



Rijksdienst voor Ondernemend
Nederland

Verkenkende studie QRA's kleinschalige waterstofinstallaties en activiteiten

In opdracht van het ministerie van Klimaat en Groene Groei

Verkenkende studie QRA's kleinschalige waterstofinstallaties en activiteiten

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland

Rapport nr.: 10487246-1, Rev. 0

Document nr.: 2198084

Datum: 07-04-2025



DISCLAIMER

Independence, impartiality, and advisory limitations

This document contains content provided by DNV. Please note the following:

Ethical safeguards

To maintain integrity and impartiality essential to its third-party roles, DNV performs initial conflict-of-interest assessments before engaging in advisory services.

Priority of roles

This report is generated by DNV in its advisory capacity, subsequent to conflict-of-interest assessments. It is separate from DNV's responsibilities as a third-party assurance provider. Where overlap exists, assurance activities conducted by DNV will be independent and take precedence over the advisory services rendered.

Future assurance limitation

The content in this document will not obligate or influence DNV's independent and impartial judgment in any future third party assurance activities with DNV.

Compliance review

DNV's compliance with ethical and industry standards in the separation of DNV's roles is subject to periodic external reviews.

Inhoudsopgave

1	MANAGEMENT SAMENVATTING	1
1.1	English summary	1
1.2	Nederlandse samenvatting	3
2	INTRODUCTIE.....	6
2.1	Doelstelling	6
2.2	Aanpak	6
3	HUIDIG JURIDISCH KADER EN RELEVANTE BEGRIPPEN	8
3.1	Plaatsgebonden risico	8
3.2	Aandachtsgebieden	10
4	BESCHRIJVING TECHNISCHE SYSTEMEN.....	11
5	ONGEVALSCENARIO'S	12
5.1	Elektrolyser (B1)	12
5.2	Buffervat (B2, B15, B16)	12
5.3	Compressor (B3, B12)	13
5.4	Tubetrailer (B4, B7)	13
5.5	Flessenpakketten (B5, B8, B11)	14
5.6	Reduceer (B6, B10) en lospaneel (B9)	14
5.7	Leidingen (B13 en L1 t/m L9)	14
5.8	Afleverzuil / verlading (B14)	15
6	MODELLERING	16
6.1	ESD ingrijpen	16
6.2	Terugslagklep	16
6.3	Systeemreactie compressor	16
6.4	Nalevering en terugstroming	16
6.5	Weergegevens	17
6.6	Ruwheidslengte	17
6.7	Terreingrens	17
6.8	Locatie	17
6.9	Vergelijking Rekenvoorschrift met DNV waterstof QRA guideline	17
6.10	Gevoeligheidsanalyses	19
7	RESULTATEN	20
7.1	Plaatsgebonden risico	20
7.2	Aandachtsgebieden	20
7.3	Risicobepalende scenario's	20
7.4	Effectafstanden	21
7.5	Risico drivers	22
7.6	Gevoeligheidsanalyses	22
8	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN.....	24
9	REFERENTIES	26
Bijlage A	Inventarisatie QRA input	
Bijlage B	Uitgewerkte ongevalscenario's	
Bijlage C	Input DNV's RIVM hose model	
Bijlage D	SMEZ rapport	

1 MANAGEMENT SAMENVATTING

1.1 English summary

The 'Rijksdienst voor Ondernemend Nederland' (RVO) has asked DNV to conduct an exploratory QRA study for small-scale hydrogen installations and activities. RVO carries out this assignment on behalf of the Ministry of Climate Policy and Green Growth (KGG).

The purpose of this study is to calculate risks for a generic small-scale hydrogen installation. Based on these calculations, insight is provided into the important parameters for calculating the risk and possible risk-reducing measures. In addition to the modelling according to the current Dutch calculation methodology, recommendations are made on potential improvements to the calculation methodology for hydrogen installations and the identification of effective measures.

For this study, a hypothetical small-scale hydrogen plant was defined based on collected information and information provided by industry. The information has been summarised in a block diagram in which the technical systems for the import, production, storage and export of hydrogen for small-scale installations have been mapped out. A QRA was then carried out to calculate the risks and to further analyse risks by applying risk ranking on selected components and scenarios.

The distances to the various risk contours are shown in Tabel 1-1. It should be noted that the QRA has not been calculated for one specific hydrogen installation. The calculated installation is a generic installation with all the components that may be present in a small-scale installation. The risks of a specific installation, which does not include all the different components from this study, are therefore expected to be smaller than those calculated in this study.

The relevant distance for a QRA is the 10^{-6} per year LSIR-contour. For the hydrogen installation, this contour extends approximately 43 metres from the location of the plant.

Tabel 1-1: Distance to LSIR-contours

LSIR contour (per year)	Distance (m)
10-4	21
10-5	31
10-6	35
10-7	48
10-8	49

The flammable focus area reaches 31 meters (jet fire from largest connection on tube trailer) and the explosion focus area reaches 60 meters (delayed ignition after catastrophic failure tube on tube trailer).

The risk determining scenarios are mainly related to the transfer of hydrogen to and from tube trailers. Close to the installation, the risks are mainly determined by the rupture of the loading hose and at a greater distance from the installation, the risks are determined by the catastrophic failure of the tube trailer itself and catastrophic failure of the buffer vessels.

The following parameters are important for reducing the risks of loading:

- Transfer time¹, the leak frequency during transfer is primarily determined by the transfer time².
- Distance between loading points. By keeping a distance between different tube trailers that load at the same time, the risks of the two operations will not add up.
- A fire wall can shield a vulnerable area from flammable effects in the event of a LoC with the loading hose.

¹ The standard hose failure frequencies in the calculation manual do not separate between 'transfer' and long duration 'filling'. The frequency exclusively depends on transfer hours. In reality the frequency of an incident will also depend on the number of (dis)connections. This means that a long filling process with only one connection and disconnection should result in a lower frequency than a transfer operation of the same duration with frequent connections and disconnections. Unfortunately this is not something that can be taken into account in the Dutch calculation manual. The RIVM hose model that has been developed by DNV can account for this.

² Reducing transfer time reduces the likelihood of a leak. However, typically lower transfer time would be paired with higher transfer rates, which increases the consequences. For any operation there will be some optimum transfer time/flow rate that results in the lowest risk.

- Limit the number of loading operations. In practice, only one tube trailer is connected for a longer duration at any given time without frequent connection and disconnection. In the model of the Calculation Manual, the number of transfers is not taken into account for the probability of failure of a hose. In practice, many LoC incidents with loading have to do with the connection and disconnection of the loading hose. By limiting the number of loading actions, the risks of loading can be limited. This is also reflected in the risk calculations when the new RIVM hose model developed by DNV is applied.

The following parameters are important for reducing the risks of the buffer vessels and tube trailers:

- Minimize the presence of full tube trailers (for example, as little waiting time as possible for a full tube trailer before it can connect to the installation).
- Reduce the number of buffer vessels on the installation.
- Reducing ignition probability (e.g. by hazardous area classification (ATEX)) will result in a lower risk in practice. However, for the risk calculated in the QRA Impact depends on the QRA methodology. In the Dutch methodology it is assumed that a flammable cloud always ignites when it reaches outside the site boundary, which means reducing ignition sources has no impact in the model. However, if the QRA is modelled based on actual ignition sources it can have an impact.
- Limiting confined or congested areas where hydrogen gas can accumulate. The risks of the tube trailers are mainly caused by the delayed gas cloud explosion. If there are locations where hydrogen can accumulate, this can result in explosions, and for hydrogen even possibly in a detonation.
- Less hydrogen inventory in the buffer vessels and trailers, less inventory results in lower maximum effect distances.

In addition, rapid leak detection with alarms can ensure that no people are around if a hydrogen leak ignites. This is not something that is included in the QRA modelling, but it can be effective to reduce the real risks of the installation and the exposure of employees.

To provide additional insight into a number of different parameters, various sensitivity analyses were also performed.

Comparing the modelling methodology in the Calculation Manual to the DNV hydrogen guideline shows that for the most part, there is no reason to not use the failure cases (i.e. failure frequencies) from the Calculation Manual in a hydrogen QRA (except for hose failure frequencies). Due to a lack of well documented failure data on hydrogen installations, there is no well-founded failure frequency database specific for hydrogen applications available. Therefore any commonly used source, such as the Calculation Manual, could reasonably be used to define failure cases for a hydrogen QRA.

However, for ignition and explosion modelling there are a few points where the methodology of the Calculation Manual does not align with the insights from the internal DNV guideline on hydrogen QRA's. Primarily, the difference is on the immediate ignition probability of hydrogen, the modelling of detonations and the frequency for transfer leaks.

First, the Calculation manual assumes an immediate ignition probability of 1, which means that delayed effects (such as a delayed explosion) are not included in the QRA. Incidents in the past have shown that a delayed vapour cloud explosion can occur for hydrogen and should be taken into account in the QRA. The sensitivity analysis suggests that, for specific scenarios analysed, the effect of an explosion results in a moderate increase to the overall risk. This means that using an immediate ignition probability of 1 can potentially result in an underestimation of the risks of a hydrogen installation.

The second is the modelling of detonations. The Calculation Manual does not include a possibility to account for detonations when modelling a hydrogen explosion. Due to the high reactivity of hydrogen, a detonation of a hydrogen cloud is a realistic event (unlike for most hydrocarbons). The sensitivity analysis also showed that not taking detonations into account did not impact the risk for the installation used in this QRA. However, for installations with larger volumes than can be released in an event of a catastrophic failure the impact of detonations was significant on the 10⁻⁷ and 10⁻⁸ per year contours. This means that not taking detonations into account could still potentially underestimate the risks of a hydrogen installation.

Finally, the leak frequency for transfer hoses in the Calculation Manual is very high ($6.3E-04$ per year for rupture), especially for installations with continuous (un)loading and relatively few operations per year (long duration per operation). Using the hose model that was developed by DNV results in much lower (and likely more realistic) failure frequencies ($5.6E-05$ per year for rupture). The sensitivity analysis also shows that using this model results in much lower calculated risks for the installation, especially close to the installation.

1.2 Nederlandse samenvatting

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) heeft DNV gevraagd om een verkennend QRA-onderzoek uit te voeren voor kleinschalige waterstofinstallaties en -activiteiten. RVO voert deze opdracht uit in opdracht van het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG).

Het doel van deze studie is het berekenen van risico's voor een generieke kleinschalige waterstofinstallatie. Op basis van deze berekeningen wordt inzicht gegeven in de belangrijke scenario's en parameters voor het berekenen van het risico en mogelijke risicoreducerende maatregelen. Naast het modelleren volgens de huidige Nederlandse rekenmethodiek worden aanbevelingen gedaan over mogelijke verbeteringen in de rekenmethodiek voor waterstofinstallaties en voor het identificeren van effectieve maatregelen.

Voor deze studie is een hypothetische kleinschalige waterstofinstallatie gedefinieerd op basis van verzamelde informatie en informatie aangeleverd vanuit de industrie. De informatie is samengevat in een blokkenschema waarbij de technische systemen voor import, productie, opslag en export van waterstof voor kleinschalige installaties in kaart zijn gebracht. Vervolgens is een QRA uitgevoerd om de risico's te berekenen en zijn de risico's verder geanalyseerd door middel van risk ranking toe te passen op geselecteerde onderdelen en scenario's.

De afstanden tot de verschillende risicocontouren zijn weergegeven in Tabel 1-2. Opgemerkt moet worden dat de QRA niet is berekend voor één specifieke waterstofinstallatie. De berekende installatie is een generieke installatie met alle componenten die in een kleinschalige installatie aanwezig kunnen zijn. De risico's van een specifieke installatie, die niet alle verschillende componenten uit deze studie bevat, zullen daarom naar verwachting kleiner zijn dan de risico's die in deze studie zijn berekend.

De relevante afstand voor een QRA is de 10^{-6} per jaar PR-contour. Voor de waterstofinstallatie reikt deze contour ongeveer 43 meter vanaf de installatie.

Tabel 1-2: Afstand tot 10^{-6} PR-contouren

PR-contour (per jaar)	Afstand (m)
10^{-4}	21
10^{-5}	31
10^{-6}	35
10^{-7}	48
10^{-8}	49

Het brandbare aandachtsgebied reikt 31 meter (warmtestraling vanaf de grootste aansluiting van de tubetrailer) en het explosieaandachtsgebied reikt 60 meter (vertraagde ontsteking na instantaan falen tube op tubetrailer).

De risicobepalende scenario's zijn vooral gerelateerd aan het verladen van waterstof van en naar tubetrailers. Dichtbij de installatie worden de risico's voornamelijk bepaald door het breken van de verlaadslang en op grotere afstand van de installatie worden de risico's bepaald door het catastrofaal falen van de tubetrailer zelf en van de buffervaten.

Voor het reduceren van de risico's van de verlading zijn de volgende parameters van belang:

- Verladersduur³, de hoge risico's komen voornamelijk uit de hoge verladersduur⁴.
- Afstand tussen verlaadpunten. Door afstand te houden tussen verschillende tubetrailers die tegelijk verladen kan worden voorkomen dat de risico's bij elkaar optellen.
- Een brandmuur kan een kwetsbaar gebied afschermen van brandbare effecten bij een LoC met de verlaadslang.
- Aantal verladersoperaties beperken. In de praktijk is er maar 1 tube trailer tegelijk aangesloten (voor langere tijd zonder aan- of afkoppeling). In het model van het Rekenvoorschrift wordt voor de faalkans van een verlading geen rekening gehouden met het aantal verladingen. In de praktijk hebben veel LoC incidenten met verlading te maken met het aan en afkoppelen van de verlaadslang. Door het aantal verlaadacties te beperken kunnen de risico's van de verlading beperkt worden. Dit is ook terug te zien in de risicoberekeningen als het RIVM hose model wordt toegepast.

Voor het reduceren van de risico's van de buffervaten en tubetrailers zijn de volgende parameters van belang:

- Aanwezigheid van volle tubetrailers minimaliseren (dus bijvoorbeeld zo min mogelijk wachttijd van een volle tubetrailer voordat die kan aankoppelen).
- Reduceren van aantal buffervaten
- Verminderen van ontstekingskansen (e.g. door een hazardous area classificatie (ATEX)) zal in de praktijk resulteren in een lager risico. Echter, voor het risico dat in de QRA wordt berekend hangt de impact af van de toegepaste methodiek. In de Nederlandse methodiek heeft dit geen impact omdat er wordt aangenomen dat een brandbare wolk altijd ontsteekt als die buiten de terreingrens komt. Echter, als de QRA gemodelleerd is op basis van werkelijke ontstekingsbronnen kan dit wel impact hebben op de QRA risico's.
- Beperken van besloten gebieden waar waterstof gas zich kan ophopen. De risico's van de tubetrailers zijn voornamelijk de vertraagde gaswolkexplosie. Als er locaties zijn waar waterstof zich kan ophopen kan dit resulteren in explosies, en voor waterstof zelfs mogelijk in een detonatie.
- Minder waterstof inhoud in buffervaten en trailers, minder inhoud resulteert in kleinere maximale effectafstanden.

Daarnaast kan een snelle detectie met alarmering zorgen dat er geen mensen in de buurt zijn als een waterstof lek ontsteekt. Dit is niet iets wat in de QRA modellering wordt meegenomen, maar kan in de praktijk wel effectief zijn om schade naar installaties en personen te voorkomen.

Om extra inzicht te geven in een aantal parameters, zijn er verschillende gevoeligheidsanalyses uitgevoerd.

Uit een vergelijking tussen het Rekenvoorschrift en de DNV-waterstofrichtlijn blijkt dat er voor het grootste deel geen reden is om de incidentscenario's (d.w.z. faalfrequenties) uit het Rekenvoorschrift niet te gebruiken in een waterstof-QRA (met uitzondering van slang faalfrequenties). Door een gebrek aan goed gedocumenteerde incidentdata voor waterstofinstallaties is er geen goed onderbouwde incidentdatabase specifiek voor waterstoftoepassingen beschikbaar. Daarom kan elke veelgebruikte bron, zoals het Rekenvoorschrift, redelijkerwijs worden gebruikt om incidentscenario's voor een waterstof-QRA te definiëren.

Echter, voor ontstekings- en explosiemodellering zijn er een paar punten waarop het Rekenvoorschrift niet aansluit bij de inzichten uit de interne DNV-richtlijn. Het voornaamste verschil is de directe ontstekingskansen van waterstof, de modellering van detonaties en de frequentie van incidenten tijdens verladen.

Ten eerste, in het Rekenvoorschrift wordt voor waterstof een directe ontstekingskans van 1 aangenomen. Dit betekent dat vertraagde effecten (zoals een vertraagde gaswolk explosie) niet worden meegenomen in de QRA. Incidenten

³ de faalkans voor falen van een slang maakt geen onderscheid maakt in een 'verlading' of continue vullen. De faalkans van een slang is uitgedrukt in per uur verlading en niet per operatie. Het is DNV bekend dat de faalkans van een slang afhangt van het aantal aan- en afkoppelingen. De faalkans van een slang voor het continu langdurig vullen met lagere debieten (met weinig aan- en afkoppelingen) zou dan ook kleiner moeten zijn dan voor vele verladingoperaties met veel aan- en afkoppelingen die bijv. maar 1 uur duurt, maar waarbij de totale verladersduur per jaar gelijk is. Helaas geeft het rekenvoorschrift geen mogelijkheid om hier onderscheid in te maken. Het RIVM hose model dat door DNV is ontwikkeld wel, zie antwoord hieronder.

⁴ Door de verladersduur te verlagen, wordt de kans op een lek verkleind. Doorgaans gaat een kortere verladersduur echter gepaard met hogere debieten, wat de gevolgen vergroot. Voor elke operatie zal er een optimale verladersduur/debiet zijn die resulteert in het laagste risico.

hebben aangetoond dat een vertraagde explosie wel mogelijk is bij een waterstofinstallatie en dus wel moet worden meegenomen in een QRA. De gevoeligheidsanalyse suggereert dat, voor de specifieke scenario's in deze analyse, de impact van explosies een resulteren in een beperkte toename van het totale risico. Dit betekent dat een directe ontstekingskans van 1 potentieel resulteert in een onderschat risico voor een waterstofinstallatie.

Het tweede verschil betreft de modellering van detonaties. Het Rekenvoorschrift geeft geen mogelijkheid om detonaties mee te nemen in de modellering van een waterstof explosie. Vanwege de hoge reactiviteit van waterstof kan een detonatie niet worden uitgesloten als realistische gebeurtenis (dit kan wel voor bijvoorbeeld koolwaterstoffen). Uit de gevoeligheidsanalyse bleek geen significante impact als gevolg van het niet meenemen van detonaties in de berekeningen voor deze QRA. Echter, voor installaties met groter waterstof volumes die instantaan kunnen vrijkomen had het meenemen van detonaties wel significante impact op de 10^{-7} en 10^{-8} per jaar contouren. Dit betekent dat voor sommige specifieke installaties, het niet meenemen van detonaties in een waterstof QRA kan resulteren in een onderschatting van het risico.

Als laatste verschil is gekeken naar de incident frequenties voor verlading. In het Rekenvoorschrift heeft verlading erg hoge lekfrequenties (6.3×10^{-4} per jaar voor slangbreuk), zeker als er wordt uitgegaan van volcontinue verladen met relatief weinig jaarlijkse operaties (i.e. lange verladingduur per operatie). Het RIVM hose model dat door DNV is ontwikkeld resulteert in veel lagere (en naar verwachting realistischere) incident frequenties (5.6×10^{-5} per jaar). De gevoeligheidsanalyse toont dan ook een significant lager risico voor de installatie, voornamelijk in de buurt van de locatie waar het risico wordt bepaald door de verladingsscenario's.

2 INTRODUCTIE

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) heeft voor het ministerie van Klimaat en Groene Groei (KGG) aan DNV gevraagd om een verkennende QRA studie uit te voeren voor kleinschalige waterstofinstallaties en activiteiten.

KGG werkt aan coördinerend beleid voor de energietransitie, ook op het gebied van randvoorwaarden voor publieke belangen en voor de versnelling van de energietransitie. Dit beleid krijgt onder andere gestalte in de vorm van 'richtsnoeren': beleidskaders die moeten helpen met het omgaan in leemten in wet- en regelgeving die er onvermijdelijk ontstaan in een transitiefase van deze omvang. Specifiek voor waterstof is er in 2022 gewerkt aan een *Generiek Richtsnoer voor Waterstofveiligheid*. Hierin was onder meer het streven om duiding te geven voor vergunningverlening hoe om te gaan met nieuwe initiatieven van relatief beperkte omvang, en hoe te voorkomen dat deze projecten aan onevenredig zware (industriële) eisen hebben te voldoen, bij afwezigheid van andere beter toegesneden kaders.

KGG is op zoek hoe de ruimte voor de energietransitie kan worden gevonden, zonder dat het niveau van veiligheid wordt aangetast. Daarin wil KGG nadrukkelijk stilstaan bij de vraag hoe veiligheidsvoorzieningen voor kleinschalige waterstoftoepassingen kunnen helpen de benodigde afstanden te balanceren voor inpassing zonder afbreuk te doen aan de veiligheid.

2.1 Doelstelling

Het doel van deze studie is het berekenen van risico's voor een generieke kleinschalige waterstofinstallatie, eerst op basis van de huidige rekenmethode het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid (Ref. /1/) en vervolgens op basis van de DNV Internal Service Guideline (Ref. /2/). Op basis van deze berekeningen worden de belangrijke scenario's en parameters voor het berekenen van het risico geïdentificeerd, welke inzicht geven in mogelijke effectieve risico reducerende maatregelen. Naast de modellering volgens de huidige rekenmethodiek worden ook aanbevelingen gegeven voor mogelijke verbeteringen van de rekenmethodiek voor waterstofinstallaties. Ook zijn effectafstanden voor verschillende incidentscenario's opgenomen om inzicht te geven in effecten zoals explosie en warmtestraling voor de bestrijding/preparatie door de veiligheidsregio's.

Met deze studie beoogt KGG resultaten te kunnen meenemen in het Richtsnoer voor waterstof, zoals mogelijke verbeteringen van de rekenmethodiek naar het RIVM en de informatie naar de Veiligheidsregio's.

2.2 Aanpak

De eerste stap bestaat uit het definiëren van typen technische systemen (inclusief procesonderdelen) met richtinggevend voorbeelden uit de praktijk, inclusief variaties in technische en operationele parameters (druk, doorzet, volumes, leidingdiameters etc.).

Voor de gedefinieerde technische systemen wordt vervolgens een QRA uitgevoerd. De eerste berekeningen worden uitgevoerd voornamelijk conform het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid, module I & II, januari 2025 (Ref. /1/). Vervolgens worden ook vergelijkende berekeningen worden uitgevoerd waarbij gebruik wordt gemaakt van de Internal Service Guideline voor Hydrogen QRA's van DNV (Ref. /2/). Een vergelijking tussen het Rekenvoorschrift en de Internal Service Guideline van DNV is toegevoegd in paragraaf 6.9 van dit rapport. De berekeningen worden uitgevoerd in Safeti-NL 9.2 en Safeti 9.0⁵.

Om inzicht te geven in hoe de huidige door het RIVM voorgeschreven rekenmethodiek aansluit op de realiteit wordt vervolgens een vergelijking gemaakt tussen de huidige versie van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid en de DNV handleiding voor het modelleren van waterstof QRA's. Hierbij wordt aandacht besteed aan waar de twee richtlijnen afwijken en wat de verwachte impact daarvan is.

⁵ Safeti-NL is een Nederlandse versie van het moederprogramma Safeti. In Safeti-NL zijn bepaalde parameters vastgezet zodat berekeningen conform het Rekenvoorschrift worden uitgevoerd. De meeste berekeningen zijn uitgevoerd in Safeti-NL. Waar parameters moeten worden aangepast die niet in de NL versie kunnen worden aangepast, zoals voor het doorrekenen van detonaties, is de ongelimiteerde versie van Safeti gebruikt.

Vervolgens wordt op basis van de QRA resultaten inzicht gegeven in de kritische componenten en risico drivers voor kleine waterstofinstallaties. Verder wordt onderzocht of er maatregelen denkbaar zijn die de berekende risico's van de kritische componenten (o.b.v. risicobepalende scenario's) en de technische systemen effectief kunnen mitigeren.

3 HUIDIG JURIDISCH KADER EN RELEVANTE BEGRIPPEN

De Omgevingswet bevat een algemene zorgplicht. Dit houdt in dat overheden, bedrijven én burgers verantwoordelijk zijn voor een veilige en gezonde leefomgeving. Deze algemene zorgplicht is een vangnet voor het geval er geen specifieke decentrale of rijksregels zijn.

Voor de opslag van minder dan 125 liter waterstof in gasflessen geldt geen informatieplicht, meldingsplicht of vergunningplicht. Alleen de zorgplicht van het omgevingsplan geldt. Bij opslag van meer dan 125 liter waterstof in gasflessen geldt een informatieplicht en meldplicht Bal. Verder is waterstof een met naamgenoemde gevaarlijke stof in de Seveso richtlijn. De lage en hoge drempelwaarden voor waterstof zijn hieronder weergegeven.

Tabel 3-1: Lage en hoge Seveso drempelwaarden voor waterstof

Nr.	Met naam genoemde gevaarlijke stof	CAS	Lage drempel (ton)	Hoge drempel (ton)
15	Waterstof	1333-74-0	5	50

Een inrichting met meer dan 5 ton waterstof is dus een lagedrempelinrichting en een inrichting met meer dan 50 ton waterstof is een hogedrempelinrichting.

Een kwantitatieve risicoanalyse wordt gebruikt om beslissingen te nemen over de aanvaardbaarheid van het risico in relatie tot ontwikkelingen bij een bedrijf of in de omgeving van een Seveso-inrichting. De criteria voor de beoordeling van de aanvaardbaarheid van risico's zijn opgenomen in het Bkl.

Voor Seveso-inrichtingen onderscheidt het Bkl twee vormen van risico: het plaatsgebonden risico (PR) en aandachtsgebieden. Beide dienen vastgesteld te worden met een QRA. Daarnaast wordt het volgende opgemerkt dat het groepsrisico is komen te vervallen met het intreden van de nieuwe Omgevingswet en is vervangen door aandachtsgebieden.

Voor milieubelastende activiteiten met minder dan 5 ton waterstof is een QRA strikt genomen niet nodig, maar het bevoegd gezag kan hier wel om vragen. In deze studie wordt een QRA uitgevoerd voor een kleinschalige inrichting om inzicht te geven in de risico's van een kleinschalige waterstof inrichting op vergelijkbare wijzen als wat voor een Seveso-inrichting wordt gedaan.

De relevante begrippen zijn in onderstaande paragrafen toegelicht.

3.1 Plaatsgebonden risico

Het plaatsgebonden risico is de kans op het overlijden van een onbeschermd en continu aanwezig persoon buiten de begrenzing van de locatie waar een activiteit wordt verricht als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval veroorzaakt door die activiteit.

Het plaatsgebonden risico wordt weergegeven als PR-contouren. Zo laat de 10^{-6} per jaar 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 activiteit.

Artikel 5.7.1 van het Bkl stelt verder dat de grenswaarde voor kwetsbare en zeer kwetsbare gebouwen en kwetsbare locaties 10^{-6} per jaar is. Voor beperkt kwetsbare gebouwen en locaties geldt een richtwaarde van 10^{-6} per jaar. Dit betekent dat er zich geen zeer kwetsbare en kwetsbare gebouwen en kwetsbare locaties mogen bevinden binnen de 10^{-6} PR-contour van een Seveso-inrichting. Voor beperkt kwetsbare gebouwen en locaties dient ernaar gestreefd te worden dat deze gebouwen en locaties niet binnen de 10^{-6} PR-contour vallen; een hoger risico kan toegestaan worden, wanneer dit voldoende gemotiveerd wordt.

Er is een uitzondering op basis van een functionele binding. De criteria voor het plaatsgebonden risico van een activiteit gelden niet voor beperkt kwetsbare en kwetsbare gebouwen en beperkt kwetsbare en kwetsbare locaties waar een activiteit uit bijlage VII van het Bkl plaatsvindt. Of die een functionele binding hebben met een dergelijke activiteit.

Dergelijke gebouwen en locaties zijn dus per definitie gelegen buiten de (eigen) risico veroorzakende Seveso-inrichting. Kwetsbare en beperkt kwetsbare gebouwen en locatie die bijvoorbeeld onderdeel uitmaken van bijvoorbeeld een andere Seveso-inrichting zoals een kantoorgebouw worden niet als (beperkt) kwetsbaar gebouw beschouwd voor de toetsing van het plaatsgebonden risico.

Hieronder zijn enkele voorbeelden genoemd van:

- Zeer kwetsbare gebouwen;
- Kwetsbare gebouwen en locaties;
- Beperkt kwetsbare gebouwen en locaties.

De informatie is ontleend van het Informatiepunt Leefomgeving⁶.

Zeer kwetsbare gebouwen

Een gebouw is zeer kwetsbaar als het een gebouw is voor mensen die zichzelf niet op tijd in veiligheid kunnen brengen. Het gaat om de volgende gebouwen:

- woonfunctie voor 24-uurszorg
- basisscholen
- scholen voor minderjarigen met een lichamelijke of geestelijke beperking
- dagverblijf van personen met een lichamelijke of geestelijke beperking
- gezondheidszorg met bedgebied (ziekenhuizen en verpleeghuizen)
- kinderopvang
- gevangenissen

Kwetsbare gebouwen en locaties

Kwetsbare gebouwen zijn alle gebouwen met een woonfunctie (niet verspreid liggende bebouwing) en locaties bestemd voor grote evenementen of voor recreatief nachtverblijf voor meer dan 50 personen. Gebouwen en locaties zijn ook kwetsbaar als er veel personen een groot deel van de dag aanwezig zijn. Het gaat bijvoorbeeld om:

- woonfunctie
- bijeenkomstfunctie
- kantoorfunctie
- sportfunctie
- scholen voor volwassenen
- gezondheidszorg zonder bedgebied
- locatie voor evenementen in de open lucht voor ten minste 5.000 personen

Beperkt kwetsbare gebouwen en locaties

De overige gebouwen en locaties zijn beperkt kwetsbaar. De nadruk ligt op de bescherming van de kwetsbare gebruiksfunctie van een gebouw in plaats van op de bescherming van het gebouw als geheel.

⁶ Bron: <https://iplo.nl/thema/externe-veiligheid/kwetsbare-gebouwen/> , bezocht op 25-01-2024

3.2 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.

Het bevoegd gezag kan diverse maatregelen inzetten om mensen te beschermen binnen de aandachtsgebieden⁷:

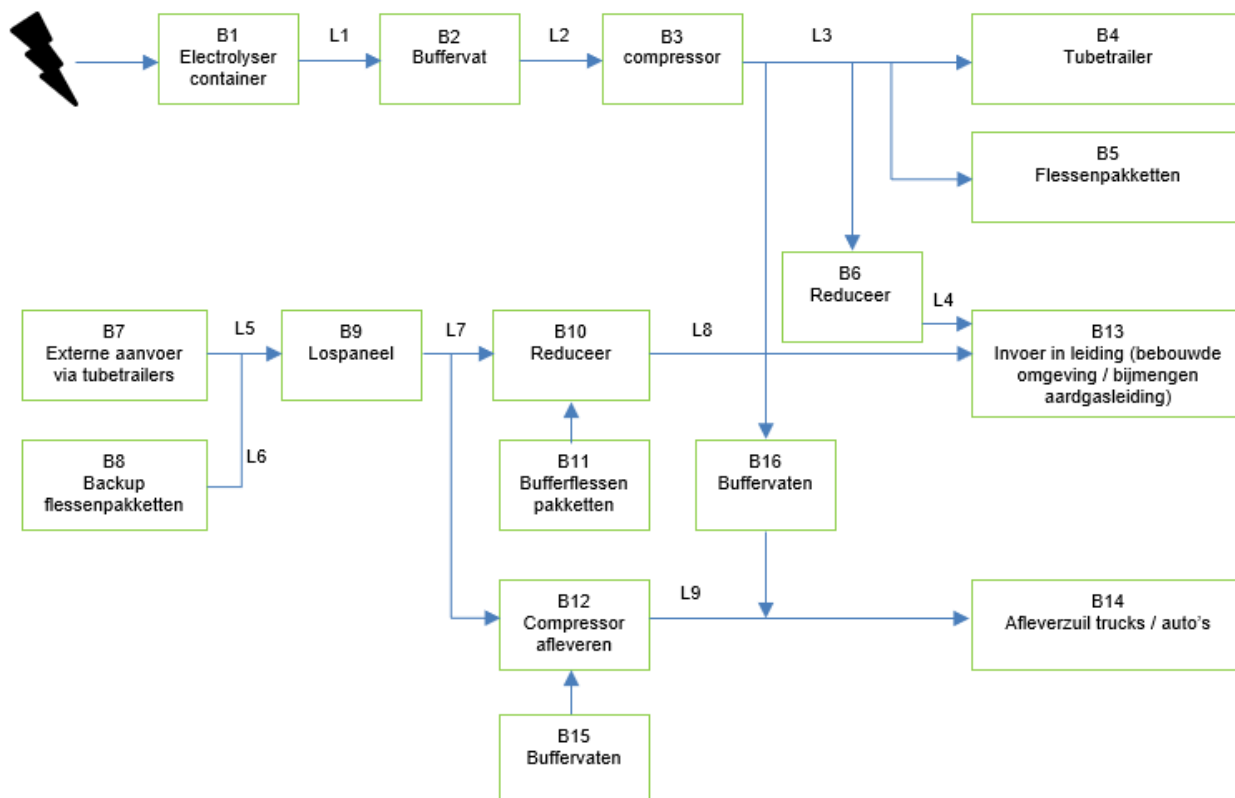
- afstand houden tot de risicobron binnen het aandachtsgebied;
- aanvullende risicocommunicatie;
- beperken van personendichtheden in de omgeving van de risicobron;
- vlucht- en schuilmogelijkheden;
- omgevingsmaatregelen;
- aanvullende bouwmaatregelen in een voorschriftengebied.

Een gemeente kan binnen een aandachtsgebied voorschriftengebieden aan te wijzen. Een voorschriftengebied kan een deel van of het gehele aandachtsgebied zijn. De gemeente wijst in dat geval een locatie binnen een (brand- of explosie)aandachtsgebied als (brand- of explosie)voorschriftengebied aan in het omgevingsplan. In dit deel van het aandachtsgebied gelden dan aanvullende bouweisen voor nieuwbouw en vervangende nieuwbouw van beperkt kwetsbare, kwetsbare en zeer kwetsbare gebouwen. Deze aanvullende bouweisen staan in de artikelen 4.90 tot en met 4.96 van het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl). Zij hebben tot doel om mensen in een gebouw beter te beschermen tegen de effecten van een brand of explosie.

⁷ Bron: <https://iplo.nl/thema/externe-veiligheid/externe-veiligheid-in-omgevingsplan/aandachtsgebieden-voorschriftengebieden/>, bezocht op 19-01-2024

4 Beschrijving Technische systemen

Voor deze studie is een hypothetische kleinschalige waterstofinstallatie gedefinieerd op basis van verzamelde informatie en informatie aangeleverd vanuit de industrie. Deze informatie bestaat uit QRA's, procesbeschrijvingen en processchema's van kleinschalige waterstofinstallaties (praktijkvoorbeelden). De informatie is samengevat in een blokkenschema waarbij de technische systemen voor import, productie, opslag en export van waterstof voor kleinschalige installaties in kaart zijn gebracht. Het blokkenschema bestaat uit verschillende componenten (B1, B2 etc.) en verbonden leidingwerk (L1, L2 etc.) en is weergegeven in Figuur 4-1.



Figuur 4-1: Blokschema hoofdcomponenten kleinschalige waterstofinstallaties

De inventarisatie van technische en operationele uitgangspunten is uitgevoerd op basis van ontvangen informatie van de industrie (o.a. QRA's). Het resultaat van deze inventarisatie is opgenomen in een datasheettabel in Bijlage A. De informatie is vanwege confidentialiteit geanonimiseerd.

Er dient opgemerkt te worden dat het bovenstaande blokdiagram niet een layout is voor één specifieke waterstofinstallatie. Het diagram geeft een hypothetische installatie met alle onderdelen die mogelijk aanwezig kunnen zijn in een kleinschalige installatie. De risico's van een concrete installatie zullen daarom naar verwachting kleiner zijn dan die berekend in deze studie.

5 ONGEVALSCENARIO'S

Voor alle componenten die in hoofdstuk 4 zijn geïdentificeerd zijn ongevalsscenario's opgesteld aan de hand van het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid (Ref. /1/). De modellering voor waterstof staat beschreven in het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module II, versie januari 2025, paragraaf 9.9. De relevante scenario's en bijbehorende frequentie en belangrijkste parameters worden besproken in de volgende paragrafen. In paragraaf 6.9.1 wordt het toepassen van de faalscenario's uit het Rekenvoorschrift op een waterstofinstallatie verder besproken.

Een lijst met uitgewerkte scenario's is opgenomen in Bijlage B.

5.1 Elektrolyser (B1)

In het Rekenvoorschrift zijn geen specifieke faalscenario's voor een elektrolyser opgenomen. Uit een analyse van de beschikbare QRA's blijkt dat er in deze QRA's twee verschillende aanpakken worden gehanteerd:

1. Het falen van de elektrolyser wordt buiten beschouwing gelaten. Omdat de geproduceerde waterstof meteen gecomprimeerd wordt is aangenomen dat de hoeveelheid waterstof in de elektrolyser verwaarloosbaar is.
2. Er wordt een beoordeling gemaakt van de maximale hoeveelheid waterstof die kan vrijkomen als de elektrolyser faalt. Deze hoeveelheid wordt vervolgens als een reactorvat gemodelleerd.

Het rapport "Safety aspects of Green Hydrogen Production on Industrial Scale" van het ISPT (Ref. /3/) stelt dat het falen van het membraan / diafragma van een elektrolyser kan leiden tot mixen van zuurstof en waterstof in de elektrolyser met een risico op een explosie. Het falen van een elektrolyser wordt daarom door DNV wel als relevant beoordeeld. In deze QRA is de elektrolyser gemodelleerd als een reactorvat met de maximale waterstof inhoud van de elektrolyser. Voor deze studie is een inhoud van 15 kg waterstof bij een druk van 40 barg en een temperatuur van 9,8 °C aangenomen.

De scenario's die voor de elektrolyser zijn gemodelleerd, zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 5-1: Scenario's voor de elektrolyser (B1) - gemodelleerd als reactorvat (module I, tabel 3.19)

Scenario	Frequentie (per jaar)
Instantaan vrijkomen van de gehele inhoud van de elektrolyser ⁸	5×10^{-6}
Vrijkomen van de gehele inhoud in 10 minuten, in een continue en constante stroom	5×10^{-6}
Continu vrijkomen uit een gat met een effectieve diameter van 10 mm	1×10^{-4}

5.2 Buffervat (B2, B15, B16)

Het Rekenvoorschrift stelt dat een buffervat gemodelleerd dient te worden als opslag onder druk. De scenario's voor buffervaten zijn weergegeven in onderstaande tabel.

Voor het buffervat B2 is uitgegaan van een inhoud van 50 kg bij een druk van 40 barg en een temperatuur van 9,8 °C. Voor zowel B15 als B16 is uitgegaan van een inhoud van 46,6 kg bij een druk van 500 barg en een temperatuur van 9,8 °C. Verder is er aangenomen dat er 2 buffervaten vallen onder onderdeel B15 en 5 onder onderdeel B16.

Tabel 5-2: Scenario's voor het buffervat (B2/B15/B16) - gemodelleerd als opslag onder druk (module I, tabel 3.2)

Scenario	Frequentie (per jaar)
Instantaan vrijkomen van de gehele inhoud van het buffervat	5×10^{-7}
Vrijkomen van de gehele inhoud in 10 minuten, in een continue en constante stroom	5×10^{-7}
Continu vrijkomen uit een gat met een effectieve diameter van 10 mm	1×10^{-5}

⁸ Dit is het geschatte volume dat realistisch gezien uit kan stromen bij het falen van de elektrolyser.

5.3 Compressor (B3, B12)

Het Rekenvoorschrift definieert ongevalsscenario's voor 3 verschillende type compressoren: centrifugaal met pakking, centrifugaal zonder pakking en zuiger. De compressoren in deze studie zijn conservatief gemodelleerd als zuigercompressoren.

Het catastrofaal falen van een compressor wordt gemodelleerd als een breuk van de aanvoerleiding. De uitstroomcondities zijn daarom gebaseerd op de condities in de aanvoerleiding. Compressor B3 is gemodelleerd op 40 barg, 9,8 °C met een diameter van ¼ inch en compressor B12 is gemodelleerd op 300 barg⁹, 9,8 °C en een diameter van ½ inch.

De maximale uitstroomhoeveelheid is bepaald op basis van de maximale inhoud van de insluitsystemen stroomopwaarts van de compressor. Voor compressor B3 komt dit neer op 65 kg en voor B12 komt dit neer op 600 kg. Het uitstroomdebiet is niet gelimiteerd op basis van het compressordebiet, aangezien de breuk wordt aangenomen in de aanvoerleiding, niet de persleiding.

Tabel 5-3: Scenario's voor de compressor (B3/B12) (module I, tabel 3.23)

Scenario	Frequentie (per jaar)
Catastrofaal falen	1×10^{-4}
Lek (10% diameter)	$4,4 \times 10^{-3}$

5.4 Tubetrailer (B4, B7)

Voor het uitvoeren van de berekeningen wordt uitgegaan van continu verladen (8766 uur per jaar) naar tubetrailer B4 en vanuit tubetrailer B7. De faalscenario's die horen bij deze verlading zijn opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 5-4: Scenario's voor verlading vanuit of naar de tubetrailer (B4/B7) (module II, tabel 9.2)

Scenario	Frequentie (per uur)	Frequentie (per jaar); bij 8766 uur verladen
Breuk van de slang	4×10^{-7}	$3,51 \times 10^{-3}$
Lek met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, maximaal 50 mm	4×10^{-5}	$3,51 \times 10^{-1}$

De trailers zijn gemodelleerd met 9 tubes met een totale inhoud van 600 kg waterstof bij een druk van 300 barg, een temperatuur van 9,8 °C en een grootste aansluiting van 12,7 mm¹⁰. Voor het falen van een tube trailer wordt aangenomen dat er maximaal 1 tube tegelijk faalt. De frequenties in Tabel 5-5 en Tabel 5-6 worden vermenigvuldigd met het totaal aantal tubes op de trailer.

Naast de scenario's voor het verladen zijn er ook incidentscenario's voor het falen van de tubetrailer zelf. De tubetrailer wordt conform het Rekenvoorschrift gemodelleerd als een tankauto onder druk. De scenario's voor de tubetrailer zijn hieronder beschreven. Er wordt aangenomen dat de trailers 100% van de tijd aanwezig zijn en worden uitgewisseld als ze leeg zijn. Er wordt aangenomen dat er voor zowel onderdeel B4 als onderdeel B7 altijd 1 trailer aanwezig is.

Tabel 5-5: Scenario's voor de tubetrailer (B4/B7) (module II, tabel 9.2 en 9.6)

Scenario	Initiële frequentie (per jaar)	Additionele frequentie (per jaar) vuurbal door externe beschadiging	Totale frequentie (per jaar); bij $t_A = 8766$ uren
Instantaan vrijkomen van de gehele inhoud	$f_A \times 5 \times 10^{-7}$	$t_A \times 5 \times 10^{-11}$	$9,38 \times 10^{-7}$
Vrijkomen van de gehele inhoud uit de grootste aansluiting	$f_A \times 5 \times 10^{-7}$	-	5×10^{-7}

f_A is hier de aanwezigheidsfractie $f_A = t_A / 8766$. Voor zowel B4 als B7 wordt aangenomen dat $f_A = 1$.

⁹ De aflever compressor kan gevoed worden vanuit een flessenpakket of een tubetrailer. In werkelijkheid zullen het flessenpakket en de tubetrailer niet dezelfde druk hebben. Voor deze QRA is de druk van de compressor gemodelleerd als 300 barg, gelijk aan de druk die is aangenomen voor een tubetrailer.

¹⁰ In PGS35 wordt uitgegaan van een diameter van 3 mm voor de afsluiter van de trailer. Dit is naar verwachting te klein, in deze studie is van 12,7 mm uitgegaan.

Tevens dient een additioneel scenario toegevoegd te worden wanneer een brand in de omgeving en/of externe beschadiging niet uit te sluiten is. Dit scenario wordt in het Rekenvoorschrift een BLEVE genoemd. Feitelijk gezien zal er geen BLEVE optreden aangezien er geen sprake is van 'Boiling Liquid', de 'BLEVE' wordt gemodelleerd als een vuurbal en wordt verder in dit rapport het vuurbal scenario genoemd.

De frequentie van een vuurbal ten gevolge van externe beschadiging is, wanneer sprake is van een geïsoleerde opstelplaats waarbij een aanrijding van opzij niet mogelijk geacht wordt, gesteld op $t_A \times 5 \times 10^{-11}$ per jaar. Echter, er is aangenomen dat bij externe beschadiging geen vuurbal op zal treden, maar dat de tubetrailer instantaan zal falen. Vandaar dat de faalfrequentie is opgeteld bij het scenario 'catastrofaal falen', zie Tabel 5-5.

Het resterende vuurbal scenario wordt dus wel als standalone vuurbal gemodelleerd, waarbij de totale faalfrequentie bestaat uit een bijdrage ten gevolge van brand tijdens verlading en een bijdrage van een brand in de omgeving, zie Tabel 5-6.

Tabel 5-6: Scenario's voor de tubetrailer (B4/B7) (module II, tabel 9.3 en 9.5)

Scenario	Faalfrequentie (per jaar) vuurbal door brand tijdens verlading	Faalfrequentie (per jaar) vuurbal door brand in de omgeving	Totale frequentie (per jaar); bij $t_A = 8766$ uren
Vuurbal tubetrailer	$t_v \times f_{\text{red}} \times 5,8 \times 10^{-10} = 8766 \times 0,05 \times 5,8 \times 10^{-10} = 2,54 \times 10^{-7}$	$f_{\text{brand}} \times t_A \times f_{\text{red}} \times 0,19 = 2 \times 10^{-8} \times 8766 \times 0,05 \times 0,19 = 1,67 \times 10^{-6}$	$1,92 \times 10^{-6}$

5.5 Flessenpakketten (B5, B8, B11)

De flessenpakketten zijn gemodelleerd als een gasflessenbatterij. De ongevalsscenario's zijn in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 5-7: Scenario's voor de flessenpakketten met N gasflessen (B5/B8/B11) (module II, tabel 5.2)

Scenario	frequentie (per jaar)
Instantaan vrijkomen van de gehele van één gasfles	$N \times 5 \times 10^{-7}$
Continu vrijkomen van de inhoud van N-1 gasflessen uit een gat met een effectieve diameter van 5 mm	$N \times 5 \times 10^{-7}$

De ongevallen van het vullen van gasflessen zijn inbegrepen bij de faalfrequenties uit de bovenstaande tabel. Er zijn dus geen aparte scenario's opgenomen voor het vullen/leggen van de gasflessen.

De flessenpakketten zijn gemodelleerd met een druk van 500 barg en een temperatuur van 9,8 °C. Het flessenpakket B5 is gemodelleerd met 21 kg waterstof per fles en 104 flessen (4 bundels van elk 26 flessen) in het flessenpakket, B8 is gemodelleerd met 1,1 kg waterstof per fles en 72 flessen (6 bundels van elk 12 flessen) in het pakket en B11 is gemodelleerd met 1,1 kg waterstof per fles en 84 flessen per pakket (7 bundels van elk 12 flessen).

5.6 Reduceer (B6, B10) en lospaneel (B9)

Er zijn geen ongevalsscenario's opgenomen in het Rekenvoorschrift voor een reduceer of een lospaneel. Er wordt aangenomen dat het falen van deze onderdelen is inbegrepen in de faalscenario's van de overige onderdelen van de installatie.

5.7 Leidingen (B13 en L1 t/m L9)

De leidingen in de waterstofinstallatie zijn gemodelleerd als bovengrondse procesleidingen met een diameter van <75 mm. De ongeval scenario's zijn opgenomen in onderstaande tabel.

Tabel 5-8: Scenario's voor bovengrondse procesleidingen met een diameter van <75 mm (module I, tabel 3.16)

Scenario	Frequentie (per meter per jaar)
Breuk van de leiding	1×10^{-6}
Lek met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, maximaal 50 mm	5×10^{-6}

De belangrijkste uitgangspunten voor de modellering van de leidingen zijn opgenomen in de onderstaande tabel. Er is uitgegaan van leidingen met een diameter van ½, ¼ en een ⅛ inch.

Tabel 5-9: Belangrijkste parameters voor modellering van de procesleidingen

Onderdeel	Druk	Temperatuur	Diameter	Leiding lengte	Maximale uitstroomhoeveelheid
	barg	°C	inch	m	kg
B13	8	9,8	0,5	10	695
L1	40	9,8	0,125	30	65
L2	40	9,8	0,25	30	65
L3	500	9,8	0,5	20	65
L4	8	9,8	0,25	10	65
L5	300	9,8	0,5	20	600
L6	500	9,8	0,25	20	82
L7	500	9,8	0,5	20	682
L8	8	9,8	0,5	10	777
L9	700	9,8	0,5	10	682

5.8 Afleverzuil / verlading (B14)

Er zijn geen ongevalsscenario's gemodelleerd voor de afleverzuil, maar wel voor de verlaadslang waarmee de voertuigen worden gevuld. Voor de verlading naar voertuigen zijn de scenario's voor verlading uit het Rekenvoorschrift aangehouden. Er zijn geen aparte scenario's opgenomen voor het falen van het voertuig zelf.

Er is aangenomen dat er een voertuig aan het verladen is voor 18% van de tijd, of ongeveer 1578 uur per jaar. De verlading vindt plaats bij 700 barg en 9,8 °C met een ½ inch slang en een debiet van 185,2 kg/uur. Bij een breuk van de slang wordt het uitstroomdebiet gelimiteerd door het debiet van de compressor.

Tabel 5-10: Scenario's voor verlading bij afleverzuil (B14) (module II, tabel 9.2)

Scenario	Frequentie (per uur)	Frequentie (per jaar); bij 1578 uur verladen
Breuk van de slang	4×10^{-7}	$6,31 \times 10^{-4}$
Lek met een effectieve diameter van 10% van de nominale diameter, maximaal 50 mm	4×10^{-5}	$6,31 \times 10^{-2}$

6 MODELLERING

6.1 ESD ingrijpen

Een inbloksysteem kan de duur van de uitstroming beperken door het sluiten van Emergency Shutdown (ESD) kleppen. Er is rekening gehouden met de werking van een volautomatisch ESD-systeem met een reactietijd (detectie + sluittijd) van 120 s en een kans op falen per aanspraak van 0,01 (SIL2 equivalent). Daarnaast zijn ook scenario's gemodelleerd voor als het ESD-systeem faalt.

Voor kleine lek scenario's is conservatief geen rekening gehouden met ingrijpen van het ESD-systeem vanwege de volgende redenen:

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

Wanneer er geen rekening is gehouden met ingrijpen of wanneer ingrijpen door het ESD-systeem faalt, is de maximale uitstroomduur van 30 minuten gehanteerd.

6.2 Terugslagklep

Een terugslagklep is een klep die sluit wanneer de richting van het debiet tegengesteld is aan de ingestelde richting. Het betreft een passief systeem, dat wil zeggen dat de klep automatisch dichtgaat wanneer terugstroming optreedt. Een terugslagklep is in het algemeen weinig betrouwbaar. Indien deze niet regelmatig getest wordt, wordt de terugslagklep niet meegenomen in een QRA. In de voorliggende QRA is geen rekening gehouden met de eventuele aanwezigheid van terugslagkleppen.

6.3 Systeemreactie compressor

In het geval van een breuk stroomafwaarts van een compressor is de mogelijkheid van een systeemreactie beoordeeld. Aangezien bij een breuk het debiet van de compressor bepalend kan zijn voor het uitstroomdebiet moet worden beoordeeld of het debiet toeneemt als gevolg van het wegnemen van de tegendruk in het leidingwerk stroomafwaarts van de compressor. Bij kleine lekkages zal de tegendruk minder snel afnemen en wordt er geen systeemreactie verwacht.

De standaardaanname is een verhoging van 1.5 keer het nominale debiet (50% toename als gevolg van tegendrukverlies) in overeenstemming met het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid paragraaf 3.17.1. Dit is een conservatieve aanname aangezien de werkelijke toename van het uitstroomdebiet t.o.v. het nominale debiet afhangt van het aantal leidingen dat gebruikt wordt, de hoogteverschillen in het leidingwerk en de lengte van de leidingen vanaf de compressor tot aan de breuk. In de meeste gevallen zal de toename in het uitstroomdebiet minder zijn (realistisch gezien tussen 1.2 – 1.3x nominaal debiet door de leiding).

In de voorliggende QRA is van een verhoging van 1.5 keer het nominale debiet uitgegaan.

6.4 Nalevering en terugstroming

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

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

Voor de leidingbreuk scenario's is het uitstroomdebiet beoordeeld door naar de uitstroom van beide zijden van de breuk te kijken. In de onderstaande tabel is uitgelegd hoe het uitstroomdebiet voor de verschillende leidingbreuk scenario's is berekend.

Tabel 6-1: Uitleg van de modellering van het uitstroomdebiet voor leidingbreukscenario's

Nr.	Onderdeel	Uitstroomdebiet op basis van:
B3, B12	Compressor	Druk, temperatuur en gatgrootte van stroomopwaartse zijde. Geen terugstroming vanuit de compressor verwacht.
B7	Verlaadslang tubetrailer	
B4	Verlaadslang tubetrailer	Debiet stroomopwaarts wordt beperkt door de compressor en is niet significant ten opzichte van de terugstroming. Terugstroming vanuit de tubetrailer berekend op basis van druk, temperatuur en gatgrootte.
B13	Export leiding	
L3, L4	Procesleiding	
B14	Afleverzuil – slang	1.5 keer het compressordebiet. Geen terugstroming vanuit de trucks/auto's meegenomen.
L9	Procesleiding	
L1	Procesleiding	Tweezijdige uitstroming op basis van druk, temperatuur en effectieve gatgrootte (uitstroom vanuit elektrolyser en buffervat)
L2, L5-L7	Procesleiding	Druk, temperatuur en gatgrootte van stroomopwaartse zijde. Geen terugstroming vanaf de compressorzijde verwacht.
L8	Procesleiding	Tweezijdige uitstroming op basis van druk, temperatuur en effectieve gatgrootte (uitstroom vanuit tubetrailer/flessenpakket en exportleiding)

6.5 Weergegevens

Aangezien er geen specifieke installatie wordt beschouwd en de installatie niet op een specifieke locatie wordt berekend, zijn de meteorologische omstandigheden die in de studie gebruikt zijn die van 'Nederland'.

6.6 Ruwheidslengte

De ruwheidslengte is een (kunstmatige) lineaire maat die de invloed van de omgeving op de windsnelheid aangeeft. De ruwheidslengte kan gebaseerd zijn op de afstand tussen obstakels en de hoogte van deze obstakels in de buurt van de activiteit.

In deze studie is uitgegaan van de gemiddelde ruwheidslengte in Nederland, 300 mm.

6.7 Terreingrens

Voor het berekenen van explosieaandachtsgebieden is in Safeti-NL een terreingrens nodig. De terreingrens bepaalt ook of een brandbare wolk ontsteekt of niet. In deze studie is van een terreingrens uitgegaan van 10 x 10 meter.

6.8 Locatie

Alle scenario's zijn gemodelleerd in het midden van de 10x10 meter terreingrens¹², dit is een simplificatie van de werkelijkheid. Berekende risicoafstanden kunnen mogelijk anders worden bij het gebruiken van een specifieke layout als risico relevante onderdelen verder uit elkaar komen te liggen.

6.9 Vergelijking Rekenvoorschrift met DNV waterstof QRA guideline

In het Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid, module II, paragraaf 9.9 (Ref. /1/) wordt aangegeven hoe volgens het Rekenvoorschrift een QRA voor een waterstofinstallatie moet worden uitgevoerd. In deze paragraaf worden een aantal

¹² In de modellering wordt uitgegaan van de vrije veld methode. Er wordt aangenomen dat als een brandbare wolk buiten de terreingrens komt, deze ontsteekt als die zijn maximale grootte bereikt. Een kleine terreingrens is conservatief voor de berekening.

punten uit het Rekenvoorschrift vergeleken met de voorgestelde methodiek in de interne DNV handleiding voor het modeleren van waterstof QRA's (Ref. /2/).

6.9.1 Ongevalscenario's

De DNV handleiding stelt dat vanwege een gebrek aan goed gedocumenteerde incidentgegevens voor waterstofinstallaties er geen goed onderbouwde lekfrequentiedatabase specifiek voor waterstoftoepassingen beschikbaar is.

Er is daarom momenteel geen reden om aan te nemen dat de ongevalscenario's die worden gespecificeerd in het Rekenvoorschrift niet gebruikt zouden moeten worden voor een waterstofinstallatie.

Wel heeft DNV recent voor het RIVM een nieuw model ontwikkeld voor het bepalen van de kans op falen van een verlaadslang bij een verlading. Gezien de grote impact die verlading kan hebben op het totale risico van een kleine waterstofinstallatie is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd op de impact van het gebruiken van het nieuwe model "DNV's RIVM hose model". De input die is gebruikt voor het bepalen van de faalfrequenties met het RIVM hose model is opgenomen in Bijlage C.

6.9.2 Ontstekingskans

In het Rekenvoorschrift wordt standaard van een directe ontstekingskans van 1 uitgegaan voor gasvormig waterstof. Dit betekent dat het model alleen effecten doorrekend die horen bij een directe ontsteking, en niet die voor een vertraagde ontsteking. Er wordt alleen een fakkelbrand doorgerekend voor een continue uitstroom, en geen wolkbrand of vertraagde gaswolk explosie.

Uit incidentdata blijkt dat een vertraagde gaswolk explosie voor waterstof wel relevant is en dat het gebruiken van een directe ontstekingskans van 1 daarom het risico op een explosie onderschat. In de DNV handleiding worden meerdere bruikbare ontstekingsmodellen genoemd, die uitgaan van 2/3 kans op een directe ontsteking en 1/3 kans op een vertraagde ontsteking.

De base case is doorgerekend met een directe ontstekingskans van 0,67 en een vertraagde ontstekingskans van 0,33¹³. Om de impact hiervan op de QRA resultaten te beoordelen is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met een directe ontstekingskans van 1 en een vertraagde ontstekingskans van 0.

Voor de ontstekingskans bij het falen van een tubetrailer is in beide berekeningen uitgegaan van de standaard ontstekingskansen voor Road tankers.

6.9.3 Explosie parameters

6.9.3.1 TNO multi-energy

Conform het Rekenvoorschrift worden explosies doorgerekend met TNO curve 10 en een explosie efficiëntie van 12.5%. Voor de meeste stoffen is dit een zeer conservatieve aanname, maar door de hoge reactiviteit van waterstof is dit een correcte aanname. In de DNV handleiding wordt een aanpak voorgesteld waarbij de TNO curve afhangt van het uitstroomdebiet en de grootte van de brandbare wolk. Voor een brandbare wolk van meer dan 20 m³ wordt een TNO curve 10 aangenomen. Het Rekenvoorschrift is dus consistent met de DNV handleiding.

6.9.3.2 Detonatie

Conform het Rekenvoorschrift wordt geen detonatie meegenomen in de risicoberekening. Voor veel stoffen is de kans op een detonatie zo klein dat dit een terechte aanname is. Echter, door de hoge reactiviteit van waterstof is een detonatie van een waterstof-wolk wel realistisch.

Er is op het moment weinig informatie beschikbaar over de kans op een detonatie bij het ontsteken van een brandbare waterstof-wolk. De DNV handleiding raadt aan om een kans op detonatie van 50% mee te nemen in een waterstof QRA.

¹³ De base case is niet met een directe ontstekingskans van 1 doorgerekend zoals voorgeschreven in het RVO, omdat anders de gevolgen van een vertraagde ontsteking niet worden geïdentificeerd als mogelijke risico drivers.

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de impact van het meenemen van 50% kans op detonaties op de QRA te beoordelen. Aangezien de kans op een detonatie in Safeti-NL niet kan worden aangepast is deze berekening uitgevoerd in het moederprogramma van Safeti-NL, Safeti.

6.10 Gevoeligheidsanalyses

Om inzicht te geven in de impact van verschillende parameters en modelleringskeuzes zijn een aantal gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. De uitgevoerde gevoeligheidsanalyses zijn opgenomen in de onderstaande tabel.

Tabel 6-2: uitgevoerde gevoeligheidsanalyses

No.	Parameter	Basis uitgangspunt	Gevoeligheidsanalyse
1	Directe ontstekingskans	1	0,67
2	ESD reactietijd	120 seconden	60 seconden 30 seconden
3	Faalfrequentie verlaadslang	Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid	DNV's RIVM hose model
		Slangbreuk: 6.3E-04 per jaar Lek: 6.3E-02 per jaar	Slangbreuk: 5.6E-05 per jaar Lek: 1.8E-04 per jaar
4	Kans op detonatie	0%	50%

7 RESULTATEN

7.1 Plaatsgebonden risico

De afstanden tot de 10-4 t/m 10-8 per jaar plaatsgebonden risicocontouren zijn weergegeven in Tabel 7-1. Er dient opgemerkt te worden dat de QRA niet is doorgerekend is voor één specifieke waterstofinstallatie. De doorgerekende installatie is een hypothetische installatie met alle onderdelen die mogelijk aanwezig kunnen zijn in een kleinschalige installatie. De risico's van een concrete installatie zullen daarom naar verwachting kleiner zijn dan die berekend in deze studie.

De relevante afstand voor een QRA is de 10-6 per jaar contour. Deze contour reikt voor de waterstofinstallatie ongeveer 35 meter vanaf de locatie van de installatie. Wel moet worden opgemerkt dat voor deze studie alle onderdelen zijn gemodelleerd op dezelfde locatie. Voor een concrete waterstofinstallatie waar onderdelen gescheiden zijn van elkaar kan dit resulteren in het verschuiven van risico contouren.

Tabel 7-1: Afstanden tot PR contouren

PR contour (per jaar)	Afstand (m)
10-4	21
10-5	31
10-6	35
10-7	48
10-8	49

7.2 Aandachtsgebieden

De afstanden voor de aandachtsgebieden zijn opgenomen in de onderstaande tabel. Het brandaandachtsgebied reikt 31 meter, wat betekent dat de fakkelbrandscenario's niet bijdragen aan het 10-6 per jaar risico, wat op 35 meter ligt. Het explosieaandachtsgebied reikt tot 60 meter¹⁴. Dit is verder dan de 10-8 contour voor het PR, omdat explosieaandachtsgebieden een lagere drempelwaarden hanteren dan PR risico (0,1 bar tegenover 0,3 bar).

Het brandaandachtsgebied wordt bepaald door de fakkelbrand als gevolg van een uitstroming uit de grootste aansluiting op de tubetrailer, het explosieaandachtsgebied wordt bepaald door het scenario voor instantaan falen van een tube op de tubetrailer.

Tabel 7-2: Afstanden tot aandachtsgebieden

Aandachtsgebied	Afstand (m)
Brand (10 kW/m ²)	31
Explosie ¹ (0.1 barg)	60

1. Het explosieaandachtsgebied wordt begrenst door de 0.1 bar overdruk contour en de 35 kW/m² contour van BLEVE scenario's. De 35 kW/m² contour van het vuurbal scenario is een stuk kleiner dan de 0.1 bar overdruk contour en is daarom niet relevant bij het bepalen van de aandachtsgebieden. Daarnaast dient te worden opgemerkt dat een BLEVE niet mogelijk is voor gasvormig waterstof, aangezien het niet vloeibaar is. Het is daarom niet helemaal duidelijk of een vuurbal van gasvormig waterstof mee moet worden genomen bij het bepalen van de grootte van een explosieaandachtsgebied.

7.3 Risicobepalende scenario's

De scenario's die in totaal ongeveer 90% van het risico bepalen op de locaties van de 10-6, 10-5 en 10-4 per jaar contour zijn hieronder weergegeven. Risicobepalende scenario's geven inzicht in welke scenario's bijdragen aan het risico op een locatie. Dit kan vervolgens helpen met beoordelen wat voor beheersmaatregelen effectief zijn om het risico te verlagen.

Tabel 7-3 toont de bijdragende scenario's op de locatie van de 10-6 per jaar contour. De grootste bijdrage komt van een lekkage aan een buffervat en het leegstromen van een tube op een tubetrailer via de grootste aansluiting. De lekkage aan het buffervat komt naar voren vanwege een relatief grote gatgrootte¹⁵ en het grote aantal buffervaten dat is

¹⁴ Let op dat het explosieaandachtsgebied sterk afhankelijk is van de gemodelleerde terreingrens.

¹⁵ 10 mm gat wordt aangenomen voor een lekkage van een opslagvat, maar dat is vergelijkbaar met de leidingdiameters in de installatie

aangenomen voor onderdeel B16 (5 buffervaten). De trailers dragen veel bij vanwege de relatief grote inhoud van de trailer en de hoge aanwezigheidsduur.

Het bepalende effect op deze afstand is voornamelijk de vertraagde ontsteking van de gaswolk met een wolkbrand of explosie als gevolg.

Tabel 7-3: Risicobepalende scenario's 10-6 per jaar contour (35 meter)

Scenario	Risicobijdrage (%)	Cumulatieve risicobijdrage (%)
B16. Buffervat – lek	42.2	42.2
B15. Buffervat – lek	16.9	59.1
B4. Tubetrailer – Grootste aansluiting	10.4	69.4
B7. Tubetrailer – Grootste aansluiting	10.4	79.8

Tabel 7-4 bevat de bijdragende scenario's aan het risico op de 10-5 per jaar contour. Dit ligt een stuk dichterbij de installatie, wat betekent dat naast de grote scenario's die bijdrage op de 10-6 locatie nu ook de verladingsscenario's veel bijdragen. De grootste bijdrage komt van een breuk van de verlaadslang voor B4 of B7 met ESD ingrijpen. Dit komt vanwege de lange verladingduur (vol continu verladen 8766 uur per jaar).

Tabel 7-4: Risicobepalende scenario's 10-5 per jaar contour (31 meter)

Scenario	Risicobijdrage (%)	Cumulatieve risicobijdrage (%)
B4. Verlaadslang - Leidingbreuk ESD+	39.4	39.4
B7. Verlaadslang - Leidingbreuk ESD+	39.4	78.8
B16. Buffervat – lek	7.6	86.3
B15. Buffervat – lek	3.0	89.3

Nog dichterbij de installatie, op de 10-4 per jaar contour, dragen de verladingsscenario's nog meer bij. Dit is opgenomen in Tabel 7-5. De bijdragende scenario's zijn nog steeds de breuk van de verlaadslang. De lekscenario's van de slang hebben een nog hogere faalkans, maar de maximale letaliteitsafstand van het lekscenario is slechts 3 meter.

Tabel 7-5: Risicobepalende scenario's 10-4 per jaar contour (21 meter)

Scenario	Risicobijdrage (%)	Cumulatieve risicobijdrage (%)
B4. Verlaadslang - Leidingbreuk ESD+	42.7	42.7
B7. Verlaadslang - Leidingbreuk ESD+	42.7	85.5
B16. Buffervat – lek	5.7	91.2

7.4 Effectafstanden

Om inzicht te geven in de risicoafstanden per onderdeel is in Bijlage D het SMEZ rapport opgenomen voor weertype D9. Dit weertype resulteert in de maximale 1% letaliteitsafstand. In het SMEZ rapport zijn effectafstanden voor alle gemodelleerde scenario's opgenomen tot letaliteitsgrenswaarden. Deze afstanden kunnen gebruikt worden als indicatie van een maximale risicoafstand die hoort bij een enkele component.

7.5 Risico drivers

De componenten die het meest bijdrage aan het risico zijn de tubetrailers en de verlading daarvan. Dichtbij de installatie wordt het risico voornamelijk bepaald door de verladingsscenario's en verder weg van de installaties worden de risico's bepaald door het falen van de trailer.

Voor het reduceren van de risico's van de verlading zijn de volgende parameters van belang:

Maatregel	Impact
Risico reductie voor verlading	
Reduceren verladingstijd*	De faal frequentie voor een verlaadslang is sterk afhankelijk van verladingstijd, verlagen van verladingstijd resulteert in lagere faalfrequenties.
Afstand tussen verlaadpunten	Door afstand te houden tussen verschillende tubetrailers die tegelijk verladen kan worden voorkomen dat de risico's bij elkaar optellen.
Brandmuur	Een brandmuur kan een kwetsbaar gebied afschermen van brandbare effecten bij een LoC met de verlaadslang.
Aantal verladingsoperaties beperken*	In het model van het Rekenvoorschrift wordt voor de faalkans van een verlading geen rekening gehouden met het aantal verladingen. In de praktijk hebben veel LoC incidenten met verlading te maken met het aan en afkoppelen van de verlaadslang. Door het aantal verlaadacties te beperken kunnen de risico's van de verlading beperkt worden. Dit is ook terug te zien in de risicoberekeningen als het RIVM hose model wordt toegepast.
Risico reductie voor buffervaten en tubetrailers	
Minimaliseren aanwezigheid tubetrailers	De kans op het falen van een tubetrailer is afhankelijk van de aanwezigheidsduur van de trailer. Door het minimaliseren van de aanwezigheidsduur, bijvoorbeeld door zo min mogelijk wachttijd van een volle tubetrailer voordat deze kan aankoppelen, kan de kans op een incident worden verlaagd.
Reduceren van aantal buffervaten*	De faalkans voor de buffervaten is proportioneel met het aantal vaten. Minder vaten vermindert de kans op een incident.
Verminderen van ontstekingsbronnen in de omgeving	Verminderen van ontstekingsbronnen heeft geen impact in Safeti-NL omdat er wordt aangenomen dat een brandbare wolk altijd ontsteekt als die buiten de terreingrens komt. Echter, in de praktijk zal het verminderen van ontstekingsbronnen wel resulteren in een lager risico.
Beperken van besloten gebieden waar waterstof gas zich kan ophopen	De risico's van de tubetrailers zijn voornamelijk de vertraagde gaswolk explosie. Als er locaties zijn waar waterstof zich kan ophopen kan dit resulteren in explosies, en voor waterstof zelfs mogelijk in een detonatie.
Minder waterstof inhoud in buffervaten en trailers*	Minder inhoud van trailers en buffervaten resulteert in kleinere maximale effectafstanden.

* In de praktijk zal minder trailers/buffervaten of lagere verlaadfrequenties betekenen dat er meer inhoud per trailer/vat of hoger debiet per operatie is. Dit resulteert in grotere effectafstanden. Afhankelijk van de specifieke installatie zal er een optimum zijn voor het aantal en de grootte van de buffervaten/trailers en het verlaaddebet.

Daarnaast kan een snelle detectie met alarmering zorgen dat er geen mensen in de buurt zijn als een waterstof lek ontsteekt. Dit is niet iets wat in de QRA modellering wordt meegenomen, maar kan in de praktijk wel effectief zijn.

7.6 Gevoeligheidsanalyses

De resultaten van de uitgevoerde gevoeligheidsanalyses zijn weergegeven in Tabel 7-6. Op basis van deze resultaten kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het aanpassen van de directe ontstekingskans naar 1 heeft impact op de contouren vanaf 10-5 per jaar t/m 10-8 per jaar. De contouren reiken allemaal een stuk minder ver wat betekent dat voor de doorgerekende installatie het rekenen met een directe ontstekingskans van 1 waarschijnlijk een onderschatting van het risico geeft.

- Het aanpassen van de ESD reactietijd heeft vrijwel geen impact op de berekende risico's. De risico's dichtbij de installatie worden voornamelijk bepaald door fakkelbranden. De effecten van een fakkelbrand worden in Safeti-NL bepaald in de eerste 20 seconden¹⁶. Ingrijpen heeft dus geen impact op deze scenario's. De risico's verder van de installatie af worden voornamelijk bepaald door het falen van een tubetrailer. Voor deze scenario's is geen ESD ingrijpen meegenomen omdat ingrijpen niet effectief is bij het falen van de trailer.

Wel heeft een snelle ESD reactietijd impact op mogelijke domino-effecten. Domino-effecten als gevolg van warmtestraling treden alleen op na langdurige blootstelling. Door het snel stoppen van de uitstroom, met een snel ingrijpend ESD systeem, kan escalatie worden voorkomen.

- Het aanpassen van de faalfrequentie voor de verlading op basis van een andere bron heeft een redelijke impact. De impact is voornamelijk dichtbij de installatie, waar de risico's worden bepaald door het verladen. Door de hoge verladingsduur geeft het Rekenvoorschrift een hele hoge lekfrequentie, wat resulteert in hoge risico's bij de installatie. Het RIVM hose model, wat ook rekening houdt met het aantal verladingen, resulteert in lagere (en waarschijnlijk meer realistische) faalfrequenties. Dit vertaalt zich ook naar lagere risico's nabij de installatie. De aanpassing heeft geen impact op de 10-6 per jaar contour omdat verladingsscenario's daar niet meer bijdragen.
- Het meenemen van detonaties in de risicoberekening heeft geen impact op de installatie. Dit komt omdat de risico's voor deze installatie niet worden bepaald door vertraagde ontsteking met een explosie. Echter, er dient opgemerkt te worden dat in vorige iteraties van de QRA er wel een redelijke impact was op de 10-7 en 10-8 per jaar contouren. In deze iteraties was met een groter volume gerekend wat kon vrijkomen bij instantaan falen van een trailer. Dit betekent dat het niet meenemen van detonaties in de standaard risicoberekening conform het Rekenvoorschrift mogelijk een onderschatting geeft van het risico. Voor de installatie die in deze QRA is doorgerekend heeft het meenemen van detonaties echter geen significante impact op de afstand tot de 10-6 per jaar contour¹⁷.

Tabel 7-6: PR afstanden voor uitgevoerde gevoeligheidsanalyses

PR contour (per jaar)	Afstand (m)					
	Base case	Directe ontstekingskans = 1	ESD tijd 60 seconden	ESD tijd 30 seconden	RIVM hose model	Detonatie 50%
10-4	21	21	21	21	11	21
10-5	31	23	31	31	23	31
10-6	35	29	35	35	35	35
10-7	48	43	48	48	48	48
10-8	49	48	49	49	49	49

De gevoeligheidsanalyses voor ESD reactietijd en RIVM hose model hebben geen impact op de aandachtsgebieden, omdat bij de berekening van een aandachtsgebied kans niet mee speelt. De directe ontstekingskans heeft ook geen impact op de aandachtsgebieden omdat het maximale explosie scenario wordt bepaald door het instantaan falen van een tubetrailer. Dit scenario is niet met een directe ontstekingskans van 1 doorgerekend en komt dus in beide iteraties naar voren als grootste explosie scenario.

Detonaties meenemen heeft naar verwachting wel impact op de grootte van het aandachtsgebied, maar detonaties kunnen niet worden meegenomen in Safeti-NL en het explosieaandachtsgebied kan niet worden berekend in de normale versie van Safeti. Daarom is er geen explosieaandachtsgebied berekend met detonatie meegenomen.

Daarnaast is het niet duidelijk of detonaties überhaupt moeten worden meegenomen in de bepaling van het aandachtsgebied, aangezien de omvang van een explosieaandachtsgebied wordt bepaald op basis van een berekening in Safeti-NL, waarin detonaties niet worden meegenomen.

¹⁶ In de gevoeligheidsanalyses is de snelst doorgerekende ESD reactietijd 30 seconden. Gezien de kleine diameter van de waterstofleidingen kan worden onderzocht of een nog sneller ESD systeem mogelijk is. Indien de uitstroom binnen 20 seconden kan worden gestopt, heeft dit mogelijk wel impact op de berekende risicoafstanden.

¹⁷ Voor andere installaties, bijvoorbeeld met grotere/meer tubetrailers en buffervaten die tegelijk aanwezig zijn, kan het meenemen van detonaties dus wel grote impact hebben op de afstand tot de 10-6 per jaar risico contour.

8 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

De afstanden tot de verschillende risicocontouren zijn weergegeven in Tabel 8-1. Er dient opgemerkt te worden dat de QRA niet is doorgerekend is voor één specifieke waterstofinstallatie. De doorgerekende installatie is een hypothetische installatie met alle onderdelen die mogelijk aanwezig kunnen zijn in een kleinschalige installatie. De risico's van een concrete installatie zullen daarom naar verwachting kleiner zijn dan die berekend in deze studie.

De relevante afstand voor een QRA is de 10-6 per jaar contour. Deze contour reikt voor de waterstofinstallatie ongeveer 35 meter vanaf de locatie van de installatie.

Tabel 8-1: Afstanden tot PR contouren

PR contour (per jaar)	Afstand (m)
10-4	21
10-5	31
10-6	35
10-7	48
10-8	49

Het brandaandachtsgebied reikt 31 tot meter en het explosieaandachtsgebied reikt tot 60 meter.

De risicobepalende scenario's zijn vooral gerelateerd aan het verladen van waterstof van en naar tubetrailers. Dichtbij de installatie worden de risico's voornamelijk bepaald door het breken van de verlaadslang en op grotere afstand van de installatie worden de risico's bepaald door het catastrofaal falen van de tubetrailer zelf.

Voor het reduceren van de risico's van de verlading zijn de volgende parameters van belang:

- Verladingsduur, de hoge risico's komen voornamelijk uit de hoge verladingsduur.
- Afstand tussen verlaadpunten. Door afstand te houden tussen verschillende tubetrailers die tegelijk verladen kan worden voorkomen dat de risico's bij elkaar optellen.
- Een brandmuur kan een kwetsbaar gebied afschermen van brandbare effecten bij een LoC met de verlaadslang.
- Aantal verladingsoperaties beperken. In het model van het Rekenvoorschrift wordt voor de faalkans van een verlading geen rekening gehouden met het aantal verladingen. In de praktijk hebben veel LoC incidenten met verlading te maken met het aan en afkoppelen van de verlaadslang. Door het aantal verlaadacties te beperken kunnen de risico's van de verlading beperkt worden. Dit is ook terug te zien in de risicoberekeningen als het RIVM hose model wordt toegepast.

Voor het reduceren van de risico's van de buffervaten en tubetrailers zijn de volgende parameters van belang:

- Aanwezigheid van volle tubetrailers minimaliseren (dus bijvoorbeeld zo min mogelijk wachttijd van een volle tubetrailer voordat die kan aankoppelen).
- Reduceren van aantal buffervaten
- Verminderen van ontstekingsbronnen in de omgeving. Dit heeft geen impact in Safeti-NL omdat er wordt aangenomen dat een brandbare wolk altijd ontsteekt als die buiten de terreingrens komt. Echter, in de praktijk zal het verminderen van ontstekingsbronnen wel resulteren in een lager risico.
- Beperken van besloten gebieden waar waterstof gas zich kan ophopen. De risico's van de tubetrailers zijn voornamelijk de vertraagde gaswolkexplosie. Als er locaties zijn waar waterstof zich kan ophopen kan dit resulteren in explosies, en voor waterstof zelfs mogelijk in een detonatie.

- Minder waterstof inhoud in buffervaten en trailers, minder inhoud resulteert in kleinere maximale effectafstanden.

Daarnaast kan een snelle detectie met alarmering zorgen dat er geen mensen in de buurt zijn als een waterstof lek ontsteekt. Dit is niet iets wat in de QRA modellering wordt meegenomen, maar kan in de praktijk wel effectief zijn.

Om meer inzicht te geven in een aantal verschillende parameters zijn verschillende gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Op basis van deze analyses kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Het aanpassen van de directe ontstekingskans naar 1 heeft impact op de contouren vanaf 10-5 per jaar t/m 10-8 per jaar. De contouren reiken allemaal een stuk minder ver wat betekent dat voor de doorgerekende installatie het rekenen met een directe ontstekingskans van 1 waarschijnlijk een onderschatting van het risico geeft.
- Het aanpassen van de ESD reactietijd heeft vrijwel geen impact op de berekende risico's. De risico's dichtbij de installatie worden voornamelijk bepaald door fakkelbranden. De effecten van een fakkelbrand worden in Safeti-NL bepaald in de eerste 20 seconden. Ingrijpen heeft dus geen impact op deze scenario's. De risico's verder van de installatie af worden voornamelijk bepaald door het falen van een tubetrailer. Voor deze scenario's is geen ESD ingrijpen meegenomen omdat ingrijpen niet effectief is bij het falen van de trailer.
- Het aanpassen van de faalfrequentie voor de verlading op basis van een andere bron heeft wel een redelijke impact. De impact is voornamelijk dichtbij de installatie, waar de risico's worden bepaald door het verladen. Door de hoge verladingsduur geeft het Rekenvoorschrift een hele hoge lekfrequentie, wat resulteert in hoge risico's bij de installatie. Het RIVM hose model, wat ook rekening houdt met het aantal verladingen, resulteert in lagere (en waarschijnlijk meer realistische) faalfrequenties. Dit vertaalt zich ook naar lagere risico's nabij de installatie. De aanpassing heeft geen impact op de 10-6 per jaar contour omdat verladingsscenario's daar niet meer bijdragen.
- Het meenemen van detonaties in de risicoberekening heeft geen impact op de installatie. Dit komt omdat de risico's voor deze installatie niet worden bepaald door vertraagde ontsteking met een explosie. Echter, er dient opgemerkt te worden dat in vorige iteraties van de QRA er wel een redelijke impact was op de 10-7 en 10-8 per jaar contouren. In deze iteraties was met een groter volume gerekend wat kon vrijkomen bij instantaan falen van een trailer. Dit betekent dat het niet meenemen van detonaties in de standaard risicoberekening conform het Rekenvoorschrift mogelijk een onderschatting geeft van het risico. Voor de installatie die in deze QRA is doorgerekend heeft het meenemen van detonaties echter geen significante impact op de afstand tot de 10-6 per jaar contour¹⁸.

Het aanpassen van de directe ontstekingskans, ESD reactietijd en het verlaadmodel hebben geen impact op de aandachtsgebieden. Detonaties meenemen heeft naar verwachting wel impact op de grootte van het aandachtsgebied, maar detonaties kunnen momenteel niet worden meegenomen in Safeti-NL.

¹⁸ Voor andere installaties, bijvoorbeeld met grotere/meer tubetrailers en buffervaten die tegelijk aanwezig zijn, kan het meenemen van detonaties dus wel grote impact hebben op de afstand tot de 10-6 per jaar risico contour.

9 REFERENTIES

- /1/ RIVM, Rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid – Module I & II, Januari 2025
- /2/ DNV, Internal Service Guideline GL20. Hydrogen QRA guideline, ISG-HSER-020, Januari 2024
- /3/ ISPT, Safety Aspects of green Hydrogen Production on an Industrial Scale, November 2023

BIJLAGE A

Inventarisatie QRA input

Componenten						opmerkingen
B1 Elektrolyser	Capaciteit Nm³/h Kg/dag	L1 Druk Barg	L1 Diameter	Leidinglengte (m)	Temperatuur	
QRA 1	400-500 kg/dag	30	?	?	?	0,833 - 1,041 MW
QRA 2	564 kg/dag	35	3/4"	30	9,8	1,175 MW
QRA 3	n.v.t.					
QRA 4	1012.1 Nm ³ /h 2184 Kg/dag max 90 kg H ₂ /uur	40	0.12 m	400	75 °C	5 MW De totale hoeveelheid waterstof in het systeem is 15 kg. Er is een hoeveelheid bufferopslag vereist op het grensvlak van H ₂ -productie en compressie. De totale hoeveelheid waterstof in de leiding is 14.1 kg.
Keuze	500 kg/dag, 1000 kg/dag, 2000 kg/dag	40	¾ inch	30	9,8	Inhoud van elektrolyser zelf is verwaarloosbaar. Volcontinu in bedrijf
B2 Buffervat	Inhoud	Druk Barg	L2 Leidingdruk barg	L2 Leiding diameter	Temperatuur	
QRA 1	?	30	30-48	?	9,8	
QRA 2	45 kg	35	?	?	9,8	
QRA 3	n.v.t.					
QRA 4	N.v.t.					De lange leiding van 400 m fungeert als buffer
Keuze	50 kg	40 bar	40	¾ inch	9,8	
B3 Compressor na elektrolyse	Type + capaciteit	L3 Druk	L3 Diameter	L3 Leidingdruk	L3 Leidinglengte	
QRA 1	Type: centrifugaal met pakking 305 -410 Nm ³ /h	Min 450 bar Max 500 bar	8 mm	Min 450 bar Max 500 bar	?	
QRA 2	Type: centrifugaal met pakking 240 Nm ³ /h	Max 305 bar	1/2"	300	20	
QRA 3	n.v.t.					
QRA 4	Type: zuigercompressor 1 compressor: 42 kg/uur 2 compressoren: 82 kg/uur	Maximaal 1000 bar	2"	Max 1000 bar	?	
Keuze	Type: centrifugaal of zuiger (zelfde faalfreq). Capaciteit: 250 – 400 Nm ³ /h	300, 500, 700, 1000	8 mm – ½ "	300, 500, 700, 1000	20	350 bar voor trucks, 500 bar en 1000 bar flessenpakketten, 700 bar voor aflevering auto's

Componenten						opmerkingen
	Aantal: 1					
B4 Tubetrailer vullen	Aantal en inhoud	Druk barg	Temperatuur	slangen		
QRA 1	n.v.t.					
QRA 2	3 trailers 10 cilinders per trailer 3 m3 per cilinder (~60 kg)	300	9,8			
QRA 3	n.v.t.					
QRA 4	Twee trailers van 620 kg H ₂ per trailer bij 640 bar 48 flessen per trailer á 13 kg/fles	640 bar				
Keuze	2 tubetrailers alle cilinders in verbinding met elkaar: 600 kg per trailer 2 flessenpakketten trailers van elk 16 pakketten x 15 cilinders per pakket	Tubetrailer: 300 – 380 bar Flessenpakketten: 300 – 500 – 1000 barg		1 slang per trailer van 8 mm - 1 inch max		2 trailers volcontinu aanwezig
B5 Flessenpakketten vullen	Aantal x inhoud	Druk				
QRA 1	n.v.t.					
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	n.v.t.					
QRA 4	1 pakket bestaat uit 4 cilinders met 84 kg H ₂ (21 kg per cilinder). 26 pakketten totaal (2184 kg)	1000 bar				

Componenten						opmerkingen
Keuze	10 - 30 pakketten van elk 12-16 cilinders van 300 barg Variatie in druk: 500 barg en 1000 barg Volledig gevuld (continu)	300 – 500 - 1000	300- 500 – 1000 bar		Diameter: 6 mm Aantal: 1 slang per pakket Type: composiet	Aanwezigheidsduur: Volcontinu aanwezig
B6 Reduceer	inhoud	Druk barg	L4 Leidingdruk	L4 Leidinglengte m	Aantal Koppelslangen Type /diameter	
QRA 1	n.v.t.					
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	n.v.t.					
B7 Externe aanvoer via tubetrailers	Aantal en inhoud	Druk barg	L5 Druk in slang	L5 Slanglengte m	Aantal Koppelslangen Type /diameter	
QRA 1	1x1000 kg (500 bar) + 1 extra aansluiting voor wisselen	300/500 bar	300/500 bar	5-6 m	Aantal: 2 slangen Diameter: ? Type: stalen mantel met composiet?	Extra trailer voor wisselen is niet permanent aanwezig Max trailer inhoud: 1180 kg bij 500 bar
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	2 trailers x 387 kg (200 bar)	200 bar	200 bar	5	Aantal: 1 slang Diameter: 12,8 mm Type: composiet	
QRA 4	2x trailers x 290 kg (200 bar) = 580 kg	200 bar	200 bar			
B8 Externe aanvoer via (backup) flessenpakketten	inhoud	Druk barg	L6 slangdruk	L6 slanglengte m	Aantal Koppelslangen Type /diameter	
QRA 1	n.v.t.					
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	6 x flessenpakketten (300 bar). 12 cilinders per pakket. Totaal 81,7 kg.	200 bar	200 bar	2.5 m	Aantal: 6 Diameter: ¼" Type: composiet	
QRA 4						

Componenten						opmerkingen
Keuze	1-2 pakketten van elk 12-16 cilinders van 300 barg Variatie in druk: 500 en 1000 barg Volledig gevuld continu	300 – 500 - 1000	300 – 500 - 1000 bar		Diameter: 6 mm Aantal: 1 slang per pakket Type: composiet	Aanwezigheidsduur: Case: Aggregaat op Evenement: 5 dagen per evenement, 1 evenement per locatie per jaar Case: Bouwplaats/bedrijven: volcontinu aanwezig
B9 Lospaneel	L7 leidingdruk barg	L7 leidingdiameter	L7 Leidinglengte			
QRA 1	500	?	Minimaal 10 m max 60-70 m			
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	200	½ " x 16 m ½ " x 32 m ¼ " x 28 m	½ " x 16 m ½ " x 32 m ¼ " x 28 m			½ " x 16 m Is tot back-up panel.
B10 Reduceer	L8 leidingdruk barg	L8 leidingdiameter	L8 Leidinglengte			
QRA 1	n.v.t.					
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	8	¾ "	6 m			
B11 Bufferflessen pakketten	inhoud	Druk barg	slangdruk	slanglengte m	Aantal Koppelslangen Type /diameter	
QRA 1	n.v.t.					
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	7 x flessenpakketten van 300 bar. 13,6 kg per pakket. Totaal inhoud 95,3 kg	300 bar	300 bar	2 x 1 m 5 x 2,5 m	¼ "	
Keuze	3-7 flessenpakketten van 300 bar	300 bar	300 bar	7 koppelslangen	¼ "	Volcontinue aanwezig (als back-up) Pakketten zijn continu gekoppeld met open verbinding
B12 Compressor afleveren	Aantal en type	Nm³/h	L9 leidingdruk barg	L9 Leidingdiameter mm	L9 leidinglengte m	
QRA 1	1-2x Type: centrifugaal met pakking	45 kg/h	350 en 750 bar afleveren	8mm intern	5-15m	bij een hogere installatie capaciteit wordt 1 compressor bijgeplaatst + extra buffer van 4200 w.i. (3x 1400 w.i.)
QRA 2	N.v.t.					
QRA 3						

Componenten						opmerkingen
Keuze	1 compressor, zie QRA 1 en PGS 35					
B13 Invoer in leiding	leidingdruk barg	leidingdiameter	leidinglengte			
QRA 1						
QRA 2						
QRA 3	80 mbar	80 mm	20 m			Gaat om ondergrondse leiding. (Koelleiding en MRO Meet-regel en odorisatie station) naar huizen
Keuze	8 bar (voor netbeheerder) ondergrondse leiding	3/4 "	10 m			Verder downstream: 100 mbar straten in wijken en aflevering naar huizen van 30 mbar worden niet beschouwd (ondergronds). – zijn al studies voor gedaan max risicoafstanden van 1 meter.
B16 Buffervaten compressor afleveren	Inhoud	Leidingdruk barg	Leidingdiameter mm	Leidinglengte m		
QRA 1	2 x 1400 l					
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3						
B14 Afleverzuil trucks/auto's	Afleverdruk barg	Diameter slang	Afleverlangen aantal en type?	Totale afleverduur (uur per jaar)		
QRA 1	350 en 700 bar	?	Aantal: 1 Type: composiet			
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	n.v.t.					
Keuze	Zie QRA 1 beide auto's en trucks	Zie AVIV rapport	1 per installatie,			Zie AVIV rapport, 1690 uur per jaar voor trucks en 1690 uur per jaar voor auto's Doorzet: 800 kg/dag, 18% tijd
B15 Buffervaten voor afleveren behorende bij compressor B12	Aantal en inhoud	leidingdruk barg	leidingdiameter	Leidinglengte		
QRA 1	Bij 1 compressor: 5x 1400 l (bij 550 bar)	500	8 mm	?		bij een hogere installatie capaciteit wordt 1 compressor bijgeplaatst + extra buffer van 4200 w.i. (3x 1400 w.i.)

Componenten						opmerkingen
	Bij 2 compressoren: 3x 1400 l erbij (bij 550 bar) Daarnaast ook 5x 400 l buffervaten (bij 975 bar)					
QRA 2	n.v.t.					
QRA 3	n.v.t.					
Keuze	Uitgaan 1 compressor, dus 5x 1400 l (bij 550 bar)					



BIJLAGE B

Uitgewerkte ongevalscenario's

Leidingbreuk scenario's

Seg. Nr.	Scenario	Segment	ESD	Materiaal	Inhoud kg	Temperatuur degC	Druk barg	Diameter mm	Lengte m	Vast debiet kg/s	ESD tijd s
B3	LR	Compressor	ESD+	HYDROGEN	65.0	9.8	40	6.35	5		120
B4	LR	Verlaadslang	ESD+	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		120
B7	LR	Verlaadslang	ESD+	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		120
B12	LR	Compressor afleveren	ESD+	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		120
B13	LR	Export leiding	ESD+	HYDROGEN	999999.0	9.8	8	12.7	5		120
B14	LR	Afleverzuil trucks/auto's	ESD+	HYDROGEN	788.5	9.8	700	12.7	5	0.077	120
L1	LR	B1 - B2	ESD+	HYDROGEN	65.0	9.8	40	4.5	5		120
L2	LR	B2 - B3	ESD+	HYDROGEN	65.0	9.8	40	6.35	5		120
L3	LR	B3 - B4/B5	ESD+	HYDROGEN	65.0	9.8	500	12.7	5		120
L4	LR	B6 - B13	ESD+	HYDROGEN	999999.0	9.8	8	6.35	5		120
L5	LR	B7 - B9	ESD+	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		120
L6	LR	B8 - B9	ESD+	HYDROGEN	81.6	9.8	500	6.35	5		120
L7	LR	B9 - B10 / B12	ESD+	HYDROGEN	681.6	9.8	500	12.7	5		120
L8	LR	B10 - B13	ESD+	HYDROGEN	776.9	9.8	8	18.0	5		120
L9	LR	B12 - B14	ESD+	HYDROGEN	681.6	9.8	700	12.7	5	0.077	120
B3	LR	Compressor	ESD-	HYDROGEN	65.0	9.8	40	6.35	5		
B4	LR	Verlaadslang	ESD-	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		
B7	LR	Verlaadslang	ESD-	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		
B12	LR	Compressor afleveren	ESD-	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		
B13	LR	Export leiding	ESD-	HYDROGEN	999999.0	9.8	8	12.7	5		
B14	LR	Afleverzuil trucks/auto's	ESD-	HYDROGEN	788.5	9.8	700	12.7	5	0.077	
L1	LR	B1 - B2	ESD-	HYDROGEN	65.0	9.8	40	4.5	5		
L2	LR	B2 - B3	ESD-	HYDROGEN	65.0	9.8	40	6.35	5		
L3	LR	B3 - B4/B5	ESD-	HYDROGEN	65.0	9.8	500	12.7	5		
L4	LR	B6 - B13	ESD-	HYDROGEN	999999.0	9.8	8	6.35	5		
L5	LR	B7 - B9	ESD-	HYDROGEN	600.0	9.8	300	12.7	5		
L6	LR	B8 - B9	ESD-	HYDROGEN	81.6	9.8	500	6.35	5		

Seg. Nr.	Scenario	Segment	ESD	Materiaal	Inhoud	Temperatuur	Druk	Diameter	Lengte	Vast debiet	ESD tijd
					kg	degC	barg	mm	m	kg/s	s
L7	LR	B9 - B10 / B12	ESD-	HYDROGEN	681.6	9.8	500	12.7	5		
L8	LR	B10 - B13	ESD-	HYDROGEN	776.9	9.8	8	18.0	5		
L9	LR	B12 - B14	ESD-	HYDROGEN	681.6	9.8	700	12.7	5	0.077	

Lek scenario's

Seg. Nr.	Scenario	Segment	Materiaal	Inhoud kg	Temperatuur degC	Druk barg	Diameter mm
B1	lek	Electrolyser	HYDROGEN	15.0	9.8	40	10
B2	lek	Buffervat	HYDROGEN	50.0	9.8	40	10
B3	lek	Compressor	HYDROGEN	65.0	9.8	40	0.635
B4	lek	Verlaadslang	HYDROGEN	600.0	9.8	300	1.27
B4	Grootste aansluiting	Tubetrailer	HYDROGEN	66.67	9.8	300	12.7
B5	lek	Flessenpakketten	HYDROGEN	2184.0	9.8	500	5
B7	lek	Verlaadslang	HYDROGEN	600.0	9.8	300	1.27
B7	Grootste aansluiting	Tubetrailer	HYDROGEN	66.67	9.8	300	12.7
B8	lek	Backup flessenpakket aanvoer	HYDROGEN	81.6	9.8	500	5
B11	lek	Bufferflessen pakketten	HYDROGEN	95.3	9.8	500	5
B12	lek	Compressor afleveren	HYDROGEN	600.0	9.8	300	1.27
B13	lek	Export leiding	HYDROGEN	695.3	9.8	8	1.27
B14	lek	Afleverzuil trucks/auto's	HYDROGEN	788.5	9.8	700	1.27
B15	lek	Buffervat	HYDROGEN	46.6	9.8	500	10
B16	lek	Buffervat	HYDROGEN	46.6	9.8	500	10
L1	lek	B1 - B2	HYDROGEN	65.0	9.8	40	0.3175
L2	lek	B2 - B3	HYDROGEN	65.0	9.8	40	0.635
L3	lek	B3 - B4/B5	HYDROGEN	65.0	9.8	500	1.27
L4	lek	B6 - B13	HYDROGEN	65.0	9.8	8	0.635
L5	lek	B7 - B9	HYDROGEN	600.0	9.8	300	1.27
L6	lek	B8 - B9	HYDROGEN	81.6	9.8	500	0.635
L7	lek	B9 - B10 / B12	HYDROGEN	681.6	9.8	500	1.27
L8	lek	B10 - B13	HYDROGEN	776.9	9.8	8	1.27
L9	lek	B12 - B14	HYDROGEN	681.6	9.8	700	1.27

Instantaan falen scenario's

Seg. Nr.	Scenario	Segment	Materiaal	Inhoud	Temperatuur	Druk	Vloeistofkolom hoogte	Uitstroomhoogte
				kg	degC	barg	m	m
B1	CR	Electrolyser	HYDROGEN	15.0	9.8	40	1	2
B2	CR	Buffervat	HYDROGEN	50.0	9.8	40	1	2
B4	CR	Tubetrailer	HYDROGEN	66.67	9.8	300	1	2
B5	INST	Flessenpakketten	HYDROGEN	21.0	9.8	500	1	1
B7	CR	Tubetrailer	HYDROGEN	66.67	9.8	300	1	2
B8	INST	Backup flessenpakket aanvoer	HYDROGEN	1.1	9.8	500	1	1
B11	INST	Bufferflessen pakketten	HYDROGEN	1.1	9.8	500	1	1
B15	CR	Buffervat	HYDROGEN	46.6	9.8	500	1	2
B16	CR	Buffervat	HYDROGEN	46.6	9.8	500	1	2

10 minuten uitstroom scenario's

Seg. Nr.	Scenario	Segment	Materiaal	Inhoud	Temperatuur	Druk
				kg	degC	barg
B1	10 min	Electrolyser	HYDROGEN	15.0	9.8	40
B2	10 min	Buffervat	HYDROGEN	50.0	9.8	40
B15	10 min	Buffervat	HYDROGEN	46.6	9.8	500
B16	10 min	Buffervat	HYDROGEN	46.6	9.8	500

Standalone vuurbal scenario's

Seg. Nr.	Scenario	Segment	Materiaal	Inhoud	Temperatuur	Druk
				kg	degC	barg
B4	Standalone vuurbal	Tubetrailer	HYDROGEN	66.67	9.8	300
B7	Standalone vuurbal	Tubetrailer	HYDROGEN	66.67	9.8	300

Afleiding faalfrequenties

Seg. No.	Scenario	Segment	ESD	Aantal	ESD	Leiding- lengte	operationele fractie	Basis frequency per jaar	Basis frequency per m per jaar	Finale frequency per jaar
				#		m				
B1	CR	Electrolyser					1	5.00E-06		5.00E-06
B1	10 min	Electrolyser					1	5.00E-06		5.00E-06
B1	leak	Electrolyser					1	1.00E-04		1.00E-04
B2	CR	Buffervat					1	5.00E-07		5.00E-07
B2	10 min	Buffervat					1	5.00E-07		5.00E-07
B2	leak	Buffervat					1	1.00E-05		1.00E-05
B3	LR	Compressor	ESD+	2	0.99		1	1.00E-04		1.98E-04
B3	Leak	Compressor		2			1	4.40E-03		8.80E-03
B4	LR	Verlaadslang	ESD+		0.99		1	3.51E-03		3.47E-03

Seg. No.	Scenario	Segment	ESD	Aantal	ESD	Leiding- lengte	operationele fractie	Basis frequency	Basis frequency	Finale frequency
				#		m		per jaar	per m per jaar	per jaar
B4	Leak	Verlaadslang					1	3.51E-01		3.51E-01
B4	CR	Tubetrailer		9			1	9.38E-07		8.44E-06
B4	Grootste aansluiting	Tubetrailer		9			1	5.00E-07		4.50E-06
B4	Standalone vuurbal	Tubetrailer		9			1	2.26E-05		2.03E-04
B5	INST	Flessenpakketten		104			1	5.00E-07		5.20E-05
B5	Leak	Flessenpakketten		104			1	5.00E-07		5.20E-05
B7	LR	Verlaadslang	ESD+		0.99		1	3.51E-03		3.47E-03
B7	Leak	Verlaadslang					1	3.51E-01		3.51E-01
B7	CR	Tubetrailer		9			1	9.38E-07		8.44E-06
B7	Grootste aansluiting	Tubetrailer		9			1	5.00E-07		4.50E-06
B7	Standalone vuurbal	Tubetrailer		9			1	2.26E-05		2.03E-04
B8	INST	Backup flessenpakket aanvoer		72			1	5.00E-07		3.60E-05
B8	Leak	Backup flessenpakket aanvoer		72			1	5.00E-07		3.60E-05
B11	INST	Bufferflessen pakketten		84			1	5.00E-07		4.20E-05
B11	Leak	Bufferflessen pakketten		84			1	5.00E-07		4.20E-05
B12	LR	Compressor afleveren	ESD+	1	0.99		1	1.00E-04		9.90E-05
B12	Leak	Compressor afleveren		1			1	4.40E-03		4.40E-03
B13	LR	Export leiding	ESD+		0.99	10	1		1.00E-06	9.90E-06
B13	Leak	Export leiding				10	1		5.00E-06	5.00E-05
B14	LR	Afleverzuil trucks/auto's	ESD+		0.99		0.18	3.51E-03		6.25E-04
B14	Leak	Afleverzuil trucks/auto's					0.18	3.51E-01		6.31E-02
B15	CR	Buffervat		2			1	5.00E-07		1.00E-06
B15	10 min	Buffervat		2			1	5.00E-07		1.00E-06

Seg. No.	Scenario	Segment	ESD	Aantal	ESD	Leiding- lengte	operationele fractie	Basis frequency	Basis frequency	Finale frequency
				#		m		per jaar	per m per jaar	per jaar
B15	leak	Buffervat		2			1	1.00E-05		2.00E-05
B16	CR	Buffervat		5			1	5.00E-07		2.50E-06
B16	10 min	Buffervat		5			1	5.00E-07		2.50E-06
B16	leak	Buffervat		5			1	1.00E-05		5.00E-05
L1	LR	B1 - B2	ESD+		0.99	30			1.00E-06	2.97E-05
L1	Leak	B1 - B2				30			5.00E-06	1.50E-04
L2	LR	B2 - B3	ESD+		0.99	30			1.00E-06	2.97E-05
L2	Leak	B2 - B3				30			5.00E-06	1.50E-04
L3	LR	B3 - B4/B5	ESD+		0.99	20			1.00E-06	1.98E-05
L3	Leak	B3 - B4/B5				20			5.00E-06	1.00E-04
L4	LR	B6 - B13	ESD+		0.99	10			1.00E-06	9.90E-06
L4	Leak	B6 - B13				10			5.00E-06	5.00E-05
L5	LR	B7 - B9	ESD+		0.99	20			1.00E-06	1.98E-05
L5	Leak	B7 - B9				20			5.00E-06	1.00E-04
L6	LR	B8 - B9	ESD+		0.99	20			1.00E-06	1.98E-05
L6	Leak	B8 - B9				20			5.00E-06	1.00E-04
L7	LR	B9 - B10 / B12	ESD+		0.99	20			1.00E-06	1.98E-05
L7	Leak	B9 - B10 / B12				20			5.00E-06	1.00E-04
L8	LR	B10 - B13	ESD+		0.99	10			1.00E-06	9.90E-06
L8	Leak	B10 - B13				10			5.00E-06	5.00E-05
L9	LR	B12 - B14	ESD+		0.99	10			1.00E-06	9.90E-06
L9	Leak	B12 - B14				10			5.00E-06	5.00E-05
B3	LR	Compressor	ESD-		0.01			1.00E-04		1.00E-06
B4	LR	Verlaadslang	ESD-		0.01			3.51E-03		3.51E-05
B7	LR	Verlaadslang	ESD-		0.01			3.51E-03		3.51E-05
B12	LR	Compressor afleveren	ESD-		0.01			1.00E-04		1.00E-06

Seg. No.	Scenario	Segment	ESD	Aantal	ESD	Leiding- lengte	operationele fractie	Basis frequency	Basis frequency	Finale frequency
				#		m		per jaar	per m per jaar	per jaar
B13	LR	Export leiding	ESD-		0.01	10			5.00E-06	5.00E-07
B14	LR	Afleverzuil trucks/auto's	ESD-		0.01			3.51E-03		3.51E-05
L1	LR	B1 - B2	ESD-		0.01	30			5.00E-06	1.50E-06
L2	LR	B2 - B3	ESD-		0.01	30			5.00E-06	1.50E-06
L3	LR	B3 - B4/B5	ESD-		0.01	20			5.00E-06	1.00E-06
L4	LR	B6 - B13	ESD-		0.01	10			5.00E-06	5.00E-07
L5	LR	B7 - B9	ESD-		0.01	20			5.00E-06	1.00E-06
L6	LR	B8 - B9	ESD-		0.01	20			5.00E-06	1.00E-06
L7	LR	B9 - B10 / B12	ESD-		0.01	20			5.00E-06	1.00E-06
L8	LR	B10 - B13	ESD-		0.01	10			5.00E-06	5.00E-07
L9	LR	B12 - B14	ESD-		0.01	10			5.00E-06	5.00E-07

BIJLAGE C

Input DNV's RIVM hose model

Voor het bepalen van de faal frequenties van de slang in DNV's RIVM hose model is de volgende input aangenomen. Aangezien waterstof geen stof is die in het model is opgenomen is LNG gebruikt.

Transfer operation	
Transfer type	Cargo loading/unloading
Transport mode	Road
Flow direction	Both directions
Fluid type	LNG
Tanker type	Liquefied gas road tanker
Transfer equipment	Hose
Hose type	Composite
Number of hoses	1
Flow type	Gravity
Transfer frequency	1314
Quantity transferred	1
Transfer duration	6.66
Hose diameter	12.7
Passing movements	0.00
Transfer location	Oil terminal
ESD	Average ESD
ERC	No ERC
Time period	Late 2010s
Input checks	
Average flow rate	0.09
Fluid density	21
Average flow velocity	9
Failure cases	Required?
Hose failure	Yes
Tanker equipment failure	No
Tanker tank failure	No
Connection failure	Yes
Valve error	Yes
Back-pressure	Yes
Tanker tank overflow	No
Delivery tank overflow	No
Disconnection error	Yes
Mooring failure	No
Striking	No
Impact	Yes
Drive-off	Yes



Dit resulteert in de onderstaand faalfrequenties:

Fullbore (per jaar)	Large leak (10% FB dia) (per jaar)
5.6E-05	1.8E-04

BIJLAGE D

SMEZ rapport

Equipment Item	Scenario Name	Largest distance to LFL [m]	Largest Distance 1% lethality [m]	Largest distance to 10 kW/m2 [m]	Largest Distance to 0.3 bar [m]
B1. Electrolyser - CR	CR	10	10	40	
B1. Electrolyser - 10 min	10 min		4	4	
B1. Electrolyser - leak	Leak	8	11	11	
B2. Buffervat - CR	CR	15	17	58	
B2. Buffervat - 10 min	10 min	5	7	7	
B2. Buffervat - leak	Leak	8	11	11	
B3. Compressor - LR ESD+	LR		4	4	
B3. Compressor - Leak	Leak		1	1	
B3. Compressor - LR ESD-	LR		4	4	
B4. Verlaadslang - LR ESD+	LR	30	30	22	
B4. Verlaadslang - Leak	Leak		3	3	
B4. Tubetrailer - CR	CR	17	20	64	
B4. Tubetrailer - GA	Leak	51	51	31	
B4. Verlaadslang - LR ESD-	LR	30	30	22	
B4. Tubetrailer - Fireball	Fireball		20	64	
B5. Flessenpakketten - INST	CR	11	12	44	
B5. Flessenpakketten - Leak	Leak	19	19	16	
B7. Verlaadslang - LR ESD+	LR	30	30	22	
B7. Verlaadslang - Leak	Leak		3	3	
B7. Tubetrailer - CR	CR	17	20	64	
B7. Tubetrailer - GA	Leak	51	51	31	
B7. Verlaadslang - LR ESD-	LR	30	30	22	
B7. Tubetrailer - Fireball	Fireball		20	64	
B8. Backup flessenpakket aanvoer - INST	CR	4	4	17	
B8. Backup flessenpakket aanvoer - Leak	Leak	19	19	16	
B11. Bufferflessen pakketten - INST	CR	4	4	17	
B11. Bufferflessen pakketten - Leak	Leak	19	19	16	
B12. Compressor afleveren - LR ESD+	LR	30	30	22	
B12. Compressor afleveren - Leak	Leak		3	3	

Equipment Item	Scenario Name	Largest distance to LFL [m]	Largest Distance 1% lethality [m]	Largest distance to 10 kW/m2 [m]	Largest Distance to 0.3 bar [m]
B12. Compressor afleveren - LR ESD-	LR	30	30	22	
B13. Export leiding - LR ESD+	LR		5	5	
B13. Export leiding - Leak	Leak		1	1	
B13. Export leiding - LR ESD-	LR		5	5	
B14. Afleverzuil trucks/auto's - LR ESD+	LR	5	7	7	
B14. Afleverzuil trucks/auto's - Leak	Leak		5	5	
B14. Afleverzuil trucks/auto's - LR ESD-	LR	5	7	7	
B15. Buffervat - CR	CR	15	17	57	
B15. Buffervat - 10 min	10 min	5	7	6	
B15. Buffervat - leak	Leak	51	51	31	
B16. Buffervat - CR	CR	15	17	57	
B16. Buffervat - 10 min	10 min	5	7	6	
B16. Buffervat - leak	Leak	51	51	31	
L1. B1 - B2 - LR ESD+	LR		3	3	
L1. B1 - B2 - Leak	Leak		1		
L1. B1 - B2 - LR ESD-	LR		3	3	
L2. B2 - B3 - LR ESD+	LR		4	4	
L2. B2 - B3 - Leak	Leak		1	1	
L2. B2 - B3 - LR ESD-	LR		4	4	
L3. B3 - B4/B5 - LR ESD+	LR	41	41	27	
L3. B3 - B4/B5 - Leak	Leak		4	4	
L3. B3 - B4/B5 - LR ESD-	LR	41	41	27	
L4. B6 - B13 - LR ESD+	LR		2	2	
L4. B6 - B13 - Leak	Leak		1		
L4. B6 - B13 - LR ESD-	LR		2	2	
L5. B7 - B9 - LR ESD+	LR	30	30	22	
L5. B7 - B9 - Leak	Leak		3	3	
L5. B7 - B9 - LR ESD-	LR	30	30	22	
L6. B8 - B9 - LR ESD+	LR	10	12	12	
L6. B8 - B9 - Leak	Leak		2	2	
L6. B8 - B9 - LR ESD-	LR	10	12	12	

Equipment Item	Scenario Name	Largest distance to LFL [m]	Largest Distance 1% lethality [m]	Largest distance to 10 kW/m2 [m]	Largest Distance to 0.3 bar [m]
L7. B9 - B10 / B12 - LR ESD+	LR	41	41	27	
L7. B9 - B10 / B12 - Leak	Leak		4	4	
L7. B9 - B10 / B12 - LR ESD-	LR	41	41	27	
L8. B10 - B13 - LR ESD+	LR		7	7	
L8. B10 - B13 - Leak	Leak		1	1	
L8. B10 - B13 - LR ESD-	LR		7	7	
L9. B12 - B14 - LR ESD+	LR	5	7	7	
L9. B12 - B14 - Leak	Leak		5	5	
L9. B12 - B14 - LR ESD-	LR	5	7	7	



About DNV

DNV is the independent expert in risk management and assurance, operating in more than 100 countries. Through its broad experience and deep expertise DNV advances safety and sustainable performance, sets industry benchmarks, and inspires and invents solutions.

Whether assessing a new ship design, optimizing the performance of a wind farm, analyzing sensor data from a gas pipeline or certifying a food company's supply chain, DNV enables its customers and their stakeholders to make critical decisions with confidence.

Driven by its purpose, to safeguard life, property, and the environment, DNV helps tackle the challenges and global transformations facing its customers and the world today and is a trusted voice for many of the world's most successful and forward-thinking companies.

Dit is een publicatie van:
Rijksdienst voor Ondernemend Nederland
Prinses Beatrixlaan 2 | 2595 AL Den Haag
Postbus 93144 | 2509 AC Den Haag
T +31 (0) 88 042 42 42
Contact
www.rvo.nl

Deze publicatie is tot stand gekomen in opdracht van het ministerie van
Klimaat en Groene Groei.

© Rijksdienst voor Ondernemend Nederland | februari 2026
Publicatienummer: RVO-027-2026/RP-DUZA

De Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO) stimuleert duurzaam,
agrarisch, innovatief en internationaal ondernemen. Met subsidies, het
vinden van zakenpartners, kennis en het voldoen aan wet- en regelgeving.
RVO werkt in opdracht van ministeries en de Europese Unie.

RVO is een onderdeel van het ministerie van Economische Zaken.