
Onderzoek externe veiligheid bunkeren van alternatieve brandstoffen voor de zeescheepvaart

Havenbedrijf Amsterdam N.V.

Rapport Nr.: 10246009-1, Rev. 1

Document Nr.: 11HYLEZF-2

Datum: 19-04-2021



Rapporttitel:	Onderzoek externe veiligheid bunkeren van alternatieve brandstoffen voor de zeescheepvaart	DNV B.V. Energy Systems
Klant:	Havenbedrijf Amsterdam N.V., Postbus 19406 1000 GK Amsterdam Nederland	Risk Management Advisory Zwolseweg 1 2994 LB Barendrecht Nederland
Klantcontact:	Henri van der Weide	Tel: +31 10 2922600
Datum uitgifte:	19-04-2021	btw nr.: NL008585635B01
Project Nr.:	10246009 & 10288905	
Organisatie unit:	Risk Management Advisory Rotterdam	
Rapport Nr.:	10246009-1, Rev. 1	
Document Nr.:	11HYLEZF-2	

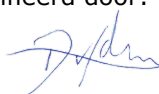
Doel: onderzoek naar de externe veiligheid (bepalen van plaatsgebonden risico en aandachtsgebieden) van het bunkeren van toekomstige alternatieve brandstoffen voor de zeescheepvaart zoals methanol, ammoniak en waterstof.

Opgesteld door:



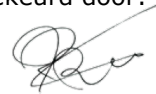
Niek Wessels
Consultant

Geverifieerd door:



Dennis van der Meulen
Senior Consultant

Goedgekeurd door:



Rob van der Spek
Head of Risk Management Advisory NL,
digital lead region CEMEIA

Copyright © DNV 2021. All rights reserved. Unless otherwise agreed in writing: (i) This publication or parts thereof may not be copied, reproduced or transmitted in any form, or by any means, whether digitally or otherwise; (ii) The content of this publication shall be kept confidential by the customer; (iii) No third party may rely on its contents; and (iv) DNV undertakes no duty of care toward any third party. Reference to part of this publication which may lead to misinterpretation is prohibited. DNV and the Horizon Graphic are trademarks of DNV AS.

DNV Distribution:

- OPEN. Unrestricted distribution, internal and external.
- INTERNAL use only. Internal DNV document.
- CONFIDENTIAL. Distribution within DNV according to applicable contract.*
- SECRET. Authorized access only.

*Specify distribution: DNV Group

Rev. Nr.	Datum	Reden voor uifgifte	Opgesteld door	Geverifieerd door	Goedgekeurd door
A	13-01-2021	Conceptrapport	N. Wessels	D. van der Meulen	R. van der Spek
0	12-03-2021	Finaal rapport, commentaar Havenbedrijf Amsterdam verwerkt	N. Wessels	D. van der Meulen	R. van der Spek
1	19-04-2021	10 ⁻⁵ /jaar PR-afstanden toegevoegd	N. Wessels	D. van der Meulen	R. van der Spek

Inhoudsopgave

MANAGEMENTSAMENVATTING.....	1	
1	INLEIDING.....	5
1.1	Doelstellingen	5
1.2	Scope beperkingen	5
1.3	Rapportstructuur	6
2	JURIDISCH KADER EN BEGRIPPEN	7
2.1	Plaatsgebonden risico	7
2.2	Aandachtsgebieden	8
2.3	Invloedsgebied	8
3	DETAILLERING VAN DE BUNKERACTIVITEITEN	9
3.1	Bunkerscenario's en configuraties	9
3.2	Technische en operationele uitgangspunten	10
4	ALGEMENE GEVAARSEIGENSCHAPPEN	12
4.1	Brandstoffen	12
4.2	Brand en explosie	14
4.3	Toxische blootstelling	15
5	METHODOLOGIE.....	16
5.1	QRA-proces	16
5.2	Richtlijnen	18
5.3	Rekenprogramma	18
5.4	Risicoberekening	18
6	QRA-STUDIE	21
6.1	Loss of Containment scenario's	21
6.2	Domino-effecten en beschadigingen	24
6.3	Modellering	27
6.4	Parameters	29
7	RESULTATEN.....	31
7.1	Plaatsgebonden risico	31
7.2	Aandachtsgebieden	32
7.3	Effectafstanden bunkeren waterstofgas	34
8	CONCLUSIE	36
9	REFERENTIES.....	39

Appendix A Plaatsgebonden risicocontouren
Appendix B Aandachtsgebieden

MANAGEMENTSAMENVATTING

Introductie

Het Havenbedrijf Amsterdam N.V. (Havenbedrijf) bereidt zich voor op een duurzame toekomst, waarbij ook het bunkeren van zeeschepen met alternatieve brandstoffen behoort. Het ship-to-ship bunkeren van LNG is al mogelijk gemaakt in de haven van Amsterdam. DNV heeft in 2017 een LNG-toolkit studie uitgevoerd voor het Havenbedrijf. In deze studie is het plaatsgebonden risico geassocieerd met voorziene LNG bunkeractiviteiten in de Haven van Amsterdam berekend om meer inzicht te krijgen in het risicoprofiel van de activiteiten. Dit is verder gebruikt ter ondersteuning van de ontwikkeling van een LNG bunkerkaart om ligplaatsen aan te wijzen waar gebunkerd mag worden. De resultaten van deze studie zijn gerapporteerd in DNV rapport: "LNG-toolkit voor het havengebied Amsterdam" (Ref. /1/).

Het Havenbedrijf wil inzicht krijgen in de benodigde milieuruimte om het bunkeren van alternatieve brandstoffen zoals methanol, ammoniak en waterstof mogelijk te maken. Ship-to-ship bunkeren valt onder het regime van de Havenverordening en niet onder het Besluit externe veiligheid inrichtingen (Bevi) of in de toekomstige Omgevingswet die van kracht wordt in januari 2022¹. Echter, vanwege het principe 'Level playing field', wil het Havenbedrijf dezelfde regels met betrekking tot externe veiligheid als voor activiteiten met gevaarlijke stoffen op het land toepassen. Daarbij is het de bedoeling dat externe veiligheidsafstanden en aandachtsgebieden (nieuw concept in de Omgevingswet 2022) bepaald worden.

Het Havenbedrijf heeft DNV gevraagd om dit onderzoek uit te voeren met als doel om de veiligheidsafstanden voor het bunkeren van alternatieve brandstoffen te vergelijken met die voor het bunkeren van LNG. De volgende brandstoffen zijn beschouwd in deze studie:

- LNG;
- Methanol;
- Ammoniak (onder druk & gekoeld);
- Gasvormig waterstof (gasvormig bij verschillende drukken en debieten);
- Vloeibaar waterstof.

Doelstellingen

De doelstellingen van deze studie zijn:

1. Bepalen van externe veiligheidsafstanden voor het ship-to-ship bunkeren van de alternatieve brandstoffen;
2. Bepalen van de aandachtsgebieden;
3. Vergelijken van de resultaten onderling en met die voor het bunkeren van LNG.

Studie aanpak

Er is bij de uitvoering van de studie zoveel mogelijk aangesloten bij de aanpak en uitgangspunten die in de LNG-toolkit studie van 2017 zijn gehanteerd. De uitgangspunten zijn afgestemd met het Havenbedrijf. Voor het berekenen van externe veiligheidsafstanden is een kwantitatieve risicostudie (QRA) opgesteld. De risico's zijn berekend in Safeti 8.3 gebruikmakend van de richtlijnen in de Handleiding

¹ En daaronder geldende Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) en Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)

Risicoberekeningen Bevi, versie 4.3. De aandachtsgebieden zijn berekend in Safeti-NL 8.3 en zijn gebaseerd op dezelfde scenario's die opgenomen zijn in de QRA.

Resultaten en Conclusies

Uit de studie is gebleken dat het bunkeren van gasvormig waterstof niet waarschijnlijk is voor de zeevaart, gezien de lage energiedichtheid en de relatief lage bunkerdebieten die genoemd worden in de literatuur. Hierdoor wordt de duur die benodigd is voor het bunkeren onrealistisch hoog om aan de energievraag te voldoen. Vanwege deze reden zijn voor het bunkeren van gasvormig waterstof, waarbij uitgegaan is van een laag debiet uit de literatuur (60 g/s), geen risicocontouren berekend. Om toch inzicht te krijgen in hoe groot de externe veiligheidsafstand maximaal zou kunnen worden (ongeacht de bunkerduur), zijn in plaats daarvan effectafstanden berekend.

Er is echter een partij die claimt dat gasvormig waterstof gebunkerd kan worden met 3.000 kg/uur zonder dat daarbij problemen ontstaan door snelle opwarming van het opslagsysteem door adiabatische compressie. Deze claim is verder niet onderzocht op haalbaarheid. Echter, indien dergelijke bunkerdebieten haalbaar zijn, is het wel nuttig om inzicht te krijgen in de risicoafstanden omdat dan de bunkerduur realistischer is. Dit wil niet zeggen dat het dan wel aannemelijker wordt dat zeeschepen gebunkerd worden met dit hoge debiet gezien de lage energiedichtheid en de benodigde bunkervolumes.

Plaatsgebonden risico / externe veiligheidsafstanden

Uit de resultaten voor het plaatsgebonden risico blijkt dat de externe veiligheidsafstanden (PR 10^{-6} /jaar) voor het bunkeren van methanol en gasvormig waterstof een stuk kleiner zijn (factor 3-5) dan die voor LNG. Voor gekoeld ammoniak en voor vloeibaar waterstof zijn de risicoafstanden vergelijkbaar met die voor LNG en voor ammoniak onder druk zijn de afstanden ongeveer 3 keer zo groot vanwege het ontstaan van een grote toxische wolk in geval van een breuk van de slang. De externe veiligheidsafstanden voor het bunkeren van de verschillende alternatieve brandstoffen zijn weergegeven in Tabel 0-1. De maximale effectafstand voor het bunkeren van gasvormig waterstof bij 700 bar en 1000 bar is ongeveer 50 m wanneer uitgegaan wordt dat er vanwege de lage ontstekingsenergie de directe ontstekingskans gelijk is aan 1 en altijd een fakkelbrand ontstaat (conform huidige aanname die het RIVM hanteert, zie verder paragraaf 6.4.3 en 7.3) en 100 m wanneer rekening wordt gehouden met een mogelijk vertraagde ontsteking mogelijk leidend tot een explosie². De externe veiligheidsafstand kan per definitie niet groter worden dan deze waarden, ongeacht de bunkerduur.

Als voor een bunkeroperatie een composietslang wordt gebruikt in plaats van een metalen slang zal het risico afnemen gezien de lagere faalfrequentie voor het breukscenario van een composietslang. Naar verwachting zal het berekende 10^{-5} /jaar en 10^{-6} /jaar plaatsgebonden risico met een factor 10 afnemen. Daarom kan ter indicatie de berekende 10^{-5} per jaar PR-contour gebruikt worden om de externe veiligheidsafstand te bepalen voor het bunkeren met een composietslang. De PR 10^{-5} /jaar afstanden zijn opgenomen in Tabel 0-1.

² De juistheid van de directe ontstekingskans van gasvorming waterstof is recent in het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma (WVIP) in opspraak gekomen naar aanleiding van een explosie die heeft plaatsgevonden bij een waterstoftankstation in Noorwegen. Dit incident suggereert dat vertraagde ontstekingen (en explosies) mogelijk wel relevant zijn om te modelleren in de QRA.

Tabel 0-1: Plaatsgebonden risicoafstanden (afstand tot 10⁻⁶ en 10⁻⁵ per jaar PR-contour)

Bunkerscenario	Afstand tot 10 ⁻⁶ /jaar PR-contour		Afstand tot 10 ⁻⁵ /jaar PR-contour	
	Laag debiet (400 m ³ /u) ^[1]	Hoog debiet (1000 m ³ /u) ^[1]	Laag debiet (400 m ³ /u) ^[1]	Hoog debiet (1000 m ³ /u) ^[1]
	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)
LNG (-146 °C)	321	- [2]	210	- [2]
LNG (-159 °C)	231	344	188	285
Methanol	68	98	56	85
Ammoniak (gekoeld)	255	427	153	246
Ammoniak (onder druk)	793	973	405	556
Waterstof (vloeibaar)	214	273	159	198
Waterstof (gasvormig) – (3 t/u)	87	- [2]	87 ^[3]	- [2]
Waterstof (gasvormig) – 700 bar (60 g/s)	- [2]	- [2]	- [2]	- [2]
Waterstof (gasvormig) – 1000 bar (60 g/s)	- [2]	- [2]	- [2]	- [2]

[1] Bunkerdebieten gelden voor de vloeibare brandstoffen. Het debiet voor de gasvormige brandstoffen is weergegeven in de scenarienaam

[2] Uitleg bij de tabel is te vinden onder Tabel 7-1 in paragraaf 7.1

[3] Voor het bunkeren van waterstof met 3 ton per uur is in de berekeningen uitgegaan van een hoge jaarlijkse bunkerduur waardoor de plaatsgebonden risicocontour van 10⁻⁵/jaar vrijwel even groot is als de 10⁻⁶/jaar contour en het invloedsgebied (zie ook Appendix A)

Aandachtsgebieden

Aandachtsgebieden zijn gebieden die zichtbaar maken waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen onvoldoende beschermd zijn tegen de gevolgen van ongevallen met gevaarlijke stoffen. Er wordt in de nieuwe Omgevingswet 2022 onderscheid gemaakt tussen drie soorten aandachtsgebieden:

- Brandaandachtsgebied;
- Explosieaandachtsgebied;
- Gifwolkaandachtsgebied.

In Tabel 0-2 zijn de maximale afstanden (gemeten vanaf de bunkerslang) voor de aandachtsgebieden weergegeven. Uit de resultaten blijkt dat de aandachtsgebieden voor ammoniak veruit het grootste zijn vanwege het grote toxische effect. De aandachtsgebieden voor het bunkeren van LNG zijn in dezelfde orde van grootte als die voor vloeibaar waterstof. De aandachtsgebieden voor het bunkeren van methanol en gasvormig waterstof zijn 3-6 keer zo klein in vergelijking met LNG. Volgens de huidige inzichten voor het berekenen van de risico's van gasvormig waterstof zijn explosieaandachtsgebieden eigenlijk niet van toepassing voor het bunkeren van gasvormig waterstof omdat het RIVM stelt dat de directe ontstekingskans voor de continue uitstroming van waterstofgas gelijk is aan 1 en dat daarom geen explosie kan optreden (zie ook hierboven). Vanwege deze reden zijn in Tabel 0-2 geen afstanden voor explosieaandachtsgebieden voor het bunkeren van gasvormig waterstof opgenomen. Echter, mocht dit inzicht in de toekomst wijzigen en explosies mogelijk wel relevant zijn om te beschouwen, dan is het explosieaandachtsgebied voor het bunkeren van gasvormig waterstof ongeveer 110-150 m voor de beschouwde bunkerscenario's in deze studie.

Tabel 0-2: Maximale afstand vanaf bunkerslang tot grens aandachtsgebied

Brandstof	Debiet	Afstand aandachtsgebied (m)		
		Brand	Explosie	Toxisch
LNG	400 m ³ /h (-146 °C)	249	274	- [1]
LNG	400 m ³ /h (-159 °C)	330	295	- [1]
Methanol	400 m ³ /h	102	- [1]	22
Ammoniak (gekoeld)	400 m ³ /h	- [1]	- [1]	1446
Ammoniak (onder druk)	400 m ³ /h	- [1]	- [1]	1478
Waterstof (vloeibaar)	400 m ³ /h	239	283	- [1]
Waterstof (gasvormig)	3 t/u	87	- [1]	- [1]
Waterstof (gasvormig)	700 bar (60 g/s)	55	- [1]	- [1]
Waterstof (gasvormig)	1000 bar (60 g/s)	55	- [1]	- [1]
LNG	1000 m ³ /u	448	229	- [1]
Methanol	1000 m ³ /u	154	- [1]	34
Ammoniak (gekoeld)	1000 m ³ /u	- [1]	- [1]	2624
Ammoniak (onder druk)	1000 m ³ /u	- [1]	- [1]	2060
Waterstof (vloeibaar)	1000 m ³ /u	324	338	- [1]

[1] De onderbouwing waarom geen afstanden zijn berekend is te vinden onder Tabel 7-3 in paragraaf 7.2

De resultaten uit dit onderzoek geven een eerste inzicht in de externe veiligheid van het bunkeren van alternatieve brandstoffen naar zeeschepen en de benodigde milieuruimte waar rekening mee moet worden gehouden. Er is echter nog veel onbekend over hoe het bunkeren van deze brandstoffen er precies uit gaat zien. Het wordt daarom aanbevolen om de uitgangspunten en de aannames in de toekomst (wanneer de markt verder ontwikkeld is) tegen het licht te houden en indien nodig te actualiseren in het kader van bijvoorbeeld de ontwikkeling van bunkerkaarten.

1 INLEIDING

Het Havenbedrijf Amsterdam N.V. (Havenbedrijf) bereidt zich voor op een duurzame toekomst, waarbij ook het bunkeren van zeeschepen met alternatieve brandstoffen behoort. Het ship-to-ship bunkeren van LNG is al mogelijk gemaakt in de haven van Amsterdam. DNV heeft in 2017 een LNG-toolkit studie uitgevoerd voor het Havenbedrijf. In deze studie is het plaatsgebonden risico geassocieerd met voorziene LNG bunkeractiviteiten in de Haven van Amsterdam berekend om meer inzicht te krijgen in het risicoprofiel van de activiteiten. Dit is verder gebruikt ter ondersteuning van de ontwikkeling van een LNG bunkerkaart om ligplaatsen aan te wijzen waar gebunkerd mag worden. De resultaten van deze studie zijn gerapporteerd in DNV rapport: "LNG-toolkit voor het havengebied Amsterdam" (Ref. /1/).

Het Havenbedrijf wil inzicht krijgen in de benodigde milieuruimte om het bunkeren van alternatieve brandstoffen zoals methanol, ammoniak en waterstof mogelijk te maken. Ship-to-ship bunkeren valt onder het regime van de Havenverordening en niet onder het Besluit externe veiligheid inrichtingen (Bevi) of in de toekomstige Omgevingswet die van kracht wordt in januari 2022³. Echter, vanwege het principe 'Level playing field', wil het Havenbedrijf dezelfde regels met betrekking tot externe veiligheid als voor activiteiten met gevaarlijke stoffen op het land toepassen. Daarbij is het de bedoeling dat externe veiligheidsafstanden en aandachtsgebieden (nieuw concept in de Omgevingswet 2022) bepaald worden.

Het Havenbedrijf heeft DNV gevraagd om dit onderzoek uit te voeren met als doel om de veiligheidsafstanden voor het bunkeren van alternatieve brandstoffen te vergelijken met die voor het bunkeren van LNG. Het bunkeren van de volgende brandstoffen is beschouwd in deze studie:

- LNG;
- Methanol;
- Ammoniak (onder druk & gekoeld);
- Gasvormig waterstof (gasvormig bij verschillende drukken en debieten);
- Vloeibaar waterstof.

Er is bij de uitvoering van de studie zoveel mogelijk aangesloten bij de aanpak en uitgangspunten die in de LNG-toolkit studie zijn gehanteerd.

1.1 Doelstellingen


De doelstellingen van deze studie zijn:

1. Bepalen van externe veiligheidsafstanden middels een QRA voor het ship-to-ship bunkeren van de alternatieve brandstoffen;
2. Bepalen van de aandachtsgebieden;
3. Vergelijken van de resultaten onderling en met die voor het bunkeren van LNG.

1.2 Scope beperkingen

Bij het bepalen van de externe veiligheidsafstanden gaat het alleen om het bepalen van het plaatsgebonden risico en daarmee de afstand tot de 10^{-6} /jaar risicocontour. Het groepsrisico wordt niet als afweging meegenomen bij de aanwijzing van de ligplaatsen in het havengebied vanwege het karakter

³ En daaronder geldende Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) en Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl)



van het gebied en de relatief lage aanwezigheid van hoeveelheden mensen. Daarnaast wordt het groepsrisico in de nieuwe Omgevingswet vervangen door aandachtsgebieden.

Externe domino-effecten (zoals falende windturbines) en beschadigingen (aanvaring) worden niet beschouwd. Het aanvaringsrisico bij de LNG-toolkit studie had een beperkte bijdrage op het totaal risico. Het Havenbedrijf heeft aangegeven dat hier niet gaat om in een detail uitgevoerde studie, maar om met enige marge te kunnen aangeven wat de verhoudingen zullen zijn tussen LNG en de alternatieve brandstoffen. Daarom zijn de aanvaringsrisico's in deze studie niet beschouwd.

De risicoresultaten dienen zoveel mogelijk locatie-onafhankelijk te zijn, zodat deze voor het gehele havengebied van Amsterdam toepasbaar zijn. Er wordt geen rekening gehouden met locatie-specifieke omstandigheden die het risico lokaal kunnen verhogen. Hierbij kan gedacht worden aan aanvaringen, externe domino-effecten zoals falende windturbines, neerstortende vliegtuigen (aanvliegroutes van Schiphol) en gevaren van bedrijven in de omgeving die met gevaarlijke stoffen werken.

Bij het vaststellen van het plaatsgebonden risico wordt verder geen onderzoek verricht naar de bepalende scenario's, de risico drivers (parameters) en effect van mitigerende maatregelen.

Er worden geen specifieke gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in het effect van bepaalde parameters op het risico. Er is echter bij het vaststellen van de scenario's/parameters wel rekening gehouden met het feit dat bijvoorbeeld bunkeren met verschillende debieten kan plaatsvinden. Het is bekend van de LNG-toolkit van 2017 dat het bunkerdebit veel invloed heeft op berekende risico, zodoende is hierin onderscheid gemaakt in de karakterisering van de bunkerscenario's. Er is voor de vloeibare brandstoffen uitgegaan van een hoog en laag bunkerdebit.

De berekening van het risico ten gevolge van het transport van de brandstoffen over water valt buiten de scope van deze studie.

1.3 Rapportstructuur

Het rapport heeft de volgende structuur:

- Hoofdstuk 2 gaat in op het juridisch kader en geeft een toelichting op enkele relevante begrippen;
- De uitgangspunten voor de bunkeractiviteiten zijn beschreven en uitgewerkt in hoofdstuk 3;
- Een beschrijving van de algemene gevaareigenschappen van de verschillende brandstoffen is gegeven in hoofdstuk 4;
- De aanpak van de studie (methodologie) is uitgewerkt in hoofdstuk 5;
- Hoofdstuk 6 geeft verder invulling aan de stappen die gevolgd zijn om het risico te berekenen in een QRA-studie (scenariodefinitie, kans van optreden, maatregelen, modellering en parameters);
- De plaatsgebonden risicoresultaten en de aandachtsgebieden (met bijbehorende afstanden) zijn gepresenteerd in hoofdstuk 7;
- Het rapport sluit af met een conclusie (hoofdstuk 8) en een lijst met referenties (hoofdstuk 9).

2 JURIDISCH KADER EN BEGRIPPEN

De risiconormen voor externe veiligheid voor bedrijven met gevaarlijke stoffen zijn wettelijk vastgelegd in het Bevi. Het Bevi heeft als doel zowel individuele als groepen burgers een minimum beschermingsniveau te garanderen tegen een ongeval met gevaarlijke stoffen⁴. Primair verplicht het Bevi de bevoegd gezagen (gemeenten en provincies) afstand te houden tussen gevoelige (kwetsbaar of beperkt kwetsbaar) objecten en risicovolle bedrijven.

Risicovolle activiteiten die op het water plaatsvinden binnen een havengebied en niet binnen een inrichting, zoals ship-to-ship (STS) bunkeren, vallen strikt genomen niet onder het Bevi. Het bevoegd gezag in deze is het Centraal Nautisch Beheer Noordzeekanaalgebied die goedkeuring of een vergunning moet verlenen voor de activiteit. Er is dus geen juridisch kader voor het berekenen van de risico's voor deze activiteiten. De normen in het Bevi kunnen uiteraard wel toegepast worden voor de activiteiten, indien de risico's op een vergelijkbare wijze berekend worden als voor een inrichting. Op deze wijze kan een Havenbedrijf invulling geven aan de ruimtelijke ordening door de minimale afstand te bepalen tussen de kwetsbare objecten en de risicovolle activiteit. Op deze manier wordt een minimum beschermingsniveau gegarandeerd.

De normen in het Bevi zijn niet effectgericht maar gebaseerd op een kans benadering, de kans om te overlijden als direct gevolg van een ongeval met gevaarlijke stoffen. Gezondheidsschade, kans op verwonding of materiële schade zijn daarbij niet betrokken. Het Bevi onderscheidt twee vormen van risico: het plaatsgebonden risico (PR) en het groepsrisico (GR). In de toekomst zal in de nieuwe omgevingswet het groepsrisico worden vervangen door aandachtsgebieden. Het groepsrisico wordt verder buiten beschouwing gelaten omdat de berekening daarvan geen onderdeel vormt van de scope van deze studie. Aandachtsgebieden worden wel berekend.

Daarnaast kent het Bevi ook nog de term invloedsgebied. Het invloedsgebied, het plaatsgebonden risico en aandachtsgebieden zijn hieronder toegelicht.

2.1 Plaatsgebonden risico

Het plaatsgebonden risico (PR), ook wel individueel risico genoemd, is de kans per jaar op een dodelijk ongeval van een persoon die zich 24 uur per dag onbeschermd in de buitenlucht bevindt op een plek buiten de inrichting, als gevolg van de letale schadelijke effecten van een ongewoon voorval (ongevalsscenario) binnen de beschouwde inrichting.

Het plaatsgebonden risico wordt weergegeven als PR-contouren. Zo laat de 10^{-6} PR-contour die plaatsen zien waar de kans op het overlijden van een persoon eens in de miljoen per jaar bedraagt. Het PR is onafhankelijk van de daadwerkelijke bevolkingsverdeling in de omgeving van de inrichting.

De Bevi-norm stelt verder dat de grenswaarde voor kwetsbare objecten (zoals woningen, ziekenhuizen, scholen, grote kantoren e.d.) 10^{-6} per jaar is. Voor beperkt kwetsbare objecten (zoals verspreid liggende woningen, kleinere kantoren, sportcomplexen e.d.) geldt een richtwaarde van 10^{-6} per jaar. Dit betekent dat er zich geen kwetsbare objecten mogen bevinden binnen de 10^{-6} PR-contour van een inrichting. Voor beperkt kwetsbare objecten dient ernaar gestreefd te worden dat deze objecten niet binnen de 10^{-6} PR-contour vallen; een hoger risico kan toegestaan worden, wanneer dit voldoende gemotiveerd wordt.

Kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten zijn per definitie gelegen buiten de (eigen) risicoveroorzakende Bevi-inrichting (of activiteit). Kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten die

⁴ Bron: <https://www.infomil.nl/onderwerpen/hinder-gezondheid/veiligheid/bevi-revi/hoofdpunten-bevi/> (bezocht op 17-07-2017)

onderdeel uitmaken van een andere Bevi-inrichting zoals een kantoorgebouw worden op grond van artikel 1 lid 2 van het Bevi niet als (beperkt) kwetsbaar object beschouwd voor het plaatsgebonden risico.

Onderstaande tabel geeft een overzicht van objecten welke gezien worden als kwetsbaar en beperkt kwetsbaar.

Tabel 2-1: Overzicht van kwetsbare en beperkt kwetsbare objecten

Kwetsbare objecten	Beperkt kwetsbare objecten
Woningen; Ziekenhuizen, bejaardenhuizen en verpleeghuizen; Scholen en dagopvang van minderjarigen; Kantoorgebouwen en hotels met een bruto vloeroppervlak van meer dan 1500 m ² ; Winkelcentra (meer dan 5 winkels en vloeroppervlak groter dan 1000 m ²) en winkels met een totaal vloeroppervlak van meer dan 2000 m ² ; Kampeer- en andere recreatieterreinen bestemd voor het verblijf van meer dan 50 personen gedurende meerdere aaneengesloten dagen.	Verspreid liggende woningen (Max. 2/ha); Overige kantoorgebouwen (<1500 m ²); Overige hotels en restaurants; Overige winkels; Sporthallen, sportterreinen, zwembaden en speeltuinen; Overige kampeer- en andere recreatieterreinen; Bedrijfsgebouwen; Equivalente objecten; Objecten met een hoge infrastructurele waarde.

2.2 Aandachtsgebieden

Aandachtsgebieden zijn gebieden rond activiteiten met gevaarlijke stoffen die zichtbaar maken waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen onvoldoende beschermd zijn tegen de gevolgen van ongevallen met gevaarlijke stoffen. Dat betekent dat zich, bij een ongeval met gevaarlijke stoffen, levensbedreigende gevaren voor personen in gebouwen kunnen voordoen. Er wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten aandachtsgebieden:

- Brandaandachtsgebied;
- Explosieaandachtsgebied;
- Gifwolkaandachtsgebied.

De aandachtsgebieden maken inzichtelijk welke gevaren in een gebied kunnen optreden en waar minimaal aandacht aan moet worden besteed voor extra bescherming. Het bevoegd gezag maakt en motiveert in de omgevingsvisie en het omgevingsplan een keuze over wat voldoende veilig is en hoe gezondheid en milieu worden beschermd. Ook beoordeelt het bevoegd gezag of, en zo ja welke maatregelen nodig zijn om mensen in aandachtsgebieden voldoende te beschermen.

2.3 Invloedsgebied

Het invloedsgebied is gebaseerd op het gebied vanaf de bron tot de grootste effectafstand. De maximale 1% letaal effectafstand is de afstand tot de locatie waar een onbeschermd persoon een kans van 1% op overlijden heeft, gegeven alle mogelijke scenario's.

3 DETAILLERING VAN DE BUNKERACTIVITEITEN

Voor het ship-to-ship bunkeren van de vloeibare brandstoffen zijn de volgende twee scenario's beschouwd:

1. Ship-to-Ship bunkeren met laag debiet (400 m³/uur);
2. Ship-to-Ship bunkeren met hoog debiet (1000 m³/uur).

Deze scenario's zijn niet toepasbaar voor het bunkeren van gasvormig waterstof, omdat de debieten veel hoger zijn dan wat realistisch haalbaar is voor gasvormig waterstof. In het Marigreen rapport "Perspectives for the use of hydrogen as fuel in inland shipping" (Ref. /2/) wordt een maximaal bunkerdebiet voor gasvormig waterstof genoemd van 60 g/s. Bij hogere bunkerdebieten ontstaan problemen met de snelle opwarming van het opslagsysteem door adiabatistische compressie.

Er is echter een partij die claimt dat gasvormig waterstof gebunkerd kan worden met 3.000 kg/uur zonder dat daarbij problemen ontstaan door adiabatistische compressie. Deze claim is verder niet onderzocht op haalbaarheid.

Voor het bunkeren van gasvormig waterstof zijn drie scenario's beschouwd:

1. Bunkeren van gasvormig waterstof (700 bar) met 60 g/s;
2. Bunkeren van gasvormig waterstof (1000 bar) met 60 g/s;
3. Bunkeren van gasvormig waterstof (350 bar) met 3 t/uur;

Gezien de lage energiedichtheid en de relatief lage bunkerdebieten die genoemd worden in de literatuur wordt de duur die benodigd is voor het bunkeren onrealistisch hoog om aan de energievraag te voldoen. Vanwege deze reden zijn voor de eerste twee bunkerscenario's voor gasvormig waterstof, waarbij uitgegaan is van een laag debiet uit de literatuur (60 g/s), geen risicocontouren berekend. Om toch inzicht te krijgen in hoe groot de externe veiligheidsafstand maximaal zou kunnen worden (ongeacht de bunkerduur), zijn daarom effectafstanden berekend.

Echter, voor het hogere bunkerdebiet (3 t/uur), is het wel nuttig om inzicht te krijgen in de risicoafstanden omdat bij dit debiet de bunkerduur realistischer is. Dit wil niet zeggen dat het dan wel aannemelijk wordt dat zeeschepen gebunkerd worden met dit hoge debiet, gezien de lage energiedichtheid en de benodigde bunkervolumes.

Om de risicocontouren te kunnen bepalen is het nodig de activiteiten te karakteriseren. De technische en operationele uitgangspunten en parameters (slang diameters, pompdebiet, druk, ESD-systeem, ...) zijn hierbij van belang. In onderstaande paragrafen worden de bunkeractiviteiten verder gedetailleerd. De beschouwde configuraties, bunkerscenario's en technische/operationele uitgangspunten worden beschreven.

3.1 Bunkerscenario's en configuraties

Er is voor het bunkeren van de verschillende brandstoffen onderscheid gemaakt tussen twee bunkerscenario's per brandstof. Per brandstof is een 'laag debiet' en 'hoog debiet' scenario gedefinieerd waarbij onderscheid is gemaakt in het bunkerdebiet, slanggrootte en bunkerduur. De risico's van alle bunkerscenario's worden apart berekend. De technische en operationele uitgangspunten (e.g. debieten) die gehanteerd zijn voor de scenarioparameters van elk bunkerscenario worden beschreven in de volgende paragraaf.

3.2 Technische en operationele uitgangspunten

De benodigde operationele en technische uitgangspunten en parameters voor de risicoberekening zijn vastgelegd in overleg met het Havenbedrijf Amsterdam. De studie-uitgangspunten voor het LNG-bunkeren zijn overgenomen uit de Toolkit studie uit 2017 (Ref. /1/). De uitgangspunten met betrekking tot de aanwezigheid van technische maatregelen (repressieve systemen) zijn in paragraaf 6.1.3 beschreven.

Om de risico's te berekenen van het bunkeren zijn gegevens nodig van de bunkeroperatie. Enkele relevante parameters zijn opgenomen in onderstaande tabellen. In werkelijkheid zijn de waarden voor de parameters sterk afhankelijk van het ontwerp van het bunkerschip en ontvangende schip en de specifieke details van de bunkeroperatie. In de praktijk is er dus sprake van een range in waarden. Per risicoberekening kan alleen één (conservatieve) waarde per parameter aangenomen worden. Dit is om het aantal risicoberekeningen te beperken en om het risico niet te onderschatten voor mogelijke toekomstige situaties.

Tabel 3-1: Uitgangspunten voor de verschillende bunkeroperaties

	Hoog debiet				Laag debiet			
	Druk (barg)	Temp (°C)	Debiet (m ³ /uur)	Interne slang diam (mm)	Druk (barg)	Temp (°C)	Debiet (m ³ /uur)	Interne slang diam (mm)
LNG	0,224	-159*	1000	200	0,224	-159	400	150
Methanol	atm	20	1000	200	atm	20	400	150
Ammoniak (druk)	9	20	1000	200	9	20	400	150
Ammoniak (gekoeld)	atm	-34	1000	200	atm	-34	400	150
Waterstofgas 700 bar (60 g/s)	-	-	-	-	700	20	5,65**	25
Waterstofgas 1000 bar (60 g/s)	-	-	-	-	1000	20	4,54**	25
Waterstofgas - (3 t/u)	-	-	-	-	380	20	122	50
Vloeibaar waterstof	atm	-253	1000	200	atm	-253	400	150

* In de LNG-toolkit is ook een situatie met -146 °C berekend. Deze is opnieuw berekend in deze studie.

**debiet is gebaseerd op 60 g/s (Ref. /2/)

Verder is er voor alle bunkeroperaties uitgegaan van bunkeren met een metalen bunkerslang. Om een betekenisvolle vergelijking tussen de risicoafstanden van de verschillende brandstoffen te kunnen maken is er aangenomen dat er op jaarbasis voor alle brandstoffen een equivalente hoeveelheid energie wordt gebunkerd. Aangezien de verschillende brandstoffen verschillende energiedichtheden hebben betekent dit dat de bunkerduur tussen de verschillende brandstoffen afwijkt. Er is geen rekening gehouden met andere parameters (zoals bijvoorbeeld rendement van de motor) die invloed kunnen hebben op hoe vaak een schip in werkelijkheid gebunkerd moet worden.

Er wordt uitgegaan van 250 uur LNG bunkeren per jaar. De bunkerduur voor de alternatieve brandstoffen is bepaald zodat de hoeveelheid energie die gebunkerd wordt voor de alternatieve brandstof, gelijk is aan de hoeveelheid energie die gebunkerd wordt aan LNG. Gezien het lage bunkerdebiet voor gasvormig waterstof (60 g/s) resulteert deze aanpak in een hele hoge bunkerduur voor het bunkeren van gasvormig waterstof met 60 g/s (>>8.765 uur per jaar). Daarom wordt voor gasvormig waterstof alleen gekeken naar effectafstanden in plaats van naar het plaatsgebonden risico (benodigd aantal uur bunkeren per jaar is langer dan het aantal uur in een jaar).

Tabel 3-2: bunkerduur voor equivalente hoeveelheid gebunkerde energie

	Energie- dichtheid ^[1] MJ/l	Energie factor ^[2] (-)	Hoog debiet		Laag debiet	
			Debiet factor ^[2] (-)	Bunkerduur ^[2] (uur/jaar)	Debiet factor ^[2] (-)	Bunkerduur ^[2] (uur/jaar)
LNG	22,4	1	1	250	1	250
Methanol	15,6	0,70	1	359	1	359
Ammoniak (druk)	12,7	0,57	1	442	1	442
Ammoniak (gekoeld)	11,3	0,50	1	495	1	495
Waterstofgas 700 bar (60 g/s)	4,6	0,20	-	-	0,014	86.605 ^[3]
Waterstofgas 1000 bar (60 g/s)	5,7	0,25	-	-	0,011	86.605 ^[3]
Waterstofgas - (3 t/u)	3,0	0,13	-	-	0,30	6.236
Vloeibaar waterstof	8,5	0,38	1	660	1	660

[1] Excl. het volume van het opslagsysteem

[2] De bunkerduur voor de alternatieve brandstoffen is bepaald op basis van een equivalente gebunkerde energie hoeveelheid ten opzichte van de LNG-scenario's. Om dit te bepalen zijn de "energiefactor" en de "debietfactor" gedefinieerd. De energiefactor is de energiedichtheid van een alternatieve brandstof gedeeld door die van LNG. De debietfactor is het debiet van de alternatieve brandstof gedeeld door het debiet voor het bunkeren van LNG. Door de bunkerduur voor LNG te delen door deze twee factoren wordt een bunkerduur berekend waarbij er dezelfde hoeveelheid energie is gebunkerd voor de alternatieve brandstof als voor LNG.

[3] Vanwege het lage bunkerdebiet is het aantal bunker uren per jaar niet realistisch. Er is voor deze scenario's geen PR berekend, maar alleen maar effectafstanden. De plaatsgebonden risicocontour kan nooit groter zijn dan de maximale effectafstand. De effectafstanden kunnen daarom beschouwd worden als de maximale veiligheidsafstand.

4 ALGEMENE GEVAARSEIGENSCHAPPEN

Dit hoofdstuk beschrijft wat er kan gebeuren als de brandstoffen vrijkomen in de atmosfeer en welke effecten er dan op kunnen treden. Er worden de algemene gevaareigenschappen van de brandstoffen beschreven. Daarna wordt ingegaan op de verschillende effecten die kunnen optreden zoals brand, explosie en toxische blootstelling.

4.1 Brandstoffen

4.1.1 LNG

De samenstelling van LNG varieert en is afhankelijk van het gasveld of andere bron waaruit het is gewonnen. LNG bestaat voornamelijk uit methaan (Aardgas). Daarnaast bevat LNG hogere koolwaterstoffen (zoals ethaan) en inerte gassen (zoals stikstof).

De algemene gevaareigenschappen voor LNG zijn beschreven in PGS 33-1 (Ref. /3/). Enkele relevante eigenschappen zijn hieronder overgenomen.

Aardgas is niet giftig, er is geen grenswaarde vastgesteld maar het levert in hoge concentraties verstikkingsgevaar op (door verdringing van de lucht). Een aardgas/lucht-mengsel is onder atmosferische omstandigheden ontsteekbaar tussen een volumepercentage van 4,4 vol% en 16,5 vol% aardgas in lucht (PGS 33-1 geeft grenzen tussen 4.5 vol% en 14 vol%).

Aardgas is van nature reukloos. CNG heeft wettelijk verplicht een geurstof toevoeging nodig om de eindgebruikers te waarschuwen voor eventuele lekkages. Bij LNG is het niet mogelijk om een geurstof toe te voegen.

Aardgas is onder atmosferische omstandigheden bij omgevingstemperatuur lichter dan lucht en zal daarom opstijgen en vervliegen als het vrijkomt. Echter, als LNG vrijkomt zal het gas zich eerst gedragen als een zwaar gas en bij de grond of het wateroppervlak blijven. Het zal zich dan ophopen in laaggelegen en slecht geventileerde plaatsen, daarbij de omgevingslucht verdringen en verstikking veroorzaken. De koude damp zal pas beginnen op te stijgen als deze door de buitenlucht tot boven – 113 °C wordt opgewarmd.

Door de lage temperatuur zal de huid bevriezen (zogenoemde 'cold burn') bij contact met de koude vloeistof of damp. Inademing van de koude damp kan bevriezing van de longen en luchtwegen veroorzaken. Materialen kunnen bij lage temperatuur bros worden en hun sterkte en daarmee functionaliteit verliezen.

Wanneer LNG vrijkomt op een ondergrond of in het water, zal dit effect hebben op de snelheid waarmee LNG expandeert naar gasvorm. Er zal een intensief kookproces plaatsvinden waar het LNG het oppervlak raakt. Tijdens de verdamping van grotere hoeveelheden vrijgekomen LNG zullen de koude dampen de waterdamp in de buitenlucht doen condenseren. Dit kan gepaard gaan met vorming van een witte mistwolk, totdat het gas opwarmt, verdunt en oplost in de buitenlucht.

Wanneer LNG vrijkomt in het water (of in contact komt met water) kunnen er explosieve krachten optreden. Dit verschijnsel heet 'snelle faseovergang' (Rapid Phase Transition, RPT). Bij RPT vindt geen verbranding plaats. De drukgolf die ontstaat door kleine hoeveelheden vloeibaar materiaal die instantaan verdampen wanneer oververhitting ontstaat door vermenging met water, zal zich met de snelheid van het geluid voortbewegen en vervallen zoals elke andere drukpuls. Er wordt doorgaans geen specifieke modelering uitgevoerd voor RPT, omdat het onwaarschijnlijk is dat de effecten van RPT significant bijdragen aan het totale gevaarbereik van een groot lek dat reeds heeft plaatsgevonden.

4.1.2 Methanol

Methanol (methylalcohol) is een kleurloze, vluchtige vloeistof. Methanol is brandbaar met een Lower Flammable Limit (LFL) van 7,3 vol% en een Upper Flammable Limit (UFL) van 36 vol%. Methanol is voornamelijk giftig bij inname met als gevolg blindheid en eventueel de dood. Alhoewel methanol ook geclassificeerd wordt als giftig bij inhalatie (H-zin H331), is de mate van toxiciteit bij inhalatie minimaal⁵. Methanol heeft dan ook een zeer hoge Levensbedreigende (LBW)-waarde (1 uur blootstelling) van 20.248 ppm dat aangeeft dat een persoon blootgesteld moet worden aan hoge concentraties voordat er sterfte kan optreden. Het RIVM heeft geen probitrelatie voor methanol vastgesteld en toxische risico's worden daarom niet beschouwd in Nederlandse kwantitatieve risicoanalyses (QRA's). Er is echter wel een probitrelatie beschikbaar in het rekenprogramma Safeti. Vanwege het bestaan van een probitrelatie, een LBW-waarde en de classificering met H-zin H331 wordt methanol ook beschouwd (naast brandbaar) als toxische stof in deze studie.

4.1.3 Ammoniak

De algemene gevaarseigenschappen voor ammoniak zijn beschreven in PGS 12 (Ref. /4/). Enkele relevante eigenschappen zijn hieronder overgenomen.

Ammoniak is een kleurloos, giftig gas met een sterk prikkelende geur. Het gas zelf is lichter dan lucht (dampdichtheid 0,6 t.o.v. lucht), maar wanneer het vrijkomt in de lucht kunnen dampen ontstaan die zwaarder zijn dan lucht (zie verder hieronder). Door samenpersen of afkoelen kan het gas tot vloeistof worden verdicht. Tot vloeistof verdicht ammoniak kan bij contact met de huid bijtende irritatie en ernstige brandwonden veroorzaken.

De werking van ammoniakdampen op de ademhalingsorganen blijft meestal beperkt tot de bovenste luchtwegen, omdat het gas goed in water oplost en bovendien sterke reflexen opwekt waardoor men onmiddellijk de adem inhoudt. Bij zeer hoge concentraties kan de ammoniak in diepere luchtwegen geraken. De gevolgen zijn dan zeer ernstig, zoals aantasting van de longen (longoedeem) met mogelijk sterfte tot gevolg.

Bij het vrijkomen van tot vloeistof verdicht ammoniakgas, zal door de aanwezigheid van waterdamp in de lucht (zoals bij hoge luchtvochtigheidsgraad), dampen worden gevormd die zwaarder zijn dan lucht. Deze toxische dampen kunnen zich op grondniveau of in laag gelegen gebieden met een slechte ventilatie verspreiden waardoor mensen mogelijk blootgesteld worden aan schadelijke (lethale) concentraties. In het geval van vrijkomen van grote hoeveelheden ammoniak (zoals in de scenario's in deze studie), kan dus een grote ammoniakwolk ontstaan die giftig is bij inhalatie tot op grote afstanden vanaf het scenario. Omdat deze wolk zwaarder is dan lucht en zich op grondniveau verspreid, kunnen mensen blootgesteld worden aan hoge concentraties en kan er sprake zijn van een hoge kans op sterfte.

Ammoniak is niet erg brandbaar. Een koudgekookte ammoniakplas brandt niet op een zichzelf onderhoudende manier, zoals de meeste koolwaterstoffen. Dit wordt veroorzaakt doordat er onvoldoende warmtestraling vanuit de vlammen in de pool terecht komt. De vlammen zijn erg doorzichtig. Wanneer er op een andere manier warmte wordt toegevoerd, bijvoorbeeld uit de grond of met water, kan er voldoende ammoniak verdampen om de brand in stand te houden. Een eventuele ammoniakbrand geeft slechts een beperkt gevaar, omdat slechts weinig warmte-uitstraling van de brand op de omgeving plaatsvindt. De kans op het ontstaan van brand en explosie bestaat vrijwel uitsluitend in slecht geventileerde ruimten. De minimumontstekingsenergie bedraagt 680 mJ (dit is ca. 10 000 × zo groot als voor waterstof).

⁵ "Ernstige intoxicatie met methanol door inhalatie" <https://www.ntvg.nl/system/files/publications/2006112980001a.pdf>

In kwantitatieve risicostudies worden daarom alleen de toxische effecten van ammoniak beschouwd. Ammoniak heeft een LBW-waarde (1 uur blootstelling) van 1.495 ppm.

4.1.4 Waterstof

De algemene gevaarseigenschappen voor waterstof zijn beschreven in PGS 35 (Ref. /5/). Enkele relevante eigenschappen zijn hieronder overgenomen.

Waterstof is een brandbaar gas met een LFL-concentratie van 4,0 vol% en een UFL-concentratie van 75 vol% in de lucht. Waterstof is niet toxisch. Waterstof dringt vanwege het kleine molecuul bijna overal doorheen, is lichter dan lucht (ongeveer 14 keer) en is tevens geurloos. Er is weinig energie nodig om het gas te doen ontsteken. Afhankelijk van de druk en de uitstroomsnelheid kan waterstof met zeer lage energie worden ontstoken, waardoor een fakkelbrand ontstaat. Daarnaast is bij ophoping van waterstof in besloten/omsloten gebieden een explosie mogelijk.

Waterstof heeft een kleurloze, nauwelijks zichtbare vlam en heeft vrijwel geen warmtestraling. Een waterstofbrand is niet goed door de mens te signaleren. Bij een grotere lekkage in een leiding of slang bij een druk van 700 bar kunnen in het geval van brand nagenoeg onzichtbare en krachtige fakkelbranden voorkomen.

Waterstof heeft een hoge ontstekingskans vanwege de lage ontstekingsenergie. Om waterstof te kunnen ontsteken, is slechts 0,02 mJ energie nodig. De kans op directe ontsteking is bij vloeibare waterstof iets lager dan bij gasvormige waterstof. Vloeibare waterstof wordt thermisch geïsoleerd bewaard en onder lage druk, zodat de snelheid en bijbehorende energie waarmee waterstof uitstroomt, lager zal zijn en vertraagde ontsteking kan plaatsvinden. Koude waterstof kan na verdamping alsnog op afstand ontsteken.

Vloeibaar waterstof is een cryogene vloeistof. Waterstof wordt onder druk gezet en gekoeld tot min 252,8 °C (bij 1013 mbar). Bij blootstelling aan de omgevingslucht kunnen zuurstof en stikstof uit de omgevingslucht condenseren. Vloeibare waterstof kan bij zeer snelle verdamping zorgen voor bevroeringsgevaar. Tevens kan het vrijkomen van vloeibaar waterstof op water leiden tot een RPT net zoals voor LNG (zie paragraaf 4.1.1 hierboven).

4.2 Brand en explosie

Het vrijkomen van brandbare stoffen kan brand en explosie tot gevolg hebben. Door vermenging van het gas met lucht wordt een brandbaar gas ontvlambaar, wanneer de concentratie in lucht tussen de LFL en UFL bedraagt. Bij minder lucht is er te weinig zuurstof om een vlam te laten bestaan, terwijl bij meer lucht het gas te verdund is om te ontsteken.

4.2.1 Wolkbrand

Een wolkbrand is een niet explosieve ontbranding van een brandbare gaswolk (m.a.w. concentratie in lucht is tussen LFL en UFL). Over het algemeen ontstaat een wolkbrand wanneer een gaswolk een ontstekingsbron tegenkomt (zoals een open vuur, verbrandingsmotor, vonken, e.d.). Er is dus sprake van een vertraagde ontsteking. De gaswolk ontsteekt vaak aan de rand (waar de concentratie lager is), waarna de brand terugslaat naar alle brandbare massa en vervolgens op de UFL-grens doorbrandt totdat alle massa op is. Er kunnen dus verschillende vlamfronten bestaan.

4.2.2 Fakkelbrand

Een fakkelbrand kan ontstaan wanneer een continue uitstroming van brandbaar materiaal ontsteekt. In geval van directe ontsteking ontstaat er altijd een fakkelbrand.

4.2.3 Plasbrand

Een plasbrand ontstaat wanneer een vloeibare plas brandbaar materiaal ontsteekt, dan wel wanneer de ontbrandbare gaswolk boven de plas ontsteekt. In het laatste geval zal de wolkbrand de plas doen ontsteken. Plasbranden veroorzaken een flinke warmtestraling welke afneemt naarmate de afstand tot de plas groter wordt.

4.2.4 BLEVE/vuurbal

Een vuurbal is een zeer snel verbrandingsproces, meestal geassocieerd met 'Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions' (BLEVE) welke kan optreden bij onder druk staande (kokende) vloeistoffen die instantaan vrijkomen. Dergelijke effecten zijn alleen relevant zijn bij falende opslagen onder druk op het land en niet bij het ship-to-ship bunkeren.

4.2.5 (semi-)Besloten dampwolkexplosie

Een dampwolkexplosie kan ontstaan wanneer een grote hoeveelheid gas ontsteekt in een besloten dan wel semi-besloten ruimte.

4.3 Toxische blootstelling

Zowel ammoniak als methanol zijn giftig bij inademing. Personen die langdurig worden blootgesteld aan toxische concentraties kunnen hieraan overlijden. Er dient wel opgemerkt worden dat methanol veel minder toxisch is bij inhalatie dan ammoniak en dat zelfs bij langdurige blootstelling aan hoge concentraties in de buitenlucht het niet waarschijnlijk is dat er sterfte optreedt (zie ook paragraaf 4.1.2). Bij het vrijkomen van grote hoeveelheden ammoniak vormt zich een grote toxische wolk die gepaard gaat met een hoge kans op overlijden op grote afstanden (zie paragraaf 4.1.3).

5 METHODOLOGIE

Er is bij de uitvoering van de risicoberekeningen zoveel mogelijk aangesloten bij de aanpak van de toolkit die is ontwikkeld in opdracht van het Havenbedrijf Amsterdam voor LNG (Ref. /1/). De uitgangspunten en scenario's voor LNG bunkeren zijn overgenomen uit deze studie en de risico's zijn opnieuw berekend in de nieuwste versie van Safeti (8.3)⁶.

Voor de andere brandstoffen zijn vergelijkbare uitgangspunten vastgesteld. Doordat berekeningen zijn uitgevoerd in de nieuwste versie van Safeti kunnen er kleine verschillen in de berekende risicoafstanden ontstaan. Deze aanpak volgt op grote lijnen de methodologie van een QRA. Het QRA-proces is in dit hoofdstuk op hoofdlijnen beschreven. Daarnaast zullen de gebruikte QRA-richtlijnen en rekenmethoden (waarin uitgelegd staat hoe je de risico's moet berekenen) gegeven en toegelicht worden. Voor de berekening van risico's is ook een rekenprogramma nodig. De keuze van het rekenprogramma wordt in dit hoofdstuk toegelicht. Verder wordt er ingegaan op hoe de risicoberekening wordt uitgevoerd, welke resultaten gegeneerd worden en welke analyses uitgevoerd gaan worden op de resultaten.

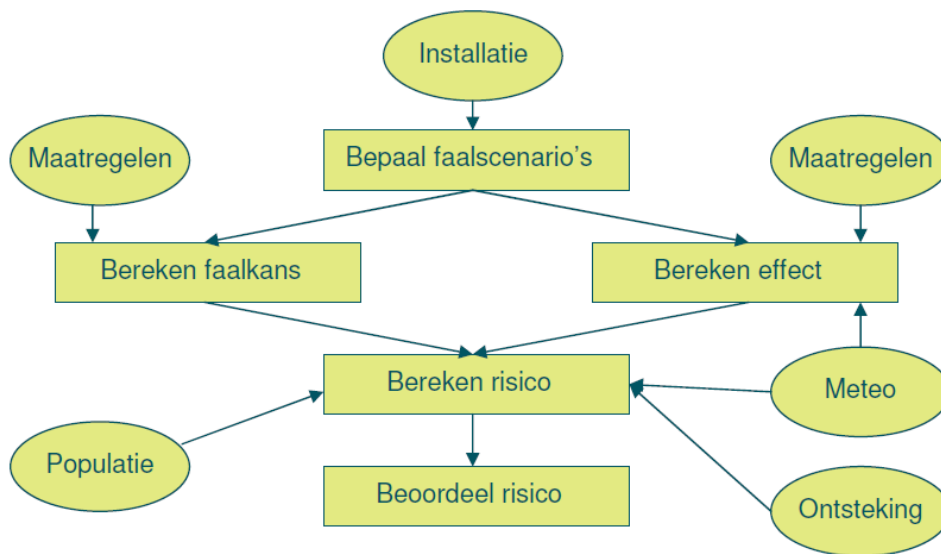
5.1 QRA-proces

Een QRA is een hulpmiddel om de risico's van het gebruiken, vervoeren en opslaan van gevaarlijke stoffen inzichtelijk te maken. Voor het bepalen van de risico's voor de externe veiligheid worden in een QRA zowel de kansen op, als de effecten van incidenten met gevaarlijke stoffen in rekening gebracht. Met de resultaten van een QRA kunnen o.a. risicoafstanden vanaf de bron van de incidenten tot de PR-contouren bepaald worden (Ref. /7/).

Op hoofdlijnen komt de uitvoering van een QRA op het volgende neer. Eerst vindt er een selectie plaats van de installaties (of procesonderdelen met gevaarlijke stof) die relevant zijn voor de externe veiligheid. Per installatie/onderdeel worden vervolgens ongevalsscenario's uitgewerkt. Hierbij gaat het zowel om de kansen op, als de effecten van de scenario's. Verder wordt gekeken of er maatregelen aanwezig zijn die de kans op het scenario kunnen verkleinen of die de effecten ervan beheersen, waarna moet worden bepaald of en hoe deze maatregelen een plek kunnen krijgen in de QRA. Voor de berekening van de risico's zijn tenslotte gegevens over bevolking in de omgeving, ontstekingsbronnen en weerdata (meteo) relevant⁷. Dit alles leidt tot rekenresultaten in de vorm van PR die op basis van de eisen uit het Bevi kunnen worden beoordeeld (Ref. /7/). Een schematisch overzicht van het QRA-proces of methodologie is weergegeven in Figuur 5-1.

⁶ Daarbij wordt opgemerkt dat de LNG-toolkit afstanden nog berekend zijn in een oudere versie van de software (7.21). Om een goede onderlinge vergelijking te maken worden daarom de afstanden opnieuw berekend in versie 8.3. Dit kan resulteren in kleine verschillen ten opzichte van de berekende afstanden in de toolkit.

⁷ Deze studie berekent alleen het PR en voor de berekening van het PR zijn andere omgevingsfactoren, zoals bevolking en ontstekingsbronnen in de nabijheid van de activiteit niet relevant.



Figuur 5-1: QRA-methodologie, overgenomen uit Ref. /7/

De verschillende processtappen in Figuur 5-1 zijn hieronder kort toegelicht met een verwijzing naar het hoofdstuk/paragraaf in het rapport waarin deze zijn uitgewerkt.

“Installatie” (of procesonderdelen), faalscenario’s en berekenen van faalkans

De beschrijving en selectie van de procesonderdelen en bijbehorende faalscenario’s zijn opgenomen in hoofdstuk 6.1. De selectie van relevante onderdelen is uitgevoerd in paragraaf 6.1.1. Vervolgens worden er faalscenario’s met bijbehorende standaard faalkansen gedefinieerd voor de relevante onderdelen. De standaard faalkans moet dan nog vermenigvuldigd worden met de jaarlijkse duur van de operatie om de finale faalkans te berekenen. Dit laatste is uitgelegd in paragraaf 6.1.4.

Maatregelen

De repressieve maatregelen zijn beschreven in paragraaf 6.1.3. Dit zijn technische maatregelen die de uitstroming en/of het effect beperken (zoals een automatisch inbloksysteem of een terugslagklep). Er zijn ook preventieve maatregelen die de kans op een scenario verlagen (bijv. het gebruik van een speciaal type slang). Daarnaast kunnen effect-beperkende maatregelen ook falen en de kans op falen per aanspraak van deze maatregelen heeft weer invloed op totale kans van het scenario.

Berekenen van effect

Het effect wordt berekend met behulp van het rekenprogramma dat beschreven wordt in paragraaf 5.3 op basis van de ingevoerde faalscenario’s zoals gedefinieerd in hoofdstuk 6.1 en de model- en omgevingsparameters in hoofdstuk 6.4. Effectresultaten worden niet specifiek gerapporteerd.

Populatie en ontsteking

Gegevens over populatie en ontstekingsbronnen in de omgeving van de activiteit zijn niet relevant voor de berekening van het PR. De methode voor het bepalen van de kans op vertraagde ontsteking voor de berekening van het PR is onafhankelijk van de aanwezigheid van ontstekingsbronnen in de omgeving.

Meteo (en andere omgevingsparameters)

De gebruikte meteogegevens en andere omgevingsparameters, zoals de ruwheidslengte van de omgeving, zijn beschreven in paragraaf 6.4.1.

Berekenen risico

Het risico wordt berekend met hetzelfde rekenprogramma als waar de effecten mee berekend worden. Er vindt geen beoordeling van het risico plaats, in plaats daarvan worden de PR-resultaten en aandachtsgebieden gegenereerd, gerapporteerd en vervolgens geanalyseerd. Hoe de resultaten worden gegenereerd en bepaald etc. wordt uitgelegd in paragraaf 5.4. De resultaten zijn opgenomen in hoofdstuk 7.

5.2 Richtlijnen

De risico's zijn berekend met behulp van de Handleiding Risicoberekeningen Bevi, versie 4.3 (Ref. /6/). In de HRB worden de parameters gespecificeerd die in het rekenprogramma moeten worden ingevoerd. De HRB is strikt genomen alleen van toepassing voor de berekening van risico van inrichtingen met gevaarlijke stoffen. De scenario- en modelparameters en modelleringfilosofie in de HRB is echter algemeen bruikbaar voor een risicoberekening van een activiteit met gevaarlijke stoffen (inrichting of niet). Voor de risico's verbonden aan het bunkeren van LNG is net als in 2017 gebruik gemaakt van de beschikbare LNG-rekenmethode: Rekenmethodiek LNG-bunkerstations (Ref. /7/). Voor de risico's verbonden aan het bunkeren van waterstof is gebruik gemaakt van RIVM-memo: Risico- en effectafstanden waterstoftankstations (Ref. /8/).

5.3 Rekenprogramma

Om risico's te kunnen toetsen aan de Bevi-normen moet strikt genomen gebruikgemaakt worden van de rekenmethodiek Bevi. De rekenmethodiek Bevi bestaat uit het rekenprogramma Safeti-NL en de Handleiding Risicoberekeningen Bevi. Safeti-NL 8.3 is momenteel het voorgeschreven programma in Nederland voor het uitvoeren van een QRA voor inrichtingen. Aangezien de activiteiten op water plaatsvinden en niet bij een inrichting horen, is gekozen om het door DNV ontwikkelde rekenpakket Safeti 8.3 te gebruiken. Dit is in feite het moederprogramma van Safeti-NL, waarin geen restricties voor het wijzigingen van modelparameters zijn ingevoerd (wat wel het geval is in de NL-versie). De modelparameters die specifiek zijn voor een QRA in Nederland zijn grotendeels overgenomen uit Safeti-NL 8.3 (zie ook de HRB). De aandachtsgebieden zijn wel in Safeti-NL berekend, omdat aan deze versie een optie is toegevoegd die benodigd is bij het berekenen van de aandachtsgebieden die niet in de standaardversie van Safeti zit.

5.4 Risicoberekening

5.4.1 Plaatsgebonden risico

Na het vaststellen en berekenen van kansen en effecten zijn in Safeti de PR-contouren berekend. De PR-contouren zijn gerapporteerd als contouren op een kaart. Deze contouren zijn gebruikt om de externe veiligheidsafstanden (afstand tot 10^{-6} /jaar) te bepalen.

5.4.2 Aandachtsgebieden

Bij de berekening van aandachtsgebieden wordt onderscheid gemaakt tussen drie soorten aandachtsgebieden:

- Brandaandachtsgebied;
- Explosieaandachtsgebied;
- Gifwolkaandachtsgebied.

Deze worden in onderstaande paragrafen toegelicht.

5.4.2.1 Brandaandachtsgebied

Voor het berekenen van het brandaandachtsgebied wordt gebruikgemaakt van de brand effectgebieden in een QRA. Het brandaandachtsgebied is het gebied rondom een activiteit waarbinnen, als gevolg van de activiteit, warmtestralingseffecten boven de 10 kW/m² mogelijk zijn. Bij langdurige blootstelling aan warmtestraling boven de 10 kW/m² kunnen gebouwen bezwijken en kunnen er dus binnenshuis personen komen te overlijden.

5.4.2.2 Explosieaandachtsgebied

Het explosieaandachtsgebied wordt bepaald als het gebied waarbinnen overdrukken van hoger dan 0,1 bar mogelijk zijn als gevolg van de activiteit. Bij het berekenen van het plaatsgebonden risico wordt ervan uitgegaan dat personen zich buiten bevinden. Het criterium voor overlijden als gevolg van overdruk voor personen buiten is 0,3 bar. Maar omdat aandachtsgebieden gericht zijn op mensen die zich binnenshuis bevinden kunnen er al mensen overlijden bij overdrukken vanaf 0,1 bar. Bij 0,1 bar overdruk kan er structurele schade aan een gebouw optreden en kunnen mensen die zich binnen bevinden komen te overleiden, door het (deels) instorten van het gebouw.

Verder wordt voor het plaatsgebonden risico uitgegaan van een gaswolkexplosie zodra de gaswolk zijn maximale omvang bereikt heeft. Voor het bepalen van de explosieaandachtsgebieden wordt dit te conservatief geacht. Voor het bepalen van het explosieaandachtsgebied wordt aangenomen dat een gaswolk tot explosie komt als het centrum van de wolk de 'terreingrens' passeert. Voor deze studie is de terreingrens gedefinieerd als een grens om beide schepen heen (brandstof ontvangende schip en bunkerschip).

5.4.2.3 Gifwolkaandachtsgebied

Het Gifwolkaandachtsgebied wordt bepaald als het gebied waarbinnen een toxische concentratie van 2,53 keer de LBW-waarde (1 uur blootstelling) van een stof voor kan komen. Het RIVM heeft vastgesteld dat als de concentratie van een stof buiten gelijk is aan 2,53 x LBW, dat er dan concentraties gelijk aan LBW kunnen voorkomen binnenshuis. De 1 uur LBW-waarde van een stof is de luchtconcentratie waarboven mogelijk sterfte of levensbedreigende aandoeningen kunnen ontstaan, als gevolg van 1 uur blootstelling.

Binnen het toxische aandachtsgebied kunnen mensen die zich binnenshuis bevinden dus bloot worden gesteld aan levensbedreigende toxische concentraties.

5.4.2.4 Berekening van de omvang van het aandachtsgebied

De effectgebieden voor de verschillende aandachtsgebieden zijn weergegeven bij een kans van 1×10^{-20} per jaar en zijn weergegeven als contouren op een kaart. De afstand van de bunkerslang tot de contour is opgemeten en weergegeven als de afstand voor het aandachtsgebied.



5.4.3 Invloedsgebied

Een berekening van het invloedsgebied (of: maximale 1% letaafstand) is relevant vanwege de volgende zaken:

- Inzicht in het maximale effectgebied dat kan ontstaan. Op basis hiervan kan bepaald worden door het Havenbedrijf of in een later stadium op basis van het aantal aanwezigen binnen het gebied een verantwoording van het groepsrisico noodzakelijk wordt geacht;
- Het invloedsgebied toont ook de theoretisch maximale grootte van de 10^{-6} /jaar contour onafhankelijk van de jaarlijkse duur van een activiteit.

Het invloedsgebied voor alle beschouwde activiteiten is weergegeven op de figuren met een plaatsgebonden risicocontour van 10^{-30} per jaar.

6 QRA-STUDIE

6.1 Loss of Containment scenario's

In deze paragraaf worden de LOC-scenario's gedefinieerd en uitgewerkt. Eerst wordt een selectie gemaakt van de risico-relevante onderdelen waar mogelijk brandstof kan vrijkomen. Voor de relevante onderdelen worden de LOC-scenario's volgens de HRB en de interim rekenmethode LNG-bunkerstations gedefinieerd. Verder zijn de meegenomen maatregelen (repressieve systemen) beschreven. De paragraaf sluit af met een berekening van de kans op falen per scenario.

6.1.1 Selectie van relevante onderdelen

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van welke onderdelen wel of niet zijn geselecteerd voor de risicoanalyse. Indien onderdelen niet worden geselecteerd voor de QRA, zal hier een onderbouwing voor worden gegeven.

Het is nog niet bekend welke onderdelen er op een schip aanwezig zullen zijn voor alle type brandstoffen. Er zijn een aantal standaard onderdelen geïdentificeerd die mogelijk aanwezig kunnen zijn op het schip, waar mogelijk brandstof kan vrijkomen. Voor de risicoberekeningen is aangenomen dat alle brandstoffen ship-to-ship gebunkerd worden via een metalen slang. In werkelijkheid is het niet de verwachting dat gasvormig waterstof ship-to-ship gebunkerd zal worden gezien de lage energiedichtheid en de benodigde bunkervolumes. Voor de berekening van de risicoafstanden maakt het echter weinig uit of er uiteindelijk vanaf een installatie op het land of vanaf een schip wordt gebunkerd.

STS bunkeren

- Ladingtank op het bunkerschip;
- Scheepsbrandstoftank op het ontvangende schip;
- Bunkerslang;
- Een eventuele dampretourslang;
- Brandstof leidingwerk en andere apparatuur die brandstof bevat op het bunkerschip of op het ontvangende schip;
- Brandstofpomp op het bunkerschip
- Drukveiligheden/ vent stack op het bunkerschip en ontvangende schip.

Van de bovenstaande procesonderdelen zijn de volgende onderdelen niet beschouwd in de QRA:

- Ladingtank op het bunkerschip en scheepsbrandstoftank op het ontvangende schip:

Het falen van een ladingtank hoeft niet beschouwd te worden in een QRA (Ref. /6/, /7/). Er wordt aangenomen dat het bunkeren plaats vindt tijdens het grootste deel van de tijd dat het bunkerschip bij de kade aanwezig is, en dat bunker scenario's (falen van de slang) het risico van de operatie domineren.

De enige scenario's voor tank falen die wel relevant zijn voor het bunkeren, zijn aanvaring scenario's waarbij de tank beschadigd raakt door een aanvaring met een ander schip. Aangezien aanvaringsrisico's erg locatie afhankelijk zijn, en er in de LNG-toolkit bleek dat ze slechts een gering effect hebben op de uiteindelijke risico's is ervoor gekozen om deze risico's buiten beschouwing te

laten in deze studie. Er zijn daarom geen scenario's meegenomen voor het falen van de ladingtank op het bunkerschip of de scheepsbrandstoftank op het ontvangende schip.

- Eventuele dampretourslangen:

De enige scenario's die dienen te worden opgenomen in de QRA voor bunkeractiviteiten zijn een breuk en lek van de laad-/loslang (Ref. /6/). Een dampretourleiding (of slang) kan gebruikt worden bij een bunker operatie, maar daarvoor zijn geen additionele scenario's gespecificeerd in de HRB. De reden daarvoor volgt uit de Rekenmethodiek LNG-tankstations (Ref. /12/). De rekenmethodiek beschrijft dat het risico veroorzaakt door de dampretourslangen verwaarloosbaar is ten opzichte van de vloeistofslangen. In het geval van vloeibare uitstromingen is dit redelijk om aan te nemen aangezien het massadebiet door de dampretourslang veel lager is door het verschil in dichtheid van vloeibare en gasvormige stoffen.

- Brandstofleidingwerk en andere apparatuur die brandstof bevat op het bunkerschip of op het ontvangende schip:

Aangenomen wordt dat de operatie plaatsvindt tijdens het grootste deel van de tijd dat een schip aanwezig is, en de verladingsscenario's (falen van de slang) dominant zijn ten opzichte van het falen van andere onderdelen op het schip, zoals leidingwerk etc.

- Brandstofpomp op het bunkerschip:

Er wordt aangenomen dat de pomp(en) op het schip dat levert of:

1. op het dek staan boven de ladingstanks (en dus boven het maximale vloeistofniveau van de tank en/of geen onderaansluiting hebben met de ladingtank (mag niet volgens ADN), dan wel;
2. ondergedompeld zijn in de ladingtank (in een 'well').

In beide gevallen zal het catastrofaal falen van de pomp niet leiden tot een uitstroming van vloeistof naar atmosfeer. Er is alleen een gasuitstroming mogelijk in het geval van optie 1, wat niet risicorelevant is gezien het dichtheidsverschil.

- Drukveiligheden/ vent stacks:

Effecten en risico's van afblaaspunten worden op grondniveau niet relevant geacht voor de externe veiligheid (en specifiek het PR 10^{-6} /jaar risico) vanwege de afblaashoogte, richting, frequentie, de hoeveelheid die kan vrijkomen en daarmee de maximale effectafstanden. Er wordt hier conform de HRB uitgegaan dat het openen van de drukveiligheid en/of uitstroming uit de vent stack niet leidt tot een emissie met risico's voor de omgeving en daarom wordt het scenario niet meegenomen in de risicoanalyse.

Geselecteerde onderdelen voor de risicoanalyse

Hieronder volgt dat alleen de risico's verbonden met het falen van de bunkerslang geselecteerd zijn als risicorelevant voor de verschillende bunkeroperaties. De definitie van de standaard LOC-scenario's van de bunkerslang met bijbehorende standaard faalkansen is in de onderstaande paragrafen opgenomen.

6.1.2 Bunkerslang

De standaardscenario's met bijbehorende standaard faalfrequenties voor een bunkerslangslang zoals gedefinieerd in de interim rekenmethode LNG-bunkerstations (Ref. /9/) zijn opgenomen in onderstaande tabel. Voor alle bunkeroperaties wordt in eerste instantie uitgegaan van een metalen slang (er is wel een indicatie gegeven voor de resultaten bij gebruik van een composiet slang).

Tabel 6-1: Standaardscenario's voor de brandstofslang (Ref. /9/)

Scenario	Standaard faalfrequentie (h ⁻¹)
Metalen slang	
S.1 Breuk van de slang	4,00*10 ⁻⁶
S.2 Lek van slang met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, maximaal 50mm	4,00*10 ⁻⁵
Composietslang	
S.3 Breuk van de slang	4,00*10 ⁻⁷
S.4 Lek van slang met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, maximaal 50mm	4,00*10 ⁻⁵

6.1.3 Repressieve maatregelen

In deze paragraaf worden de repressieve maatregelen die zijn meegenomen in de risicoanalyse beschreven. Repressieve maatregelen (of repressieve systemen) kunnen de uitstroomduur van de faalscenario's beperken, waardoor de schadelijke effecten gegeven een Loss of Containment beperkt kunnen worden.

Er is aangenomen dat er een automatisch inbloksysteem (ESD-systeem) aanwezig is met een reactietijd van 120 s en een betrouwbaarheid van 0,01 kans op falen per aanspraak.

Voor de risicoanalyse is aangenomen dat de automatische inbloksystemen alleen effectief zijn in het geval van een slangbreuk. Conform de Interim Rekenmethode LNG-bunkerstations (Ref. /9/) wordt er in geval van een kleine lekkage geen ingrijpen van het ESD-systeem gemodelleerd. Hiervoor geeft de methodiek de volgende drie redenen:

1. Het is moeilijk aan te tonen dat lekkages snel gedetecteerd zullen worden;
2. Ook bij het isoleren van het lekkende onderdeel zal de hierin aanwezige brandstof nog gedurende langere tijd blijven uitstromen;
3. De effectafstanden van lekkages zijn vaak minder relevant voor het externe risico.

Er wordt voor het klein lek van de slang (10% van de diameter) daarom uitgegaan van een maximale uitstroomduur van 30 minuten.

Er is ook een terugslagklep meegenomen in de risicoanalyse voor bunkeren die de terugstroming vanuit de brandstoftanks kan beperken (bijvoorbeeld in het geval van een breuk van de slang tijdens ondervulling van de brandstoftank). Er is aangenomen dat de terugslagklep regelmatig getest wordt en daarom mag deze meegenomen in de risicoanalyse. Er is een reactietijd van 5 seconden aangenomen en een kans op falen van 0,06 per aanspraak. Dit zijn standaardwaarden uit de HRB.

Brekkoppelingen worden beschouwd als standaardvoorzieningen. De HRB neemt aan dat de aanwezigheid en de goede werking van deze voorziening opgenomen is in de faalfrequenties. Daarom wordt een brekkoppeling niet meegenomen in de risicoanalyse als repressieve maatregel.

6.1.4 Faalfrequenties

Voor de LOC-scenario's zullen de finale faalfrequenties (kans van optreden) moeten worden berekend. De frequenties van de scenario's zijn afhankelijk van de tijd dat een bepaalde activiteit plaatsvindt op een bepaalde locatie, de standaard faalfrequentie zoals gegeven in de voorgaande paragrafen en de kans op falen van repressieve systemen.

Zoals beschreven in paragraaf 3.2 is de bunkerduur voor de verschillende scenario's zo bepaald dat er een equivalente hoeveelheid energie wordt gebunkerd. In de onderstaande tabel is het aantal bunkeruren per brandstof nogmaals weergegeven die gebruikt zijn om de faalfrequenties te bepalen.

	Hoog debiet	Laag debiet
	Bunkerduur (uur/jaar)	Bunkerduur (uur/jaar)
LNG	250	250
Methanol	359	359
Ammoniak (druk)	442	442
Ammoniak (gekoeld)	495	495
Waterstofgas 700 bar (60 g/s)	-	-
Waterstofgas 1000 bar (60 g/s)	-	-
Waterstofgas - 3 t/uur	-	6.236
Vloeibaar waterstof	660	660

6.2 Domino-effecten en beschadigingen

Het optreden van beschadiging en domino-effecten is niet opgenomen in de standaard faalfrequenties. In deze studie is geen rekening gehouden met het optreden van externe beschadiging of domino-effecten, omdat deze zeer locatie-afhankelijk zijn en deze eigenlijk op een case-by-case basis beoordeeld moeten worden in de locatieselectie. Deze paragraaf geeft een kwalitatieve beschouwing van domino-effecten en wanneer deze tot een significante verhoging van het risico kunnen leiden. Op basis van deze beschouwing kan het Havenbedrijf Amsterdam in een later stadium beoordelen of voor een bepaalde locatie een specifieke risicoberekening nodig is.

6.2.1 Externe beschadiging

Volgens de HRB (Ref. /6/) zijn scenario's zoals externe beschadiging ten gevolge van scheepsbotsingen relevant om te beschouwen in de berekening van het risico. Deze worden zeer sterk bepaald door de lokale situatie. In het geval een schip gelegen is in een (kleine) haven buiten de transport routes, is de kans op een botsing die leidt tot een uitstroming dusdanig klein, dat deze niet beschouwd hoeft te worden. In andere gevallen dient op basis van de specifieke vaarweg de basis faalfrequentie voor ongevallen bepaald te worden, welke afhangt van de aanwezigheidsduur van het bunkerschip en het aantal scheepspassages per jaar. Deze laatste parameter is locatie-afhankelijk.

In de LNG-toolkit uit 2017 (Ref. /1/) zijn de aanvaringsrisico's meegenomen voor verschillende nautische situaties. In de toolkit hadden aanvaringsrisico's maar een beperkt effect op de berekende risicoafstanden. Daarom is besloten om in deze studie aanvaringsrisico's buiten beschouwing te laten.

6.2.2 Interne domino-effecten

Interne domino-effecten ontstaan wanneer het falen van één installatie met gevaarlijke stoffen leidt tot het falen van een andere installatie met gevaarlijke stoffen. De kans op interne domino-effecten is normaliter geminimaliseerd door een goede lay-out van het schip (opstelling van de onderdelen). Ook zijn domino-effecten mogelijk al (deels) opgenomen in de standaard faalfrequenties. Daarom worden interne domino-effecten niet expliciet meegenomen in een QRA, tenzij er situaties zijn waarin het falen van één onderdeel duidelijk leidt tot het falen van een ander onderdeel. Zelfs al zou dit het geval kunnen zijn, moet er volgens de HRB uitgegaan worden dat de inhoud van het grootste reservoir (tank) vrijkomt.

6.2.3 Externe domino-effecten

Andere domino-effecten die normaliter beschouwd dienen te worden zijn vallende objecten op de installatieonderdelen (bijv. neerstortende vliegtuigen), falende windturbines en potentiële externe domino-effecten effecten ten gevolge van activiteiten in de omgeving. Conform de HRB dient beoordeeld te worden of externe domino-effecten tot een significante verhoging kunnen leiden van de externe risico's.

De HRB stelt dat het additionele risico deze domino-effecten beschouwd dient te worden als de risicobijdrage daarvan minimaal 10% kan bijdragen aan de standaard frequentie van catastrofaal falen van een installatie-onderdeel met gevaarlijke stoffen. De reden dat slechts catastrofale scenario's bekeken worden is omdat er in het geval van een extern domino-effect (bijvoorbeeld een incident met vliegverkeer of windturbine faalt met blad afwerp) nooit sprake zal zijn van een klein incident/kleine lekkage.

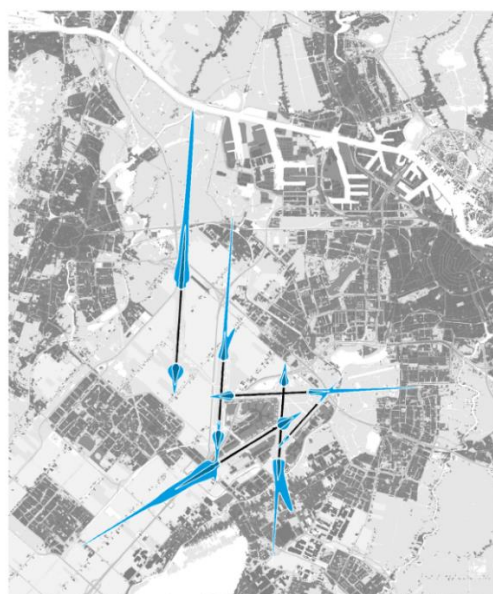
In het kader van deze studie zou het dan bijvoorbeeld kunnen gaan om de additionele kans op falen van het falen van de bunkerslang (breuk van de slang) waarvoor het 10% relevantiecriteria vaak niet gehaald wordt vanwege de al hoge standaard faalfrequentie.

6.2.3.1 Neerstortende vliegtuigen

Op de onderstaande figuur (Bron: Compendium voor de Leefomgeving, <http://www.clo.nl/>) zijn de plaatsgebonden risicocontouren rondom Schiphol weergegeven. De contouren overlappen het Amsterdamse havengebied maar voor een zeer klein deel ('kleine stroken'). Daarnaast is het plaatsgebonden risico in het havengebied niet hoger dan 10^{-6} /jaar, waardoor het onwaarschijnlijk is dat het risico ten gevolge van neerstortende vliegtuigen het 10^{-6} /jaar risico van het bunkeren significant gaat verhogen.

Plaatsgebonden risicocontouren rond Schiphol

2016



Bron: NLR en PBL

Kans op overlijden door een vliegtuigongeval binnen de risicocontouren

- Eens in de 100.000 jaar (PR = 10^{-5} per jaar)
- Eens in de 1.000.000 jaar (PR = 10^{-6} per jaar)



PBL/mrt19
www.clo.nl/nl030507

Figuur 6-1: Plaatsgebonden risicocontouren rondom Schiphol⁹

⁹ Gedownload van https://www.clo.nl/sites/default/files/infographics/0305_011k_clo_07_nl.png via <http://www.clo.nl/indicatoren/nl0305-veiligheid-rondom-schiphol> (bezoekt op 07-09-2020)

6.2.3.2 Falende windturbines

Wanneer er een windturbine in de nabijheid van de bunkeractiviteit staat, zou het falen van deze turbine kunnen leiden tot het falen van onderdelen met brandstof. Een voorbeeld van een dergelijk scenario is het afbreken van een turbineblad dat vervolgens het bunkerschip of de bunkerslang raakt. Hiertoe worden normaliter de raakfrequenties van een dergelijke impact berekend op de verschillende onderdelen die geraakt kunnen worden. Een dergelijke windturbine-analyse dient uitgevoerd te worden conform het Handboek Risicozonering Windturbines (Ref. /11/). Volgens dit handboek dienen de volgende scenario's beschouwd te worden:

- Bladbreek;
- Mastbreek;
- Gondel/rotorafworp.

Op basis van deze scenario's wordt een raakfrequentie per onderdeel berekend en vergeleken met de initiële frequentie van catastrofaal falen van het blootgestelde onderdeel. Wanneer blijkt dat de extra faalfrequentie van een bepaald onderdeel dat faalt ten gevolge van een windturbine-impact significant (> 10%, zie ook eerder) is ten opzichte van de standaard frequentie op catastrofaal falen, wordt dit als een apart dominoscenario opgenomen in de risicoanalyse (QRA).

De relevantie van windturbine falen op de 10^{-6} /jaar contour van bunkeren is vaak beperkt. Er wordt vaak aangenomen dat het falen van een windturbine (bijv. bladbreek) niet leidt tot dusdanige schade aan het schip dat er brandstof uit de ladingtank kan komen wanneer bijvoorbeeld de tank onderdeks geplaatst is. Het is dan ook onbekend welke faalscenario's gedefinieerd moeten worden, aangezien de standaard faalscenario's voor schepen alleen gerelateerd zijn aan aanvaring (en niet intrinsiek falen). Wanneer de ladingtank (of brandstoftank) op het dek staat, kan de invloed van windturbine falen wel relevanter worden. Verder wordt voor het falen van de slang het 10% relevantie criterium vaak niet gehaald.

Als eerste screening-stap om te beoordelen of windturbine-impact relevant zou kunnen zijn, zou gekeken kunnen worden of de bunkeractiviteit binnen de effectafstand (werpafstand) van bladafworp bij nominaal toerental ligt. Buiten deze effectafstand is de risicobijdrage vaak niet relevant omdat de raakfrequentie ten gevolge van het scenario bladafworp bij overtoeren veel lager is en daarmee niet significant bijdraagt aan het 10^{-6} /jaar plaatsgebonden risico. Generieke werpafstanden bij nominaal toerental zijn gegeven in tabel 2 van het Handboek Risicozonering Windturbines (Ref. /11/) en variëren van ongeveer 131 – 245 m afhankelijk van het windturbine type, het vermogen en IEC-klasse¹⁰.

6.2.3.3 Domino-effecten ten gevolge van activiteiten in de omgeving (inrichtingen)

Inrichtingen die met gevaarlijke (brandbare) stoffen werken en in de nabijheid van een bunkeractiviteit liggen, zouden ten gevolge van een incident binnen de inrichting, resulterende in een brand of explosie, domino-effecten kunnen veroorzaken. De praktijk wijst uit dat mogelijke externe domino-effecten van deze aard vaak geen relevante bijdrage leveren aan het risico van de bunkeractiviteit, gezien de beperkte duur van de activiteit en de lage kans van optreden van mogelijke explosies en branden met effectafstanden die kunnen reiken tot de bunkeractiviteit.

Typisch wordt er een analyse gemaakt door op basis van de risicokaart (www.risicokaart.nl) te inventariseren welke inrichtingen met gevaarlijke stoffen in de nabijheid van de bunkeractiviteit aanwezig zijn (bijvoorbeeld Brzo-inrichtingen). Dan wordt vervolgens op basis van de risicocontouren

¹⁰ Dit is een classificering van de locatie op basis van winddata conform de beschrijving in IEC 61400-1. Voor meer informatie wordt verwezen naar het Handboek Risicozonering Windturbines (Ref. /11/)

van deze inrichting een eerste inschatting gemaakt of er een risicorelevant bijdrage kan zijn in het kader van domino-effecten.

De bunkeractiviteiten zouden in theorie overal plaats kunnen vinden en de relevantie van externe domino-effecten ten gevolge van activiteiten in de omgeving zou dan ook op een case-by-case basis beoordeeld moeten worden.

6.3 Modelling

6.3.1 Systeemreacties

De aanwezigheid van pompen die gebruikt worden voor het bunkeren zijn betrokken bij het berekenen van de uitstroming. Wanneer de pomp niet capaciteitsgeregeld is en niet stilvalt, is het uitstroomdebiet in geval van een slangbreuk gelijk aan $1,5 \times$ pompdebiet (Ref. /9/). Hierbij wordt rekening gehouden met 50% toename in debiet door verlies van tegendruk. Het is onzeker hoe de pomp gaat reageren bij een breuk van de slang en of deze op druk- of op capaciteit is geregeld. Daarom is conservatief rekening gehouden met een systeemreactie van de pomp en dat de pomp blijft doordraaien. Bij een stilstaande pomp zou het uitstroomdebiet namelijk veel kleiner zijn, omdat de voordruk in de ladingtank (en vloeistofkolomhoogte) laag is en vanwege de weerstand van de stilstaande pomp er dus niet veel brandstof door de pomp zal stromen.

Voor de gasvormige brandstoffen is ervan uitgegaan dat er gebunkerd wordt op basis van drukverschil en niet met behulp van een pomp. Voor deze scenario's is daarom geen systeemreactie meegenomen in de berekeningen.

6.3.2 Nalevering

Bij het falen van een onderdeel kan nalevering plaatsvinden van andere systeemonderdelen die verbonden zijn met dat onderdeel. Wanneer de nageleverde hoeveelheid significant¹¹ is, dient in het scenario hiermee rekening te worden gehouden.

Er is geen rekening gehouden in de modellering van het slangbreukscenario met eventuele nalevering. De effecten van maatregelen op de uitstroming, zoals het sluiten van kleppen, zijn wel meegenomen. Het sluiten van een klep na bijv. 120 s wordt gemodelleerd door voor dit scenario de inhoud die kan vrijkomen te verlagen zodat de uitstroming na 120 seconden stopt (Ref. /6/). In realiteit zou na het sluiten van de kleppen na een slangbreuk, de inhoud van de slang ook nog vrij kunnen komen. Hier wordt in de Interim rekenmethode LNG-bunkerstations (Ref. /9/) bij de bepaling van de inhoud die kan vrijkomen geen rekening mee gehouden. De inhoud van de slang is bij het bunkeren ook niet significant t.o.v. de totale uitstroming. Daarnaast hoeft strikt genomen alleen rekening gehouden te worden met nalevering van andere onderdelen en niet uit het falende onderdeel zelf (na het ingrijpen van het inbloksysteem).

6.3.3 Terugstroming

6.3.3.1 Vloeibare brandstoffen

Bij een breuk van een slang tijdens het bunkeren kan er uit beide kanten van de breuk uitstroming plaatsvinden, namelijk uitstroom vanuit de ladingtank op het bunkerschip en terugstroming uit de brandstoftank. Wanneer de bijdragen van beide zijden van de slangbreuk aan de uitstroming relevant is (>10% van het debiet of uitstroming uit één zijde), moet hiermee rekening gehouden worden in de modellering.

¹¹ Significant is hierbij meer dan 10% van de hoeveelheid die uit het falende onderdeel vrijkomt.

Het breukscenario is gemodelleerd met een effectieve diameter van de slang (conform Ref. /6/, /9/) waarbij het uitstroomdebiet overeenkomt met het debiet vanuit beide zijden bij elkaar opgeteld.

Terugstroming van brandstof uit de brandstoftank voor het scenario slangbreuk moet in de QRA worden beschouwd. Of een brandstoftank via een onder- of bovenleiding wordt gevuld is belangrijk bij het bepalen van mogelijke terugstroming. Als de tank via een bovenleiding wordt gevuld, kan er alleen gas terugstromen in het geval van een slangbreuk. Bij vullen via een leiding aan de onderkant van een vat kan de inhoud van het vat terugstromen. Voor een aantal bunkeroperaties wordt er een mix van onder- en bovengevulling gebruikt. Eerst wordt via boven gevuld om de tank in te koelen en de druk in de tank te laten zakken. Vervolgens wordt de rest van het vullen van de tank via de onderkant van het vat gedaan. In de onderstaande tabel is weergegeven welke aannames er zijn gemaakt m.b.t. onder- of bovengevullen.

Tabel 6-2: Onder- of bovengevulling voor de verschillende alternatieve brandstoffen.

	Bovengevulling %	Ondergevulling %	Uitleg
LNG	25	75	Aanname uit LNG-toolkit
Methanol	100	0	Methanol lijkt op gasolie en kan gewoon via de bovenkant gebunkerd worden. Terugstroming is niet relevant.
Ammoniak (druk)	0	100	Er is conservatief uitgegaan van 100% ondergevulling
Ammoniak (gekoeld)	25	75	Gekoelde vloeistof, er is aangenomen dat dit vergelijkbaar is met LNG bunkeren
Vloeibaar waterstof	25	75	Gekoelde cryogene vloeistof, er is aangenomen dat dit vergelijkbaar is met LNG bunkeren

Voor de bunkerconfiguraties waarbij terugstroming mogelijk is moet vervolgens bepaald worden hoeveel materiaal er maximaal kan terugstromen. Voor alle configuraties is er aangenomen dat de tank voor 50% gevuld is en dat er dus 50% van de tank inhoud kan terugstromen. Dit komt neer 175 m³ brandstof

Bij het berekenen van het terugstroomdebiet is voor alle brandstoffen uitgegaan van een vloeistofniveau van 6 meter in de tank. Verder is er gerekend met 20 meter vulleiding van de brandstoftank tot de breuk (in werkelijkheid zal dit langer zijn, dit is een conservatieve aanname). De condities in de brandstoftank voor het berekenen van de terugstroming zijn in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 6-3: Condities in de brandstoftank voor het berekenen van terugstroming

	Temperatuur in brandstoftank (°C)	Druk in brandstoftank (barg)
LNG	-154	2
Ammoniak (druk)	20	9
Ammoniak (gekoeld)	-32.1	0,068
Vloeibaar waterstof	-245	4,9

6.3.3.2 Gasvormig waterstof

Voor de PR-berekeningen van gasvormig waterstof wordt een kans op directe ontsteking van 1 gebruikt. Hierdoor worden de risico's voor het bunkeren van gasvormig waterstof volledig bepaald door de fakkelbrand. Om de risico's van de fakkelbrand niet te overschatten is er bij de PR-berekeningen voor gasvormig waterstof uitgegaan van enkelzijdige uitstroming (de fakkelbranden uit beide zijden hebben een tegengestelde richting en worden niet bij elkaar opgeteld).

Naast de PR-berekeningen zijn er voor gasvormig waterstof ook effectberekeningen uitgevoerd. Bij de effect berekeningen zijn ook de effecten berekend in het geval van een vertraagde ontsteking (wolkbrand en gaswolk explosie). Bij het berekenen van deze effecten is wel uitgegaan van tweezijdige uitstroming. De uitstroming is berekend op basis van een effectieve diameter en er is uitgegaan van maximaal 1000 kg waterstofgas dat kan terugstromen (inhoud van een aantal flessen). Bij het bunkeren van gassen is boven- of ondervulling niet relevant, aangezien er in beide situaties gas terugstroomt.

6.4 Parameters

Dit hoofdstuk beschrijft enkele relevante omgevings- en modelparameters die van belang zijn voor de risicoanalyse.

6.4.1 Omgevingsparameters

Omgevingsparameters zoals bevolkingsgegevens en ontstekingsbronnen zijn niet relevant voor de berekening van het plaatsgebonden risico. De enige omgevingsparameters die relevant zijn, zijn weergegevens, atmosferische parameters en ruwheidslengte van de omgeving.

6.4.1.1 Weergegevens (meteo)

De gegevens van het meteorologisch station Schiphol zijn gebruikt. Meteostation Schiphol bevindt zich naar verwachting hemelsbreed het dichtste bij de toekomstige bunker locaties. Daarnaast maakt naar verwachting de keuze tussen meteostation IJmuiden of Schiphol ook niet veel uit omdat de maximale risicoafstand wordt opgemeten in elke windrichting.

6.4.1.2 Atmosferische parameters

Voor de atmosferische parameters (atmosferische temperatuur en druk etc.) zijn de gegevens uit de HRB (specifiek voor Nederland) gebruikt.

6.4.1.3 Ruwheidslengte van de omgeving

De ruwheidslengte is een (kunstmatige) lengtemaat die de invloed van de omgeving op de windsnelheid aangeeft (Ref. /6/). De ruwheidslengte van de omgeving is in Nederland standaard 300 mm. Deze kan aangepast worden op basis van de afstand tussen obstakels en de hoogte van deze obstakels in de omgeving van de inrichting. Voor een stadscentrum met hoog- en laagbouw wordt doorgaans een ruwheidslengte van 3 meter aangenomen en voor een industrieterrein typisch 1 meter.


Er wordt verwacht dat de meeste bunkerlocaties zich op of in de nabijheid van een industrieterrein bevinden. Er is daarom uitgegaan van een ruwheidslengte van 1 meter.

6.4.2 Modelparameters

Vrijwel alle modelparameters, specifiek voor een QRA in Nederland, zijn direct overgenomen uit de HRB en/of Safeti-NL 8.3. Daar waar is afgeweken, is dit beargumenteerd in deze paragraaf.

Kans op een explosie

In Safeti-NL 8.3 wordt voor de bepaling van de overdrukeffecten van een gaswolkexplosie standaard gerekend met het TNO Multi-Energy explosiemodel welke werkt met explosie sterktecurves (1-10) om de mate van de sterkte van een explosie aan te geven afhankelijk van de mate van insluiting (congestie) en reactiviteit van de stof (geeft de mate van gevoeligheid voor vlamversnelling weer). Hoe hoger de curve, hoe groter de overdrukeffecten. In het verre veld komen de overdrukeffecten die gemodelleerd worden met TNT equivalente model overeen met TNO Multi-Energy model curves 6-10 (deze curves convergeren in het verre veld).



De mate van congestie in een gebied (of mogelijkheid van insluiting) waar een brandbare wolk mogelijk kan komen speelt een grote rol bij de hoeveelheid drukopbouw als gevolg van een explosie. Bij het bunkeren zal in de meeste gevallen de vrijgekomen brandstof in een open lucht situatie ontsteken (indien het ontsheet), wat gepaard zal gaan met lage overdrukeffecten (dit wordt vaak gemodelleerd als een wolkbrand). Indien er meer insluiting kan optreden (onwaarschijnlijk op water), kunnen hogere overdrukken ontstaan. Gezien de beperkte mate van insluiting in de omgeving van STS-bunkeractiviteiten, wordt een explosie met overdrukken van 300 mbar of hoger niet reëel geacht. De kans op letaliteit voor mensen die zich buiten bevinden ten gevolge van overdruk is 0 voor overdrukken kleiner dan 300 bar (Ref. /6/). Kortom, een explosie zal naar verwachting niet bijdragen aan het plaatsgebonden risico.

Er is besloten om geen explosie mee te nemen bij de PR-berekeningen. Dit betekent concreet dat in het geval van een vertraagde ontsteking de vervolgekans op een wolkbrand op 1 is gezet en een explosie op 0 (in de gebeurtenissenboom – ‘event tree’).

Echter, voor explosieaandachtsgebieden zijn explosies relevant vanaf 100 mbar overdruk. Bij 100 mbar overdruk kan er structurele schade aan gebouwen ontstaan en is er een kans dat personen in het gebouw komen te overlijden. Aangezien overdrukken van hoger dan 100 mbar niet zijn uit te sluiten op basis van mogelijk aanwezige (beperkte) insluiting, zijn explosies nog wel relevant bij het bepalen van aandachtsgebieden. Daarom zijn explosieaandachtsgebieden wel bepaald. Bij het bepalen van deze gebieden is gebruik gemaakt van de standaard gebeurtenissenboom.

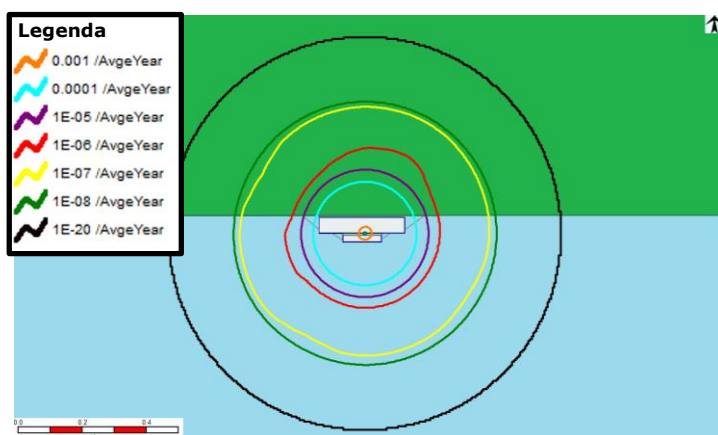
6.4.3 Ontstekingskansen

Voor de ontstekingskansen van het continu vrijkomen van waterstof is aangesloten bij de modellering door het RIVM (Ref. /8/). Voor gasvormig waterstof is gerekend met een kans op directe ontsteking van 1. Voor vloeibaar waterstof is gerekend met een kans op directe ontsteking van 0,9.

7 RESULTATEN

7.1 Plaatsgebonden risico

De risicocontouren voor het bunkeren van de alternatieve brandstoffen en bunkerscenario's zijn opgenomen in Appendix A. In Figuur 7-1 is ter illustratie het berekende plaatsgebonden risico (PR) van het bunkeren van vloeibaar waterstof met 1000 m³/uur getoond op een kaart. De rode contour is het 10⁻⁶/jaar plaatsgebonden risico. De maximale afstand van de slang tot de PR 10⁻⁶ per jaar contour (oftewel de externe veiligheidsafstand) is 273 meter. Het invloedsgebied voor de activiteit is weergegeven als de zwarte 10⁻³⁰ per jaar contour.



Figuur 7-1: Het plaatsgebonden risico voor 'vloeibaar waterstof bunkeren met hoog debiet'

De risicoafstanden voor de verschillende alternatieve brandstoffen zijn weergegeven in Tabel 7-1. De risicoafstanden voor methanol en gasvormig waterstof zijn een stuk kleiner (factor 3-5) dan die voor LNG. Voor gekoeld ammoniak en voor vloeibaar waterstof zijn de risicoafstanden vergelijkbaar met die voor LNG en voor ammoniak onder druk zijn de risicoafstanden ongeveer 3 keer zo groot vanwege het ontstaan van een grote toxische wolk in geval van een breuk van de slang.

Tabel 7-1: Afstand tot 10⁻⁶ per jaar PR-contour

Bunkerscenario	Laag debiet (400 m ³ /u) ^[1]	Hoog debiet (1000 m ³ /u) ^[1]
	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)
LNG (-146 °C)	321 ^[2]	- ^[3]
LNG (-159 °C)	231 ^[4]	344 ^[5]
Methanol	68	98
Ammoniak (gekoeld)	255	427
Ammoniak (onder druk)	793	973
Waterstof (vloeibaar)	214	273
Waterstof (gasvormig) – 3 t/uur	87	-
Waterstof (gasvormig) – 700 bar (60 g/s)	- ^[6]	-
Waterstof (gasvormig) – 1000 bar (60 g/s)	- ^[6]	-

[1] Bunkerdebieten gelden voor de vloeibare brandstoffen. Het debiet voor de gasvormige brandstoffen is weergegeven in de scenario-naam

[2] 346 m in de LNG-toolkit (Ref. /13/)

[3] De risicoafstanden met een hogere LNG-temperatuur (-146 °C) zijn gebaseerd op een situatie waarbij binnenvaartbunkerschepen, brandstof leveren aan zeevaartschepen. In deze studie werd het niet waarschijnlijk geacht dat binnenvaartbunkerschepen brandstof konden leveren met een debiet van 1000 m³/uur. Daarom is alleen de situatie met 400 m³/uur beschouwd (Ref. /13/).

[4] 223 m in de LNG-toolkit (Ref. /1/)

[5] 339 m in de LNG-toolkit (Ref. /1/)

[6] Vanwege de onrealistisch hoog benodigde bunkerduur zijn er alleen effectafstanden berekend

Als voor een bunkeroperatie een composietslang wordt gebruikt in plaats van een metalen slang zal het risico afnemen gezien de lagere faalfrequentie voor het breukscenario van een composietslang (factor 10 t.o.v. breuk van metalen slang). Naar verwachting zal het berekende 10^{-5} /jaar en 10^{-6} /jaar plaatsgebonden risico met een factor 10 afnemen. Daarom kan ter indicatie de berekende 10^{-5} per jaar PR-contour gebruikt worden om de externe veiligheidsafstand te bepalen voor het bunkeren met een composietslang. Ter verificatie van deze benadering is het scenario "ammoniak (druk) – laag debiet" doorgerekend met een composietslang om te vergelijken met het metalen slang scenario.

De 10^{-5} per jaar contour in het scenario met een metalen slang heeft een maximale afstand tot het scenario van 405 meter. Het scenario met een composietslang resulteert in exacte dezelfde afstand tot de 10^{-6} per jaar contour. De 10^{-5} per jaar contouren berekend in deze studie kunnen dus gebruikt worden ter indicatie voor de 10^{-6} per jaar contour (en externe veiligheidsafstand) wanneer er gebunkerd wordt met een composietslang in plaats van een metalen slang.

In Tabel 7-2 is de afstand tot de 10^{-5} /jaar contour gegeven voor alle beschouwde brandstoffen.

Tabel 7-2: Afstand tot 10^{-5} per jaar PR-contour

Bunkerscenario	Laag debiet (400 m ³ /u) ^[1]	Hoog debiet (1000 m ³ /u) ^[1]
	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)
LNG (-146 °C)	210	- ^[2]
LNG (-159 °C)	188	285
Methanol	56	85
Ammoniak (gekoeld)	153	246
Ammoniak (onder druk)	405	556
Waterstof (vloeibaar)	159	198
Waterstof (gasvormig) – 3 t/uur	87	-
Waterstof (gasvormig) – 700 bar (60 g/s)	- ^[3]	-
Waterstof (gasvormig) – 1000 bar (60 g/s)	- ^[3]	-

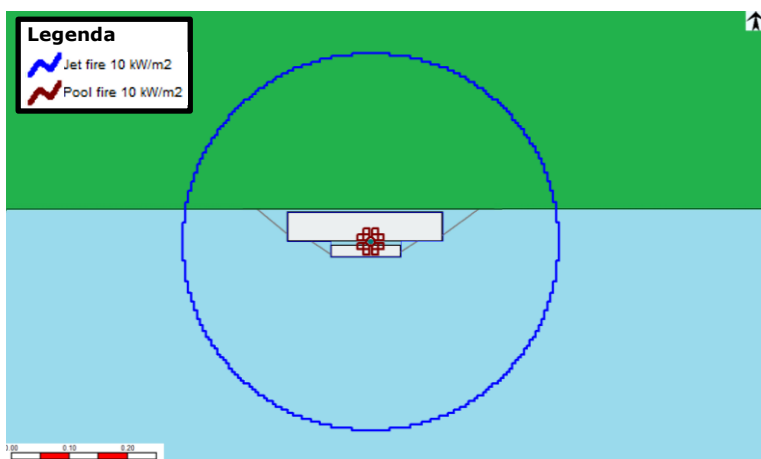
[1] Bunkerdebieten gelden voor de vloeibare brandstoffen. Het debiet voor de gasvormige brandstoffen is weergegeven in de scenario-naam

[2] De risicoafstanden met een hogere LNG-temperatuur (-146 °C) zijn gebaseerd op een situatie waarbij binnenvaartbunkerschepen brandstof leveren aan zeevaartschepen. In deze studie werd het niet waarschijnlijk geacht dat binnenvaartbunkerschepen brandstof konden leveren met een debiet van 1000 m³/uur. Daarom is alleen de situatie met 400 m³/uur beschouwd (Ref. /13/).

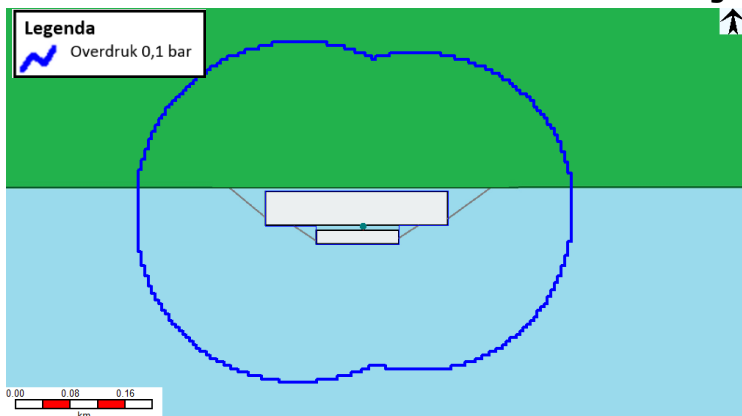
[3] Vanwege de onrealistisch hoge benodigde bunkerduur zijn er alleen effectafstanden berekend

7.2 Aandachtsgebieden

In de onderstaande figuren zijn (ter illustratie) de aandachtsgebieden getoond voor het scenario: vloeibaar waterstof bunkeren met hoog debiet. Uit de onderstaande figuren kan worden afgelezen dat het brandaandachtsgebied 324 meter vanaf de bunkerslang is. Het explosieaandachtsgebied is maximaal 338 meter van de bunkerslang. De contouren voor de aandachtsgebieden van alle alternatieve brandstoffen zijn weergegeven in Appendix B.



Figuur 7-2: Brandaandachtsgebied: 10 kW/m² contouren voor plasbrand en fakkelbrand voor het scenario: vloeibaar waterstof bunkeren met hoog debiet



Figuur 7-3: Explosieaandachtsgebied: 0,1 bar overdrukcontouren voor het scenario: vloeibaar waterstof bunkeren met hoog debiet

In Tabel 7-3 zijn de maximale afstanden (gemeten vanaf de bunkerslang) voor alle aandachtsgebieden opgenomen. Er dient opgemerkt te worden dat er geen explosieaandachtsgebied is berekend voor het bunkeren van gasvormig waterstof omdat er aangenomen wordt dat de directe ontstekingskans gelijk is aan 1 en er altijd een fakkelbrand ontstaat. Het is mogelijk dat deze aanname in de toekomst verandert en er toch een explosieaandachtsgebied berekend dient te worden. In dat geval is de maximale afstand vanaf de bunkerslang tot grens van het explosieaandachtsgebied ongeveer 110-150 m voor de beschouwde bunkerscenario's in deze studie.

Tabel 7-3: Maximale afstand vanaf bunkerslang tot grens aandachtsgebied

Stof	Debiet/druk	Afstand aandachtsgebied (m)		
		Brand	Explosie	Toxisch
LNG	400 m ³ /h (-146 °C)	249	274	- [4]
LNG	400 m ³ /h (-159 °C)	330	295	- [4]
Methanol	400 m ³ /h	102	- [3]	22
Ammoniak (gekoeld)	400 m ³ /h	- [1]	- [1]	1446
Ammoniak (onder druk)	400 m ³ /h	- [1]	- [1]	1478
Waterstof (vloeibaar)	400 m ³ /h	239	283	- [4]

Stof	Debiet/druk	Afstand aandachtsgebied (m)		
		Brand	Explosie	Toxisch
Waterstof (gasvormig)	3 t/u	87 ^[2]	- ^[5]	- ^[4]
Waterstof (gasvormig)	700 bar	55	- ^[5]	- ^[4]
Waterstof (gasvormig)	1000 bar	55	- ^[5]	- ^[4]
LNG	1000 m3/u	448	229	- ^[4]
Methanol	1000 m3/u	154	- ^[3]	34
Ammoniak (gekoeld)	1000 m3/u	- ^[1]	- ^[1]	2624
Ammoniak (onder druk)	1000 m3/u	- ^[1]	- ^[1]	2060
Waterstof (vloeibaar)	1000 m3/u	324	338	- ^[4]

[1] Alleen toxische effecten zijn beschouwd voor ammoniak en geen brandbare effecten, zie paragraaf 4.1.3

[2] Het brandaandachtsgebied voor dit scenario is hoger vanwege de aanname dat er een grotere diameter slang wordt gebruikt

[3] De LFL voor methanol reikt niet tot de 'terreingrens' (zie paragraaf 5.4.2.2), er wordt daarom geen explosie berekend

[4] Directe ontstekingskans voor gasvormig waterstof is 1 (zie RIVM-studie), daarom wordt er geen explosie berekend

[5] LNG/H2 zijn niet toxisch

7.3 Effectafstanden bunkeren waterstofgas

Gezien het lage bunker debiet (60 g/s) waarvan is uitgegaan voor bunkerscenario's met een druk van 700 bar en 1000 bar, zijn er geen PR-berekeningen uitgevoerd. Om een equivalente hoeveelheid energie te bunkeren zijn meer uren nodig dan in een jaar zitten. Om toch inzicht te geven in de risico's die verbonden zijn aan het bunkeren van gasvormig waterstof, zijn de effectafstanden berekend. De 10⁻⁶/jaar risicoafstand kan per definitie nooit groter zijn dan de maximale effectafstand.

Conform de notitie van het RIVM met een QRA voor een waterstoftankstations (Ref. /8/) wordt voor het continu vrijkomen van gasvormig waterstof uitgegaan van een directe ontstekingskans van 1 waarbij er altijd een fakkelbrand ontstaat. De juistheid van de directe ontstekingskans van gasvorming waterstof is recent in het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma (WVIP) in opspraak gekomen naar aanleiding van een explosie die heeft plaatsgevonden bij een waterstoftankstation in Noorwegen. Dit incident suggereert dat vertraagde ontstekingen (en explosies) mogelijk wel relevant zijn om te modelleren in de QRA. Er is daarom besloten ook de afstanden voor de effecten die ontstaan bij vertraagde ontsteking (wolkbrand en explosie) te berekenen. De effectafstanden zijn weergegeven in de onderstaande tabel.

Tabel 7-4: maximale effectafstanden voor het bunkeren van gasvormig waterstof

Effect	700 bar (m)	1000 bar (m)
Fakkelbrand - 3 kW/m ²	68	68
Fakkelbrand - 10 kW/m ²	53	53
Fakkelbrand - 35 kW/m ²	41	42
Wolkbrand	78	80
Worst-case explosie 0,02 bar	339	344
Worst-case explosie 0,1 bar	134	136
Worst-case explosie 0,3 bar	98	100

De grenswaarde voor letaliteit bij de verschillende effecten voor de PR-berekeningen zijn:

- 10 kW/m² voor blootstelling aan warmtestraling;
- 0,3 bar voor blootstelling aan overdruk;

- Vlamcontact voor blootstelling aan een wolkbrand.

Wanneer er wordt uitgegaan van een directe ontstekingskans van 1 en er dus altijd een fakkelbrand ontstaat (conform huidige aanname die het RIVM hanteert) wordt de maximale effectafstand voor het bunkeren van gasvormig waterstof bij 700 bar en 1000 bar ongeveer 50 meter (10 kW/m² voor de fakkelbrand).

Indien rekening wordt gehouden met vertraagde ontsteking en de mogelijkheid van een explosie wordt de maximale effectafstand voor het bunkeren van gasvormig waterstof ongeveer 100 meter (0,3 bar overdruk). De externe veiligheidsafstand kan per definitie niet groter worden dan deze waarden, ongeacht de bunkerduur.

8 CONCLUSIE

Het Havenbedrijf Amsterdam bereidt zich voor op een duurzame toekomst, waarbij ook het bunkeren van zeeschepen met alternatieve brandstoffen behoort. DNV heeft in 2017 een LNG-toolkit studie uitgevoerd voor het Havenbedrijf. In deze studie is het plaatsgebonden risico geassocieerd met voorziene LNG bunkeractiviteiten in de Haven van Amsterdam berekend om meer inzicht te krijgen in het risicoprofiel van de activiteiten en ter ondersteuning de ontwikkeling van een LNG bunkerkaart om ligplaatsen aan te wijzen.

Het Havenbedrijf wil op een vergelijkbare wijze inzicht krijgen in de milieuruimte (op het gebied van externe veiligheid) om het bunkeren van alternatieve brandstoffen zoals methanol, ammoniak en waterstof mogelijk te maken. Het Havenbedrijf heeft DNV gevraagd om dit externe veiligheidsonderzoek uit te voeren met als doel om de veiligheidsafstanden voor het bunkeren van alternatieve brandstoffen te vergelijken met die voor het bunkeren van LNG. In het onderzoek zijn de externe veiligheidsafstanden (10^{-6} /jaar plaatsgebonden risicoafstanden) en aandachtsgebieden (nieuw concept in de nieuwe Omgevingswet 2022) berekend.

De volgende brandstoffen zijn beschouwd in deze studie:

- LNG;
- Methanol;
- Ammoniak (onder druk & gekoeld);
- Gasvormig waterstof (gasvormig bij verschillende drukken en debieten);
- Vloeibaar waterstof.

Uit de studie is gebleken dat het bunkeren van gasvormig waterstof niet waarschijnlijk is voor de zeevaart, gezien de lage energiedichtheid en de relatief lage bunkerdebieten die genoemd worden in de literatuur. Hierdoor wordt de duur die benodigd is voor het bunkeren onrealistisch hoog om aan de energievraag te voldoen. Vanwege deze reden zijn voor het bunkeren van gasvormig waterstof, waarbij uitgegaan is van een laag debiet uit de literatuur (60 g/s), geen risicocontouren berekend. Om toch inzicht te krijgen in hoe groot de externe veiligheidsafstand maximaal zou kunnen worden (ongeacht de bunkerduur), zijn daarom effectafstanden berekend.

Er is echter een partij die claimt dat gasvormig waterstof gebunkerd kan worden met 3.000 kg/uur zonder dat daarbij problemen ontstaan door snelle opwarming van het opslagsysteem door adiabatische compressie. Deze claim is verder niet onderzocht op haalbaarheid. Echter, indien dergelijke bunkerdebieten haalbaar zijn, is het wel nuttig om inzicht te krijgen in de risicoafstanden omdat dan de bunkerduur realistischer is. Dit wil niet zeggen dat het dan wel aannemelijker wordt dat zeeschepen gebunkerd worden met dit hoge debiet gezien de lage energiedichtheid en de benodigde bunkervolumes.

Plaatsgebonden risico / externe veiligheidsafstanden

Uit de resultaten voor het plaatsgebonden risico blijkt dat de externe veiligheidsafstanden (10^{-6} /jaar) voor het bunkeren van methanol en gasvormig waterstof een stuk kleiner zijn (factor 3-5) dan die voor LNG. Voor gekoeld ammoniak en voor vloeibaar waterstof zijn de risicoafstanden vergelijkbaar met die voor LNG en voor ammoniak onder druk zijn de afstanden ongeveer 3 keer zo groot vanwege het ontstaan van een grote toxische wolk in geval van een breuk van de slang. De externe veiligheidsafstanden voor het bunkeren van de verschillende alternatieve brandstoffen zijn weergegeven in de tabel op de volgende pagina. De maximale effectafstand voor het bunkeren van gasvormig waterstof bij 700 bar en 1000 bar is ongeveer 50 m wanneer uitgegaan wordt dat er vanwege de lage

ontstekingsenergie de directe ontstekingskans gelijk is aan 1 en altijd een fakkelbrand ontstaat (conform huidige aanname die het RIVM hanteert) en 100 m wanneer rekening wordt gehouden met vertraagde ontsteking en de mogelijkheid van een explosie¹². De externe veiligheidsafstand kan per definitie niet groter worden dan deze waarden, ongeacht de bunkerduur.

Als voor een bunkeroperatie een composietslang wordt gebruikt in plaats van een metalen slang zal het risico afnemen gezien de lagere faalfrequentie voor het breukscenario van een composietslang. Naar verwachting zal het berekende 10^{-5} /jaar en 10^{-6} /jaar plaatsgebonden risico met een factor 10 afnemen. Daarom kan ter indicatie de berekende 10^{-5} per jaar PR-contour gebruikt worden om de externe veiligheidsafstand te bepalen voor het bunkeren met een composietslang. De PR 10^{-5} /jaar afstanden zijn opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 8-1: Plaatsgebonden risicoafstanden (afstand tot 10-6 en 10-5 per jaar PR-contour)

Bunkerscenario	Afstand tot 10-6/jaar PR-contour		Afstand tot 10-5/jaar PR-contour	
	Laag debiet (400 m ³ /u) ^[1]	Hoog debiet (1000 m ³ /u) ^[1]	Laag debiet (400 m ³ /u) ^[1]	Hoog debiet (1000 m ³ /u) ^[1]
	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)	PR Afstand (m)
LNG (-146 °C)	321	- [2]	210	- [2]
LNG (-159 °C)	231	344	188	285
Methanol	68	98	56	85
Ammoniak (gekoeld)	255	427	153	246
Ammoniak (onder druk)	793	973	405	556
Waterstof (vloeibaar)	214	273	159	198
Waterstof (gasvormig) – (3 t/u)	87	- [2]	87 ^[3]	- [2]
Waterstof (gasvormig) – 700 bar (60 g/s)	- [2]	- [2]	- [2]	- [2]
Waterstof (gasvormig) – 1000 bar (60 g/s)	- [2]	- [2]	- [2]	- [2]

[1] Bunkerdebieten gelden voor de vloeibare brandstoffen. Het debiet voor de gasvormige brandstoffen is weergegeven in de scenario-naam

[2] De onderbouwing waarom geen afstanden zijn berekend is te vinden onder Tabel 7-1 in paragraaf 7.1

[3] Voor het bunkeren van waterstof met 3 ton per uur is in de berekeningen uitgegaan van een hoge jaarlijkse bunkerduur waardoor de plaatsgebonden risicocontouren van 10^{-5} /jaar vrijwel even groot is als de 10^{-6} /jaar contour en het invloedsgebied (zie ook Appendix A)

Aandachtsgebieden

Aandachtsgebieden zijn gebieden die zichtbaar maken waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen onvoldoende beschermd zijn tegen de gevolgen van ongevallen met gevaarlijke stoffen. Er wordt in de nieuwe Omgevingswet 2022 onderscheid gemaakt tussen drie soorten aandachtsgebieden:

- Brandaandachtsgebied;
- Explosieaandachtsgebied;
- Gifwolkaandachtsgebied.

In onderstaande tabel zijn de maximale afstanden (gemeten vanaf de bunkerslang) voor de aandachtsgebieden weergegeven. Uit de resultaten blijkt dat de aandachtsgebieden voor ammoniak veruit het grootste zijn vanwege het grote toxische effect. De aandachtsgebieden voor het bunkeren van LNG zijn in dezelfde orde van grootte als die voor vloeibaar waterstof. De aandachtsgebieden voor het bunkeren van methanol en gasvormig waterstof zijn 3-6 keer zo klein in vergelijking met LNG. Volgens de huidige inzichten voor het berekenen van de risico's van gasvormig waterstof zijn

¹² De juistheid van de directe ontstekingskans van gasvorming waterstof is recent in het Waterstof Veiligheid Innovatie Programma (WVIP) in opspraak gekomen naar aanleiding van een explosie die heeft plaatsgevonden bij een waterstoftankstation in Noorwegen. Dit incident suggereert dat vertraagde ontstekingen (en explosies) mogelijk wel relevant zijn om te modelleren in de QRA.

explosieaandachtsgebieden eigenlijk niet van toepassing voor het bunkeren van gasvormig waterstof omdat het RIVM stelt dat de directe ontstekingskans voor de continue uitstroming van waterstofgas gelijk is aan 1 en dat daarom geen explosie kan optreden (zie ook hierboven). Vanwege deze reden zijn in onderstaande tabel geen afstanden voor explosieaandachtsgebieden voor het bunkeren van gasvormig waterstof opgenomen. Echter, mocht dit inzicht in de toekomst wijzigen en explosies mogelijk wel relevant zijn om te beschouwen, dan is het explosieaandachtsgebied voor het bunkeren van gasvormig waterstof ongeveer 110-150 m voor de beschouwde bunkerscenario's in deze studie.

Tabel 8-2: Maximale afstand vanaf bunkerslang tot grens aandachtsgebied

Brandstof	Debiet	Afstand aandachtsgebied (m)		
		Brand	Explosie	Toxisch
LNG	400 m3/h (-146 °C)	249	274	- [1]
LNG	400 m3/h (-159 °C)	330	295	- [1]
Methanol	400 m3/h	102	- [1]	22
Ammoniak (gekoeld)	400 m3/h	- [1]	- [1]	1446
Ammoniak (onder druk)	400 m3/h	- [1]	- [1]	1478
Waterstof (vloeibaar)	400 m3/h	239	283	- [1]
Waterstof (gasvormig)	3 t/u	87	- [1]	- [1]
Waterstof (gasvormig)	700 bar (60 g/s)	55	- [1]	- [1]
Waterstof (gasvormig)	1000 bar (60 g/s)	55	- [1]	- [1]
LNG	1000 m3/u	448	229	- [1]
Methanol	1000 m3/u	154	- [1]	34
Ammoniak (gekoeld)	1000 m3/u	- [1]	- [1]	2624
Ammoniak (onder druk)	1000 m3/u	- [1]	- [1]	2060
Waterstof (vloeibaar)	1000 m3/u	324	338	- [1]

[1] De onderbouwing waarom geen afstanden zijn berekend is te vinden onder Tabel 7-3 in paragraaf 7.2

De resultaten uit dit onderzoek geven een eerste inzicht in de externe veiligheid van het bunkeren van alternatieve brandstoffen naar zeeschepen en de benodigde milieuruimte waar rekening mee moet worden gehouden. Er is echter nog veel onbekend over hoe het bunkeren van deze brandstoffen er precies uit gaat zien. Het wordt daarom aanbevolen om de uitgangspunten en de aannames in de toekomst (wanneer de markt verder ontwikkeld is) tegen het licht te houden en indien nodig te actualiseren in het kader van bijvoorbeeld de ontwikkeling van bunkerkaarten.

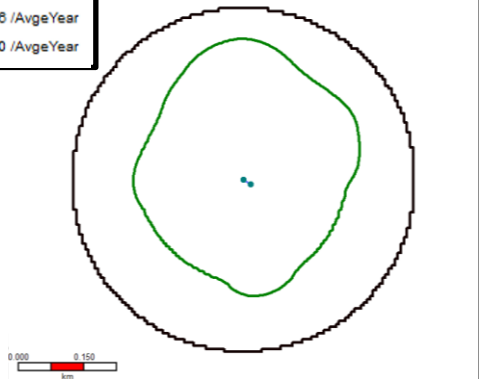
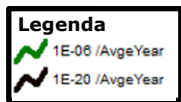
9 REFERENTIES

- /1/ LNG-toolkit voor het havengebied Amsterdam, Rapport Nr.: PP184174-1, Rev. 0, Document Nr.: 114QV8LO-2, Datum: 2017-09-01
- /2/ Marigreen, "Perspectives for the use of hydrogen as fuel in inland shipping", oktober 2018
- /3/ Publicatiereeks gevaarlijke stoffen (PGS), PGS 33-1: Afleverinstallaties van vloeibaar aardgas (LNG) voor voertuigen en werktuigen, versie 0.2, april 2020
- /4/ Publicatiereeks gevaarlijke stoffen (PGS), PGS 12: Ammoniak – Opslag en verlading, versie 0.2, interim PGS, april 2020
- /5/ Publicatiereeks gevaarlijke stoffen (PGS), PGS 35: Waterstofinstallaties voor het afleveren van waterstof aan voertuigen en werktuigen, versie 0.2, april 2020
- /6/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Handleiding Risicoberekeningen Bevi, Versie 4.3, 1 januari 2021
- /7/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Wat is een QRA? Een introductie over QRA's voor inrichtingen in Nederland, 29 september 2009, http://www.rivm.nl/Onderwerpen/O/Omgevingsveiligheid/Inrichtingen%3Aj85fmAxmQRmsN99K9Um_NA/Gerelateerde_onderwerpen%3AiAzJiQTRVaSOhsz-2w_vQ/QRA/Downloads/Wat_is_een_QRA.org
- /8/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Memo Risico- en effectafstanden waterstoftankstations, 3 oktober 2016
- /9/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Interim rekenmethode LNG-bunkerstations, versie 1.0, 18 december 2014
- /10/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Rekenmethodiek LNG tankstations, versie 1.0.2, 2017-04-25
- /11/ Handboek Risicozonering Windturbines, opgesteld door DNV KEMA in opdracht van AgentschapNL, versie 3.1 uitgave september 2014
- /12/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Rekenmethodiek LNG tankstations, versie 1.0.2, 2017-04-25, <http://www.rivm.nl/dsresource?objectid=5a763cf4-b715-418b-8640-5bc374b6056d&type=PDF>
- /13/ Notitie Vergelijkingsonderzoek bunkeren met grote en kleine bunkerscheepen, Memo Nr.: 116XOT3G-2/ DVDM, datum: 31-10-2017

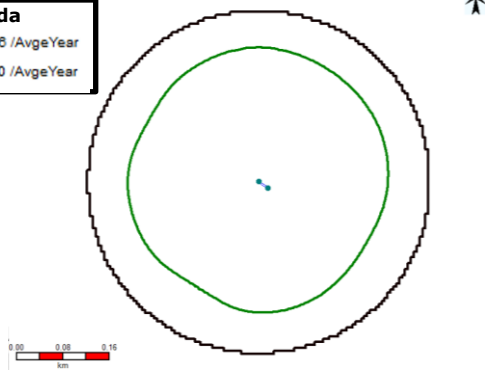
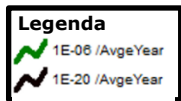
APPENDIX A

Plaatsgebonden risicocontouren

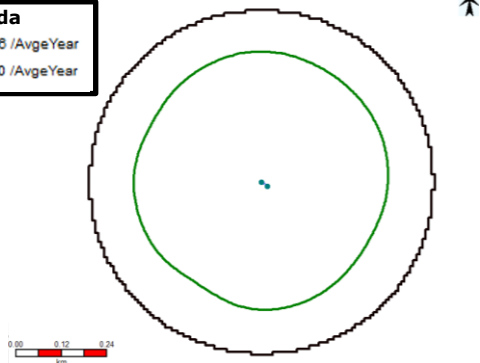
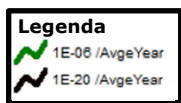
LNG – laag debiet -146 °C



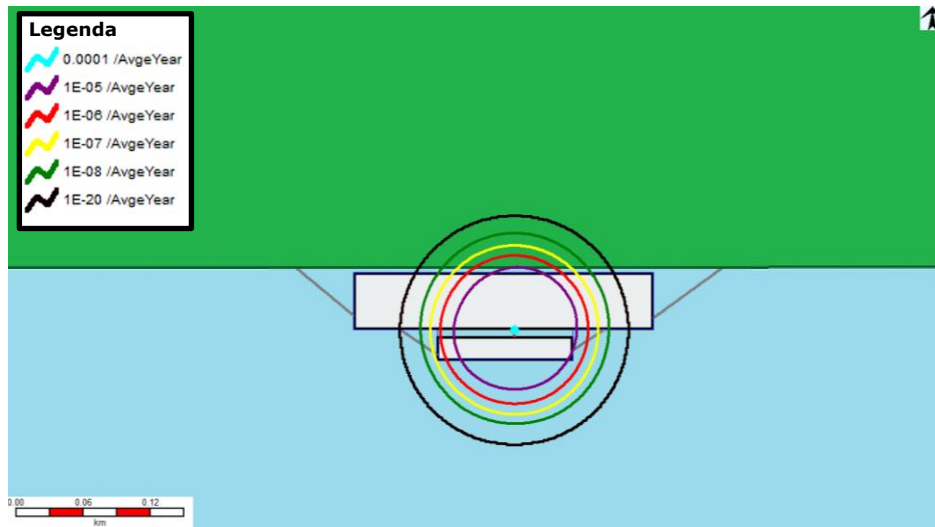
LNG – laag debiet -159 °C



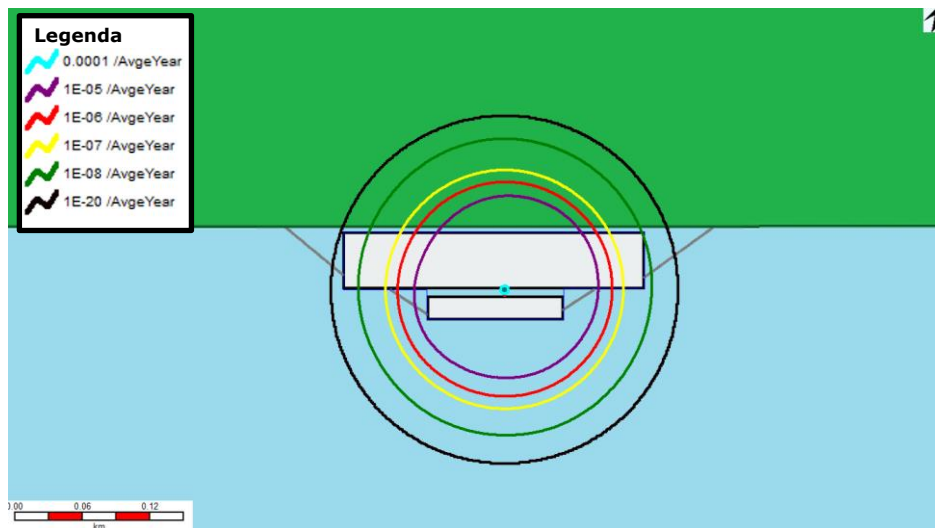
LNG – hoog debiet



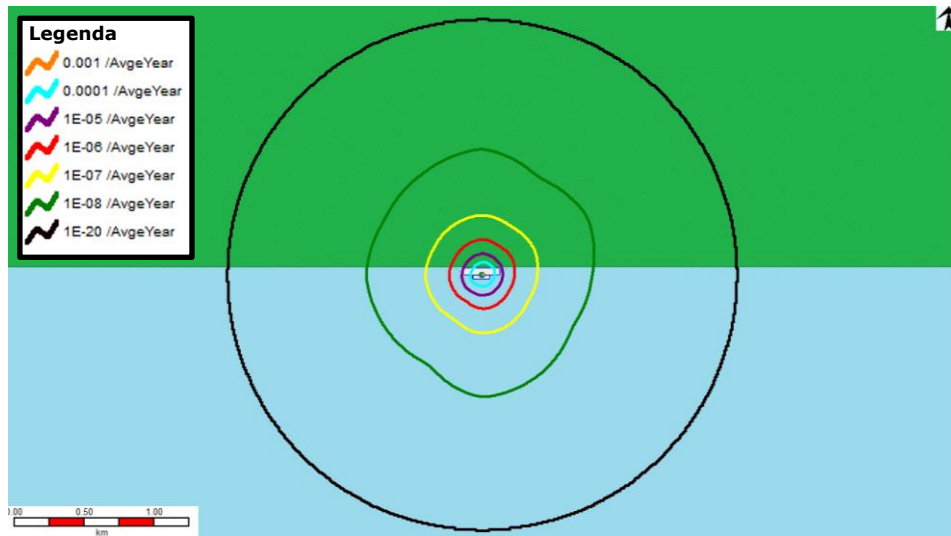
Methanol – Laag debiet



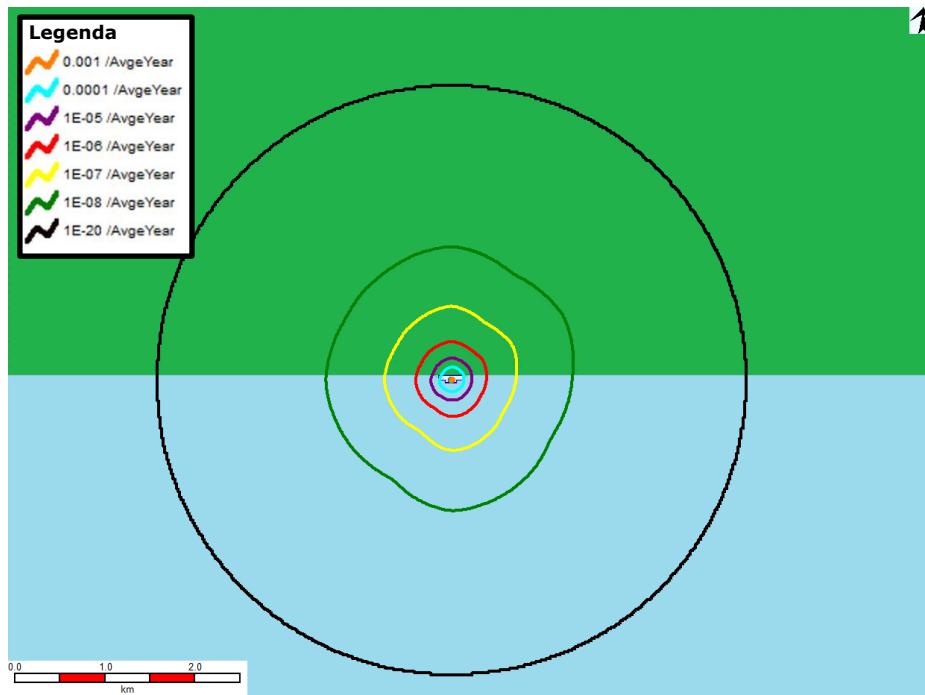
Methanol – hoog debiet



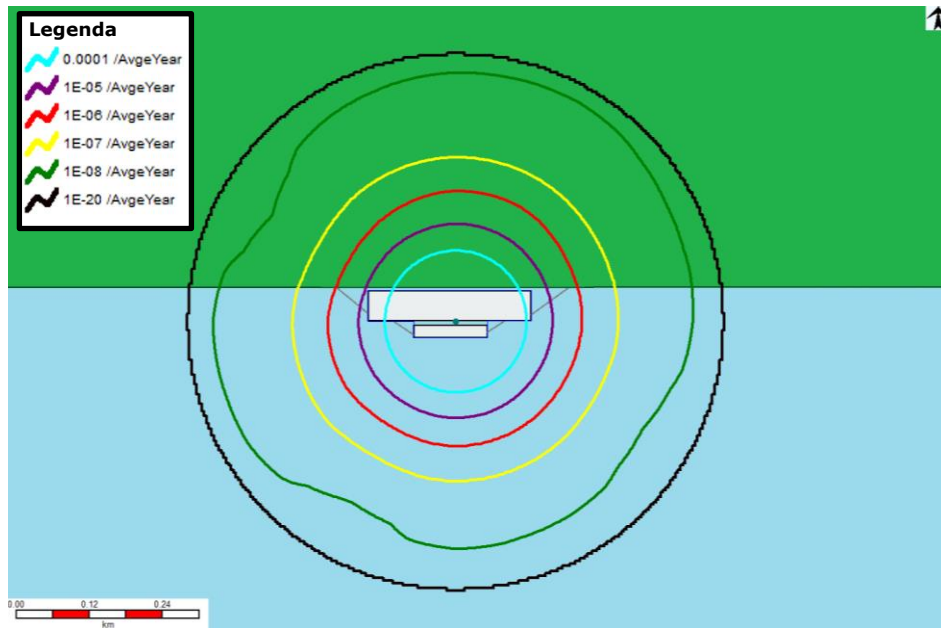
NH3 (T) – laag debiet



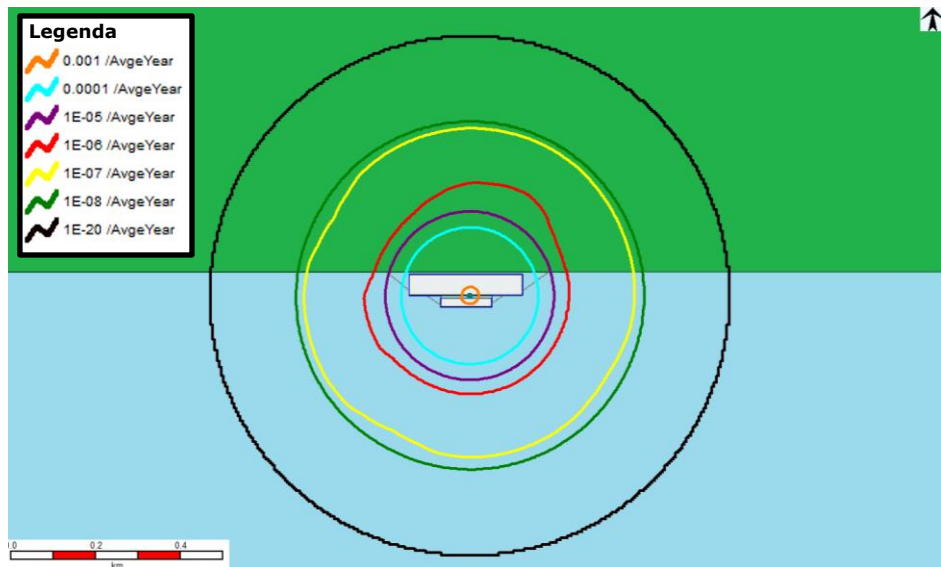
NH3 (T) – Hoog debiet



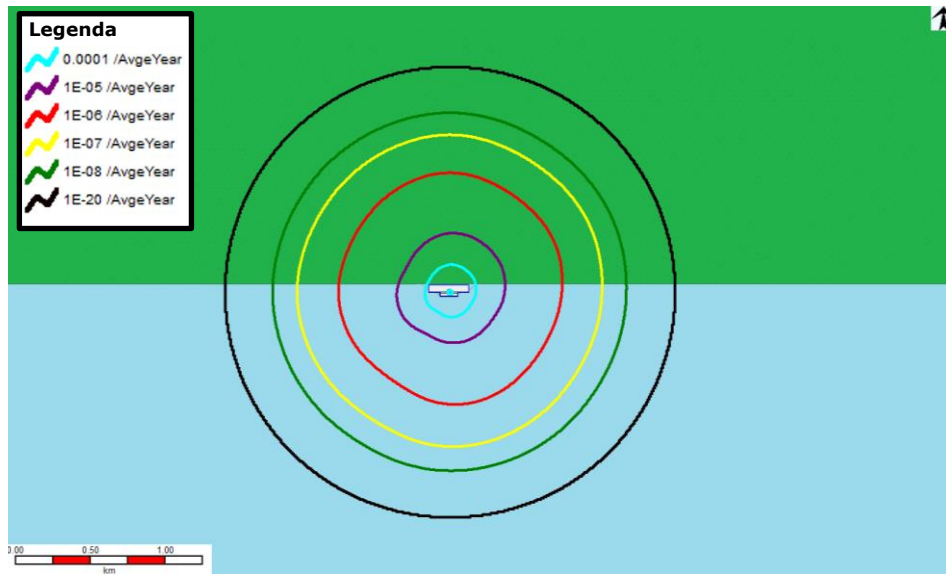
Waterstof (L) – laag debiet



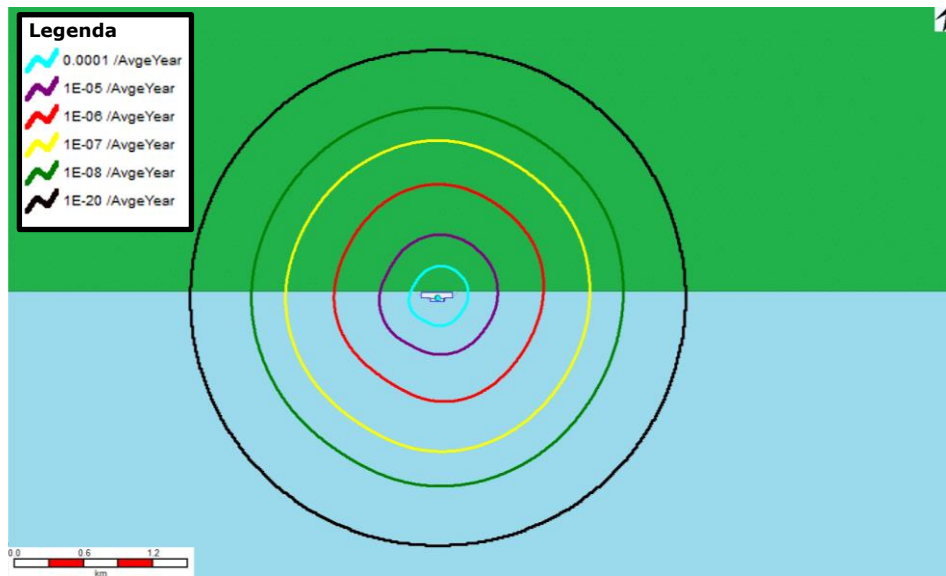
Waterstof (L) – hoog debiet



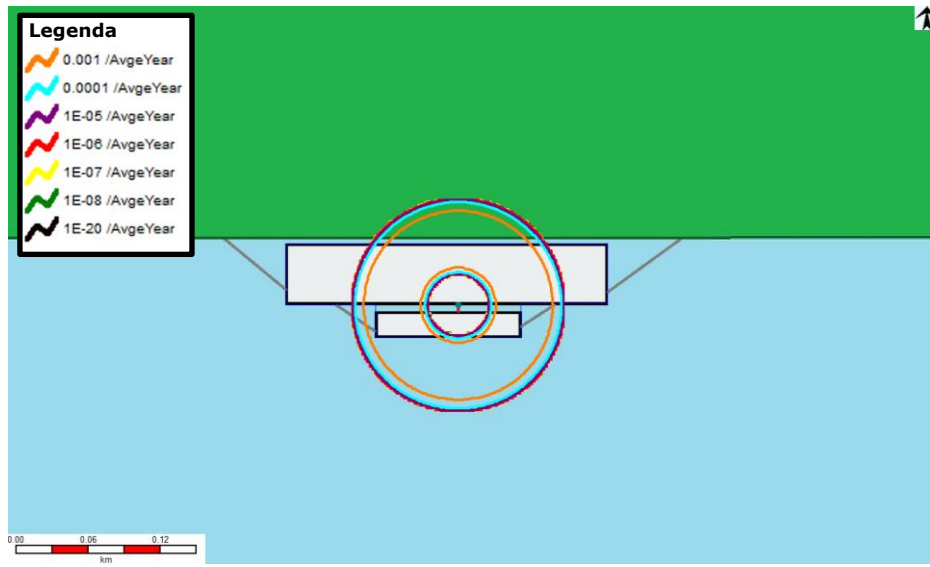
NH3 (P) – laag debiet



NH3 (P) – hoog debiet



Waterstof (G) – hoog debiet

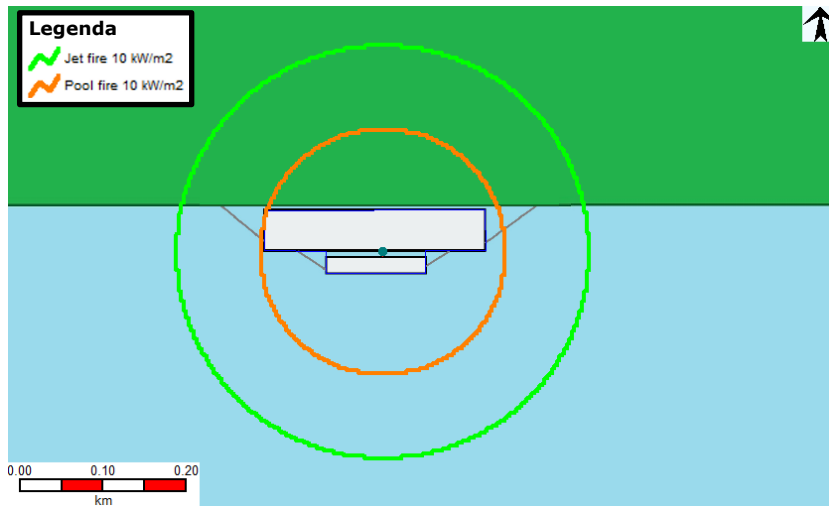


APPENDIX B

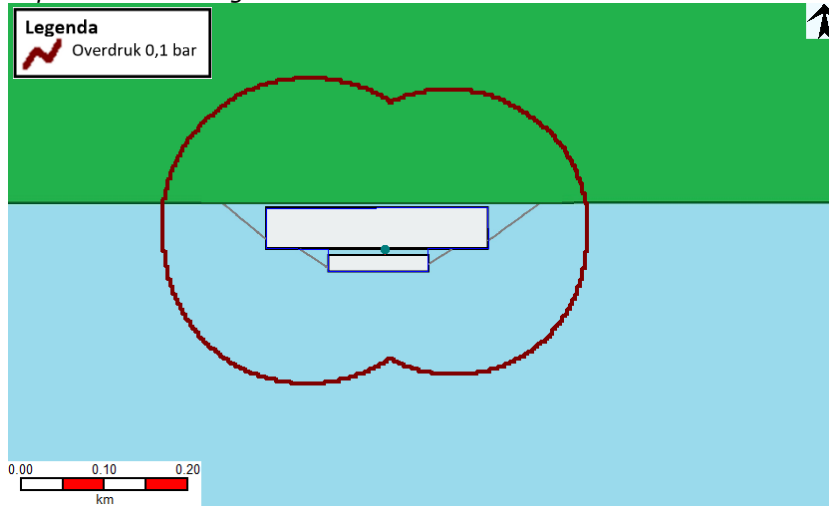
Aandachtsgebieden

LNG – laag debiet -146 °C

Brandaandachtsgebied

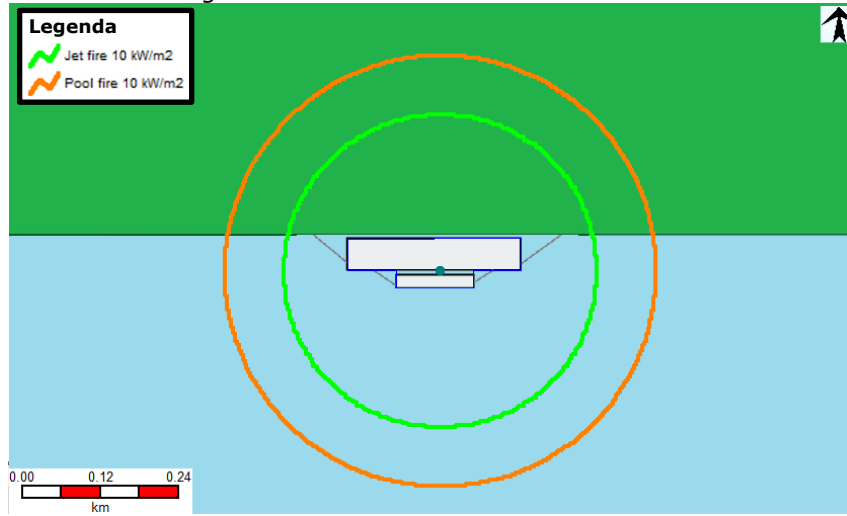


Explosieaandachtsgebied

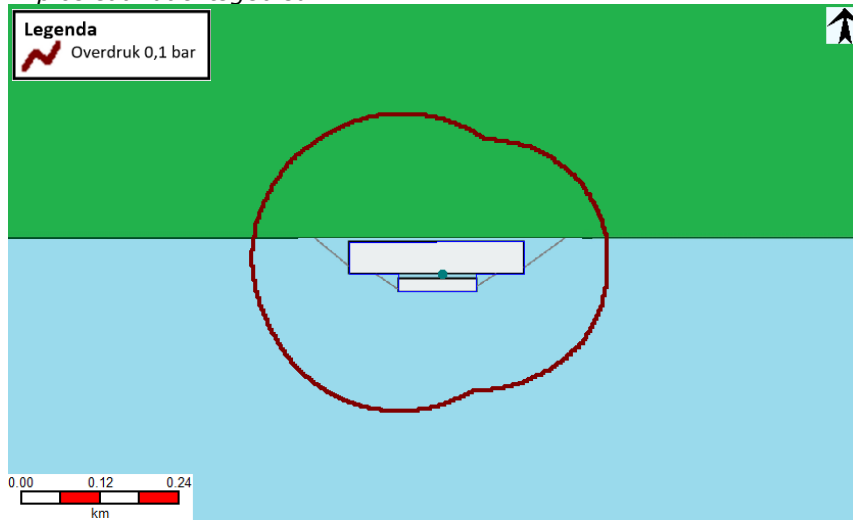


LNG – laag debiet -159 °C

Brandaandachtsgebied

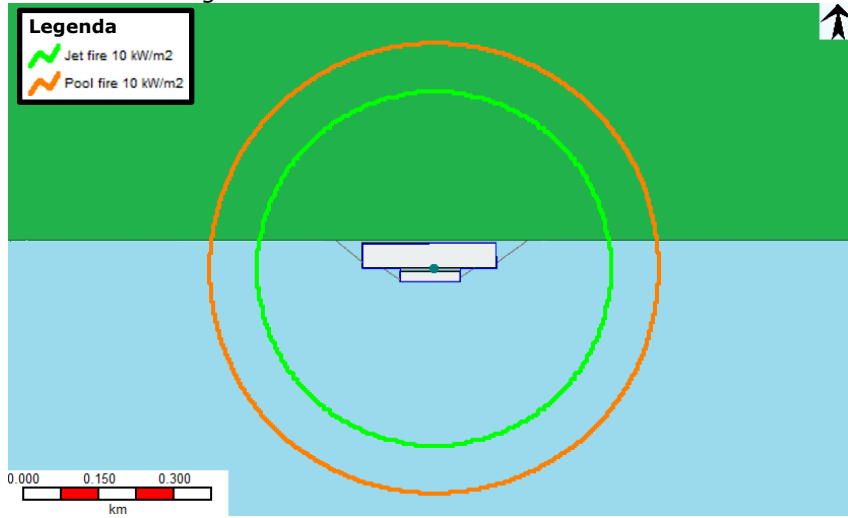


Explosieaandachtsgebied

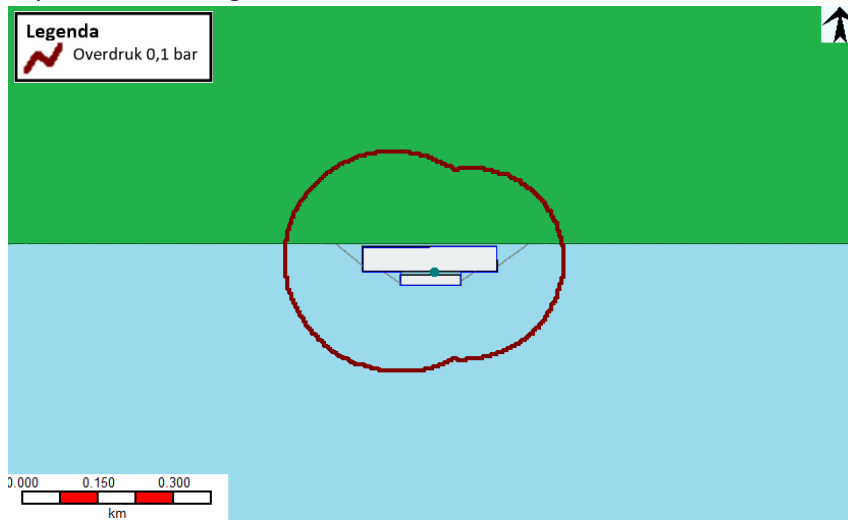


LNG – hoog debiet

Brandaandachtsgebied

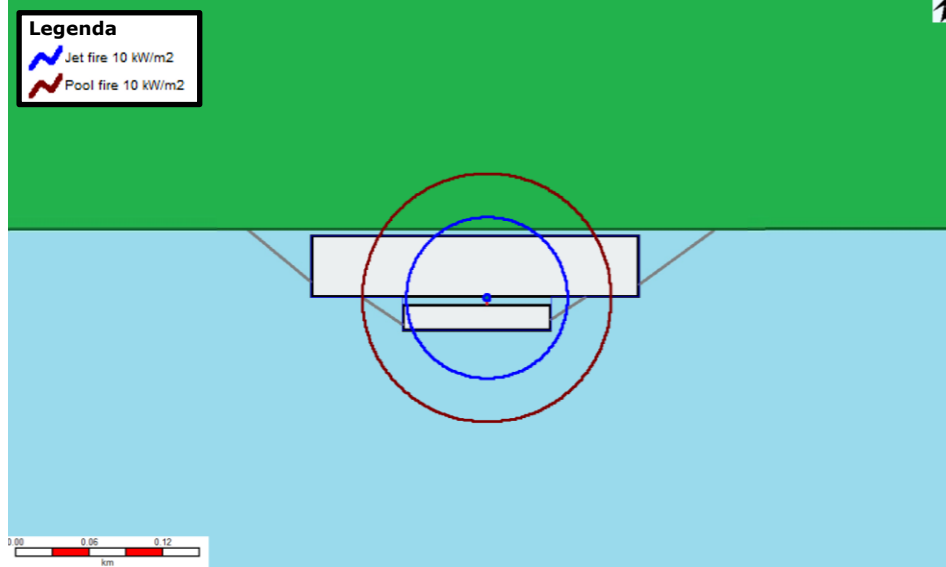


Explosieaandachtsgebied

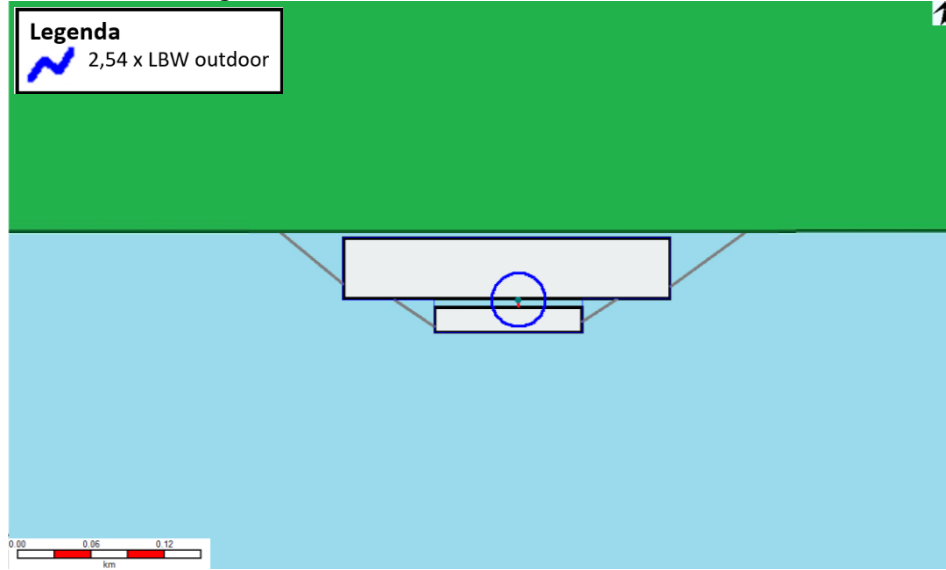


Methanol – laag debiet

Brandaandachtsgebied

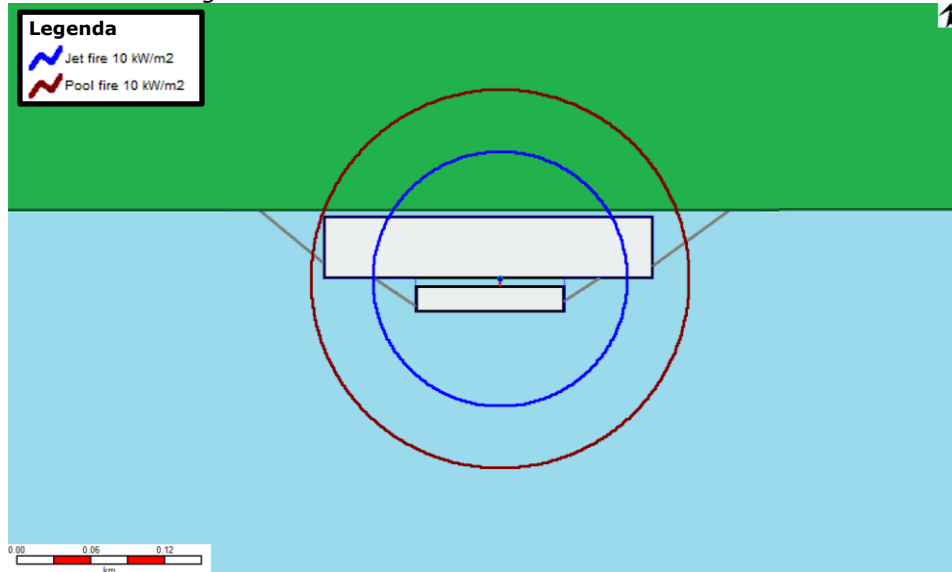


Gifwolkaandachtsgebied

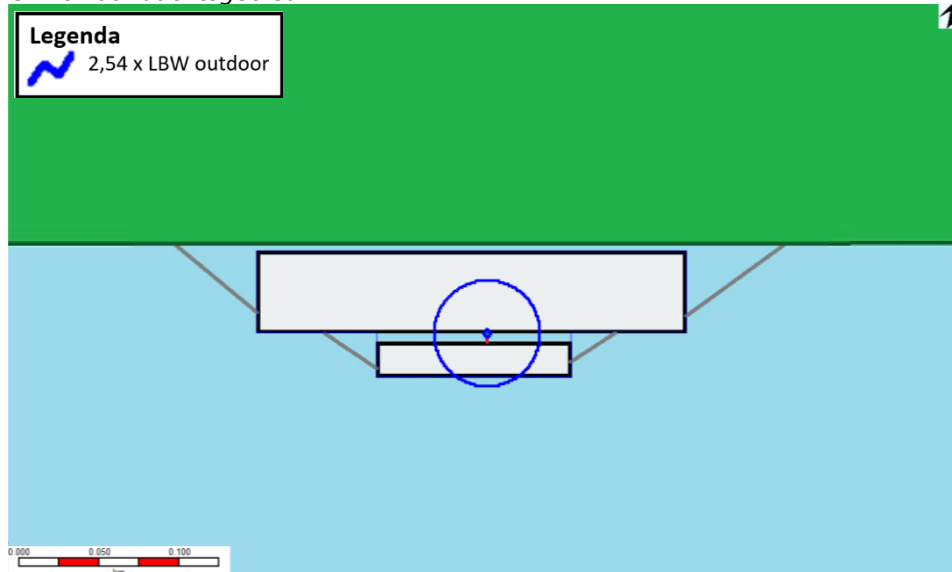


Methanol – hoog debiet

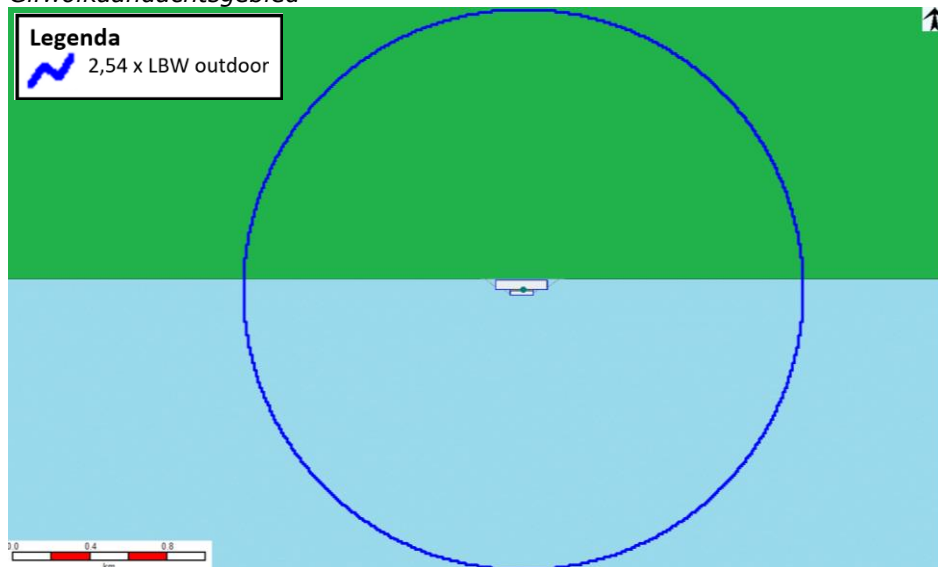
Brandaandachtsgebied



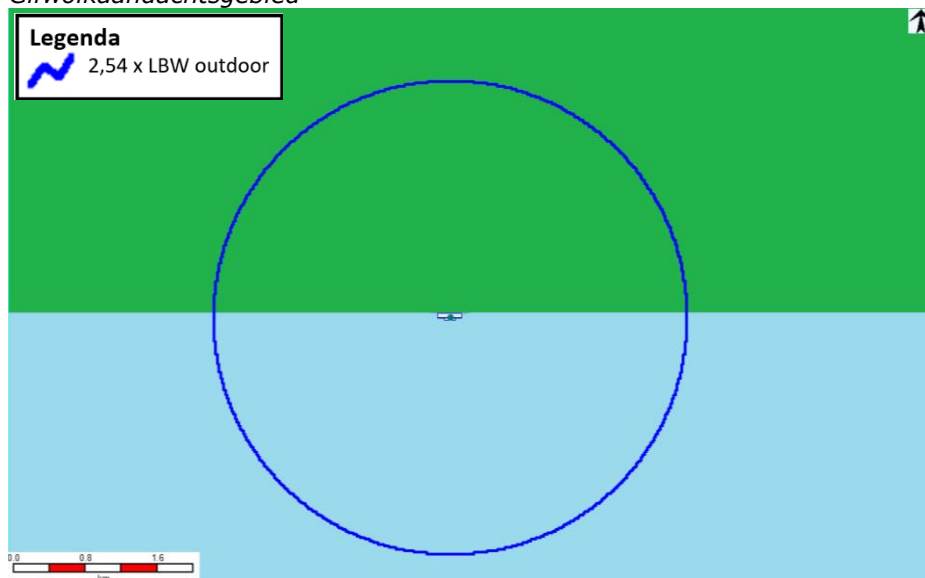
Gifwolkaandachtsgebied



NH3 (T) – laag debiet
Gifwolkaandachtsgebied

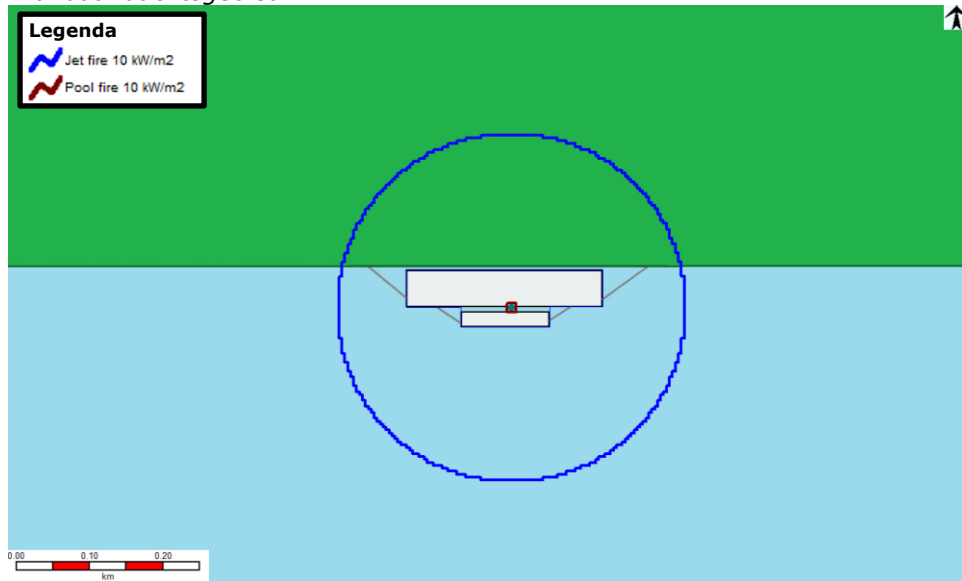


NH3 (T) – hoog debiet
Gifwolkaandachtsgebied

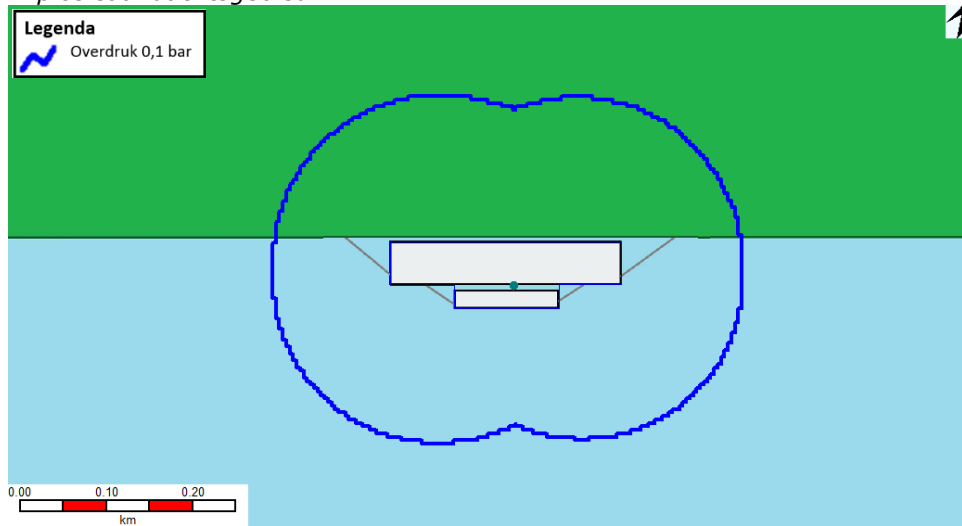


Waterstof (L) – laag debiet

Brandaandachtsgebied

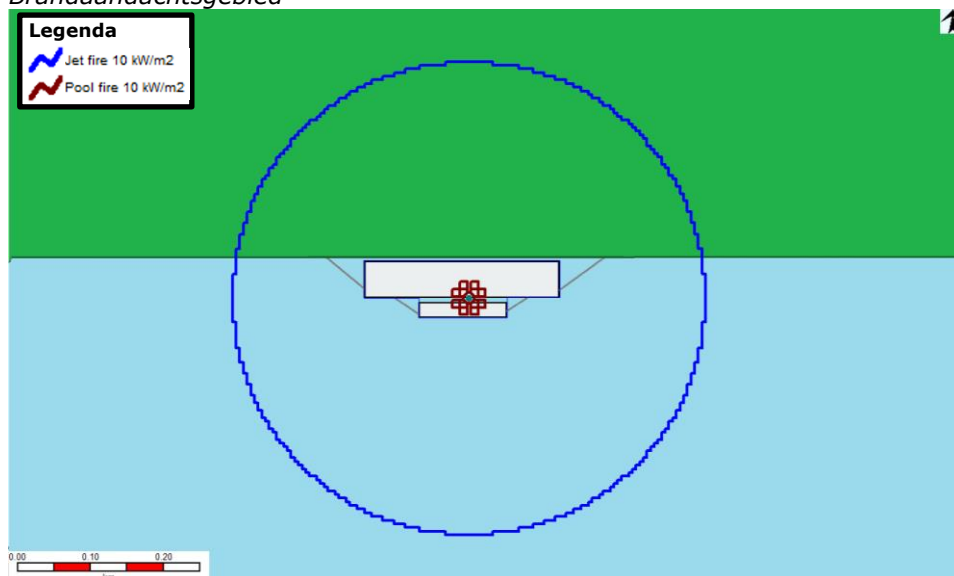


Explosieaandachtsgebied

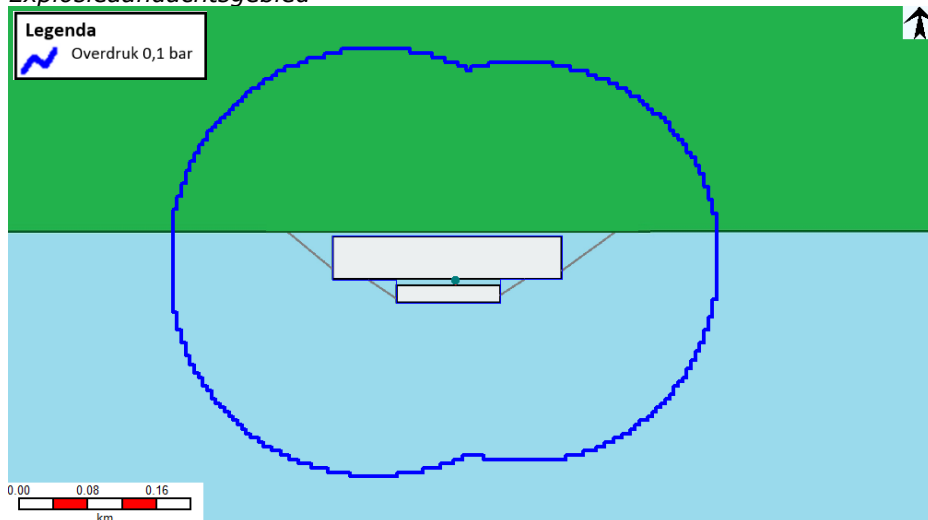


Waterstof (L) – hoog debiet

Brandaandachtsgebied

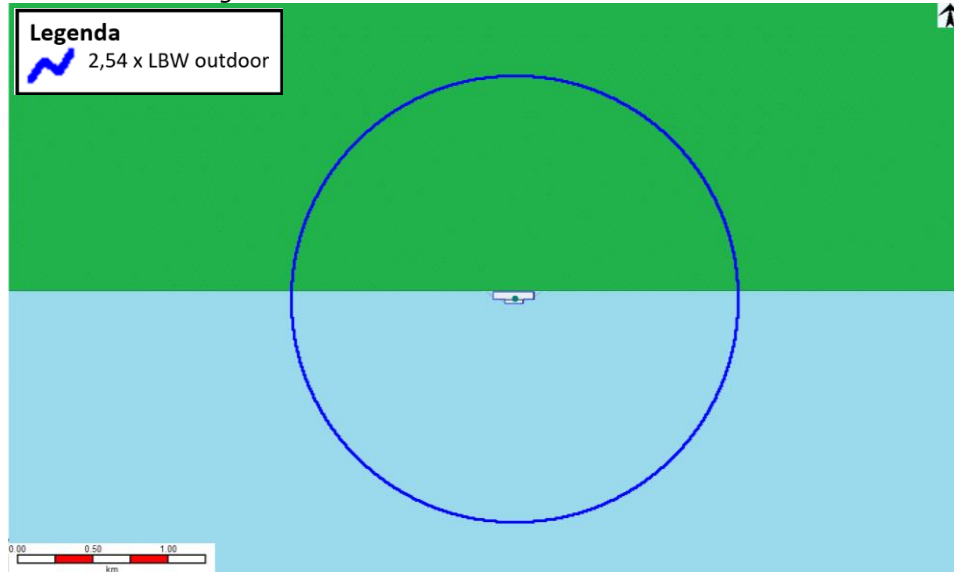


Explosieaandachtsgebied



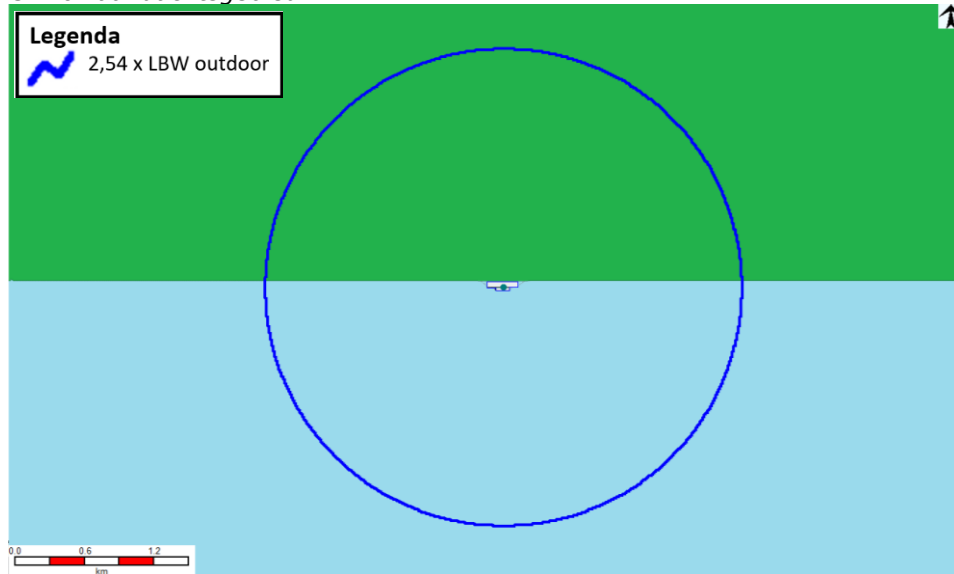
NH3 (P) – laag debiet

Gifwolkaandachtsgebied



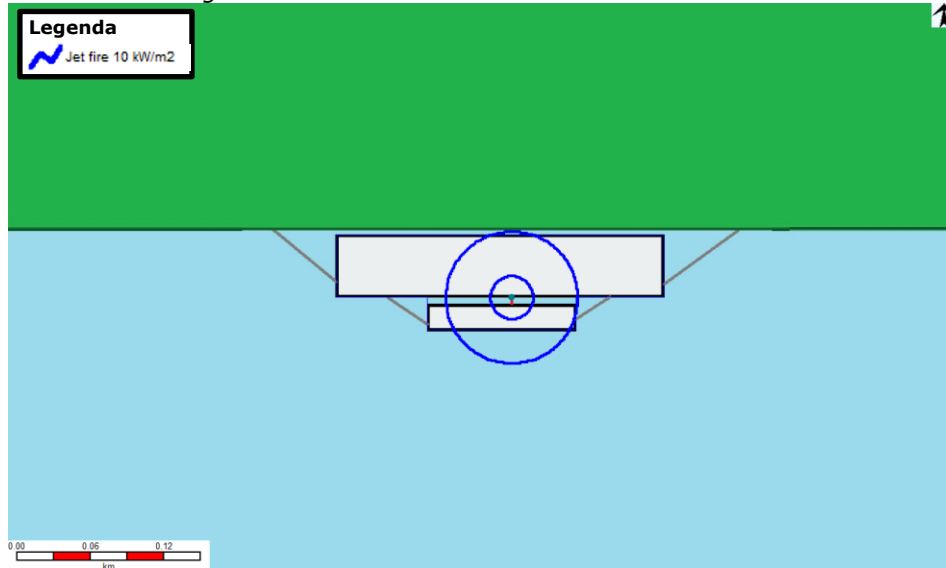
NH3 (P) – Hoog debiet

Gifwolkaandachtsgebied



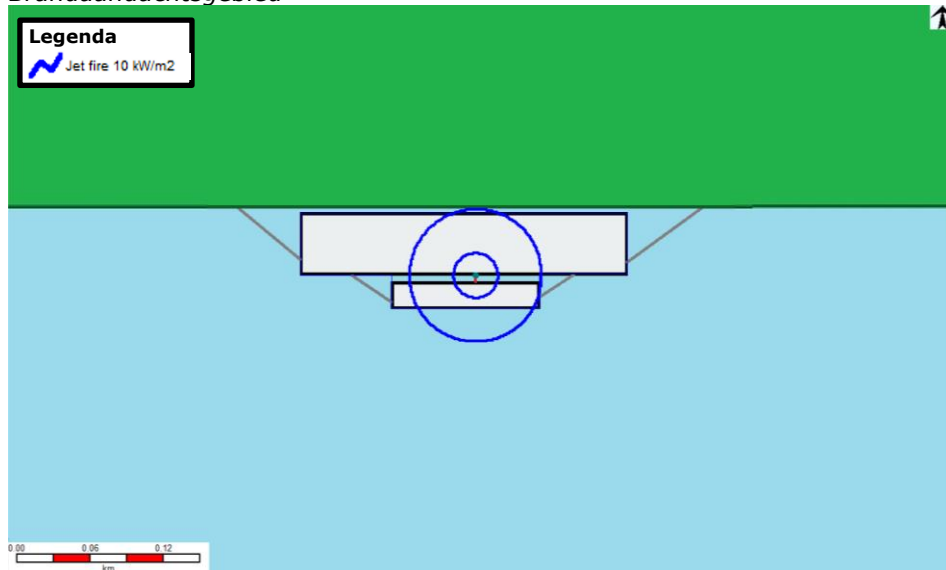
Waterstof (G) – 700 bar

Brandaandachtsgebied



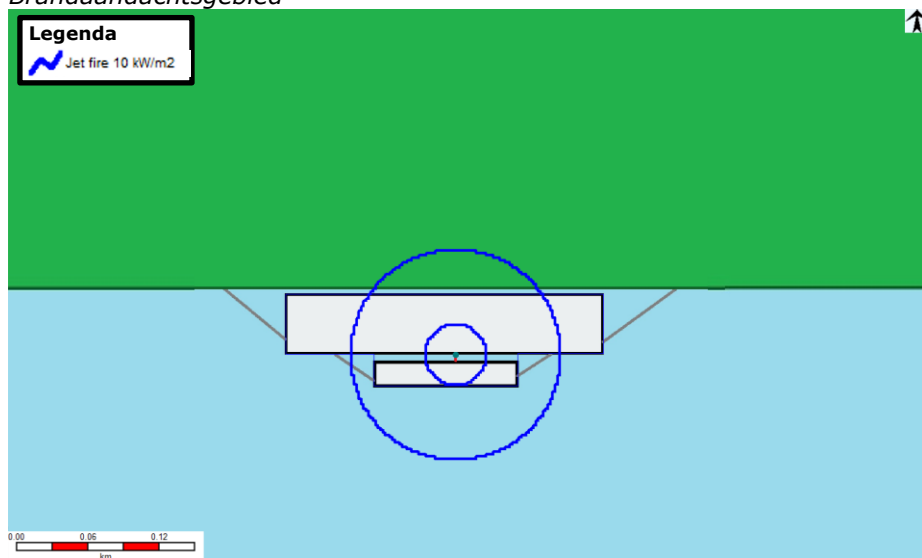
Waterstof (G) – 1000 bar

Brandaandachtsgebied



Waterstof (G) – Hoog debiet

Brandaandachtsgebied



*Brandbaar aandachtsgebied is vrijwel hetzelfde als de risicocontouren omdat het scenario alleen in een fakkelbrand resulteert, de vervolgcans op een explosie is op 0 gezet in de event tree, directe ontstekingskans = 1 voor gasvormig waterstof dus geen plasbrand/wolkbrand en waterstof is niet toxisch. Het enige effect dat overblijft is een fakkelbrand.





About DNV

Driven by our purpose of safeguarding life, property and the environment, DNV enables organizations to advance the safety and sustainability of their business. We provide classification and technical assurance along with software and independent expert advisory services to the maritime, oil & gas and energy industries. We also provide certification services to customers across a wide range of industries. Operating in more than 100 countries, our professionals are dedicated to helping our customers make the world safer, smarter and greener.