



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

# De kans op **verladingsincidenten** bij **bevoorrading van** **LPG-tankstations**

Een analyse voor de actualisatie van het  
Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid



## **De kans op verladingsincidenten bij bevoorrading van LPG-tankstations**

Een analyse voor de actualisatie van het Rekenvoorschrift  
omgevingsveiligheid

RIVM-briefrapport 2025-0160

## Colofon

© RIVM 2026

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

DOI 10.21945/RIVM-2025-0160

M. van der Linden (auteur), RIVM  
E.S. Kooi (auteur), RIVM  
P.A.M. Uijt de Haag (auteur), RIVM

### Contact:

Marte van der Linden  
Milieu en Veiligheid, Centrum Veiligheid  
omgevingsveiligheid@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat in het kader van het project M/260119/25/BI.

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
Nederland

[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

## Publiekssamenvatting

### **De kans op verladingsincidenten bij bevoorrading van LPG-tankstations**

Een analyse voor de actualisatie van het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid

Bij tankstations met LPG kunnen incidenten gebeuren waarbij LPG vrijkomt en brand ontstaat, bijvoorbeeld als de voorraad LPG wordt aangevuld. Voor de veiligheid van omwonenden moet er daarom genoeg afstand zijn tussen een LPG-tankstation en woningen in de buurt. Hoe groot deze afstand minimaal moet zijn, hangt onder meer af van het aantal keren per jaar dat de LPG-tankauto de voorraad bijvult. Want hoe vaker de tankauto aanwezig is op het tankstation, hoe groter de kans op een incident.

Een mogelijk incident is dat de slang waarmee het reservoir wordt gevuld afbreekt, scheurt of lekt. Ook kunnen er door verschillende oorzaken lekkages vanuit de tankauto ontstaan. In een extreem geval barst de tankauto en komt de hele inhoud vrij.

Om de afstanden tussen het tankstation en omwonenden te bepalen, moet bekend zijn welke incidenten (scenario's) kunnen gebeuren en hoe groot de kans daarop is (faalkans). Deze scenario's en faalkansen staan in een wettelijk verplicht rekenvoorschrift. Het RIVM onderzocht of de kansen op incidenten met de slang in het rekenvoorschrift nog aansluiten bij de praktijk.

De kans op een breuk van de slang blijkt niet aantoonbaar te groot of te klein te zijn. Het RIVM stelt daarom voor om deze kans niet te veranderen. De kans op een lek in de slang wordt in het rekenvoorschrift te groot ingeschat. Het RIVM stelt hiervoor een nieuwe, lagere, waarde voor.

Uit eerder onderzoek van het RIVM bleek dat de berekende afstanden voor een aantal LPG-tankstations groter zijn dan de afstanden in de regelgeving. Maar de afstanden hangen ook af van de veiligheidsmaatregelen die op het tankstation worden genomen. Als de tankauto daar genoeg kan worden beschermd tegen botsing en brand in de omgeving, zijn de huidige afstanden nog wel geschikt.

Het RIVM heeft de faalkans berekend in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. Dit ministerie bepaalt de afstanden voor de regelgeving. Gemeenten moeten deze afstanden rond LPG-tankstations aanhouden.

Kernwoorden: LPG, tankstation, verlading, faalkans, faalfrequentie, omgevingsveiligheid, risicoafstand, verlaadslang



## Synopsis

### **The likelihood of transfer incidents when supplying LPG filling stations**

An analysis for the update of the Calculation Guidelines for Environmental Safety

Incidents are possible at LPG filling stations involving the release of LPG and possible fire, for example when the supply of LPG is replenished. To ensure the safety of people living nearby, there must be sufficient distance between LPG filling stations and nearby homes. The minimum distance depends on factors including the number of times each year an LPG road tanker replenishes the supply. This is because the more often a road tanker is present at a filling station, the greater the likelihood of an incident.

An example of a possible incident is the hose being used to fill the reservoir breaking off, rupturing or leaking. Also, there are various causes through which the tanker might leak. In extreme cases, the tanker could burst, releasing all of its contents.

To determine the distances between filling stations and people living nearby, it is important to understand what incidents (scenarios) might occur, along with the likelihood of such incidents (failure probability). These scenarios and failure probabilities are set out in legally required calculation guidelines. RIVM examined whether the likelihood of incidents involving a hose in the calculation guidelines is still in line with practice.

This study revealed that the chance of a ruptured hose is not demonstrably too great or too small. For this reason, RIVM suggests not amending this failure probability. The calculation guidelines are overestimating the probability of a hose leaking. RIVM proposes adopting a new, lower value for this.

Previous research by RIVM showed that calculated distances are larger than distances specified in the regulations, for some LPG filling stations. However, the distances also depend on the safety measures taken at the filling station. If a filling station offers sufficient protection against collisions for tankers and against fire hazards, the current distances will still be appropriate.

RIVM has determined the failure probability on behalf of the Ministry of Infrastructure and Water Management. The Ministry determines the distances stipulated by regulations. Municipalities must apply these distances around LPG filling stations.

Keywords: LPG, filling station, loading, failure probability, failure frequency, environmental safety, risk distance, unloading hose



## Inhoudsopgave

### Samenvatting — 9

<b>1</b>	<b>Inleiding — 11</b>
1.1	Leeswijzer — 12
1.2	Afbakening — 12
<b>2</b>	<b>Systeembeschrijving — 13</b>
2.1	Kenmerken van de verlading — 13
2.2	Begrenzing van het systeem — 13
<b>3</b>	<b>Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid — 15</b>
3.1	Scenario's en faalfrequenties — 15
3.2	Voorgeschreven afstanden — 16
3.3	Gevoeligheidsanalyse — 17
<b>4</b>	<b>ASC-model voor faalkansen verlading LPG van tankauto's — 23</b>
4.1	Inleiding — 23
4.2	Scope van het ASC-model voor LPG — 24
4.3	Gegevens voor het ASC-model voor de verlading van LPG — 24
4.3.1	Selectie databases voor incidenten en verlading — 25
4.3.2	Incidentgegevens — 25
4.3.3	Activiteitsgegevens — 28
4.4	Faalkansen voor de referentiepopulatie — 30
4.4.1	Faalkans per LPG-verlading — 30
4.4.2	Onderverdeling naar lek en breuk — 31
4.4.3	Faalkans per faaloorzaak — 31
4.4.4	Overschrijdingskans per uitstroomhoeveelheid — 31
4.5	Faalkansen voor <i>user defined cases</i> — 32
4.5.1	Reported Leak model — 35
4.5.2	Outflow model — 36
4.6	Toepassing van ASC-model voor Nederlandse situatie — 38
4.6.1	Kenmerken van de verlading van LPG in Nederland — 38
4.6.2	Modificatiefactoren — 39
4.6.3	Resultaten — 40
<b>5</b>	<b>RIVM-analyse LPG incidenten in PHMSA-database — 45</b>
5.1	Inleiding — 45
5.2	Algemene aanpak — 45
5.3	Nadere selectie — 46
5.4	Analyse van de 42 geselecteerde incidenten — 48
5.5	Vertaling naar QRA scenario's — 53
5.5.1	Uitstroomlocaties — 54
5.5.2	Uitstroomduur en gatgrootte — 54
5.5.3	Faalkansen — 55
<b>6</b>	<b>Discussie en beoordeling — 57</b>
6.1	Vergelijking van de benaderingen — 57
6.2	Vergelijking van de resultaten — 57
6.3	Onzekerheden — 58
6.3.1	Onzekerheid in de activiteitsgegevens — 58

- 6.3.2 Onzekerheid in de incidentgegevens — 59
- 6.3.3 Onzekerheid in de verdelingen — 59
- 6.3.4 Onzekerheid in de vertaling naar de Nederlandse situatie — 59
- 6.4 Beoordeling van de verschillende benaderingen — 59
  - 6.4.1 Validiteit — 60
  - 6.4.2 Betrouwbaarheid — 61
  - 6.4.3 Samenvattende beoordeling — 62
- 6.5 Afleiding faalkansen — 63
- 6.6 Meenemen van doorstroombegrenzer in de QRA — 64

## **7 Conclusies en aanbevelingen — 65**

### **Dankbetuiging — 69**

### **Literatuur — 71**

### **Bijlage 1 Procedure voor de verlading van LPG bij een LPG-tankstation — 73**

### **Bijlage 2 Toetsingsafstanden en interne veiligheidsafstanden — 77**

### **Bijlage 3 Afstanden tot de PR $10^{-6}$ contour voor verschillende opstelplaatsen van de tankauto — 83**

## Samenvatting

Amber Safety Consulting (ASC) heeft in opdracht van het RIVM een model ontwikkeld voor het afleiden van betrouwbaardere en meer valide faalkansen voor de verlading van gevaarlijke stoffen. Een van de toepassingen van het ASC-model betreft de verlading van LPG. Het ASC-model voor LPG gebruikt recente gegevens, namelijk enerzijds de gegevens uit de PHMSA-database met incidenten bij de verlading van LPG in de Verenigde Staten en anderzijds het aantal verladingen van LPG in de VS op basis van Commodity Flow Surveys in dezelfde periode. Deze gegevens zijn nu beschikbaar voor de periode van 2000 tot en met 2024.

Het RIVM heeft het ASC-model toegepast voor de afleiding van de faalkansen bij de verlading van LPG bij LPG-tankstations in Nederland en beoordeeld op de criteria validiteit en betrouwbaarheid. Hiervoor heeft het RIVM eerst nader onderzocht hoe de verlading van LPG verloopt bij een LPG-tankstation in Nederland en welke beveiligingen aanwezig zijn. Vervolgens zijn met het ASC-model de faalgegevens uit de VS vertaald naar de Nederlandse situatie. Daarnaast heeft het RIVM een aanvullende analyse van de incidenten in de PHMSA-database (2000-2024) uitgevoerd en vertaald naar de faalkansen voor de verlading van LPG bij LPG-tankstations in Nederland. De afleiding van de faalkansen op basis van deze gegevens is betrouwbaarder en meer valide dan de huidige faalkansen. De huidige faalkansen in het Rekensvoorschrift omgevingsveiligheid zijn namelijk gebaseerd op oude, niet goed herleidbare bronnen.

De resultaten van het ASC-model en de RIVM-analyse geven faalkansen voor het breukscenario bij de verlading van LPG bij LPG-tankstations in Nederland die onderling redelijk vergelijkbaar zijn, namelijk  $5,2 \times 10^{-7}$  tot  $1,5 \times 10^{-6}$  per verlading. De kans op een breuk is daarmee een factor drie tot acht hoger dan de huidige kans in het Rekensvoorschrift omgevingsveiligheid. Echter, de inschatting is dat de gebruikte technieken en procedures voor aflevering bij LPG-tankstations in Nederland veiliger zijn dan de gebruikte technieken en procedures voor aflevering aan, deels kleine, bedrijven in de VS. De naar verwachting veiligere technieken en procedures in Nederland kunnen onvoldoende meegenomen worden in de vertaling van de gegevens uit de VS naar de Nederlandse situatie. De afgeleide faalkansen voor het breukscenario worden daarom als een conservatieve bovengrens gezien. Aanbevolen wordt daarom voor de verlading van LPG bij een LPG-tankstation uit te blijven gaan van de waarde van de faalkans in het Rekensvoorschrift omgevingsveiligheid. Wel wordt voorgesteld om de eenheid te veranderen, namelijk  $2 \times 10^{-7}$  per verlading in plaats van  $4 \times 10^{-7}$  per uur. Deze aanpassing in de eenheid van de faalkans heeft geen invloed op de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour.

De resultaten van het ASC-model en de RIVM-analyse geven faalkansen voor het lekscenario die ongeveer een factor twintig lager zijn dan in het Rekensvoorschrift omgevingsveiligheid (nu:  $4 \times 10^{-5}$  per uur, wat overeenkomt met  $2 \times 10^{-5}$  per verlading bij een verladingduur van 30

minuten). Omdat ook deze faalkans als een bovengrens gezien wordt, is de aanbeveling de kans op een lek bij de verlading van LPG te verlagen met een factor twintig tot  $1 \times 10^{-6}$  per verlading. De effecten van het lekscenario reiken echter niet verder dan 10 – 15 meter, zodat een verlaging van de kans op een lek geen invloed heeft op de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour als deze groter is dan 15 m.

Voor de verlading met slangen van LPG en andere tot vloeistof verdichte gassen bij Seveso-bedrijven en opslagen van propaan of propaan is de aanname dat de procedures en beveiligingen vergelijkbaar zijn met het lossen van LPG bij LPG-tankstations. Daarom kunnen de faalkansen voor lek en breuk van LPG-verlaadslangen ook toegepast worden voor verlading bij deze milieubelastende activiteiten.

De afleiding van de faalkansen voor verlading heeft verschillende onzekerheden, zoals de inschatting van het aantal verladingen per jaar, het aantal incidenten, de uitgestroomde hoeveelheid en de vertaling van de praktijk in de VS naar de praktijk in Nederland. De totale onzekerheid in de faalkansen wordt op zeker één orde van grootte geschat, van ondergrens tot bovengrens.

Het RIVM heeft ook een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te bepalen welke scenario's de grootste bijdrage hebben aan de PR  $10^{-6}$  contour. De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de breuk van de verlaadslang en de warme BLEVE ten gevolge van brand in de omgeving de belangrijkste scenario's zijn voor de PR  $10^{-6}$  contour tot een doorzet van ongeveer  $1.000 \text{ m}^3$  per jaar. Bij hogere doorzetten wordt de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour voornamelijk bepaald door de warme BLEVE ten gevolge van brand in de omgeving met een kleinere bijdrage van de BLEVE ten gevolge van externe impact. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat de afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour verkleind kan worden door met name de kans op een warme BLEVE te verkleinen.

De afstanden tot het plaatsgebonden risico ( $10^{-6}$  per jaar) in het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) gaan ten onrechte uit van het gebruik van een hittewerende coating. De opnieuw berekende afstanden zijn groter dan de afstanden in het Bal voor doorzetten vanaf  $900 \text{ m}^3/\text{jaar}$ . Wel zijn de afstanden in het Bal gebaseerd op de hoogste kans op een BLEVE door brand in de omgeving in combinatie met de hoogste kans op een BLEVE door externe impact. Het is mogelijk meer differentiatie aan te brengen door bijvoorbeeld meerdere afstanden per doorzet op te nemen in het Bal waarbij rekening gehouden wordt met de (veiligheid van de) opstelplaats van de tankauto en de invloed daarvan op de kans van een BLEVE.

Het ASC-model biedt de mogelijkheid kansen af te leiden voor andere typen verlading, zoals de verlading van vloeistoffen naar en van tankauto's en ketelwagens bij Seveso-inrichtingen en scheepsverladings. Omdat de huidige faalkansen hiervoor in het Rekensvoorschrift omgevingsveiligheid niet actueel, niet transparant en niet herleidbaar zijn, wordt aanbevolen te onderzoeken of met het ASC-model hiervoor faalkansen kunnen worden afgeleid die betrouwbaarder en meer valide zijn. De kennis uit het hier beschreven onderzoek geeft daarvoor al een goede basis.

## 1 Inleiding

Het RIVM beheert de rekenvoorschriften voor het berekenen van het aandachtsgebied en het plaatsgebonden risico rond milieubelastende activiteiten met gevaarlijke stoffen. Eén van de milieubelastende activiteiten is het tanken van LPG, hierna een LPG-tankstation genoemd (Bkl, Besluit kwaliteit leefomgeving, 2025).

De afstand van het plaatsgebonden risico (de PR  $10^{-6}$  contour) is voor een LPG-tankstation gegeven in het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal), artikel 4.472c, eerste lid (Besluit activiteiten leefomgeving, 2025). Deze afstand is berekend op basis van de aanwezigheid van twee risicoreducerende maatregelen, namelijk een LPG-tankauto die voorzien is van een hittewerende coating en het gebruik van een verbeterde verlaadslang (Van der Linden en Stam, 2022). Echter, de aanwezigheid van deze risicoreducerende maatregelen kan vanwege beperkingen in de juridische mogelijkheden niet geborgd worden in de omgevingsvergunning van een LPG-tankstation (Raad van State, 2022). Daarom heeft het RIVM op verzoek van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat de afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour opnieuw berekend zonder deze twee risicoreducerende maatregelen (Van der Linden en Stam, 2022). Het weglaten van deze risicoreducerende maatregelen leidt ertoe dat de afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour groter wordt voor alle doorzetten. Bij lage doorzet (kleiner dan  $1.000 \text{ m}^3$  per jaar) neemt de afstand vooral toe indien de verbeterde verlaadslang niet is meegenomen in de berekening. Bij hoge doorzet neemt de afstand vooral toe door het niet meenemen van de hittewerende coating.

De afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour wordt mede bepaald door de kans dat er bij het verladen een incident gebeurt waarbij LPG onbedoeld uitstroomt. Het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid geeft standaard uitstroomscenario's en kansen voor het onbedoeld vrijkomen van LPG bij de verlading (RIVM, 2025a). Deze kansen zijn decennia geleden afgeleid van data die niet direct van toepassing zijn op het verladen van LPG bij een LPG-tankstation (zie bijvoorbeeld DNV, 2015). In opdracht van het RIVM heeft daarom eerst DNV en daarna ASC onderzoek gedaan naar de actualisatie van faalkansen voor de verlading van gevaarlijke stoffen, waaronder de verlading van LPG. Het onderzoek heeft beschikbare databases met incidenten en verladinggegevens onderzocht op bruikbaarheid en vervolgens de meest bruikbare data geanalyseerd. Dit heeft geleid tot een nieuw model voor het afleiden van scenario's en faalkansen voor verlading (Spouge en Wolting, 2023, Spouge, 2024).

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft het RIVM gevraagd te onderzoeken of het mogelijk is met dit nieuwe model actuelere en beter onderbouwde faalkansen af te leiden voor het verladen van LPG bij LPG-tankstations, en hiermee nieuwe afstanden tot de PR  $10^{-6}$  contour af te leiden.

## **1.1 Leeswijzer**

Dit rapport beschrijft de resultaten van het onderzoek. Hoofdstuk 2 beschrijft de praktijk van de verlading van LPG bij een LPG-tankstation en de begrenzing van het systeem. Hoofdstuk 3 gaat in op de standaard scenario's en faalkansen die voorgeschreven zijn in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid (RIVM, 2025a). Dit hoofdstuk beschrijft ook de daarmee berekende afstanden tot de PR  $10^{-6}$  contour en de gevoeligheid van deze afstanden voor de faalkansen. In de volgende hoofdstukken zijn de faalkansen voor verlading van LPG bij een LPG-tankstation in Nederland op drie verschillende manieren afgeleid, namelijk met twee verschillende versies van het ASC-model en de RIVM-analyse van de incidenten in de gebruikte database. De twee versies van het ASC-model voor het afleiden van scenario's en faalkansen voor de verlading van gevaarlijke stoffen zijn beschreven in hoofdstuk 4 voor de verlading van LPG van tankauto's. Ook is in dit hoofdstuk de toepassing van het model voor de Nederlandse situatie beschreven. Het RIVM heeft ook een eigen analyse gedaan van de brondata van het ASC-model en daaruit faalkansen afgeleid voor de verlading van LPG. Deze analyse is beschreven in hoofdstuk 5. Hoofdstuk 6 vergelijkt de resultaten van de drie verschillende benaderingen en beoordeelt de bruikbaarheid hiervan in de risicoanalyse. De conclusies en aanbevelingen zijn ten slotte beschreven in hoofdstuk 7.

## **1.2 Afbakening**

Het model van ASC voor het afleiden van scenario's en faalkansen voor verlading is van toepassing op verschillende gevaarlijke stoffen (waaronder LNG, LPG en benzine) en van of naar verschillende transportmiddelen (schip, tankauto, ketelwagen). In dit rapport hebben we alleen de toepassing van het model voor de verlading bij LPG-tankstations onderzocht. De conclusies over de bruikbaarheid van het model zijn dan ook alleen geldig voor deze en vergelijkbare toepassingen, namelijk de verlading met slangen van tot vloeistof verdichte gassen bij Seveso-bedrijven en opslagen van propaan of propeen. Andere onderdelen van de risicoberekening, zoals de faalkansen van de tankauto zelf en de uitstroom- en effectmodellering, zijn niet onderzocht.

## 2       Systeembeschrijving

### 2.1       **Kenmerken van de verlading**

De verlading van een tankauto naar een opslagtank bij een LPG-tankstation vindt plaats met een flexibele slang, de 'verlaadslang'. De verlaadslang is gemonteerd op een haspel op de tankauto en wordt verbonden met het vulpunt. Het vulpunt is met vaste leidingen verbonden met de (ondergrondse) opslagtank van het LPG-tankstation. De tankauto bevat een pomp, een meetbuis en korte stukken leiding.

De risico's van een LPG-tankstation voor de omgeving worden bepaald door de bevoorrading van het tankstation. De procedure voor het vullen van een LPG-reservoir en de aanwezige beveiligingen zijn van invloed op het risico. De procedure is beschreven in bijlage H van PGS16:2021 (PGS-richtlijn 16, 2021). Deze procedure is besproken in een overleg met enkele vertegenwoordigers van de branche. In het overleg zijn ook de aanwezige beveiligingen en enkele typische kenmerken besproken. De procedure en de kenmerken zijn beschreven in Bijlage 1. De voor de berekening van de risico's belangrijkste kenmerken zijn:

1. De diameter van de verlaadslang is typisch 1½" tot 2", dat wil zeggen ongeveer 38–50 mm.
2. Het verladersdebiet is typisch 400 tot 800 liter/minuut.
3. De hoeveelheid per verlading is typisch 10.000 tot 15.000 liter (afhankelijk van tankgrootte).
4. De tijdsduur van de verlading is typisch 30 tot 45 minuten.
5. De tijdsduur van de aanwezigheid van de tankauto is typisch 45 tot 60 minuten (inclusief voorbereiding en afronding).
6. Eén tankauto bevoorraadt gemiddeld ongeveer drie LPG-tankstations.
7. De doorzet van een tankstation kan sterk variëren van 20 tot 1.500 m<sup>3</sup> per jaar.

*Opmerking:*

Bij een verladersdebiet van 400 liter per minuut is de tijdsduur van de verlading 25 minuten (voor 10.000 liter) dan wel 37,5 minuten (voor 15.000 liter). Bij een verladersdebiet van 800 liter per minuut is dit respectievelijk 12,5 en 19 minuten. De typische waarden voor verladersdebiet, hoeveelheid en tijdsduur lijken daarmee niet geheel consistent. De laagste waarde van het verladersdebiet, 400 liter per minuut, geeft de beste overeenstemming met de typische tijdsduur van 30 tot 45 minuten van een verlading.

### 2.2       **Begrenzing van het systeem**

Tijdens de verlading kan een onregelmatigheid optreden waardoor LPG uitstroomt en een wolkbrand, fakkelbrand, vuurbal en/of explosie kan optreden.

De volgende uitstromingen van LPG behoren tot het verladingsproces:

- LPG komt vrij vanuit de verlaadslang of verbindingen met de verlaadslang; dit kan leiden tot domino-effecten zoals een BLEVE<sup>1</sup> van de tankauto;
- LPG komt vrij uit het noodventiel of uit (onbedoelde) openingen in het systeem (vaste leidingen en opslagtank) van het LPG-tankstation, mits de uitstroming verband houdt met het verlaadproces;
- LPG komt vrij uit openingen, leidingen of de pomp van de tankauto, mits de uitstroming verband houdt met het verlaadproces;

De volgende uitstromingen van LPG behoren niet tot het verladingsproces:

- LPG komt vrij uit het systeem (vaste leidingen en opslagtank) van het LPG-tankstation zonder relatie met het verlaadproces: dit zijn aparte scenario's voor het intrinsiek falen van leidingen en opslagtanks;
- LPG komt vrij uit de omhulling van de tankauto: dit zijn aparte scenario's voor het intrinsiek falen van de tankauto;
- Een BLEVE van een LPG-tankauto kan optreden door aanrijding (externe impact): dit is een apart scenario voor de aanwezigheid van de LPG-tankauto;
- Een BLEVE van een LPG-tankauto kan optreden door brand in de omgeving: dit is een apart scenario voor de aanwezigheid van de LPG-tankauto.

In dit onderzoek naar nieuwe faalkansen beperken we ons tot de uitstromingen van LPG die behoren tot het verladingsproces.

<sup>1</sup> Een BLEVE (Boling Liquid Expanding Vapour Explosion) treedt op als de tank met LPG bezwijkt doordat de interne druk te hoog wordt voor de omhulling. De inhoud komt in één keer vrij en dit leidt bij directe ontsteking tot een vuurbal.

## 3 Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid

### 3.1 Scenario's en faalfrequenties

Het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid module II, versie januari 2025, geeft de scenario's en faalfrequenties die worden meegenomen in een kwantitatieve risicoanalyse van een LPG-tankstation (RIVM, 2025a). De vaste afstanden in het Besluit activiteiten leefomgeving zijn gebaseerd op deze scenario's (Besluit activiteiten leefomgeving, 2025).

Naast de standaard scenario's voor het intrinsiek falen van de tankauto, opslagvaten en vaste leidingen worden de scenario's in Tabel 3.1 meegenomen in de kwantitatieve risicoanalyse.

Tabel 3.1 Scenario's in de risicoanalyse van een LPG-tankstation in aanvulling op de scenario's voor opslagvaten en vaste leidingen (RIVM, 2025a).

Scenario	Minimum faalfrequentie [per uur]	Maximum faalfrequentie [per uur]
T.1 instantaan falen tankauto	$5,7 \times 10^{-11}$	$5,7 \times 10^{-11}$
T.2 lek tankauto	$5,7 \times 10^{-11}$	$5,7 \times 10^{-11}$
L.1 breuk verlaadslang	$4 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-7}$
L.2 lek verlaadslang	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-5}$
B.1 BLEVE tankauto door brand tijdens verlading	$2,9 \times 10^{-11}$	$5,8 \times 10^{-10}$
B.2, B.3 en B.4 BLEVE tankauto door brand in omgeving	$9 \times 10^{-11}$	$1,8 \times 10^{-8}$
B.5, B.6 en B.7 BLEVE tankauto door externe beschadiging	$5 \times 10^{-11}$	$4,6 \times 10^{-9}$

Voor de scenario's B.1 – B.7 zijn een minimum en maximum faalfrequentie gegeven:

- De maximum frequentie van een BLEVE van de tankauto door brand tijdens verlading (B.1) is voor een LPG-tankauto zonder hittewerende coating. De minimum frequentie is een factor 20 lager en geldt voor een LPG-tankauto met hittewerende coating.
- De maximum frequentie van een BLEVE van de tankauto door brand in de omgeving (B.2, B.3 en B.4) is voor een LPG-tankauto zonder hittewerende coating binnen de toetsingsafstanden van mogelijke brandlocaties (zie Bijlage 2). Als de tankauto buiten de toetsingsafstanden staat is de frequentie een factor 10 lager; voor een LPG-tankauto met hittewerende coating is de faalfrequentie nog een factor 20 lager (minimum frequentie). De frequentie wordt (gewogen) verdeeld over drie verschillende vulgraden (33%, 67% en 100%)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> De verdeling in verschillende vulgraden is niet toegepast voor het intrinsiek falen van de tankauto (scenario's T.1 en T.2) en brand tijdens verlading (scenario B.1), hoewel het dezelfde tankauto betreft. Dit is niet van invloed op de resultaten omdat de bijdrage van deze scenario's aan het risico klein is.

- De maximum frequentie van een BLEVE van de tankauto door externe beschadiging (B.5, B.6 en B.7) is voor een opstelplaats zonder beperkingen. Voor een geïsoleerde opstelplaats is de faalfrequentie een factor 92 lager (minimum). De frequentie wordt evenredig verdeeld over drie verschillende vulgraden (33%, 67% en 100%).

De generieke faalfrequentie van breuk van een verlaadslang (L.1) is  $4 \times 10^{-6}$  per uur (RIVM, 2025c). Met deze faalfrequentie is de breuk van de verlaadslang bepalend voor het plaatsgebonden risico tot een afstand van circa 50 m. TNO heeft daarom in opdracht van de Vereniging Vloeibaar Gas in 2005 een systeemanalyse gedaan van het losproces en onderzoek gedaan naar de faalfrequentie van de verlaadslang (Logtenberg, 2006). De conclusie was dat de bronnen van de generieke faalfrequenties verouderd zijn, niet traceerbaar en niet specifiek voor LPG-verlaadslangen. TNO heeft vervolgens op basis van statistiek de faalfrequentie van het falen van de vulslang bij de LPG-afleverzuil afgeleid. Uit een vergelijking van de eigenschappen en gebruik van de vulslang en de verlaadslang concludeert TNO dat de faalfrequentie van de vulslang een conservatieve waarde is voor de faalfrequentie van de verlaadslang. Hieruit volgt dat de faalfrequentie van de verlaadslang beter is dan  $1 \times 10^{-9}$  per lossing, en de generieke faalfrequentie tenminste een factor 10 te hoog is.

Het RIVM heeft het rapport van TNO beoordeeld (RIVM, 2006). Het RIVM concludeert dat de LPG verlaad- en vulslangen in kwalitatieve zin met elkaar vergelijkbaar zijn en dat de faalgegevens van de vulslangen van de afleverzuilen gebruikt kunnen worden om de faalfrequentie van verlaadslangen te bepalen. Echter, het RIVM vond de verwerking van de statistiek van het falen van een vulslang tot een faalfrequentie onjuist en heeft deze aangepast. De conclusie van het RIVM is dat de faalfrequentie van breuk van de vulslang een factor 70 lager is dan de generieke faalfrequentie. Echter, omdat uitvoeringsvorm en gebruiksomstandigheden van verlaad- en vulslangen verschillend zijn en die verschillen moeilijk te kwantificeren zijn, was de aanbeveling om veiligheidshalve voor de verlaadslang een hogere faalkans te hanteren dan voor de vulslang: niet een factor 70 lager, maar een factor 10 lager. De faalfrequentie voor breuk van de verlaadslang (L.1) in Tabel 3.1 en het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid is daarmee een factor 10 lager dan de standaard faalfrequentie (RIVM, 2025a). Sindsdien is een LPG-verlaadslang met een factor 10 lagere breukfrequentie omschreven als de 'verbeterde' verlaadslang.

De waarden voor de BLEVE frequentie ten gevolge van brand, brand in de omgeving en externe impact zijn overgenomen uit een rapport uit 1985 (RIVM, 2025b, Kok en Pietersen, 1985).

### 3.2 Voorgeschreven afstanden

Het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) geeft vaste afstanden voor een LPG-tankstation. Deze vaste afstanden zijn gebaseerd op een tankauto met hittewerende coating en een verbeterde verlaadslang. Daarnaast is gerekend met de maximale faalfrequenties voor de scenario's BLEVE door brand in de omgeving en BLEVE door externe

beschadiging (Van der Linden en Stam, 2022), (zie Bijlage 2). De afstanden vanaf het vulpunt zijn gegeven in Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Voorgescreven afstanden in het Besluit activiteiten leefomgeving.

Doorzet per jaar	Afstand vanaf vulpunt
Minder dan 500 m <sup>3</sup>	25 m
Meer dan 500 m <sup>3</sup> , maar minder dan 1.000 m <sup>3</sup>	35 m
Meer dan 1.000 m <sup>3</sup>	40 m

### 3.3 Gevoeligheidsanalyse

Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om te bepalen wat de invloed is op de ligging van de PR 10<sup>-6</sup> contour<sup>3</sup> van (1) de faalfrequentie van de verlaadslang en (2) de ligging van het vulpunt ten opzichte van de toetsingsafstanden voor brand in de omgeving en de opstelplaats van de tankauto voor externe beschadiging<sup>4</sup>. Voor één situatie is ook gekeken naar de risicobijdrage van de verschillende scenario's bij verschillende doorzetten.

Een overzicht van de doorgerekende situaties, de scenario's en faalfrequenties is gegeven in Tabel 3.3, de resultaten voor de doorgerekende situaties in Tabel 3.4. De berekeningen zijn uitgevoerd met Safeti-NL versie 9.2 (DNV, 2025). De faalfrequenties in Tabel 3.3 zijn gegeven in kans per jaar voor 1.000 m<sup>3</sup>/jaar doorzet (70 verladings van 0,5 uur). In Figuur 3.1 is het plaatsgebonden risico voor de default situatie uit Tabel 3.3 weergegeven met een doorzet van 500, 1.000 en 1.500 m<sup>3</sup> per jaar als functie van afstand, met onderscheid naar de verschillende scenario's.

<sup>3</sup> De ligging van het aandachtsgebied is niet afhankelijk van de twee genoemde factoren.

<sup>4</sup> Een gevoeligheidsanalyse van de hittewerende coating van de tankauto is beschreven in RIVM-briefrapport 2021-0184 (Van der Linden en Stam, 2022).

Tabel 3.3 Faalfrequentie (per jaar) voor de verladingsscenario's van de tankauto voor een doorzet van 1.000 m<sup>3</sup>/jaar.

	Default	Variante 1	Variante 2
Verlaadslang	Verbeterd (faalkans breuk 10x lager dan generiek)	'Perfect' (geen breuk, lek, of BLEVE bij verlading)	Verbeterd (faalkans breuk 10x lager dan generiek)
kans brand omgeving	max	max	min
kans externe impact	max	max	min
<b>Scenario's</b>			
T.1 Tankauto – instantaan falen	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$
T.2 Tankauto - lek	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-9}$
L.1 Breuk slang	$1,4 \times 10^{-5}$	0	$1,4 \times 10^{-5}$
L.2 Lek slang	$1,4 \times 10^{-3}$	0	$1,4 \times 10^{-3}$
B.1 BLEVE tijdens verlading	$2,0 \times 10^{-8}$	0	$2,0 \times 10^{-8}$
B.2, B.3 en B.4 BLEVE door brand in omgeving <sup>5</sup>	$6,4 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-7}$	$6,4 \times 10^{-8}$
B.5, B.6, B.7 BLEVE door beschadiging <sup>6</sup>	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-9}$

#### Toelichting bij Tabel 3.3

De default situatie komt overeen met situatie III zoals beschreven in (Van der Linden en Stam, 2022). Hierbij is uitgegaan van de huidige faalkansen voor de verbeterde verlaadslang, zonder hittewerende coating op de tankauto. Voor de gevoeligheidsanalyse is deze situatie vergeleken met twee varianten: variant 1 waarbij een (hypothetische) perfecte verlaadslang wordt gebruikt die niet kan breken of lekken (en waarbij ook geen BLEVE tijdens verlading kan optreden) en variant 2 waar de minimale waarde wordt gebruikt voor de kans op een BLEVE door brand in de omgeving of door externe impact.

De belangrijkste conclusies van deze gevoeligheidsanalyse zijn:

- Voor een doorzet vanaf 1.300 m<sup>3</sup> per jaar wordt de PR 10<sup>-6</sup> contour bepaald door een BLEVE ten gevolge van een brand in de omgeving of externe impact. Dit geldt voor de situatie dat de tankauto is opgesteld binnen de toetsingsafstanden en niet beschermd is tegen aanrijden.
- Voor een doorzet minder dan 500 m<sup>3</sup> per jaar is de berekende afstand vanaf het vulpunt kleiner dan de voorgeschreven 25 m, ook zonder hittewerende coating.
- Voor een doorzet tussen 500 en 800 m<sup>3</sup> is de afstand vanaf het vulpunt kleiner of gelijk aan de voorgeschreven 35 m, ook zonder hittewerende coating.

<sup>5</sup> De in de tabel gegeven faalfrequentie is de som van de faalfrequenties voor scenario's B.2, B.3, en B.4 voor verschillende vulgraden van de tankauto. De faalfrequentie wordt verdeeld over de drie scenario's op de volgende manier: 0,14 voor B.2, 0,33 voor B.3 en 0,53 voor B.4 (respectievelijk vulgraad 100%, 67% en 33%). De verdeling is niet evenredig omdat de kans op een BLEVE afhangt van het oppervlak van de tank dat in contact is met de gasfase, en dus afhangt van de vulgraad.

<sup>6</sup> De in de tabel gegeven faalfrequentie is de som van de faalfrequenties voor scenario's B.5, B.6 en B.7 voor verschillende vulgraden van de tankauto. De faalfrequentie wordt evenredig verdeeld over de drie scenario's (respectievelijk vulgraad 100%, 67% en 33%).

- Voor een doorzet groter dan 1.000 m<sup>3</sup> is de afstand vanaf het vulpunt kleiner of gelijk aan de voorgeschreven 40 m als de tankauto op een veilige plaats is opgesteld, ook zonder hittewerende coating.
- Op afstanden groter dan 40 m draagt vooral het scenario B.2 (warme BLEVE t.g.v. brand in de omgeving) bij aan het totale risico. Bij een doorzet van 1.500 m<sup>3</sup> per jaar is de afstand tot de PR 10<sup>-6</sup> contour zonder veilige opstelplaats 86 m. Deze afstand wordt kleiner als de kans op het scenario B.2 verkleind wordt, en in mindere mate als de kans op scenario B.3 (externe impact) verkleind wordt.
- Op kortere afstand is ook het scenario L.1 (breuk verlaadslang met falen doorstroombegrenzer) belangrijk. Bij een doorzet van 1.000 m<sup>3</sup> per jaar is de afstand tot de PR 10<sup>-6</sup> contour zonder veilige opstelplaats 37 m. Deze afstand wordt kleiner als de kans van een van de scenario's L.1 of B.2 (of allebei) verkleind wordt.

*Opmerking:*

De berekeningen zijn uitgevoerd voor een verlading met een tijdsduur van een half uur. Verder is aangenomen dat de tankauto per verlading 45 minuten aanwezig is. Uit de procedure voor het lossen van de tankauto blijkt namelijk dat de tankauto ongeveer een kwartier extra aanwezig is voor voorbereidende en afrondende werkzaamheden.

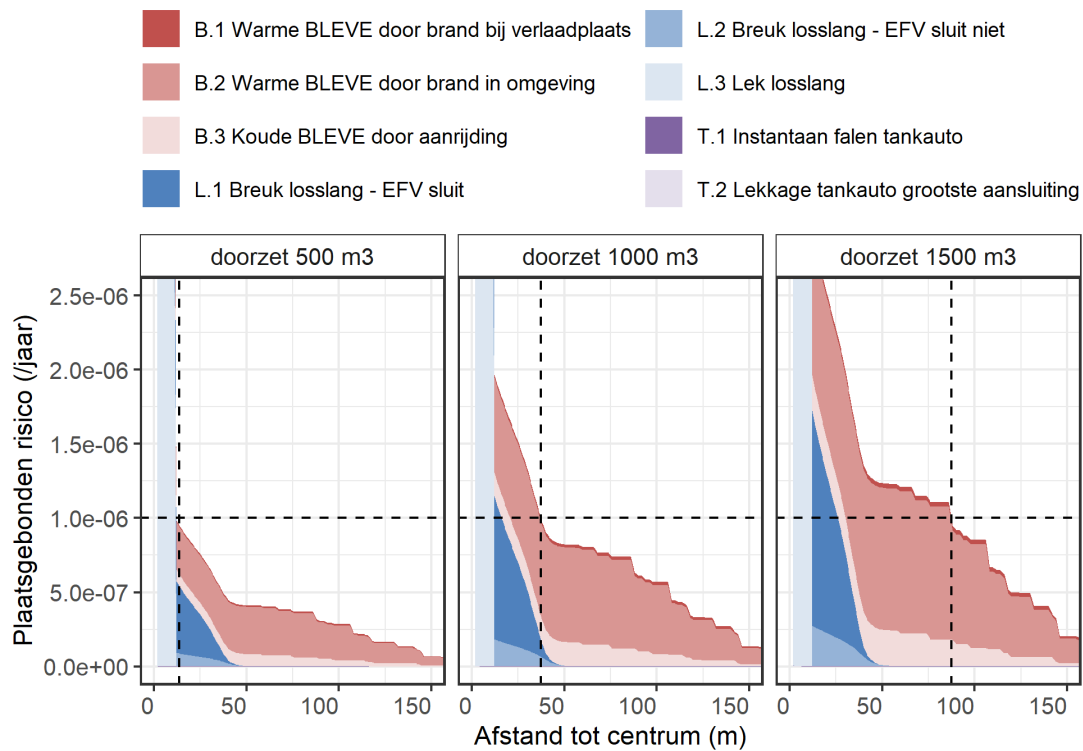
De kans op een BLEVE door brand in de omgeving en door externe impact is oorspronkelijk afgeleid op basis van een verblijfsduur van 45 minuten, en gerapporteerd per 100 verladingen (Kok en Pietersen, 1985). In latere publicaties (Ham, 2001 en RIVM, 2014) werd een verblijfsduur van 30 minuten verondersteld. Voor de BLEVE-kansen werden nog steeds de oorspronkelijke kansen per verlading van Kok en Pietersen gebruikt. In het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid (RIVM, 2025a) zijn deze kansen per verlading vertaald naar faalfrequenties per uur. Bij die vertaling is toen uitgegaan van een verblijfsduur van 30 minuten, terwijl dat in de oorspronkelijke bepaling 45 minuten was. Door die fout zijn de faalfrequenties per uur in (RIVM, 2025a) een factor 1,5 te hoog. De fout werkte *niet* door in de risicoberekeningen omdat voor de verblijftijd vervolgens ook 30 minuten werd aangenomen (de ene fout werd ongedaan gemaakt door de andere fout). Op basis van het huidige onderzoek wordt aanbevolen om de faalkansen voor de genoemde scenario's weer per verlading te definiëren, dus niet meer per uur. Aanbevolen wordt hoofdstuk 9 van Module II van het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid hierop aan te passen.

Tabel 3.4 Afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour voor een doorzet van 250-2.000 m<sup>3</sup>/jaar.

	<b>Default</b>	<b>Variant 1</b>	<b>Variant 2</b>
Verlaadslang	Verbeterd (faalkans breuk 10x lager dan generiek)	'Perfect' (geen breuk, lek, of BLEVE bij verlading)	Verbeterd (faalkans breuk 10x lager dan generiek)
Kans brand omgeving	max	max	min
Kans externe impact	max	max	min
<b>Doorzet (m<sup>3</sup>/jaar)</b>			
250	12	n.v.t.	12
500	18	n.v.t.	13
600	26	n.v.t.	13
700	29	n.v.t.	13
800	34	n.v.t.	18
900	36	n.v.t.	21
1.000	37	n.v.t.	26
1.100	38	n.v.t.	26
1.200	45	n.v.t.	27
1.300	69	68	28
1.400	86	85	29
1.500	86	86	30
2.000	106	106	34

Bijlage 3 geeft voor verschillende situaties van de opstelplaats van de tankauto de afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour.

Figuur 3.1 Bijdragen van scenario's aan het totale plaatsgebonden risico voor de default situatie (verbeterde verlaadslang en maximale kans op BLEVE door brand in de omgeving of externe impact) met een doorzet van 500, 1.000 en 1.500 m<sup>3</sup> per jaar, als functie van afstand.





## 4 ASC-model voor faalkansen verlading LPG van tankauto's

### 4.1 Inleiding

DNV en Amber Safety Consulting (ASC) hebben in opdracht van het RIVM een model ontwikkeld voor het afleiden van faalkansen voor verlading<sup>7</sup> (Spouge, 2024). Het model, hierna het ASC-model genoemd, is ontwikkeld voor verschillende typen verlading, zoals scheepsverlading en verlading van en naar tankauto's en ketelwagens. Ook is het model ontwikkeld voor de verlading van verschillende stoffen, zoals diesel, benzine, LPG en LNG.

Het ASC-model is gebaseerd op enerzijds ongevalsgegevens ('teller' data) en anderzijds verladingsgegevens ('noemer' data). De ongevalsgegevens betreffen de aantallen incidenten, maar ook hun karakteristieken, zoals oorzaak en uitstroomhoeveelheid. ASC heeft hiervoor gegevens verzameld over alle incidenten en niet alleen over grote incidenten met gevolgen buiten de inrichting (EV-relevante incidenten). Het model maakt het mogelijk faalkansen te berekenen, maar ook om die faalkansen uit te splitsen naar achterliggende factoren (voor zover beschikbaar in de incidentrapportages).

Het ASC-model geeft ten eerste inzicht in de faalkansen voor de 'referentiepopulatie'. De referentiepopulatie betreft de groep waarvoor ongevalsgegevens en verladingsgegevens verzameld zijn. Voor tankautoverlading van LPG gaat het om verladingen in de Verenigde Staten. ASC heeft gegevens verzameld voor de periode 2000-2016, dit is door het RIVM verder uitgebreid met gegevens tot 2024 (zie voor meer informatie paragraaf 4.3). De gemiddelde faalkans voor de referentiepopulatie is dan de verhouding van het aantal incidenten in die referentiepopulatie en het totale aantal verladingen binnen dezelfde groep. In het bijzonder hangt de gemiddelde faalkans af van de binnen de groep gangbare instrumentatie en technologie.

Ten tweede kan het ASC-model gebruikt worden om faalkansen te berekenen voor andere populaties, zoals voor een Nederlands tankstation dat wellicht andere verlaadslangen en/of een ander *emergency shut-down* (ESD)-systeem gebruikt dan wat gangbaar was binnen de referentiepopulatie. Ook het effect van een *emergency release coupling* (ERC) kan worden meegenomen. Voor de vertaling van de referentiepopulatie naar 'user defined cases' bevat het model verschillende modificatiefactoren en andere databewerkingen. Het ASC-model bevat voor de vertaling naar *user defined cases* twee deelmodellen (varianten): het *Reported Leak model* (zie paragraaf 4.5.1) en het *Outflow model* (zie paragraaf 4.5.2).

Uiteindelijk heeft ASC het model opgeleverd in de vorm van twee gelinkte Excel-spreadsheets (één voor het verwerken van de

<sup>7</sup> Het onderzoek is in 3 fasen uitgevoerd. DNV heeft fase 1 en 2 van het onderzoek uitgevoerd. De betrokken medewerker is daarna als zelfstandig consultant verder gegaan als Amber Safety Consulting en heeft fase 3 van het onderzoek uitgevoerd. In dit rapport spreken we verder alleen over ASC, ook als de analyse in de eerste fase door DNV is uitgevoerd.

ongevalsgegevens, en één voor berekeningen van faalkansen) en een rapport<sup>8</sup>. De gebruiker moet invoerparameters opgeven (de karakteristieken van de verlading). Vervolgens wordt automatisch relevante output gegenereerd, zoals tabellen en figuren.

Dit rapport beperkt zich tot het door ASC opgeleverde model (versie 1.2, maart 2024). Eerdere versies van dit model zijn gereviewd door het RIVM en voorgelegd aan het PrIO, Departement Omgeving Vlaanderen, experts van Shell en deelnemers van het joint industry project SAFEN (Safetec, 2025). Verdere ontwikkelingen en nieuwe inzichten na maart 2024 zijn niet meegenomen in dit rapport.

In de volgende paragrafen wordt het ASC-model beschreven voor de verlading van LPG van en naar tankauto's.

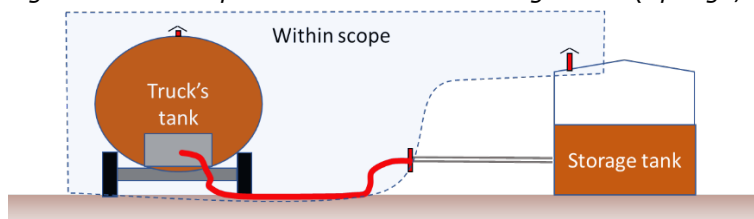
## 4.2 Scope van het ASC-model voor LPG

Het ASC-model voor het afleiden van faalkansen voor verlading van LPG van tankauto's omvat (zie ook Figuur 4.1):

- de verlaadslang of -arm;
- onderdelen op de tankauto tussen het reservoir en de slang/arm (zoals een pomp);
- de omhulling van de tankauto;
- noodventielen op de tankauto en op de stationaire opslagtank (indien de uitstroming veroorzaakt wordt door het verladen).

Uitstroming vanuit de omhulling van de opslagtank (intrinsiek falen van de opslagtank) is dus buiten scope van het model. Merk op dat uitstroming vanuit de omhulling van de tankauto (intrinsiek falen van de tankauto) wel binnen de scope is van het ASC-model, terwijl het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid aparte scenario's hiervoor definieert (RIVM, 2025a).

Figuur 4.1 De scope van het ASC-model. Figuur uit (Spouge, 2024).



In dit rapport kijken we specifiek naar de verlading van LPG op een LPG-tankstation. In de volgende paragrafen zijn de verschillende stappen toegelicht.

## 4.3 Gegevens voor het ASC-model voor de verlading van LPG

Het ASC-model is ontwikkeld in een aantal stappen, namelijk (1) selectie van de databases voor incidenten en verladingen, (2) afleiding van het aantal uitstromingen in een specifieke tijdsperiode, (3) afleiding van het aantal verladingen in dezelfde tijdsperiode en (4) bepalen van de

<sup>8</sup> Op sommige punten wijken de waarden in de Excelbestanden iets af van die in het ASC-rapport. Deze inconsistenties worden in dit hoofdstuk benoemd. Wij zijn uitgegaan van de waarden in de Excelbestanden.

faalkansen afhankelijk van de kenmerken van de verlading. Deze stappen worden in de volgende paragrafen toegelicht.

#### 4.3.1 *Selectie databases voor incidenten en verlading*

ASC heeft in de eerste fase van het project verschillende bestaande databronnen voor het afleiden van faalkansen (per faaloorzaak) voor verlading verzameld en beoordeeld aan de hand van de criteria in Tabel 4.1 (Spouge, 2018).

*Tabel 4.1 Gebruikte criteria voor het beoordelen van databronnen (Spouge, 2018).*

Bruikbaarheid	kunnen verladingsincidenten gemakkelijk uit de database worden gehaald?
Relevantie	hebben de gegevens betrekking op verlading zoals in Nederland gebeurt?
Grootte	hoeveel verladingsincidenten zijn aanwezig in de database (tellerdata)?
Actualiteit	hoe actueel is de rapportageperiode?
Volledigheid	zijn alle lekincidenten opgenomen, gegeven een gedefinieerde rapportagedrempel en periode?
Beschrijving	zijn de oorzaken van alle incidenten onderzocht en beschreven?
Hoeveelheid	zijn de uitstroomhoeveelheden bekend?
Noemerdata	is het aantal verladingen bekend?
Praktijk-kennis	zijn typische kenmerken van de verlading, zoals duur, debiet en veiligheidsmaatregelen bekend?
Niet-vertrouwelijk	zijn incidentrapporten beschikbaar en kunnen deze zonder geheimhoudingsbeperkingen worden gepubliceerd?
Acceptatie	zijn lekkansen al in het publieke domein en worden ze veel gebruikt?

In totaal zijn 35 verschillende databases onderzocht en beoordeeld. Voor de verlading van LPG van en naar tankauto's scoren de volgende databases het hoogst:

- Voor incidentgegevens: de Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) database, besproken in paragraaf 4.3.2, in combinatie met
- Voor activiteitsgegevens: de Commodity Flow Surveys (CFS), besproken in paragraaf 4.3.3.

Deze zijn daarom geselecteerd voor het afleiden van de faalkansen voor de verlading van een tankauto naar een LPG-tankstation. De periode waarover de incidenten geanalyseerd zijn betreft 2000-2024.

#### 4.3.2 *Incidentgegevens*

De Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) database van het Amerikaanse Department of Transportation ontvangt meldingen van lekkages onder de Hazardous Materials Regulations (49 CFR Parts 171-180) (PHMSA, 2025). Dit omvat het onbedoeld vrijkomen

van gevaarlijke stoffen tijdens het transport, inclusief laden, lossen en tijdelijke opslag in de VS. Voor LPG is de drempelwaarde voor de meldings-/rapportageplicht 20 liter.

#### 4.3.2.1 Selectie van de relevante incidenten

De volgende zoekcriteria zijn gebruikt, voor het zoeken van incidenten tijdens verlading van tankwagens:

- Mode of transportation: *Highway*
- Transportation phase: *Loading of Unloading*
- Packaging type: *Cargo tank motor vehicle*
- Result: *Spillage, Fire, Explosion, Material entered waterway/storm sewer, Vapor(gas) dispersion, Environmental damage.*

In de oorspronkelijke analyse van ASC is door een omissie enkel gezocht naar incidenten met Result = *Spillage*. Voor gevaarlijke vloeistoffen (zoals benzine) is *Spillage* verreweg de belangrijkste uitkomst. Voor LPG zijn er echter ook veel incidenten met als uitkomst *Vapor(gas) dispersion*. Het RIVM heeft daarom de zoekcriteria uitgebreid. Daarbij is ook de tijdsperiode uitgebreid van 2000-2016 (ASC) naar 2000-2024.

In de periode 2000-2024 zijn er ongeveer 10.000 incidenten met verlading van gevaarlijke stoffen uit/naar tankwagens beschreven, waardoor dit de grootste bekende database van dergelijke incidenten is. 160 van de incidenten hadden betrekking op LPG (UN 1075). Van deze 160 incidenten zijn 134 in detail geanalyseerd en 26 buiten scope verklaard op basis van de incidentbeschrijvingen. De incidenten buiten scope waren bijvoorbeeld incidenten waarbij de opslagtank intrinsiek faalde of incidenten tijdens transport (een tankauto die van de weg raakt). ASC had oorspronkelijk 19 incidenten geïdentificeerd (het verschil is een factor zeven).

#### 4.3.2.2 Analyse van incidenten

Alle incidenten bevatten een (meestal beknopte) beschrijving in vrije tekst. Daarnaast worden ook onder meer het UN-nummer van de betrokken stof en de uitstroomhoeveelheid (volume) gerapporteerd. Aanvullend heeft ASC twee informatievelden toegevoegd: de faaloorzaak en de lekgrootte. Voor de faaloorzaak zijn de categorieën en definities van Tabel 4.2 gebruikt. De lekgrootte is een ruwe indeling in twee categorieën<sup>9</sup>: lek (representatieve lekgrootte ruwweg 10% van de diameter) en breuk (lek ter grootte van de volledige diameter van de verlaadslang). Dit sluit aan bij de QRA-scenario's van PGS 3 (PGS-richtlijn 3, 1999).

De twee nieuwe velden (faaloorzaak en lekgrootte) zijn door ASC ingevuld voor de oorspronkelijke 19 incidenten voor LPG-tankauto. In 2025 heeft het RIVM deze twee velden ingevuld voor de aanvullende incidenten. De verdeling<sup>10</sup> van de in totaal 134 incidenten over de verschillende faalorzaken en lekgrootten is gegeven in Tabel 4.3.

<sup>9</sup> Het ASC-model staat een indeling in meer dan twee categorieën toe. Voor verlading van LPG is dit niet gedaan door ASC.

<sup>10</sup> In de oorspronkelijke analyse van ASC (19 incidenten) is de verdeling over breuk en lek gebaseerd op *expert judgement*: voor elke faaloorzaak is een verdeling aangenomen van 10% breuk en 90% lek, met uitzondering van de faaloorzaak 'vroegtijdig wegrijden' waarvoor is aangenomen dat enkel breuk optreedt.

Tabel 4.2 Faalorzaken in het ASC-model voor faalkansen verlading. Alleen de faalorzaken die relevant zijn voor de verlading van LPG-tankauto's zijn weergegeven.

<b>Faalorzaak (failure case)</b>	<b>Omschrijving</b>
Falen verlaadslang (hose failure)	Uitstroming uit de verlaadslang door corrosie, vermoeiing, e.d.
Falen onderdelen tankauto (tanker equipment failure)	Uitstroming uit onderdelen op de tankauto tussen de slang en de tank op de tankauto (bijvoorbeeld leidingen, flenzen, pompen, verdeelstukken, kleppen, meters, ...)
Falen tankauto (tanker tank failure)	Uitstroming uit de omhulling van de tankauto, door corrosie, vermoeiing, e.d.
Falen verbinding (connection failure)	Uitstroming uit het verbindingsstuk tussen de slang en de tankauto/opslagtank, door menselijke fout en technische oorzaken.
Open klep (valve error)	Uitstroming uit kleppen door menselijke fout, waaronder het vroegtijdig openen van kleppen.
Tegendruk (back-pressure)	Uitstroming door overdruk in de tank. Dit omvat het falen van het noodventiel, het ontstaan van overdruk door het onjuist sluiten van kleppen, het ontstaan van terugstroming.
Overvullen tankauto (tanker tank overflow)	Uitstroming uit (het noodventiel van) de tankauto door overvullen (het vullen van het reservoir tot boven het maximaal toegestane vulniveau).
Overvullen opslagtank (delivery tank overflow)	Uitstroming uit (het noodventiel van) de opslagtank door overvullen (het vullen van het reservoir tot boven het maximaal toegestane vulniveau).
Vroegtijdig loskoppelen (disconnection error)	Uitstroming door het (te vroeg) verwijderen van een slang of onderdeel, namelijk voordat verbindingen met de tankauto of tank goed gesloten zijn, of voordat onderdelen geleegd zijn.
Contact met ander voertuig (striking)	Uitstroming uit verladingsonderdelen omdat een ander voertuig (niet de tankauto) botst op de installatie of over de verlaadslang heen rijdt.
Botsing van tankauto (impact)	Uitstroming uit verladingsonderdelen omdat de tankauto op (onderdelen van) de installatie botst.
Vroegtijdig wegrijden (drive-off)	De tankauto rijdt weg terwijl de verlaadslang nog niet afgekoppeld is.

Tabel 4.3 Aantal incidenten per faaloorzaak, en bijbehorende verdeling over breuk en lek (respectievelijk 100% en 10% van de diameter).

Faaloorzaak	Aantal incidenten	Lekgrootte		
		Breuk	Lek	Onbekend
Falen verlaadslang	10	6	2	2
Falen onderdelen tankauto	25	4	15	6
Falen tankauto	1	0	1	0
Falen verbinding	13	5	5	3
Open klep	24	11	5	8
Tegendruk	4	3	0	1
Overvullen tankauto	2	2	0	0
Overvullen opslagtank	5	4	1	0
Vroegtijdig loskoppelen	7	6	0	1
Contact met ander voertuig	0	0	0	0
Botsing van tankauto	2	1	1	0
Vroegtijdig weggrijden	31	28	2	1
Onbekend	10	5	1	4
<b>Totaal</b>	<b>134</b>	<b>75</b>	<b>33</b>	<b>26</b>

De uitstroomhoeveelheid wordt in de PHMSA-database gerapporteerd op basis van volume, waarbij gekozen moet worden tussen de eenheden GCF ('gas cubic feet') en LGA ('liquid gallon'). Het is niet duidelijk of altijd de juiste eenheid gekozen is (GCF voor gasuitstroom en LGA voor vloeistofuitstroom) en wat de juiste eenheid is in geval van een twee-fase uitstrooming. ASC heeft (conservatief<sup>11</sup>) aangenomen dat het altijd gaat om een volume vloeistof. Dit volume wordt daarna omgerekend naar een massa in ton, op basis van een veronderstelde dichtheid van 0,55 ton/m<sup>3</sup> (Spouge, 2024).

Het ASC-model kent geen onderscheid tussen kleine, langdurende lekken en grote, kortdurende lekken. Deze detailinformatie is namelijk nauwelijks beschikbaar in de incidentbeschrijvingen (voor meer informatie, zie hoofdstuk 5).

#### 4.3.3 Activiteitsgegevens

Het Bureau of Transportation Statistics geeft eens in de vijf jaar een overzicht van het vervoer van gevaarlijke stoffen in de Verenigde Staten, de Commodity Flow Surveys (CFS) (CFS, 2025). Hierbij zijn de vervoersgegevens (in US-ton<sup>12</sup>) beschikbaar op het niveau van UN nummer (LPG is UN 1075). Voor de periode 2000-2024 is het gemiddelde genomen van alle beschikbare gegevens van deze periode, namelijk de jaren 2002, 2007, 2012, 2017 en 2022. De vervoerde hoeveelheid LPG (29.563 kton/jaar) is als bron gebruikt voor het bepalen van het aantal verladingen per jaar.

Het aantal verladingen LPG per jaar in de Verenigde Staten is door ASC in vier stappen afgeleid uit de vervoerde hoeveelheid LPG (ton/jaar). Wij hebben dezelfde aanpak gevolgd.

<sup>11</sup> De aanname is conservatief omdat de dichtheid van vloeistof hoger is dan die van gas, en daarmee de uitgestroomde massa groter is bij een vloeistofuitstrooming dan bij een gasuitstrooming met hetzelfde volume.

<sup>12</sup> Eén US-ton is gelijk aan 907 kg. In dit rapport staat US-ton voor 907 kg, ton voor 1.000 kg.

#### 4.3.3.1 Fractie vervoer in bulk

De vervoerde hoeveelheid LPG betreft zowel in bulk (tankauto's) als in verpakking (gasflessen). Uit de PHMSA-database is afgeleid hoeveel LPG (in m<sup>3</sup>) is vrijgekomen bij verladingsincidenten van bulkvervoer en hoeveel bij verladingsincidenten van vervoer in verpakkingen. Hierbij blijkt in de periode 2000-2024 ongeveer 43% aan volume te zijn vrijgekomen bij verlading van bulkvervoer en 57% bij verlading van verpakkingen. Deze verhouding is ook toegepast op het vervoer: dat wil zeggen, we nemen aan dat ongeveer 43% van het vervoer bulkvervoer betreft. Dit bepaalt de hoeveelheid vervoerde LPG in bulk in ton per jaar.

#### 4.3.3.2 Aantal vervoersbewegingen per jaar

Uit de PHMSA-database is afgeleid wat de typische capaciteit is van een LPG-tankauto. De gemiddelde capaciteit voor de periode 2000-2024 was 21,4 m<sup>3</sup>. Deze capaciteit komt ongeveer overeen met die van de grotere 'bobtails' (typische Amerikaanse LPG-tankauto's), al kunnen grote Amerikaanse LPG-tankauto's ook groter zijn, tot 45 m<sup>3</sup> (Amthor, 2025).

Het aantal vervoersbewegingen (per jaar) kan vervolgens worden bepaald door het vervoer (ton per jaar) te delen door de gemiddelde capaciteit van een LPG-tankauto (ton). Voor de dichtheid wordt conform ASC gerekend met 0,55 ton/m<sup>3</sup> (Spouge, 2024)<sup>13</sup>.

#### 4.3.3.3 Aantal verladingen per jaar

Aangenomen is dat een vervoersbeweging van een (volle) tankauto twee verladingen kent, namelijk laden bij de leverancier en lossen bij de klant. Dit is een conservatieve aanname. Het aantal verladingen per jaar is dan gelijk aan:

$$2 \times \text{het vervoer van LPG (ton per jaar)} \times \text{de fractie in bulk (-)} / \text{de gemiddelde capaciteit van een tankauto (ton)}$$

Op deze manier is het aantal LPG-verladingen per jaar geschat op (afgerond) 2,2 miljoen. Voor de periode 2000-2024 komt het aantal verladingen in totaal uit op 54 miljoen.

#### 4.3.3.4 Aantal handelingen per verlading

In het ASC-model wordt voor elke faaloorzaak een faalkans berekend. De faalkans hangt af van het aantal handelingen (bijvoorbeeld: de faalkans voor 'falen verlaadslang' is afhankelijk van het aantal uren dat de slang wordt gebruikt).

Het aantal verladingen per jaar wordt gebruikt om het aantal handelingen per jaar te bepalen. Hiervoor moet worden geschat hoeveel handelingen per verlading plaatsvinden. Voor het schatten van het aantal handelingen per verlading is aangesloten bij de aannames van

<sup>13</sup> LPG bestaat voornamelijk uit propaan en butaan. De DIPPR-database in Safeti-NL versie 9.2 geeft voor propaan een vloeistofdichtheid van 0,50 ton/m<sup>3</sup> bij 20°C en voor butaan 0,58 ton/m<sup>3</sup> (DNV, 2025).

ASC (expert judgement<sup>14</sup>), zie Tabel 4.4. Het totale aantal handelingen is gelijk aan het aantal handelingen per verlading vermenigvuldigd met het aantal verladingen in de periode 2000-2024.

Tabel 4.4 Handelingen per verlading voor elke faaloorzaak.

Faaloorzaak	Eenheid van de handeling	Handelingen per verlading
Falen verlaadslang	Slang-uren	0,5
Falen onderdelen tankauto	Verladings-uren	0,67
Falen tankauto	Verladings-uren	0,67
Falen verbinding	Verlading	1
Open klep	Verlading	1
Tegendruk	Verlading	1
Overvullen tankauto	Verlading (laden)	0,5
Overvullen opslagtank	Verlading (lossen)	0,5
Vroegtijdig loskoppelen	Verlading	1
Contact met ander voertuig	Passeerbewegingen	0,5
Botsing van tankauto	Verlading	1
Vroegtijdig weggrijden	Verlading	1

Opmerkingen bij de tabel:

- Het aantal passeerbewegingen is onbekend maar het aantal passeerbewegingen per uur wordt verondersteld constant te zijn. Het aantal passeerbewegingen is daarom evenredig met het aantal uur dat de slang wordt gebruikt.

#### 4.4 Faalkansen voor de referentiepopulatie

De incidenten met LPG-tankauto-verlading hebben betrekking op verladingen in de Verenigde Staten in de periode 2000-2024. Samen met de noemerdata (het aantal verladingen in dat gebied en die periode) kan een gemiddelde faalkans per verlading voor die (referentie)populatie worden afgeleid. Faalfrequenties zijn het product van de faalkans (per verlading) en het aantal verladingen per jaar.

##### 4.4.1 Faalkans per LPG-verlading

In de PHMSA-database zijn voor de verlading van LPG van en naar tankauto's 134 relevante incidenten gevonden. Deze incidenten vonden in de periode 2000-2024 plaats in de Verenigde Staten. Het totaal aantal verladingen in dat gebied en die periode is naar schatting 54 miljoen. De faalkans voor LPG-verlading in de VS is daarom:

$$\frac{134}{54 \times 10^6 \text{ verlading}} = 2,5 \times 10^{-6} \text{ per verlading}$$

<sup>14</sup> In deze stap maakt ASC onderscheid tussen slang-uren en verladingsuren (respectievelijk de tijd dat de slang in gebruik is, 0,5 uur, en de totale duur van de verlading, 0,67 uur). Dit is conform de algemene aanbevelingen in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid module II (RIVM, 2025a). In verdere stappen in het model, en het gebruik van het model, wordt dit onderscheid niet gemaakt. ASC gaat in de verdere stappen (zoals de kalibratie van het *Outflow model*, paragraaf 4.5.2) uit van 0,67 uur voor zowel slang-uren als verladingsuren. Deze inconsistentie heeft naar verwachting een kleine (<5%) invloed op de faalkans, en wordt daarom in de RIVM-analyse genegeerd.

Hier is nog geen onderverdeling gemaakt in lek en breuk, of in incidenten die wel of niet EV-relevant zijn. Ook het onderscheid tussen het laden of het lossen van een tankauto is hier nog niet gemaakt.

#### 4.4.2 *Onderverdeling naar lek en breuk*

In Tabel 4.3 zijn de 134 incidenten uitgesplitst naar gatgrootte: lek (33 incidenten), breuk (75 incidenten) en onbekend (26 incidenten). Als aangenomen wordt dat de incidenten met onbekende gatgrootte evenredig over lek en breuk verdeeld kunnen worden, dan komen de faalkansen uit op  $1,7 \times 10^{-6}$  per verlading (scenario breuk) en  $7,6 \times 10^{-7}$  per verlading (scenario lek).

#### 4.4.3 *Faalkans per faaloorzaak*

Tabel 4.3 geeft het aantal incidenten per faaloorzaak. Voor sommige faaloorzaken zijn geen incidenten gevonden in de PHMSA-database. Voor verdere verwerking van de gegevens kent ASC hier 0,7 incidenten aan toe (de 50<sup>e</sup> percentiel van een Poisson-verdeling zonder incidenten). Voor de verlading van LPG betreft dit alleen de faaloorzaak 'contact met ander voertuig'. Daarnaast zijn er 10 incidenten met een onbekende faaloorzaak. In de ASC-aanpak worden deze incidenten verdeeld over alle faaloorzaken. In de RIVM-analyse is dezelfde aanpak gevolgd: er zijn 124 incidenten met toegekende faaloorzaak plus 0,7 incidenten voor de faaloorzaak 'contact met ander voertuig'. Het gecorrigeerde aantal incidenten per faaloorzaak is dan het aantal incidenten per faaloorzaak vermenigvuldigd met een factor 134/124,7. Tabel 4.5 geeft het op deze manier gecorrigeerde aantal incidenten, het aantal handelingen in de periode 2000-2024 (conform Tabel 4.4) en de faalkans per miljoen handelingen.

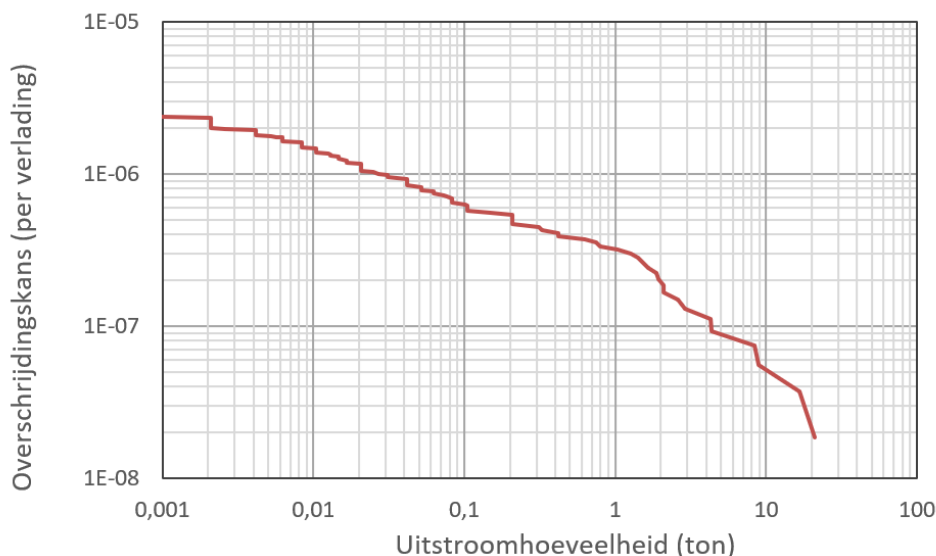
Tabel 4.5 Handelingen en faalkansen per faaloorzaak na correctie.

Faaloorzaak	Incidenten (gecorrigeerd)	Handelingen 2000-2024 (miljoen)	Faalkans (per miljoen handelingen)
Falen verlaadslang	10,7	27	0,40
Falen onderdelen tankauto	26,9	36	0,75
Falen tankauto	1,1	36	0,03
Falen verbinding	14,0	54	0,26
Open klep	25,8	54	0,48
Tegendruk	4,3	54	0,08
Overvullen tankauto	2,1	27	0,08
Overvullen opslagtank	5,4	27	0,20
Vroegtijdig loskoppelen	7,5	55	0,14
Contact met ander voertuig	0,8	27	0,03
Botsing van tankauto	2,1	54	0,04
Vroegtijdig wegrijden	33,3	54	0,62

#### 4.4.4 *Overschrijdingskans per uitstroomhoeveelheid*

De PHMSA-database geeft ook voor elk incident de uitstroomhoeveelheid. In Figuur 4.2 is weergegeven hoe groot de kans per verlading is op een uitstroming groter dan een bepaalde hoeveelheid (overschrijdingskans).

Figuur 4.2 Overschrijdingskansen voor uitstroomhoeveelheden (voor de referentiepopulatie: de 134 incidenten in de periode 2000-2024).



#### 4.5 Faalkansen voor *user defined cases*

De faalkansen die in paragraaf 4.4 zijn afgeleid, hebben betrekking op de onderzochte referentiepopulatie (verladingen in de Verenigde Staten in de periode 2000-2024) en de onderliggende kenmerken van die verladingen. De kenmerken van de verlading van LPG in de VS zijn gegeven in Tabel 4.6. De faalkansen van de faaloorzaken (Tabel 4.5) gelden voor verlading met deze karakteristieken. Voor de karakteristieken sluiten wij aan bij de *expert judgement* van ASC (met uitzondering van de waarde voor '*quantity transferred*': deze is gelijk aan de gemiddelde capaciteit van een tankauto uit de PHMSA-database, zie paragraaf 4.3.3.2). De karakteristieken van de verlading in de VS worden onder andere gebruikt om het *Outflow model* (paragraaf 4.5.2) te kalibreren.

Tabel 4.6 Karakteristieken van de verlading van LPG (VS).

Parameter	Waarde
Transfer type	Cargo loading/unloading
Transport mode	Road
Flow direction	Both directions <sup>15</sup>
Fluid type	LPG
Tanker type	Liquefied gas road tanker
Transfer equipment	Hose
Hose type	Composite
Number of hoses	1
Flow type	Pumped
Transfer frequency	1
Quantity transferred	11,8 ton
Transfer duration	0,67 h
Hose diameter	25 mm
Passing movements	1
Transfer location	Average location
ESD	Average ESD
ERC	Average ERC
Time period	Late 2010s

Het doel van het ASC-model is om ook faalkansen te kunnen berekenen voor 'user defined cases', waarbij de gebruiker zelf de verladingskenmerken invoert, zoals de verladingduur, het type verlaadslang en ESD-systeem. Hiervoor heeft het ASC-model twee varianten: het *Reported Leak model* en het *Outflow model*. Het *Reported Leak model* gaat uit van de faalkansen voor verlading in de VS (Tabel 4.5) en past deze aan op basis van de door de gebruiker ingevoerde verladingskenmerken. Het *Outflow model* is complexer. Het gaat uit van een continue verdelingsfunctie van gatgrootten (op basis van het rapport IOGP 434-01), een inschatting van initiële uitstroomdebieten en een waarschijnlijkheidsverdeling voor de uitstroomduur (afhankelijk van het ESD-systeem). Meer informatie over de twee modellen is te vinden in paragraaf 4.5.1 en 4.5.2.

In Tabel 4.7 is weergegeven welke resultaten met deze twee varianten berekend kunnen worden. Beide modellen kunnen lekkansen per verlading berekenen met onderscheid naar faaloorzaken, uitstroomhoeveelheden en discrete lekgrootten (lek en breuk, respectievelijk 10% en 100% van de diameter, zie de incidentanalyse in paragraaf 4.3.2.2). Ook combinaties daarvan, zoals lekkans met onderscheid naar uitstroomhoeveelheden én faaloorzaken, kunnen met beide modellen worden berekend. Alleen met het *Outflow model* is ook een onderverdeling naar (1) willekeurige diameters, (2) initiële uitstroomdebieten en (3) tijdsduur tot isolatie mogelijk.

<sup>15</sup> Dit betreft laden en lossen

Tabel 4.7 Beschikbare uitkomsten van het Reported Leak model (RLM) en het Outflow model (OM) (niet uitputtend).

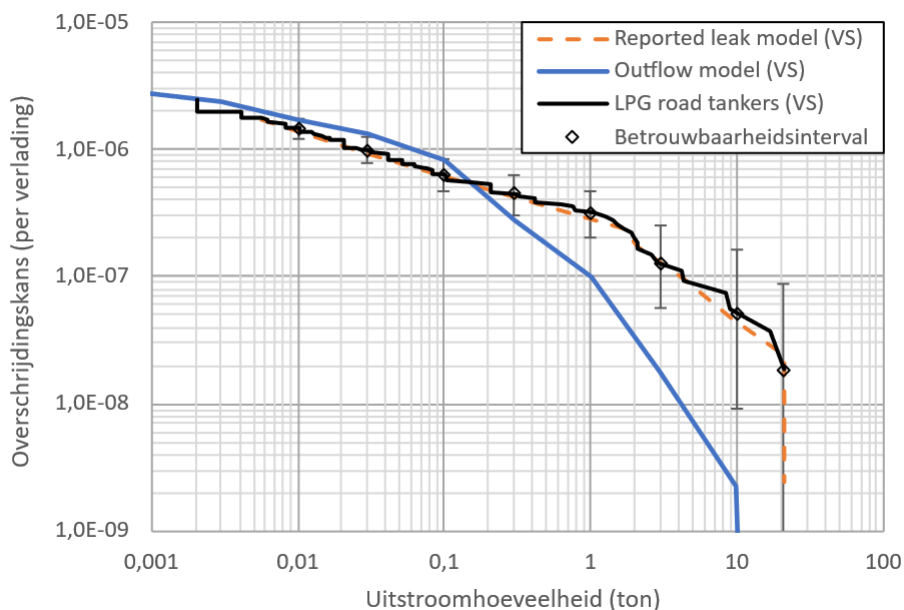
Uitkomst	Detailniveau	RLM	OM
Kans op een lek (per verlading)	zonder onderverdeling	√	√
	met onderscheid naar faaloorzaken	√	√
	met onderscheid naar uitstroomhoeveelheden	√	√
	met onderscheid naar lekgrootten (lek of breuk)	√	√
	met onderscheid naar diameters (continue range)		√
	met onderscheid naar initiële uitstroomdebieten		√
	met onderscheid naar tijdsduur tot isolatie		√

Het *Outflow model* heeft ten opzichte van het *Reported Leak model* meer uitvoermogelijkheden omdat drie onderdelen zijn toegevoegd: (1) een continue (in plaats van discrete) verdelingsfunctie voor gatgrootten (gebaseerd op het IOGP 434-01 rapport), (2) een inschatting van initiële uitstroomdebieten (voor verschillende relevante lekdiameters) en (3) een waarschijnlijkheidsverdeling voor de uitstroomduur (afhankelijk van het veronderstelde ESD systeem).

In Figuur 4.3 is de verdeling van uitstroomhoeveelheden weergegeven volgens verschillende varianten: de gegevens voor de referentiepopulatie (paragraaf 4.4) in zwart, de uitkomsten voor het *Reported Leak model* (paragraaf 4.5.1) voor de referentiepopulatie in oranje en de uitkomsten voor het *Outflow model* (paragraaf 4.5.2) voor de referentiepopulatie in blauw. Uit de figuur blijkt dat het *Reported Leak model* vrijwel dezelfde uitkomsten geeft als de oorspronkelijke gegevens, terwijl het *Outflow model* bij uitstroomhoeveelheden groter dan ongeveer 0,3 ton lagere faalkansen geeft<sup>16</sup>.

<sup>16</sup> Dit was ook het geval voor de 19 incidenten (2000-2016) die ASC oorspronkelijk heeft geanalyseerd. Verder lijkt dit specifiek voor LPG-verlading het geval te zijn. Voor de overige typen verlading waar het ASC-model voor is ontwikkeld (bijv. scheepsverlading met ruwe olie of verlading van/naar benzinetankauto's) is de overeenkomst tussen het *Outflow model* en het *Reported Leak model* beter.

Figuur 4.3 Overschrijdingskansen voor uitstroomhoeveelheden volgens het ASC-model. Oranje: het Reported Leak model voor de referentiepopulatie (134 incidenten uit 2000-2024). Blauw: het Outflow model voor de referentiepopulatie. Zwart: de data voor verladingen in de VS in de periode 2000-2024, met 90% betrouwbaarheidsinterval (uitgaande van een Poisson-distributie).



#### 4.5.1 Reported Leak model

Het *Reported Leak model* is ontwikkeld door ASC in fase 2 van het project, en heeft tot doel faalkansen af te leiden voor *user defined cases*. Met de *user defined cases* kan een gebruiker specifieke karakteristieken van de verlading definiëren, zoals het type verlaadslang dat gebruikt wordt en het ESD-systeem (indien aanwezig). De gebruiker heeft ook de mogelijkheid om bepaalde faaloorzaken uit te sluiten. Het model vertaalt vervolgens de faalkansen voor de referentiepopulatie (in dit geval de Verenigde Staten in de periode 2000-2024) naar faalkansen voor de *user defined case*. Voor die vertaling worden verschillende modificatiefactoren gebruikt. Deze factoren zijn door ASC bepaald op basis van andere (literatuur)bronnen en expert judgement. De faalkansen die het model berekent, kunnen uitgesplitst worden naar faaloorzaak, gatgrootte (lek of breuk) en uitstroomhoeveelheid. Ook uitsplitsingen naar combinaties van die parameters zijn mogelijk. Voor uitsplitsing naar gatgrootte (lek of breuk) wordt de verhouding tussen het aantal breuken en lekken uit de incidentanalyse (Tabel 4.3) gebruikt.

Het model bevat verschillende modificatiefactoren. De factoren die relevant zijn voor LPG-verlading met tankauto's, zijn weergegeven in Tabel 4.8. De factoren die de faalkans beïnvloeden, geven een verhoging of verlaging van de faalkansen per faaloorzaak, ten opzichte van de referentiepopulatie. De verschillende faaloorzaken worden dus op verschillende manieren aangepast, afhankelijk van de invloed van de parameters op faaloorzaken. De keuze voor het ESD-systeem beïnvloedt

de verwachte uitstroomduur, en daarmee samenhangend de verwachte uitstroomhoeveelheid, maar heeft in het *Reported Leak model* geen invloed op de faalkans of de verdeling naar faaloorzaken of gatgrootten.

Tabel 4.8 Modificatiefactoren voor de verlading van LPG met tankauto's.

Parameter	Beïnvloeding	Keuzemogelijkheden
Locatie	Faalkans (alle faaloorzaken)	Average location, customer site, oil terminal
Type verlaadslang	Faalkans (falen verlaadslang)	Single wall, double-wall, metal, composite, rubber
ERC	Faalkans (falen verbinding, contact met ander voertuig, vroegtijdig weggrijpen)	No ERC, average ERC <sup>17</sup> , ERC
ESD	Uitstroomduur	Non-automatic, operator activated, semi-automatic, automatic, average

Andere invoerparameters beïnvloeden specifieke deelresultaten. De diameter van de verlaadslang heeft bijvoorbeeld geen invloed op de totale kans per faaloorzaak of de kansverdeling voor relatieve lekgrootten, maar wel op de kansverdeling voor absolute lekgrootte. Het verladingsdebiet en de verladingsnelheid beïnvloeden de uitstroomhoeveelheid (beter gezegd: de uitstroomhoeveelheidsverdeling).

#### 4.5.2 *Outflow model*

Het *Outflow model* is door ASC ontwikkeld in fase 3 van het project, en heeft net als het *Reported Leak model* tot doel faalkansen af te leiden voor *user defined cases*. Het *Outflow model* kan faalkansen berekenen voor elke willekeurige diameter. In het bijzonder kan ook de kans op een lek met een uitstroomhoeveelheid onder de rapportagegrens berekend worden. Verder wordt de uitstroomduur op basis van het ESD-systeem in het *Outflow model* verfijnder berekend dan in het *Reported Leak model*.

Om te komen tot een gedetailleerde gatgrootteverdeling maakt het *Outflow model* gebruik van de '*process release frequencies*' van de *International Association of Oil and Gas Producers* (IOGP, 2019), hierna aangeduid als 'IOGP 434-01'. De stappen zijn als volgt:

1. IOGP 434-01 geeft voor verschillende typen installatie-onderdelen lekfrequenties per jaar. De lekfrequenties hangen af van de diameter van het installatie-onderdeel en de relatieve gatgrootte (de verhouding van de lekdiameter en de diameter van het installatie-onderdeel).
2. Door aan te geven (a) welke installatie-onderdelen onderdeel zijn van de installatie, (b) welke installatie-onderdelen relevant zijn voor welke faaloorzaken en (c) welke diameters de installatie-onderdelen hebben, ontstaan faaloorzaak-specifieke

<sup>17</sup> In het ASC-model is aangenomen dat in 50% van de verladingen een ERC aanwezig is. Dit komt overeen met een *average ERC*.

kansverdelingen voor lek grootte (voor elke faaloorzaak een aparte kansverdeling). De op deze manier berekende faalkansen (per installatieonderdeel-jaar) worden nog vermenigvuldigd met de relevante modificatiefactoren (die betrekking hebben op faaloorzaken, zie Tabel 4.8) en een tijdsfractie: de duur van een enkele verlading als fractie van een volledig jaar. De faalfrequentieverdeling per jaar wordt dan een faalkansverdeling per verlading. De verdelingen maken onderscheid naar de verschillende beschouwde faaloorzaken en lekgrootten.

3. De uitstroomhoeveelheid hangt af van het uitstroomdebiet (kg/s) en de uitstroomduur.<sup>18</sup> Het uitstroomdebiet (kg/s) is een functie van de lekdiameter, het verladingsdebiet en de druk in het installatieonderdeel (ten opzichte van de pompdruk). Voor elk installatieonderdeel wordt geschat welke fractie van de uitstromingen plaatsvindt tijdens pompen of niet. Voor de uitstroomduur wordt een kansdichtheidsverdeling in de tijd gebruikt. Die verdeling heeft twee bijdragen: één bijdrage voor de kans dat de uitstroming kort duurt vanwege het succesvol ingrijpen van het ESD-systeem, en één bijdrage voor de kans dat de uitstroming langer duurt omdat het ESD-systeem faalt. Voor beide bijdragen wordt een lognormale verdeling in de tijd gebruikt, met een maximum (de 'gemiddelde' uitstroomduur bij succes of falen van het ESD-systeem) en een standaard afwijking (de variatie). Ook de kans op het slagen of falen van het ESD-systeem is in de gecombineerde kansdichtheidsverdeling verwerkt.
4. De lekgrootteverdelingen (punt 2), het uitstroomdebiet (als functie van lekdiameter) en de uitstroomduurverdeling (punt 3) geven tezamen een uitstroomhoeveelheid-verdeling. Omdat het model specifieke lekgrootteverdelingen heeft per faaloorzaak, zijn ook de uitstroomhoeveelheidverdelingen specifiek per faaloorzaak.
5. De bovengenoemde uitstroomhoeveelheidverdelingen worden voor de referentiepopulatie vergeleken met de uitstroomhoeveelheden van gerapporteerde incidenten. Dit wordt voor elke faaloorzaak afzonderlijk gedaan. Daarbij is de kleinste hoeveelheid waarvoor gerapporteerd moet worden (de drempelwaarde voor meldingsplicht) extra relevant. Voor deze kritische uitstroomhoeveelheid<sup>19</sup> zouden de twee benaderingen idealiter dezelfde (overschrijdings)kansen moeten geven. Echter wijkt het *Outflow model* (lees: een model) af van de incidentdata en bijbehorende noemerdata (lees: de praktijk). Daarom worden de uitstroomhoeveelheid-verdelingen van het *Outflow model* met 'kalibratiefactoren' verhoogd of verlaagd, zodanig dat de twee faalkansen (die van het model en die op basis van de incidentrapportages) voor de kritische uitstroomhoeveelheid wél overeenkomen. Elke faaloorzaak heeft daarbij een eigen kalibratiefactor.

<sup>18</sup> Na het sluiten van ESD-kleppen komt nog een beperkte hoeveelheid vrij, het model neemt die bijdrage ook mee.

<sup>19</sup> Voor de kritische uitstroomhoeveelheid neemt ASC voor de meeste situaties de drempelwaarde voor meldingsplicht. Voor tot vloeistof verdichte gassen zoals LPG lijkt in de uitstroomhoeveelheidverdeling (Figuur 4.2) geen effect zichtbaar van de drempelwaarde voor meldingsplicht (voor LPG gelijk aan 20 liter, ofwel 11 kg). ASC neemt daarom voor LPG als kritische uitstroomhoeveelheid 2 kg (wat ongeveer overeenkomt met de kleinste gerapporteerde uitstroming).

6. De kalibratiefactoren worden ook gebruikt voor andere output van het *Outflow model* zoals de kansverdeling voor gatgrootten.
7. Nadat de kalibratiefactoren zijn afgeleid, kan het *Outflow model* ook toegepast worden voor andere invoercombinaties (*user defined cases*, met afwijkende kenmerken ten opzichte van de referentiepopulatie).

#### 4.6 Toepassing van ASC-model voor Nederlandse situatie

De faalkansen per verlading in paragraaf 4.4 gelden voor een verlading met de kenmerken van een LPG-verlading in de VS. Voor het bepalen van de gemiddelde faalkansen van de LPG-verlading bij LPG-tankstations in Nederland met het ASC-model moeten we corrigeren voor de Nederlandse kenmerken van de verlading.

##### 4.6.1 Kenmerken van de verlading van LPG in Nederland

De kenmerken van de verlading van LPG bij een Nederlands LPG-tankstation zijn beschreven in paragraaf 2.1. In Tabel 4.9 zijn de kenmerken vertaald naar invoerparameters voor het ASC-model. De hoeveelheid (*quantity transferred*) en verladingduur (*transfer duration*) zijn zo gekozen dat deze parameters en het hieruit volgende verladingdebit vallen binnen de ranges die door de sector zijn opgegeven (paragraaf 2.1). Omdat de door de sector opgegeven typische waarden voor deze parameters niet geheel intern consistent zijn, betekent dit dat voor de hoeveelheid een gemiddelde waarde wordt gebruikt, maar voor debiet en verladingduur de onderkant van de range.

Tabel 4.9 Invoerwaarden voor Nederlandse situatie, voor overige invoerwaarden wordt aangesloten bij de karakteristieken voor verlading in de VS (Tabel 4.6).

Parameter	Waarde	Bron/opmerking
Flow direction	Delivery	Enkel verlading bij tankstations (lossen van de tankauto) beschouwd.
Quantity transferred	6,6 ton	Uit paragraaf 2.1: typische verlading is 10.000-15.000 liter = 5,5 tot 8,25 ton. Gekozen voor $12 \text{ m}^3 = 6,6 \text{ ton}$ (dichtheid: $0,55 \text{ ton/m}^3$ ).
Transfer duration	0,5 h	Uit paragraaf 2.1: typische duur van verlading is 30-45 min. Gekozen voor 30 min. Dit geeft een verladingdebit van $13,2 \text{ ton/uur} = 400 \text{ liter/min}$ , binnen de opgegeven range (400-800 liter/min).
Hose diameter	44 mm	Uit paragraaf 2.1: typische diameter is 38-50 mm: gemiddeld 44 mm.
Passing movements	1	Dit aantal is onbekend. De waarde 1 sluit aan bij de situatie in de VS, de waarde 0 betekent dat er geen andere voertuigen in de buurt komen.

Parameter	Waarde	Bron/opmerking
Transfer location	Customer site	Deze waarde is gekozen om aan te sluiten bij 'flow direction' (enkel het lossen van de tankauto bij tankstations wordt beschouwd).
ESD	Automatic	Uit hoofdstuk 2: er is een computersysteem dat afwijkingen signaleert. Dit komt overeen met de 'automatic' ESD van het ASC-model (het beste systeem, met de grootste verlaging van de uitstroomduur).
ERC	ERC	Uit hoofdstuk 2: er is een elektronische/pneumatische bodemafsluiter op de tankauto, en overige elektronische/pneumatische afsluiters op het tankstation.

#### Opmerkingen:

- De tankauto is 15 minuten langer aanwezig dan de duur van de verlading. Dit verschil tussen verladingstijd en aanwezigheid wordt niet meegenomen in bij de invoer van de *user defined case* in het model (zie voetnoot 14 op pagina 30).
- De faaloorzaken *falen tankauto* en *overvullen tankauto* worden *niet* meegenomen omdat het falen van de tankauto valt onder de QRA-scenario's voor 'Intrinsiek falen tankauto' en overvullen tankauto niet kan plaatsvinden tijdens het lossen van de tankauto<sup>20</sup>.

#### 4.6.2

##### Modificatiefactoren

De invoergegevens voor de Nederlandse situatie (zie Tabel 4.6 en Tabel 4.9) bepalen de modificatiefactoren in het ASC-model waarmee de faalkansen berekend worden. De modificatiefactoren volgen direct uit de gekozen invoergegevens en hebben de volgende waarden:

- Hose = composite: 0,5.  
Deze waarde is *expert judgement* van ASC<sup>21</sup>. De modificatiefactor wordt toegepast op de faalkans van de faaloorzaak 'falen verlaadslang'.
- Transfer location = customer site: 1,2.  
Dit volgt uit het feit dat 60% van de 134 incidenten in de PHMSA-database plaatsvonden tijdens het lossen, en de aanname dat 50% van alle verladingen lossen betrof (60%/50% = 1,2). Deze modificatiefactor wordt toegepast op de faalkans van alle faaloorzaken.
- ESD = Automatic: 0,44.  
Dit volgt uit een ASC-analyse van incidenten tijdens verlading van olietankers (zie Appendix A van Spouge, 2024). Deze modificatiefactor wordt toegepast op de duur van de uitstroming in het *Reported Leak model*, niet op de faalkans. In het *Outflow*

<sup>20</sup> In het ASC-model wordt de faalkans van de faaloorzaak 'overvullen tankauto' automatisch op 0 gezet als gekozen is voor 'transfer location' = *customer site*.

<sup>21</sup> Voor de verlading van LPG is het gebruik van deze modificatiefactor mogelijk een overcorrectie. ASC neemt aan dat in de referentiepopulatie een composietlang wordt gebruikt. Toepassing van een modificatiefactor in een *user defined case* met hetzelfde type verlaadslang is daarom eigenlijk niet nodig. De invloed op de uiteindelijke faalkans van het gebruik van deze modificatiefactor is <5%.

*model* wordt het ESD-systeem meegenomen zoals besproken in paragraaf 4.5.2. Voor dit ESD-systeem zijn voor de kans op falen (0,001), de 'gemiddelde' uitstroomduur bij slagen (2 minuten) en falen (20 minuten) en de representatieve afwijking (2) de standaardwaarden uit het ASC-model gebruikt, waarbij ASC zo veel mogelijk heeft aangesloten bij de faalkansen en reactietijden voor automatische inbloksystemen uit de Handleiding Risicoberekeningen Bevi (RIVM, 2020).

- ERC = ERC: 1,05 voor 'falen verbinding' en 0,44 voor 'vroegtijdig wegrijden' en 'contact met ander voertuig'. Dit volgt uit een ASC-analyse van incidenten tijdens verlading van olietankers (zie Appendix A van Spouge, 2024). Deze modificatiefactor wordt toegepast op de faalkans van de faaloorzaken 'falen verbinding', 'vroegtijdig wegrijden' en 'contact met ander voertuig'.

#### 4.6.3 Resultaten

In Tabel 4.10 staan de faalkansen uit het *Reported Leak model* en het *Outflow model* voor verlading (lossen) van LPG bij LPG-tankstations in Nederland. De faalkansen die het ASC-model berekent, zijn voor alle breuken en lekken. Het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid geeft de faalkansen voor (mogelijk) EV-relevante breuken en lekken.

Tabel 4.10 Resultaten (faalkans per verlading van 0,5 uur) van de twee ASC-modellen *Reported Leak* en *Outflow*, op basis van alle (ook niet-EV-relevante) incidenten. Ter vergelijking zijn ook de voorgeschreven faalkansen uit het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid gegeven.

Scenario	Reported Leak model	Outflow model	Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid
Lek	$8,2 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-5}$
Breuk	$1,5 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-7}$
Totaal	$2,4 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	$2,02 \times 10^{-5}$

#### Opmerkingen:

- De gatgrootte van het scenario 'lek' is:
  - In het *Reported Leak model*: gelijk aan de representatieve lek grootte uit de incidentanalyse, ruwweg 10% van de diameter (zie paragraaf 4.3.2.2)
  - In het *Outflow model*: tussen 10% en 100% van de diameter.
  - In het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid: 10% van de diameter.
- De faalkans voor breuk uit het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid geldt voor de verbeterde verlaadslang. In de gebeurtenissenboom wordt dit scenario nog opgesplitst in breuk waarbij de doorstroombegrenzer werkt (kans 0,88) en breuk waarbij de doorstroombegrenzer faalt (kans 0,12) (Van der Linden en Stam, 2022).
- De totale faalkans per verlading in het *Outflow model*,  $4,5 \times 10^{-6}$ , is de som van de kansen voor breuk, lek en klein lek (respectievelijk minimaal 100%, 10% en 1% van de diameter). Het scenario klein lek wordt verder buiten beschouwing gelaten.

Figuur 4.4 toont de bijdrage van de verschillende faalorzaken aan de totale faalkans voor de twee verschillende ASC-modellen. Voor het *Reported Leak model* zijn de belangrijkste faalorzaken:

- voor lek: falen onderdelen tankauto, open klep en falen verbinding;
- voor breuk: open klep, vroegtijdig weggrijden en vroegtijdig loskoppelen.

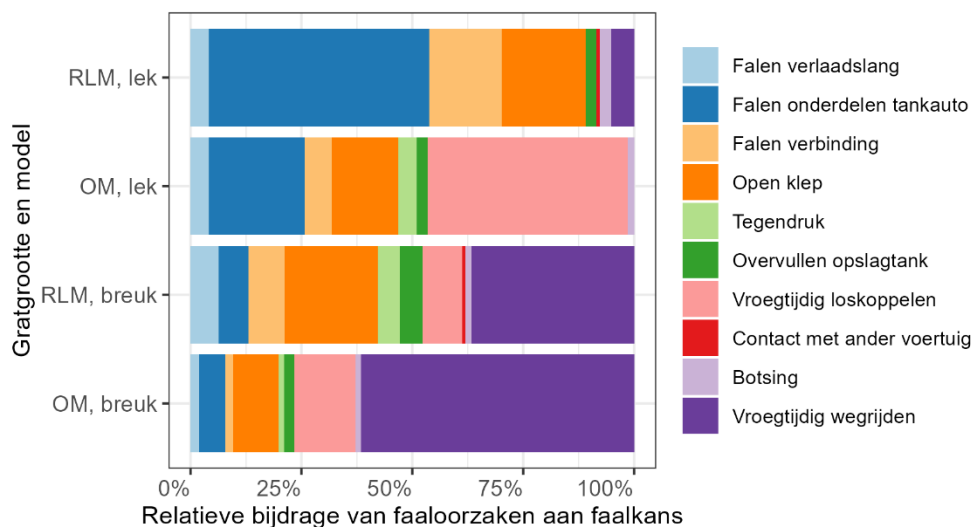
Voor het *Outflow model* zijn de belangrijkste faalorzaken

- voor lek: vroegtijdig loskoppelen, falen onderdelen tankauto en open klep;
- voor breuk: vroegtijdig weggrijden, vroegtijdig loskoppelen en open klep.

Volgens Figuur 4.4 wordt de kans op breuk voornamelijk bepaald door menselijk handelen (vroegtijdig weggrijden of loskoppelen, open klep) en in mindere mate door materieel falen (falen van verlaadslang, onderdelen tankauto of verbinding). Materieel falen draagt wel in grote mate bij aan de kans op lek (met name voor het *Reported Leak model*). Het falen van de verlaadslang draagt in alle gevallen beperkt bij aan de faalkans (de grootste bijdrage is 6%, voor de kans op breuk in het *Reported Leak model*).

Gezien de veiligheidsvoorzieningen en -procedures bij Nederlandse LPG-tankstations (Bijlage 1) kan het gerechtvaardigd zijn om de bijdrage te verkleinen van de faalorzaken die betrekking hebben op menselijk handelen<sup>22</sup>. De berekende faalkans voor met name breuk zal hierdoor lager worden. Indien de faalorzaken 'vroegtijdig weggrijden', 'vroegtijdig loskoppelen' en 'open klep' volledig buiten beschouwing worden gelaten, neemt de faalkans voor breuk af met ongeveer een factor 2 (*Reported Leak model*) tot ongeveer 6 (*Outflow model*).

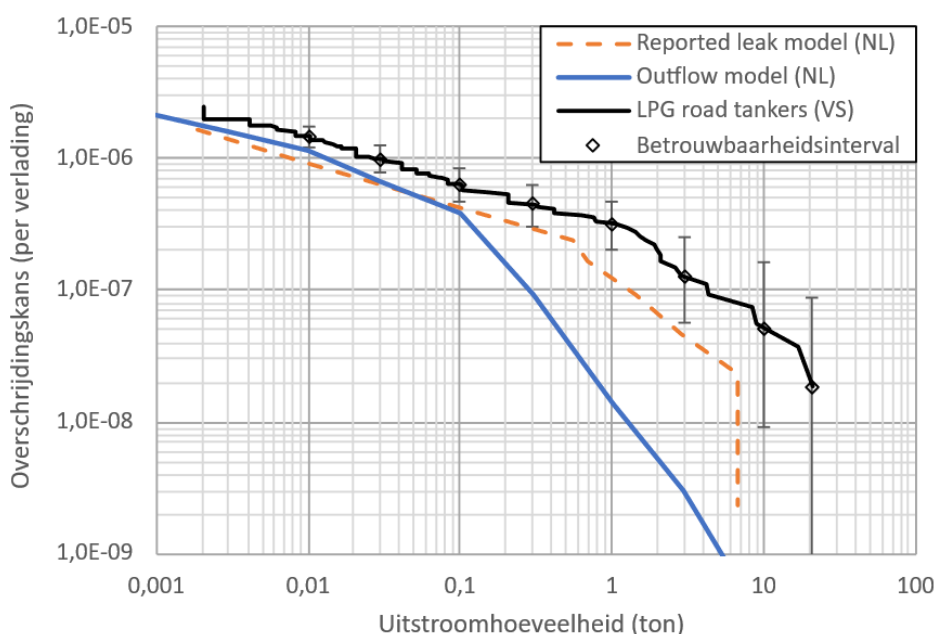
Figuur 4.4 Bijdrage van de verschillende faalorzaken aan de faalkans voor het *Reported Leak model* (RLM) en *Outflow model* (OM) voor breuk en lek.



<sup>22</sup> Het weglaten van faalorzaken in het ASC-model is eenvoudig. Voor het verkleinen van de bijdrage zijn (eenvoudige) wijzigingen nodig.

In Figuur 4.5 is de verdeling van uitstroomhoeveelheden weergegeven volgens de verschillende varianten: de gegevens voor de referentiepopulatie (paragraaf 4.4) in zwart, de uitkomsten voor het *Reported Leak model* (paragraaf 4.5.1) voor de Nederlandse situatie in oranje en de uitkomsten voor het *Outflow model* (paragraaf 4.5.2) voor de Nederlandse situatie in blauw.

*Figuur 4.5. Overschrijdingskansen voor uitstroomhoeveelheden volgens het ASC-model. Oranje: het Reported Leak model voor de Nederlandse situatie. Blauw: het Outflow model voor de Nederlandse situatie. Zwart: de data voor verladings in de VS in de periode 2000-2024, met 90% betrouwbaarheidsinterval (uitgaande van een Poisson-distributie).*



De vergelijking van de twee modellen voor de Nederlandse situatie met de oorspronkelijke dataset voor de situatie in de VS laat zien:

- Met beide ASC-modellen worden voor de Nederlandse situatie lagere overschrijdingskansen berekend dan de kansen die zijn bepaald voor de oorspronkelijke dataset.
- Boven 20 ton zijn er geen data in PHMSA (20 ton is 80% van de inhoud van de grootste Amerikaanse LPG-tankauto's, zie paragraaf 4.3.3.2). Het *Reported Leak model* geeft als grootste uitstroming 7 ton. Dit wordt veroorzaakt doordat enerzijds het verladingsdebiet in Nederland lager is (13 ton/h in plaats van 18 ton/h) en omdat de ESD voor Nederland als *automatic* is gekarakteriseerd. Dit geeft een modificatiefactor van 0,44 op de uitstroomduur en dus op de uitstroomhoeveelheid.

De gevoeligheid van een aantal aannames op de berekende faalkansen is onderzocht. Er is gekeken naar aannames die betrekking hebben op de referentiepopulatie (uit paragraaf 4.3.3: de verdeling bulkvervoer – verpakt vervoer, de grootte van de tankauto) en naar aannames die betrekking hebben op de Nederlandse situatie (uit Tabel 4.9: de diameter van de verlaadslang, de verladingsduur en de hoeveelheid die

wordt verladen). Voor de gevoeligheidsanalyse zijn invoerparameters aangepast van de typische waarde naar andere (nog steeds realistische) waarden. De resultaten zijn samengevat in Tabel 4.11. Uit de analyse blijkt dat:

- Het aanpassen van de invoerparameters voor de Nederlandse situatie geeft voor het *Reported Leak model* alleen beperkte veranderingen in de uitkomsten. Voor het *Outflow model* leidt het aanpassen van de verladingsduur tot een 50% hogere faalkans.
- De verandering in faalkans is groter wanneer parameters voor de referentiepopulatie worden aangepast. Dit komt omdat de onzekerheid in deze parameters relatief groot is, waardoor een grote range van realistische waarden mogelijk is.

Tabel 4.11 Samenvatting van de gevoeligheidsanalyse. De tabel geeft voor verschillende aangepaste parameters aan wat de faalkans is voor breuk en lek ten opzichte van Tabel 4.10. RLM = Reported Leak model, OM = Outflow model.

Aanpassing	RLM lek	RLM breuk	OM lek	OM breuk
Diameter verlaadslang (van 44 mm naar 50 mm) in <i>user defined case</i> (Nederlandse situatie)	100%	100%	93%	100%
Hoeveelheid verladen (van 6,6 naar 8,25 ton) in <i>user defined case</i> (Nederlandse situatie)	100%	100%	100%	100%
Verladingsduur (van 30 naar 45 min) in <i>user defined case</i> (Nederlandse situatie)	123%	106%	150%	150%
Fractie vervoer in bulk (van 43% naar 60%) in afleiding noemerdata (referentiepopulatie)	71%	71%	71%	71%
Omvang tankauto (van gemiddelde, 21,4 m <sup>3</sup> , naar mediaan, 11,4 m <sup>3</sup> ) in afleiding noemerdata (referentiepopulatie)	53%	53%	59%	55%

De onzekerheid in de berekende faalkansen wordt verder besproken in paragraaf 6.3.



## 5 RIVM-analyse LPG incidenten in PHMSA-database

### 5.1 Inleiding

De oorspronkelijke dataset van ASC bevatte 19 incidenten met LPG-tankauto's. Voor deze 19 incidenten heeft ASC de faaloorzaak en de gatgrootte ingeschat op basis van de incidentbeschrijvingen. Met andere filters op de PHMSA-database vond het RIVM 160 incidenten met LPG-tankauto's. Voor het afleiden van faalkansen volgens het ASC-model moest het RIVM de faaloorzaak en de gatgrootte van de 141 aanvullende incidenten achterhalen.

Het RIVM heeft deze gelegenheid aangegrepen om niet alleen de faaloorzaak en de gatgrootte in te schatten, maar ook enkele andere onderwerpen die voor een risicoanalyse relevant zijn, mee te nemen. Bijvoorbeeld vanuit welke installatie of installatie-onderdeel de uitstroming plaatsvond (bijvoorbeeld tankauto, verlaadslang of vaste leiding), en of het betreffende installatie-onderdeel bij aanvang van het incident geïsoleerd was of tijdens het incident alsnog geïsoleerd werd. Met die aanvullende kenmerken ontstaat een gedetailleerder beeld van de aard van de incidenten en de potentiële relevantie voor omgevingsveiligheid.

### 5.2 Algemene aanpak

De PHMSA-database en de gebruikte zoekcriteria zijn beschreven in paragraaf 4.3.2. De PHMSA-data bevatten voor elk incident een korte omschrijving, en velden voor welk onderdeel faalde (meerdere keuzes mogelijk), wat er gebeurde (zoals 'leaked', 'cracked' en 'ruptured'), en hoeveel product er vrijkwam. Op basis van deze informatie heeft het RIVM afgeleid of:

- het incident binnen de scope van het huidige onderzoek valt (verlading bij LPG-tankstations);
- het incident (potentieel) EV-relevant is;
- waar de uitstroming plaatsvond (zoals tankauto, verlaadslang, vulpunt, leidingwerk naar de opslagtank of opslagtank);
- welk specifiek onderdeel faalde;
- of het ging om een klein gat of opening (hierna 'lek') of het vrijkomen van product vanuit de volledige diameter van een leiding of verbinding (hierna 'breuk')<sup>23</sup>;
- wat de meest waarschijnlijke faaloorzaak was, waarbij aangesloten werd bij de faaloorzaken in het ASC-model;
- of het aannemelijk was dat het betreffende installatie-onderdeel bij aanvang van het incident geïsoleerd was;
- of de uitstroomduur door succesvolle noodmaatregelen (handmatig of automatisch) beperkt werd;
- of de uitstroomduur (heel) kort, beperkt of lang was.

Voor de meeste incidenten was de informatie te beperkt om de bovenstaande vragen nauwkeurig te beantwoorden. Verder leek niet alle

<sup>23</sup> De term 'breuk' dekt de lading niet helemaal. Het gaat eigenlijk om 'lek ter grootte van de volledige diameter'. Dit omvat ook incidenten waarbij een klep abusievelijk open staat of open wordt gezet. Desalniettemin is gekozen voor de term 'breuk' om de consistentie met het rekenvoorschrift te borgen.

informatie even betrouwbaar, in het bijzonder de uitstroomhoeveelheid (quantity released) en de bijbehorende eenheid (unit of measure). Desondanks ontstond er meestal wel een beeld van wat zich ongeveer heeft afgespeeld. Met minimaal twee collega's heeft het RIVM in onderling overleg keuzes gemaakt op basis van de beschikbare informatie. Als de informatie over een bepaald onderdeel heel summier was, heeft het RIVM 'onbekend' ingevuld.

### 5.3 Nadere selectie

Van de 160 incidenten in de PHMSA-database die betrekking hadden op LPG (UN 1075) vonden er 101 plaats tijdens het lossen van de tankauto (c.q. vullen van de opslagtank) en 59 tijdens het laden van de tankauto. De aard van de verlading (laden of lossen) is een invoerveld in de PHMSA-database en hoeft dus niet te worden gehaald uit de incidentbeschrijving.

Voor de 101 incidenten tijdens het lossen is nader beschouwd of ze relevant zijn voor het afleiden van faalkansen voor het lossen van LPG in Nederland bij LPG-tankstations, bedrijven of particulieren (zie Tabel 5.1). Daarbij vielen 59 incidenten af, omdat ze buiten de scope van de faalkansen voor LPG-verlading vielen (27 keer) of omdat de uitstroming niet relevant wordt geacht voor de Externe Veiligheid (32 keer). Voor 42 incidenten werden de oorzaken en omstandigheden wel voldoende relevant geacht voor het afleiden van faalkansen.

Tabel 5.1 Eerste uitsplitsing van de incidenten in de PHMSA-database.

Classificatie incident	Aantal incidenten
Bij laden tankauto	59
Bij lossen tankauto	101
Buiten scope LPG-verlading	27
Materieel falen opslagtank	5
Materieel falen leidingwerk	2
Materieel falen tankauto	1
Vullen cilinders	7
Niet-representatieve handelingen	4
Niet-representatieve omstandigheden	4
Overig buiten scope	4
Uitstroming niet EV-relevant	32
Slang bij aanvang geïsoleerd	24
Afblazen van gas	8
Binnen scope en potentieel EV-relevant	42
Totaal	160

De 27 incidenten 'buiten scope' zijn om de volgende redenen niet meegenomen:

- Bij vijf incidenten faalde de opslagtank door materiële oorzaken zoals corrosie. Deze oorzaken worden meegenomen in het intrinsiek falen van opslagtanks.
- Bij twee incidenten faalde een vaste leiding door materiële oorzaken zoals corrosie. Deze oorzaken worden meegenomen in het intrinsiek falen van leidingen.

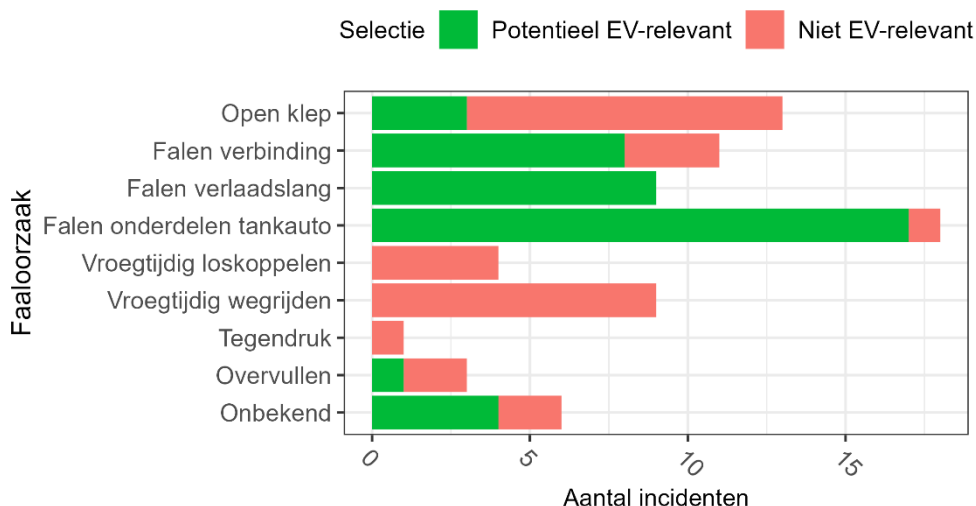
- Bij één incident faalde de tankauto door materiële oorzaken zoals corrosie. Deze oorzaken worden meegenomen in het intrinsiek falen van tankauto's.
- Zeven incidenten vonden plaats bij het vullen van cilinders, waarbij het product vrijkwam bij de koppeling met de cilinder. Het vullen van een cilinder is een heel andere activiteit.
- Vier incidenten met 'niet-representatieve handelingen'. Het betreft het moedwillig (en deels volgens procedure) afblazen van LPG (2 keer), het uitvoeren van een emmertest (1 keer) en het verladen naar een opslagtank die buiten gebruik is (1 keer). Afblazen van LPG wordt niet gedaan of zou buiten de grenzen van het tankstation geen ernstige effecten mogen hebben. De andere twee handelingen worden bij Nederlandse tankstations niet uitgevoerd.
- Bij vier incidenten waren de omstandigheden niet representatief voor Nederlandse tankstations. Het ging om twee incidenten met opstelplaatsen in bergachtig terrein, een levering aan een woonhuis en een incident tijdens het rijden van de tankauto over een fabrieksterrein.
- Vier incidenten werden om andere reden niet relevant geacht. Het betrof een incident tijdens wegtransport, een incident met diesel, een lekkage in het motorblok van de tankauto en een incident tijdens reparatiewerkzaamheden.

Daarnaast waren en nog 32 incidenten die wel tijdens reguliere LPG-verlading plaatsvonden, maar die niet relevant worden geacht voor de Externe Veiligheid (EV). Dit betreft:

- Bij 24 incidenten kwam alleen de inhoud van een verlaadslang vrij omdat de verlaadslang bij aanvang van het incident ingeblokt was (afsluiters naar tankauto en richting opslagtank waren gesloten). Bij deze incidenten is er geen nalevering van LPG richting het lek. Bij een groot lek neemt de druk in de slang snel af. De omvang van de brandbare wolk is beperkt en niet EV-relevant.
- Bij acht incidenten is gas afgeblazen via een noodventiel of ander afblaassysteem. Voor een gasuitstroom vanuit een ontworpen uitstroomlocatie wordt aangenomen dat het geen grote gevolgen heeft voor de omgeving. Zo moeten bijvoorbeeld de overdrukbeveiligingen op het reservoir voorzien zijn van een verticale afvoerpijp die minimaal 2 m boven maaiveld is (PGS-richtlijn 16, 2021).

De verdere analyse richt zich op de 42 incidenten die wel als relevant werden beschouwd. De selectiecriteria hebben invloed op de verdeling over faaloorzaken van de incidenten in de resterende dataset, zoals ter illustratie is weergegeven in Figuur 5.1. Ook andere parameters, zoals gemiddelde uitstroomhoeveelheid, hangen af van de selectiecriteria.

Figuur 5.1 Verdeling van 42 potentieel EV-relevante en 32 niet-EV relevante incidenten over verschillende faaloorzaken. Voor de faaloorzaken is aangesloten bij het ASC-model (Tabel 4.2).



#### 5.4 Analyse van de 42 geselecteerde incidenten

De analyse in deze paragraaf heeft betrekking op de 42 geselecteerde incidenten: incidenten tijdens het lossen van LPG, waarvan oorzaken en omstandigheden niet afwijken van wat in Nederland voorstelbaar is, en waarvan de gevolgen potentieel (bijvoorbeeld zonder succesvolle mitigerende maatregelen) relevant kunnen zijn voor de externe veiligheid (zie vorige paragraaf).

De locatie van de uitstroming is weergegeven in Tabel 5.2. De meeste incidenten vinden plaats bij de tankauto (n=20), gevolgd door de verlaadslang (n=8) en het vulpunt (n=6). De incidenten bij de tankauto blijken betrekking te hebben op toebehoren van de tankauto. Bij de opslagtank (n=2) of vaste leidingen (n=1) zijn minder incidenten, deels omdat materieel falen van die installatie-onderdelen buiten beschouwing wordt gelaten. Bij opslagtanks is ook het afblazen van gas niet meegenomen<sup>24</sup> (niet 'EV-relevant'). Voor vijf incidenten is de uitstroomblocatie onbekend: de incidentbeschrijving maakte niet duidelijk waar de lekkage precies plaatsvond.

Tabel 5.2 Locatie van de uitstroming.

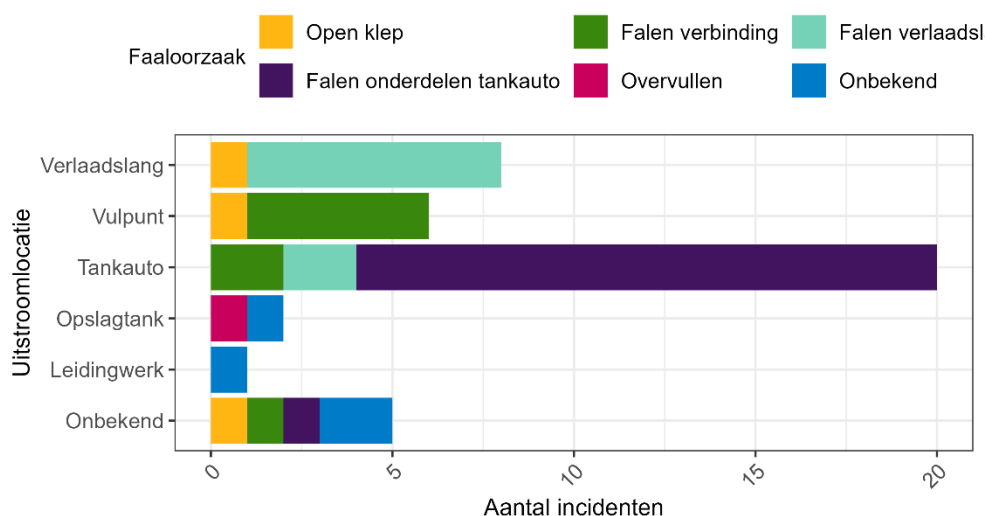
Locatie	Onderdeel	Aantal	Fractie
Verlaadslang (n=8)	Afsluiter	1	2%
	Slang	7	17%
Vulpunt (n=6)	Klep	1	2%
	Koppeling	5	12%
Tankauto (n=20)	Aansluiting verlaadslang	3	7%
	Filter	1	2%
	Flens	2	5%

<sup>24</sup> Bij het ene incident met uitstroming vanuit het noodventiel op de opslagtank is het niet bekend of er gas of vloeistof is vrijgekomen. Bij dit incident is een dodelijk slachtoffer gevallen. De uitstroomblocatie is niet gerapporteerd. Voorzichtigheidshalve is het incident meegenomen in deze analyse.

Locatie	Onderdeel	Aantal	Fractie
	Leiding	2	5%
	Meter	2	5%
	Pomp	9	21%
	Slang	1	2%
Opslagtank (n=2)	Aansluiting	1	2%
	Noodventiel	1	2%
Leidingwerk (n=1)	Flexibele leiding	1	2%
Onbekend (n=5)	Klep	1	2%
	Instrumentleiding	1	2%
	Onbekend	3	7%
<b>Totaal</b>		<b>42</b>	<b>100%</b>

De faaloorzaken van de 42 geselecteerde incidenten zijn weergegeven in Figuur 5.2. De incidenten bij de tankauto en de verlaadslang ontstaan vooral door materiële defecten. De incidenten bij het vulpunt ontstaan vooral door het falen van de verbinding. De verbinding kan falen door materiële oorzaken (zoals slijtage), door menselijke fouten (onvoldoende sterk aandraaien) of een combinatie van beide.

Figuur 5.2 Faaloorzaken met onderscheid naar uitstroomlocatie.

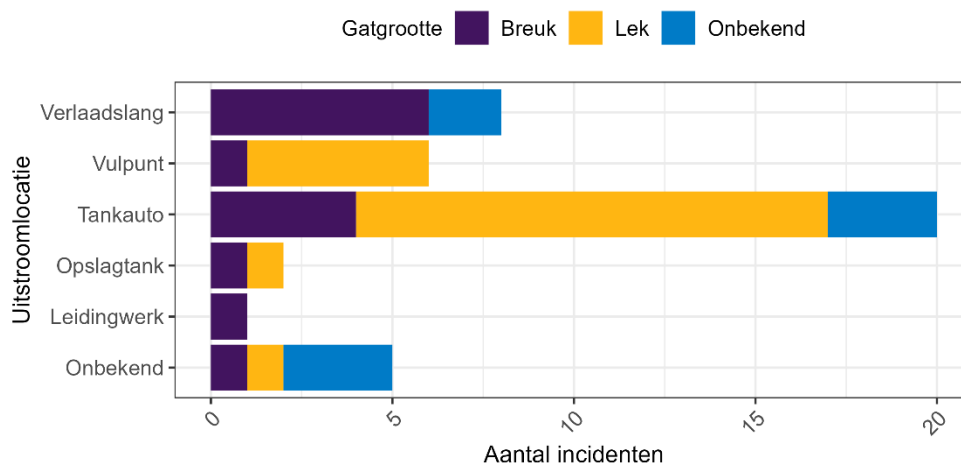


De indicatieve gatgrootte (breuk<sup>25</sup>, lek of onbekend) is weergegeven in Figuur 5.3. Deze gatgrootte is ingeschat door het RIVM op basis van de incidentbeschrijvingen en het gerapporteerde uitstroomvolume. De categorie 'breuk' is een verzamelnaam voor incidenten waarbij de gatgrootte bij benadering gelijk is aan de volledige diameter van een leiding of verbinding. Het betreft vooral incidenten waarbij een onderdeel scheurt ('ruptured'), waarbij een verbinding faalt of waarbij een klep volledig open staat. Lek gaat om incidenten waarbij voldoende duidelijk is dat de gatgrootte veel kleiner is dan de volledige diameter. Regelmatig is de incidentbeschrijving te summier voor een goede inschatting (bijvoorbeeld 'hose failed'). In dat geval is 'onbekend' ingevuld.

<sup>25</sup> De term 'breuk' dekt de lading niet helemaal. Het gaat eigenlijk om lekkages met een gatgrootte ter grootte van de volledige diameter van een leiding of verbinding. Zie ook voetnoot 23 op pagina 42.

Volgens de analyse van het RIVM was er bij 20 incidenten (48%) sprake van een lek, en bij 14 incidenten (33%) van een breuk (lek ter grootte van de volledige diameter). Bij de resterende 8 incidenten (19%) was de gatgrootte onvoldoende duidelijk. Bij de tankauto en het vulpunt is er verhoudingsgewijs vaak sprake van een lek. De meeste breuken vonden plaats bij de verlaadslang.

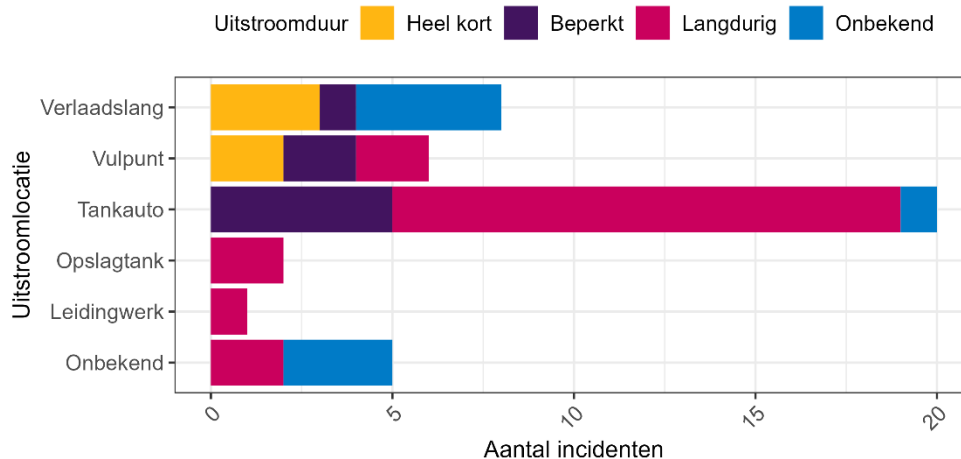
*Figuur 5.3 Indicatieve gatgrootte met onderscheid naar uitstroomblocatie.*



De indicatieve uitstroomblocatie (heel kort, beperkt, langdurig of onbekend) is weergegeven in Figuur 5.4. Deze uitstroomblocatie is door het RIVM ingeschat op basis van de incidentomschrijving en het gerapporteerde uitstroomvolume. De uitstroomblocatie is 'heel kort' als er vrijwel direct een noodmaatregel geactiveerd wordt (hetzij automatisch, hetzij door het bedienen van een knop). Bij het dichtdraaien van een klep of het vertraagd activeren van een noodstelsel is de uitstroomblocatie 'beperkt', en anders 'langdurig'. Onbekend heeft vooral betrekking op incidenten met een heel korte incidentbeschrijving (te weinig detail).

Voor de geselecteerde incidenten is de uitstroomblocatie overwegend langdurig (n=21), beperkt (n=8) of onbekend (n=8). Incidenten met een heel korte uitstroomblocatie komen maar weinig voor binnen de selectie (n=5), deels omdat incidenten waarbij de slang bij aanvang al geïsoleerd was, buiten de selectie vallen (zie Tabel 5.1).

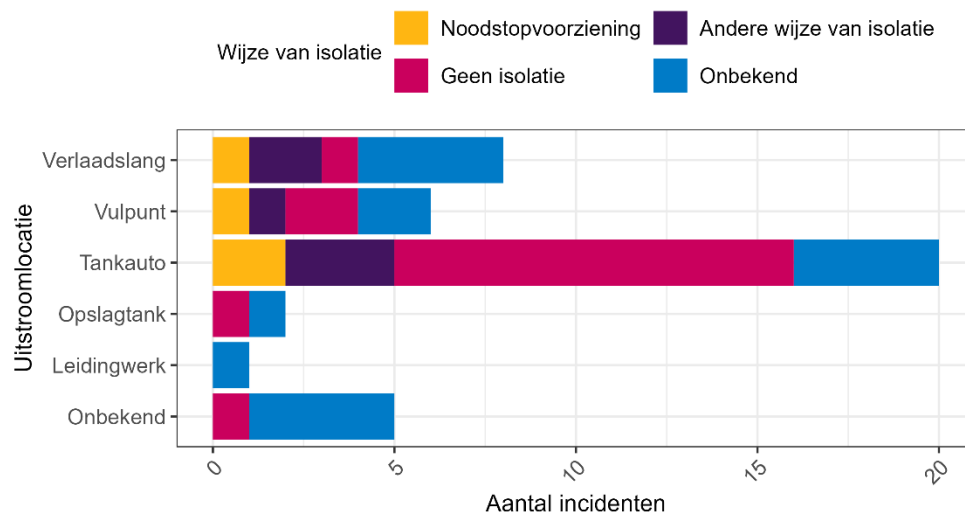
Figuur 5.4 Indicatieve uitstroomduur met onderscheid naar uitstroomblocatie.



In Figuur 5.5 is weergegeven of de uitstroomduur beperkt is door succesvolle isolatiemaatregelen. De wijze van isolatie is door het RIVM geanalyseerd, op basis van de incidentbeschrijvingen. Succesvolle isolatie vindt plaats via noodstopvoorzieningen (automatisch of semi-automatisch) of door het dichtzetten of dichtdraaien van afsluiters ('andere wijze van isolatie'). De categorie 'geen isolatie' betreft langdurige incidenten waarbij binnen afzienbare tijd (indicatief: tien minuten) geen succesvolle isolatiemaatregelen getroffen werden. De categorie 'onbekend' betreft incidenten waarvoor te weinig informatie beschikbaar was voor een goede inschatting.

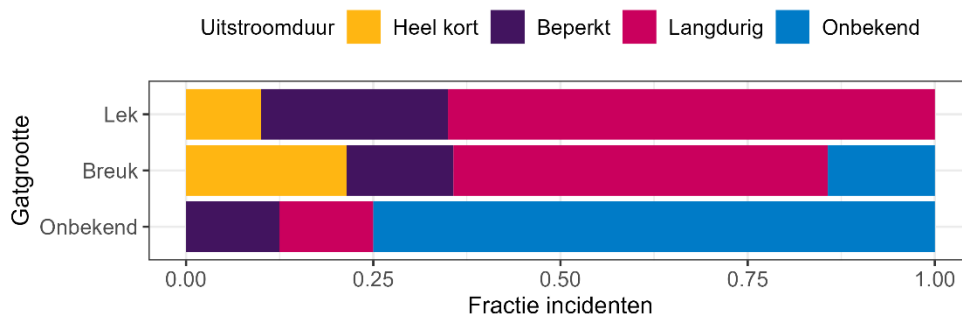
Bij vier incidenten werd een noodstopvoorziening succesvol geactiveerd, en bij zes incidenten werd de uitstroming op een andere manier beperkt. Bij zestien incidenten werd de uitstroming volgens de analyse niet binnen afzienbare tijd beperkt, en voor zestien andere incidenten was de informatie te beperkt voor een inschatting (categorie 'onbekend'). Vooral bij de tankauto zijn er relatief veel incidenten waarbij de uitstroming niet met maatregelen beperkt wordt (zie Figuur 5.5).

Figuur 5.5 Wijze van isolatie met onderscheid naar uitstroomblocatie.



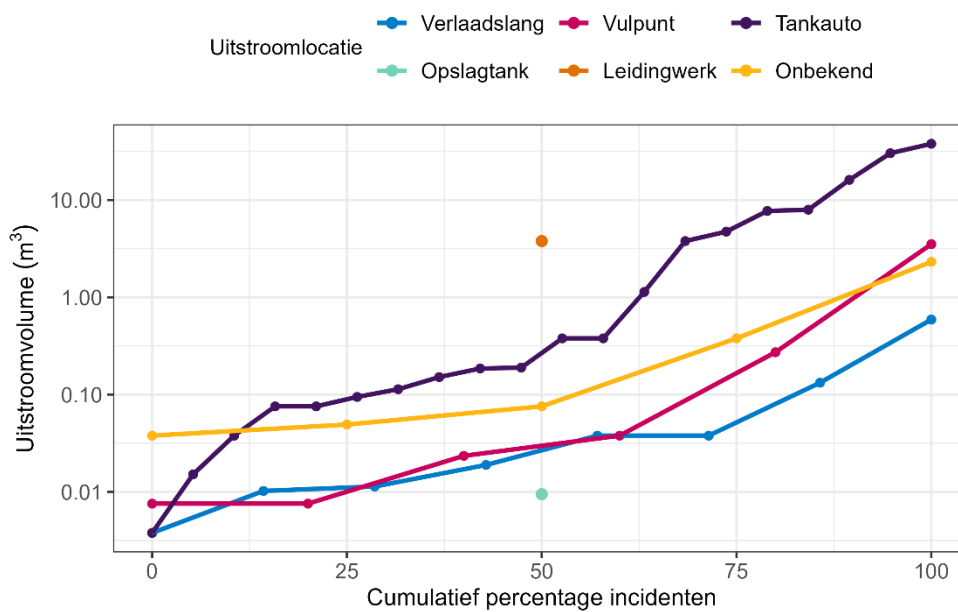
In Figuur 5.6 is de verdeling van indicatieve uitstroomduren voor de verschillende (indicatieve) gatgrootten weergegeven. Vooral het aandeel 'onbekend' verschilt tussen de drie. Overige verschillen zijn niet significant.

Figuur 5.6 Verdeling van uitstroomduur per gatgrootte.



Figuur 5.7 toont het uitstroomvolume van de geselecteerde incidenten in oplopende volgorde, en met onderscheid naar de verschillende uitstroomblocaties. De y-as is logaritmisch. Het uitstroomvolume is voor incidenten bij de tankauto gemiddeld groter dan bij de overige incidenten. Verder heeft ook het ene incident met locatie 'leidingwerk' een relatief groot uitstroomvolume.

Figuur 5.7 Uitstroomvolumes van incidenten met onderscheid naar uitstroomlocatie. De y-as is logaritmisch. Voor de locaties 'leidingwerk' en 'opslagtank' is maar één waarde bekend. Ten behoeve van de zichtbaarheid is die waarde in het midden (bij 50%) weergegeven.



## 5.5 Vertaling naar QRA scenario's

In het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid worden voor leidingen en slangen twee scenario's meegenomen: breuk en lek. Breuk<sup>26</sup> betreft incidenten met een gatgrootte ongeveer gelijk aan de volledige diameter. Lek betreft incidenten met een veel kleinere gatgrootte, bijvoorbeeld 10% van de volledige diameter. Verder kan de uitstroomduur in de QRA beperkt worden als het aannemelijk is dat die beperkt kan worden door een succesvolle noodmaatregel, zoals een automatische of semi-automatische noodstopvoorziening.

Voor de vertaling van incidenten naar faalkansen zijn drie vragen van belang:

1. Kunnen de incidenten voor de verschillende uitstroomlocaties samengevoegd worden of niet?
2. Hoe kunnen incidenten met onbekende gatgrootte verdeeld worden over de twee categorieën 'lek' en 'breuk'?
3. Over hoeveel categorieën moet de uitstroomduur verdeeld worden? En hoe kunnen incidenten met onbekende uitstroomduur worden verdeeld over die categorieën?

Voor de afleiding van faalkansen voor QRA-scenario's wordt alleen gekeken naar de 42 incidenten die binnen de scope van dit onderzoek vielen en die 'potentieel EV-relevant' worden geacht (zie paragraaf 5.3). In het bijzonder zijn incidenten waarbij alleen de inhoud van een verlaadslang vrijkwam, omdat de slang bij aanvang van het incident ingesloten was, buiten beschouwing gelaten.

<sup>26</sup> Het kan ook gaan om incidenten waarbij een klep abusievelijk open stond. De term 'breuk' moet niet letterlijk worden opgevat.

### 5.5.1 *Uitstroomlocaties*

Wat betreft de uitstroomlocatie valt vooral het relatief grote aantal incidenten bij de tankauto op: 20 van de 42 (zie Tabel 5.2). Deze incidenten onderscheiden zich verder door relatief grote uitstroomhoeveelheden (Figuur 5.7), en daarmee samenhangend relatief lange uitstroomduren (Figuur 5.4) door het ontbreken van effectieve noodmaatregelen (Figuur 5.5). Overigens worden er voor het intrinsiek falen van de tankauto al aparte scenario's meegenomen in de QRA.

De incidenten bij de verlaadslang en het vulpunt kunnen samengenomen worden omdat het min of meer om dezelfde incidentlocatie gaat en de gatgrootten en uitstroomduren ook redelijk overeenkomen (voor zover de beperkte statistiek het toelaat om daar een uitspraak over te doen). In totaal gaat het om veertien incidenten.

De incidenten bij het leidingwerk (n=1) en de opslagtank (n=2) worden vanwege de specifieke locaties apart beschouwd: het leidingwerk en de opslagtank liggen niet per sé dichtbij het vulpunt en de tankauto. Het gaat in totaal om drie incidenten. Overigens worden er voor vaste leidingen en voor opslagtanks al aparte scenario's meegenomen in de QRA.

Tot slot zijn er nog vijf incidenten met onbekende uitstroomlocatie. Deze worden samen genomen met de incidenten bij de verlaadslang en het vulpunt. Op die manier komt de locatie van de uitstroming 'in het midden' te liggen: ergens tussen de tankauto en de opslagtank in.

### 5.5.2 *Uitstroomduur en gatgrootte*

Volgens het rekenvoorschrift is de maximale blootstellingsduur bij een brand 20 s. Daarom kunnen alle incidenten met een uitstroomduur langer dan 20 s samengenomen worden: de exacte uitstroomduur is voor de berekende effecten dan niet relevant. Voor kortere incidenten is de uitstroomduur wel relevant, omdat die de dosis van de ontvangen warmtestraling beïnvloedt, en daarmee de verwachte overlijdenskans.

Het RIVM heeft de informatie uit de PHMSA-database gebruikt om in te schatten of de uitstroming naar verwachting korter of langer dan 20 s duurde. Dit is ook gedaan als er maar heel weinig informatie beschikbaar was. Er is dus geen categorie 'onbekend' meer, dit in tegenstelling tot de algemene analyse van incidenten in paragraaf 5.4.

Ook de gatgrootte is opnieuw ingeschat op basis van de informatie uit de PHMSA-database, met nu alleen de keuzemogelijkheden 'lek' en 'breuk', dus zonder 'onbekend'.

Voor de twintig incidenten bij de tankauto is de verdeling naar gatgrootte en uitstroomduur weergegeven in Tabel 5.3. Volgens de analyse van het RIVM was er vier keer sprake van een breuk en zestien keer sprake van een lek. Bij alle twintig incidenten was de uitstroomduur minstens 20 s. Incidenten bij de tankauto, zoals lekkages vanuit verbindingen en leidingen op de tankauto, worden dus in het algemeen niet snel gestopt.

Tabel 5.3 Verdeling van incidenten bij de tankauto naar gatgrootte en uitstroomduur.

Gatgrootte	Uitstroomduur < 20 s	Uitstroomduur > 20 s
Lek	-	16
Breuk	-	4

Voor de negentien incidenten bij de verlaadslang, het vulpunt of onbekende locatie (zie paragraaf 5.5.1) is de verdeling naar gatgrootte en uitstroomduur weergegeven in Tabel 5.4. Volgens de analyse van het RIVM was er acht keer sprake van een breuk en elf keer sprake van een lek. Het merendeel van de lekkages had een uitstroomduur langer dan 20 s. Voor breuken zijn de aantallen incidenten met korte of lange uitstroomduur bijna gelijk.

Tabel 5.4 Verdeling van incidenten bij de verlaadslang en het vulpunt (inclusief 5 incidenten met onbekende locatie) naar gatgrootte en uitstroomduur.

Gatgrootte	Uitstroomduur < 20 s	Uitstroomduur > 20 s
Lek	2	6
Breuk	6	5

Tot slot is er nog één relevant incident met een flexibele leiding gevonden en twee incidenten bij de opslagtank. Het incident met de flexibele leiding betreft een breuk met langdurige uitstroming die uiteindelijk ontstak en daarbij een gaswolkbrand gaf met vuurbalverschijnselen. Bij de opslagtank ging het om (1) een lek vanuit leidingwerk op de tank en (2) een vloeistofuitstroming vanuit het noodventiel. Beide incidenten duurden naar verwachting langer dan 20 s.

### 5.5.3

#### Faalkansen

Voor de faalkansen worden de relevante aantallen incidenten (paragraaf 5.5.2) gedeeld door het geschatte aantal verladingen in de Verenigde Staten in de periode tussen 2000 en 2024. Het totale aantal verladingen (alleen lossen) wordt ingeschat op 27 miljoen (zie paragraaf 4.3.3). De onzekerheid in die schatting is aanzienlijk (zie paragraaf 6.3.1 voor meer informatie).

De resulterende faalkansen zijn weergegeven in Tabel 5.5. De totale kans op een lek bij de tankauto, de slang of het vulpunt is  $8,9 \times 10^{-7}$  per verlading en de totale kans op een leidingbreuk bij de tankauto, de slang of het vulpunt  $5,6 \times 10^{-7}$  per verlading.

Tabel 5.5 Resulterende faalkansen per verlading voor de gekozen scenario's.

QRA onderdeel	Gatgrootte	Uitstroomduur		
		Kort	Niet kort	Totaal
Tankauto	Lek	-	$5,9 \times 10^{-7}$	$5,9 \times 10^{-7}$
	Breuk	-	$1,5 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-7}$
Slang/vulpunt	Lek	$7,4 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-7}$	$3,0 \times 10^{-7}$
	Breuk	$2,2 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-7}$	$4,1 \times 10^{-7}$

Voor de drie overige incidenten (één met een flexibele leiding en twee bij de opslagtank) is de faalkans, voor elk incident afzonderlijk,  $3,7 \times 10^{-8}$  per verlading.

Net als in paragraaf 4.6.3 is de gevoeligheid van aannames op berekende faalkansen kort onderzocht. De faalkansen hangen af van het aantal incidenten en het geschatte aantal verladingen.

- Het aantal incidenten hangt af van de incidentmeldingen (PHMSA-database) en de keuze om een deel van de gerapporteerde incidenten verder buiten beschouwing te laten. Met een ruimere definitie voor relevante incidenten (bijvoorbeeld inclusief incidenten met handelingen en omstandigheden die in Nederland ongebruikelijk zijn, inclusief incidenten waarbij alleen de inhoud van de vulslang vrijkomt en inclusief incidenten waarbij gas werd afgeblazen) was het aantal incidenten maximaal twee keer zo groot geweest.
- Het geschatte aantal verladingen is vooral gevoelig voor de veronderstelde omvang van de tankauto en de inschatting voor de fractie van LPG dat in bulk vervoerd wordt (zie paragraaf 4.6.3). Met andere aannames kan de berekende faalkans een factor twee lager worden (Tabel 4.11).

De onzekerheid in de berekende faalkansen wordt verder besproken in paragraaf 6.3.

## 6 Discussie en beoordeling

In de vorige hoofdstukken zijn de faalkansen voor verlading van LPG bij een LPG-tankstation in Nederland op drie verschillende manieren afgeleid, namelijk met het *ASC Reported Leak model*, het *ASC Outflow model* en de RIVM-analyse. In alle drie benaderingen wordt gebruik gemaakt van de incidentdata uit de PHMSA-database. In dit hoofdstuk worden de resultaten vergeleken, wordt de onzekerheid ingeschat en worden de verschillende benaderingen geanalyseerd aan de hand van de criteria validiteit en betrouwbaarheid. Ten slotte wordt beoordeeld welke faalkansen het beste van toepassing zijn voor de Nederlandse LPG-tankstations.

### 6.1 Vergelijking van de benaderingen

De PHMSA-incidentendatabase beschrijft de incidenten bij de verlading van LPG in de VS. De incidenten zijn op verschillende manieren gefilterd voor de afleiding van faalkansen.

Het ASC-model gebruikt in beginsel alle incidenten uit de PHMSA-database die gedownload zijn. Het RIVM heeft daarna alleen incidenten bij andere activiteiten, zoals bij het vullen van gascilinders of tijdens transport, uit de dataset verwijderd. In het bijzonder wordt er geen filter gebruikt voor minimale uitstroomduur of uitstroomhoeveelheid. Daardoor worden ook alle incidenten waarbij alleen de inhoud van de (ingeblokke) verlaadslang vrijkomt, meegenomen in de analyse.

Het RIVM heeft vervolgens dezelfde incidenten in meer detail bekeken (hoofdstuk 5). Daarbij bleek dat een aanzienlijk deel van de incidenten naar verwachting niet relevant was voor externe veiligheid, omdat het effectgebied waarschijnlijk heel beperkt zou zijn. Bijvoorbeeld incidenten waarbij alleen de inhoud van de verlaadslang vrijkwam en incidenten waarbij gas vrijkwam via een noodventiel. Voor het afleiden van faalkansen in de RIVM-analyse zijn deze incidenten niet gebruikt.

### 6.2 Vergelijking van de resultaten

In Tabel 6.1 zijn de faalkansen van de drie verschillende benaderingen en het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid met elkaar vergeleken.

*Tabel 6.1 Vergelijking van de faalkansen uit het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid (Rekenvoorschrift) per verlading van 0,5 uur met de drie verschillende benaderingen uit dit rapport (Reported Leak, Outflow, RIVM-analyse).*

<b>Gat-grootte</b>	<b>Rekenvoorschrift</b>	<b>Reported Leak model</b>	<b>Outflow model</b>	<b>RIVM-analyse</b>
Lek	$2 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-6}$	$8,9 \times 10^{-7}$
Breuk	$2 \times 10^{-7}$	$1,5 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-7}$	$5,6 \times 10^{-7}$

## Opmerkingen:

- De bijdragen van het materieel falen van onderdelen van de tankauto (pompen, flenzen, e.d.) zijn meegenomen in de scenario's lek en breuk bij de verlading. De bijdrage van materieel falen van de tankauto zelf (faaloorzaak in het ASC-model: *falen tankauto*) is niet meegenomen.
- De faalkansen voor het *Outflow model* gelden voor een lek met minimaal 10% diameter.
- Bij de RIVM-analyse is alleen gekeken naar de EV-relevante incidenten (42 incidenten van in totaal 74 incidenten binnen de scope tijdens het lossen van de tankauto). Bij het *Reported Leak* en *Outflow model* zijn alle incidenten meegenomen.

De vergelijking laat zien dat de drie verschillende benaderingen op basis van de PHMSA-database leiden tot een hogere kans voor het breukscenario (factor drie tot acht) in vergelijking met het Rekenvoorschrift. De kans op het lekscenario is daarentegen ongeveer een factor twintig lager dan in het Rekenvoorschrift.

In de nieuwe analyses is de kans op een lek half zo groot (*Reported Leak* model) tot twee keer zo groot (*Outflow model*) als de kans op breuk. In het Rekenvoorschrift is de kans op lek een factor 100 groter dan de kans op breuk. In het verleden was in het Rekenvoorschrift de kans op het lekscenario standaard een factor tien groter dan de kans op het breukscenario (expert judgement). Naar aanleiding van het TNO-onderzoek naar de verbeterde verlaadslang is de kans op het breukscenario verlaagd met een factor 10 (RIVM, 2006), en is de kans op het lekscenario ongewijzigd gebleven, waardoor het verschil een factor 100 werd. Een eventuele verlaging van de kans op het lekscenario door de verbeterde verlaadslang is indertijd niet onderzocht omdat de effectafstand van het lekscenario kleiner is dan 15 m en daarmee niet relevant is voor de risico's op grotere afstand. Dit maakt aannemelijk dat de kans op het lekscenario overschat wordt in het Rekenvoorschrift.

## 6.3 Onzekerheden

De afleiding van de faalkansen voor de verlading van LPG bij LPG-tankstations in Nederland kent een aantal onzekerheden. De belangrijkste worden in deze paragraaf aangegeven.

### 6.3.1 Onzekerheid in de activiteitsgegevens

In het bepalen van het aantal verladingen per jaar zijn er verschillende onzekerheden, waaronder:

- De fractie van vervoer in bulk is bepaald op basis van de uitgestroomde hoeveelheid bij verladingincidenten. Het is echter onbekend of de kans op uitstroming bij bulkverlading kleiner of groter is dan bij verlading van verpakkingen. Ook kan de gemiddelde uitstroomhoeveelheid bij bulkverlading groter zijn dan bij verlading van verpakkingen.
- De capaciteit van een LPG-tankauto is gelijkgesteld aan de gemiddelde capaciteit in de PHMSA-database, 21,4 m<sup>3</sup>. De mediaan is echter bijna een factor 2 kleiner, 11,4 m<sup>3</sup>.
- Het aantal keren lossen per tankauto(-rit) is gelijkgesteld aan één. In Nederland is dit typisch drie keer lossen per rit. Wel is de

gemiddelde capaciteit van de tankauto in de Verenigde Staten kleiner.

Er zijn enkele conservatieve keuzes gemaakt (gemiddelde capaciteit in plaats van mediane capaciteit van de tankauto, één keer lossen per tankauto-rit) waardoor het aantal verladingen eerder te laag is ingeschat en dus de faalkansen eerder te hoog.

### 6.3.2 *Onzekerheid in de incidentgegevens*

De onzekerheid in het aantal incidenten schatten we verhoudingsgewijs laag in omdat er een meldingsplicht is. De verwachting is daarom dat zeker de incidenten met grote (EV-relevante) uitstroomhoeveelheden gerapporteerd zullen worden. Een ander aspect is de keuze welke incidenten wel of niet meegenomen worden. In hoofdstuk 5 bleek bijvoorbeeld dat er 24 incidenten waren waarbij alleen de inhoud van de loslang vrijkwam. Verder waren er twaalf incidenten met handelingen of omstandigheden die voor Nederlandse LPG-tankstations niet relevant worden geacht. Het meenemen of weglaten van zulke incidenten scheelt ongeveer een factor twee in de faalfrequentie.

### 6.3.3 *Onzekerheid in de verdelingen*

De informatie in de incidentrapportages is beperkt waardoor er onzekerheden zijn in de faaloorzaak, de verdeling breuk/lek en de uitstroomhoeveelheid. Een verfijning naar kansverdelingen over gatgrootten per faaloorzaak is onnauwkeurig en moet hooguit indicatief gebruikt worden. Daarnaast is aangenomen dat alle gerapporteerde uitstroomhoeveelheden, zowel in GCF ('Gas Cubic Feet') als in LGA ('liquid gallon'), volumes vloeistof betreffen. Dit geeft een grote onzekerheid bij het omrekenen van volume naar massa.

### 6.3.4 *Onzekerheid in de vertaling naar de Nederlandse situatie*

De activiteit- en incidentgegevens zijn afkomstig van een dataset uit de Verenigde Staten en gelden voor de situatie daar. De data zijn specifiek voor LPG en betreffen het afleveren van LPG aan een breed palet aan, deels kleine, bedrijven in de Verenigde Staten. De gebruikte technieken en procedures voor aflevering bij LPG-tankstations zijn in Nederland anders dan de gebruikte technieken en procedures voor aflevering aan, deels kleine, bedrijven in de Verenigde Staten. De verwachting is dat de technieken en procedures in Nederland een hoger veiligheidsniveau geven<sup>27</sup>. De veronderstelde veiligere technieken en procedures in Nederland kunnen in het ASC-model niet goed meegenomen worden via modificatiefactoren, maar wel door de bijdrage van faaloorzaken te verkleinen (zoals genoemd in paragraaf 4.6.3). Deze inschatting moet worden gedaan op basis van *expert judgement*. De verschillen in de stand der techniek en procedures leiden tot onzekerheden bij de toepassing van het model op de Nederlandse situatie.

## 6.4 **Beoordeling van de verschillende benaderingen**

De faalkansen van het lossen van LPG op LPG-tankstations zijn afgeleid op basis van de PHMSA-database met drie verschillende benaderingen, namelijk het *Reported Leak model*, het *Outflow model* en de RIVM-

<sup>27</sup> Een aantal incidenten in de PHMSA-database lijken op basis van de incidentomschrijvingen niet te verwachten in Nederland op basis van de beschreven procedures en voorzieningen.

analyse, en vergeleken met de faalkansen in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid. We beoordelen de verschillende benaderingen aan de hand van de aspecten validiteit en betrouwbaarheid (Boxman et al., 2022). Elk aspect is onderverdeeld in onderdelen, en aan elk onderdeel wordt een score toegekend op een schaal van vijf, namelijk ++ (zeer goed), + (goed), ± (matig), - (slecht) en -- (zeer slecht). Indien het onduidelijk is hoe een benadering scoort, omdat informatie niet te achterhalen is, wordt de score ? (onbekend) toegekend.

Naast betrouwbaarheid en validiteit kent het rapport nog twee aspecten voor beoordeling, namelijk ontvankelijkheid en toepasbaarheid.

- De ontvankelijkheid betreft de contactpersoon voor vragen en of de benadering eenduidig beschreven is. Het betreft hier voorgeschreven faalfrequenties in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid. Voor alle benaderingen is het RIVM de contactpersoon en is de benadering eenduidig beschreven in het Rekenvoorschrift. Alle benaderingen scoren daarmee zeer goed op dit aspect.
- De toepasbaarheid gaat over de vraag of de aanpassing passend, relevant, toekomstbestendig, betaalbaar en uitlegbaar is. Het betreft hier een eventuele aanpassing van de voorgeschreven faalfrequenties in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid. Een dergelijke aanpassing van het rekenvoorschrift voldoet aan de genoemde punten van toepasbaarheid. Alle benaderingen scoren daarmee zeer goed op dit aspect.

#### 6.4.1 *Validiteit*

De beoordeling van de validiteit kent twee verschillende onderdelen. Enerzijds dient de onderbouwing van de faalkansen aan te sluiten bij de actuele, representatieve wetenschappelijke inzichten, anderzijds dient er geen schijnnaauwkeurigheid te worden geïntroduceerd, waardoor iets stellig wordt voorgesteld wat in werkelijkheid onzeker is.

##### *Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid*

De onderliggende data van de faalkansen zijn gebaseerd op bronnen uit de jaren '70 van de vorige eeuw en hebben betrekking op andere typen slangen dan verlaadslangen (DNV, 2015). Deze faalkansen sluiten daarom niet aan bij de actuele representatieve wetenschappelijke inzichten (score --). De faalkansen worden toegepast voor alle LPG-tankstations zonder verfijning. Er wordt geen schijnnaauwkeurigheid gecreëerd (score +).

##### *Reported Leak model, Outflow model en RIVM-analyse*

De afleiding van faalkansen is gebaseerd op incident- en activiteitsgegevens voor de verlading van LPG uit de periode 2000-2024 en is daarmee actueel. Er waren ook geen betere gegevens beschikbaar (zie paragraaf 4.3.1). De faalkansen zijn afgeleid op basis van incidenten in de Verenigde Staten en vertaald naar de Nederlandse situatie op basis van de kenmerken. Echter, deze kenmerken hebben alleen betrekking op parameters zoals het verladingsdebiet en type slang en de aanwezigheid van beveiligingen (ESD en ERC). In deze vertaling is geen rekening gehouden met verschillen in het veiligheidsbeheerssystemen, zoals periodieke inspecties en keuringen, procedures tijdens de verlading en toezicht op de verlading. De

inschatting is dat in Nederland een strikter veiligheidsbeheerssysteem wordt toegepast. De (vertaalde) data van de VS zijn daarom minder representatief, maar geven eerder een overschatting. De score voor actuele, representatieve inzichten is daarmee  $\pm$  voor de drie varianten.

In de twee varianten van het ASC-model worden verschillende bewerkingen gedaan om de faalkansen te vertalen naar een *user defined case* zoals LPG-tankstations in Nederland. De twee varianten van het ASC-model hebben daarbij een verschillende complexiteit.

Het *Reported Leak model* sluit aan bij de gerapporteerde incidenten met beperkte aanpassingen voor het verladingsdebiet en de werking van de ESD. De wijze waarop ESD wordt meegenomen is echter niet realistisch: zo schaalde de maximum uitstroomhoeveelheid mee met het verladingsdebiet en de kwaliteit van de ESD. In werkelijkheid zal de maximum uitstroomhoeveelheid, bij het falen van de ESD, altijd gelijk zijn aan de totale inhoud van het verladingsstelsel. Ook wordt de kwaliteit van de ESD alleen vertaald in een kleinere uitstroomduur en niet in een aangepaste faalkans. De verkorte uitstroomduur geldt bovendien voor alle incidenten, terwijl er faaloorzaken zijn waar de ESD geen effect heeft. De score voor schijnnauwkeurigheid is daarmee  $\pm$ .

Het *Outflow model* is aanzienlijk gecompliceerder. Het model gaat uit van IOGP-data en gebruikt verschillende aannames zoals (1) het toekennen van installatie-onderdelen uit IOGP-434-01 aan faaloorzaken, (2) de druk tijdens uitstroming, en (3) faalkansen en isolatietijden van verschillende ESD-systemen. Deze aannames hebben verschillende bronnen (deels expert judgement). Het *Outflow model* kent vervolgens een kalibratiestap om voor elke faaloorzaak de berekende uitstroomhoeveelheid-verdeling te schalen, zodat deze voor een kritische uitstroomhoeveelheid overeenkomt met de verdeling verkregen uit incidentanalyse. Uit Figuur 4.3 blijkt dat dat de uitstroomhoeveelheid-verdeling van het *Outflow model* voor LPG-verlading ondanks deze kalibratiestap afwijkt van de data voor uitstroomhoeveelheden groter dan ongeveer 0,3 ton. Ook is onduidelijk of de data waarop het IOGP-model is gebaseerd, namelijk installaties met koolwaterstoffen offshore en onshore, ook van toepassing is op LPG-verlading, waarbij telkens flexibele slangen worden aan- en afgekoppeld. De onderliggende data rechtvaardigen een dergelijk complex model daarom niet en geeft schijnnauwkeurigheid gezien de onzekerheid in de data en achterliggende aannames. De score voor schijnnauwkeurigheid is daarmee -.

De RIVM-analyse is voornamelijk gebaseerd op de incidentbeschrijvingen met diverse aannames, waarbij de incidenten toebedeeld zijn aan lek en breuk. De score voor schijnnauwkeurigheid is daarmee +.

#### 6.4.2 *Betrouwbaarheid*

De beoordeling van de betrouwbaarheid kent vier verschillende onderdelen, (1) de data voldoen aan de FAIR<sup>28</sup>-principes, (2) de resultaten zijn reproduceerbaar en ongevoelig voor kleine veranderingen

<sup>28</sup> Findable, Accessible, Interoperable en Reusable

in uitgangspunten en parameters, (3) bij onzekerheid is gekozen voor een veilige benadering en (4) vergelijkbare situaties worden op vergelijkbare wijze benaderd.

Voor de drie analyses in dit rapport geldt dat de faalkans per verlading is afgeleid voor de bevoorrading van een LPG-tankstation, en ook alleen daarvoor. De procedure voor de bevoorrading van een LPG-tankstation in Nederland is vastgelegd in de PGS-richtlijn en wordt naar verwachting overal op ongeveer dezelfde wijze uitgevoerd. Hiermee worden vergelijkbare situaties op vergelijkbare wijze benaderd (score +).

#### *Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid*

De onderliggende data van de faalkansen zijn gebaseerd op bronnen uit de jaren '70 van de vorige eeuw. De data voldoen daarmee niet aan de FAIR-principes en zijn niet herleidbaar en reproduceerbaar (DNV, 2015) (score --). Omdat de data niet goed herleidbaar zijn, is onduidelijk of een veilige benadering is gekozen (score ?).

#### *Reported Leak model, Outflow model en RIVM-analyse*

De incident- en activiteitsgegevens zijn afkomstig uit een openbare database. De analyses en de bewerkingen van de data zijn vastgelegd in spreadsheets en scripts. Deze zijn opvraagbaar bij het RIVM. Hiermee voldoen de data aan de FAIR-principes en zijn de resultaten ook reproduceerbaar (score ++).

De gevoeligheid van een aantal aannames op de berekende faalkansen is onderzocht voor de twee varianten van het ASC-model (zie Tabel 4.11). Uit Tabel 4.10 blijkt dat de twee varianten van het ASC-model vergelijkbare resultaten geven. Uit Tabel 6.1 blijkt dat de faalkansen voor lek tussen de drie aanpakken met een factor drie kunnen verschillen. Voor breuk was de bandbreedte een factor anderhalf. De gevoeligheid van uitkomsten voor onderliggende aannames is beschreven in paragraaf 4.6.3 (*Reported Leak model* en *Outflow model*) en 5.5.3 (RIVM analyse). Daarin bleek de invloed van de veronderstelde omvang van de tankauto het grootst: met een andere aanname voor deze parameter zijn faalkansen mogelijk een factor twee lager.

Bij onzekerheid is een veilige benadering gekozen, zoals een grote inhoud van de tankauto waardoor het aantal activiteiten lager is en de faalkans per verlading hoger wordt ingeschat. Ook de aanname dat alle uitstroomhoeveelheden in de vloeistoffase zijn leidt tot een veilige benadering. Door de conservatieve keuzes en omdat de praktijk in de VS anders is dan in Nederland, is ingeschat dat de uiteindelijk afgeleide faalkans een bovengrens vormt voor de Nederlandse situatie (score +).

#### 6.4.3 *Samenvattende beoordeling*

In Tabel 6.2 is de beoordeling van de vier benaderingen samengevat.

Tabel 6.2 Beoordeling van de afgeleide faalkansen uit het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid (Rekenvoorschrift) Reported Leak model (Rep. Leak), Outflow model (Outflow) en de RIVM-analyse.

Aspect	Rekenvoorschrift	Rep.Leak	Outflow	RIVM-analyse
Validiteit				
- actueel, representatief	--	±	±	±
- schijnnauwkeurig	+	±	-	+
Betrouwbaarheid				
- FAIR, reproduceerbaar	--	++	++	++
- ongevoelig, veilige benadering	?	+	+	+

Hieruit blijkt dat het Rekenvoorschrift slecht scoort op met name actualiteit, representativiteit en reproduceerbaarheid. De scores van het *Reported Leak model*, *Outflow model* en de RIVM-analyse zijn vergelijkbaar, waarbij de RIVM-analyse en Reported Leak iets beter scoren bij schijnnauwkeurigheid.

## 6.5 Afleiding faalkansen

De analyse van de PHMSA-database leidt tot faalkansen van het lossen van LPG op LPG-tankstations. Uit de analyse volgt dat de kans op het breukscenario bij verlading een factor drie tot acht hoger is dan opgenomen in het Rekenvoorschrift. De inschatting is echter dat de gebruikte technieken en procedures voor aflevering bij LPG-tankstations in Nederland veiliger zijn dan de gebruikte technieken en procedures voor aflevering bij een breed palet aan, deels kleine, bedrijven in de Verenigde Staten. De uit de PHMSA-data afgeleide kans op het breukscenario kan daarom als een conservatieve bovengrens gezien worden. Ook gezien de onzekerheden in de afgeleide faalkans is er onvoldoende onderbouwing om de huidige faalkans voor het breukscenario te verhogen.

Voor het lekscenario is de kans volgens de PHMSA-data ongeveer een factor twintig lager dan de kans die nu is opgenomen in het rekenvoorschrift. Met de aanname dat de verlading in Nederland minstens zo veilig is als de verlading in de Verenigde Staten, kan de faalkans voor het lekscenario worden verlaagd tot  $1 \times 10^{-6}$  per verlading.

Voor de verlading met slangen van LPG en andere tot vloeistof verdichte gassen bij Seveso-bedrijven en opslagen van propaan of propeen is de aanname dat de procedures en beveiligingen vergelijkbaar zijn met het lossen van LPG bij LPG-tankstations. Daarom kunnen de faalkansen voor de verlading bij LPG-tankstations ook toegepast worden voor deze milieubelastende activiteiten. De faalkansen per verlading voor de verlaadslang zijn gegeven in Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Voorgestelde faalkansen in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid (Rekenvoorschrift) per verlading van tot vloeistof verdichte gassen voor het falen van de verlaadslang.

Scenario	Voorstel
L.1 Verlaadslang – Breuk	$2 \times 10^{-7}$
L.2 Verlaadslang – lek 10% diameter	$1 \times 10^{-6}$

## 6.6 Meenemen van doorstroombegrenzer in de QRA

In QRA-berekeningen voor LPG-tankstations wordt standaard rekening gehouden met de aanwezigheid van een doorstroombegrenzer. Dit is een passief veiligheidssysteem met een faalkans van 0,12 en een reactietijd van 5 seconden (RIVM, 2025c). Bij het sluiten van de doorstroombegrenzer wordt de uitstroom van LPG bij breuk beperkt tot circa 42 kg (Van der Linden en Stam, 2022). Dit ligt ruim boven de drempelwaarde voor rapportageplicht voor incidenten in de PHMSA-database (zie paragraaf 4.3.2). De verwachting is daarom dat ook incidenten waarbij doorstroombegrenzers sluiten zullen worden gerapporteerd (voor zover deze in de VS worden toegepast), al is niet uit te sluiten dat dergelijke kleine incidenten worden ondergerapporteerd.

De aanwezigheid van een doorstroombegrenzer kan daarom worden meegenomen in de QRA voor het scenario 'breuk van de verlaadslang'. Hierbij merken we op dat de aanwezigheid van de doorstroombegrenzer nauwelijks invloed heeft op de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour (zie Figuur 3.1).

## 7 Conclusies en aanbevelingen

De huidige faalkansen voor de verlading van gevaarlijke stoffen met slangen zijn gebaseerd op informatie en inzichten uit de jaren zeventig van de vorige eeuw over de faalkans van slangen. Welke bronnen precies gebruikt zijn en hoe verschillende getallen gecombineerd zijn tot faalkansen, is grotendeels onbekend. In de afgelopen jaren heeft ASC daarom in opdracht van het RIVM een nieuw model ontwikkeld voor het afleiden van faalkansen voor de verlading van gevaarlijke stoffen.

Eén van de toepassingen van het ASC-model betreft de verlading van LPG. Het RIVM heeft het ASC-model toegepast met gebruik van recente gegevens, namelijk enerzijds de gegevens uit de PHMSA-database met incidenten bij de verlading van LPG in de VS in de periode 2000-2024 en anderzijds het aantal verladingen van LPG in de VS op basis van Commodity Flow Surveys in dezelfde periode.

Het ASC-model bestaat uit twee varianten, namelijk het *Reported Leak model* en het *Outflow model*. Het *Reported Leak model* geeft de faalkansen voor de verlading van LPG op basis van de gegevens uit de VS. Met dit model kan de gebruiker faalkansen in combinatie met uitstroomhoeveelheden afleiden voor de eigen situatie door enkele verladingsskenmerken in te voeren zoals verlaaduur, verlaaddebiet en kwaliteit van het ESD-systeem. Het *Outflow model* heeft ten opzichte van het *Reported Leak model* meer uitvoermogelijkheden omdat drie onderdelen zijn toegevoegd, namelijk (1) een continue (in plaats van discrete) verdelingsfunctie voor gatgrootten (gebaseerd op het IOGP 434-01 rapport), (2) een inschatting van initiële uitstroomdebieten (voor verschillende relevante lekdiameters) en (3) een waarschijnlijkheidsverdeling voor de uitstroomduur (afhankelijk van het veronderstelde ESD-systeem).

Het RIVM heeft een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd en de twee varianten van het ASC-model onderzocht voor de afleiding van de faalkansen bij de verlading van LPG bij LPG-tankstations. De twee varianten zijn beoordeeld op de criteria validiteit en betrouwbaarheid. Aanvullend heeft het RIVM een eigen analyse van de incidenten uitgevoerd en vertaald naar faalkansen.

Het onderzoek leidt tot de volgende conclusies:

- De gevoeligheidsanalyse laat zien dat de breuk van de verlaadslang en de warme BLEVE ten gevolge van brand in de omgeving de belangrijkste scenario's zijn voor de PR  $10^{-6}$  contour tot een doorzet van 1.000 m<sup>3</sup> per jaar. Bij hogere doorzetten wordt de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour voornamelijk bepaald door de warme BLEVE ten gevolge van brand in de omgeving met een kleinere bijdrage van de BLEVE ten gevolge van externe impact. De afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour kan verkleind worden door de kans op een warme BLEVE te verkleinen.
- Er zijn met de PHMSA-database van incidenten en de Commodity Flow Surveys actuele gegevens beschikbaar voor het afleiden van de faalkansen voor LPG-verlading. De afleiding van de faalkansen

op basis van deze gegevens is betrouwbaarder en meer valide dan de huidige faalkansen.

- In de afleiding van het ASC-model voor de verlading van LPG waren niet alle relevante incidenten uit de PHMSA-database geselecteerd omdat de zoekterm onvolledig was. Met de correcte zoekterm is het aantal incidenten een factor zeven hoger. Het RIVM gebruikt in dit rapport de nieuwe gegevens met de correcte zoekterm.
- De drie verschillende benaderingen, namelijk het *Reported Leak model*, het *Outflow model* en de RIVM-analyse geven faalkansen voor de verlading van LPG die onderling redelijk vergelijkbaar zijn, namelijk  $8,2 \times 10^{-7}$  tot  $1,2 \times 10^{-6}$  per verlading voor lek en  $5,2 \times 10^{-7}$  tot  $1,5 \times 10^{-6}$  per verlading voor breuk. De kans op een breuk is daarmee een factor drie tot acht hoger dan de kans in het Rekenvoorschrift. De kans op een lek is daarentegen ongeveer een factor twintig lager dan in het Rekenvoorschrift.
- De kans op een breuk en een lek is afgeleid op basis van incidentgegevens en verladingsgegevens uit de VS. De data zijn specifiek voor LPG en betreffen het afleveren van LPG aan een breed palet aan, deels kleine, bedrijven in de Verenigde Staten. Het ASC-model biedt de mogelijkheid om een Nederlandse *user defined case* te gebruiken. Dit betreft echter een beperkt aantal correcties voor onder andere de inhoud van de tankauto, het verladingsdebiet en de aanwezige ESD systemen. De inschatting is dat de gebruikte technieken en procedures voor aflevering bij LPG-tankstations in Nederland veiliger zijn dan de gebruikte technieken en procedures voor aflevering aan, deels kleine, bedrijven in de Verenigde Staten. De veronderstelde veiligere technieken en procedures in Nederland kunnen onvoldoende meegenomen worden in de Nederlandse *user defined case*. De afgeleide faalkansen worden daarom als een conservatieve bovengrens gezien.
- In de afleiding van de faalkansen zijn er verschillende onzekerheden, zoals de inschatting van het aantal verladingen per jaar, het aantal incidenten, de uitgestroomde hoeveelheid en de vertaling van de praktijk in de VS naar de praktijk in Nederland. Een vergelijking van de drie verschillende benaderingen geeft een factor drie verschil in de kans op breuk. De totale onzekerheid van ondergrens tot bovengrens bedraagt zeker een orde van grootte.

Het onderzoek leidt tot de volgende aanbevelingen:

- De afgeleide kans op breuk van de LPG-verlaadslang op basis van de PHMSA-database en de Commodity Flow Surveys is een factor drie tot acht hoger dan de kans in het Rekenvoorschrift. De afgeleide kans is gebaseerd op data uit de VS en moet worden gezien als een bovengrens gezien de verschillen in gebruikte technieken en procedures. Ook gezien de onzekerheden in de afgeleide faalkans is er onvoldoende onderbouwing om de huidige faalkans voor het breukscenario te verhogen. Aanbevolen wordt om voor de verlading van LPG bij een LPG-tankstation uit te blijven gaan van de waarde van de faalkans in het Rekenvoorschrift. Wel wordt voorgesteld om de eenheid te veranderen, namelijk  $2 \times 10^{-7}$  per verlading in plaats

van  $4 \times 10^{-7}$  per uur. Evenzo wordt ook voor het scenario BLEVE tankauto door brand tijdens verlading (B.1) aanbevolen om uit te gaan van een kans per verlading (in plaats van een kans per uur). Deze aanpassingen in de eenheid van de faalkansen heeft geen invloed op de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour.

- De afgeleide kans op lek van de LPG-verlaadslang is ongeveer een factor twintig lager dan de kans in het Rekenvoorschrift. Naar verwachting zijn de verladingen in Nederland minstens zo veilig zijn als die in de Verenigde Staten. In dat geval geldt de afgeleide kans als bovengrens voor de Nederlandse praktijk. Voorgesteld wordt daarom de kans op een lek bij de verlading van LPG te verlagen met een factor twintig tot  $1 \times 10^{-6}$  per verlading. Omdat de effecten van het lekscenario niet verder reiken dan 10 – 15 meter, zal een verlaging van de kans op een lek geen invloed hebben op de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour als deze groter is dan 15 m.
- De gevoeligheidsanalyse laat zien dat bij doorzetten hoger dan 1.000 m<sup>3</sup> per jaar de ligging van de PR  $10^{-6}$  contour voornamelijk wordt bepaald door de warme BLEVE ten gevolge van brand in de omgeving met een kleinere bijdrage van de BLEVE ten gevolge van externe impact. De afstanden van het plaatsgebonden risico ( $10^{-6}$  per jaar) in het Bal zijn gebaseerd op de hoogste kans op een BLEVE door brand in de omgeving in combinatie met de hoogste kans op een BLEVE door externe impact. Het is mogelijk meer differentiatie aan te brengen door bijvoorbeeld meerdere afstanden per doorzet op te nemen in het Bal waarbij rekening gehouden wordt met de (veiligheid van de) opstelplaats van de tankauto en de invloed daarvan op de kans van een BLEVE. Zie hiervoor de berekende afstanden in Bijlage 3.
- Dit rapport beperkt zich tot een actualisatie van de faalkansen van de verlaadslang. Overige onderdelen van de risicomodellering zijn niet bekeken, zoals de modellering van de terugstroming (RIVM 2014, Van der Linden en Stam, 2022). Ook is de afleiding van de kans op een BLEVE door brand in de omgeving en externe impact veertig jaar oud. Bij actualisatie van de rekenmethode verdient dit alsnog aandacht. Wel moet opgemerkt worden dat het niet duidelijk is of er voldoende nieuwe incidentgegevens en inzichten zijn.
- Het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid, Module II, hoofdstuk 9 geeft de kans op een BLEVE van de tankauto door externe impact en door brand in de omgeving per uur aanwezigheid. Deze is echter bepaald uit de oorspronkelijke afgeleide kans per 100 verladingen door uit te gaan van een half uur aanwezigheid per verlading in plaats van drie kwartier per verlading. Aanbevolen wordt dit te corrigeren in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid.
- De analyse van het RIVM heeft zich beperkt tot de verlading van LPG bij LPG-tankstations. Voor de verlading met slangen van LPG en andere tot vloeistof verdichte gassen bij Seveso-bedrijven en opslagen van propaan of propeen is de aanname dat de procedures en beveiligingen vergelijkbaar zijn met het lossen van LPG bij LPG-tankstations. Daarom kunnen de faalkansen voor lek en breuk ook toegepast worden voor deze milieubelastende activiteiten.

- Het ASC-model biedt de mogelijkheid kansen af te leiden voor andere typen verlading, zoals de verlading van vloeistoffen naar en van tankauto's en ketelwagens bij Seveso-inrichtingen en scheepsverladingen. Omdat de huidige faalkansen hiervoor in het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid niet actueel, niet transparant en niet herleidbaar zijn, wordt aanbevolen te onderzoeken of met het ASC-model hiervoor faalkansen kunnen worden afgeleid die betrouwbaarder en meer valide zijn. De kennis uit onder meer het huidige onderzoek geeft daarvoor al een goede basis.

## Dankbetuiging

Wij willen graag de volgende personen bedanken voor hun bijdrage aan de totstandkoming van dit rapport:

- John Spouge van ASC voor de ontwikkeling van het model en het beantwoorden van de vragen die naar voren kwamen bij de review van het model en het schrijven van dit rapport.
- De vertegenwoordigers van de branche die ons voorzien hebben van de praktische kennis met betrekking tot het verladen van LPG bij LPG-tankstations.



## Literatuur

Amthor, 2025. [The Essential Guide to Propane Trucks: Your Partner in Efficient Fuel Delivery](#). Geraadpleegd op 27 augustus 2025.

Besluit activiteiten leefomgeving (Bal), 2025. [wetten.nl - Regeling - Besluit activiteiten leefomgeving - BWBR0041330](#). Geraadpleegd op 27 augustus 2025.

Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl), 2025. [wetten.nl - Regeling - Besluit kwaliteit leefomgeving - BWBR0041313](#). Geraadpleegd op 27 augustus 2025.

Boxman A.M.C., Stam G, Uijt de Haag P.A.M., Van Vliet A.A.C., 2022. Advies aandachtsgebieden. Beschouwing van voorstel alternatieve benadering voor de berekening van aandachtsgebieden. RIVM rapport 2022-0012.

CFS, 2025. Bureau of Transportation Statistics. Commodity Flow Surveys (CFS). <https://www.bts.gov/topics/historical-cfs-data>, geraadpleegd op 11 juni 2025 & 16 juli 2025.

DNV, 2015. Searching for the source of a hose leak frequency. <https://www.dnv.com/article/searching-for-the-source-of-a-hose-leak-frequency-200545/> geraadpleegd op 6 oktober 2025.

DNV, 2025. Safeti-NL versie 9.2.

Ham, J.M., 2001. Kwantitatieve Risico-analyse generiek voor LPG-tankstations, TNO-rapport R 2001/435a, oktober 2001.

IOGP, 2019. Risk Assessment Data Directory: Process Release Frequencies, International Association of Oil & Gas Producers, Report 434-01, September 2019.

Kok, O.M.P. en Pietersen, C.M., 1985. Reductie BLEVE-frequentie van een LPG-tankauto op een autotankstation, TNO-rapport 85- 01237, 28 februari 1985.

Logtenberg, 2006. Onderzoek naar de risico's van het losproces van LPG/Autogas-tankauto's en mogelijke verbeteringen hierin. TNO rapport B&O-A R 2005/293.

PGS-richtlijn 3, 1999. Guidelines for quantitative risk assessment. Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 3:1999/2005.

PGS-richtlijn 16, 2021. LPG: Afleverinstallaties, vulinstallaties en skid-installaties. Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 16:2021 versie 1.0, 2021.

PHMSA, 2025. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (American Department of Transportation). Incident Statistics – Hazmat Incident Report Search Tool. <https://www.phmsa.dot.gov/hazmat-program-management-data-and-statistics/data-operations/incident-statistics>, geraadpleegd op 26 mei 2025.

Raad van State, 2022. Uitspraken 201705745/3 en 201701963/1. [Tankstation in Purmerend mag LPG blijven verkopen - Raad van State](#), geraadpleegd op 12 december 2025.

RIVM, 2006. Consequenties van LPG studies voor PR en GR, brief, kenmerk 210/06 CEV Mah/mva-1009, 26 juni 2006.

RIVM, 2014. Rekenmethodiek voor LPG-tankstations, versie 1.2 van 5 november 2014.

RIVM, 2020. [Handleiding Risicoberekeningen Bevi versie 4.2.pdf](#). Geraadpleegd op 10 oktober 2025.

RIVM, 2025a. Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid module II, versie januari 2025.

RIVM, 2025b. Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid - toelichting, versie januari 2025.

RIVM, 2025c. Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid module I, versie januari 2025.

Safetec, 2025. SAFEN (Safe Energy Carriers). <https://www.safetec.no/en/innovation/safen/>, geraadpleegd op 7 januari 2026.

Spouge, J., 2018. Phase 1: Review of Data Sources for Transfer Leaks. DNV Report No.: 10040979/1, Rev. 1 Document No.: 114CBTZG-3

Spouge, J., 2024. Leak Frequency and Outflow Model for Fuel Transfer Operations: Phase 3. ASC Project No P041, Report revision 2, 12 March 2024

Spouge, J. en Wolting, B., 2023. A New Model for Fuel Transfer Leak Frequencies. In: M.P. Brito, T. Aven, P. Baraldi, M. Cepin, E. Zio (eds.). Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference, ESREL, September 2023, Southampton, UK. Singapore, Research Publishing, 2023:P175, 2023.

Van der Linden, M. en Stam, G., 2022. Effect van risicoreducerende maatregelen op het plaatsgebonden risico van LPG-tankstations. RIVM rapport 2021-0184, 2022.

## Bijlage 1 Procedure voor de verlading van LPG bij een LPG-tankstation

De verlading van een tankauto naar een opslagtank bij een LPG-tankstation vindt plaats met een flexibele slang, de 'verlaadslang'. De verlaadslang is gemonteerd op een haspel op de tankauto en wordt verbonden met het vulpunt. Het vulpunt is met vaste leidingen verbonden met de (ondergrondse) opslagtank van het LPG-tankstation. De tankauto bevat een pomp, een meetbuis en korte stukken leiding.

De procedure voor het vullen van een LPG-reservoir en de aanwezige beveiligingen zijn van invloed op het risico. De procedure is beschreven in bijlage H van PGS16:2021 (PGS-richtlijn 16, 2021). Deze procedure is besproken in een overleg met enkele vertegenwoordigers van de branche. In het overleg zijn ook de aanwezige beveiligingen en enkele typische kenmerken besproken. De procedure en de kenmerken zijn beschreven in deze bijlage.

### Procedure

Voor het lossen van de tankauto wordt de volgende procedure gevolgd:

1. Aankomst van de tankauto op het terrein; parkeer op de aangewezen losplaats.
2. Trek de handrem aan waardoor de wielen blokkeren. Als de handrem niet is aangetrokken, is het niet mogelijk met de verlading te beginnen. Plaats eventueel keggen onder de wielen van de tankauto en bakken de vrachtwagen af met pylonen (pionnen).
3. Melden bij het afleveradres. Visuele inspectie van de locatie: controleer de locatie op de afwezigheid van relevante onregelmatigheden. Verifieer dat er binnen 25 m van de losplaats geen andere tankauto brandstoffen staat te lossen en de lossing veilig kan plaatsvinden.
4. Stel met de inhoudsmeter de inhoud van het stationaire reservoir vast en bepaal op basis daarvan de maximaal toelaatbaar bij te vullen hoeveelheid<sup>29</sup>.
5. Open de deuren van de tapkast, waardoor de op afstand bedienbare afsluiters en de pomp in werking kunnen worden gesteld en tevens het systeem van de wegrijalarmering/-blokkering wordt ingeschakeld.
6. Breng de kabels (zijnde één aardingskabel en één voor de elektronische verbinding) aan tussen de tankauto en het vulpunt. Hiermee wordt enerzijds de tankauto geaard (equipotentiaalverbinding), anderzijds het tankauto-noodstopsysteem gekoppeld met de overvulbeveiliging en noodstopsysteem van de te bevoorraden installatie. Controleer de algemene staat van de installatie.
7. Verwijder eventuele kappen en/of blindflenzen bij het vulpunt en de slang.

<sup>29</sup> De hoeveelheid wordt ingevoerd op het paneel van de tankauto bij stap 10.

8. De verlaadslang is standaard gemonteerd op een haspel op de tankauto en is standaard gevuld met LPG. Rol deze uit en sluit de verlaadslang aan op het vulpunt. Er is geen dampretourleiding, omdat dit een gesloten systeem is en er geen dampen naar de atmosfeer verdwijnen.
9. Open de afsluiters van de tankauto, het vulpunt en het opslagreservoir.
10. Op de tankauto wordt ingesteld hoeveel liter gelost wordt met welk debiet. Start de verlading via het bedieningspaneel in de tapkast.
11. Controleer voortdurend dat het lossen veilig plaatsvindt (monitoren van druk en debiet) en in het bijzonder dat de toelaatbare vullingsgraad van het stationaire reservoir niet wordt overschreden. De alertheid van de chauffeur wordt gecontroleerd met een dodemansknop op een afstandsbediening.
12. Stop het lossen bij het bereiken van de maximaal toelaatbare vullingsgraad door het stoppen van de pomp en het sluiten van de afsluiters van de tankauto (bodemklep en handmatig afsluiten afsluiter verlaadslang).
13. Stel het bereiken van de maximaal toelaatbare vullingsgraad vast door de maximumniveauaanwijzing.  
N.B. Er wordt niet altijd tot het maximum niveau gevuld.
14. Sluit de afsluiters van vulpunt en opslagreservoir.
15. Koppel de slang af, rol deze op de haspel en voorzie de slangafsluiter van een blindstop of blindkoppeling. Bij het afkoppelen van de slang komt een kleine hoeveelheid LPG vrij uit de ruimte tussen twee blindstoppen ('borrelglaasje').
16. Ontkoppel de kabels (aardkabel en LPG stekker) tussen de tankauto en het vulpunt.
17. Stel de afgeleverde hoeveelheid vast.
18. Sluit de kast van de tankauto, waardoor de bekrachtiging van het systeem van de wegrijalarmering, de op afstand bedienbare afsluiters en de pomp wordt verbroken.
19. Controleer zowel het opslagreservoir als de tankauto op onregelmatigheden of lekkage en meld je af.
20. Verwijder eventuele keggen onder de wielen en pylonen, ontkoppel de handrem en verlaat de opstelplaats.

### **Afsluiters en beveiligingen**

Wanneer de tankauto LPG lost naar het opslagreservoir van het LPG-tankstation, is de stroom van LPG:

Reservoir tankauto > bodemklep → pomp → meetbuis →  
verlaadslang > vulpunt → opslagreservoir

Waarbij:

- > direct verbonden
- verbonden met een leiding

De volgende afsluiters zijn aanwezig:

1. Bodemafsluiter tankauto – elektronisch/pneumatisch<sup>30</sup>
2. Afsluiter uiteinde verlaadslang – handbediend
3. Afsluiter vulpunt – handbediend
4. Overige afsluiters op het tankstation – elektronisch/pneumatisch

De volgende afsluiters zijn optioneel aanwezig:

1. Extra elektronische/pneumatische afsluiter op het vulpunt
2. Verdere afsluiters op het tankstation – elektronisch/pneumatisch

De volgende beveiligingen zijn aanwezig:

1. De tapkast kan pas geopend worden als de tankauto op de handrem staat. Daarmee kan ook de bodemafsluiter pas open als de tankauto op de handrem staat. Verladen is dus pas mogelijk als de handrem is aangetrokken.
2. Elektronisch bediende afsluiters zijn 'fail safe' uitgevoerd. Zonder positief signaal vanuit het elektronische systeem staan of vallen de afsluiters dicht. Elektronische afsluiters staan dus alleen open bij een actieve signaalverbinding en alleen tussen de start van de verlading en het eind van de verlading. De verlading eindigt als de chauffeur de verlading stopt of als het computersysteem afwijkingen signaleert, zoals afwijkingen in druk, debiet of vulgraad, en de verlading automatisch stopzet.
3. Bij het openen van de afsluiters voor de verlading worden de afsluiters naar de afleverzuil op het tankstation dichtgestuurd zodat tanken niet meer mogelijk is.
4. Er is op de tankauto een debietbegrenzer of een aparte afsluiter gekoppeld aan de meetbuis. Bij een te hoog debiet gaat de debietbegrenzer dan wel de afsluiter dicht.
5. Er zijn twee terugslagkleppen geïnstalleerd, namelijk bij het vulpunt en bij het opslagreservoir.
6. Er is een overvulbeveiliging op het opslagreservoir: een niveaumeter die bij bereiken van het maximum niveau (85% resp. 90%, afhankelijk van het type reservoir) automatisch de pomp stopt en de elektronisch bediende afsluiters dichtstuurt.
7. De chauffeur heeft een afstandsbediening met een dodemansknop: elke drie minuten moet de chauffeur de knop indrukken, anders klinkt eerst een zoemer en daarna stopt de verlading, gaan de afsluiters dicht en stopt de pomp.
8. Op de afstandsbediening is ook een noodknop. Bij indrukken van de noodknop stopt de verlading (elektronisch bediende afsluiters gaan dicht en de pomp slaat af) en gaat ook het hele tankstation dicht. Daarnaast zijn er ook noodknoppen aanwezig op de tankauto (3x), het vulpunt en op het tankstation.
9. Het is mogelijk de verlaadslang te ontkoppelen bij het vulpunt als de handmatig bediende afsluiter nog open is. Wel merk je dat het ontkoppelen moeilijker is en LPG begint te lekken langs de afsluiter.
10. Een doorstroombegrenzer sluit de toevoer naar de LPG-haspel op de tankwagen in de volgende situaties af: (1) bij breuk van de verlaadslang, (2) bij ontkoppelen van de verlaadslang met open afsluiter (zie punt 9).

<sup>30</sup> Het signaal wordt elektronisch aangeleverd, de actie wordt met perslucht uitgevoerd

11. Wielkeggen zijn op sommige, maar niet alle, locaties verplicht en worden dan ook niet overal gebruikt. Het uitzetten van pylonen is wel overal verplicht.
12. Als de tapkast open is en de chauffeur wil wegrijden klinkt er in de cabine een harde piep met lichtsignaal (wettelijk verplicht). Tankauto's kunnen ook uitgerust zijn met een 'break interlock' waardoor wegrijden met open tapkast niet mogelijk is omdat de tankauto op de rem blijft staan.

### **Kenmerken van de verlading**

Bij de bevoorrading van een LPG-tankstation zijn typische kenmerken:

#### *Verlaadslang:*

1. De verlaadslang is rubber met metalen vlechtwerk. De verlaadslang voorziet daarmee ook in aarding.
2. De slangen worden minimaal 1x per jaar gekeurd (wettelijk verplicht).
3. De diameter van de verlaadslang is typisch 1½" tot 2", dat wil zeggen ongeveer 38–50 mm.
4. De lengte van de verlaadslang is maximaal 40 m, maar de tankauto is meestal zo dicht mogelijk bij het vulpunt opgesteld.
5. De verlaadslang is drukbestendig en bestand tegen lage temperaturen.

#### *Verlading*

1. Het verladingsdebiet is typisch 400 tot 800 liter/minuut.
2. De hoeveelheid per verlading is typisch 10.000 tot 15.000 liter (afhankelijk van tankgrootte).
3. De tijdsduur van de verlading is typisch 30 tot 45 minuten.
4. De tijdsduur van de aanwezigheid van de tankauto is typisch 45 tot 60 minuten (inclusief voorbereiding en afronding).
5. Eén tankauto bevoorraadt gemiddeld ongeveer drie LPG-tankstations.
6. De doorzet van een tankstation kan sterk variëren van 20 tot 1.500 m<sup>3</sup> per jaar.

## Bijlage 2 Toetsingsafstanden en interne veiligheidsafstanden

In de risicoberekeningen van een LPG-tankstation wordt de kans op een BLEVE van de LPG-tankauto meegenomen ten gevolge van een aanrijding (externe beschadiging) en ten gevolge van een brand in de omgeving. De kans op een BLEVE ten gevolge van externe impact is afhankelijk van de opstelplaats van de tankauto. Hiervoor zijn drie situaties beschreven, met voor elke situatie een aparte kans op een BLEVE. De kans op een BLEVE ten gevolge van een brand in de omgeving is afhankelijk van de afstand van de LPG-tankauto tot mogelijke bronnen van warmtestraling. Hiervoor zijn toetsingsafstanden vastgesteld waarmee de kans op een BLEVE kan worden bepaald.

In PGS16:2021 (PGS-richtlijn 16, 2021) zijn maatregelen beschreven die aanwezig moeten zijn bij een LPG-tankstation. Deze maatregelen betreffen onder andere de opstelplaats van de tankauto en de interne veiligheidsafstanden.

Deze bijlage vergelijkt de eisen in PGS16:2021 met de verschillende criteria voor externe beschadiging en de toetsingsafstanden. Uit deze vergelijking volgt de kans op een BLEVE voor een LPG-tankstation dat voldoet aan de eisen in PGS16:2021.

### BLEVE ten gevolge van externe beschadiging

Een BLEVE kan plaatsvinden ten gevolge van externe beschadiging. De kans op externe beschadiging is afhankelijk van de opstelplaats van de tankauto (zie Tabel B2.1).

*Tabel B2.1 Basisfrequentie van een BLEVE van een LPG-tankauto ten gevolge van externe beschadiging. De waarden zijn op basis van de oorspronkelijke getallen uit (Kok en Pietersen, 1985) en omgerekend naar per uur op basis van 45 minuten verblijfstijd.*

Opstelplaats tankauto	Basisfrequentie BLEVE (uur <sup>-1</sup> )
Geïsoleerde opstelplaats waarbij een aanrijding van opzij tegen de leidingkast niet aannemelijk wordt geacht (ook niet met lage snelheid)	$3,4 \times 10^{-11}$
Opstelplaats op een (wegrij)strook met een toegestane snelheid van maximaal 70 km/uur	$6,7 \times 10^{-10}$
Overige situaties	$3,1 \times 10^{-9}$

In PGS16:2021 zijn de volgende maatregelen beschreven voor het beschermen van de tankauto tegen externe beschadiging.

- **M78 - Aanrijdbeveiliging**

Op plaatsen waar gevaar van aanrijding bestaat, zijn relevante installatieonderdelen in de aanrijdingsrichting beschermd.

**Toelichting**

Door bij de inrichting van het LPG-tankstation hiermee rekening te houden kan gevaar voor aanrijding worden voorkomen. Daar waar dit niet mogelijk is, zijn aanvullende maatregelen

noodzakelijk. Relevante installatieonderdelen zijn bijvoorbeeld afleverzuilen, drukontlastingsapparatuur en vulpunten. Installatieonderdelen zijn vaak al voorzien van bescherming door bijvoorbeeld een hek om de ondergrondse tank. Een aanrijdbescherming bestaat bijvoorbeeld uit een geleiderailconstructie of met beton gevulde stalen buizen.

- *M92 - Aanbrengen vulpunt*  
Het vulpunt moet op een dusdanige plaats zijn aangebracht dat de LPG-tankwagen tijdens het lossen zich op een geschikte en hiertoe bestemde plaats bevindt waar het overige verkeer geen gevaar vormt voor de tankwagens.
- *M93 - Eisen opstelplaats tankwagens*  
De opstelplaats van de tankwagens is ten tijde van gaslevering goed bereikbaar en gelegen op een plek waar het overige verkeer geen gevaar vormt voor de tankwagens. De tankwagens kan de opstelplaats in alle gevallen onbelemmerd verlaten.

#### *Toelichting*

Indien het niet mogelijk is de opstelplaats voor de tankwagens binnen de begrenzing van de locatie waar de activiteit wordt verricht te realiseren, mag deze zich alleen in bestaande situaties bevinden op de verkeersweg, op een vlucht- of parkeerstrook naast deze verkeersweg, dan wel op of naast het weggedeelte dat toegang geeft tot het LPG-tankstation. Dit mag alleen indien het LPG-tankstation is gelegen langs een verkeersweg waarvoor krachtens de Wegenverkeerswet een snelheidsbeperking geldt van 80 km/h of minder. In dat geval behoort ook passende signalering te worden toegepast om de andere weggebruikers tijdig de aanwezigheid van de tankwagens kenbaar te maken.

Vergelijken we de situaties in Tabel B2.1 met de maatregelen in PGS16:2021, dan zou op grond van maatregel M92 de tankauto zo zijn opgesteld dat deze beschermd is tegen aanrijding. Echter, maatregel M93 biedt de mogelijkheid de tankauto op te stellen op een vlucht- of parkeerstrook naast een verkeersweg waar 80 km/uur mag worden gereden. Dit valt onder de 'overige situaties' waarvoor de hoogste frequentie van het scenario BLEVE door externe beschadiging geldt, namelijk  $3,1 \times 10^{-9}$  per uur aanwezigheid.

### **BLEVE ten gevolge van brand in de omgeving**

Een BLEVE kan plaatsvinden ten gevolge van langdurige blootstelling aan warmtestraling van een brand in de omgeving. De kans hierop is afhankelijk van een aantal toetsingsafstanden (Tabel B2.2) en wordt afgeleid uit Tabel B2.3.

Tabel B2.2 Toetsingsafstanden vanaf het vulpunt ten opzichte van een aantal objecten.

Nr	Object	Toetsingsafstand (m)
1	LPG-afleverzuil	17,5
2	Benzine-afleverzuil	5
3	Opstelplaats benzine tankauto	25
4	Gebouw zonder brandbescherming	
	- hoogte < 5 m	10
	- 5 m < hoogte < 10 m	15
	- hoogte > 10 m	20
	Gebouw met brandbescherming (en maximaal 50% gevelopeningen)	
- hoogte < 5 m	5	
- 5 m < hoogte < 10 m	10	
- hoogte > 10 m	15	

Tabel B2.3 Frequentie van een brand nabij een LPG-tankauto (per uur aanwezigheid van de tankauto). De waarden zijn op basis van de oorspronkelijke getallen uit (Kok en Pietersen, 1985) en omgerekend naar per uur op basis van 45 minuten verblijfstijd.

Ligt het vulpunt binnen de toetsingsafstand van:				Brandfrequentie (per uur aanwezigheid van de tankauto)
LPG-afleverzuil	Benzine-afleverzuil	Opstelplaats benzine tankauto	Gebouw	
Ja	Ja	Ja	Ja	$3 \times 10^{-8}$
Nee	Ja	Ja	Ja	
Ja	Nee	Ja	Ja	
Ja	Ja	Nee	Ja	
Ja	Nee	Nee	Ja	
Nee	Ja	Nee	Ja	
Nee	Nee	Ja	Ja	
Ja	Ja	Ja	Nee	$1,5 \times 10^{-8}$
Ja	Nee	Ja	Nee	
Nee	Nee	Nee	Ja	
Ja	Ja	Nee	Nee	$1 \times 10^{-8}$
Nee	Ja	Ja	Nee	
Ja	Nee	Nee	Nee	$8 \times 10^{-9}$
Nee	Nee	Ja	Nee	
Nee	Ja	Nee	Nee	$5 \times 10^{-9}$
Nee	Nee	Nee	Nee	$3 \times 10^{-9}$

De interne veiligheidsafstanden voor de opstelplaats van de tankauto zijn gegeven in bijlage C van PGS16:2021 (zie Tabel B2.4). Daarnaast geeft maatregel M102 een minimale afstand van 25 m tot een benzine tankauto.

Tabel B2.4 Interne veiligheidsafstanden voor de bescherming tegen brand in de omgeving van de tankauto.

Onderdeel	Afstand	Maatregel
LPG-reservoir	15 m	M56
Aflevertoestel	5 m	M66
Vulpunt	< 5 m	M62
Opslag gevaarlijke stoffen	15/7,5 m	M52
Gebouw/bedrijfswoning binnen begrenzing activiteit	Hoogte gebouw, max 20 m	M64
Gebouwen met een brandwerendheid van ten minste 30 minuten	Helft hoogte gebouw, max 10 m	M65
Begrenzing van de locatie waar de activiteit wordt verricht	-	M60

- *M52 - Afwijkmogelijkheden afstandseis tankwagens*  
De afstand van het vulpunt, de horizontale projectie van het LPG-reservoir en de opstelplaats van de LPG-tankwagen tot bovengrondse opslag van in het ADR aangewezen gevaarlijke stoffen, tenzij het uitsluitend verpakte gevaarlijke stoffen betreft in een hoeveelheid van minder dan 100 kg of 100 l (verkoopruimte) of minder dan 50 kg of 50 l (andere situaties), moet ten minste gelijk zijn aan 15 m.  
Van deze afstand mag uitsluitend in de volgende gevallen worden afgeweken:
  1. indien de hoeveelheid gevaarlijke stoffen (m.u.v. ADR-klassen 1 en 7) minder is dan 50 kg of 50 l of minder is dan 250 kg of 250 l wanneer uitsluitend sprake is van stoffen in ADR-klassen 8 en 9; in dat geval is er geen minimumafstand; of
  2. indien de opslag van gevaarlijke stoffen plaatsvindt in een gebouw dat ten opzichte van het LPG-reservoir, het vulpunt of de opstelplaats van de LPG-tankwagen een brandwerendheid bezit van ten minste 60 min (van binnen naar buiten het gebouw, volgens NEN 6069); in dat geval moet de afstand ten minste 7,5 m bedragen.
  3. Indien de opslag van gevaarlijke stoffen plaatsvindt in een verkoopruimte behorend bij de LPG-installatie, dan mag de hoeveelheid van 50 kg of 50 l, zoals benoemd onder 1), worden verhoogd tot maximaal 100 kg of 100 l.
- *M56 - Afstandseis tussen LPG-reservoir en opstelplaats tankwagens*  
De afstand tussen de horizontale projectie van het reservoir en het vulpunt, respectievelijk tussen de horizontale projectie van het reservoir en de opstelplaats van de tankwagen moet ten minste 15 m bedragen. Van deze bepaling mag uitsluitend worden afgeweken indien voor die situatie vóór 1 juli 1984 een vergunning ingevolge de Wet milieubeheer is verleend. Daarbij geldt dat de afstand niet verder mag worden verkleind ten opzichte van de vergunde afstand.
- *M60 - Afstandseis tussen vulpunt en gebouw en begrenzing van de locatie waar de activiteit wordt verricht*  
De afstand tussen het LPG-vulpunt en een tot het LPG-

tankstation behorend gebouw (inclusief verkoopruimte) of een bedrijfswoning, alsmede de begrenzing van de locatie waar de activiteit wordt verricht, moet ten minste 5 m bedragen.

- *M62 - Afstandseis tussen vulpunt en meterkast tankwag*  
Tijdens het lossen moet de meterkast van de LPG-tankwagen op ten hoogste 5 m van het vulpunt zijn opgesteld.
- *M64 - Afstandseis tussen opstelplaats tankwag en gebouw*  
De afstand van de opstelplaats van de LPG-tankwagen tot een tot het het LPG-tankstation behorend gebouw (inclusief verkoopruimte) of een bedrijfswoning moet ten minste gelijk zijn aan de hoogte van het gebouw of de woning, tenzij het een gebouw of bedrijfswoning betreft dat/die hoger is dan 20 m; in dat geval moet de afstand ten minste 20 m bedragen.
- *M65 - Afstandseis tussen opstelplaats tankwag en gebouw bij bepaalde brandwerendheid*  
Indien de wanden en het dak van een gebouw (inclusief verkoopruimte) of een bedrijfswoning binnen de in M64 (Afstandseis tussen opstelplaats tankwag en gebouw) bedoelde afstand (zowel horizontaal als verticaal gemeten) een brandwerendheid bezitten van ten minste 30 min (van binnen naar buiten het gebouw, volgens NEN 6069), dan moet de afstand van de opstelplaats van de LPG-tankwagen tot dit tot het LPG-tankstation behorend gebouw of deze bedrijfswoning ten minste gelijk zijn aan de helft van de in M64 bedoelde afstand.
- *M66 - Afstandseisen tussen opstelplaats tankwag en aflevertoeestel*  
De afstand van de opstelplaats van de tankwagen tot een aflevertoeestel moet ten minste 5 m bedragen.
- *M102 - Niet gelijktijdig vullen van LPG en andere brandstoffen*  
Het lossen van een LPG-tankwagen mag niet gelijktijdig plaatsvinden met het lossen van een tankwagen met andere motorbrandstoffen, tenzij de LPG-tankwagen zich op meer dan 25 m afstand bevindt van de desbetreffende tankwagen.

Vergelijken we de interne veiligheidsafstanden in Tabel B2.4 met de toetsingsafstanden in Tabel B2.2, dan is de conclusie dat:

1. de afstand tot de afleverzuil (minimaal 5 m) niet voldoet aan de toetsingsafstand van de LPG-afleverzuil (15 m);
2. de afstand tot de afleverzuil (minimaal 5 m) voldoet aan de toetsingsafstand van de benzine-afleverzuil (5 m);
3. de afstand tot de opstelplaats van de benzine tankauto (minimaal 25 m) voldoet aan de toetsingsafstand (25 m);
4. de afstanden tot een brandbaar gebouw kleiner zijn dan de toetsingsafstand van gebouwen binnen de begrenzing van de locatie waar de activiteit wordt verricht. Er is echter geen afstandseis voor de opstelplaats van de LPG-tankauto ten opzichte van de begrenzing van de locatie waar de activiteit wordt verricht. Daarom is niet uit te sluiten dat er ook gebouwen zijn buiten het LPG-tankstation die liggen binnen de toetsingsafstand.

Er wordt bij een LPG-tankstation dat voldoet aan de PGS16:2021 dus voldaan aan de toetsingsafstanden voor de benzine-afleverzuil en de opstelplaats van de benzine-tankauto, maar niet noodzakelijk aan de

toetsingsafstanden voor de LPG-aflerzuil en gebouwen. In die situatie geldt de hoogste frequentie van het scenario BLEVE door brand, namelijk  $3 \times 10^{-8}$  per uur aanwezigheid.

### Bijlage 3 Afstanden tot de PR $10^{-6}$ contour voor verschillende opstelplaatsen van de tankauto

De risico's van een LPG-tankstation hangen af van de opstelplaats van de tankauto, omdat de opstelplaats invloed heeft op de kans op een BLEVE door aanrijding en de kans op BLEVE door brand in de omgeving (zie Bijlage 2). Invoerwaarden zijn gegeven in Tabel B3.1 en de uitkomsten in Tabel B3.2. In Tabel B3.2 worden de afstanden tot de PR  $10^{-6}$  contour vermeld voor verschillende combinaties van brand- en aanrijdingskansen. Met groene en rode markeringen is aangegeven of de berekende afstand binnen de momenteel voorgeschreven afstanden (Tabel 3.2) vallen of niet.

*Tabel B3.1 Invoerwaarden voor de berekening van de risicoafstanden, voor een doorzet van  $1.000 \text{ m}^3/\text{jaar}$  (70 verladingsduur = 30 minuten en verblijftijd van de tankauto = 45 minuten). Voor andere doorzetten zijn de uitkomsten van deze berekening geschaald.*

Scenario	Basis voor faalfrequentie	Vervolgfactor	Faalfrequentie [ /jaar ]
L1. Breuk losslang - doorstroombegrenzer sluit	$2 \times 10^{-7}$ /verlading	$70 \times 0,88$	$1,23 \times 10^{-5}$
L2. Breuk losslang - doorstroombegrenzer sluit niet	$2 \times 10^{-7}$ /verlading	$70 \times 0,12$	$1,68 \times 10^{-6}$
L3. Lek losslang	$1 \times 10^{-6}$ /verlading	70	$7,00 \times 10^{-5}$
T1. Tankauto – intrinsiek falen	$5,0 \times 10^{-7}$ /jaar	$70 \times (45/60)/8766$	$2,99 \times 10^{-9}$
T2. Tankauto – lek grootste aansluiting	$5,0 \times 10^{-7}$ /jaar	$70 \times (45/60)/8766$	$2,99 \times 10^{-9}$
B1. Warme BLEVE bij verlading	$2,9 \times 10^{-10}$ /verlading	70	$2,03 \times 10^{-8}$
B2. Warme BLEVE door omgevingsbrand 100%	$3 \times 10^{-8}$ /uur	$70 \times 45/60 \times 0,33 \times 0,19$	$9,88 \times 10^{-8}$
B3. Warme BLEVE door omgevingsbrand 67%	$3 \times 10^{-8}$ /uur	$70 \times 45/60 \times 0,33 \times 0,46$	$2,39 \times 10^{-7}$
B4. Warme BLEVE door omgevingsbrand 33%	$3 \times 10^{-8}$ /uur	$70 \times 45/60 \times 0,33 \times 0,73$	$3,79 \times 10^{-7}$
B5. Koude BLEVE door externe impact 100%	$3,1 \times 10^{-9}$ /uur	$70 \times 45/60 \times 0,33$	$5,37 \times 10^{-8}$
B6. Koude BLEVE door externe impact 67%	$3,1 \times 10^{-9}$ /uur	$70 \times 45/60 \times 0,33$	$5,37 \times 10^{-8}$
B7. Koude BLEVE door externe impact 33%	$3,1 \times 10^{-9}$ /uur	$70 \times 45/60 \times 0,33$	$5,37 \times 10^{-8}$

Voor de faalfrequenties (invoerwaarden) is gebruik gemaakt van:

- De nieuwe (in dit rapport afgeleide) faalfrequentie voor scenario L3 (lek losslang), deze is een factor twintig lager dan de oude frequentie.

- Een verblijftijd van 45 minuten voor scenario T1 en T2 (intrinsiek falen van de tankauto en lek van de grootste aansluiting tankauto), dit is 15 minuten langer dan bij eerdere berekeningen (Van der Linden en Stam, 2022).
- Een verblijftijd van 45 minuten voor de BLEVE-scenario's B2 t/m B7 (BLEVE door brand in de omgeving en externe impact) en gecorrigeerde basisfaalfrequenties (per uur) voor deze scenario's. De faalfrequentie per jaar komt ongeveer overeen met de eerder gebruikte faalfrequenties (Van der Linden en Stam, 2022), met enkel kleine verschillen door afronding.

De verladingsduur (30 minuten) en verblijftijd (45 minuten) sluiten aan bij de eerder gebruikte waarden in het oorspronkelijke rapport van TNO (Kok en Pietersen, 1985). Volgens de branche zijn langere verladingen ook mogelijk: de typische verladingsduur is 30-45 minuten en de typische verblijftijd is 45-60 minuten.

De afstand tot de PR  $10^{-6}$  contour verschilt per kompasrichting. De waarden in Tabel B3.2 betreffen de afstand in noordoostelijke richting. In die richting zijn de risico-afstanden het grootst.

Tabel B3.2 Afstand (m) tot de PR  $10^{-6}$  contour als functie van de doorzet voor verschillende kansen (per uur) op brand in de omgeving en verschillende kansen (per uur) op externe impact. De groen gemarkeerde\* afstanden vallen binnen de huidige afstandentabel in het Bal, de rood gemarkeerde afstanden\*\* vallen buiten de afstandentabel in het Bal.

Frequentie brand	$3 \times 10^{-9}$	$5 \times 10^{-9}$	$8 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-8}$
<b>250 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	8*	8*	8*	8*	8*	8*
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	8*	8*	8*	8*	8*	8*
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	8*	8*	8*	8*	8*	9*
<b>500 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	10*	11*	11*	11*	11*	15*
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	11*	11*	11*	11*	12*	16*
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	11*	11*	11*	12*	12*	19*
<b>600 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	12*	12*	12*	13*	15*	24*
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	12*	12*	13*	13*	15*	25*
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	13*	13*	15*	16*	19*	28*
<b>700 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	14*	15*	16*	18*	21*	29*
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	14*	15*	17*	18*	21*	30*
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	17*	19*	20*	22*	25*	32*
<b>800 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	18*	19*	21*	22*	25*	33*
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	19*	20*	22*	23*	26*	33*
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	22*	23*	25*	26*	29*	35*
<b>900 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	21*	23*	25*	26*	29*	35*
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	22*	23*	25*	26*	29*	36**
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	26*	27*	28*	29*	32*	38**
<b>1.000 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	24*	26*	27*	28*	31*	37*
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	25*	26*	28*	29*	31*	37*
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	28*	29*	31*	31*	34*	40*
<b>1.250 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	29*	30*	31*	32*	34*	42**
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	30*	31*	32*	33*	35*	44**
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	32*	33*	34*	35*	37*	81**
<b>1.500 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	32*	32*	34*	35*	37*	86**
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	32*	33*	34*	35*	37*	87**
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	34*	35*	36*	37*	39*	89**
<b>2.000 m<sup>3</sup>/jaar</b>						
Aanrijding - $3,4 \times 10^{-11}$	35*	35*	37*	37*	40*	107**
Aanrijding - $6,7 \times 10^{-10}$	35*	36*	37*	38*	40*	107**
Aanrijding - $3,1 \times 10^{-9}$	37*	38*	39*	41**	67**	108**

Dit is een uitgave van:

**Rijksinstituut voor Volksgezondheid  
en Milieu**

Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven  
[www.rivm.nl](http://www.rivm.nl)

mei 2026

De zorg voor morgen  
begint vandaag