), montageplaten en instrumentatieleidingen, hebben de frequenties slechts betrekking op de tank/vaten en het geassocieerde instrumentatienetwerk. De leidingen verbonden met de tanks/vaten worden afzonderlijk behandeld.
- Tanks kunnen binnen of buiten een gebouw staan: de frequenties zijn niet afhankelijk van de binnen- of buitenlocatie.
- Er wordt geen classificatie per opgeslagen product gegeven. Een classificatiemethode voor het frequent verscheppen van verschillende producten wordt beschreven in VvoW95.
- Er zijn geen afzonderlijke frequenties voorzien voor cryogene tanks<sup>1</sup>.
- Atmosferische opslagtanks kunnen een absolute druk hebben van iets groter dan 1 bar. Voorbeelden hiervan zijn cryogene tanks en atmosferische opslagtanks met stikstofdeken.
- Het vloeistofniveau binnen een ingegraven atmosferische opslagtank mag niet hoger komen dan het grondniveau. De omliggende (aangrenzende) grond wordt beschouwd als secundaire container. Bij dit soort tanks resulteert falen slechts in een initiële flash gevolgd door verdamping uit de verontreinigde bodem.

### Invloed van beschermingsmaatregelen op frequentie voor instantaan falen

Voor de tanks met vast dak wordt door het Paarse Boek (PB99) uitgegaan van dezelfde reductiefactoren als voor tanks met uitwendig vlottend dak.

<sup>1</sup> Atmosferische opslagtanks met bewaartemperatuur beneden de omgevingstemperatuur.



## 4.4. TANKBRANDEN

### Tanks met uitwendig vlottend dak

De meest recente, meest omvattende en statistisch best onderbouwde studie i.v.m. met de brandincidentie van dit soort tanks is gepubliceerd in het LASTFIRE project 1997 (LFP97).

De studie geeft een beschrijving van vijf initiële brandtypes:

- randdichtingsbrand;
- brand na uitstroming op het dak;
- volledig dakvlakbrand volgend op het inzinken van het dak;
- kleine kuipbrand;
- volledige (of grote) kuipbrand.

De faaldata (Tabel 14) zijn gebaseerd op een gedetailleerd onderzoek naar de frequentie van uitstromingen/overlopen en branden van vloeibare koolwaterstoffen (KWS) bij tanks waarvan de diameter groter dan 40 m bedraagt. Hiervoor werd tussen 1981 en 1995 wereldwijde bevraging uitgevoerd waardoor cijfermateriaal verzameld werd over 2420 tanks en 33.909 tankjaren. Voor de klasse III van brandbare vloeistoffen bestond de populatie uit 293 tanks en 4196 tankjaren.

Tabel 14: Brandfrequentie bij tanks met vlottend dak gevuld met vloeibare KWS (LFPRW97)

Type brand	Aantal branden	Basisfrequentie ( $\times 10^{-5}$ /tankjaar)	99% betrouwbaarheidsinterval ( $\times 10^{-5}$ /tankjaar)
Randdichtingsbrand			
– Alle oorzaken	55	162	112 - 228
– (Veroorzaakt door blikseminslag)	(52)	(153)	(104 - 218)
Brand in uitstroming op het dak	1	3	0,03 - 22
Volledig dakvlakbrand volgend op dakinzinking	1	3	0,03 - 22
<i>Totaal</i>	<i>57</i>		

### Oorzaken van brand

#### 1. Randdichtingsbrand

Randdichtingsbrand kan ontstaan tijdens onderhoud- of installatiewerken, tengevolge van onweersbuien met blikseminslag of door een aantal andere niet geregistreerde oorzaken. Onweersbuien met blikseminslag is echter de belangrijkste oorzaak van randdichtingsbrand.

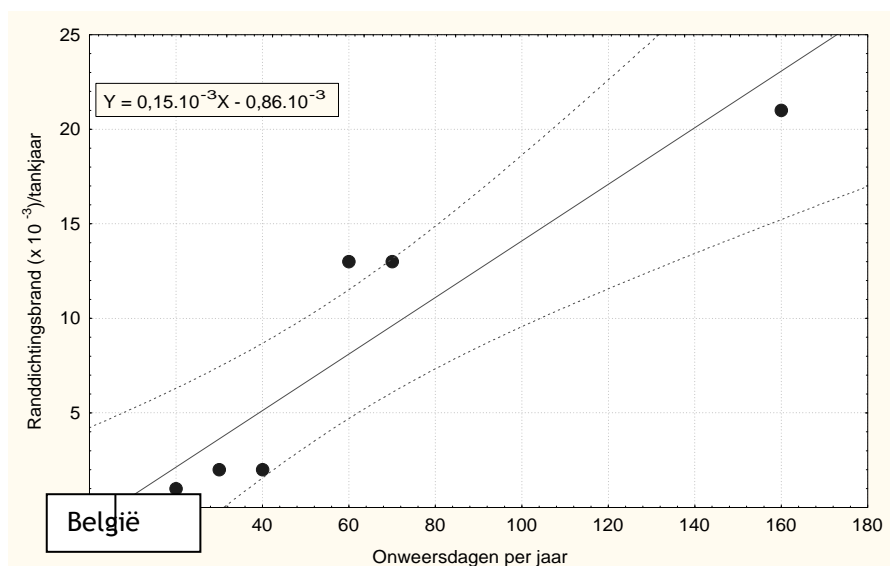
#### *Randdichtingsbrand tijdens onderhouds- of installatiewerken*

Van de 55 geregistreerde randdichtingsbranden werden er 2 (5,5%) veroorzaakt tijdens onderhoud- of installatiewerken van operationele tanks.

*Verband tussen onweersbuien en randdichtingsbrand*

Onweer met blikseminslag is in ongeveer 95% (52 op 55) van de gevallen de initiële oorzaak van randdichtingsbrand. Over de oorzaak van één randdichtingsbrand bestaat onzekerheid.

Aan de hand van de LFP97-gegevens i.v.m. het aantal onweersdagen die per jaar voorkomen in verscheidene werelddelen -Saoedi Arabië, Noord Europa, Zuid Europa, Noord Amerika, Venezuela, Thailand en Nigeria- en de overeenkomstige randdichtingsbranden berekende Vito het verband ( $\pm 95\%$  betrouwbaarheidsinterval, onderbroken lijncurven) tussen beide variabelen (Figuur 2).



Figuur 2: Verband tussen randdichtingsbrand en aantal onweersdagen per jaar

De lineaire functie die het verband tussen beide variabelen best beschrijft wordt gegeven door:

$$Y = 1,5 \cdot 10^{-4} X - 8,6 \cdot 10^{-4} \quad (r = 0,93) \quad \{1\}$$

waar

Y: frequentie randdichtingsbranden ( $\times 10^{-4}$ ) per tankjaar

X: aantal onweersdagen per jaar

$1,5 \cdot 10^{-4}$  en  $8,6 \cdot 10^{-4}$ : respectievelijk de hellingscoëfficiënt en de intercept

r: de correlatiecoëfficiënt ( $-1 < r < +1$ )

Voor tanks in het Midden-Oosten, Noord Amerika, Europa, Australië en Nieuw Zeeland wordt de beste schatting (LFPRW97) van de brandincidentie tengevolge van onweer gegeven door:

$$Y = 0,5 \cdot 10^{-4} X \text{ per tankjaar} \quad \{2\}.$$

Interpolatie van {2} naar de Belgische situatie - het aantal onweersdagen met blikseminslag is in België 20 per jaar (LFP97) - betekent dat het aantal randdichtingsbranden tengevolge van onweersbuien met blikseminslag in België  $1,0 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar bedraagt.

Als generieke brandfrequentie voor randdichtingsbranden veroorzaakt door blikseminslag wordt  $1,0 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar aanbevolen (Belgische situatie). Hieraan dient nog een brandfrequentie van  $1,0 \cdot 10^{-4}$  per tankjaar tengevolge van andere oorzaken toegevoegd. De globale aanbevolen generieke brandfrequentie voor randdichtingsbranden bedraagt bijgevolg  $1,1 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar. De gegeven vergelijkingen zijn generieke waarden en zijn geldig voor tanks met alle soorten producten (ruwe olie tot klasse III). Indien met de specifieke tankinhoud rekening dient gehouden, worden de brandfrequenties van Tabel 15 aanbevolen.

#### *Invloed van tankinhoud op randdichtingsbranden*

Randdichtingsbrand die door blikseminslag veroorzaakt wordt is afhankelijk van het ontvlampunt van de tankinhoud (het product dat in de tank opgeslagen is), hoe lager des te gevoeliger. In dit verband geeft Tabel 15 de klassenindeling die door het IP (Institute of Petroleum) aangenomen wordt. Bijvoorbeeld voor klasse III producten is de frequentie van randdichtingsbrand 2 tot 3,4 keer kleiner dan voor ruwe olie.

*Tabel 15: Invloed van tankinhoud op randdichtingsbrand bij tanks met vlottend dak gevuld met vloeibare KWS door blikseminslag (LFP97; ARF99)*

Brandstof	Aantal			Frequentie ( $\times 10^{-4}$ )tj en 99% betrouwbaarheidsinterval		
	Branden	Tanks	Tankjaren			
Ruwe olie (LFP97)	37	1285	18210	13	20	31
Ruwe olie (Belg. onweersstatistiek)	(18)	(1285)	(18210)	(5)	(10)	(18)
Klas I (v.b. nafta, benzine) <sup>a</sup>	12	718	9808	5,4	12	25
Klas II (v.b. kerosen) <sup>b</sup>	1	91	1266	0,1	8	58
Klas III (v.b. diesel, stookolie)	2	293	4196	0,35	4,8	22
Overige en onbekend	0	33	429		0	
Totaal & gemiddeld (LFP97)	52	2420	33909	10	15	22
(Totaal & gemiddeld - België)	(33)	(2420)	(33909)	(6)	(10)	(15)

a: Klasse I:  $\pm$  licht ontvlambaar met vlampunt  $< 23 \text{ }^\circ\text{C}$

b: Klasse II: ontvlambare vloeistof met vlampunt  $23 \text{ }^\circ\text{C} < \text{VP} < 66 \text{ }^\circ\text{C}$

c: Klasse III: brandbare vloeistoffen met vlampunt  $> 66 \text{ }^\circ\text{C}$

De verhoogde brandfrequentie van ruwe olie t.o.v. de andere brandstoffen van Tabel 15 is te wijten aan het feit dat veel uitvoerterminals voor het opslaan van ruwe olie gesitueerd zijn in landen met een relatief hoge onweersfrequentie, opslagtanks voor de overige producten zijn gelijkmatiger verdeeld over de regio's, zodat enkel een correctie voor de Belgische onweersstatistieken op de brandfrequenties voor ruwe olie werd doorgevoerd.

#### *Invloed van constructieve ingrepen op randdichtingsbranden*

LFPRW97 geeft schattingen voor een aantal constructieve ingrepen. Deze reductiefactoren zijn niet gesteund op statistisch onderbouwde faaldata. Volgende reductiefactoren voor randdichtingsbranden worden voorgesteld:

- dubbele afdichting: 0,75
- bliksemafleidingssysteem: 0,25
- geodetisch gewelf: 0,1

Het gebruik van deze modificatiefactoren dient geval per geval door de veiligheidsdeskundige beoordeeld te worden.

### *Escalatie van randdichtingsbrand*

Van de 55 randdichtingsbranden escaleerde 1 (kans 0,02) in een volledig dakvlakbrand. Het escalatiemechanisme zag er als volgt uit:

- een initiële bliksemingslag veroorzaakte een ontploffing die een ponton vernietigde.
- de tank bevatte een product met een dampspanningsbereik van 12-15 p.s.i. RVP (Reid Vapour Pressure) en komt overeen met 0,83 - 1,03 bar RVP.
- er waren slechts 3 van de 6 vaste schuimwerpers operationeel.

### *2. Brand in uitstroming op dak*

De brandfrequentie in de uitstroming op het dak wordt op  $3 \cdot 10^{-5}$  per tankjaar geschat: 1 brand in uitstroming op dak van een ruwe olietank op 33909 tankjaar (LFP97).

Daar de initiële gebeurtenis van dit soort brand de uitstroming van KWS in de dakruimte is, is “brand in uitstroming op dak” reeds een escalatiegebeurtenis op zichzelf. De frequentie van een uitstroming op het dak wordt gegeven in Tabel 7 en bedraagt  $1,6 \cdot 10^{-3}$  per tankjaar. Daar een brand slechts bij 1 op 55 uitstromingen op het dak optrad is de kans dat de uitgestroomde KWS ontvlamt ongeveer 0,02 (1/55), hetgeen resulteert in een brandfrequentie van  $3 \cdot 10^{-5}$  per tankjaar.

De kans dat brand in uitstroming op dak escaleert in een volledige dakvlakbrand is 1. Deze raming is gebaseerd op één enkel incident. LFP vermeldt een tweede spill on roof incident (niet opgenomen in de statistiek), waarbij de brand snel kon geblust worden, maar na 30 minuten terug tot ontsteking kwam en de daaropvolgende brand gans de tank vernietigde. De werkelijke kans op escalatie zal ergens tussen 0,5 en 1 liggen. Toch wordt aanbevolen een escalatiekans 1 aan te nemen.

### *3. Volledig dakvlakbrand*

Van de 4 volledige dakvlakbranden die in het LFP97 opgenomen zijn kan slechts 1 als een initiële brand<sup>2</sup> beschouwd worden. De andere 3 waren escalatieresultaten van respectievelijk randdichtingsbrand, brand in uitstroming op dak en kuipbrand.

Bij het uitvoeren van een risicoanalyse kan volgens LFP97 gebruik gemaakt worden van de faalfrequentie van één van de twee soorten volledige dakvlakbrand-frequenties:

---

<sup>2</sup> Bij de initiële brand ging het om een 41 m diametertank waarbij tijdens het vullen met nafta vastgesteld werd dat het dak gedeeltelijk in de nafta ondergedompeld was. Na 10 min ontbrandde de nafta (waarschijnlijk tengevolge van een elektrostatische ontlading) en resulteerde onmiddellijk in een volledige dakvlakbrand. Twee uur later ontstond eerst een randdichtingsbrand en later een volledige dakvlakbrand in een identieke aangrenzende tank en 10 uur later ontstond een totaalbrand in een derde identieke tank. Waarschijnlijk was de escalatie het gevolg van de stralingswarmte. In de tanks die aan de lijkzijde van de eerste tank geplaatst waren was nafta opgeslagen bij een temperatuur van 27°C (9 graden onder het kookpunt). De brand waarbij de drie tanks vernietigd werden duurde 6 dagen. Er traden geen ernstige verwondingen op en de kosten werden op 6 miljoen dollar geschat.

- $3 \cdot 10^{-5}$ /tankjaar (1/33909): dit is de generieke brandfrequentie, gebaseerd op één dakvlakbrand ten gevolge van dakverzakking en ontsteking door elektrostatische ontlading, waarbij slechts de verhouding van 1 brand op 33.909 tankjaar wordt aangenomen. Bij toepassing van deze frequentie wordt geen rekening gehouden met andere vervolgebeurtenissen en escalatiewegen.
- $1,1 \cdot 10^{-4}$ /tankjaar (4/33909): hier wordt wel rekening gehouden met alle dakvlakbranden, zowel initiële als escalatiegebeurtenissen en wordt een brandfrequentie van 4 op 33.909 tankjaren aangenomen (99% betrouwbaarheidsinterval:  $2,4 \cdot 10^{-5}$  -  $3,8 \cdot 10^{-4}$ ).

Voor scenarioberekening van een volledige dakvlakbrand als gevolggebeurtenissen in het kader van veiligheidsrapportering wordt aanbevolen de allesomvattende brandfrequentie van  $1,1 \cdot 10^{-4}$ /tankjaar als basisbrandfrequentie waarde te gebruiken.

#### *Escalatiekans van volledige dakvlakbrand*

Volledig dakvlakbrand kan beschouwd worden als een escalatieresultaat van een dakverzakking in de opgeslagen vloeistof.

Volgens het LFP97 is de kans dat een “verzakt dak” escaleert in een volledig dakvlakbrand ongeveer 0,03 of het voorkomen van 1 ontvlaming op 37 verzakte daken.

Bij brandstof met geen boilover risico wordt de escalatie van een volledig dakvlakbrand naar een naburige tank gevuld met brandstof met een licht ontvlambare vloeistof op 0,25 geschat: een LFP97-review (periode 1981 - 1997) toonde aan dat 2 volledig dakvlakbranden op 8 tanks die gevuld waren met licht ontvlambare brandstof escaleerde naar andere tanks.

Voor tanks die daarentegen producten bevatten die aanleiding geven tot boilover wordt de kans op verdere escalatie van een volledig dakvlakbrand via boilover op 1 geschat.

#### *4. Boilover*

Met boilover bedoelt men het krachtig uitstoten van de volle inhoud van de tank met vorming van een vuurkolom en het overlopen van het product. Dit fenomeen treedt uitsluitend op bij tanken die brandende producten bevatten.

Typische boiloverproducten zijn ruwe aardoliën en tussenproducten van petroleum zoals ruwe distillaten, olieresten, zware stookolie en geraffineerde producten gemengd met producten met verschillende kookpunten.

Voor tanks die respectievelijk gevuld zijn met producten die aanleiding geven tot boilover wordt in de risicoanalyse aangenomen dat de kans van een volledig dakvlakbrand escaleert in boilover (gelijk is aan 1) indien er geen (adequate) interventie van de brandweer is na meerdere uren. Een review van LASTFIRE over escalatiemechanismen toonde aan dat van de 16 geregistreerde brandincidenties van tanks met boilover brandstoffen (met inbegrip van vaste daktanks) er 7 gevallen van boilover waren, 2 overstroomden en bij 7 branden faalde de tank zonder dat boilover optrad, maar deed er zich een overstroming voor in de kuip. Men weet niet hoeveel er van die 7 branden zouden geresulteerd zijn in boilover indien het tankomhulsel niet begeven had. Dus, om risicoanalyses uit te voeren wordt gesuggereerd om een boiloverkans van 1 aan te nemen.

De frequentie van de escalatiebrand (laagste niveau) is het product van de frequentie van de initiële brand (hoogste niveau) en de overeenkomstige kans (middenniveau) op escalatie.

## Vaste daktanks

Tabel 16 geeft de meest representatieve schatter voor de brandincidentie van atmosferische opslagtanks met vast dak.

Tabel 16: Brandfrequentie bij atmosferische opslagtanks met vast dak (ARF99)

Bron	Daktype	Aantal branden	Aantal tanks & periode	Frequentie & 99% betrouwbaarheidsinterval (x10 <sup>-4</sup> /tankjaar)
API data Technica (project C1998)	kegeldak	270	100.000 (1969-77)	2,5    3,0    3,5

De brandfrequentie is gebaseerd op het voorkomen van branden gespreid over 9 jaar (ARF99, API data Technica (project C1998, 1990)). In deze faaldata zijn geen branden opgenomen veroorzaakt door lekken van leidingen en kleppen.

De hier aangehaalde studie Technica (C1998, 1990) maakt melding van het API Risk Analysis Task Force Document N°1 van mei 1977 waarbij in een periode van 9 jaar (1969-1977) op 100.000 tanks 270 incidenten voor tanks met vast dak en respectievelijk 69 incidenten voor tanks met vlottend dak betrokken waren. Het grootste gedeelte van de geregistreerde branden waren volledige tankbranden. De in Tabel 16 vermelde allesomvattende brandfrequentie bedraagt 3,0 10<sup>-4</sup>/tankjaar, deze brandfrequentie wordt aanbevolen voor volledige tankbranden. Deze brandfrequentie ligt een factor 2,7 hoger dan deze voor tanks met vlottend dak. Het hogere brandrisico voor vaste daktanks is gedeeltelijk te verklaren door de aanwezigheid van ontvlambare gasmengsels in het tankplenum van vastedaktanks. Voor tanks voorzien van een stikstofdeken is dit bijkomend brandrisico gemilderd, in dit geval kan de brandfrequentie van vlottende daktanks van 1,1 10<sup>-4</sup>/tankjaar gehanteerd worden. Deze paragraaf heeft bijgevolg enkel betrekking op de vastedaktanks zonder stikstofdeken.

## Invloed van tankinhoud

Uit de API-studie bleek dat de voorkomingsfrequentie op een tankbrand voor een product met vlampunt < 37.7 °C (Klasse I) 11 maal hoger lag dan voor een product met vlampunt (VP) groter dan 93.3 °C (Klasse III).

Indien de brandfrequentie voor licht ontvlambare vloeistoffen (VP < 21°C) als referentiewaarde aangenomen wordt, ligt deze voor brandbare vloeistoffen (VP > 55°C) door extrapolatie van de API-studie 11 maal lager. Voor ontvlambare vloeistoffen van tussenliggende categorieën (21°C < VP < 55°C) wordt een brandfrequentie aangenomen die 3,3 (√11) keer lager ligt dan deze van licht ontvlambare vloeistoffen.

De meest bekende ongevallen beschreven in de API-studie hadden betrekking op licht ontvlambare vloeistoffen (methanol, acrylonitrile). De gekozen populatie voor het bepalen van de voorkomingsfrequentie op een tankbrand is hierdoor overschat.

Uit de ervaring bij verschillende studies blijkt dat ongeveer 30% van het aantal tanks een licht ontvlambaar product (vlampunt < 21°C) bevatten. De werkelijke representatieve populatie van tanks met een licht ontvlambare vloeistof is dus een factor 3,3 lager dan de totale populatie. Aangenomen wordt dat de tankpopulatie met ontvlambare vloeistoffen 35% vertegenwoordigt en de overige 35% van de tanks brandbare vloeistoffen bevat. De vloeistofafhankelijke brandfrequentie voor de atmosferische tanks is opgenomen in Tabel 17. De verhouding tussen de verschillende brandstoffen gegeven in Tabel 17 verschilt van deze gegeven voor tanks met vlottend dak (Tabel 15), omwille van de dominante rol van blikseminslag als brandoorzaak bij vlottende daktanks.

Tabel 17: Faaldata voor tankbrand bij atmosferische tanks

Tank	Frequentie (x 10 <sup>-4</sup> per tankjaar)	
	Met vlottend dak of Vast dak met stikstofdeken	Vast dak zonder stikstofdeken
Licht ontvlambare vloeistof (VP < 21°C)	2,5	6,86
Ontvlambare vloeistof (21°C < VP < 55°C)	0,76	2,07
Brandbare vloeistof (VP > 55°C)	0,23	0,62
Gemiddelde	1,1	3,0

## 4.5. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009

### Lekken en instantaan falen van atmosferische tanks

Het beslissingsdiagram in het handboek is opgesteld op basis van de definities van de verschillende soorten tanks, zoals aan het begin van dit hoofdstuk weergegeven. Hierbij zijn typische voorbeelden van de verschillende tanktypes:

- Tanktype 1: enkelwandige atmosferische opslagtank;
- Tanktype 2: atmosferische opslagtank met beschermend buitenomhulsel;
- Tanktype 3: dubbel omsloten atmosferische tank;
- Tanktype 4: volledig omsloten atmosferische tank.

Voor de faalfrequenties van enkelwandige atmosferische opslagtanks (tanktype 1) wordt uitgegaan van het Last Fire Project voor de lekken (2,8 10<sup>-3</sup>/tankjaar) en van het Paarse Boek voor het instantaan falen (1 10<sup>-5</sup>/tankjaar). Voor de andere types opslagtanks worden de reductiefactoren voor instantaan falen uit (PB99) toegepast voor het instantaan falen. Voor de lekken werd besloten om voor alle tanktypes dezelfde lekfrequentie te gebruiken voor de eerste (binnenste) omhulling. De tweede omhulling wordt beschouwd als een inkuiping (die niet faalt). Voor de ingeterpte en ingegraven tanks werd geoordeeld dat lekken niet relevant zijn in het kader van externe mensrisico's.

Voor tankwagens en spoorwagens worden de lekfrequenties van tanktype 1 gebruikt.

Voor de procesinstallaties wordt arbitrair een 10 maal hogere faalfrequentie gehanteerd (cfr. druktanks).

## Tankbrand

Voor tankbrand werd voor de basisfaalfrequentie voor tanks met uitwendig vlottend dak uitgegaan van  $1,1 \cdot 10^{-4}$ /tankjaar (LFP97). Als basisfaalfrequentie voor tanks met vast dak zonder stikstofdeken wordt  $3 \cdot 10^{-4}$ /tankjaar (ARF99) gehanteerd. Voor tanks met vast dak met stikstofdeken wordt dezelfde faalfrequentie als voor de tanks met vlottend dak genomen. De faalfrequenties voor de verschillende tanks op basis van inhoud worden bepaald zoals weergegeven in Tabel 17.



## Hoofdstuk 5: Warmtewisselaars

### 5.1. PIJPWARMTEWISSELAARS (HBKC1994)

Een extern lek van een pijpwarmtewisselaar kan veroorzaakt worden door:

- Een lek door de mantel naar de omgeving;
- Een pijpbreuk die overdruk geeft op de mantel, die begint te lekken.

#### Uitstroming via de mantel

De mantelzijde van een pijpenwarmtewisselaar is in essentie een druktank. Er is onvoldoende gedetailleerde data beschikbaar voor een nauwkeurige opdeling.

OREDA-92 bevat een grote hoeveelheid aan faalgegevens voor warmtewisselaars. In het totaal heeft de data betrekking op 531 pijpwarmtewisselaars voor een ervaringsperiode van 1194 pijpwarmtewisselaarsjaren. Over deze periode werden 61 externe falingen waargenomen. De gemiddelde kans van voorkomen van een mantel lek aan een pijpwarmtewisselaar bedraagt dan  $5,1 \cdot 10^{-2}$ /jaar.

Arulanantham en Lees (Arulanantham et al, 1981) geven algemene faaldata over 4 chemische fabrieken, met een totaal van 5950 warmtewisselaarjaren ervaring. De totale faalfrequentie bedraagt  $1,7 \cdot 10^{-3}$ /jaar.

De gegevens van OREDA-92 zijn verzameld vanaf 1978. De publicatie van Lees en Arulanantham dateert van 1981. Het is met andere woorden weinig waarschijnlijk dat er een overlapping is tussen beide onderzochte populaties.

Het totale aantal externe lekken voor beide referenties samen bedraagt 71 voor een totaal van 7144 warmtewisselaarjaren. De meeste lekken aan warmtewisselaars zijn relatief kleine lekken aan dichtingen. Voor het bepalen van de kans van voorkomen van lekken aan de mantel is aangenomen dat de data van OREDA92 en Lees enkel de relatief kleinere lekken betreft (< 50 mm).

Voor lekken in de categorie 50 - 150 mm en in de categorie instantaan falen zijn de faalfrequenties gebaseerd op expert judgement. Bij het ontbreken van statistische gegevens kan men zich beroepen op de Delphi methode. Deze methode kan men omschrijven als een gestructureerd groepscommunicatieproces. De faalfrequenties voor warmtewisselaars werden geschat op basis van de gekende faalfrequenties voor drukkouders.

Rekening houdend met in de literatuur voorspelde invloedsfactoren wordt verwacht dat indien men 310 000 warmtewisselaarsjaren onderzoek zou doen dat in de categorie 50 - 150 mm het aantal falingen 5 bedraagt en voor instantaan falen worden 4 falingen verwacht.

Tabel 18 bevat de resultaten.

Tabel 18: Faalfrequentie volgens lek grootte voor pijp warmtewisselaars (mantel)

Lekgrootte categorie (mm)	Equivalentente lek grootte (mm)	Faalfrequentie band (/warmtewisselaar.jaar)
0-25	10	$3,8 \cdot 10^{-3} - 6,0 \cdot 10^{-3} - 8,6 \cdot 10^{-3}$
25-50	35	$2,3 \cdot 10^{-3} - 3,9 \cdot 10^{-3} - 6,3 \cdot 10^{-3}$
50-150	100	$4,1 \cdot 10^{-6} - 1,6 \cdot 10^{-5} - 4,6 \cdot 10^{-5}$
Catastrofaal	Breuk	$2,7 \cdot 10^{-6} - 1,3 \cdot 10^{-5} - 4,1 \cdot 10^{-5}$
	<i>Alle</i>	$7,2 \cdot 10^{-3} - 9,9 \cdot 10^{-3} - 1,3 \cdot 10^{-2}$

## Pijplekken en pijpbreuken

Bij kleine lekken zal de drukopbouw traag verlopen en zal de druk in vele gevallen tijdig geëvacueerd kunnen worden.

Een inwendige pijpbreuk zal aanleiding geven tot een mantellek indien de werkdruk in de pijpen hoger is dan de ontwerpdruk van de mantel en de drukontlasting niet of onvoldoende gebeurt. Afhankelijk van de specifieke situatie dient nagegaan welke de vervolggans is op het falen van de mantel tengevolge van een pijpbreuk en dient dit scenario afzonderlijk in rekening gebracht te worden. De faalfrequentie van een veiligheidsklep kan worden bepaald met behulp van de gegevens uit het deel "gevolgbeperkende maatregelen".

Het Electrical Power Research Institute (EPRI, 1981) geeft de volgende faalfrequenties voor pijpbreuk:

- Gesloten circuit warmtewisselaar  $2,5 \cdot 10^{-3}$ /jaar;
- Condensor  $5,0 \cdot 10^{-3}$ /jaar.

Men kan deze frequentie ook schatten op basis van de leidinglengte van de interne pijpen.

Perry (Perry, 1985) stelt als typische pijplengte 4,88 m voorop en OREDA schat het gemiddeld aantal pijpen op 300.

Een intern rapport van DNV (geklasseerd onder DNV Technica code L056) geeft een faalfrequentie voor kleine pijplekken van  $7,87 \cdot 10^{-5}$ /m.jaar en voor grote pijplekken van  $1,77 \cdot 10^{-5}$ /m.jaar.

Op basis van deze gegevens wordt de totale faalfrequentie van een pijplek geschat op  $9,64 \cdot 10^{-5}$ /m.jaar.

Uit de lek distributie van leidingen (zie verder) blijkt dat ongeveer 5% van de falingen neerkomen op pijpbreuken.

Met deze gegevens kan de frequentie van een pijpbreuk berekend worden als:

$$Fr = 9,64 \cdot 10^{-5} \frac{\text{pijplek}}{\text{m.jaar}} * 0,05 \frac{\text{pijpbreuk}}{\text{pijplek}} * 4,88 \frac{\text{m}}{\text{pijp}} * 300 \frac{\text{pijpen}}{\text{warmtewisselaar}}$$

$$= 7,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{pijpbreuk}}{\text{warmtewisselaar.jaar}}$$

Op deze manier wordt de faalfrequentie voor pijpbreuk bijgevolg geschat op  $7,1 \cdot 10^{-3}$  per warmtewisselaar.jaar.

## 5.2. PLAATWARMTEWISSELAARS (HBKC1994)

### Faalfrequenties voor plaatwarmtewisselaars

Plaatwarmtewisselaars zijn in gebruik in de industrie sedert halweg de jaren zestig.

Svensson en Sjørgen (1988) geven een overzicht van 2300 jaar ervaring met 474 plaatwarmtewisselaars, rekening houdend met plaatconfiguratie, plaatmateriaal, werkingstemperatuur en -druk.

De gerapporteerde jaarlijkse faalfrequentie varieert van  $3,5 \cdot 10^{-3}$  tot  $2,5 \cdot 10^{-2}$ , afhankelijk van het aantal verlopen kalenderdagen sinds de ingebruikname. Voor inox plaatwarmtewisselaars bedroeg de faalfrequentie  $1,66 \cdot 10^{-2}$  per item.jaar, verdeeld over de volgende faalwijzen:

- Extern lek:  $1,0 \cdot 10^{-2}$  (60%)
- Intern lek:  $5,8 \cdot 10^{-3}$  (35%)
- Verstopping:  $8,3 \cdot 10^{-4}$  (5%)

Het artikel toont ook aan dat bepaalde werkcondities een belangrijke invloed hebben op de faalfrequentie.

Tabel 19 toont de invloed van de temperatuur op de frequentie voor een extern lek.

Tabel 19: Invloed van temperatuur op de faalfrequenties voor een extern lek

Temperatuursrange (°C)	Faalfrequentie voor extern lek (per jaar)
10 - 30	$5,3 \cdot 10^{-4}$
30 - 70	$3,2 \cdot 10^{-3}$
70 - 110	$2,1 \cdot 10^{-2}$
> 110	0,22
<i>Alle</i>	$1,0 \cdot 10^{-2}$

Tabel 20 toont de invloed van de werkdruk op de faalfrequenties voor een extern lek.

Tabel 20: Invloed van de werkdruk op de faalfrequenties voor plaatwarmtewisselaars

Werkdruk (bar)	Faalfrequentie voor extern lek (per jaar)
< 5	$6,6 \cdot 10^{-3}$
5 - 8	$1,0 \cdot 10^{-2}$
> 8	$2,4 \cdot 10^{-2}$
<i>Alle</i>	$1,0 \cdot 10^{-2}$

De invloed van de temperatuur is blijkbaar meer uitgesproken dan de invloed van de druk. In werkelijkheid gaan druk en temperatuur meestal samen. Een indeling naar een hogere werkdruk houdt in vele gevallen een verhoging in werktemperatuur in.

De vermelde faaldata bevatten geen gegevens over de verdeling in functie van de lekdiаметer. Een veronderstelde representatieve lekverdeling wordt gegeven in Tabel 21.

Tabel 21: Faalfrequentieverdeling voor plaatwarmtewisselaars

Lekdiаметer (mm)	Equivalentе lekdiаметer (mm)	Kansverdeling (%)
0 - 25	10	0,7
25 - 50	35	0,3
> 50	breuk	$8,3 \cdot 10^{-4}$

De lekverdeling uit Tabel 21 is gebaseerd op volgende aannames:

- De tussenkomst van de operator dient als basis voor het inschatten van de “aanneembare lekgrootte”. Indien directe tussenkomst noodzakelijk was, wordt verondersteld dat de lekdiаметer in de categorie van 25 mm behoort. Voor krachtcentrales met nucleaire en fossiele brandstof was, rekening houdend met de beschouwde werkingsuren, gemiddeld in 30% van de gevallen direct ingrijpen van de operator vereist.
- Er zijn geen catastrofale breuken van plaatwarmtewisselaars gerapporteerd. De faalfrequentie voor verstopping en een voorwaardelijke faalkans van 0,01 voor de drukontlasting, geeft een faalcijfer voor breuk van  $8,3 \cdot 10^{-6}$ , wat in de buurt ligt van het cijfer voor drukvaten.
- De rest van de externe lekken worden verondersteld thuis te horen in de categorie met gemiddelde lekdiаметer van 5 mm, met een lekfrequentie van  $7,0 \cdot 10^{-3}$ .

## Oorzaken van falingen

De meest voorkomende faalwijze van een plaatwarmtewisselaar is een extern lek veroorzaakt door faling van de pakking, bijvoorbeeld door verkeerd materiaalgebruik, onvoldoende hechting van de pakking aan de plaat, overmatige interne druk, mechanische beschadiging, veroudering van de pakking of hechtingsmateriaal,... Ook slechte verbindingen met de leidingen kunnen een externe lekkage veroorzaken.

Interne lekkage, gewoonlijk te wijten aan perforatie van een plaat door corrosie, kan zich verder ontwikkelen tot een extern lek indien de pakking het begeeft.

Verstoppingen in de verbindingen met de leidingen of aan de plaatdoorgangen kan overdruk veroorzaken en leiden tot een lek of breuk indien geen detectie en controle plaatsgrijpt.

### **5.3. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009**

Voor uitstroming via de mantel van pijpwarmtewisselaars worden faalfrequenties gehanteerd op basis van een combinatie van statische data en expert judgement. Indien de werkdruk in de pijpen hoger is dan de ontwerpdruk in de mantel dient ook rekening gehouden te worden met falen van de mantel ten gevolge van pijpbreuk, waarvoor tevens faalfrequenties worden voorgesteld.

De faalfrequenties voor plaatwarmtewisselaars houden rekening met de werkingsdruk van de warmtewisselaar en zijn een combinatie van Tabel 20 en Tabel 21.

## Hoofdstuk 6: Pompen en compressoren

### 6.1. POMPEN

De grote hoeveelheid pompen kan men onderbrengen in één van de categorieën van Tabel 22 (Lauriks et al, 1983).

Tabel 22: overzicht van de soorten pompen

Categorie	Beweging	Type
Volumetrische pompen	Heen en weer gaande beweging	Enkelwerkende zuigerpomp Dubbelwerkende zuigerpomp Enkelwerkende plunjerpomp Dubbelwerkende plunjerpomp Membraanpomp
	Roterende beweging rondom een as	Radiale plunjerpomp Schottenpomp Vloeistofringpomp Monopomp Vijzelpomp Axiale plunjerpomp
	Roterende beweging om meerdere assen	Tandwielpompe Wormpomp
Stromingspompen	Roterende beweging	Centrifugaalpompe (radiaal) Schoepenpompe (halfaxiaal) Propellerpompe (axiaal)

(Lees F.P., 1980) geeft als voornaamste faalwijzen voor procespompen:

- Faling van een oliekeerring;
- Faling van een pakking;
- Operationele schade (cavitatie, drooglopen,...)

Een onderzoek van Electricité de France (Dorey, 1979) geeft volgende statistiek voor 465 falingen op een populatie van 536 pompen en 4,5 miljoen uren:

Oorzaak faling	%
Pakkingen	36
Oliekeerringen	21
Andere lekken	16
Motor	11
Smering	8
Diverse	9

De meest uitgebreide databank over pompen is NRDPS (1981) die 3252 pompjaren operationele ervaring beslaat. Tabel 23 vat de gegevens samen.

Tabel 23: Verdeling van falingen van pompen in de nucleaire industrie

Pomptype	Faalwijze						Totaal	Operationele tijd (jaar)
	Lek	Barst	Scheur	Deuk	Breuk	Ander		
Axiaal	1					2	3	66
Centrifugaal	158	18	3	2	10	143	334	2139
Diafragma	2					6	8	35
Tandrad	1						1	70
Zuiger	259	11	1	1	26	40	338	196
Radiaal						2	2	14
Lobben	7				1	20	28	138
Schroef						8	8	28
Straal						4	4	492
Andere						4	4	74
<i>Totaal</i>	<i>428</i>	<i>29</i>	<i>4</i>	<i>3</i>	<i>37</i>	<i>229</i>	<i>730</i>	<i>3252</i>

De meeste pompfalngen (63%) deden zich voor tijdens operatie; hierna wordt enkel deze fractie in rekening gebracht.

Omdat meervoudige pakkingen maar algemeen in gebruik geraakt zijn vanaf 1980, wordt verondersteld dat de NPDRS-populatie uitsluitend enkelvoudige pakkingen had.

Over de verdeling van de lekgroottes zijn geen verdere gegevens bekend en daarom wordt uitgegaan van volgende hypothesen:

- De faalwijzen “lek” en “barst” geven aanleiding tot een lek waarvan de gemiddelde equivalente lekdiameter kleiner is dan 10 mm;
- De faalwijzen “scheur”, “deuk” en “breuk” geven aanleiding tot een equivalente lekdiameter in de range van 10 tot 50 mm;
- Het catastrofaal openbreken van een pomp is niet waargenomen in de bovenvermelde studie. Lees F.P. (Lees, 1980) geeft een waarde van  $10^{-4}$  op per pompjaar voor een catastrofale breuk.

In principe vallen alle relevante lekfaalwijzen onder 2 categorieën, namelijk problemen met de pakking of het pomphuis.

Met behulp van Tabel 23 en de hoger gestelde aannamen kan men de kans op voorkomen bepalen voor lekken aan pompen. De meest gebruikte pompen in de procesindustrie zijn waarschijnlijk centrifugaalpompen. Daarom is de oefening uitgevoerd voor centrifugaalpompen (enkelvoudige pakking) in Tabel 24.

Tabel 24: Faalfrequenties voor centrifugaalpompen met enkelvoudige pakking

Lekgrootte [mm]	Equivalente lekdiameter [mm]	Faalfrequentieband [/pomp.jaar]
0 - 10	5	$3,9 \cdot 10^{-2}$ - $5,2 \cdot 10^{-2}$ - $6,5 \cdot 10^{-2}$
10 - 50	25	$1,5 \cdot 10^{-3}$ - $4,4 \cdot 10^{-3}$ - $9,4 \cdot 10^{-3}$
breuk	Grootste leiding	$1,0 \cdot 10^{-5}$ - $1,0 \cdot 10^{-4}$ - $2,0 \cdot 10^{-4}$

Voor centrifugaalpompn met een dubbele pakking zal de kans op een extern lek lager zijn. Schatting van een lekfrequentie voor dubbele pakking dient te gebeuren op basis van de frequentie van een 5 mm lek, omdat grotere lekken verwijzen naar schade aan het pomphuis.

Veronderstel eenzelfde lekfrequentie voor de binnen- en de buitenpakking en beschouw een barst als een “common mode failure”, dan wordt de faalfrequentie voor centrifugaalpompn met dubbele pakking:

$$\lambda(\text{dubbele pakking}) = ((158/2139) * 0,63)^2 + 18/2139 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ per pompjaar}$$

Voor de frequentie op een lek in de categorie 10 - 50 mm wordt aangenomen dat de oorzaken van die aard zijn dat de faalkans voor een pomp met dubbele pakking niet verschilt van een pomp met enkelvoudige pakking. Een dubbele pakking is met andere woorden enkel doeltreffend voor kleinere lekken.

Tabel 25 geeft de faaldata voor centrifugaalpompn met dubbele pakking.

Tabel 25: Faalfrequenties voor centrifugaalpompn met dubbele pakking

Lekgrootte [mm]	Equivalentte lekdiameter [mm]	Faalfrequentieband [/pomp.jaar]
0 - 10	5	$5,6 \cdot 10^{-3} - 7,5 \cdot 10^{-3} - 9,4 \cdot 10^{-3}$
10 - 50	25	$1,5 \cdot 10^{-3} - 4,4 \cdot 10^{-3} - 9,4 \cdot 10^{-3}$
breuk	Grootste leiding	$1,0 \cdot 10^{-5} - 1,0 \cdot 10^{-4} - 2,0 \cdot 10^{-4}$

Voor centrifugaalpompn zonder pakking kan volgende redenering gevolgd worden. OREDA-97 geeft voor het scenario “extern lek” de relatieve bijdrage van de diverse onderdelen van het pompsysteem (pomp, aandrijving, koeling, smering, aangesloten leidingsysteem, etc.). Wat de pomp zelf betreft, blijkt het pomphuis voor 2 tot 3% bij te dragen tot de externe lekkage. Aangezien pakkingloze pompn geen asafdichtingen hebben en andere componenten (as, lagers, etc.) ook binnen het eigenlijke pomphuis zitten, kan gesteld worden dat de kans op lekkage van een pakkingloze pomp 2 tot 3% bedraagt van deze van de kans op lekkage van een pomp met pakkingen. Uitgaande van de lekfrequentie van  $4,4 \cdot 10^{-3}$  per jaar voor pompn met pakking, bekomt men zodoende een kans op lekkage van ca.  $10^{-4}$ /jaar voor een pakkingloze pomp.

Voor zuigerpompn is een analoge redenering te voeren als voor centrifugaalpompn. Uit Tabel 23 stelt men vast dat het aantal kleinere lekken een factor 17 hoger ligt dan voor de centrifugaalpompn. Er werden 270 kleinere lekken waargenomen (lek en barst) ten opzichte van 176 voor centrifugaalpompn maar de populatie is een factor 10 kleiner.

Een dergelijke discrepantie wordt echter niet bevestigd in andere literatuurbronnen. Davidson (Davidson, 1988) geeft vergelijkbare faalfrequenties voor “centrifugal pumps” en “reciprocating pumps” (deze laatste krijgen een faalfrequentie die hoogstens een factor 3 hoger is).



In het Handboek Kanscijfers 2004 (HBKC2004) wordt voor zuigerpompen aanbevolen om een faalfrequentie te hanteren die een factor 10 hoger ligt dan deze van centrifugaalpompen.

Andere referenties voor faalgegevens van pompen zijn onder andere OREDA-92 en het ENI handboek en Blything (Blything et al, 1988), Smith (Smith, 1988) en Davidson (Davidson, 1988).

## 6.2. COMPRESSOREN

Net zoals bij pompen kunnen verschillende faalwijzen aanleiding geven tot het vrijkomen van product in de omgeving; de voornaamste zijn:

- Lek aan de asafdichting;
- Lek aan het compressorhuis.

De faaldata voor externe lekken aan compressoren is schaars. In de PERD-guidelines van AIChE zijn enkel algemene cijfers voor instantaan falen opgenomen, waarbij geen onderscheid gemaakt wordt of er al dan niet een extern lek optreedt:

- Ondergrens:  $2,7 \cdot 10^{-2}$  /compressor.jaar;
- Gemiddelde: 12 /compressor.jaar;
- Bovengrens: 49 /compressor.jaar.

Johnson en Welker (1981) hebben voor het Gas Research Institute een verbeterde databank voor LNG-installaties opgesteld. Voor compressorsystemen zijn op 2,256 miljoen werkingsuren 116 belangrijke falingen vastgesteld, wat een faalfrequentie betekent van 0,45/compressor.jaar met een 99% betrouwbaarheidsinterval van 0,34 - 0,56/compressor.jaar.

Op basis van een analyse van een vertrouwelijk rapport van een scheikundige groep is volgende data verzameld:

### Centrifugaalcompressoren

- 16 lekken zijn waargenomen op een populatie van 1157 compressoren;
- 15 met een lekdiameter van 0 tot 10 mm;
- 1 in de categorie van 25 tot 50 mm lekken;

### Zuigercompressoren

- 102 lekken zijn gerapporteerd voor 156 compressorjaren;
- 97 “minor”, niet weerhouden;
- 3 gebruikt voor de 25 mm (10 - 50 mm categorie) lekfrequentie;
- 2 kleiner dan 25 mm diameter, niet gebruikt.

De databank catalogeerde de lekken als “minor” (95%) en “major” (5%), uit de laatste categorie is de helft weerhouden als 25 mm lek.

Voor beide compressortypes wordt verder aangenomen dat de kans op een lek in de categorie 50 - 150 mm 1/10 bedraagt van de kans op een lek in de categorie 10 - 50 mm.

Bovenstaande gegevens leiden tot de faalfrequenties van Tabel 26.

Tabel 26: Faalfrequenties (per trapjaar) voor centrifugaalcompressoren

Lekgrootte [mm]	Equivalente lekdiameter [mm]	Faalfrequentieband [/compressor.jaar]	
		Centrifugaalcompressoren	Zuigercompressoren
10 - 50	25	$4,3 \cdot 10^{-6} - 8,6 \cdot 10^{-4} - 6,4 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-6} - 1,9 \cdot 10^{-2} - 7,0 \cdot 10^{-2}$
> 50	100	$4,3 \cdot 10^{-7} - 8,6 \cdot 10^{-5} - 6,4 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-7} - 1,9 \cdot 10^{-3} - 7,0 \cdot 10^{-4}$

### 6.3. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009

Voor de centrifugaalpompjes werd besloten om enkel de grotere lekken te weerhouden ( $4,4 \cdot 10^{-3}$ /pompjaar voor pompjes met pakking en  $10^{-4}$ /pompjaar voor pakkingloze pompjes). Breuk werd niet vastgesteld en is tevens weinig waarschijnlijk voor dergelijke pompjes. Bij de zuigerpompjes is deze faalwijze wel aannemelijk en wordt deze bijgevolg ook meegenomen ( $10^{-4}$ /pompjaar). Voor de lekken van de zuigerpompjes werd eenzelfde frequentie aangenomen als voor de centrifugaalpompjes.

Voor de centrifugaal- en zuigercompressoren worden dezelfde faalfrequenties gebruikt als voor de zuigerpompjes. Hier wordt dus voor alle compressoren breuk weerhouden als faalwijze en dit omwille van de specifieke risico's verbonden aan snellopende machines (vb. loskomen turbinebladen) (Sertius).

Als equivalente lekdiameter wordt 10% van de leidingdiameter genomen, zoals in (RIVM) en ondersteund door een studie van (Westinghouse).

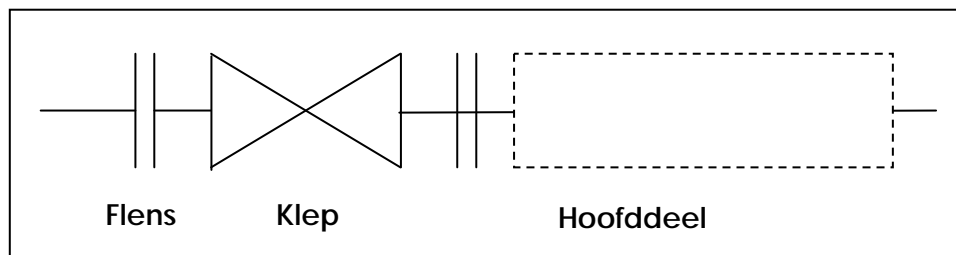
## Hoofdstuk 7: Leidingsystemen

### 7.1. PROCESLEIDINGEN (DNV)

#### Definities

##### Faalgebied

Naar analogie van ARF99 worden in deze rubriek uitsluitend de falingen met betrekking tot het hoofddeel (main body) van de pijpleidingen (Figuur 3) in beschouwing genomen.



*Figuur 3: Schematische voorstelling van een pijpleiding (ARF99)*

In procespijpleidingen komen echter meer falingen voor bij flenzen, kleppen en kleine boormontages dan in het hoofddeel van de pijpleiding.

#### *Procesleidingen*

Dit zijn de leidingen in een procesplant die de procesfluida tussen de verschillende procesvaten transporteren.

#### *Inter-Unit en Transportleidingen*

Met dit soort worden de leidingen bedoeld die de verbinding vormen tussen verscheidene afdelingen (inter-unit) of de leidingen die het transport verzorgen (transportleidingen) tussen eenheid en opslagtank. Dit soort inter-unit leidingen bevinden zich meestal op grondniveau in leidingstraten of op leidingbruggen.

#### Faalwijze

De belangrijkste manieren waarop procesleidingen falen zijn (ARF99):

- externe lekken doorheen de leidingwand of -lassen;
- blokkering tengevolge van vervorming van de leiding of door obstructie van objecten in de leiding;
- onaanvaardbare vervorming of corrosie (zonder lekkage of blokkering).

De belangrijkste oorzaken van falen bij leidingen zijn van mechanische aard (meestal door combinatie van overbelasting en onaangepast ontwerp) en door corrosie. Men vermoedt dat corrosie aanleiding geeft tot veel kleinere lekken dan oorzaken van mechanische aard (ARF99).

## Eenheden van lekfrequentie

### *Lekken per dienstjaren*

Er wordt aangenomen dat de kans op falen over een gegeven tijdsperiode exponentieel toeneemt d.w.z. dat de kans op falen exponentieel toeneemt met de tijd dat een leiding in dienst is. De faalfrequentie per tijdseenheid is in dit geval een constante. De faalfrequentie wordt dan meestal uitgedrukt in dienstjaren, hoewel diensturen eveneens gebruikelijk is.

Een afgeleide eenheid is de lekfrequentie uit te drukken in “lekken per bedrijf per jaar”. Deze uitdrukkingvorm wordt enkel gebruikt voor eenvoudige kwantitatieve risicoanalyses waarbij de resultaten uitsluitend gebruikt worden voor het vergelijken van faalgegevens van bedrijven met een gelijkaardige omvang en met dezelfde hoeveelheid leidingen.

### *Lekken per leidinglengte per jaar*

Voor generische lekfrequenties geniet de uitdrukkingvorm “lekken per meterjaar” de voorkeur en wordt daarom in kwantitatieve risicoanalyses het meest gebruikt. Er wordt aangenomen dat de lekfrequentie proportioneel toeneemt met de lengte van de leiding.

Een alternatieve uitdrukking van de lekfrequentie is “het aantal lekken per eenheid lengte/diameter verhouding per jaar”. In dit geval wordt verondersteld dat de lekfrequentie evenredig toeneemt met de leidinglengte en omgekeerd evenredig met de leidingdiameter. Hoewel deze frequentie-eenheid dikwijls gebruikt wordt is er geen evidentie dat ze bepaalde voordelen biedt t.o.v. de “frequentie per leidinglengte per jaar”.

## Effect van leidinglengte en -diameter

### *Effect van leidinglengte op lekfrequentie*

Daar langere leidingen enerzijds meer lassen en krommingen hebben en anderzijds meer gelegenheid tot impact en corrosie bieden is de kans op lekken groter dan bij kortere leidingen. In de meeste studies wordt aangenomen dat de lekfrequentie proportioneel is met de leidinglengte, daarom wordt de frequentie uitgedrukt in aantal lekken per meterjaar.

### *Effect van leidingdiameter op lekfrequentie*

Grotere leidingen hebben dikkere wanden en zijn aldus beter bestand tegen schokken en corrosie dan kleinere leidingen. Dikwijls wordt er eveneens meer aandacht geschonken aan ontwerp, inspectie en onderhoud. Alhoewel sommige auteurs veronderstellen dat de lekfrequentie niet afhankelijk is van de leidingdiameter zijn er anderen die er van uit gaan dat de lekfrequentie omgekeerd evenredig is met de leidingdiameter.

## Faalfrequenties

In de kwantitatieve risicoanalyse wordt veelvuldig gebruik gemaakt van de Gulf data (ARF99). De faalfrequentie voor procesleidingen zijn gebaseerd op gegevens aangeleverd door een belangrijke chemische groep (DNV TEDARES source LO56, intern document DNV) die ze omschrijft als “een review van Gulf en andere data, Gulf Oil, 1978”. De originele lekfrequenties van de Gulf data worden in Tabel 27 samengevat.

Uit de ervaren falingen werd een empirische correlatie vastgelegd tussen lekgrootte L en de leidingdiameter D.

Tabel 27: Originele lekfrequenties van Gulf data (HKC94, ARF99)

Lektype	Lekgrootte in % oppervlak	Lekgrootte in % diameter	Voorwaardelijke kans	Frequentie (per jaar)
Klein lek	< 1	10	0,59	$2,8 \cdot 10^{-7} L/D$
Groot lek	1 - 5	22	0,25	$1,2 \cdot 10^{-7} L/D$
Ernstig lek	5 - 20	45	0,11	$5,0 \cdot 10^{-8} L/D$
Breuk	20 - 100	100	0,05	$2,2 \cdot 10^{-8} L/D$
<i>Totaal</i>				$4,72 \cdot 10^{-7} L/D$

Er moet op gewezen worden dat alle andere interpretaties en modificatie van deze gegevens niet in de originele dataset teruggevonden worden. De *in italic* weergegeven waarden zijn afgeleide waarden uit de originele Gulf data.

DNV heeft voor de allesomvattende lekfrequentie van de Gulf data volgende formule afgeleid:

$$F = 4,72 \cdot 10^{-7} L/D \quad \{3\}$$

waar

F = lekfrequentie per jaar

L = leidinglengte (m)

D = leidingdiameter (m)

## Faaloorzaken van procesleidingen

Uit een onderzoek (DNV-Technica C1359, feb. 1989; intern document DNV) in dit verband werd op basis van 921 ongevallen uit internationale databestanden (HKC94) 72 faaloorzaken geïdentificeerd en onderverdeeld in 12 categorieën. Deze oorzaken werden verder gekwantificeerd (DNV-Technica studie, H111, april 1991; intern document DNV) en kunnen onder specifieke omstandigheden die relevant zijn voor het falen van de leiding aangewend worden om hoger vermelde faaldata te verfijnen. Tabel 28 geeft een overzicht van de relevante oorzaken en hun procentuele bijdrage tot het falen van een procesleiding.

Tabel 28: Procentuele bijdrage van de deelloorzaken van een procesleiding

Oorzaak	Deelloorzaak	Bijdrage (%)
Corrosie	Verkeerd materiaal	1,68
	Corrosieve contaminatie	0,38
	Uitzonderlijke condities	1,01
	Agressieve omgeving	1,03
	Slechte bescherming	0,74
	Zink-embrittlement	0,06
	Koelwatercircuit	0,06
	Galvanische corrosie	0,33
	Onbekend	4,11
Erosie	Turbulente stroming	0,01
	Ongunstige vloeibaar	0,22
	Hoge stroomsnelheid	0,14
	Erosieve externe omgeving	0,05
	Onbekend	0,27
	Erosieve inhoud	0,11
Externe belasting	Weggehaalde leidingsupports	0,28
	Faling van leidingsupports	0,98
	Slecht ontwerp van de supports	1,14
	Onbekend	0,11
	Externe belasting	0,48
Temperatuur	Onvoldoende materiaalspecificatie	0,87
	Thermische spanningen	0,38
	Verandering van de inhoud	0,60
	Thermische schok	0,38
	Slechte leidingspecificaties	0,02
	Domino-effect	0,54
	Onbekend	1,01
Verkeerde oplijning	Verkeerde plaatsing van delen	0,16
	Verkeerde installatie	2,64
	Onvoldoende uitrusting	1,09
	Onbekend	0,11
Procedurefout	Niet gereinigde leiding vóór opening	4,38
	Verkeerde leiding waarop gewerkt wordt	0,87
	Verkeerde uitrustingsstatus	3,62
	Verkeerde opeenvolging van operaties	2,90
	Leiding/uitrusting fout verbonden/ontkoppeld	0,76
	Leiding onvoldoende geïsoleerd	1,56
	Uitrusting niet teruggebracht naar normale status	0,33
	Onbekend	3,78
Impact	Impact van een naburige installatie	1,68
	Menselijke impact	0,85
	Vallend object t.g.v. een natuurlijke oorzaak	0,22
	Voertuigimpact	1,57
	Onbekend	0,43
Overdruk	Bronddruk te hoog	1,81
	Falen van noodstopsysteem tegen overdruk	0,22

	Hoge drukbron aangesloten op lage drukzijde	0,11
	Onverwachte reactie	4,34
	Bevriezen	1,18
	Drukpulsen afkomstig van de stroomverwarming	0,76
	Drukpulsen van trillende kleppen	0,11
	Drukpuls vanwege de pomp	0,05
	Onbekend	2,87
	Externe hittebelasting	0,65
Trilling	Vibratie van aanhangend materiaal	0,71
	Vibratie in de leiding t.g.v. defect materiaal	0,30
	Onstabiele condities	0,22
	Design/installatiefout veroorzaakt vibraties	0,05
	Waterslag	0
	Onbekend	0,22
Materiaalfout	Leiding	12,54
	Klep	5,92
	Pakking	5,48
	Breekplaat	0,38
	Andere	1,79
	Onbekend	5,75
Onbekend		9,0
Andere	Opening van klep door bekrachtiging	0,11
	Opstart	0,33
	Vastklitten	0,65
	Blokkering van open klep door vreemd voorwerp	0,05
	Faling van computersoftware	0,22
	Te hoog buigmoment in een bocht	0,05
	Doorboring van ingegraven leiding	0,11
TOTAAL		100

## 7.2. ONDERGRONDSE PIJPLEIDINGEN

### Gaspijpleidingen

De faaldata voor ondergrondse gaspijpleidingen zijn afgeleid uit (EGIG, 2008). De EGIG bevraging beslaat de periode 1970 - 2007. In totaal deden er 15 bedrijven mee aan de bevraging, te weten: DGC (Denemarken), ENAGAS (Spanje), Fluxys (België), Gasum Oy (Finland), N.V. Nederlandse Gasunie (Nederland), GRT Gaz (Frankrijk), E.ON Ruhrgas AG (Duitsland), SNAM Rete Gas (Italië), SWISSGAS (Zwitserland), National Grid (Verenigd Koninkrijk), RWE Transgas Net (Tsjechië), Ren Gasodutos S.A. (Portugal), Swedegas A.B. (Zweden), Bord Gais Eireann (Ierland), OMV Gas GmbH (Oostenrijk).

De criteria voor de classificatie voor incidenten in deze database zijn:

- er is altijd een ongewild vrijkomen van gas;
- de pijpleiding moet aan volgende voorwaarden voldoen
  1. gemaakt van staal;
  2. onshore;

3. maximum werkdruk groter dan 15 bar;
  4. gelokaliseerd buiten de omheining van de gasinstallaties;
- de incidenten hebben geen betrekking op bijhorende uitrusting (kleppen, compressoren) of andere onderdelen dan de pijpleiding zelf.

Afhankelijk van de lekgrootte worden de drie volgende schadetypes onderscheiden:

- Barst: diameter van defect gelijk aan of kleiner dan 2 cm;
- Gat: diameter van defect meer dan 2 cm en gelijk aan of kleiner dan de diameter van pijpleiding;
- Breuk: diameter van defect groter dan diameter van pijpleiding.

## Faalfrequenties

De faalfrequenties voor de hele periode 1970-2007, voor de laatste vijf jaar (2003-2007) en voor het laatste jaar (2007) worden in Tabel 29 samengevat.

Tabel 29: Faalfrequenties [/km.jaar] gaspijpleidingen (EGIG, 2008)

Periode	Aantal incidenten	Populatie [km.jaar]	Faalfrequentie [/km.jaar]
1970-2007	1172	3.150.000	$3,7 \cdot 10^{-4}$
2003-2007	88	620.000	$1,4 \cdot 10^{-4}$
2007	14	130.000	$1,1 \cdot 10^{-4}$

In Tabel 30 wordt een overzicht gegeven van de faalfrequentie volgens oorzaak en lektype voor de periode 1970-2007. Deze waarden werden afgelezen van figuur 17 uit (EGIG, 2008). Op basis hiervan kan het percentage voor de verschillende faalwijzen ten opzichte van de totale faalfrequentie bepaald worden.

Tabel 30: Faalfrequentie [/km.jaar] gaspijpleidingen volgens oorzaak (1970-2007) (EGIG, 2008)

Lektype	Oorzaak van incident						Totaal	%
	Externe interferentie	Corrosie	Constructie Materiaal	Grondverplaatsing	Operationele fouten	Andere		
Barst	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	50,3
Gat	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	-	$1,3 \cdot 10^{-4}$	35,7
Breuk	$3,5 \cdot 10^{-5}$	-	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	-	-	$5,0 \cdot 10^{-5}$	14,0

Tesamen met de allesomvattende faalfrequentie  $1,4 \cdot 10^{-4}$  /km.jaar voor de periode 2003-2007, levert dit volgende faalfrequenties voor de verschillende faalwijzen voor de ondergrondse gasleidingen:

- Barst:  $7,2 \cdot 10^{-5}$  /km.jaar;
- Gat:  $5,1 \cdot 10^{-5}$  /km.jaar;
- Breuk:  $2,0 \cdot 10^{-5}$  /km.jaar.



## Faaloorzaken

Op basis van (EGIG, 2008) werd Tabel 31 opgesteld met een overzicht van de relevante oorzaken en hun procentuele bijdrage tot het falen van de ondergrondse gasleiding.

Tabel 31: Procentuele bijdrage van de deelloorzaken van een ondergrondse gasleiding

Oorzaak	Deelloorzaak	Bijdrage per deelloorzaak (%)	Bijdrage per oorzaak (%)
Externe interferentie	Graven	18,85	49,6
	Grondwerken	4,46	
	Publieke werken	4,46	
	Agricultuur	4,46	
	Drainage	3,97	
	Onbekend	13,39	
Corrosie	Externe corrosie	12,47	15,4
	<i>Pitting</i>	8,48	
	<i>Galvanische corrosie</i>	1,50	
	<i>Spanningscorrosie</i>	0,62	
	<i>Onbekend</i>	1,87	
	Interne corrosie	2,31	
Onbekend	0,62		
Constructie/materiaal	-	16,50	16,5
Grondverplaatsing	Dijkbreuk	0,07	7,3
	Overstroming	1,31	
	Aardverschuiving	4,09	
	Mijn	0,37	
	Rivier	0,44	
	Andere/onbekend	1,02	
Operationele fout	-	4,60	4,6
Andere/onbekend	Bliksem	1,68	6,7
	Onbekend	5,02	

## Vloeistofpijpleidingen

De aanbevolen data voor dit soort leidingen werden afgeleid uit (Concawe, 2008), waarbij incidenten in het Europese olieleidingnet werden geanalyseerd. De studie omvat pijpleidingen gebruikt voor het transport van ruwe olie of petroleumproducten met een lengte van 2 km of meer in het openbaar domein die over land lopen. Pompstations en intermediaire opslagplaatsen zijn hierbij inbegrepen.

In (Concawe, 2008) werden volgende arbitraire definities gebruikt voor de verschillende lekgroottes:

- Klein gat: minder dan 2x2 mm;
- Spleet: 2 tot 75 mm lang en maximum 10% van de diameter van de pijpleiding breed;
- Gat: 2 tot 75 mm lang en minimum 10% van de diameter van de pijpleiding breed;
- Scheur: 75 tot 1000 mm lang en maximum 10% van de diameter van de pijpleiding breed;

- Breuk: meer dan 75 mm lang en minimum 10% van de diameter van de pijpleiding breed.

“Geen gat” betekent dat de uitstroming veroorzaakt werd door het falen van een pakking, een afdichting of een mechanische breuk.

## Faalfrequenties

De faalfrequenties voor de hele periode 1971-2006, voor de laatste 5 jaren (2002-2006) en voor het laatste jaar (2006) worden in Tabel 32 samengevat.

Tabel 32: Faalfrequenties [/km.jaar] vloeistofpijpleidingen (CONCAWE, 2008)

Periode	Aantal incidenten	Populatie [km.jaar]	Faalfrequentie [/km.jaar]
1971-2006	448	800.000	$5,6 \cdot 10^{-4}$
2002-2006	54	174.000	$3,1 \cdot 10^{-4}$
2006	12	35.400	$3,4 \cdot 10^{-4}$

De vloeistofpijpleidingen kunnen onderverdeeld worden in warme en koude pijpleidingen. Bovenstaande faalfrequenties gelden voor alle pijpleidingen samen. Er is echter een aanzienlijk verschil voor de faalfrequenties en -oorzaken voor beide types pijpleidingen. In het algemeen hebben de warme leidingen een hogere faalfrequentie veroorzaakt door (externe) corrosie. Daarom werden in het verleden reeds veel van dit type leidingen gesloten of omgevormd tot koude leidingen.

Vermits (externe) corrosie typisch is voor warme pijpleidingen en deze op dit moment in beperkte mate (0,8%) voorkomen, wordt bij de verdere uitwerking van de faalfrequenties en -oorzaken verder geen rekening gehouden met de faaloorzaak (externe) corrosie voor warme leidingen. Voor de periode 2002-2006 betreft dit 1 falings en wordt de faalfrequentie  $3,0 \cdot 10^{-4}$ /jaar.

De verdeling per lektype wordt weergegeven in Tabel 33. Deze tabel heeft betrekking op de periode 1971-2006 en werd opgesteld op basis van de gegevens van de 239 incidenten waarvoor dergelijke details werden opgegeven.

Tabel 33: Verdeling falings vloeistofpijpleidingen volgens lektype (1971-2006) (Concawe, 2008)

Lektype	Aantal incidenten	%
Geen gat	5	2
Klein gat	22	9
Spleet	37	15
Gat	81	34
Scheur	48	20
Breuk	46	19

De in (Concawe, 2008) gehanteerde definities komen niet overeen met deze uit (EGIG, 2008) (barst  $\leq 20$ mm, gat  $> 20$  mm en breuk). Om toch dezelfde indeling te kunnen

gebruiken worden “geen gat” en “klein gat” volledig ingedeeld bij barst. “Spleet” en “gat” worden elk voor 50% toebedeeld aan barst en gat. “Scheur” wordt volledig ingedeeld bij gat. En “breuk” uit (Concawe, 2008) wordt gelijk gesteld aan breuk uit (EGIG, 2008).

Tesamen met de allesomvattende faalfrequentie  $3,0 \cdot 10^{-4}$  /jaar voor de periode 2002-2006, levert dit volgende faalfrequenties voor de verschillende faalwijzen voor de ondergrondse vloeistofleidingen:

- Barst (36%):  $1,1 \cdot 10^{-4}$  /km.jaar;
- Gat (45%):  $1,4 \cdot 10^{-4}$  /km.jaar;
- Breuk (19%):  $5,9 \cdot 10^{-5}$  /km.jaar.

### Faaloorzaken

Op basis van (Concawe, 2008) werd Tabel 34 opgesteld met een overzicht van de relevante oorzaken en hun procentuele bijdrage tot het falen van de ondergrondse vloeistofleiding. Bij de bepaling van de bijdrage per (deel)oorzaak werd de bijdrage van de warme pijpleidingen voor de oorzaak (externe) corrosie tevens achterwege gelaten.

Tabel 34: Procentuele bijdrage van de deelloorzaken van een ondergrondse vloeistofleiding

Oorzaak	Deelloorzaak	Bijdrage per deelloorzaak (%)	Bijdrage per oorzaak (%)	
Mechanisch	Constructie	Verkeerde las	2,54	28,42
		Constructiefout	1,52	
		Verkeerde installatie	2,54	
		Andere/onbekend	4,06	
	Design en materiaal	Verkeerd design	1,78	
		Verkeerd materiaal	6,85	
		Ouderdom/vermoeidheid	1,52	
		Andere/onbekend	7,61	
Operationeel	Systeem	Uitrusting	0,51	7,87
		Controlesystemen	0,76	
		Andere/onbekend	1,27	
	Mens	Niet drukloos gemaakt of gedraind	0,76	
		Verkeerde handeling	3,30	
		verkeerd onderhoud/constructie	1,02	
		Andere/onbekend	0,25	
Corrosie	Externe corrosie	11,68	18,54	
	Interne corrosie	5,84		
	Spanningscorrosie	1,02		
Natuurlijke gevaren	Grondverplaatsing	Aardverschuiving	1,27	3,80
		Verzakking	0,76	
		Aardbeving	0,25	
		Andere/onbekend	0,25	
	Andere	Overstroming	0,76	
		Onbekend	0,51	

Externe interferentie	Ongelukken	Constructie			41,38
			Graven	9,14	
			Bulldozer	3,30	
		Agricultuur			
			Graven	7,61	
			Bulldozer	0,76	
			Andere	0,51	
		Ondergrondse infrastructuur			
			Graven	3,05	
			Bulldozer	0,76	
			Boren/explosie	2,28	
	Andere	1,02			
	Andere/onbekend	1,02			
Opzettelijke schade	Terrorisme	0,51			
	Vandalisme	1,27			
	Diefstal	3,55			
Incidenten		6,60			

### 7.3. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009

De faalfrequenties voor bovengrondse leidingen zijn afgeleid van de Gulf Data.

De faalfrequenties voor de ondergrondse leidingen worden afgeleid uit een combinatie van de faalfrequenties voor gas- en vloeistofpijpleidingen, vermits de faalfrequenties voor de recentste periode voor ondergrondse gas- en vloeistofleidingen geen significant verschil vertonen. De onderliggende data werden afgeleid van respectievelijk (EGIG, 2008) en (Concawe, 2008), waarbij telkens de gegevens van de meest recente periode gebruikt werden. De totale faalfrequentie wordt in Tabel 35 bepaald.

Tabel 35: Faalfrequentie voor ondergrondse pijpleidingen (EGIG, 2008; Concawe, 2008)

Bron	Aantal incidenten	Totaal aantal km.jr	Frequentie [/km.jr] en 99 % betrouwbaarheidsinterval
EGIG	88	620 000	$1,1 \cdot 10^{-4} - 1,4 \cdot 10^{-4} - 1,9 \cdot 10^{-4}$
Concawe	53	174 000	$2,1 \cdot 10^{-4} - 3,0 \cdot 10^{-4} - 4,3 \cdot 10^{-4}$
Totaal	141	794 000	$1,4 \cdot 10^{-4} - 1,8 \cdot 10^{-4} - 2,2 \cdot 10^{-4}$

In Tabel 36 wordt een overzicht gegeven van de faalfrequentie volgens lektype voor gas- en vloeistofleidingen samen.

Tabel 36: Faalfrequentie [/km.jr] volgens lektype

Lektype	Aantal incidenten	Faalfrequentie [/km.jr] en 99 % betrouwbaarheidsinterval
Barst	63	$5,6 \cdot 10^{-5} - 7,9 \cdot 10^{-5} - 1,1 \cdot 10^{-4}$
Gat	55	$4,8 \cdot 10^{-5} - 6,9 \cdot 10^{-5} - 9,7 \cdot 10^{-5}$
Breuk	22	$1,5 \cdot 10^{-5} - 2,8 \cdot 10^{-5} - 4,7 \cdot 10^{-5}$

## Hoofdstuk 8: Verladingsactiviteiten

### 8.1. LADEN EN LOSSEN VAN TANKWAGENS, SPOORWAGONS EN SCHEPEN

In Tabel 37 worden de in (RIVM) aanbevolen faaldata gegeven voor verladingsactiviteiten van druk- en atmosferische tanks van tankwagens, spoorwagens en schepen in een onderneming. De gehanteerde definities voor de beschreven fenomenen zijn de volgende:

- L.1a: Volledige breuk van de laad- en losslang. De uitstroming is aan weerszijde van de volledige breuk.
- L.2a: Lek van de laad- en losslang. De uitstroming gebeurt via een lek met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, die maximaal 50 mm bedraagt.
- L.1b: Volledig breuk van de laad- en losarm. De uitstroming is aan weerszijde van de volledige breuk.
- L.2b: Lek van de laad- en losarm. De uitstroom van een lek met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, die maximaal 50 mm bedraagt.

Tabel 37: Faalfrequenties voor verladingsactiviteiten (RIVM)

	L.1a per uur	L.2a per uur	L.1b per uur	L.2b per uur
Druktank	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-7}$
Atmosferische tank				

De frequentie voor een catastrofale breuk van een laadarm of een laadslang van tankwagens, spoorwagens en schepen werd afgeleid van de COVO study (COVO81, AEC75, We76, Ja71). Hier wordt een faalfrequentie angewend voor een leidingslang onder lichte spanning; de breukfrequentie van een leidingslang onder zware druk is een factor 10 groter. De frequentie van een lek wordt verondersteld 10 keer groter te zijn dan de frequentie van een breuk. Bij berekening van de uitgestroomde hoeveelheden dient rekening gehouden met de aanwezige veiligheidsvoorzieningen, zoals lekdetectoren, manueel of automatisch bediende snelafsluiters en met de bijhorende antwoordtijd van deze systemen.

### 8.2. LPG-VERLADINGEN

De faalfrequenties voor de LPG-flexibels komen uit (HSE), waarin volgende faalfrequenties specifiek voor het verladen van LPG vermeld zijn:

Lekgrootte (mm)	Nominale lekdiameter (mm)	Faalfrequentie (/uur)
3-10	5	$2,7 \cdot 10^{-6}$
10- 50	25	$2,7 \cdot 10^{-6}$
Breuk	50	$5,4 \cdot 10^{-7}$

Bijkomend wordt vermeld dat de slangen uitgerust zijn met breekkoppelingen, waardoor er een beveiliging is tegen oorzaken die een te grote mechanische spanning zouden veroorzaken (vb. weggrijden tankwagen met aangekoppelde slang). Deze oorzaak voor het scenario van een breuk van een slang wordt hierdoor geëlimineerd.

### **8.3. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009**

De faalfrequenties voor verladingsactiviteiten zijn overgenomen uit (RIVM). Hieraan werden faalfrequenties voor de verlaadflexibels voor LPG toegevoegd (HSE).

Voor de faalfrequenties van de tankwagens en spoorwagens zelf wordt verwezen naar het hoofdstuk omtrent druktanks en atmosferische tanks.

## Hoofdstuk 9: Brand in magazijnen

Er zijn enkele statistische studies beschikbaar die onderzoek verrichtten naar de kans van voorkomen van een brand in een magazijn. De betekenis die wordt gegeven aan de term "brand" is niet dezelfde in de verschillende studies maar in grote lijnen kan men drie categorieën onderscheiden:

- Incident: Dit zijn situaties waar er in feite sprake kan zijn van een brand maar dankzij een snelle tussenkomst is de schade beperkt of nihil gebleven. Het is zeer moeilijk om hier betrouwbare statistische gegevens over te verzamelen.
- Gerapporteerde brand: De brand werd door de overheid gerapporteerd wat betekent dat de brandweer is moeten tussenkomen.
- Zeer ernstige brand: Het ongeval dat zich voordoet beantwoordt aan de geest van de Seveso-wetgeving. Bepaalde auteurs kiezen als criterium dat het *dak van de loods instort*.

In 1992 voerde Hymes (Hymes et al., 1992) een onderzoek uit, in opdracht van het Engelse HSE, dat betrekking had op opslagloodsen in het Verenigd Koninkrijk en op de periode 1976-1987. Hymes verwijst naar een vroegere studie van Baldwin die een frequentie van  $1,2 \cdot 10^{-2}$  *gerapporteerde branden* per magazijn en per jaar had vastgesteld.

Hymes besluit dat er zich per magazijn 1 tot 5 situaties per jaar voordoen waarbij het gebruik van een brandblusser vereist is.

Hymes vermeldt een totaal van 351 *gerapporteerde branden* op een totale populatie van 36.192 magazijn.jaren. Dit levert een frequentie van  $9,7 \cdot 10^{-3}$  *gerapporteerde branden* /magazijn.jaar met een 99 % betrouwbaarheids-interval gelijk aan  $8,4 \cdot 10^{-3} - 1,1 \cdot 10^{-2}$ .

Hymes stelde vast dat in 20,5% van de gevallen brand escaleerde tot een *zeer ernstige brand* (instorten van het dak).

Voor 25% van de branden was er onvoldoende informatie beschikbaar om te kunnen besluiten of een escalatie al of niet plaats had.

Indien wordt aangenomen dat er zich ook een escalatie naar een zeer ernstige brand voordeed in 20,5% van deze onbekende gevallen, betekent dit een totaal van 90 branden die escaleerden naar een zeer ernstige brand (26%). Dit levert een frequentie van  $2,5 \cdot 10^{-3}$  *zeer ernstige branden*/magazijn.jaar met een 99% betrouwbaarheidsinterval gelijk aan  $1,8 \cdot 10^{-3} - 3,2 \cdot 10^{-2}$ .

Het al of niet escaleren van een brand zal ondermeer afhankelijk zijn van de interventiemiddelen.

Voor magazijnen die voorzien zijn van een sprinklerinstallatie bleek dat de sprinklerinstallatie er in 7% van de gevallen niet in slaagt om de brand te bedwingen of in 93% van de gevallen de brand wel bedwong. Indien alle 351 magazijnen voorzien waren

geweest van een automatisch geactiveerd sprinklersysteem zouden er met andere woorden maar 25 geëscaleerd zijn naar een zeer ernstige brand. Dit levert een voorkomingfrequentie van  $6,9 \cdot 10^{-4}$  *zeer ernstige branden* per magazijn.jaar met een 99% betrouwbaarheidsinterval gelijk aan  $3,9 \cdot 10^{-4}$  -  $1,1 \cdot 10^{-3}$ .

### **Besluit – Generieke faalfrequenties HBFF2009**

Voor brand in magazijnen worden de faalfrequenties bekomen door Hymes overgenomen.



## Hoofdstuk 10: Stukgoederen

De faalfrequenties voor stukgoedopslag en -behandeling werden bekomen uit praktijkgegevens van verschillende Vlaamse Seveso-inrichtingen (SGS). De gegevens waarop de faalfrequenties gebaseerd zijn, worden in de volgende tabel weergegeven.

Tabel 38: Overzicht gegevens Vlaamse Seveso-inrichtingen

Bedrijf	Productie/ opslag	Periode	Aantal jaren	Stukgoedopslag		Stukgoedbehandeling	
				Aantal falingen	Populatie (stukgoedjaren)	Aantal falingen	Populatie (stukgoed- behandelingen)
1	Opslag	1993- 2005	13	1	1.040.000	25	2.860.000
2	Proces	2005- 2006	2	16	132.354	12	529.416
3	Opslag	2002- 2006	5	0	-*	26	108.000
4	Opslag	2004- 2006	3	0	-*	7	15.000
5	Proces	2003- 2006	4	15	29.665	23	88.995
6	Proces	1995- 2005	11	3	75.342	5	150.683
<i>Totaal</i>				<i>35</i>	<i>1.277.361</i>	<i>98</i>	<i>3.752.094</i>
Faalfrequentie				$2,74 \cdot 10^{-5}$ [/stukgoedjaar]		$2,64 \cdot 10^{-5}$ [/stukgoedbehandeling]	
99%-betrouwbaarheidsinterval				$1,72 \cdot 10^{-5} - 4,18 \cdot 10^{-5}$ [/stukgoedjaar]		$1,98 \cdot 10^{-5} - 3,38 \cdot 10^{-5}$ [/stukgoedbehandeling]	

\* geen gegevens m.b.t. stukgoedopslag beschikbaar

Uit de praktijkgegevens kon inzicht verkregen worden in de verdeling van de faaloorzaken en de vrijgestelde hoeveelheid product. In de volgende tabel wordt dit weergegeven voor stukgoedbehandeling en -opslag.

Tabel 39: Faaloorzaken stukgoedbehandeling en -opslag

Stukgoedbehandeling		Stukgoedopslag	
Faaloorzaak	Percentage	Faaloorzaak	Percentage
Doorprikken/aanrijden	31%	Lekkende kraan of dichting	42%
Vallen	29%	Vallen	13%
Lekkende kraan of dichting	9%	Mechanische belasting	13%
Nagel (op pallet of vrachtwagenvloer)	9%	Hitte	3%
Onbekend	23%	Onbekend	29%

Tevens kon uit de praktijkgegevens een verdeling gemaakt worden van de vrijgestelde hoeveelheid product. Dit wordt weergegeven in Tabel 40.

Tabel 40: Vrijzetting bij falen van stukgoed

Stukgoedbehandeling		Stukgoedopslag	
Vrijzetting	Percentage	Vrijzetting	Percentage
< 100 kg of liter	51%	< 100 kg of liter	65%
> 100 kg of liter	40%	> 100 kg of liter	19%
Onbekend	9%	Onbekend	16%

Indien de verdeling van de gekende vrijgezette hoeveelheden toegepast wordt op de falingen waar geen vrijgezette hoeveelheid van gekend is, kan onderstaande verdeling van de vrijgezette hoeveelheid bepaald worden voor stukgoedbehandeling en -opslag.

Tabel 41: Verdeling vrijgezette hoeveelheid bij stukgoed

Stukgoedbehandeling		Stukgoedopslag	
Vrijzetting	Percentage	Vrijzetting	Percentage
≤ 100 kg of liter	56%	≤ 100 kg of liter	77%
> 100 kg of liter	44%	> 100 kg of liter	23%

In (CPR15) wordt als faalfrequentie voor het gelijktijdig falen van twee vaten een tien maal lagere faalfrequentie gehanteerd dan voor het falen van één vat.

### Besluit – Generieke faalfrequenties HBFF2009

Voor stukgoedopslag en stukgoedbehandeling wordt op basis van Tabel 38 (afgerond) een faalfrequentie van respectievelijk  $2,5 \cdot 10^{-5}$  per stukgoedjaar en per stukgoedbehandeling verkregen. Voor stukgoedbehandeling geldt deze faalfrequentie enkel indien 1 stukgoed faalt. De faalfrequentie voor stukgoedbehandeling waarbij alle stukgoederen op een pallet falen, bedraagt 10 keer minder dan die voor 1 stukgoed dat faalt.

# Hoofdstuk 11: Gevolgbeperkende maatregelen

Voor de faalkansen en reactietijden van gevolgbeperkende maatregelen wordt gesteund op de informatie uit (RIVM) (zie hieronder).

## 11.1. INBLOKSYSTEMEN

### Definitie en kenmerken

Inbloksystemen dienen om de vrijgekomen hoeveelheid na een vrijzetting te beperken. Een inbloksysteem bestaat uit een detectiesysteem, bijvoorbeeld gasdetectie, in combinatie met afsluitkleppen. De afsluiters kunnen automatisch of handmatig worden gesloten. De effectiviteit van een inbloksysteem wordt bepaald door verschillende factoren, zoals de positie van gasdetectie-monitors en de verdeling daarvan over de verschillende windrichtingen. Verder zijn ook de detectielimiet en de reactietijd van het systeem evenals de interventietijd van de operator van belang.

Voor het meenemen van de werking van een inbloksysteem in de risicoanalyse moet voldaan worden aan de volgende voorwaarden:

- er moet een automatisch detectiesysteem aanwezig zijn, dat leidt tot een signalering in de controlekamer dan wel automatische aansturing van de inlokafsluiters. Een voorbeeld hiervan is een gasdetectiesysteem met monitors van voldoende gevoeligheid en voldoende detectiepunten. Bij signalering in de controlekamer dient deze continu bemand te zijn.
- het detectiesysteem en de afsluitkleppen moeten regelmatig getest worden.

Voor de situatie waarin geen sprake is van een automatisch detectiesysteem maar alleen van (visueel) toezicht door een operator wordt verwezen naar 11.4.

### Modellering

Het effect van een inbloksysteem moet worden bepaald met behulp van een specifieke gebeurtenissenboom, waarbij tevens het falen van het systeem wordt beschouwd. Als richtlijn kan gebruik worden gemaakt van de hier genoemde standaardwaarden voor drie representatieve systemen. Met nadruk wordt er op gewezen dat onderstaande waarden alleen zijn opgenomen om een indruk te geven van algemeen geaccepteerde waarden. Voor een kwantitatieve risicoanalyse dient uitgegaan te worden van de feitelijke situatie, zeker wanneer de faalkansen en reactietijden significant afwijken van de hier genoemde standaardwaarden.

#### 1 Automatisch inbloksysteem

Een automatisch inbloksysteem is een systeem waarbij de detectie van het lek en het sluiten van de inlokafsluiters automatisch plaatsvindt. Actie van een operator is niet

nodig. De kans op falen per aanspraak is gelijk aan 0,001, de tijd nodig voor het sluiten van de inlokafsluiters is gelijk aan 2 minuten.

### 2 Semi-automatisch inbloksysteem

Een semi-automatisch inbloksysteem is een systeem waarbij de detectie van het lek automatisch plaatsvindt en leidt tot een alarmsignaal in een continu bemande controlekamer. Na validatie van het signaal sluit de operator de inlokafsluiters met behulp van een schakelaar in de controlekamer. De kans op falen per aanspraak is gelijk aan 0,01, de tijd nodig voor het sluiten van de inlokafsluiters is gelijk aan 10 minuten.

### 3 Niet-automatisch inbloksysteem

Een niet-automatisch inbloksysteem is een systeem waarbij de detectie van het lek automatisch plaatsvindt en leidt tot een alarmsignaal in een continu bemande controlekamer. De operator heeft niet de mogelijkheid de inlokafsluiters dicht te doen met behulp van een schakelaar in de controlekamer, maar dient hiervoor buiten de controlekamer actie te ondernemen. Voor een dergelijk systeem geldt dat de benodigde tijd voor het goed uitvoeren van de benodigde acties dusdanig lang is, dat er geen effect is in de kwantitatieve risicoanalyse, gegeven de algemeen toegepaste maximum uitstroomduur van 30 minuten.

Wanneer er meerdere inbloksystemen aanwezig zijn, moet de kans op falen van het hele inbloksysteem bepaald worden. Dit is niet zonder meer gelijk aan het product van de afzonderlijke faalkansen van elk inbloksysteem, omdat vaak sprake is van ‘common mode failures’. In de praktijk blijkt het zeer moeilijk te zijn een faalkans van 0,001 of lager te bereiken voor (een combinatie van) inbloksystemen. Wanneer in een kwantitatieve risicoanalyse gerekend wordt met een faalkans per aanspraak van minder dan 0,001, moet deze expliciet onderbouwd worden met een foutenboomanalyse, rekening houdend met ‘common mode failures’.

## Voorbeeld

Een 10 meter (3”) leiding is verbonden met de vloeistoffase van een druktank ammoniak (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 42.

*Tabel 42: Scenario’s voor leidingbreuk aan een ammoniak druktank voor inbloksystemen*

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

## 11.2. DOORSTROOMBEGRENZER

### Definitie

Een doorstroombegrenzer is een klep die sluit wanneer het debiet een ingestelde waarde overschrijdt.

### Kenmerken

Een doorstroombegrenzer is een systeem waarbij de klep automatisch dichtgaat wanneer het debiet een ingestelde waarde overschrijdt, bijvoorbeeld doordat de druk op een klep de veerdruk overschrijdt. Een systeem waarbij een detector een signaal afgeeft waardoor een klep wordt dichtgestuurd is geen doorstroombegrenzer, maar een inbloksysteem.

### Modellering

Een doorstroombegrenzer wordt meegenomen in een kwantitatieve risicoanalyse. De werking is afhankelijk van de verhouding tussen het berekende uitstroomdebiet en de instelwaarde van de doorstroombegrenzer. Hierbij gelden de faalkansen zoals weergegeven in Tabel 43.

Tabel 43: Faalkansen doorstroombegrenzer

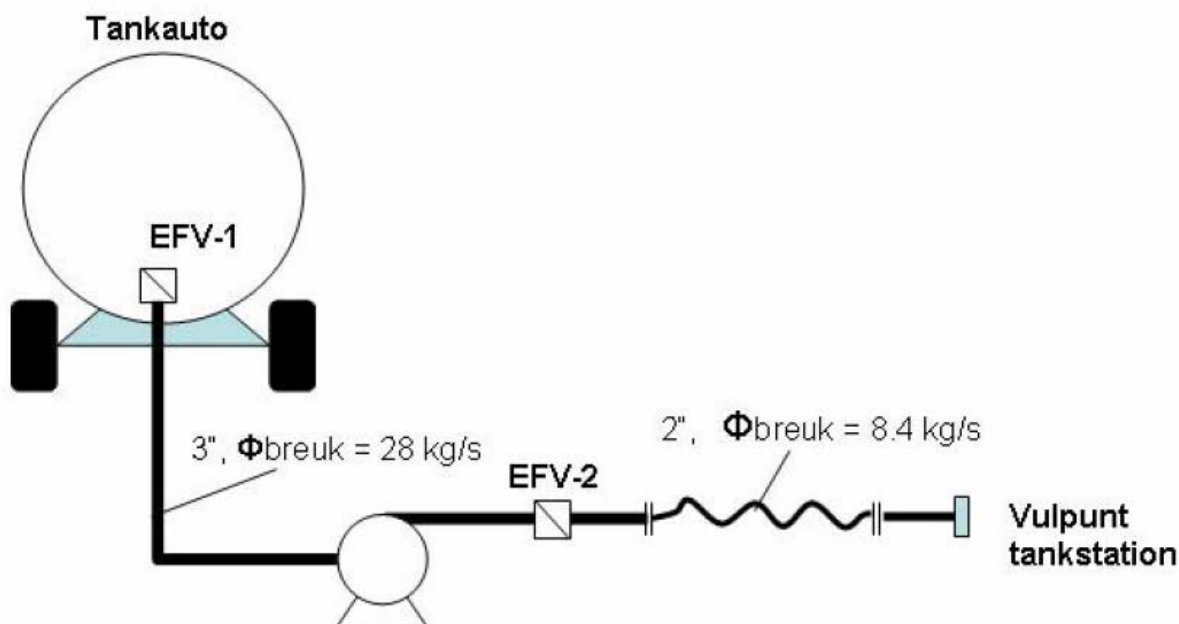
Verhouding uitstroomdebiet en instelwaarde	Kans op niet sluiten
uitstroomdebiet $\leq$ instelwaarde	1
instelwaarde < uitstroomdebiet $\leq 1,2 \times$ instelwaarde	0,12
Uitstroomdebiet > $1,2 \times$ instelwaarde	0,06

De reactietijd van de doorstroombegrenzer is gelijk aan vijf seconden.

### Voorbeeld

Bij de verlading van een tankauto met 20 ton LPG (zie Figuur 4) 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 (Ham JM en van Blanken AWT (2004)) zijn de faalkansen voor de verschillende vrijzettingen gegeven in Tabel 44, de resulterende scenario's zijn gegeven in Tabel 45.

Figuur 4: Verlading van een LPG tankauto



Tabel 44: Vrijzettingen 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 45: Senario's voor de verlading

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

## 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.

## 11.3. TERUGSLAGKLEP

### Definitie

Een terugslagklep is een klep die sluit wanneer de richting van het debiet tegengesteld is aan de ingestelde richting.

### Kenmerken

Een terugslagklep is een systeem waarbij de klep automatisch dichtgaat wanneer terugstroming optreedt. Een systeem waarbij een detector een signaal afgeeft waardoor een klep wordt dichtgestuurd is geen terugslagklep, maar een inbloksysteem.

### Modelling

Een terugslagklep is in het algemeen weinig betrouwbaar. Indien deze niet regelmatig getest wordt, wordt de terugslagklep niet meegenomen in een kwantitatieve risicoanalyse. Wanneer een terugslagklep regelmatig getest wordt, wordt deze wel meegenomen. De default reactietijd is gelijk aan vijf seconden en de default kans op falen is gelijk aan 0,06 per aanspraak.

### Voorbeeld

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 46.

Tabel 46: Bijdrage van de terugstroming uit de opslagtank aan het breukscenario

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

## 11.4. INGRIPEN DOOR OPERATORS

### Beschrijving

Bij verlading is vaak een operator<sup>3</sup> ter plaatse aanwezig die toezicht houdt op het proces en met behulp van een noodstopvoorziening een afsluiter kan bedienen. Het ingrijpen van een operator bij de verlading kan worden meegenomen in de kwantitatieve risicoanalyse, mits voldaan wordt aan de volgende voorwaarden:

1. De ter plaatse aanwezige operator heeft van het begin tot en met het einde van de verlading zicht op de verlading en de laad-/losslang of -arm. In het bijzonder zit de

<sup>3</sup> Een chauffeur kan bij verlading ook aanzien worden als een operator.

operator tijdens de verlading niet in de cabine van de tankwagen of binnen in een gebouw.

2. Het ter plaatse aanwezig zijn van de operator wordt geborgd door een voorziening zoals een dodemansknop of door een procedure in het veiligheidsbeheerssysteem en wordt tijdens inspecties gecontroleerd.
3. Het inschakelen van de noodstopvoorziening door de aanwezige operator in het geval van een lekkage tijdens de verlading is vastgelegd in een procedure.
4. De ter plaatse aanwezige operator is voldoende opgeleid en is tevens bekend met de geldende procedures.
5. De noodstopvoorziening is volgens geldende normen gepositioneerd, zodanig dat er in korte tijd ongeacht de uitstroomrichting een noodknop bediend kan worden.

Indien aan deze voorwaarden wordt voldaan kan de uitstroomduur in de kwantitatieve risicoanalyse beperkt worden tot twee minuten. Als aan één van deze voorwaarden niet voldaan wordt, bedraagt de aan te houden uitstroomduur 30 minuten. Het effectief aanspreken van een noodstopvoorziening heeft een faalkans van 0,1 per aanspraak.

## Voorbeeld

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 47.

Tabel 47: *Velading scenario's bij continue aanwezigheid van een operator*

LOC	Systeemreactie	Vervolgkans	Debiet (kg/s)	Tijdsduur (s)
Breuk laadslang	Ingrijpen operator	0,9	8,4	120
Breuk laadslang	Geen ingrijpen operator	0,1	8,4	1800
Lek laadslang	Ingrijpen operator	0,9	0,46	120
Lek laadslang	Geen ingrijpen operator	0,1	0,46	1800

## 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.

## 11.5. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009

Voor de gevolgbeperkende maatregelen wordt uitgegaan van de faalkansen uit (RIVM). In het Handboek Faalfrequenties 2009 zijn de inzichten uit (Sertius) overgenomen en wordt aangeraden om de faalkansen te baseren op specifieke gegevens, bv. op basis van (IEC1) en (IEC2).

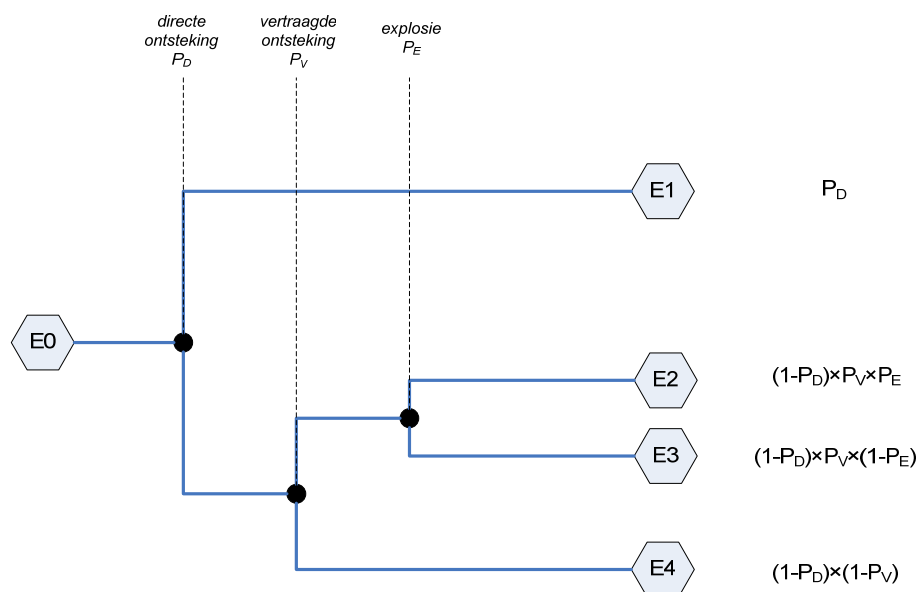


## Hoofdstuk 12: Vervolggebeurtenissen

### 12.1. GEBEURTENISSENBOM

Afhankelijk van de omstandigheden waaronder de vrijzetting van een gevaarlijke stof plaatsvindt en de aard van de vrijzetting, kan deze vrijzetting resulteren in verschillende gevaarlijke fenomenen. Dit is algemeen voorgesteld in de gebeurtenissenboom van Figuur 5, waarbij de verschillende fenomenen waarmee mogelijk dient rekening gehouden te worden, aangeduid zijn met “E0”, “E1”, etc. (Sertius).

Figuur 5: Generieke gebeurtenissenboom



De gevaarlijke fenomenen die te beschouwen zijn, zijn voor de verschillende stofklassen weergegeven in Tabel 48 voor breuk en in Tabel 49 voor lekken en 10 minuten uitstroom.

Tabel 48: Gevaarlijke fenomenen voor breuk

Effect	Niet-brandbare stoffen	Groep 0	Groep 1	Groep 2 en 3
E0	Fysische explosie	Fysische explosie	Fysische explosie	Fysische explosie
E1	-	Vuurbal (onder druk) Plasbrand (drukloos)	Plasbrand	Plasbrand
E2	-	Gaswolkexplosie Plasbrand	Gaswolkexplosie Plasbrand	-
E3	-	Wolkbrand Plasbrand	Wolkbrand Plasbrand	Wolkbrand Plasbrand
E4	Toxische gaswolk	Toxische gaswolk	Toxische gaswolk	Toxische gaswolk

Tabel 49: Gevaarlijke fenomenen voor lekken en volledige uitstroom in 10 min.

Effect	Niet-brandbare stoffen	Groep 0	Groep 1	Groep 2 en 3
E0	-	-	-	-
E1	-	Fakkelfbrand Plasbrand	Plasbrand	Plasbrand
E2	-	Gaswolkexplosie Fakkelfbrand Plasbrand	Gaswolkexplosie Plasbrand	-
E3	-	Wolkbrand Fakkelfbrand Plasbrand	Wolkbrand Plasbrand	Wolkbrand Plasbrand
E4	Toxische gaswolk	Toxische gaswolk	Toxische gaswolk	Toxische gaswolk

De praktische invulling van de gebeurtenissenboom gebeurt op basis van 4 parameters, nl. op basis van

1. De aard van de vrijzetting:
  - Breuk;
  - Lekken en volledige uitstroom in 10 min.
2. De aard van de stof:
  - Gassen en vloeistoffen die niet brandbaar zijn.
  - Brandbare gassen en vloeistoffen waarbij verder onderscheid gemaakt wordt tussen:
    - ❖ Gassen of vloeistofdampen met een lage reactiviteit<sup>4</sup>;
    - ❖ Gassen of vloeistofdampen met een gemiddelde of hoge reactiviteit.
3. De omstandigheden waarin de stof verkeert op het ogenblik van de vrijzetting:
  - Groep 0: Het product bevindt zich in gasvormige toestand, het product bevindt zich boven het atmosferisch kookpunt of het atmosferisch kookpunt van het product is lager dan of gelijk aan -25°C.  
Typische voorbeelden: LPG-opslag, LNG- en andere koudeopslag, kokende solventen in reactoren, opslag in gasometer, etc.
  - Groep 1: Het product bevindt zich op of boven het vlampunt, maar beneden het atmosferisch kookpunt.  
Typisch voorbeeld: opslag P1-producten.
  - Groep 2: Het product bevindt zich op een temperatuur die minder dan 35°C onder het vlampunt ligt.  
Typisch voorbeeld: opslag P2-producten.
  - Groep 3: Het product bevindt zich op een temperatuur die 35°C of meer onder het vlampunt ligt.  
Typisch voorbeeld: opslag P3- en P4-producten.

<sup>4</sup> Onder de reactiviteit van een stof wordt verstaan de gevoeligheid voor vlamversnelling. Deze wordt bepaald op basis van gegevens zoals de grootte van het explosiegebied, minimum ontstekingsenergie, zelfontbrandingstemperatuur, experimentele gegevens en ervaringen in praktijksituaties. Volgens (PB99) zijn volgende stoffen laag reactief:

- allylchloride
- ammoniak
- dichloorpropeen
- epichloorhydrine
- ethylchloride
- koolstofmonoxide
- methaan
- methylbromide
- methylchloride
- tetraethyllood

Deze parameter wordt enkel in rekening gebracht voor brandbare gassen en vloeistoffen.

4. De grootte van de vrijzetting:

- Instantane bronterm < 1.000 kg, continue bronterm < 10 kg/s.
- Instantane bronterm 1.000 - 10.000 kg, continue bronterm 10 - 100 kg/s.
- Instantane bronterm > 1000 kg, continue bronterm > 100 kg/s.

Deze parameter wordt enkel in rekening gebracht voor brandbare gassen en vloeistoffen.

## 12.2. ONTSTEKINGSKANSEN (SERTIUS)

### Directe ontsteking bij groep 0 en groep 1

De directe ontstekingskans ( $P_D$ ) van groepen 0 en 1 wordt overgenomen uit (HBKC 2004). Deze ontstekingskansen worden ook in (RIVM) vermeld. Het resultaat is te zien in Tabel 50.

Tabel 50: Directe ontsteking groep 0 en groep 1

Bronterm		Ontstekingssoort	Ontstekingskans				
Continu [kg/s]	Instantaan [kg]		Groep 0 - hoge reactiviteit	Groep 0 - lage reactiviteit	Groep 1	Groep 2	Groep 3
< 10	< 1000	$P_D$	0,2	0,02	0,065		
		$P_U$					
		$P_E$					
10 - 100	1000 - 10000	$P_D$	0,5	0,04	0,065		
		$P_U$					
		$P_E$					
> 100	> 10000	$P_D$	0,7	0,09	0,065		
		$P_U$					
		$P_E$					

### Uitgestelde ontsteking bij groep 0 en groep 1

De kans op uitgestelde ontsteking ( $P_U$ ) van hoog reactieve gassen kan uit (HBKC 2004) gehaald worden. Voor de kans op uitgestelde ontsteking ( $P_U$ ) van laag reactieve gassen en groep 1 wordt verondersteld dat deze gelijk is aan de kans op directe ontsteking (SGS, juli 2007). Het resultaat is terug te vinden in Tabel 51.

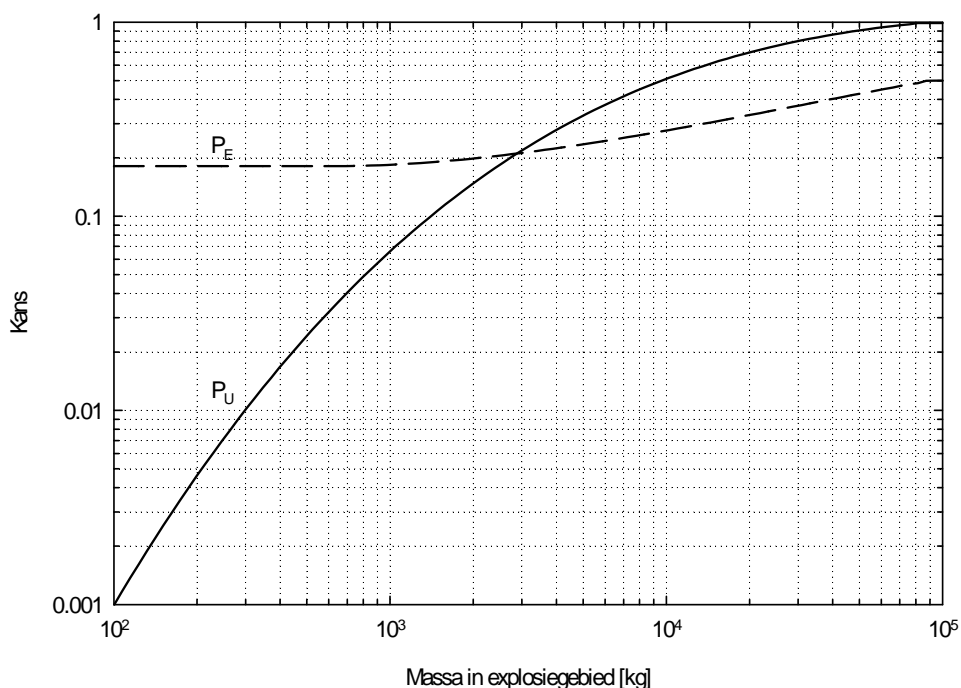
Tabel 51: Uitgestelde ontsteking groep 0 en groep 1 producten

Bronterm		Ontstekings- soort	Ontstekingskans				
Continu [kg/s]	Instantaan [kg]		Groep 0 - hoge reactiviteit	Groep 0 - lage reactiviteit	Groep 1	Groep 2	Groep 3
< 10	< 1000	P <sub>D</sub>	0,2	0,02	0,065		
		P <sub>U</sub>	0,05	0,02	0,065		
		P <sub>E</sub>					
10 - 100	1000 - 10000	P <sub>D</sub>	0,5	0,04	0,065		
		P <sub>U</sub>	0,1	0,04	0,065		
		P <sub>E</sub>					
> 100	> 10000	P <sub>D</sub>	0,7	0,09	0,065		
		P <sub>U</sub>	0,2	0,09	0,065		
		P <sub>E</sub>					

## Explosie bij groep 0 en groep 1

De kans op explosie wordt bepaald met behulp van het model van Prugh (Prugh, 1988). Dit model bepaalt de kans op explosie en uitgestelde ontsteking op basis van de massa aanwezig in het explosiegebied. Figuur 6 toont de grafiek die bovenstaande relaties weergeeft.

Figuur 6: Explosiekans en kans op uitgestelde ontsteking volgens het model van Prugh (Prugh, 1988)



Voor de gassen, zowel hoog als laag reactief, wordt (conservatief) aangenomen dat de massa in explosiegebied niet veel minder is dan de massa van de instantane bronterm. De explosiekans kan bijgevolg in de figuur afgelezen worden op basis van deze massa. Voor de vloeistoffen wordt op basis van de uitgestelde ontstekingskans de massa in explosiegebied bepaald. Deze geeft dan op zijn beurt de kans op explosie. Het resultaat van bovenstaande redenering is te vinden in Tabel 52.

Tabel 52: Explosie bij groep 0 en groep 1

Bronterm		Ontstekingssoort	Ontstekingskans				
Continu [kg/s]	Instantaan [kg]		Groep 0 - hoge reactiviteit	Groep 0 - lage reactiviteit	Groep 1	Groep 2	Groep 3
< 10	< 1000	P <sub>D</sub>	0,2	0,02	0,065		
		P <sub>U</sub>	0,05	0,02	0,065		
		P <sub>E</sub>	0,2	0,2	0,2		
10 - 100	1000 - 10000	P <sub>D</sub>	0,5	0,04	0,065		
		P <sub>U</sub>	0,1	0,04	0,065		
		P <sub>E</sub>	0,3	0,3	0,2		
> 100	> 10000	P <sub>D</sub>	0,7	0,09	0,065		
		P <sub>U</sub>	0,2	0,09	0,065		
		P <sub>E</sub>	0,4	0,4	0,2		

### Groep 2 en groep 3

De kans op directe ontsteking voor groepen 2 en 3 wordt gebaseerd op de verhoudingen die gebruikt worden voor tankbrand (zie paragraaf 4.4). Deze verhouding bedraagt voor groep 2 0,3 van de kans op ontsteking van groep 1 en voor groep 3 0,09 van de kans op ontsteking van groep 1. Er wordt aangenomen dat de kans op uitgestelde ontsteking voor groepen 2 en 3 verwaarloosbaar is. Tabel 53 geeft een overzicht van de zo bekomen ontstekingskansen. De kans op explosie (P<sub>E</sub>) voor groep 2 en 3 is zeer onwaarschijnlijk.

Tabel 53: Ontsteking en explosie van groep 2 en 3

Bronterm		Ontstekingssoort	Ontstekingskans				
Continu [kg/s]	Instantaan [kg]		Groep 0 - hoge reactiviteit	Groep 0 - lage reactiviteit	Groep 1	Groep 2	Groep 3
< 10	< 1000	P <sub>D</sub>	0,2	0,02	0,065	0,02	0,006
		P <sub>U</sub>	0,05	0,02	0,065	-	-
		P <sub>E</sub>	0,2	0,2	0,2	-	-
10 - 100	1000 - 10000	P <sub>D</sub>	0,5	0,04	0,065	0,02	0,006
		P <sub>U</sub>	0,1	0,04	0,065	-	-
		P <sub>E</sub>	0,3	0,3	0,2	-	-
> 100	> 10000	P <sub>D</sub>	0,7	0,09	0,065	0,02	0,006
		P <sub>U</sub>	0,2	0,09	0,065	-	-
		P <sub>E</sub>	0,4	0,4	0,2	-	-

## Eindcorrectie vertraagde ontsteking

De vertraagde ontsteking zoals bedoeld in het HBFF 2009 is niet gelijk aan de uitgestelde ontsteking van voorgaande tabellen en dient bijgevolg gecorrigeerd te worden. De uitgestelde ontsteking uit voorgaande tabellen is immers afkomstig van de redenering dat de kans op geen ontsteking gelijk is aan  $1 - P_D - P_U$ . Uit de hier gebruikte gebeurtenissenboom volgt echter dat deze kans gelijk is aan  $(1 - P_D) \cdot (1 - P_V)$ . Hieruit kan afgeleid worden dat  $P_V = P_U / (1 - P_D)$ . Het uiteindelijke resultaat is terug te vinden in Tabel 54.

Tabel 54: Eindcorrectie vertraagde ontsteking

Bronterm		Ontstekings-soort	Ontstekingskans				
Continu [kg/s]	Instantaan [kg]		Groep 0 - hoge reactiviteit	Groep 0 - lage reactiviteit	Groep 1	Groep 2	Groep 3
< 10	< 1000	$P_D$	0,2	0,02	0,065	0,02	0,006
		$P_V$	0,06	0,02	0,07	-	-
		$P_E$	0,2	0,2	0,2	-	-
10 - 100	1000 - 10000	$P_D$	0,5	0,04	0,065	0,02	0,006
		$P_V$	0,2	0,04	0,07	-	-
		$P_E$	0,3	0,3	0,2	-	-
> 100	> 10000	$P_D$	0,7	0,09	0,065	0,02	0,006
		$P_V$	0,7	0,1	0,07	-	-
		$P_E$	0,4	0,4	0,2	-	-

### 12.3. BESLUIT – GENERIEKE FAALFREQUENTIES HBFF2009

De vervolgebeurtenissen worden bepaald op basis van bovenstaande redenering.

## Hoofdstuk 13: Referenties

AEC75, US, Atomic Energy Commission, reactor safety study - an assessment of accident risks in the U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400, appendix III Failure data (and references therein), 1975

American Institute of Chemical Engineers (AIChE) 1989, Guidelines For Process Equipment Reliability Data, PERD

Arulanatham D.C., Reeves F.P. (1981), Some data on the reliability of pressure equipment in the chemical plant environment, Int. J. Press. Vessels & Piping, 9 (1981), pp327-338

ARF99, DNV (1999), ARF Document, Technical Note, Process Equipment Failure Frequencies

AMINAL, Cel Veiligheidsrapportering (1994), Handboek Kanscijfers voor het opstellen van een veiligheidsrapport

AMINAL, Cel veiligheidsrapportering (2004), Handboek Kanscijfers voor het opstellen van een veiligheidsrapport

Blything en Reeves (1988), An initial prediction of the BLEVE frequency of a 100 te butane storage vessel, SRD/HSE R488

Cavrois E. (1985), Histoire des bouteilles à gaz, IGC Documents 31/5/F

Concawe, Western europe cross-country oil Pipelines. 25 year performance statistics - Concawe Brussel, June1998

Concawe, rapport 7/08, Performance of European cross-country oil pipelines. Statistical summary of reported spillages in 2006 and since 1971, augustus 2008

COVO81, COVO commission, Risk analysis of six potentially hazardous industrial objects in the Rijnmond area, a pilot study, a report to the Rijnmond public authority, Schiedam: Central Environmental Control Agency Rijnmond, 1981

CPR15, VROM, Risico-analyse methodiek CPR15-bedrijven, Den Haag, oktober 1997

Crossthwaite, P.J., Fitzpatrick, R.D. & Hurst, N.W. (1988), "Risk Assessment for the Siting of Developments near Liquefied Petroleum Gas installations", IcemE Symposium Series No 10

Davidson (1988)

DNV, Decat, G., Wouters, G., Eindverslag van de onderzoeksopdracht "Actualisatie Handboek Kanscijfers" t.b.v. externe veiligheidsrapportering, april 2001

Dorey (1979), Reliability Data derived from EDF operating experience, Second National Reliability Conference, March 1979

EGIG, 7<sup>th</sup> EGIG-report (1970-2007), Doc. Number EGIG 08.TV-B.0502, december 2008

EPRI (1981), Component Failure and Repair Data for Coal-fired Power Units

Ham JM en van Blanken AWT (2004), Invloed systeemreacties LPG-tankinstallatie op risico LPG-tankstation (ligging PR-contour). TNO rapport R 2004/107

[HBKC1994], Handboek Kanscijfers ten behoeve van het opstellen van een veiligheidsrapport, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AMINAL, dienst Gevaarlijke Stoffen en Risicobeheer, 1994

[HBKC2004], Handboek Kanscijfers voor het opstellen van een veiligheidsrapport, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, LIN, AMINAL, Cel veiligheidsrapportering, 2004

HSE (1991), Advisory Committee on Dangerous Substances, Major hazard aspects of the transport of dangerous substances, HSE-books, 1991

HSE (1997), Offshore Hydrocarbon Release Statistics 1997, Offshore Technology Report OTO 97 950

Hymes I en Flynn JF (1992), The Probability of Fires in Warehouses and Storage Premises, SRD/HSE R578

IEC1, IEC 61508: Functional Safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems

IEC2, IEC 61511: Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector

Ja71, Jacobs, R.M., Minimizing hazards in design, Quality progress, 1971

Johnson DW en Welker JR (1981), Development of an improved LNG plant failure rate data base, Gas Research Institute

Lauriks L en Vadorpe S (1983), Pompen algemene aspecten - toepassingen - keuze, Water nr 8, januari 1983

Lees FP (1980), Loss Prevention in the Process Industries, Butterworths

LFP97 (1997), LASTFIRE PROJECT (Large Atmospheric Storage Tank Fire Project), Analysis of Incident Frequency Survey



LFPRW97 (1997), LASTFIRE PROJECT (Large Atmospheric Storage Tank Fire Project), Risk Workbook

Marchal (1985), Bouteilles à gaz - Analyse Statistique des accidents, IGC Document 31/85/F

NFPA30 (07/08/1987), Flammable and Combustible Liquids Code, ANSI/NFPA30, an American National Standard

OREDA92, Offshore reliability data, 2<sup>nd</sup> edition, DNV Technica, 1992

OREDA97, Offshore Reliability Data, 3<sup>rd</sup> edition, Sintef Industrial Management, Noorwegen, 1997

PB99, CRP18E; Purple Book, Guidelines for quantitative risk assessment, Sdu Uitgevers, Den Haag, Committee for the Prevention of Disaster, 1<sup>st</sup> edition, 1999

Perry RH (1985), Perry's Chemical Engineering's Handbook, McGraw-Hill Book Co

Prugh RW (1988), Evaluation of unconfined vapour cloud explosion hazards, Proc. Int'l Conf. Vapor Cloud Modelling, AIChE, NY

Reeves, A.B., Minah, F.C. & Chow, V.H.K. (1997), "Quantitative Risk Assessment Methodology for LPG Installations", EMSD Symposium on Risk and Safety Management in Gas Industry, Hong Kong, March 1997

Rholf FJ en Sokal RR (1995), Statistical Tables, Third edition, State University of New York, Stony Brook

RIVM/CEV (1 januari 2008), Handleiding Risicoberekeningen BEVI, versie 3.0

Sertius (2009), LV\090402, 27.04.2009

SGS (juli 2007), TWOL-project "Actualisatie van de faalfrequenties in risicoberekeningen in Sevesobedrijven", eindrapport

Smith DJ (1988), Reliability and Maintainability in Perspective, Mac Millan, 1987

Smith, T.A. and Warwick, R.G. (1981), "A Survey of Defects in Pressure Vessels in the UK for the Period 1962-78, and its Relevance to Nuclear Primary Circuits", UKAEA Safety and Reliability Directorate Report SRD R203

Svensson en Sjørgen (1988), Reliability of Plate Heat Exchangers in the Power Industry, ASME/IEEE Power Generation Conference, 1988

VvoW95 (1995), Systematiek voor indeling van stoffen ten behoeve van risico-berekeningen bij het vervoer van gevaarlijke stoffen. Project Veilig Vervoer over Water; Deelproject S3b. The Hague: Ministry of Transport, Public Works and Water Management.

We76, Welker, J.R., et al, Fire safety aboard LNG vessels, NTISAD/A - 030 619, 1976

Westinghouse, Savannah River Site Generic Data Base Development (U), WSRC-TR-93-262, rev. 1, mei 1998

Whittle (1993), LPG installation design and general risk assessment methodology employed by the gas standards office, Conference on risk & safety management in the gas industry, Hong Kong, Oktober 1993

# Bijlage

## STATISTISCHE ACHTERGROND

In de aanbevolen faalfrequenties wordt het betrouwbaarheidsinterval berekend uitgaande van de Poissonverdeling. Voor berekening van het betrouwbaarheidsinterval rond het gemiddelde van de Poissonverdeling wordt gebruik gemaakt van de methode volgens (F. J. Rohlf, R.R. Sokal, 1995) (deze verwijst naar E.L. Crown en R.S. Gardner in Biometrika 46:441-453, 1959). Deze waarden worden aanbevolen omdat ze een continu verloop vertonen. De betrouwbaarheidsintervallen berekend volgens Pearson (Pearson, 1954), vertonen voor waarden van n tussen 10 en 15 namelijk een aantal discontinuïteiten.

Voor waarden van  $\lambda$  (aantal incidenten) kleiner of gelijk aan 50 ( $\lambda \leq 50$ ) kan het 99% tweezijdig betrouwbaarheidsinterval voor een Poissonveranderlijke berekend worden door middel van de overeenkomende waarden uit onderstaande tabel.

Voor waarden van  $\lambda$  (aantal incidenten) groter dan 50 ( $\lambda > 50$ ) kan het 99% tweezijdig betrouwbaarheidsinterval berekend worden met volgende formules:

- voor de ondergrens: 
$$Mo = \lambda - 1/2 + 3/8 * (2,576)^2 - 2,576 * \sqrt{\lambda - 1/2 + 1/8 * (2,576)^2}$$
- voor de bovengrens: 
$$Mb = \lambda + 1/2 + 3/8 * (2,576)^2 + 2,576 * \sqrt{\lambda + 1/2 + 1/8 * (2,576)^2}$$

Tabel 55: 99% tweezijdige betrouwbaarheidsintervallen voor Poissonveranderlijke ( $1 - 2\alpha = 0,99$ ;  $\alpha = 0,005$ ) [Rohlf en Sokal, 1995]

Tweezijdig interval	Rohlf en Sokal, 1995		Tweezijdig interval	Rohlf en Sokal, 1995	
	Aantal incidenten ( $\lambda$ )	Ondergrens		Bovengrens	Aantal incidenten ( $\lambda$ )
0	0,000	5,288	26	15,277	42,354
1	0,011	7,336	27	15,814	43,381
2	0,149	9,312	28	16,801	44,854
3	0,437	11,263	29	17,313	45,880
4	0,824	12,762	30	18,363	47,352
5	1,280	14,307	31	18,808	48,376
6	1,786	15,813	32	19,874	49,848
7	2,331	17,312	33	20,299	50,872
8	2,907	18,807	34	21,360	52,343
9	3,508	20,298	35	22,043	53,366
10	4,131	21,359	36	22,845	54,837
11	4,772	22,844	37	23,765	55,859
12	5,289	24,326	38	24,327	56,879
13	5,829	25,376	39	25,377	58,351

14	6,668	26,855
15	7,337	28,334
16	7,756	29,376
17	8,727	30,852
18	9,313	32,328
19	10,010	33,365
20	10,859	34,840
21	11,264	35,874
22	12,347	37,347
23	12,793	38,379
24	13,794	39,852
25	14,308	40,881

40	25,829	59,371
41	26,856	60,842
42	27,718	61,862
43	28,335	62,880
44	29,377	64,352
45	29,901	65,370
46	30,853	66,841
47	31,840	67,859
48	32,329	68,876
49	33,366	70,348
50	34,183	71,364

# Colofon

## Samenstelling

Vlaamse overheid  
Departement Leefmilieu, Natuur en Energie  
Afdeling Milieu-, Natuur- en Energiebeleid  
Dienst Veiligheidsrapportering  
Graaf de Ferrarisgebouw  
Koning Albert II-laan 20  
1000 Brussel

## Verantwoordelijke uitgever

J.-P. Heirman, secretaris-generaal  
Departement Leefmilieu, Natuur en Energie

## Depotnummer

D/2009/3241/161

## Uitgave

Mei 2009

