

Mitigerende maatregelen in een QRA

Versie: eindrapportage

Datum: 31 juli 2010

Opdrachtgever: Centrum Externe Veiligheid (RIVM)

Auteur: J. Baksteen

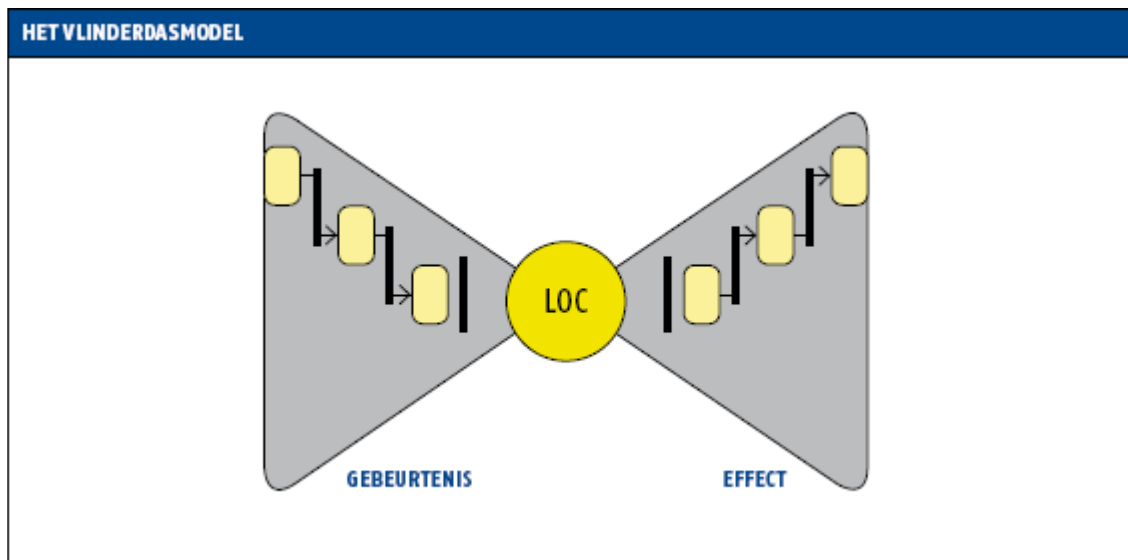
INHOUDSOPGAVE

1	Introductie.....	3
2	Methode van onderzoek.....	5
3	Afbakening installaties en EV-relevante scenario's	6
3.1	Introductie.....	6
3.2	Atmosferische opslagtanks	6
3.2.1	Afbakening.....	6
3.2.2	EV-relevante scenario's.....	6
3.3	LPG-opslagtanks.....	7
3.3.1	Afbakening.....	7
3.3.2	EV-relevante scenario's.....	8
4	Fase I Veel voorkomende mitigerende maatregelen.....	9
4.1	Introductie.....	9
4.2	Atmosferische opslagtanks	9
4.2.1	A-maatregelen: beperking uitstroming	9
4.2.2	B-maatregelen: beperking verspreiding vloeistof.....	10
4.2.3	C-maatregelen: beperking van de dampconcentratie in de lucht.....	10
4.2.4	Conclusie veel voorkomende mitigerende maatregelen atmosferische opslagtanks	11
4.3	LPG-opslagtanks.....	12
4.3.1	A-maatregelen: beperking uitstroming	12
4.3.2	B-maatregelen: beperking verspreiding vloeistof.....	12
4.3.3	C-maatregelen: beperking van de dampconcentratie in de lucht.....	12
4.3.4	Conclusie veel voorkomende mitigerende maatregelen LPG-opslagtanks	13
5	Fase II Selectie mitigerende maatregelen en onderbouwing reductiefactoren	14
5.1	Selectie mitigerende maatregelen	14
5.1.1	Atmosferische opslagtanks	14
5.1.2	LPG-opslagtanks.....	15
5.2	Onderbouwing reductiefactoren.....	15
5.2.1	Mitigerende B-maatregelen: opslagtank - en/of tankputontwerp	15
5.2.2	Mitigerende C-maatregel: isolerende laag	18
5.2.3	Mitigerende C-maatregel: verdunning door geforceerde luchtinmenging.....	19
5.2.4	Mitigerende C-maatregel: vloeistofscherm	20
5.3	Toepassing van reductiefactoren in QRA's	25
5.3.1	'Baffles' en/of 'deflectors'	25
5.3.2	Isolerende (schuim)lagen	25
5.3.3	Vloeistofschermen	25
6	Fase III Aanbeveling voor beoordeling mitigerende maatregelen in een QRA (incl. voorbeeld). 27	
7	Conclusies.....	29
	VERKLARINGEN VAN WOORDEN EN AFKORTINGEN	30
	LITERATUUR	31
	BIJLAGE 1 Overzicht veel voorkomende mitigerende maatregelen en stand der techniek	34

1 Introductie

Mitigerende of repressieve maatregelen¹ zijn een belangrijk middel om de veiligheid te verbeteren. Indien mogelijk dienen deze verbeteringen verdisconteerd te worden in QRA-berekeningen. In de Handleiding Risicoberekeningen Bevi [HRB 09] wordt aangegeven hoe bepaalde mitigerende maatregelen verdisconteerd kunnen worden in een QRA. In deze handleiding worden echter ook maatregelen genoemd die in principe genomen kunnen worden, maar waarvan niet bekend is hoe effectief deze zijn en op welke wijze zij de uitkomsten van een QRA zouden kunnen beïnvloeden. Het doel van dit onderzoek is om na te gaan of de effectiviteit van deze - en eventuele niet in de handleiding genoemde - mitigerende maatregelen te kwantificeren is en in hoeverre deze maatregelen in een QRA verdisconteerd kunnen worden.

Mitigerende maatregelen zijn maatregelen die de effecten van het vrijkomen van een gevaarlijke stof (de LOC= loss of containment) beperken. In het vlinderdasmodel van figuur 1 betreft dit maatregelen die een barrière vormen aan de rechterzijde van de centrale gebeurtenis, de LOC.



Figuur 1 Vlinderdasmodel met als Centrale Gebeurtenis de LOC

In het rapport Major Hazard Accident Modelling van Baksteen et al. [BAK 09] wordt een LOC-vlinderdasmodel beschreven met aan de rechterzijde opvolgend de volgende 6 barrièregroepen:

1. Barrières die de uitstroming beperken ('shut-off barriers')
2. Barrières die de verspreiding tegengaan ('dispersion control barriers')
3. Barrières die de brand en of explosie moeten voorkomen ('ignition control barriers')
4. Barrières die de brand of explosie ontwikkeling moeten tegengaan ('fire control barriers')
5. Barrières die contact met de gevaarlijke stof of de fysieke impact veroorzaakt door het vrijkomen van gevaarlijke stoffen moeten voorkomen ('barriers preventing contact/exposure')
6. Barrières die de ernst van het letsel na de blootstelling moeten beperken ('barriers limiting severity of injuries')

Uitsluitend die mitigerende maatregelen die invloed uitoefenen op de barrièregroepen 1 en 2 komen in dit onderzoek aan bod. Dit zijn maatregelen die binnen bedrijven genomen kunnen worden en die een directe relatie hebben met de QRA.

¹ De term maatregelen staat in dit rapport voor zowel maatregelen als voorzieningen. Maatregelen zijn menselijke handelingen die moeten worden uitgevoerd om bepaalde mitigerende middelen in te zetten. Voorzieningen zijn permanent aanwezig middelen die (semi-)automatisch kunnen worden geactiveerd. Dit rapport gebruikt de term mitigerend deze is synoniem voor de term repressief.

De mitigerende maatregelen die – na het vrijkomen van de gevaarlijke stof - brand en/of explosie(-ontwikkeling) moeten voorkomen en die de effecten hiervan op de mens moeten tegengaan maken geen deel uit van dit onderzoek (dit zijn de maatregelen die invloed uitoefenen op de barrièregroepen 3, 4, 5 en 6). Voorbeelden van de barrièregroepen 5 en 6 zijn o.a. schuilen, evacuatie en hulpverlening aan slachtoffers. Deze maatregelen worden grotendeels (door overheden en organisaties) buiten het bedrijf genomen en worden momenteel niet in QRA's meegenomen.

Dit onderzoek beperkt zich tot de genoemde mitigerende maatregelen die getroffen zijn of kunnen worden bij de *atmosferische opslag* van gevaarlijke stoffen en bij de opslag van *LPG*. De maatregelen die behoren bij 'barrières die de verspreiding tegengaan' zijn in dit onderzoek om praktische redenen gesplitst in 2 categorieën (B en C), zodat uiteindelijk de volgende 3 categorieën maatregelen worden onderscheiden:

- A. maatregelen die de uitstroming beperken
- B. maatregelen die de verspreiding van vloeistoffen beperken
- C. maatregelen die het ontstaan en/of de verspreiding van dampen beperken

2 Methode van onderzoek

Dit onderzoek is in 3 fasen verdeeld die overeenkomen met de onderzoeksvragen en -opdrachten van het onderzoek:

- I Beschrijf de veel voorkomende² mitigerende maatregelen bij atmosferische tanks en bij drukopslagtanks (voorbeeldstelsel: LPG-opslagtank) en welke stand der techniek zijn (zoals deze is weergegeven in PGS-18 [PGS18 91] en PGS-29 [PGS29 08]). Voer daarnaast ter verificatie van internationale technische ontwikkelingen op het gebied van mitigerende maatregelen een literatuuronderzoek uit.
- II Selecteer 2 of 3 kansrijke systemen van maatregelen (bijv. waterschermen, doorstroombegrenzers, inblosksystemen). Maak voor deze systemen onderbouwde voorstellen voor reductiefactoren, uitgesplitst naar kans en effect.
- III Stel een protocol op dat toegepast kan worden voor het beoordelen van mitigerende maatregelen of voor de aanpassing van de bestaande methode voor het waarderen van maatregelen.

Het literatuuronderzoek dat in het kader van dit onderzoek heeft plaatsgevonden, bestaat uit drie delen:

1. Literatuuronderzoek ten behoeve van Fase I van het onderzoek
2. Literatuuronderzoek ten behoeve van Fase II van het onderzoek (deel 1)
3. Literatuuronderzoek ten behoeve van Fase II van het onderzoek (deel 2)

Het eerste deel betreft een algemeen literatuuronderzoek, waarbij de volgende informatiebronnen zijn beschouwd:

1. overheidspublicaties
2. bij het RIVM (Centrum Externe Veiligheid) aanwezige literatuur (handboeken, proceedings van symposia) en internet
3. scopus: een multidisciplinaire database met verwijzingen naar voornamelijk tijdschriftartikelen, maar ook naar verslagen van symposia

De resultaten hiervan zijn opgenomen in het achtergronddocument 'Literatuuronderzoek mitigerende maatregelen in een QRA'. Tevens is het gebruikte zoekprofiel waarmee in scopus is gezocht in dit document opgenomen.

Het tweede en derde deel betreffen meer specifieke literatuuronderzoeken waarbij in scopus is gekeken naar opvangputten (bunds) en andere fysieke barrières, vloeistofschermen en isolatielagen. De gebruikte zoekprofielen en de resultaten zijn in het achtergronddocument 'Literatuuronderzoek mitigerende maatregelen in een QRA' opgenomen.

² Het totaal aan mitigerende maatregelen die in het rapport is vermeld, wordt benoemd als 'veel voorkomende mitigerende maatregelen'. Een deelverzameling hiervan zijn stand-der-techniek maatregelen in Nederland zoals die als best beschikbare technieken in PGS-29 en PGS-8 staan vermeld.

3 Afbakening installaties en EV-relevante scenario's

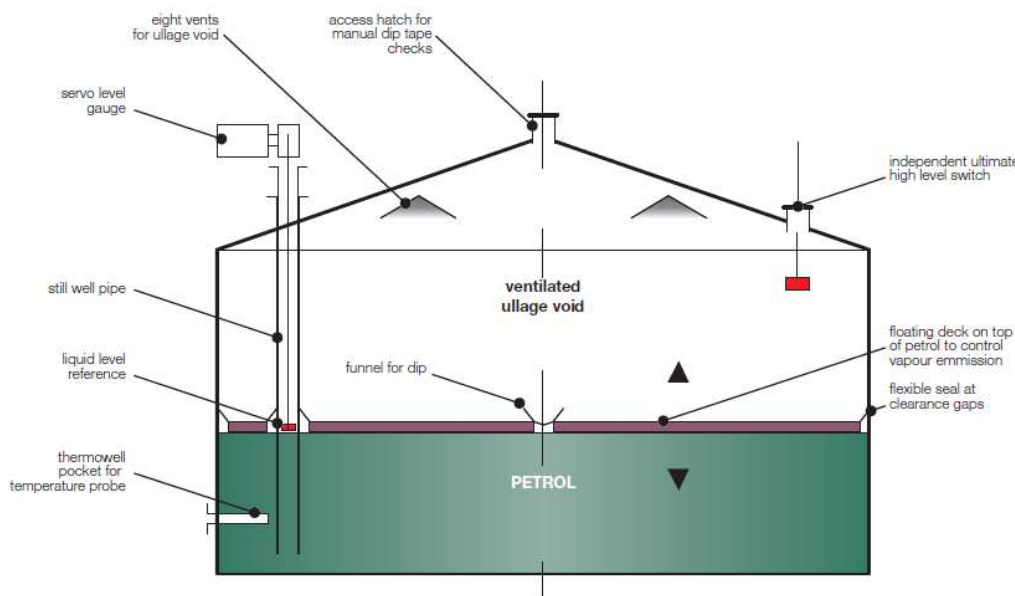
3.1 Introductie

De mitigerende maatregelen die worden onderzocht grijpen in op scenario's waarbij gevaarlijke stoffen vrijkomen of vrijgekomen zijn. Sommige scenario's leveren echter geen bijdrage aan het externe veiligheidsrisico. Maatregelen voor deze scenario's zijn buiten beschouwing gelaten.

3.2 Atmosferische opslagtanks

3.2.1 Afbakening

Bij atmosferische opslagtanks wordt gekeken naar de tank en naar de productleidingen die het product aanvoeren en afvoeren. In figuur 2 is een schematische weergave van een atmosferische opslagtank met drijvend dak opgenomen.



Figuur 2 Schematische voorstelling atmosferische opslagtank met drijvend dak, uit [HSE 06]

3.2.2 EV-relevante scenario's

In de Handleiding Risicoberekeningen Bevi [HRB 09] worden voor atmosferische opslagtanks de volgende drie scenario's voorgeschreven:

1. instantaan vrijkomen van de gehele tankinhoud;
2. vrijkomen van de gehele tankinhoud in 10 minuten in een continue en constante stroom; dit scenario is representatief voor alle scenario's waarbij in korte tijd grote hoeveelheden gevaarlijke stof vrijkomen;
3. continu vrijkomen uit een gat met een effectieve diameter van 10 mm; dit scenario is representatief voor alle scenario's met kleine lekkages.

In deze handleiding worden voor het leidingwerk aan de atmosferische opslagtank de volgende twee scenario's voorgeschreven:

1. breuk van de leiding
2. lek met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, maximaal 50 mm

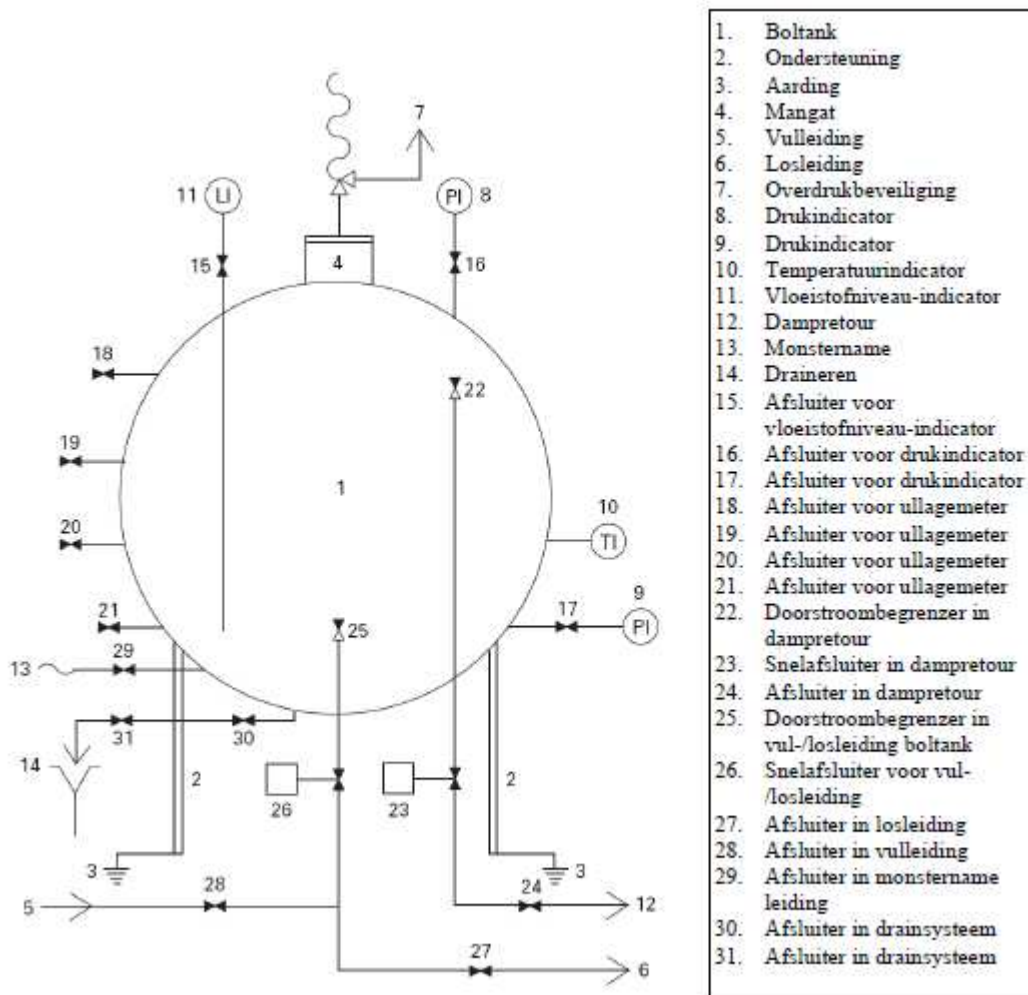
Alle genoemde scenario's kunnen EV-relevant zijn (zeker indien het gaat om het vrijkomen van toxische vloeistoffen). De effecten van lekkages zijn meestal verwaarloosbaar ten opzichte van de andere EV-relevante scenario's.

Bij de opslagtanks scenario's waarbij de stof continu vrijkomt is het van belang – in het kader van dit onderzoek – om onderscheid te maken in de hoogte van de uitstroomlocatie. Bij hoge uitstromingen is de mate van verspreiding en verdamping van stoffen vaak anders dan bij lage uitstromingen. Voor QRA-berekeningen zijn de uitstroomhoogtes voorgeschreven.

3.3 LPG-opslagtanks

3.3.1 Afbakening

Bij LPG-opslagtanks wordt gekeken naar de tank en naar de productleidingen die het product aanvoeren en afvoeren. In figuur 3 is een schematische weergave van een LPG-opslagtank opgenomen.



Figuur 3 Schematische voorstelling LPG-boltank [LPGI 83A en 83B]

3.3.2 EV-relevante scenario's

In de Handleiding Risicoberekeningen Bevi [HRB 09] worden voor druktanks de volgende drie scenario's voorgeschreven (HRB-scenario's):

1. instantaan vrijkomen van de gehele tankinhoud
2. vrijkomen van de gehele tankinhoud in 10 minuten in een continue en constante stroom
3. continu vrijkomen van de inhoud uit een gat met een effectieve diameter van 10 mm

In deze handleiding worden voor het leidingwerk aan de druktanks de volgende twee scenario's voorgeschreven:

1. breuk van leiding
2. lekkage met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, maximaal 50 mm

De lekkagescenario's zullen meestal niet bijdragen aan het externe veiligheidsrisico. De overige scenario's dragen bij aan het risico voor de externe veiligheid.

4 Fase I Veel voorkomende mitigerende maatregelen

4.1 Introductie

Om in Nederland veel voorkomende mitigerende maatregelen bij atmosferische opslagtanks en bij bovengrondse LPG-opslagtanks vast te stellen, is aan de hand van de PGS-richtlijnen 29 en 18 de stand der techniek vastgesteld en is een aanvullend literatuuronderzoek uitgevoerd. De wijze waarop dit onderzoek heeft plaatsgevonden en de resultaten zijn opgenomen in het achtergronddocument 'Literatuuronderzoek mitigerende maatregelen in een QRA'.

4.2 Atmosferische opslagtanks

Een overzicht van alle mitigerende maatregelen en welke in Nederland stand der techniek zijn, is opgenomen in tabel 1 van bijlage 1.

4.2.1 A-maatregelen: beperking uitstroming

Om de uitstroming uit een atmosferische opslagtank te beperken zijn, afhankelijk van het uitstroombesluit, drie typen maatregelen mogelijk:

A1: maatregelen die de uitstroming beperken bij overvullen van de tank

A2: maatregelen die de uitstroming beperken bij falen van de tank

A3: maatregelen die de uitstroming beperken bij falen van appendages of leidingwerk

4.2.1.1 A1: overvulbeveiligingen (opslagtankscenario: overvullen)

A1.1 Detectie vrijgekomen stof in tankput en dichtsturen toevoer

Deze maatregel komt voor bij opslag onder druk van zeer gevaarlijke stoffen. Het dichtsturen van de toevoer is onafhankelijk van een hoogniveau-alarmering en -beveiliging. Voor atmosferische opslagtanks is deze maatregel geen stand der techniek. In [HRB 09] is aangegeven hoe de maatregel verdisconteerd kan worden in QRA-berekeningen. Deze maatregel is primair bedoeld om lekkages uit leidingen te beperken en niet om overvullen te beperken.

4.2.1.2 A2: uitstroombeperkingen bij falen tank (opslagtankscenario: kleine lekkages)

A2.1 Dichten gat

Bij kleine lekkages van een opslagtank is het eventueel mogelijk om het gat te dichten. Naast een snelle detectie is hierbij een snelle dichting essentieel. Het dichten van kleine lekkages zal echter verder niet in het onderzoek worden meegenomen, omdat ervan wordt uitgegaan dat bij de meeste incidenten niet binnen 30 minuten³ het gat kan worden gedicht.

A2.2 Wegnemen bron

Met deze maatregel wordt voorkomen dat bij een kleine lekkage onder in de tankwand de volledige inhoud van een containment in de atmosfeer vrijkomt. Er zijn geen standaard voorzieningen die tot de stand der techniek behoren waarbij de inhoud van een lekkende opslagtank wordt overgebracht naar een andere tank. Uit incidentbeschrijvingen blijkt wel dat soms maatregelen worden getroffen om de inhoud te verpompen. Deze maatregel zal echter niet binnen 30 minuten kunnen worden gerealiseerd zodanig dat dit effect zou kunnen hebben op het QRA-scenario 'vrijkomen uit 10 mm gat'.

4.2.1.3 A3: uitstroombeperking door dichtzetten afsluiter of in werking treden doorstroombegrenzers (opslagtankscenario: falen leidingwerk) (PGS29, § 7.5)

Het falen van leidingwerk of appendages die zich in de toe- of afvoerleiding van product bevinden is een scenario dat van belang is in het kader van dit onderzoek.

³ Alleen de effecten van de uitstroming in de eerste 30 minuten worden in een QRA verdisconteerd

De hoeveelheid gevaarlijke stof die vrijkomt, kan eventueel worden beperkt door:

- een afsluiter of regelklep die zich in de leiding voor locatie van uitstroming bevindt handmatig dicht te zetten of (semi-)automatisch dicht te sturen.
- een doorstroombegrenzer die zich in de leiding voor locatie van uitstroming bevindt. Wanneer het debiet door de leiding een bepaalde ingestelde waarde overschrijdt, zal de afsluiter automatisch sluiten.

A3.1 Afsluiters en regelkleppen

PGS29 geeft aan dat *afsluiters en regelkleppen* in productleidingen die nodig zijn bij noodsituaties zowel ter plaatse (handmatig) alsook vanaf minimaal één andere plaats bediend moeten kunnen worden (semi-automatisch). Dit is daarom stand der techniek. PGS29 geeft geen voorschriften ten aanzien van het aantal afsluiters en regelkleppen dat aanwezig dient te zijn.

A3.2 Doorstroombegrenzers

PGS29 spreekt niet over *doorstroombegrenzers* in productleidingen. Op grond hiervan wordt ervan uitgegaan dat doorstroombegrenzers geen stand der techniek zijn in productleidingen van atmosferische opslagtanks.

4.2.2 B-maatregelen: beperking verspreiding vloeistof

Bij maatregelen ter beperking van de verspreiding van de uitgestroomde vloeistof gaan we ervan uit dat de vloeistof zowel de primaire containment alsook de eventueel aanwezige secundaire containment (bij tanks met beschermend omhulsel, dubbel omsloten tanks, volledig omsloten tanks en membraantanks) gepasseerd heeft.

4.2.2.1 Ontwerp tankput (PGS29, H5)

De vloeistof die vrijkomt, bevindt zich aan de buitenzijde van de containment in de atmosfeer. De verspreiding van de vloeistof over de bodem kan worden beperkt indien de vloeistof wordt tegengehouden door een wal, wand of muur. Bij bepaalde scenario's beperkt de vloeistofverspreiding zich tot de oppervlakte van de betreffende tankput. Bij het catastrofaal falen van een atmosferische opslagtank moet er echter rekening worden gehouden dat de vloeistof als een golf vrijkomt en over de tankputwand heen spoelt. Dit effect staat in de literatuur bekend als 'overtopping'. Door Nair et al. [NAI 08] wordt, met behulp van Computational Fluid Dynamics (CFD), beschreven wat de belangrijkste aspecten zijn die overtopping beïnvloeden: de hoogte van de tankputwand, de afstand tussen de buitenzijde van de tank en de tankputwand en de sterkte en de integriteit van de tankputwand. In PGS29 wordt aangegeven wat de minimale opvangcapaciteit (maatregel B1.1) van een tankput moet zijn. Tevens wordt aangegeven dat de hoogte van de tankputwand wordt bepaald uit de benodigde opvangcapaciteit en dat deze moet worden verhoogd met 0,25 meter. Ten slotte wordt vermeld aan welke sterkte-eisen (integriteit) de tankputwand moet voldoen en dat deze vloeistofkerend moet zijn. In PGS29 wordt dus niet gesproken over een minimaal vereiste hoogte van de tankputwand en ook niet over een minimaal vereiste afstand tussen tankwand en tankputwand. Ten aanzien van deze 2 punten kan dus niet gesproken worden over een bepaalde stand der techniek.

Atherton et al. [ATH 08] beschrijven dat een naar binnen gerichte deflector (maatregel B1.2; een deflector is een kering op de tankputwand die voorkomt dat een golf over de tankputwand heen spoelt) gecombineerd met interne laag niveau baffles (maatregel B1.3; baffles zijn constructies in de tank die bij catastrofaal falen van de tank ervoor zorgen dat de vloeistof langzamer vrijkomt) de kans beperken dat gevaarlijke stoffen over de tankputwand heen spoelen. Dergelijke maatregelen behoren op dit moment zeker niet tot de stand der techniek.

Bij een tankwandlekkage onder het vloeistofniveau kan onder bepaalde omstandigheden de vloeistofstraal over de tankputwand heenkomen. Dit effect staat in de literatuur bekend als spigot. Twee van drie door Nair genoemde aspecten die een rol spelen bij overtopping spelen ook een rol bij spigot: de hoogte van de tankputwand en de afstand van de tankwand tot de tankputwand (maatregel B1.4).

4.2.3 C-maatregelen: beperking van de dampconcentratie in de lucht

Om, na het optreden van een LOC, de concentratie van dampen in de lucht te beperken zijn drie typen maatregelen mogelijk:

- C1. Maatregelen die de verdamping beperken
- C2. Maatregelen die de damp verdunnen
- C3. Maatregelen die de verspreiding beperken

4.2.3.1 C1: beperking van de dampvorming

Er zijn twee manieren om dampvorming te beperken:

- C1.1 eisen aan het tankontwerp
- C1.2 het verkleinen van het verdampend oppervlakte door het aanbrengen van objecten of (vloeistof)stoffen op het verdampende vloeistofoppervlakte die de verdamping tegengaan.

C1.1 Eisen aan het tankontwerp (bijvoorbeeld deflectorplaten)

Naar aanleiding van het ongeval in Buncefield doet de HSE onderzoek naar mitigerende maatregelen om dampvorming tegen te gaan bij het overstromen van een opslagtank [HSE 09]. De resultaten van dit onderzoek zijn echter nog niet bekend.

C1.2 Aanbrengen isolerende laag op verdampend oppervlakte

In PGS29 wordt niet gesproken over isolerende lagen als mitigerende maatregel om verdamping tegen te gaan. Deze maatregel is zeker niet stand der techniek. Om snel over te gaan tot het nemen van deze C-maatregel is een snelle detectie van de vrijgekomen gevaarlijke stof belangrijk. In PGS29 worden geen eisen gesteld aan detectiemaatregelen.

4.2.3.2 C2: verdunning van de damp

Door dichtbij de uitstroomopening de damp sterk te verdunnen kan de concentratie van de stof in de lucht worden beperkt waardoor de kans dat mensen in de omgeving worden blootgesteld aan schadelijke concentraties wordt verkleind. Bij het vrijkomen van ontvlambare stoffen kan tevens hierdoor de concentratie van de stof mogelijk onder de LEL worden gehouden, waardoor de kans op ontsteking wordt gereduceerd. Verdunningsmaatregelen worden in PGS29 niet vermeld en behoren zeker niet tot de stand der techniek.

4.2.3.3 C3: beperking van dampverspreiding

Om verspreiding van dampen tegen te gaan dienen dampen zo dicht mogelijk bij de bron te worden tegengehouden of verwijderd. De bekendste manier om dit te doen is het benedenwinds aanleggen van een vloeistofscherm waarin de dampvormige componenten oplossen of waarmee de componenten worden verdund. De vloeistof die hiervoor het meest wordt gebruikt is water. Vloeistofschermen worden in PGS29 niet vermeld en behoren niet tot de stand der techniek.

4.2.4 Conclusie veel voorkomende mitigerende maatregelen atmosferische opslagtanks

A-maatregelen

Voor atmosferische opslagtanks is in Nederland alleen A3.1 (afsluiters en regelkleppen die in noodsituaties handmatig of semi-automatisch worden dichtgestuurd) stand der techniek. Voor A.1.1 (detectie vrijgekomen stof en dichtsturen toevoer), A3.1 en A3.2 (doorstroombegrenzers) is in de Handleiding Risicoberekeningen aangegeven hoe deze verdisconteerd moeten worden.

B-maatregelen

Uitsluitend de aanwezigheid en de vereiste capaciteit van de tankput kunnen als stand der techniek worden beschouwd.

C-maatregelen

In PGS29 worden geen maatregelen vermeld die de dampconcentratie beperken. Er zijn geen mitigerende C-maatregelen die als stand der techniek kunnen worden beschouwd.

4.3 LPG-opslag tanks

Een overzicht van alle mitigerende maatregelen en welke stand der techniek zijn, is opgenomen in bijlage 1, tabel 1.

4.3.1 A-maatregelen: beperking uitstroming

In Nederland zijn bovengrondse LPG-drukopslag tanks voorzien van een aantal uitstroombewegingen [PGS18, H9-11; UIJT 08] die alle als stand der techniek kunnen worden beschouwd.

A1.1 Detectie vrijgekomen stof in tankput en dichtsturen toevoer

Gasdetectie in besloten ruimten en ruimten gelegen onder het maaiveld alsmede tussen pompen en/of compressoren en activering van het noodknoppensysteem dat op meerdere plaatsen nabij LPG-opslag tanks aanwezig is zorgen voor automatische afsluiting van de op afstand bedienbare afsluiters.

A3.1 Afsluiters en regelkleppen

Op de aansluitflenzen van het reservoir moeten handbediende afsluiters zijn geplaatst die op zo'n kort mogelijke afstand worden gevolgd door op afstandbedienbare afsluiters. Bij wegvallen van de bekrachtiging van de afsluiters moeten de afsluiters binnen 15 seconden fail safe sluiten. Bij smelten van de stuurleiding van het bekrachtigingssysteem moeten de afsluiters automatisch sluiten.

A3.2 Doorstroombegrenzers

Doorstroombegrenzers of terugslagkleppen op elke aansluiting van het reservoir met een doorlaat van groter dan 2 mm² (dus ook in de vulleiding, losleiding en in de dampretourleiding).

4.3.2 B-maatregelen: beperking verspreiding vloeistof

Opvangput (PGS18, §8.2.10)

De opvangput is bedoeld om vloeistof weg te voeren. De grootte van de opvangput moet ten minste gelijk zijn aan de horizontale projectie van het reservoir. De opvangput moet zodanig zijn, dat zich onder het reservoir geen vloeibaar LPG kan verzamelen. Dit kan o.a. worden bereikt met een constructie die een goede natuurlijke ventilatie mogelijk maakt met een op afschot liggende opvangputvloer. Maatregelen moeten zijn getroffen waardoor het vloeibare LPG op een veilige wijze naar een veilige plaats kan worden afgevoerd. Een veilige plaats is een plaats waar verbranding van LPG geen grotere warmtebelasting op het reservoir kan veroorzaken dan 10 kW/m².

4.3.3 C-maatregelen: beperking van de dampconcentratie in de lucht

Om de concentratie van dampen bij het vrijkomen van LPG te beperken, zijn – net als bij atmosferische opslag tanks - drie typen maatregelen mogelijk:

- C1. Maatregelen die de verdamping beperken
- C2. Maatregelen die de damp verdunnen
- C3. Maatregelen die de verspreiding beperken

In PGS18 worden geen C-maatregelen genoemd. Op bepaalde plaatsen is gasdetectie een vereiste (zie ook §4.3.1). Indien gas wordt gedetecteerd worden de op afstandbedienbare afsluiters automatisch dichtgestuurd (dit is een A-maatregel). In PGS18 wordt geen melding gemaakt van C-maatregelen die na gasdetectie kunnen worden geactiveerd. Het aanbrengen van isolerende lagen op koud kokende plassen kan zelfs een averechts effect hebben omdat er warmte van het isolatiemedium (meestal schuim) overgaat naar de plas, waardoor de verdamping juist zal toenemen.

4.3.4 Conclusie veel voorkomende mitigerende maatregelen LPG-opslag tanks

A-maatregelen

De meeste A-maatregelen voor LPG-opslag tanks in Nederland zijn stand der techniek. Voor deze A-maatregelen is in de Handleiding Risicoberekeningen aangegeven hoe deze verdisconteerd moeten worden in een QRA.

B-maatregelen

Uitsluitend de aanwezigheid en de vereiste capaciteit van de tankput kunnen als stand der techniek worden beschouwd.

C-maatregelen

In PGS18 worden geen maatregelen vermeld die de dampconcentratie beperken. Er zijn geen mitigerende C-maatregelen die als stand der techniek kunnen worden beschouwd.

5 Fase II Selectie mitigerende maatregelen en onderbouwing reductiefactoren

5.1 Selectie mitigerende maatregelen

5.1.1 Atmosferische opslagtanks

In de tabel in bijlage 1 zijn de mitigerende maatregelen A t/m C voor atmosferische opslagtanks gepresenteerd. De selectie zal plaatsvinden uit deze maatregelen.

5.1.1.1 A-maatregelen

De A-maatregelen ‘dichten gat’ (maatregel A2.1) en ‘wegnemen bron’ (maatregel A2.2) zijn niet van toepassing omdat door de aard van deze maatregelen er geen effect zal zijn op de uitkomsten van een QRA. De andere A-maatregelen, ‘detectie vrijgekomen stof en dichtsturen toevoer’ (maatregel A1.1), ‘afsluiters en regelkleppen’ (maatregel A3.1) en ‘doorstroombegrenzers’ (maatregel A3.2) kunnen al in QRA-berekeningen worden verdisconteerd aan de hand van de aanwijzingen in het Handleiding Risicoberekeningen Bevi. Een voorbeeld hiervan zijn automatische inbloksystemen. Voor dit soort systemen worden defaultwaarden gehanteerd voor de kans op falen per aanspraak. De herkomst van deze defaultwaarden is echter onduidelijk. Dit is een mogelijk onderwerp voor een ander vervolgonderzoek. Op basis van het bovenstaande worden voor dit onderzoek geen A-maatregelen geselecteerd.

5.1.1.2 B-maatregelen

Opvang van vloeistof in tankputten behoort wel tot de stand der techniek, maar de voorwaarden waaronder deze maatregel wordt meegenomen in de QRA kunnen worden aangescherpt. Het is wellicht mogelijk om de maatregel van een ‘deflector op de tankputwand’ (maatregel B1.2) en de maatregel van ‘baffles in de tank’ (maatregel B1.3) als een combinatie van maatregelen te verdisconteren in QRA's. Dit zal in §5.2.1 aan de orde komen. De hoogte van de tankputwand en de afstand hiervan tot de tankwand (maatregel B1.4) heeft, net zoals de maatregelen B1.2 en B1.3, invloed op het al of niet optreden van overtopping. Op basis van hiervan zijn alle drie de maatregelen geselecteerd.

5.1.1.3 C-maatregelen

De C-maatregelen zijn mitigerende maatregelen die dampverspreiding tegengaan en die effect kunnen hebben op de uitkomsten van de QRA, maar die nog niet in de Handleiding Risicoberekeningen Bevi zijn uitgewerkt.

Tankontwerpmaatregelen (maatregel C1.1) hebben betrekking op het ontwerp van ontluchtingsopeningen of andere openingen waardoor uitstroming mogelijk is en de weg die de uitstromende vloeistof aflegt tussen de uitstroomopening en de vloeistofplas. Deze maatregelen zijn toegespitst op het type uitstroming, de locatie van de uitstroomopening en het tankontwerp en lenen zich daarom minder als generieke mitigerende maatregelen die in de QRA verdisconteerd kunnen worden om de dampbron te reduceren.

De overige C-maatregelen zijn wel voor de meeste uitstroomscenario's van toepassing. Deze C-maatregelen zijn nader onderzocht als mitigerende maatregelen bij het vrijkomen van gevaarlijke stoffen uit atmosferische opslagtanks. In §5.2.2, §5.2.3 en §5.2.4 komen deze maatregelen aan de orde. Ze worden daar aangeduid als:

- het aanbrengen van een isolerende laag op een verdampende vloeistofplas (C1.2)
- verdunning van de zich verspreidende damp (C2)
- het aanbrengen van een vloeistofscherm benedenwinds een dampwolk (C3)

5.1.2 LPG-opslag tanks

In de tabel in bijlage 1 zijn de mitigerende maatregelen A t/m C voor LPG-opslag tanks gepresenteerd. De selectie zal plaatsvinden uit deze maatregelen.

5.1.2.1 A-maatregelen

De A-maatregelen behoren in Nederland tot de stand der techniek bij de opslag en verlading van LPG. Deze worden al in QRA's verdisconteerd.

5.1.2.2 B-maatregelen

Omdat LPG een stof is die onder druk tot vloeistof verdicht is opgeslagen, is de functie van de tankput voornamelijk het afvoeren van de vloeibare LPG naar een veilige plek. Het beperken van de vloeistofoppervlakte zal weliswaar bijdragen aan een kleinere verdamping, maar door de fasetoestand van LPG zal tijdens het vrijkomen de verdamping – ook met opvang in een tankput – toch aanzienlijk zijn. Het laten afvloeien naar een veilige plek is in Nederland een maatregel die tot de stand der techniek behoort.

5.1.2.3 C-maatregelen

De C-maatregelen komen niet aan de orde in PGS18. Er kunnen verschillende goede redenen bedacht worden om toch C-maatregelen te treffen:

- de beperking van de dampconcentratie tot beneden het LEL-niveau, waardoor verbranding of explosies worden tegengegaan
- de beperking van de verspreiding van een ontvlambare/explosieve gaswolk ter voorkoming van vertraagde ontsteking

Analoog aan atmosferische opslag tanks wordt daarom in §5.2.3 en §5.2.4 gekeken naar de mogelijkheden van verdunning en het toepassen van vloeistofschermen.

5.2 Onderbouwing reductiefactoren

Om de geselecteerde mitigerende maatregelen te onderzoeken zijn specifieke literatuuronderzoeken verricht. De wijze waarop deze onderzoeken heeft plaatsgevonden en de resultaten zijn opgenomen in het achtergronddocument 'Literatuuronderzoek mitigerende maatregelen in een QRA'.

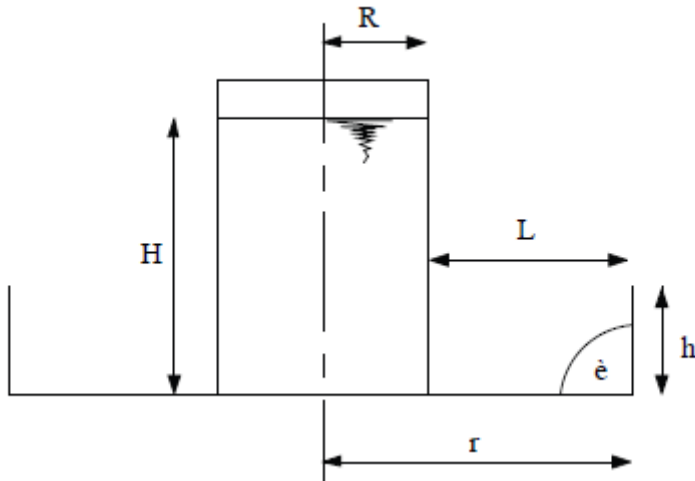
In deze paragraaf wordt een onderbouwing van reductiefactoren gegeven. In §5.3 worden aanbevelingen gedaan voor toepassing van reductiefactoren in QRA's.

5.2.1 Mitigerende B-maatregelen: opslag tank - en/of tankputontwerp

Overtoppingverliezen bij instantaan falen cilindrische opslag tanks

In de Handleiding Risicoberekeningen Bevi wordt voorgeschreven dat bij instantaan falen van atmosferische opslag tanks er een vloeistofplas ontstaat ter grootte van 1,5x de oppervlakte van de tankput. De oorzaak hiervan is het zogenaamde 'overtopping' effect waarbij een deel van de vrijgekomen vloeistof over de tankputwand heen spoelt. In de literatuur [ATH 08, ASH 09] is zelfs sprake van overtoppingverliezen bij instantaan falen tot 70% van de tankinhoud (bij een tankputcapaciteit van 110% en een verticale tankwand). Indien de tankwand een dijk is met een helling dan kan dit overtoppingverlies zelfs nog oplopen tot 80%.

In figuur 4 is schematisch een cilindrische tank weergegeven.



Figuur 4 Schematische weergave cilindrische tankgeometrie (cilindrische tank en bund)

De experimenten van Greenspan en Johansson [GRE 81] hebben tot de conclusie geleid dat een simpele formule om de fractie van het overtoppingverlies (Q) te schatten waarschijnlijk gebaseerd is op een dimensieloze combinatie van parameters (zie formule 1):

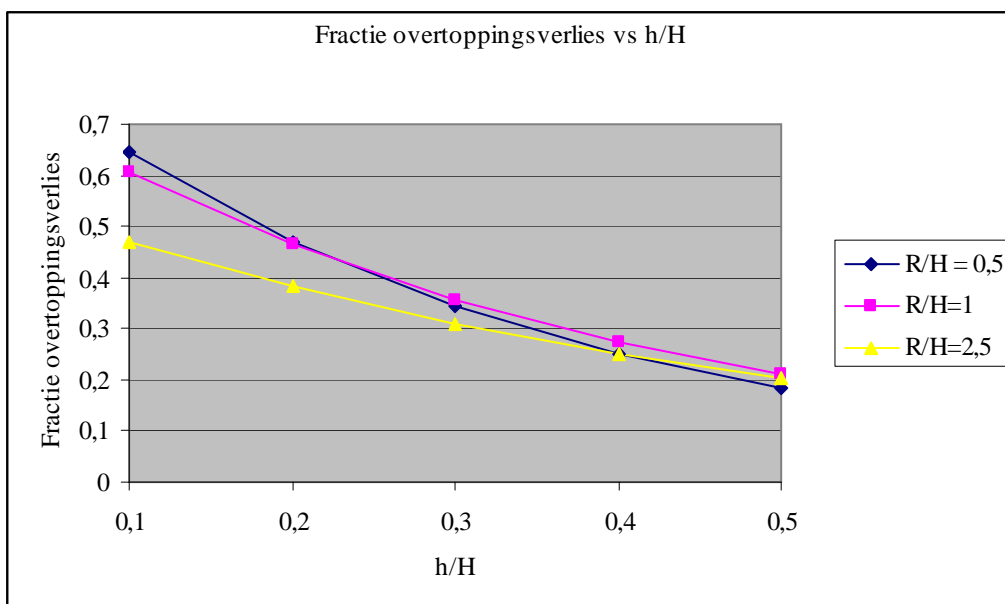
$$Q = f(h/H, r/H, R/H, \hat{\epsilon}) \quad (1)$$

Met als belangrijkste parameters de verhouding van de hoogte van de tankputwand en de hoogte van het vloeistofniveau in de tank (h/H). Atherton [ATH 05] hanteert de volgende formule:

$$Q = A \exp [-B (h/H)] \quad (2)$$

Deze formule is geldig indien $0.66 < L/R < 5.32$.

Met kleine schaal experimenten (schaal 1:30) zijn door Atherton [ATH 08] A en B vastgesteld voor verschillende R/H -verhoudingen bij een verticale tankputwand ($\hat{\epsilon} = 90^\circ$). Uitgangspunt is dat de tankput een capaciteit heeft van 110% van de tankinhoud. De resultaten hiervan zijn opgenomen in figuur 5.



Figuur 5 Fractie overtoppingverlies als functie van h/H bij $R/H=0,5$; 1 en 2,5

Deze overtoppingverliezen zouden bij het instantaan falen van cilindrische atmosferische opslagtanks als uitgangspunt genomen kunnen worden. Indien er geen mitigerende maatregelen worden getroffen zullen deze fracties van de tankinhoud over de tankputwand heen spoelen en vervolgens vrij kunnen uitstromen. Bovengenoemde overtoppingverliezen gaan uit van een cilindrische opslagtank en een cirkelvormige opvangput. De opvangput zal echter in de meeste situaties rechthoekig zijn. Ash [ASH 09] heeft mogelijke verschillen op dit punt onderzocht en komt tot de conclusie dat er weinig verschil is in overtoppingverliezen bij cirkelvormige tankputten ten opzichte van de overtoppingverliezen bij rechthoekige tankputten.

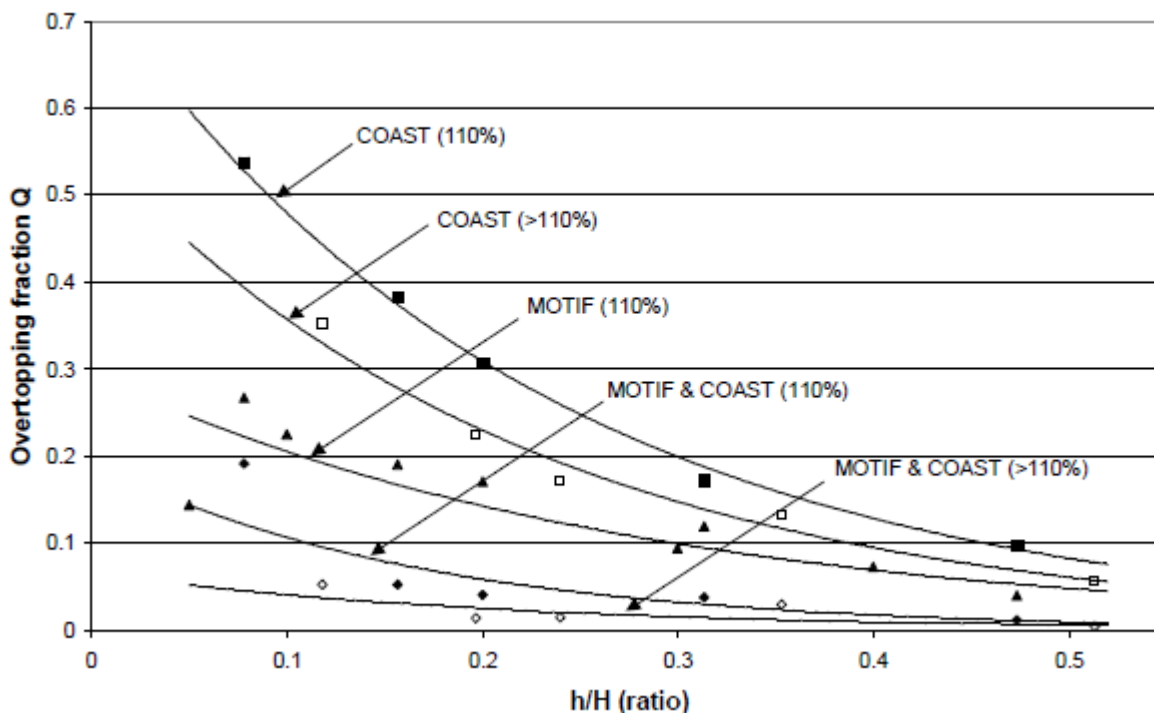
Reductiefactoren overtoppingverliezen

Door [ATH 08 en LEA 08] wordt beschreven dat het vergroten van de tankputcapaciteit van 110% naar 200% het probleem van overtopping niet automatisch wegneemt, maar dat er twee maatregelen getroffen kunnen worden die het verlies door overtopping kunnen terugdringen:

1. het aanbrengen van 'baffles' in atmosferische opslagtanks die bij catastrofaal falen de snelheid van vrijkomen verminderen ('baffles' zijn constructies in de tank zoals een lage interne tankwand of cilindrische buizen met perforaties)
2. het aanbrengen van een 'deflector' op de tankputwand die bij catastrofaal falen voorkomt dat de golf over de tankputwand heenspoelt (een 'deflector' is een naar binnen gericht schot op de bovenzijde van de tankputwand)

Door Ash [ASH 09] is onderzoek gedaan naar de verschillende uitvoeringsvormen van 'baffles' en 'deflectors'. De uitvoeringsvormen die – tot op heden - de grootste overtoppingverliesreductie opleveren staan bekend als MOTIF (= Mitigation of Tank Instantaneous Failure) en COAST (=Catastrophic Overtopping Alleviation of Storage Tanks). MOTIF is een laag niveau interne 'baffle' waarvan de dimensies worden bepaald door het type opslagtank. Het doel is het verlagen van de snelheid van de uitstromende vloeistof bij catastrofaal falen. COAST is een speciaal ontworpen 'deflector' die op de top van de tankputwand wordt geplaatst en in staat is elke golfinslag te weerstaan. De criteria waaraan MOTIF en COAST moeten voldoen, zijn niet gepubliceerd omdat deze maatregelen momenteel worden gepatenteerd.

Volgens Atherton [ATH 08] kunnen – op dit moment – met MOTIF en COAST de overtoppingsverliezen worden teruggebracht met factoren tussen de 0.76 en 0.79 (MOTIF) en tussen de 0.15 en 0.52 (COAST). MOTIF en COAST gecombineerd kunnen een overtoppingverliesreductiefactor opleveren van 0.91. Deze reductiefactoren kunnen worden afgeleid uit een vergelijking van de figuren 5 en 6.



Figuur 6 Overtoppingverliezen na inzet van COAST en MOTIF bij tankputcapaciteit van 110% en > 110%, bij R/H = 1, uit [ASH 09]

5.2.2 Mitigerende C-maatregel: isolerende laag

5.2.2.1 Introductie

Een isolerende laag is een stof of zijn objecten die op een verdampende vloeistofplas kunnen worden aangebracht met als doel het verminderen van de verdamping uit de vloeistofplas. Het betreft hier de toepassing op niet koud kokende vloeistofplassen (zie ook §4.3.3).

In het Brandweer BRZO scenarioboek [BBS 09] wordt het afdekken van een niet brandbare plas beschreven. Essentieel bij het afdekken van een (toxische) vloeistofplas is dat de afdekking voldoende snel wordt gerealiseerd (applicatietijd en hoeveelheid schuim), dat de heersende windsnelheid niet te hoog is (applicatieomstandigheden) en dat het juiste isolerende medium wordt toegepast (soort isolatiemedium).

Om een schuimlaag te kunnen aanbrengen zijn de volgende systeemcomponenten nodig:

- watertoevoer
- schuim concentraat toevoer
- ratio flow controller die beide toevoeren in de juiste verhouding mengt
- schuimgeneratoren die de schuimoplossing omzet in schuim

5.2.2.2 Applicatie van het schuim

Applicatietijd en hoeveelheid schuim

In [BBS 09] wordt als vuistregel aangegeven dat de toxische vloeistofplas binnen 1 minuut moet zijn dichtgeschuimd en dat binnen 5 minuten een voldoende dikke isolatielaag van het – voor de betreffende vrijgekomen gevaarlijke stof - juiste isolatiemedium moet zijn aangebracht. Om dergelijke korte applicatietijden te kunnen realiseren dient de tankput voorzien te zijn van detectoren die bij vrijkomen van de gevaarlijke stof de installatie aanstuurt die automatisch het isolatiemedium op de vloeistofplas aanbrengt.

De dikte van de isolatielaag is afhankelijk van de soort stof en dient met testrapporten vastgesteld te worden [BBS 09]. De kans op het vrijkomen van gevaarlijke stoffen uit leidingwerk, pompen en appendages is meestal groter dan uit de opslagtank zelf. Norman en Swihart [NOR 91] geven aan dat het daarom soms raadzaam is om deze apparatuur apart te omwallen zodat er minder schuim nodig is en de schuimlaag sneller de juiste dikte zal bereiken.

Applicatieomstandigheden

Het is van groot belang dat de heersende windsnelheid ten tijde van de applicatie van het schuim niet te groot is. Volgens DiMaio en Norman [DIM 90] levert de toepassing van ‘medium expansion nozzles’ bij hogere windsnelheden dan 15 mph (6,7 m/s) schuimproblemen op. De schuimlaag komt in beweging en kan zelfs van de oppervlakte worden opgeheven.

5.2.2.3 Soort isolatiemedium en haalbare verdampingsreductiefactoren

Het soort stof dat in de tankput vrijkomt, is bepalend voor het soort isolatiemedium dat toegepast kan worden. Volgens [BBS 09] wordt bij aardolie en aardolieproducten (benzine en dergelijke) vaak zwaarschuim gebruikt. Bij stoffen die een hogere dampspanning hebben en dus sneller verdampen wordt vaak middelschuim gebruikt. Sommige schuimsoorten worden afgebroken door alcoholen. Om verdamping van alcoholen tegen te gaan dienen daarom speciale alcoholbestendige isolatiemiddelen te worden toegepast. Hetzelfde geldt voor het tegengaan van de verdamping van zuren.

Volgens [DIM 90] moet een schuim dat toegepast wordt op een spill van een gevaarlijke stof de volgende werking hebben:

- isoleren
- absorberen
- beperken van de reactiviteit

De schuimdeken kan het gevaarlijke materiaal isoleren van de omgevingstemperatuur, van zonnestraling en van thermische straling, in het bijzonder wanneer de gevaarlijke stof al bij lage temperaturen kookt. Daarnaast dient de schuimlaag oplosbare gassen, aerosolen en deeltjes weg te vangen. Ten slotte dient het schuim een remmende werking te hebben op de chemische reactiviteit van de gevormde dampen.

DiMaio et al. [DIM 90] en Norman et al. [NOR 91] hebben experimenten uitgevoerd waarbij een aantal chemische stoffen worden afgedekt: chloor, zwaveldioxide, monomethylamine, waterstoffluoride, broom, fosfortrichloride, fosforoxychloride en ammoniak. De stoffen werden afgedekt met vier soorten schuim:

- 6% Hazmat #1 (een zuurresistent schuim);
- 6% Hazmat #2 (een zuurresistent schuim);
- 6% Fluoroproteïn;
- 6% Universal (een alcoholresistent schuim).

In tabel 2 zijn de behaalde verdampingsreductiefactoren opgenomen.

Tabel 2 Verdampingsreductiefactoren bij toepassing ‘medium expansion foam’ bij diverse chemische stoffen, overgenomen uit [DIM 90; exp 1-9] en [NOR91]

Experiment	Chemische stof	Schuim	Verdampingsreductiefactoren
1	Chloor	Fluoroproteïn	Negatief. Schuim breekt af.
2	Chloor	Hazmat #2	0.67- 0.82
3	Zwaveldioxide	Hazmat #2	Negatief (eerste 10 minuten) 1 (na 10 minuten) 0.61 (overall)
4	Monomethylamine	Universal	0.85 (MMA lost op in het schuim met als gevolg een hoger kookpunt en lagere verdamping)
6	Fosfortrichloride	Hazmat #2	Succesvol (uitsluitend kwalitatieve gegevens beschikbaar)
7	Fosforoxychloride	Hazmat #2	Succesvol (uitsluitend kwalitatieve gegevens beschikbaar)
8	Waterstoffluoride	Hazmat #2	0.70- 0.85 (HF lost op in het schuim met als gevolg een hoger kookpunt en lagere verdamping)
9	Broom	Hazmat #2	> 0.95
NOR91	Ammoniak	Hazmat #1	0.80 (schuim binnen 2 minuten aangebracht)

5.2.3 Mitigerende C-maatregel: verdunning door geforceerde luchtinmenging

Verdunning door geforceerde luchtinmenging staat beschreven in [GUP 05]. Bij het vrijkomen van gassen of dampen kan de concentratie in de lucht door toevoer en menging van lucht worden verlaagd. Verdunning met lucht is niet mogelijk voor alle scenario's waarbij gevaarlijke stoffen vrijkomen. Voor sommige scenario's zal geforceerde luchtinmenging de situatie juist verergeren. Bij verdamping van vloeistoffen zal geforceerde luchtinmenging de dampconcentratie juist doen toenemen. Dit geldt ook voor twee fasen uitstroming waarbij een grote hoeveelheid van de gevaarlijke stof die als vloeistof vrijkomt op de grond terecht komt en eveneens voor het vrijkomen van aerosolen. In het laatste geval zal door geforceerde luchtinmenging meer vloeistof verdampen dan normaal of kunnen de aerosolen verder worden meegevoerd waardoor ook op grotere afstand van het uitstroompunt vloeistof op de grond zal neerregenen. In de praktijk lijkt het niet echt haalbaar om met blowers deze geforceerde luchtinmenging te realiseren. Gevaarlijke stoffen kunnen op vele plekken uit de installatie vrijkomen en het plaatsen van mobiele blowers bij de uitstroomlocatie zal de benodigde tijd kosten. Op basis hiervan wordt deze optie niet verder onderzocht.

5.2.4 Mitigerende C-maatregel: vloeistofscherm

5.2.4.1 Introductie

De apparatuur om een vloeistofscherm te realiseren bestaat uit een of meer leidingen waarin zich op bepaalde afstanden sproeikoppen bevinden.

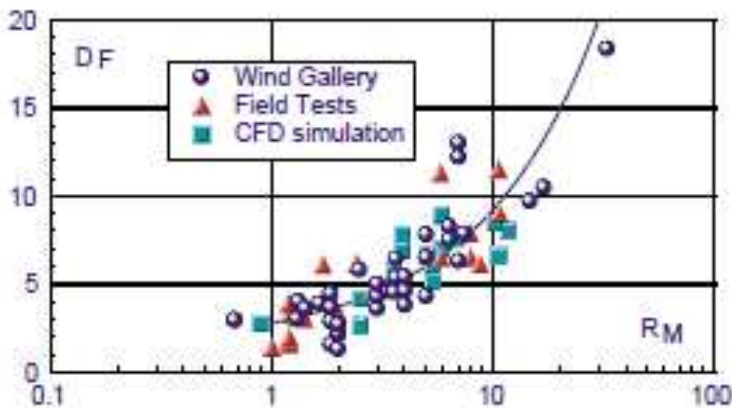
Na activering van de sproeikoppen ontstaat een vloeistofscherm dat in staat is om op 3 manieren gaswolken te beïnvloeden [HAL 03]:

1. het mechanische effect van de intrede van gas in het vloeistofgordijn leidend tot geforceerde dispersie van de gaswolk en verdunning
2. het fysische-chemisch effect van het absorptieproces van het oplossen van de gascomponenten in de vloeistof van het gordijn en/of het wegreageren van de gascomponenten
3. het thermische effect van de opwarming van de gaswolk waardoor deze stijgt

De reductiefactor (D_f) kan worden beschreven als het quotiënt van de gasconcentratie zonder de aanwezigheid van een vloeistofscherm en de gasconcentratie met een vloeistofscherm. Deze factor wordt beïnvloed door de drie bovengenoemde effecten. In de gevonden literatuur wordt weinig aandacht besteed aan het thermische effect.

5.2.4.2 Mechanische effecten van vloeistofschermen

In bijna alle referenties wordt ingegaan op het mechanische effect van vloeistofschermen. Een belangrijke grootte is de verhouding (R_m) tussen het momentum van het vloeistofscherm en het momentum van de gasuitstroming of de damp/gaswolk. Als alleen het mechanische effect wordt beschouwd dan kan bij een voldoende hoog vloeistofscherm (vuistregel: minimaal 2x de hoogte van de gaswolk en 2x de breedte van de gaswolk) een reductiefactor (D_f) van 10 worden bereikt bij een R_m van 10 [HAL 05]. Dit is weergegeven in figuur 4.



Figuur 4 Reductiefactor D_f als functie van R_m (verhouding tussen het momentum van het vloeistofscherm en het momentum van de damp/gaswolk), uit [HAL 05].

De formule voor R_m die gehanteerd wordt, is:

$$R_M = \frac{\dot{m}_{l,u} U_{d0}}{\rho V^2 H_{wc}} \quad (3)$$

waarbij:

- $\dot{m}_{l,u}$: vloeistofdebiet per eenheid lengte vloeistofscherm (kg/s/m)
- U_{d0} : beginsnelheid druppels spuitstukken (m/s)
- ρ : dichtheid wolk (kg/m³)
- V : windsnelheid (m/s)
- H_{wc} : hoogte waterscherm (m).

Volgens deze formule wordt de impuls van de damp- of gaswolk bepaald door de windsnelheid. Dit betekent dat deze formule uitsluitend kan worden toegepast voor scenario's waarbij de uitstroming impulsloos is.

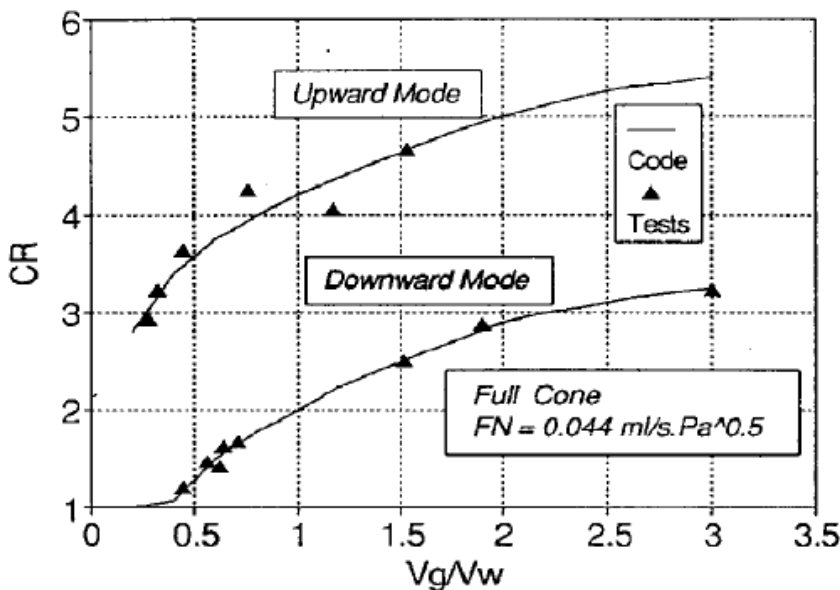
Typische waarden voor het vloeistofdebiet per meter vloeistofscherf liggen in de orde van 1 tot 5 kg/s/m. Pallazi et al. [PAL 09] geeft een waarde van 32 m/s voor U_{d0} . Uitgaande van een dichtheid van de wolk van circa 1 kg/m^3 en een waterscherfhoogte van maximaal 5 meter en een vloeistofdebiet van 5 kg/s/m levert dit voor R_m de formule op:

$$R_m = 32/V^2 \quad (4)$$

Uitgaande van formule (4) zal bij een windsterkte van meer dan 5,5 m/s R_m kleiner dan 1 worden. Bij een R_m van 1 zal D_f niet gemakkelijk meer dan 2 worden (zie figuur 4). Dit is de reden dat bij hogere windsnelheden de mechanische werking van een vloeistofscherf beperkt is.

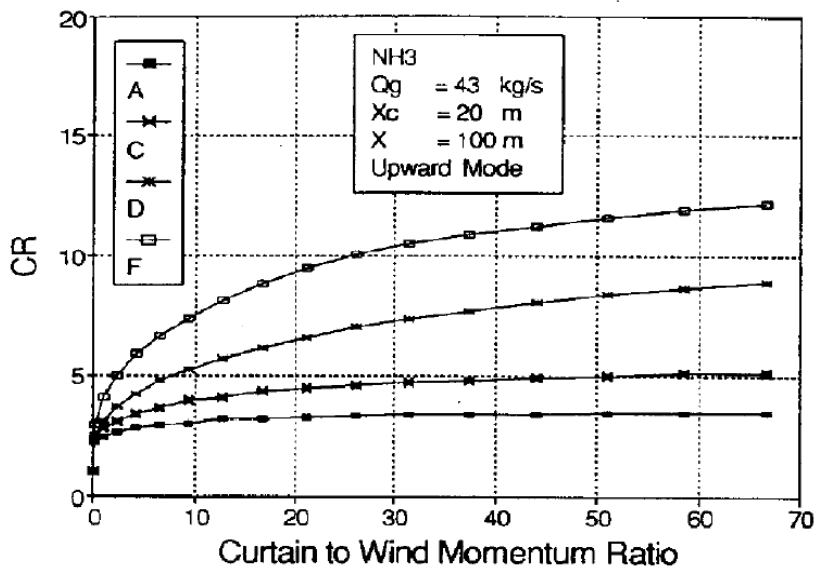
Als algemene regel kan worden gesteld dat bij een R_m van 10 de reductiefactor ongeveer 10 zal zijn [HAL 05]. Hierbij is in de veldtesten een vloeistofscherf gebruikt waarbij de vloeistof naar beneden wordt gespoten. Er wordt door Hald niet ingegaan op de eventuele invloed van de stabiliteit van het weer.

Buchlin [BUC 94] geeft aan dat bepaalde vloeistofscherfen (full cone) die naar boven gericht zijn een grotere reductie opleveren dan vloeistofscherfen die naar beneden gericht zijn (zie figuur 5). De reductie is gemeten op een afstand van 1 tot 2 meter achter het scherm.



Figuur 5 Effecten van waterrichting op reductiefactor ($CR=D_f$), V_g/V_w is de verhouding van de luchtintredesnelheid en de windsnelheid, uit [BUC 94].

De luchtintredesnelheid is de intredesnelheid aan het bovenste pluimoppervlak ter hoogte van plaats waar de pluim in contact komt met het waterscherf. Ook de stabiliteit van het weer heeft volgens Buchlin grote invloed op de te behalen reductie (zie figuur 6). Reductiefactoren kunnen bij $R_m < 10$ een factor 2 kleiner zijn bij onstabiel weer (klasse A) dan bij stabiel weer (klasse F). Bij $R_m > 10$ kan dit zelfs oplopen tot een factor 4 verschil. De reductie is gemeten op een afstand van 100 meter achter het scherm.



Figuur 6 Effect van de atmosferische stabiliteit op de reductiefactor ($CR=D_f$), uit [BUC 94].

5.2.4.3 Fysisch-chemische effecten van vloeistofschermen

In sommige referenties is naast de mechanische werking de fysisch-chemische werking door absorptie onderzocht. In [PAL 09] wordt een fysisch model beschreven waarin naast het mechanische effect ook de fysische-chemische absorptie van een chloorwolk in een natronloogoplossing wordt beschreven.

Direct achter het vloeistofscherm is D_f^4 een functie van de luchtinmengingsefficiëntie gedurende het initiële vrijkomen (η_0), de absorptie-efficiëntie (η_{abs}) en van de verdunningsefficiëntie als gevolg van het mechanische effect van het vloeistofscherm (η_{dil}):

$$D_f = (1 - \eta_0) / \{(1 - \eta_{abs}) * (1 - \eta_{dil})\} \quad (5)$$

waarbij,

η_0 = luchtinmengingsefficiëntie gedurende het initiële vrijkomen

η_{abs} = absorptie-efficiëntie (fysisch-chemisch effect)

η_{dil} = verdunningsefficiëntie (mechanische effect)

De term in de teller is de afname van de concentratie door initiële luchtinmenging in afwezigheid van een vloeistofscherm. De termen in de noemer zijn de afname van de concentratie als gevolg van absorptie en de afname van de concentratie door mechanische verdunning in aanwezigheid van een vloeistofscherm.

De efficiëntie gedurende het initiële vrijkomen η_0 wordt enerzijds bepaald door meteorologische parameters (weerklasser, windsnelheid, bodemtemperatuur, etc.) en anderzijds door de kenmerken van het vrijkomen. Indien de gevaarlijke stof onder druk als straal vrijkomt zal $(1 - \eta_0)$ zeer klein zijn en D_f ook. Indien de bron een verdampende vloeistof is dan zullen de weersomstandigheden doorslaggevend zijn voor $(1 - \eta_0)$ en kan $(1 - \eta_0)$ bijna gelijk aan 1 zijn.

Uit figuur 7 blijkt dat op grotere afstand achter het vloeistofscherm D_f uitsluitend wordt bepaald door de absorptie-efficiëntie (η_{abs}):

$$D_f = (1 - \eta_{disp}) / \{(1 - \eta_{abs}) * (1 - \eta_{disp})\} = 1 / (1 - \eta_{abs}) \quad (6)$$

waarbij,

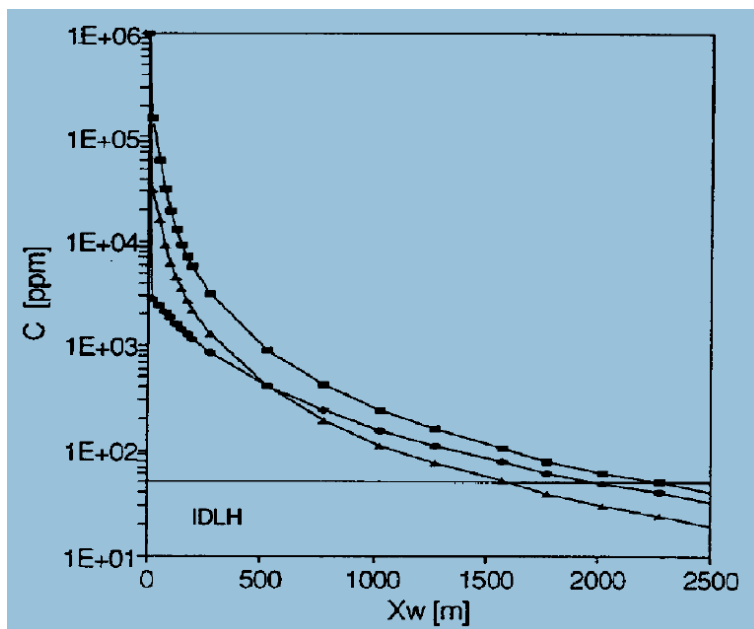
η_{disp} = efficiëntie als gevolg van atmosferische dispersie

⁴ Strikt genomen mag er niet meer van een verdunningsfactor worden gesproken, omdat absorptie geen verdunning is maar volledige verwijdering van de stof uit de gasfase

De term in de teller geeft de afname weer van de concentratie als gevolg van atmosferische dispersie in afwezigheid van een vloeistofscherm. De termen in de noemer geven de afname weer van de concentratie als gevolg van absorptie en de afname van de concentratie als gevolg van atmosferische dispersie in aanwezigheid van een vloeistofscherm.

Ook Buchlin [BUC 94] geeft aan dat het mechanische verdunningseffect van een vloeistofscherm uitsluitend op korte afstand achter het vloeistofscherm resultaat heeft en dat effecten op grotere afstand alleen kunnen worden gerealiseerd door de fysisch-chemische absorptie van vloeistofschermen. Dit kan worden verklaard uit het feit dat het mechanische effect er niet voor zorgt dat er gevaarlijke stof uit de wolk verdwijnt. Mechanische verdunning wordt op de grotere afstand van het vloeistofscherm verwaarloosbaar ten opzichte van de verdunning als gevolg van de normale atmosferische dispersie. Absorptie zorgt er echter wel voor dat de gevaarlijke stof uit de dampfase verdwijnt en daarom niet meer kan worden gedispergeerd.

In figuur 7 is dit effect weergegeven [BUC 94]. Uit deze figuur blijkt dat op grote afstand absorptie een veel grotere concentratiereductie oplevert (ten opzichte van de concentratie als gevolg van atmosferische dispersie) dan de concentratiereductie die wordt gerealiseerd door mechanische verdunning. De figuur laat zien dat op 2500 meter afstand van de uitstroming D_f als gevolg van absorptie circa 2 is en D_f als gevolg van mechanische verdunning 1,25.



Figuur 7 Simulatie van de concentratieafname als gevolg atmosferische dispersie zonder waterscherm (bovenste lijn), als gevolg van verdunning door de mechanische werking van een vloeistofscherm (lijn met de bolletjes) en als gevolg van absorptie in de vloeistof van het vloeistofscherm (lijn met driehoekjes), uit [BUC 94].

Palazzi et al [PAL 09] berekenen, onder bepaalde condities, absorptie-efficiëncies tussen de 0,57 en 0,71. Deze efficiëncies leveren volgens formule (6) op grote afstand van het vloeistofscherm reductiefactoren (D_f) op die boven de 2 liggen, namelijk 2,3 en 3,4.

Brandbare gassen kunnen ontsteken als de concentraties in het explosieve gebied liggen, dat wil zeggen boven de LEL (Lower Explosive Limit) en onder de UEL (Upper Explosive Limit). De UEL-waarden van gassen variëren tussen de 40.000 ppm en 1.000.000 ppm, de LEL-waarden tussen de 5000 ppm en 160.000 ppm. Uit figuur 7 valt af te lezen dat door mechanische verdunning van een vloeistofgordijn de concentratie vlak achter het vloeistofgordijn in dit geval kan worden teruggebracht met een factor 10. Dit is vaak al genoeg om de concentratie onder de LEL-waarde te krijgen.

Toxische concentraties van gassen zijn vaak ook nog schadelijk voor de mens bij veel lagere waarden. Uit figuur 7 valt af te lezen dat de afstand waar de IDLH-waarde wordt bereikt sterk kan worden teruggedrongen door de fysisch-chemische absorptiewerking van vloeistofschermen (van 2300 m naar 1600 m). Dit is bij een D_f van 2. Indien, conform Palazzi et al [PAL 09] grotere waarden voor D_f kunnen worden bereikt kan deze afstand nog veel verder worden gereduceerd.

Een overzicht van in de literatuur beschreven absorptie-efficiënties is opgenomen in de tabel 3.

Tabel 3 Absorptie-efficiënties (η_{abs}) en reductiefactoren (D_f) van vloeistofschermen

Stof die vrijkomt	Vloeistofscherm	Bijzonderheden scherm	η_{abs}	D_f	Schaal	Referentie
Cl ₂	0,1 M NaOH	Neerwaarts vloeistofscherm op enige afstand	0,57 -0,71	2,3-3,4	Spray barrier: - hoogte : 0,6 m - lengte: 0,8 m	PAL 09
NH ₃ , HF, HCl	Water		≤ 0,5	≤ 2	Spray barrier: - hoogte: 0,7 m - lengte: 2 m	BUC 94
HF	Water	Gericht ⁵ vloeistofscherm: - neerwaarts en opwaarts ⁶ - horizontaal: - windsnelheid 17 m/s - windsnelheid 5 m/s	0,53-0,97 0,7 0,96	2-33 3,3 25	Spray barrier: - hoogte: 10 m - hoogte: 20 m	FTH 95
HF	Water	Opwaarts vloeistofscherm op enige afstand met water/HF volume verhoudingen van: - 6:1 - 40:1	0,25 0,90	1,3 10	Niet bekend	LEE 96

Nog onduidelijk is de invloed van de windsnelheid en de luchtvochtigheid op de absorptie-efficiëntie van een waterscherm. Blewitt et al [BLE 91] geven aan dat deze factoren weinig effect hebben terwijl Palazzi et al [PAL 09] aangeven dat sproeisystemen alleen effectief zijn bij lage windsnelheden (≤ 2m/s). Volgens Fthenakis et al. [FTH 95] kunnen echter ook aanzienlijke absorptie-efficiënties bij hogere windsnelheden wordt behaald.

Tenslotte een opsomming van de belangrijkste factoren voor een effectieve absorptie:

1. De keuze van de vloeistof waarin de gevaarlijke stof oplost en eventueel weggeeft. De gevaarlijke stof die vrijkomt, dient goed op te lossen in de vloeistof van het scherm. De hoeveelheid gevaarlijke stof die hierdoor uit de gasfase treedt kan zelfs nog groter worden indien de stof in de vloeistof weggeeft.
2. Het ontwerp van de sproei-installatie. Na selectie van het juiste oplosmiddel en/of reactiemiddel in de juiste concentratie dient de sproei-installatie zo te worden ontworpen dat de contacttijd en het contactoppervlakte tussen de gevaarlijke stof en de sproeivloeistof voldoende groot is voor een goede uitwisseling. Dit kan worden gerealiseerd door een vloeistofscherm op te richten waarvan de vloeistofdeeltjes zich als een spray van kleine druppeltjes in de lucht verspreiden. De grootte van de vloeistofdruppeltjes dient voor een optimale absorptie tussen de 100 µm en 300 µm te liggen.
3. De verhouding van het volume vloeistof (scherm)/gevaarlijke stof. Naarmate deze verhouding groter is zal de absorptie-efficiëntie ook hoger zijn.
4. De locatie/positie van het vloeistofscherm. Naarmate deze zich dicht bij de uitstroomopening bevindt of zelfs daar volledig op gericht is zal de absorptie-efficiëntie toenemen. Naar boven gerichte vloeistofschermen hebben de voorkeur boven naar beneden gerichte [BUC 94]. Horizontale vloeistofschermen hebben de voorkeur boven verticale omdat horizontale vloeistofschermen een betere dekking van de damp/gaswolk opleveren [FTH 95].

⁵ Gericht vloeistofscherm: de vloeistofstraal is gericht naar het punt waar de HF vrijkomt

⁶ Deel van de pluim werd niet gemitigeerd vanwege ontsnapping via de bovenzijde vloeistofscherm

5.2.4.4 Conclusie vloeistofschermen: mechanisch versus fysisch-chemisch

Om de concentratie van brandbare gassen die vrijkomen beneden de LEL te krijgen kan de mechanische werking van vloeistofschermen effectief zijn. Om de concentratie van toxische gassen op afstand te reduceren beneden de IDLH-waarde is het verdunningseffect van vloeistofschermen ontoereikend en is de fysisch-chemische werking door absorptie van vloeistofschermen nodig [BUC 94].

5.3 Toepassing van reductiefactoren in QRA's

5.3.1 'Baffles' en/of 'deflectors'

Pas nadat er meer bekend wordt over de eisen die er aan de uitvoeringsvormen van MOTIF en COAST gesteld moeten worden, kunnen de criteria voor de toepassing van reductiefactoren in de QRA voor de reductie van overtoppingverliezen als gevolg van de toepassing van 'baffles' en/of 'deflectors' worden vastgesteld.

5.3.2 Isolerende (schuim)lagen

Generieke reductiefactoren

Voor isolerende schuimlagen zijn er geen generieke reductiefactoren waarvan in de QRA kan worden uitgegaan.

Generieke criteria voor toepassing van reductiefactoren

Om verdampingsreductiefactoren als gevolg van het aanbrengen van een schuimlaag op een verdampend vloeistofoppervlakte in een QRA te kunnen verdisconteren dient te worden aangetoond dat aan de volgende generieke criteria wordt voldaan:

1. Het ontwerp van de schuiminstallatie is zodanig dat het verdampend vloeistofoppervlak bedekt kan worden met schuim (geef in de QRA aan binnen welke tijd het vloeistofoppervlak bedekt kan worden).
2. De capaciteit van de schuiminstallatie is groot genoeg om de schuimlaag aan te brengen en voldoende te verversen (onderbouw voor de verschillende QRA-scenario's wat een voldoende verversing inhoudt).
3. De effectiviteit van de toegepaste schuimen is bepaald bij de weerklassen die in QRA's worden gehanteerd (algemene regel: schuimen die 98% water bevatten, zogenaamde 'medium expansion foams', kunnen alleen worden toegepast tot windsnelheden van maximaal 6 m/s).

5.3.3 Vloeistofschermen

Generieke reductiefactoren

Voor vloeistofschermen schuimlagen zijn er geen generieke reductiefactoren waarvan in de QRA kan worden uitgegaan.

Generieke criteria voor toepassing van reductiefactoren

Om reductiefactoren als gevolg van het activeren van een vloeistofscherm in een QRA te kunnen verdisconteren dient te worden aangetoond dat aan de volgende generieke criteria wordt voldaan:

1. Het vloeistofscherm wordt volautomatisch in werking gesteld als resultaat van de meting van het vrijkomen van de betreffende gevaarlijke stof (geef in de QRA aan na hoeveel tijd - na het ontstaan van de LOC- het vloeistofscherm effectief is).
2. Het vloeistofscherm is minimaal 2x zo hoog als de hoogte van de vrijgekomen gas/dampwolk op de plaats van het scherm en ook minimaal 2x zo breed als de breedte van deze wolk op de plaats van het scherm.
3. Om de concentratie van een brandbare wolk onder de LEL te krijgen, mogen vloeistofschermen worden toegepast die uitsluitend een verdunnend (mechanisch) effect hebben. Formule (3) levert een R_m waarmee vervolgens een reductiefactor kan worden berekend. Deze formule geldt uitsluitend voor impulsloze uitstromingen, dus niet voor brandbare stoffen die onder druk vrijkomen. Dit betekent dat in de praktijk vloeistofschermen voor het verlagen van de concentratie tot onder de LEL dus niet van belang zijn voor de QRA.

4. Om de concentratie van giftige wolken te reduceren dienen vloeistofschermen te worden toegepast met een absorptieve (fysisch-chemische) werking. Met behulp van experimentele resultaten dient te worden aangetoond dat de reductiefactor die in de QRA wordt meegenomen voor het betreffende scenario gehaald wordt. Hierbij moet ook worden aangegeven bij welke meteocondities de reductiefactor kan worden gebruikt en bij welke meteocondities niet.

6 Fase III Aanbeveling voor beoordeling mitigerende maatregelen in een QRA (incl. voorbeeld)

Voor de beoordeling van mitigerende maatregelen in een QRA moeten in algemene zin de volgende stappen worden doorlopen.

Stap 1: Aantonen van het effect van de maatregel

In deze stap dient allereerst aangegeven te worden waar de maatregel op ingrijpt (beperking van de uitstromingsduur – en/of snelheid; beperking van de plasgrootte; beperking van de verdamping; beperking van de verspreiding, etc.). Vervolgens dient te worden aangetoond dat een bepaalde reductiefactor gehaald wordt voor een bepaald scenario bij de 6 weerklassen die in QRA's worden gebruikt.

Hierbij kan gebruik worden gemaakt van de resultaten van full scale experimenten, of de resultaten van schaaltesten met een goede onderbouwing, CFD-berekeningen in combinatie met validaties en casuïstiek. Van groot belang hierbij is dat ook wordt aangetoond voor welke meteorologische condities deze reductiefactor geldig is. De experimenten kunnen volledig toegespitst zijn op het betreffende scenario (specifieke experimenten) of er wordt gebruik gemaakt van de resultaten van meer algemene experimenten, waarbij aangegeven dient te worden hoe de reductiefactor die in deze algemene experimenten werd behaald, vertaald kan worden naar een reductiefactor die realistisch is voor de omstandigheden van het betreffende scenario.

Stap 2: Bepalen op welk deel van de QRA-modellering de maatregel invloed uitoefent

Beschrijf het deel van de QRA-modellering waarop de maatregel ingrijpt.

Stap 3: Bepaal de grootte van de invloed van de maatregel op dat deel van de modellering rekeninghoudend met de tijd die nodig is om de maatregel te activeren

Indien de maatregel invloed heeft op de verspreiding, dient bepaald te worden met welke nieuwe bronterm en vanaf welke locatie de dispersieberekeningen dienen plaats te vinden. Bepaal of het nodig is binnen één scenario met 2 uitstromingen te rekenen: de uitstroming in de periode dat de uitstroming nog niet is beperkt omdat de mitigerende maatregel nog niet is geactiveerd en de uitstroming in de periode na activering van de mitigerende maatregel.

Stap 4: Bepaal de faalkans van de maatregel

Aan de hand van statistiek, specifieke of algemene testgegevens dient te worden vastgesteld wat de faalkans is van de maatregel.

Voorbeeld:

In onderstaand voorbeeld worden deze stappen summier toegepast voor de mitigerende maatregel van een waterscherm om een HF-wolk neer te slaan..

Scenario: HF komt op een hoogte van 5 meter vrij uit een alkylatie-unit. De snelheid waarmee de HF vrijkomt is 25 kg/s. De unit wordt beschermd met een waterscherm dat maximaal 5 seconden nadat HF vrijkomt wordt geactiveerd. De totale capaciteit van het waterscherm is 40.000 g/min. Dit scherm bestaat uit 2 sproeiers die zich 5 meter boven en 5 meter onder de uitstroomopening bevinden. De bovenste sproeier is naar beneden gericht en de onderste sproeier naar boven.

Stap 1: Het waterscherm grijpt in op de verspreiding van HF als gevolg van het vrijkomen van HF uit de alkylatie-unit. De scenario's waarop de maatregel van toepassing zijn, zijn al de alkylatie-unitscenario's waarbij HF vrijkomt uit de alkylatie-unit met een maximale uitstroming van 40 kg/s.

De aanvrager dient de volgende gegevens aan te leveren:

1. De reductiefactoren voor de verschillende QRA-scenario's bij de weerklassen die in de QRA worden gebruikt en de afleiding van die reductiefactoren. Bij deze afleiding zijn de volgende twee punten van belang.
2. Verspreidingsberekeningen die aantonen dat het vloeistofscherm minimaal 2x zo hoog en minimaal 2x zo breed is als de HF-wolk ter hoogte van dat scherm.

3. Bewijsmateriaal dat de eigenschappen van het waterscherp (het waterdebiet, de druppelgrootte) zodanig zijn dat de vrijgekomen HF voldoende wordt geabsorbeerd en verdund.

De afleiding van de reductiefactoren met behulp van het artikel van Fthenakis kan als volgt: Volgens tabel 3 van [FTH 95] zijn absorptiecoëfficiënten haalbaar voor neerwaartse en opwaartse waterschermen die variëren tussen de 0,53 en 0,97. De ondergrens is veroorzaakt door het feit dat het waterscherp niet de gehele wolk dekte en door de hoge windsterkte van 17 m/s. De fractie van de tijd dat de windsnelheid groter is dan 17 m/s is klein. Indien met verspreidingsberekeningen kan worden aangetoond dat het vloeistofscherp minimaal 2x zo groot en minimaal 2x zo breed is als de wolk dan lijkt het gerechtvaardigd om een coëfficiënt te hanteren die zich hoog in de range 0,53-0,97 bevindt. Maar er zijn andere factoren van belang, zoals het waterdebiet van het scherm, het type sproeiers (de druppelgrootte van het scherm) en de grootte van de bronterm, die een grote invloed hebben op de absorptiecoëfficiënt.

Bij Fthenakis was het waterdebiet van het scherm 30 kg/min terwijl het onderhavige waterscherp een debiet heeft van 40 kg/min. De bronterm bij Fthenakis was circa 40 kg/s terwijl de bronterm in het voorbeeld 25 kg/s is. Vergelijking van deze gegevens duidt erop dat een hoge absorptie- coëfficiënt gehanteerd zou kunnen worden op voorwaarde dat ook de druppelgrootte van het waterscherp vergelijkbaar is. Door Fthenakis werden twee verschillende soorten sproeiers getest, maar de kenmerken van deze sproeiers en de resulterende druppelgroottes worden echter niet vermeld. Hierdoor kan de afleiding van de reductiefactoren niet volledig worden gedaan met behulp van de gegevens in het artikel van Fthenakis.

Er kunnen nu twee wegen worden bewandeld:

1. Ga na wat de eigenschappen waren van de sproeiers die Fthenakis heeft gebruikt en toon aan dat de sproeiers die worden gebruikt een vergelijkbare druppelgrootte opleveren.
2. Doe zelf onderzoek om aan te tonen dat de sproeiers die worden gebruikt het beoogde effect hebben.

Stap 2:

De maatregel grijpt in op de bronterm (het debiet) die als startpunt van de dispersieberekeningen worden gebruikt.

Stap 3:

De dispersieberekeningen dienen, strikt genomen, uitgevoerd te worden vanaf de locatie van het waterscherp met de volgende brontermkenmerken, waarbij de afmetingen van de wolk en de concentratie in de wolk achter het waterscherp vermeld zou moeten worden. Omdat het invoeren van een wolk met gespecificeerde afmetingen nog lastig is, wordt voorgesteld om voor de locatie gewoon de oorspronkelijke locatie van uitstroming aan te houden. Maximaal 5 seconden na de uitstroming zal het waterscherp in werking treden. De eerste fase van de uitstroming (zonder de werking van de mitigerende maatregel) is verwaarloosbaar ten opzichte van de bronterm na activering van de mitigerende maatregel vanwege het feit dat de activeringstijd van 5 seconden vele malen kleiner is dan de maximale tijdsduur van de uitstroming waarmee in QRA's wordt gerekend (30 minuten). Anders dient met twee uitstroomsegmenten gerekend te worden, namelijk de eerste vijf seconden met ongewijzigd debiet en vanaf vijf seconden met gereduceerd debiet.

Stap 4:

De kans dat een vloeistofscherp niet in werking treedt bedraagt [P_{falen}]. Deze faalkans is terug te vinden in de volgende referenties [referenties noemen] of kan op de volgende wijze worden afgeleid [afleiding beargumenteren] uit de volgende gegevens die te vinden zijn in [referenties noemen].

7 Conclusies

1. Veel van de in de literatuur gevonden mitigerende maatregelen zijn volgens PGS-18 en PGS-29 nog geen stand der techniek in Nederland. Deze mitigerende maatregelen worden in Nederland en wereldwijd zo nu en dan ingezet maar vormen geen voorzieningen die standaard en structureel aanwezig zijn in de chemische industrie.
2. De in de literatuur gevonden reductiefactoren zijn vaak zeer specifiek voor een bepaalde stof die vrijkomt, bij een bepaalde weerklassificatie en geldend voor een bepaalde mitigerende voorziening (waterscherm, isolerende schuimlaag) met specifieke kenmerken. Op grond hiervan zijn geen algemene reductiefactoren te geven.
3. De generieke criteria voor het toepassen van reductiefactoren voor QRA-scenario's bestaan voornamelijk uit het bewijzen of aannemelijk maken dat de reductiefactoren voor deze QRA-scenario's, door het toepassen van bepaalde specifieke mitigerende voorzieningen onder bepaalde weersomstandigheden, gehaald zullen worden.
4. Baffles en deflectors zijn mitigerende maatregelen waarvan de werking nauwelijks wordt beïnvloedt door het type vloeistof dat vrijkomt. Zodra meer bekend wordt over de specifieke eigenschappen van deze maatregelen, kunnen de in dit onderzoek genoemde reductiefactoren algemeen worden toegepast.
5. De mechanische werking van een vloeistofscherm is een toepasbare maatregel waarvan de reductiefactor eenvoudig kan worden berekend. Deze maatregel is echter voornamelijk effectief bij het onder de LEL brengen van de concentratie van brandbare gaswolken die impulsloos vrijkomen. Dit betekent dat in de praktijk vloeistofschermen voor het verlagen van de concentratie tot onder de LEL dus niet van belang zijn voor de QRA.

Uitstroming van brandbare tot vloeistofverdichte gassen en toxische wolken kunnen niet voldoende worden gemitigeerd met vloeistofschermen die uitsluitend een verdunnend effect hebben. Op grond hiervan zal deze mitigerende maatregel voor de meeste uitstromingen niet voldoende effectief zijn.

6. In algemene zin is er een aanbeveling gedaan voor het beoordelen van mitigerende maatregelen.
7. In § 4.2.8 van Module C van de Handleiding Risicoberekeningen BEVI kan, bij de bepaling van de effectiviteit van de repressieve systemen isolerende schuimlagen en vloeistofschermen, gevraagd worden naar een beschrijving van specifieke kenmerken van deze systemen.

VERKLARINGEN VAN WOORDEN EN AFKORTINGEN

Baffle	Voorziening in de tank in de vorm van cilindrische buizen met perforaties of een lage interne tankwand bedoeld om de uitstroomsnelheid bij instantaan falen van de tank te beperken
COAST	Catastrophic Overtopping Alleviation of Storage Tanks; specifieke uitvoeringsvorm van een deflector
Deflector	Voorziening op de tankputwand in de vorm van een kering die moet voorkomen dat een golf over de tankputwand heen spoelt bij catastrofaal falen van de tank
EV	Externe Veiligheid
IPO	Interprovinciaal Overleg
LEL	Lower Explosion Limit
LOC	Loss of Containment
LPG	Liquid Petroleum Gas
MOTIF	Mitigation of Tank Instantaneous Failure; specifieke uitvoeringsvorm van een baffle
Overtopping	Het verschijnsel dat zich voor kan doen na catastrofaal falen van opslagtanks waarbij de vloeistof als een golf over de tankputwand heen spoelt
PGS	Publikatiereeks Gevaarlijke Stoffen
QRA	Quantitative Risk Assessment
Reductiefactor	De reductiefactor kan worden beschreven als het quotiënt van de gasconcentratie zonder de aanwezigheid van een mitigerende maatregel (vloeistofschermb, isolerende laag) en de gasconcentratie in aanwezigheid van betreffende mitigerende maatregel.
Spigot	Het verschijnsel dat zich voor kan doen als een klein gat in een tank optreedt waaruit een straal van de vloeistof uittreedt en buiten de opvangput terecht komt
Stand der techniek	De best beschikbare technieken (BBT) zoals deze in de PGS-richtlijnen 18 en 29 zijn beschreven
UEL	Upper Explosion Limit

LITERATUUR

- ASH 09 2009. J.W.Ash. The modelling of tank failures. Current data and the development of mitigation factors. Liverpool John Moores University.
- ATH 05 2005. W. Atherton. An experimental investigation of bund wall overtopping and dynamic pressure on the bund wall following catastrophic failure of a storage vessel. HSE RESEARCH REPORT 333, ISBN 0 7176 2988 0
- ATH 08 2008. W. Atherton et al.. The modeling of spills resulting from the catastrophic failure of above ground storage tanks and the development of mitigation. Liverpool John Moores University.
- BAK 09 2009. Baksteen et al. Major Hazard Accident Modelling. Ministry of Social Affairs and Employment. The Hague. The Netherlands.
- BBS 09 2009. Brandweer BRZO Scenarioboek Module 0, pagina's 15, 16, 26-36 en 109-111
- BLE 91 1991. Blewitt et al. Zie LEE 96, §15.43.14 Water spray barriers for dense gases: physical modelling
- BUC 94 1994. J.M. Buchlin. Mitigation of problem clouds. J. Loss Prev. Process Ind., Volume 7, Number 2, 167-174
- DIM 90 1990. L.R. DiMaio and E.C. Norman. Continuing studies of hazardous material vapour mitigation using aqueous foams. Plant/operation progress. Vol 9. Nr. 2. pages 135-137
- FTH 95 1995. V.M. Fthenakis and D.N. Blewitt. Recent developments in modelling mitigation of accidental releases of hazardous gases. J. Loss Prev. Process Ind., 1995, Volume 8, Number 2, pages 71-77
- GRE 81 1981. Greenspan, H.P. and A.V. Johansson. 1981. An experimental study of flow over an impounding dike. Studies in Applied Maths. 64: 211-223.
- GUP 05 2005. J.P. Gupta. Dilution with air to minimise consequences of toxic/flammable gas Releases. J. of Loss Prevention in the Process Industry 19 (2005),502-505
- HAL 03 2003. Hald et al. A methodology to investigate heavy gas dispersion by water-curtains. Safety and Reliability. Eds Bedford & Van Gelder. 2003. Swets & Zeitlinger, Lisse
- HAL 05 2005. Hald et al. Heavy gas dispersion by water spray curtains: A research Methodology. Journal of loss prevention in the Process Industries, 18, 506-511
- HRB 09 2009. Handleiding Risicoberekingen Bevi Versie 3.2
- HSE 06 2006. The Buncefield Investigation. Third progress report. HSE. 9 mei 2006.
- HSE 09 2009. Website HSE. Proposal for a Study of the Dispersion and Explosion Characteristics of Large Vapour Clouds. Project number: CO2066
- LEA 08 2008. Conventional bunds are sometimes inadequate. Engineers Journal, volume 62, issue 9, November 2008, 574-576

- LEE 96 1996. F.P. Lees, Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control, ISBN 0750615478
- NAI 08 2008. S.R. Nair et al. Methods of avoiding tank bund overtopping using computational fluid dynamics tool. ICHIME Symposium Series No154, pagina 479-495.
- NOR 91 1991. Edward C. Norman and Thomas M. Swihart. Foam system design for ammonia storage areas. Plant/operation progress. Vol 10. Nr. 1. pages 22-26
- PAL 09 2009. Pallazi et al. From laboratory simulation to scale-up and design of spray barriers mitigating toxic gaseous releases. Process Safety and Environment Protection, 87, 26-34
- PGS-18 91 1991. Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 18. Distributiedepots voor LPG. Den Haag: Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid. CPR8-3.
- PGS-29 08 2008. Publikatiereeks Gevaarlijke Stoffen 29. Richtlijn voor bovengrondse opslag van brandbare vloeistoffen in verticale cilindrische tanks. Den Haag: Ministerie van Sociale Zaken en Werkgelegenheid
- UIJT 08 2008. P.A.M. Uijt de Haag et al. Op weg naar een protocol voor het waarderen van maatregelen in een kwantitatieve risicoanalyse. Bilthoven: RIVM.

BIJLAGE 1 Overzicht veel voorkomende mitigerende maatregelen en stand-der-techniek maatregelen

TABEL 1 Overzicht veel voorkomende mitigerende maatregelen en stand-der-techniek maatregelen bij atmosferisch opslagtanks (PGS29) en bij LPG-opslag (PGS18)

Doel maatregel	Maatregel	Stand der techniek in Nederland?		In HRB module C vermeld?	Opmerking
		PGS29	PGS18		
A. Beperking uitstroming uit atmosferische opslagtank	A1. Beperking uitstroming bij overvullen tank				
	<i>A.1.1 Detectie vrijgekomen stof in tankput en dichtsturen toevoer</i>	NEE	JA (§ 9.7.3)	JA, inbloksystemen (§ 4.2.2)	
	A2. Beperking uitstroming bij falen tank (kleine lekkages)				
	<i>A2.1 Dichten lek</i>	NEE	NEE	NEE (zie opmerking)	Duur uitvoering maatregel > 30 minuten ⁷ .
	<i>A2.2 Wegnemen bron</i>	NEE	NEE	NEE (zie opmerking)	Het is niet mogelijk om grote opslagvolumes binnen 30 minuten van de ene naar de andere containment te verplaatsen.
A. Beperking uitstroming uit leidingwerk aan tank (toe- en afvoerleidingen Product)	A3. Beperking uitstroming uit (appendages in) leidingwerk van toe – of afvoerleiding product				
	<i>A3.1 Dichtzetten of dichtsturen afsluiter(s) of regelklep(pen)</i>	JA (§ 7.5)	JA (§ 10.5.5)	JA, inbloksystemen (§ 4.2.2)	
	<i>A3.2 Aanspreken doorstroombegrenzers</i>	NEE	JA (§ 10.5.6)	JA, doorstroombegrenzers (§ 4.2.3)	
B. Beperking verspreiding Vloeistof	B1. Secundaire containment (overvullen opslagtank, falen opslagtank, falen leidingwerk in tankput)				
	<i>B1.1 Voldoende capaciteit tankput</i>	JA (§ 5)	JA (§8.2.10)	JA, tankput (§ 4.2.1)	Bij LPG-opslagtanks gaat het om een voldoende groot oppervlakte van de opvangput dat de volledige de horizontale projectie van de tank afdekt. De opvangput moet voldoende groot zijn om de LPG af te voeren naar een veilige plaats zodat geen LPG onder de tank kan
	<i>B1.2 Eisen aan ontwerp/hoogte tankputwand (zodanig dat –bij instantaan falen -overtopping</i>	NEE	NVT	NEE	

⁷ De maatregelen die worden onderzocht zijn uitsluitend die maatregelen die effect hebben op de uitkomsten van een QRA. In een QRA wordt uitsluitend de eerste 30 minuten van de uitstroming verdisconteerd.

Doel maatregel	Maatregel	Stand der techniek in Nederland?		In HRB module C vermeld?	Opmerking
		PGS29	PGS18		
	<p><i>wordt beperkt): deflectors</i></p> <p>B1.3 Eisen aan tankontwerp <i>(zodanig dat – bij instantaan falen - overtopping wordt beperkt): interne laag niveau baffles</i></p> <p>B1.4 Eisen aan afstand tankwand tot tankputwand <i>(zodanig dat – bij lekkage van de tankwand – spigot wordt beperkt)</i></p>	NEE	NVT	NEE	ophopen.
C. Beperking Dampconcentratie in lucht	C1. Beperken verdampend oppervlakte				
	<i>C1.1 Eisen aan ontwerp uitstroomopening</i>	NEE	NVT	NEE	Dit heeft bijvoorbeeld een belangrijke rol gespeeld bij de ontwikkeling van het Buncefield incident.
	<i>C1.2 Aanbrengen van isolerende lagen op verdampend oppervlakte</i>	NEE	NEE	NEE	Isolerende lagen kunnen averechts werken bij koud kokende vloeistofplassen (zie (§4.3.3))
	C2. Verdunning vrijgekomen dampen				
	<i>Verdunning door geforceerde luchtinmenging met behulp van blowers/ventilatoren</i>	NEE	NEE	NEE (zie opmerking)	Voor de scenario's waarbij dit een optie is, zal deze maatregel kunnen worden gerealiseerd door het plaatsen van mobiele blowers. Door de duur van de uitvoering van deze maatregel is verdiscontering in een QRA geen optie.
	C3. Beperken dampverspreiding				
	<i>C3.1 Vloeistofscherm</i>	NEE	NEE	Ja, maar niet uitgewerkt (§ 4.2.8)	