



Veiligheid transport van ammoniak door buisleidingen

Een onderzoek naar de risico's en effecten van het grootschalig transport van vloeibaar ammoniak door ondergrondse buisleidingen

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Project
Opdrachtgever

Veiligheid transport van ammoniak door buisleidingen
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Document
Status
Datum
Referentie

Onderzoeksrapport
Definitief 02
17 juni 2024
137343/24-007.525

Projectcode
Projectleider
Projectdirecteur

137343
J.W. Slaa MSc, drs. R.J.M. Scheres
J.L. Dierx MSc

Auteur(s)
Gecontroleerd door
Goedgekeurd door

C. de Vos MSc, drs. R.J.M. Scheres, ing. A.M. op den Dries, K. Starostenko MSc,
Q.V. Tran MSc
J.W. Slaa MSc
J.W. Slaa MSc

Paraaf



Adres

Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V.
Leeuwenbrug 8
Postbus 233
7400 AE Deventer
+31 (0)570 69 79 11
www.witteveenbos.com
KvK 38020751

Het kwaliteitsmanagementsysteem van Witteveen+Bos is gecertificeerd op basis van ISO 9001.

© Witteveen+Bos

Niets uit dit document mag worden veelelvoudigd en/of openbaar gemaakt in enige vorm zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Witteveen+Bos noch mag het zonder dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander werk dan waarvoor het is vervaardigd, behoudens schriftelijk anders overeengekomen. Witteveen+Bos aanvaardt geen aansprakelijkheid voor enigerlei schade die voortvloeit uit of verband houdt met het wijzigen van de inhoud van het door Witteveen+Bos geleverde document.

INHOUDSOPGAVE

1	NIET-TECHNISCHE SAMENVATTING	5
2	INLEIDING	7
2.1	Leeswijzer	8
2.2	Vraagstelling en werkwijze	9
3	ACHTERGRONDINFORMATIE	10
3.1	Risicoprofiel ammoniak	10
3.1.1	Toxische eigenschappen	11
3.1.2	Brandgevaar	13
3.2	Dispersiegedrag	13
3.2.1	Dispersie na vrijkomen lek of breuk	14
3.2.2	Praktijktests	15
3.2.3	Invloed van meteorologische condities	17
3.3	Faalmechanismen	19
3.3.1	Generieke faalmechanismen	19
3.3.2	Ammoniak specifieke faalmechanismen	21
3.4	Mitigerende maatregelen	22
3.4.1	Voorkomen van het lek	24
3.4.2	Maatregelen bij ontstaan lek	26
3.5	Faalfrequenties van ammoniakleidingen	29
3.6	Incidenten analyse	29
4	BUISLEIDINGEN VOOR AMMONIAKTRANSPORT	31
4.1	Transport van ammoniak in het buitenland en Nederland	31
4.2	Verwachte ammoniaktransport	33
4.3	Voorwaarden ontwerp van buisleidingen	34
4.4	Mogelijke leidingspecificatie Nederland	36
5	RISICOBEREKENINGEN	37
5.1	Normering	37

5.1.1	Plaatsgebonden risico	37
5.1.2	Groepsrisico	37
6	MODELLERING	39
6.1	Desert Tortoise	39
6.1.1	De inputparameters	40
6.1.2	AVEVA	41
6.1.3	Blanket model	42
6.2	Leidingvariaties	46
6.2.1	Uitgangspunten	46
7	RESULTATEN MODELLEEROPGAVES EN RISICOANALYSES	47
7.1	Resultaten en conclusie Desert Tortoise validatie	47
7.1.2	Aandachtspunten	48
7.2	Resultaten en conclusies risicoanalyses leidingspecificatie variaties	49
7.2.1	Andere gebruikte parameters	50
7.2.2	Resultaten plaatsgebonden risico enkelwandige leidingen	51
7.2.3	Plaatsgebonden risico dubbelwandige leidingen	54
7.2.4	Domino effect	58
7.2.5	Bepaling van de duur van de effecten van de plas.	59
7.2.6	Effecten van de afkoeling van de bodem in de krater	62
7.3	Conclusies risicoberekeningen	62
8	CONCLUSIE	64
	Laatste pagina	67
	Bijlage(n)	Aantal pagina's
I	Projectorganisatie	1
II	Input en resultaten leidingspecificaties	2

NIET-TECHNISCHE SAMENVATTING

Met het oog op verduurzaming van de energievoorziening in het kader van de energietransitie gaat waterstof een steeds grotere rol spelen. Waterstof heeft een lage energiedichtheid, waardoor in vergelijking met bijvoorbeeld aardgas voor eenzelfde hoeveelheid energie een grotere inhoud gas getransporteerd moet worden. Transport onder druk verhoogt de energiedichtheid, maar verhoogt tegelijkertijd ook de transportkosten. Waterstofrijke energiedragers kunnen ingezet worden als een energetisch en economisch gunstiger alternatief. Het aandeel van vloeibare ammoniak kan in de toekomst groot zijn in Nederland, aangezien dit een veelbelovende energiedrager is. Voor ammoniak moeten echter nieuwe lange buisleidingstracés worden aangelegd, mogelijk in de nabijheid van burgers. Nederland heeft weinig ervaring met grootschalige buisleidingtrajecten voor tot vloeistof verdichte ammoniak langs bewoonde gebieden. Ammoniak is toxisch en aquatoxisch en heeft daarmee een potentieel hoge impact wat betreft omgevingsveiligheid en maatschappelijke ontwrichting, mede door de grote effectafstanden bij vrijkomen. Dit alles leidt tot de noodzaak van aanvullende veiligheidseisen en/of beleid.

Daarom onderzoekt dit rapport de verschillende scenario's van ongevallen bij ammoniaktransport door buisleidingen en de bijbehorende risico's. De focus ligt op onder druk vloeibaar gemaakt ammoniak, ook wel warme ammoniak genoemd. Hierbij worden voornamelijk leidingbreuken als scenario beschouwd. Daarnaast wordt de beheersbaarheid van deze ongevalsscenario's onderzocht en de potentiële maatregelen. Hiervoor wordt de modelleerwijze bestudeerd en wordt met verschillende configuraties voor risico doorberekend. Dit rapport analyseert leemtes in de huidige modelleerwijze en stelt wetenschappelijk onderbouwde verbetermogelijkheden voor. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de geprojecteerde doorzet van ammoniak in Nederland.

Voor verschillende leidingspecificaties is hiervoor doorgerekend met behulp van de software Safeti-NL. Dit is het programma dat in Nederland is voorgeschreven voor het berekenen van de plaatsgebonden risicocontouren, aandachtsgebieden en het groepsrisico. Daarbij zijn vingeroefeningen uitgevoerd met een 'referentie' ontwerp op basis van al bestaande ammoniakleidingen in Europa. Hierop zijn variaties berekend om te analyseren welke parameters het meest invloed hebben op de effecten. Daarbij is tevens vergeleken met eerdere onderzoeken die verspreidingspatronen van ammoniak in kaart hebben gebracht. De resultaten uit deze onderzoeken zijn gevalideerd met Safeti-NL door de gebruikte inputparameters voor leidingspecificaties zoveel mogelijk gelijk te houden. Er is voor de berekeningen gebruik gemaakt van het kratermodel. Daarbij is uitgegaan van onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak. Er is gekeken naar vier variaties voor leidingdiameter en daarbij gekeken naar het effect op de ammoniakuitstroom voor de scenario's lekken en breken van de buisleiding. Er is voor de berekeningen gedraaid aan verschillende parameters, zoals bijvoorbeeld de lengte van het inloksegment. Bij het draaien aan de parameters is in eerste instantie gestreefd naar een maximale uitstroom van 50 ton ammoniak, analoog aan de maximale inhoud van een spoorketelwagen. Aanvullend is een aantal risicoberekeningen gemaakt waarbij wordt uitgegaan van dubbelwandige leidingen.

Uit de resultaten blijkt dat in de meest waarschijnlijke configuraties van de leidingen sprake zal zijn van een PR-contour van 10^{-6} per jaar. Dit is de algemene aanvaardbare individuele risicogrenswaarde. Bij optreden van een PR 10^{-6} contour ontstaat een gebied waar vanwege het risico beperkingen op liggen. De berekende gifwolkaandachtsgebieden variëren afhankelijk van met name de leidingdiameter van 1.900 tot 7.500 m en 1 % letaliteitsafstanden van 500 tot 3.900 m. De langdurige uitdamping van een ammoniakplas varieert tussen de 14 uur en 57 uur.

De lengte van segmenten blijkt nauwelijks invloed te hebben op de maximale langdurige plas en de aandachtsgebieden, maar heeft wel invloed op de $PR10^{-6}$ -contouren en 1 % letaliteitsafstanden. De scenario's die bepalend zijn in de Safeti-NL risicoberekeningen zijn beperkt tot een duur van maximaal 1.800 seconden. Een uitstroombesnoei scenario bij een breuk duurt echter veel langer dan 1.800 seconden. Een langere duur kan door de gewone gebruiker van het rekenprogramma niet worden ingesteld. Ook het getroffen gebied is dan groter dan de berekende aandachtsgebieden. Vandaar dat naast de aandachtsgebieden ook onderzocht is hoelang ammoniak blijft uitstromen uit zowel de leiding als de plas die vervolgens ontstaat en hoe groot dat gebied is. Hieruit komt naar voren dat het tot dagen kan duren voordat een plas is uitgestroomd. Het gevolg hiervan is dat in een gebied van meerdere kilometers (variërend van 4.450 m bij een 8' leiding tot 7.767 m bij een 36' leiding) rondom de breuk mensen geëvacueerd moeten worden en dat het gebied meerdere dagen niet of beperkt toegankelijk is. Dus naast de standaard risicoberekeningen zijn aanvullende effectberekeningen nodig om een goed beeld te krijgen van de impact van een incident met een ammoniakbuisleiding. Dit betekent dat wanneer bovenstaande wordt gekoppeld aan maatschappelijke ontwrichting kleinere leidingdiameters maatschappelijke ontwrichting terugdringen, omdat er dan minder ammoniak uitstroomt en daardoor de ammoniakplas eerder is uitgestroomd. Daarnaast kunnen dubbelwandige leidingen, korte inbliksegmenten en het aanleggen van betonnen platen rondom de leidingen resulteren in een reductie van de $PR10^{-6}$ -contour, waarbij opgemerkt wordt dat rekenkundige aannames rond dubbelwandige leidingen niet volgen uit de huidige rekenvoorschriften of RIVM adviezen. Verschillende mitigerende maatregelen kunnen worden toegepast om de faalkans van de buisleidingen te reduceren. Daarbij is het toepassen van maatregelen ter reductie of voorkoming van de faaloorzaak 'beschadiging door derden' de belangrijkste maatregel. Na het toepassen van mitigerende maatregelen zal echter voor alle leidingvarianten een $PR10^{-6}$ -contour blijven bestaan. Alleen voor dubbelwandige leidingen geldt dat door deze maatregel de $PR10^{-6}$ -contour kan verdwijnen. Hiermee wordt de kans op een incident verkleind, maar worden niet de effecten ervan beperkt. Voor het waarborgen van de veiligheid zal bij het aanleggen van ammoniakleidingen per leidingonderdeel rekening moeten worden gehouden met aspecten als bevolkingsdichtheid, (beperkt) kwetsbare gebouwen en locaties en zeer kwetsbare gebouwen. Daarnaast moeten de verwachte doorstroomhoeveelheden van ammoniak, en de $PR10^{-6}$ -contouren worden meegenomen in de afwegingen voor leidingconfiguraties en locaties van plaatsing van de leidingen.

INLEIDING

Waterstof wordt genoemd als een belangrijke energiedrager in de verduurzaming van de energievoorziening. Waterstof wordt op dit moment in grote hoeveelheden gebruikt in de industrie. De transitie van grijze waterstof naar groene waterstof (vanuit groene elektriciteit en water) begint opgang te krijgen. Momenteel wordt groene waterstof vooral lokaal geproduceerd. Hierdoor kan niet alle waterstof geproduceerd worden waar het ook gebruikt gaat worden. Om waterstof van de producent naar de gebruiker te kunnen transporteren zal er door heel Nederland een waterstofinfrastructuur opgezet moeten worden. De lage energiedichtheid van gasvormige waterstof is echter minder effectief bij transport dan bijvoorbeeld bij aardgas. In vergelijking met aardgas zal er namelijk ongeveer drie keer zoveel waterstof getransporteerd moet worden voor eenzelfde hoeveelheid energie (beide onder atmosferische omstandigheden). Het comprimeren van waterstof tot een hogere druk om zo de energiedichtheid te verhogen kan een uitkomst zijn en is redelijk eenvoudig. Echter, comprimeren met een factor drie is vaak energetisch en economisch niet gunstig. Daarom wordt momenteel onderzoek gedaan naar economisch aantrekkelijkere manieren om waterstof over grote afstanden te kunnen transporteren. Hiervoor wordt onder andere gekeken naar waterstofrijke energiedragers met een hogere energiedichtheid.

Ammoniak wordt in meerdere rapporten benoemd als een potentieel gunstige waterstofdrager^{1,2,3}. Ook is ammoniak een veelgebruikte grondstof in de chemische industrie. Daarom zal het toekomstige aandeel van ammoniak naar verwachting hoog zijn. Transport van ammoniak als waterstofdrager is in veel opzichten effectiever dan transport van waterstof of andere gebruikelijke waterstofdragers, zogeheten 'Liquid Organic Hydrogen Carriers' (LOHCs). De condensatietemperatuur van ammoniak is -33°C. Deze ligt hoger dan de temperatuur van waterstof van -254°C. Hierdoor is er minder koelvermogen nodig om ammoniak in vloeibare staat te verkrijgen ten opzichte van waterstof. De minimale ontstekingsenergie van ammoniak (680 MJ) ligt daarnaast significant hoger dan de ontstekingsenergie van waterstof (0,019 MJ). Daarmee is de kans op ontstekingen van ammoniak aanzienlijk kleiner. Ook kan door de hogere energiedichtheid van ammoniak per volume-eenheid ammoniak meer waterstof worden getransporteerd alleen waterstof, wat economisch gunstig is. Bovendien is bij gebruik van LOHCs een dubbele transportstroom nodig. LOHCs moeten namelijk worden teruggevoerd om weer hergebruikt te kunnen worden. Dit is bij ammoniaktransport niet nodig. Ammoniak zal naar verwachting namelijk vooral via zeehavens al in ammoniakvorm het land inkomen en daar opgeslagen en verladen worden.

Voor ammoniaktransport zijn momenteel nog geen buisleidingtracés door Nederland aangelegd, met uitzondering van buisleidingen op industriële/chemie complexen en een korte buisleiding voor het transport vanaf de haven van Urmond naar Chemelot. Er zullen voor transport van deze waterstofdrager dus nieuwe, lange buisleidingtrajecten moeten worden aangelegd. Mogelijk zullen deze tracés aangelegd moeten worden in de nabijheid van burgers. Nederland heeft echter weinig ervaring met grootschalige trajecten voor ammoniak langs bewoonde gebieden.

Ammoniak is toxisch (ook voor het aquatisch milieu) en heeft daarmee een potentieel hoge impact in het kader van omgevingsveiligheid en mogelijke maatschappelijke ontwrichting. Wanneer er sprake is van een breuk in een buisleiding kan voor ammoniak een effectgebied ontstaan dat tot meerdere kilometers vanaf de breuklocatie reikt.

¹ Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers; TNO, Arcadis, Berenschot; 2023.

² Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers; Arcadis, Berenschot; 2023.

³ Rapport buisleidingtransport waterstofdragers; Antea group; 2023.

Ook is er mogelijk sprake van ammoniak plasvorming die over een langere tijd aanwezig is. De omgeving binnen het effectgebied blijft dus voor een langere tijd onbegaanbaar voor hulpdiensten en burgers. Transport van deze stof kent dus andere risico's dan huidige gebruikte stoffen voor de energievoorziening. Dit is waarom de Nederlandse overheid inzet(te) op vermindering van het transport van ammoniak, met name over het spoor.

De waarde van ammoniak als waterstofdrager is in het kader van de energietransitie een steeds meer erkende ontwikkeling aan het worden in Europa. De rol van Nederland hierbij is vooral als doorvoerland voor grote volumes naar bijvoorbeeld Duitsland. Daarom is het belangrijk om kennis te vergaren over grootschalig transport van deze stof om het transport maatschappelijk verantwoord te laten plaatsvinden. Hiervoor is inzicht nodig in de potentiële risico's voor de omgeving en de mitigatie ervan. Het doel is om te komen tot ontwerpspecificaties voor veilige buisleidingen met beheersbare risico's die een bijdrage leveren aan verduurzaming.

Voordat besloten kan worden of en hoe deze nieuwe tracés aangelegd worden, dient in kaart gebracht te worden welke tracés er moeten komen en welke specificaties er nodig zijn. Denk hierbij aan de diameter, druk en het debiet, maar ook aan de plaatsing van benodigde boosterstations en afsluiters. De door Nederland gewenste trajecten voor ammoniaktransport zijn overzienbare systemen, mits er samenhang is met import(havens), opslag (havens, industrie) en afnemers (bestaande BRZO-bedrijven en industrie voor het kraken van ammoniak).

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (hierna: IenW) heeft behoefte aan een onderzoek naar de scenario's en bijbehorende risico's die ontstaan bij transport van ammoniak door buisleidingen. De achterliggende opgave is om te komen tot een beheersbaar scenario zodat maatschappelijke ontwrichting zoveel mogelijk voorkomen kan worden. Hierbij wordt uitgegaan van het berekenen van aandachtsgebieden om maatschappelijke ontwrichting te kwantificeren. Het gaat bij dit onderzoek om ammoniak dat onder druk vloeibaar gemaakt, zogeheten warme ammoniak¹, is en transport dat plaatsvindt in ondergrondse buisleidingen onder minimaal 8 bar overdruk. Deze overdruk is benodigd om de ammoniak vloeibaar te houden. Daarbij wordt de beheersbaarheid van deze ongevalsscenario's in kaart gebracht waar voornamelijk leidingbreuken als risico worden beschouwd. Dit onderzoek kan bijdragen aan de huidige kennis over modellering, maatregelen en risico's, grootte van potentiële maatschappelijke ontwrichting en de beheersing van maatschappelijke ontwrichting van ongewenste scenario's van uitstroming van ammoniak uit buisleidingen.

2.1 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt ingedeeld:

- hoofdstuk 2 beschrijft verder de vraagstelling en de aanpak;
- hoofdstuk 3 beschrijft de achtergrondinformatie van transport van ammoniak in buisleidingen in het kader van (externe) veiligheid;
- hoofdstuk 4 beschrijft ammoniaktransport in het buitenland en mogelijk benodigde leidingspecificaties voor tracés in Nederland;
- hoofdstuk 5 beschrijft bekende incidenten en de bepaling van risico's;
- hoofdstuk 6 beschrijft de toepassing van simulatietechnieken AVEVA en Safeti-NL. Deze programma's stellen het modelleren van veiligheidsrisico's van vrijkomen van ammoniak bij leidingbreuken in staat;
- hoofdstuk 7 presenteert de resultaten van de modellering;
- hoofdstuk 8 geeft de conclusie van het onderzoek waarbij aanbevelingen worden gegeven voor het mitigeren en beheersen van potentiële risico's met onderbouwing.

¹ Ammoniak kan vloeibaar gemaakt worden door koeling tot onder het atmosferische kookpunt van ammoniak: -33 °C. Dan wordt wel gesproken over koude ammoniak. Warme ammoniak wordt als begrip gebruikt als tegenhanger van koude ammoniak, maar betreft feitelijk ammoniak bij kamertemperatuur.

2.2 Vraagstelling en werkwijze

De vraagstelling van het onderzoek luidt:

Wat zijn de risico's van ongevalsscenario's (leidingbreuk) bij ammoniaktransport door buisleidingen en hoe kan worden bijgedragen aan de beheersbaarheid van deze ongevalsscenario's?

Deze vraag wordt behandeld aan de hand van de volgende deelvragen:

- *wat is de maximale hoeveelheid ammoniak die kan vrijkomen waarbij maatschappelijke ontwrichting niet optreedt?*
- *welke leidingvariëaties zijn benodigd om te zorgen dat het maximaal acceptabele effect van het vrijkomen van ammoniak uit buisleidingen niet wordt overschreden?*
- *wat kan worden gezien als 'veilig genoeg' in het kader van het risico op ongevalsscenario's?*
- *welke configuraties en samenstellingen van leidingen kunnen voldoen aan een optimale veiligheid in relatie tot de ruimtelijke omgeving?*

Om invulling te geven aan deze vraagstelling, is het onderzoek gesplitst in de volgende onderdelen:

- 1 het in kaart brengen van (huidige) ontwerpkeuzes, ongewenste scenario's, risico's en sets van maatregelen van leidingbreuken. Hiervoor wordt tevens de modelleerwijze middels module D van het Bevb aangewend;
- 2 het analyseren van leemtes in de huidige modelleerwijze. Daarnaast worden potentiële verbetermogelijkheden voorgesteld. Hiervoor wordt uitgezocht tot welke hoeveelheid ammoniak het huidige rekenmodel kan rekenen. Tevens wordt gekeken naar een potentieel model waarmee grote hoeveelheden uitstroom goed kunnen worden gemodelleerd;
- 3 het voorstellen van maatregelen om ongewenste scenario's te beheersen. Dit kan bijvoorbeeld in het kader zijn van uitstroomhoeveelheid en -duur;
- 4 het waar mogelijk kwantitatief modelleren van maatregelen, en de technische haalbaarheid en de impact op de veiligheid van deze maatregelen worden onderbouwd. Hierbij wordt verder gekeken dan de technische maatregelen die tot nu toe gebruikelijk zijn in de buisleiding branche. Verder wordt rekening gehouden met de geprojecteerde doorzet van ammoniak in Nederland, omdat dit mogelijk consequenties heeft voor de haalbaarheid van buisleidingconfiguratie.

Dit project richt zich op een uitwerking van ongewenste scenario's van het uitstromen van ammoniak en de bijbehorende modellering. Daarnaast wordt een set aan maatregelen en risico's in kaart gebracht waarbij tenminste het geldende beoordelingskader van het plaatsgebonden risico en aandachtsgebieden in beschouwing worden genomen. De resultaten dragen bij aan modelmatige verbeteringen van de toxische stof ammoniak door buisleidingen middels nieuwe inzichten van de bekende en nieuwe risico's van ammoniaktransport door buisleidingen. Met deze inzichten kunnen effectieve kans- en effectreducerende maatregelen worden getroffen die bijdragen aan een verbeterde beheersbaarheid van leidingbreuken. Deze informatie draagt bij aan het vergroten van de maatschappelijke acceptatie voor de implementatie van ammoniakbuisleidingen in Nederland.

Medio 2023 is dit onderzoek in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gestart, waarbij het literatuuronderzoek in dat jaar is afgerond. Niet op alle vragen hebben we sluitende antwoorden kunnen geven, want er zijn nog leemtes die we benoemen in dit rapport. Bepaalde bevindingen kunnen andere effecten op uitkomsten hebben bij andere uitgangspunten, inzichten of rekenmethodes.

Het onderzoek is uitgevoerd door een kerngroep, waarbij een werkgroep is samengesteld om kennis en ervaring in te brengen door middel van enkele sessies en. De samenstelling van beide groepen is beschreven in bijlage I.

ACHTERGRONDINFORMATIE

Om te de risico's te kwantificeren is inzicht benodigd in de effecten en faalfrequenties van leidingtransport van ammoniak. Het effect is in het algemeen afhankelijk van:

- de stofeigenschappen van ammoniak (paragraaf 3.1);
- en specifiek het gedrag van ammoniak na uitstromen uit een lek of breuk onder de transportcondities in relatie tot de omgevingscondities (paragraaf 3.2).

En de faalfrequenties zijn afhankelijk van de:

- stofspecifieke faalmechanismen van buisleidingen (paragraaf 3.3).

De faalfrequenties voor leidingtransport zijn in het algemeen beschreven in het Bevb en zijn afhankelijk van de faalmechanismen. Dit hoofdstuk geeft inzicht of transport van onder druk vloeibaar gemaakte ammoniak door ondergrondse buisleidingen additionele faalmechanismen oplevert.

Verder wordt in paragraaf 3.4 ingegaan op de mitigerende maatregelen. Deze kennis komt vooral vanuit 'Best Practices' vanuit de industrie, zowel nationaal als internationaal.

De resultaten van de bevindingen in dit hoofdstuk vormen de basis voor mogelijke ontwerpkeuzes van verschillende leidingspecificaties waarvan de risico's berekend worden om te komen tot mogelijk maatschappelijk verantwoorde leidingspecificaties. Dat wil zeggen leidingen met een acceptabel extern veiligheidsrisico. Ook kunnen de bevindingen leiden tot de identificatie van leemtes in de kennis, welke worden benoemd in hoofdstuk 7.

3.1 Risicoprofiel ammoniak

Ammoniak is sterk ruikend kleurloos gas dat bestaat uit een binding van stikstof en waterstof. Het moleculaire gewicht is 17,03 g/mol en de stof is goed oplosbaar in water. Onder atmosferische condities is de stof gasvormig. Ammoniak condenseert bij een druk van 8-10 bar bij circa 20 °C of bij een temperatuur die lager is dan -33 °C bij atmosferische druk¹. De dichtheid van ammoniak onder standaard omstandigheden is 0,77 kg/m³ (gasvormig). Bij een temperatuur van -33 °C en atmosferische druk is de dichtheid van vloeibare ammoniak 682 kg/m³. Voor ammoniak in vloeibare fase hangt de dichtheid nauwelijks af van de operationele parameters zoals druk en temperatuur². In PGS 12 zijn de overige thermodynamische eigenschappen en gevaren van ammoniak samengevat. Deze zijn in onderstaande tabel gegeven.

¹ Ketenstudie omgevingsveiligheid van duurzame waterstofrijke energiedragers; Arcadis, Berenschot; 2023.

² Rapport buisleidingtransport waterstofdragers; Antea group; 2023.

Tabel 3.1 Thermodynamische eigenschappen vloeibaar ammoniak

Eigenschap	Waarde
dichtheid t.o.v. lucht	0,6 (gas)
smeltpunt	-77,7 °C
kookpunt	-33,4 °C (bij atm. Druk)
kritische temperatuur	132,4 °C
kritische druk	109,3 bar
verdampingswarmte bij 15 °C	121 x 10 ⁴ J/kg
verdampingswarmte bij -33,4 °C	137 x 10 ⁴ J/kg
soortelijke warmte bij 15 °C	0,47 x 10 ⁴ J/(kg.K)
soortelijke warmte bij -33,4 °C	0,45 x 10 ⁴ J/(kg.K)

Zoals verder is beschreven in PGS 12¹ reageert ammoniak met sterke oxidanten, zuren, halogenen en veel zware metalen tot explosieve en brandgevaarlijke verbindingen². Voorbeelden van deze oxidanten zijn peroxiden, salpeterzuur, kaliumchloraat en zuurstof. Voorbeelden van halogenen zijn kaliumjodide, 1,2-dichloorethaan, zilverchloride en sulfinylchloride. Voorbeelden van deze metalen zijn goud, zilver, kwik, koper en zink. Daarnaast vormt de stof schokgevoelige verbindingen met kwik, zilver en goudoxides. Het is corrosief voor koper en verzinkte oppervlakken. Vloeibaar ammoniak kan daarnaast plastics, rubber en coatings aantasten.

3.1.1 Toxische eigenschappen

Gasvormig ammoniak

Ammoniak komt veel voor in biologische processen. Toch is het een gevaarlijke stof. Ammoniak heeft namelijk acuut negatieve effecten op mensen en dieren. Door de sterke basische en hygroscopische (wateraantrekkend) eigenschappen kunnen irritatie aan en corrosie van oppervlaktes van weefsels ontstaan. Bijvoorbeeld de ogen, luchtwegen en de huid kunnen worden aangetast door deze stof. Het inhaleren van ammoniak in gasvorm kan longoedeem veroorzaken. Hoge concentraties van ammoniakgas in de lucht kunnen daarnaast blaren en chemische brandwonden op de huid creëren. Wanneer kinderen aan eenzelfde hoeveelheid ammoniak worden blootgesteld als volwassenen ontvangen zij een hogere dosis, omdat zij een grotere long- en huidoppervlakte : lichaamsgewicht ratio hebben³. Onderstaande tabel geeft een indicatie van de effecten weer van verschillende ammoniakdamppconcentraties in de lucht.

¹ Ammoniak opslag en verlading; Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen; 2014.

² Ammoniak opslag en verlading; Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen; 2014.

³ Medical Management Guidelines for Ammonia; Toxic Substances Portal; 2017.

Tabel 3.2 Effecten van blootstelling aan verschillende ammoniakconcentraties^{1,2}

Ammoniakdampconcentratie (ppm)	Generieke effect	Blootstellingsduur
5	geur waarneembaar voor sommige mensen. Fysiologische reactie bij de mens begint tussen 5 en 50 ppm (irritatie slijmvliezen)	-
25	-	MAC-waarde in meerdere landen, beroepsblootstellingsnorm lange termijn 8 u/TGG
35	-	beroepsblootstellingsnorm korte termijn 15 min/TGG
50-100	irritatie waarneembaar voor de meeste mensen	aanvaardbaar voor mensen die niet gewend zijn aan blootstelling van max. 2 uur. Mensen die gewend zijn aan blootstelling tolereren een hogere concentratie gedurende dezelfde periode
400-700	directe oog-, neus- en keelirritatie	0,5 - 1 u blootstelling geeft geen serieuze schade. Irritatie bovenin de luchtwegen kan 24 u aanhouden na 30 min. blootstelling. Bestaande luchtwegproblemen kunnen verergeren
1000-2000	hevig hoesten, hevige oog-, neus- en keelirritatie	schade aan de ogen en luchtwegen kan binnen minuten ontstaan wanneer niet direct behandeld. Blootstelling van 30 min. kan serieuze effecten te weeg brengen bij mensen met al bestaande luchtwegproblemen
3000-4000	hevig hoesten, hevige oog-, neus- en keelirritatie	kan fataal zijn na 30 min. Geschatte LC50 (afgeleid van data van dieren) voor blootstelling van 2 u
5000-12000	luchtwegspasmen. Snelle verstikking	fataal binnen enkele minuten. Geschatte LC50 (afgeleid van data van dieren) voor blootstelling van 30 min

Vloeibaar ammoniak

Bij direct contact met vloeibaar gekoeld ammoniak zal het weefsel direct bevroren en chemische brandwonden veroorzaken. Vloeibaar ammoniak dat in contact komt met de ogen kan serieuze brandwonden aan het hoornvlies of blindheid veroorzaken. Het inslikken van ammoniak in water veroorzaakt brandwonden in de mond, keel en maag.

Aquatisch milieu

Ammoniak in oppervlaktewater kan de vegetatie aantasten en is zeer toxisch voor in water levende organismen. Het toevoegen van ammoniak zorgt voor een stijging van de pH, wat kan leiden tot vissterfte. Daarnaast kan ammoniak in oppervlaktewater leiden tot een te hoge tropiegraad, waardoor algengroei explosief kan toenemen. Wanneer deze aan het eind van de vegetatieperiode afsterven, kan dit in hypoxie resulteren wat gevolgen heeft voor de rest van het betreffende ecosysteem. Tijdens een ongeval nabij Kingman in de Verenigde Staten leidde een lek van ammoniak in een kreek tot meer dan 25.000 dode vissen, inclusief bedreigde diersoorten³.

¹ Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines; Fertilizers Europe; 2013.

² Ammoniak: opslag en verlading; Publicatiereeks gevaarlijke stoffen; 2014.

³ Assessing the case for EU legislation on the safety of pipelines and the possible impacts of such an initiative, COWI, 2006.

Maatschappelijke ontwrichting

Bij vrijkomen van onder druk vloeibaar gemaakt ammoniak uit een leiding zal een deel van het ammoniak verdampen. Deze verspreidende wolk bestaat uit ammoniak damp, meegevoerde druppels vloeibare ammoniak en lucht. Daarnaast kan er een koude plas ammoniak vormen ten gevolge van uitregenen uit de wolk en uit de opening van de leiding. Vanuit de koude plas zal ammoniak verdampen en een koude wolk vormen met de lucht welke zwaarder is dan de omgevingslucht. Hierdoor ontstaat een dichte ammoniakwolk die zich laag over de grond beweegt. De slechte zichtbaarheid gecombineerd met de toxiciteit leidt tot belemmering in het uitvoeren van de functie van hulpverleners zoals bereiken van en wegvoeren van getroffen burgers. Afhankelijk van de afstand van dit effect, leidt dit tot, naast gezondheidsrisico's, ook andere maatschappelijke belemmeringen voor burgers in de omgeving¹. Denk hierbij aan het afsluiten van wegen, ontruimen van het getroffen gebied voor langere tijd. Hoe dit zich ontwikkelt en hoe men erop dient te reageren wordt vermoeilijkt doordat het dispersiegedrag afhankelijk is van weersomstandigheden zoals de windrichting, buitentemperatuur, regen, etc. Het groepsrisico is een maatstaaf die mede gebruikt wordt om maatschappelijke ontwrichting kwantificeerbaar te maken. Het groepsrisico spitst zich toe op de kans per jaar dat grote aantallen personen komen te overlijden als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval waarbij gevaarlijke stoffen zijn betrokken en geeft daarmee meer informatie over de mogelijke omvang van een ongewenst voorval. Voor het bepalen van het groepsrisico worden aandachtsgebieden berekend. Dit zijn gebieden die zichtbaar maken waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen, onvoldoende beschermd kunnen zijn tegen de gevolgen van een ongeval met gevaarlijke stoffen. Het bevoegd gezag kan deze gebieden vervolgens aanwijzen als voorschriftengebieden waar dan aanvullende bouwkundige maatregelen verplicht zijn. Een voorschriftengebied kan alleen worden aangewezen binnen een brand- en explosieaandachtsgebied. In gifwolkaandachtsgebieden kunnen geen voorschriftengebieden worden aangewezen.

3.1.2 Brandgevaar

Ammoniak is brandbaar en heeft explosieve eigenschappen. Het is echter lastig om de stof te doen ontbranden. De minimale zelfontstekingstemperatuur is 651 °C en de ontstekingstemperatuur voor ammoniak in contact met heet staal is circa 650 °C. Experimenten en observaties tijdens ongevallen tonen aan dat bij het vrijkomen van ammoniak in de open lucht het ammoniak-lucht mengsel over het algemeen buiten de vlamgrenzen ligt (16-27 vol% NH₃ in lucht)². Daarom is de kans op een explosie van vrijgekomen ammoniak buiten gebouwen verwaarloosbaar klein. De kans op branden bestaat vrijwel alleen in besloten, slecht geventileerde ruimtes¹. Verder kan het wel explosieve en brandgevaarlijke verbindingen vormen met sterke oxidanten, zuren, halogenen en veel zware metalen zoals eerder beschreven in paragraaf 3.1.

Vloeibaar ammoniak is tevens niet erg brandbaar. Een koudgekookte ammoniakpoel zal niet branden op een op zichzelf onderhoudende manier. Dit komt omdat er niet voldoende warmtestraling vanuit de vlammen in de poel terecht komt³. Er is echter wel brand mogelijk wanneer er vanuit een externe bron constant warmte wordt toegevoegd, bijvoorbeeld warmte vanuit de grond of water.

3.2 Dispersiegedrag

In onderstaande paragrafen wordt nader beschreven hoe onder druk gemaakte vloeibare ammoniak zich gedraagt bij uitstroom via breuk of lek. Deze uitstroom leidt tot een dispersie van ammoniak in de omgeving. In onderstaande paragrafen wordt in fases beschreven hoe de dispersie verloopt en hoe dit wordt beïnvloed door weersomstandigheden. Het doel van deze paragraaf is om naast het dispersiegedrag van vrijkomend ammoniak te beschrijven, ook om te onderzoeken of de huidige dispersiemodel geschikt is voor de risicoberekeningen van ammoniak.

¹ Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines; Fertilizers Europe; 2013.

² Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines; Fertilizers Europe; 2013.

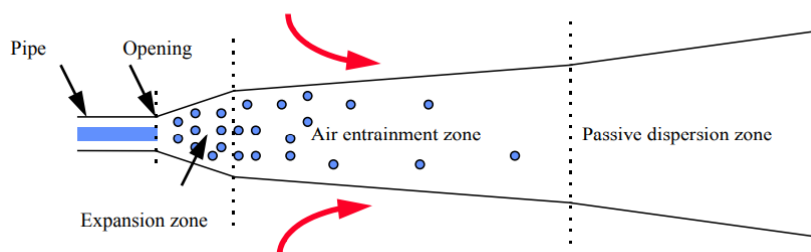
³ Ammoniak; Algemene Directie Toezicht op het Welzijn op het Werk, Directie van de Chemische Risico's; 2003.

3.2.1 Dispersie na vrijkomen lek of breuk

Bij het vrijkomen van onder druk vloeibaar gemaakt ammoniak door bijvoorbeeld een breuk in een buisleiding zal in eerste instantie een flash (vloeistof gaat voor een deel of helemaal instantaan over in de gasfase door onttrekking van energie vanuit de atmosfeer en de vloeibare fase om te kunnen verdampen) van de stof ontstaan, gevolgd door een vrije uitstroom. Bij één liter vloeibaar ammoniak komt 947 liter gas vrij (geëxpandeerd tot 15 °C, onder 1 bar druk) ¹.

Ineris (Frankrijk) heeft een studie uitgevoerd naar het ammoniakdispersiegedrag², beginnend met vloeibare ammoniak onder druk in de leiding. Zij stellen dat er drie zones betrokken zijn bij de verspreiding van ammoniak: de expansiezone, de meesleepzone en de passieve dispersiezone. Deze zones zijn weergegeven in onderstaande afbeelding en hieronder nader per zone beschreven.

Afbeelding 3.1 Zones bij vrijkomen van ammoniak uit een insluiting onder druk



Expansiezone

In deze zone expandeert de vloeistof omdat de druk verandert van de druk vanuit de insluiting, in dit geval een buisleiding, naar atmosferische druk. Door de plotselinge drukverlaging verdampt een deel van de vloeibare ammoniakstraal vrijwel direct, zoals hierboven beschreven. Dit wordt een thermodynamische flash genoemd. De hoeveelheid damp is afhankelijk van de temperatuur en druk van de vloeibare ammoniak. De gasfase die door deze flash gecreëerd wordt, heeft een hogere snelheid dan de op dat moment nog vloeibare ammoniak. Dit komt doordat de damp een lagere dichtheid heeft. Dit verschil in snelheid induceert de meesleep van de nog vloeibare straal die vervolgens fragmenteert in kleine druppels. Deze druppels worden in hoge snelheid meegenomen en vormen de zogenaamde 'aerosol'. Aan het eind van deze zone bestaat de jet uit een gasfase en vloeibare fase in aerosolvorm.

Vanwege het hoge debiet van uitstroming zal door ontgronding een krater ontstaan. De grootte van deze kraker is afhankelijk van de leidingdiameter, de druk en de dekking boven de leiding. De uitstroom van de ammoniak zal de omliggende grond bevroren. Deze bevroering kan de verdere vorming/uitbreiding van een krater belemmeren.

De meesleepzone

In deze zone wordt de omgevingslucht in de straal meegevoerd. Deze lucht levert energie aan de straal omdat deze warmer is dan de ammoniakdruppels, waardoor damp ontstaat. Deze verdamping en de adiabatische verzadiging van de lucht koelt de straal, die zich vervolgens gedraagt als een straal zwaar gas in de atmosfeer. Daardoor ontstaat een koud mengsel van lucht en ammoniak. Dit mengsel is zwaarder dan lucht en verspreidt zich over de bodem.

¹ View of Contribution to the Analysis of the Toxic Ammonia Cloud Dispersion Associated with Pipeline Catastrophic Rupture case study of Arzew Oran; Mohamed & Zerrouk; 2022.

² Ammonia Large-scale atmospheric dispersion tests; Ineris; 2005.

Het koelte-effect dat ontstaat door flashen en door de adiabatische verzadiging leidt tot een belemmering van het zicht in de wolk. Vooral dichtbij de bron van vrijkomen ontstaat een dichte mist.

De passieve dispersiezone

Door het meevoeren van de omgevingslucht neemt de snelheid van de straal progressief af totdat het de windsnelheid bereikt. Vervolgens wordt de straal passief meegevoerd in de atmosfeer.

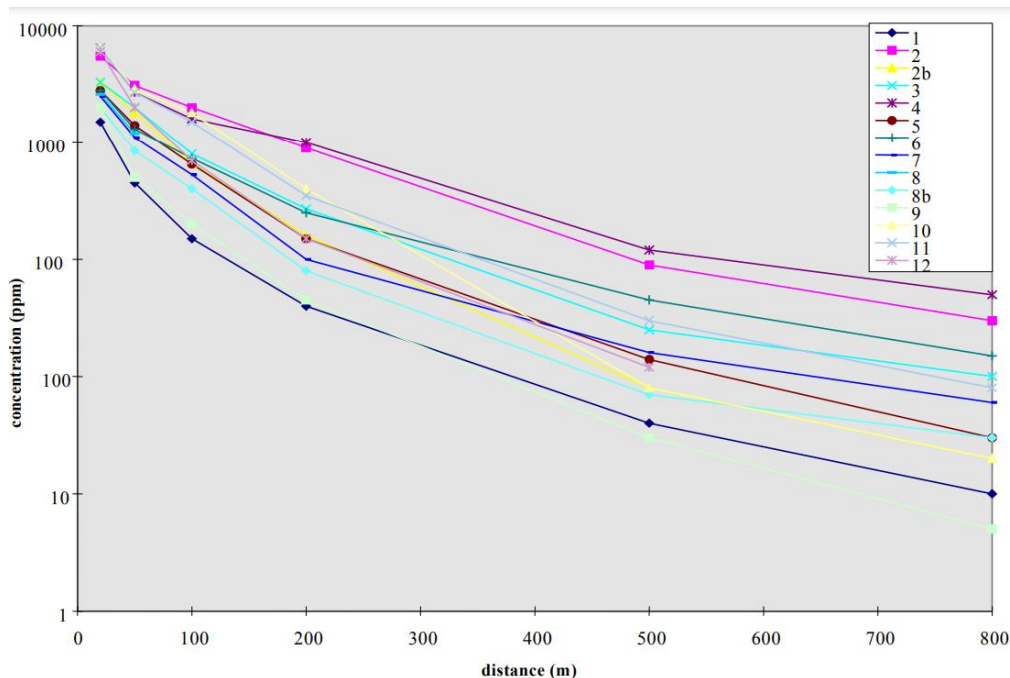
Wanneer er objecten aanwezig zijn bij het vrijkomen van de ammoniak en wanneer de gaswolk die vrijkomt even groot is als een object zal de initiële dispersiefase en daardoor de dispersie in de atmosfeer veranderen. Een obstakel kan er bijvoorbeeld voor zorgen dat er direct een ammoniakplas ontstaat. Ook kan het obstakel, wanneer het zich verder weg van de bron bevindt en de gaswolk even groot is als het object, de gasvormige massastroom modifieren en niet de fysieke staat van de ammoniakstraal.

3.2.2 Praktijktests

Ineris heeft een aantal ammoniakdispersietests uitgevoerd, waarbij rekening is gehouden met variërende weercondities. 15 tests zijn uitgevoerd waarbij 1.400 tot 3.500 kg vrijgelaten werd per test gedurende 7 tot 14 minuten. Deze hoeveelheid aan vrijgekomen ammoniak is klein ten opzichte van een hoeveelheid ammoniak die vrij kan komen uit een buisleiding. Een buisleiding met een relatief lage diameter van 8 inch (circa 20 cm) kan bijvoorbeeld al een spill opleveren van 22.000 kg bij een relatief korte afstand van 1.000 m tussen afsluitkleppen. Wanneer de kleppen op een onderlinge afstand van 5.000 m worden geplaatst, resulteert dit in een spill van bijna 90.000 kg ammoniak. Dit wordt nader onderzocht in hoofdstuk 7.

Bij het uitvoeren van het onderzoek van Ineris viel op dat het zichtbare gedeelte van de ammoniakwolk bij vrijkomen veranderde van circa 500 meter naar circa 70 meter bij een verandering in luchtvochtigheid van 82 % naar 24 %. Daarnaast werd in geen enkel geval een stijging van de gevormde ammoniakwolk waargenomen. Dit betekent dat de wolk, ook bij een luchtvochtigheid van 24 %, zwaar genoeg is geweest om stijging te doen voorkomen. Onderstaande afbeelding geeft de progressie weer van ammoniakconcentraties in de wolk van alle door Ineris uitgevoerde tests als een functie van de afstand vanaf de bron. De onderstaande tabel geeft verschillende weerparameters weer die tijdens de uitgevoerde tests gemeten zijn en zijn geplot in de grafiek (1 t/m 12).

Afbeelding 3.2 Progressie van ammoniakconcentraties in de wolk als functie van de afstand tot de bron¹



De belangrijkste conclusies uit deze praktijktests geven aan dat de vrijgekomen ammoniakwolk zich in zijn algemeenheid gedraagt als een zwaar gas. Pas nadat de uitstroomsnelheid kleiner is geworden dan de windsnelheid, zal verdamping en verspreiding van (steeds lagere) concentraties ammoniak ook opwaarts plaatsvinden. Dit wordt ook wel nalevering genoemd. Daarnaast kan de temperatuur in de ammoniakstraal die vrijkomt dalen tot -70°C . Objecten zoals een muur geplaatst op een locatie van minder dan een paar meter van waar de ammoniakstraal vrijkomt, hebben een sterke invloed op de gemeten ammoniakconcentratie na dit object. Circa 2 keer zo lage concentratiewaarden zijn gemeten wanneer een obstakel in de straal geplaatst werd ten opzichte van een 'open-field release'.

In dit onderzoek is ook het effect van watergordijnen onderzocht. De resultaten toonden aan dat watergordijnen die geproduceerd waren met zogeheten 'peacock tail' mondstukken, weinig tot geen effect hadden op de verdunning en verspreiding van de ammoniakwolk. Verklaring hiervoor was dat de ammoniakwolk de watergordijnen kunnen passeren indien er voldoende momentum is, of dat de weersomstandigheden veranderden tijdens de tests (bv. wind in de juiste richting kan ook extra momentum geven). Andere studies tonen echter wel de effectiviteit aan van waterschermen^{2,3} maar geven ook aan dat het erg afhankelijk is van de weersomstandigheden, druppelgrootte, positionering van schermen, de uitstroomsnelheid en uitstroomhoeveelheid. Deze experimenten gaan verder ook uit van lagere uitstroomsnelheden (0,25 kg/s vs 2-4 kg/s) en uitstroomhoeveelheden (20-25 kg vs 2.000-3.400 kg) vergeleken met de experimenten van INERIS. De inzetbaarheid van waterschermen door de brandweer bij grotere uitstroomhoeveelheden, zoals onderzocht wordt binnen dit onderzoek, is op basis van de bevindingen van INERIS dus niet direct effectief.

Ook de Homeland Security, het Amerikaanse chemische veiligheidsanalyse centrum, heeft in 2011 veldproeven uitgevoerd waarbij het gedrag van vloeibaar gemaakt ammoniak bij uitstroming uit insluitingen onder druk werd onderzocht. In 10 proeven werd per proef 1 of 2 ton ammoniak vrijgelaten bij een temperatuur die varieerde van 0 tot circa 10°C .

¹ Ammonia - Large scale atmospheric dispersion tests; Ineris; 2005.

² Effectiveness of water curtains to protect firemen in case of an accidental release of ammonia: comparison of the effectiveness for two different release rates of ammonia, Dandrieux et al., 2001.

³ THE USE OF FLUID CURTAINS FOR POST-RELEASE MITIGATION OF GAS DISPERSION, H.H. Schoten et al., TNO, ISPRA, European Process Safety Centre.

De proeven werden uitgevoerd bij verschillende windsnelheden. In elk geval creëerde het vrijgekomen ammoniak binnen enkele minuten een witte wolk die in alle richtingen vanuit de insluiting naar buiten drong. Bij lagere windsnelheden (0,25 m/s) ontstond er een wolk van circa 1 m die na een periode van circa 45 minuten omhoog bewoog en tot 150 m hoog reikte. Daarbij ontstond een wolk die als een koepel over de insluiting hing. Bij de hoogste windsnelheden (3,5 m/s) ontstond tevens een wolk. Deze reikte echter niet hoger dan 10 m en werd vrijwel direct met de wind meegevoerd. Hoe hoger de windsnelheid, des te sneller wordt ammoniak vermengd met de lucht en is het gevaar lager.

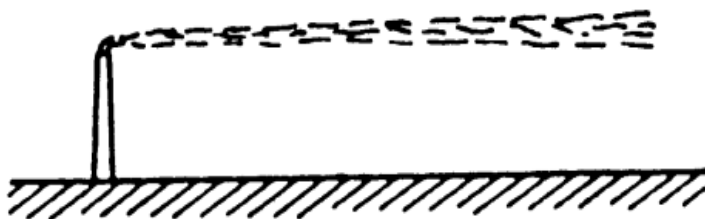
3.2.3 Invloed van meteorologische condities

Verspreiding van een gas uit een opening is afhankelijk van meteorologische condities; zoals bijvoorbeeld omgevingstemperatuur, zoninstraling en de weerklasse. Weerklassen zijn omschreven met een letter en een cijfer. Het cijfer geeft de gemiddelde windsnelheid (m/s) aan op 10 m hoogte. De letter geeft de Pasquill-stabiliteitsklasse (A tot F) aan. De letter A geeft een extreem instabiele atmosfeer aan en de letter F een gemiddelde stabiele atmosfeer. Zo regent bijvoorbeeld bij een kalme nacht (weerklasse F1,5) een deel van de ammoniak uit waarna een vloeistofplas gevormd wordt. De ammoniak verdampt vervolgens en dispersie naar de omgeving vindt plaats. Bij overige weerklassen (overdag en 's nachts) regent de ammoniak niet uit, maar ontstaat er een mist. Deze mist is een koude deken van ammoniak en waterdamp. Bij een instabiele atmosfeer (letters A en B) vindt bij vrijkomen van ammoniak op een relatief hoog punt (meerdere meters boven maaiveld) vooral atmosferische verspreiding plaats, waarbij een zeer open gaswolk (dus niet alleen voor ammoniak) ontstaat. Dit type wolk is weergegeven in onderstaande afbeelding. Bij het vrijkomen van ammoniak op grondniveau vindt bij instabiel weer ook in eerste instantie atmosferische verspreiding plaats (gebaseerd op Jack Rabbit III field tests uit 2011). De vrijgekomen ammoniakwolk heeft daardoor minder lang de kans om zich laag over de grond te verspreiden en is minder dicht.

Afbeelding 3.3 Dispersie van een gaswolk in een instabiele omgeving (Ineris, 2005)



In een stabiele omgeving (letters E en F) is de mogelijkheid tot het verspreiden van een verontreinigende stof beperkt. Hierdoor ontstaat een zogenaamde 'gesloten' gaswolk, zoals weergegeven in onderstaande afbeelding. Bij het vrijkomen van ammoniak op grondniveau zal een dichte gaswolk ontstaan die in eerste instantie over de grond verspreidt en uiteindelijk maar minder snel stijgt ten opzichte van verspreiding bij instabiele weerklassen.



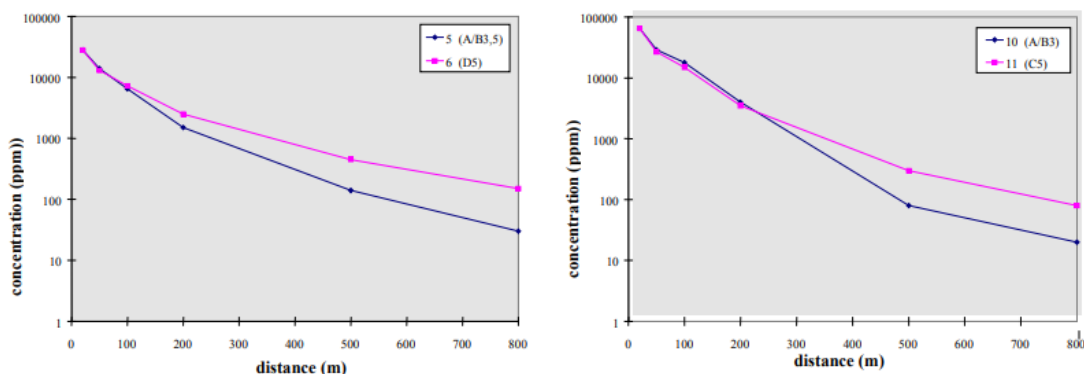
De stabiliteit van de atmosfeer is afhankelijk van een aantal factoren. Een aantal van deze factoren is onder andere:

- de standaarddeviatie van de windrichting;
- de verticale temperatuurgradiënt;
- het nummer van Richardson. Deze geeft de verhouding tussen de potentiële en kinetische energie weer;
- de Monin-Obukhov lengte, de karakteristieke lengte van de atmosferische turbulentie. Deze is afhankelijk van de vloeistofdichtheid. De warmtecapaciteit, de frictiesnelheid, de von Karman constante, de gravitatieconstante, de temperatuur van de bodem en de verticale warmteoverdracht;
- en methoden gebaseerd op criteria zoals de gemiddelde windsnelheid op een gegeven hoogte, de altitude van de zon, de dichtheid van de bewolking, etc.

Weerstabiliteit

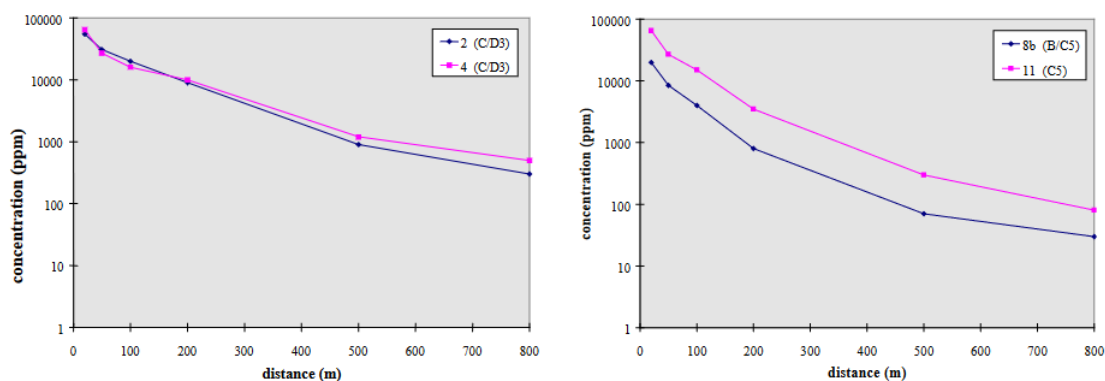
Ineris heeft tevens de invloed van de weerstabiliteit op ammoniakdispersie gemeten. Daarvoor hebben zij de ammoniakconcentratie na vrijkomen gemeten op 1 m hoogte boven de grond bij verschillende weercondities en over verschillende afstanden. De variatie in weercondities hebben tot tientallen meters na het punt van vrijkomen invloed op de verspreiding, terwijl over de grotere afstanden de atmosferische stabiliteit de meest bepalende factor voor dispersie is. Dit komt omdat de passieve dispersie zone dan van kracht is. Significante verschillen in concentraties kunnen dus gedetecteerd worden op lange afstand voor twee tests terwijl tijdens het vrijkomen de weercondities gelijk zijn maar de weerstabiliteit verschilt. Onderstaande grafieken geven de resultaten weer van tests 5 en 6 (2.520 kg uitstroom) en 10 en 11 (2.150 en 1.800 kg uitstroom) waarbij dit fenomeen wordt gedemonstreerd. Tests 5 en 6 én test 10 en 11 hebben bij vrijlating nagenoeg gelijke weercondities. De weerstabiliteit verschilt echter per test. Op enkele tientallen meters van het punt van vrijkomen is de concentratie van elke twee tests bijna identiek. Op grotere afstanden, bij passieve dispersie, wordt het verschil in concentratie steeds groter. Opvallend is dus dat voor instabiele weerklassen (tests 6 en 11) de concentratie na 800 meter met een factor 4 of 5 minder afneemt ten opzichte van meer stabiele weerklassen (tests 5 en 10).

Afbeelding 3.5 Progressie van concentraties als functie van afstand voor verschillende weerklassen voor twee sets van tests



Wanneer twee tests bij dezelfde omstandigheden en bij gelijke weerklassen zijn uitgevoerd, bleek de afname in ammoniakconcentratie gemeten op 1 m hoogte over de afstand een soortgelijk profiel te tonen. In onderstaande afbeeldingen is dit weergegeven voor test 2 en 4, twee tests met soortgelijke weercondities en uitstroomcondities, en test 8b en 11, twee tests met soortgelijke weercondities maar een verschil in stroomsnelheid.

Afbeelding 3.6 Progressie van concentraties als functie van afstand voor verschillende weerklassen, voor twee sets van tests



3.3 Faalmechanismen

De faalmechanismen kunnen generiek van aard zijn zoals beschreven in Bevb, maar ook kan transport van ammoniak leiden tot faalmechanismen specifiek door ammoniak waardoor er aanleiding is tot aanpassing aan de faalfrequentie van de voorgeschreven faalfrequenties van het Bevb. In onderstaande paragrafen wordt nader ingegaan op mogelijke faalmechanismen bij buisleidingen en specifiek, ammoniak in buisleidingen.

3.3.1 Generieke faalmechanismen

In de categorie Chemicaliënleidingen worden volgens het Besluit externe veiligheid buisleidingen (Bebv) twee scenario's beschouwd in de rekenmethodiek. Het gaat hier om een breuk van de buisleiding en een lek met een effectieve diameter van 10 % van de nominale inwendige diameter die maximaal 20 mm is. Onderstaande tabel geeft de faalfrequenties weer voor de scenario's. De faalfrequenties gelden voor de buisleiding inclusief flenzen, lassen en kleppen maar exclusief pompen. De bijbehorende faaloorzaken zijn weergegeven in tabel 3.4.

Tabel 3.3 Scenario's en faalfrequenties voor ondergrondse buisleidingen Bevb

Scenario	Faalfrequentie (/km/jaar)
breuk van de buisleiding	$1,5 \times 10^{-4}$
lek met een effectieve diameter van 10 %- van de nominale diameter, maximaal 20 mm	$4,5 \times 10^{-4}$
totaal	$6,0 \times 10^{-4}$

Tabel 3.4 Faaloorzaakverdeling voor buisleidingen met chemicaliën Bevb

Faaloorzaak	Faalfrequentie			Aandeel (%)	
	<i>Breuk</i>	<i>Lek</i>	<i>Totaal</i>	<i>Breuk</i>	<i>Lek</i>
beschadiging door derden	$7,19 \times 10^{-5}$	$9,86 \times 10^{-5}$	$1,71 \times 10^{-4}$	47,9	21,9
mechanisch	$3,23 \times 10^{-5}$	$1,45 \times 10^{-4}$	$1,77 \times 10^{-4}$	21,5	32,2
inwendige corrosie	$5,71 \times 10^{-6}$	$4,40 \times 10^{-5}$	$4,97 \times 10^{-5}$	3,8	9,8
uitwendige corrosie	$1,72 \times 10^{-5}$	$1,32 \times 10^{-4}$	$1,49 \times 10^{-4}$	11,5	29,3
natuurlijke oorzaken	$9,15 \times 10^{-6}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$2,27 \times 10^{-5}$	6,1	3,0
operationeel/overig	$1,38 \times 10^{-5}$	$1,71 \times 10^{-5}$	$3,09 \times 10^{-5}$	9,2	3,8
totaal	$1,5 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	100	100

Bij de faalfrequenties voor het breukscenario is de invloed van de grondroerdersregeling (mechanische graafwerkzaamheden) opgenomen door het aantal breuken als gevolg van beschadiging door derden te reduceren met een factor 2,5. De diepteligging wordt opgenomen in de faaloorzaak 'Beschadiging door derden'. Er wordt geconcludeerd dat de oorzaak 'beschadiging door derden', dus beschadiging van buitenaf de meest voorkomende faaloorzaak is. Dit betekent dat de diepteligging hoogstwaarschijnlijk van invloed is en dat een buisleiding waar vloeibare ammoniak doorheen stroomt dusdanig diep moet komen te liggen dat dit type oorzaak zoveel mogelijk gereduceerd wordt.

De Europese Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG) heeft statistische gegevens van 1.123 incidenten in Europese gasleidingen voor de periode 1970 tot 2004. De oorzaak van deze incidenten zijn weergegeven in onderstaande tabel. Vergeleken met de voorgeschreven faaloorzaken van het Bevb komen deze faaloorzaken bij gasleidingen in Europa goed overeen.

Tabel 3.5 Oorzaakanalyse van pijpleidingongevallen in Europa¹

Oorzaak van het ongeval	% van alle ongevallen	Verdeling
beschadiging door derden	49,8	graven, paalwerk, grondwerk, ankers, bulldozers, graafmachines, ploegen, beschermkokers
constructiefouten/materiaal falen	16,7	
corrosie	15,1	
natuurlijke oorzaken	7,1	dijkbreuk, erosie, overstroming, aardverschuiving, mijnbouw, rivier
boren van leidingen onder druk	4,6	

¹ Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines; Fertilizers Europe; 2013.

Oorzaak van het ongeval	% van alle ongevallen	Verdeling
anders en onbekend	6,7	ontwerpfout, bliksem, onderhoud
totaal	100	

3.3.2 Ammoniak specifieke faalmechanismen

Interne corrosie

Vloeibare ammoniak kan in de aanwezigheid van zuurstof spanningscorrosie veroorzaken. Dit type corrosie ontstaat wanneer metalen blootgesteld worden aan een combinatie van stress en een corrosief milieu. De stresslevels die aanwezig moeten zijn, zijn in dit geval hoog en interne spanningscorrosie wordt voornamelijk in opslagtanks waargenomen. Volgens een onderzoek van Holbrook¹ hebben koolstofstalen vloeibare ammoniakleidingen geen kans op interne corrosie. Wanneer aan vloeibaar ammoniak ten minste 0,2 gew% water wordt toegevoegd, wordt spanningscorrosie namelijk voorkomen. Ook kan spanningscorrosie worden voorkomen wanneer vacuümcondities worden gehanteerd (bijvoorbeeld door de leiding voor te spoelen met stikstof alvorens het ammoniaktransport te laten plaatsvinden). De Gulf Central pipeline (3.057 km) tussen Texas en Louisiana, the MidAmerican Pipeline System (1.754 km) tussen Noord Texas en Minnesota en de Tampa Bay pipeline in Florida (132 km) zijn voorbeelden van ammoniakleidingen waar nooit interne corrosie is gedetecteerd. De laatst genoemde leiding is sinds 2019 niet meer in gebruik. Volgens een vertegenwoordiger van OCI Global wordt spanningscorrosie in bestaande ammoniakleidingen in ieder geval op industriecomplex Chemelot niet waargenomen². In paragraaf 3.4 wordt nader ingegaan op de inspectiemethoden die toegepast kunnen worden en de bijbehorende nauwkeurigheid om onder andere spanningscorrosie te detecteren.

Thermische expansie

Vloeibare ammoniak zet uit wanneer het opgewarmd wordt. Wanneer een hoeveelheid vloeibare ammoniak geïsoleerd wordt, bijvoorbeeld tussen twee kleppen, zal het waarschijnlijk uitzetten wanneer de temperatuur verhoogd wordt. Als de ammoniak verwarmt door de omgevingstemperatuur, is de thermische expansie groter dan het toegenomen volume van de leiding door de thermische expansie van het leidingmateriaal. Hierdoor neemt de druk toe en kan ammoniak lekken uit leidingverbindingen. Om dit te voorkomen kunnen kleine ontlastkleppen worden geïnstalleerd.

De noodzaak voor ontlastkleppen is echter alleen benodigd voor cryogene systemen met een lage ontwerpdruk, bovengrondse delen waar de temperatuur zo hoog kan worden dat de dampspanning boven de ontwerp temperatuur van het buisleidingmateriaal uitkomt en wanneer ontworpen moet worden voor brandscenario's waarbij ingeblokte delen door een externe brand kunnen worden aangestraald. Voor transportleidingen is cryogeen transport niet zinvol. Het drukhoudende deel van de leidingen heeft een hoge ontwerpdruk en daarmee zijn procesmatig geen ontlastkleppen benodigd. Daarnaast worden in dit onderzoek ondergrondse leidingen beschouwd. Thermische expansie zal voor transport van ammoniak door buisleidingen dus waarschijnlijk geen significant risico zijn.

IJs ontwikkeling

Transport van vloeibaar ammoniak door buisleidingen brengt het risico op ontwikkeling van ijs met zich mee. Door de vorming van ijs zou de buis zwaarder worden, waardoor de belasting op de ondersteunende onderdelen groter wordt.

Ijsvorming aan de binnenzijde van de leiding is echter alleen een issue bij cryogene leidingen. Cryogeen transport van ammoniak is ondergronds niet haalbaar. Daarom kan ijsvorming in ondergrondse vloeibare ammoniakleidingen vrijwel worden uitgesloten. Bij lekken en afsluiters kan echter wel ijsvorming optreden, omdat de ammoniak bij expansie naar atmosferische druk koud kookt.

¹ Delivery of Hydrogen Energy by Anhydrous Ammonia; Dr. J. Holbrook; 2006.

² Vergaderverslag Ammoniak Kennissessie; *Persoonlijke communicatie*; 2023, 19 oktober.

Dit kan een risico vormen wanneer de onderdelen op deze manier niet langer bedienbaar zijn. Het is daarom noodzakelijk de leiding zo te ontwerpen dat er bij uitstroming geen problemen ontstaan in verband met ijsvorming.

Inbedrijfsstelling

Een buisleiding waar lucht in zit moet alvorens ammoniak te introduceren gespoeld (purgen) worden met stikstof. Dit voorkomt de vorming van potentieel explosieve ammoniak-luchtmengsels (16 %-27 % ammoniak in lucht) binnen een gesloten omgeving.

Uitbedrijfsstelling

Het leegmaken van een ammoniakbuisleiding moet uitgevoerd worden door vloeibare ammoniak te verdrijven met een gas, bij voorkeur met ammoniakdamp. Verdrijven met stikstof kan plaatsvinden wanneer de meeste ammoniak is verpompt. Het spoelen van vloeibare ammoniak met stikstof kan extreem lage temperaturen veroorzaken (van -70 °C). Dergelijke temperaturen zijn een aandachtspunt voor de ontwerpspecificaties van de leiding. Er wordt veelal aangenomen dat de laagst mogelijke temperatuur van ammoniak -33 °C is. Dit is echter alleen het geval wanneer de ammoniakdamp boven de vloeistof 1 bar is. Wanneer de druk van ammoniak lager wordt door het toevoegen van stikstof wordt het kookpunt veel lager. Dit is het resultaat van de hitte die nodig is voor verdamping. De verdreven vloeibare ammoniak moet dan naar een passende opslaglocatie worden vervoerd, zoals een opslagtank

3.4 Mitigerende maatregelen

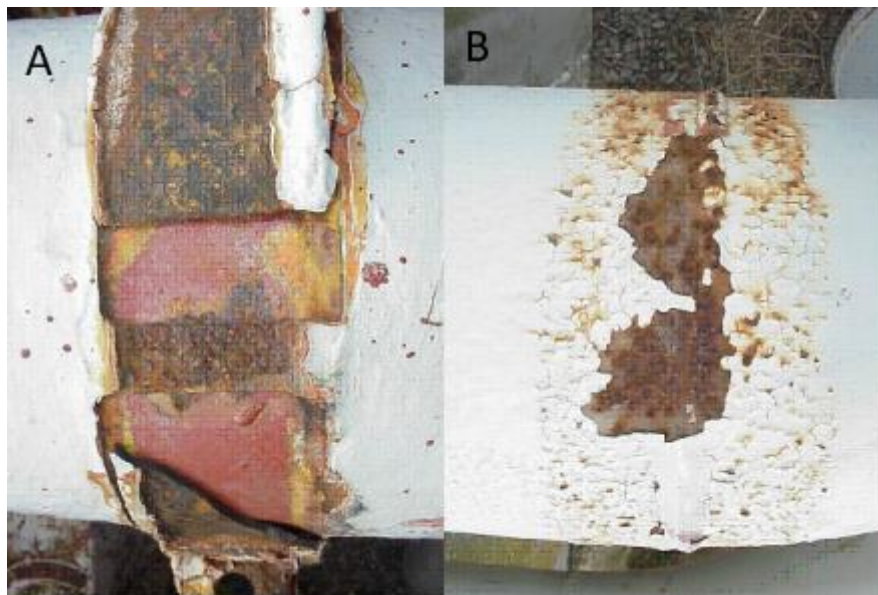
Bij het vrijkomen van ammoniak uit buisleidingen zullen mitigerende maatregelen getroffen moeten worden die de toxische effecten zoveel mogelijk kunnen terugdringen. Dit kan worden gedaan door maatregelen te nemen ter voorkoming van een lek en maatregelen te nemen die na het ontstaan van een lek ingezet kunnen worden, oftewel zowel in kansen en effecten kunnen maatregelen genomen worden om deze te reduceren.

Externe corrosie

Ondergrondse leidingen moeten worden gecoat om externe corrosie tegen te kunnen gaan. Dit werd vroeger met bitumineuze materialen, een dik vloeibaar mengsel van verschillende koolwaterstoffen die voorkomen in ruwe aardolie, uitgevoerd. Tegenwoordig worden voornamelijk geëxtrudeerd -polyethyleen en -polyurethaan worden ingezet als coating. Bij de locatie waar de bodem in contact komt met de lucht hebben ondergrondse pijpleidingen vergelijkbare faalmechanismen als leidingen die bovengronds liggen. Daarom moet op deze plekken een pipewrap worden gebruikt om externe corrosie te voorkomen.

Verder mogen pijpleidingondersteuning de leiding niet beschadigen. Dat betekent bijvoorbeeld dat er voldoende ondersteunende kracht overblijft wanneer een deel van de ondersteuning het begeeft. Ook mogen deze onderdelen geen scherpe randen hebben en mogen ze regenwater niet toe laten in de leiding. Buisklemmen kunnen bijvoorbeeld een rol spelen bij het corroderen van de leiding. Dit kan gebeuren wanneer er regenwater of condens tussen de leiding en de klem terecht komt. Foto A in onderstaande afbeelding laat corrosie zien dat ontstaan is onder een buisklem.

Afbeelding 3.7 A) Externe corrosie onder een buisklem, B) Externe corrosie bij een lasnaad



Thermische isolatie tussen een koude leiding en de buisklem reduceert de vorming van koude plekken op de leiding en daarmee de vorming van corrosie. Direct contact tussen een roestvrijstalen leiding en een koolstofstalen ondersteuning moet worden vermeden om corrosie te voorkomen.

Lasnaden en zones rondom die door hitte zijn beïnvloed zijn kwetsbaar voor corrosie. Dit komt echter niet direct door het lassen, maar door het feit dat het lasgebied van lagere kwaliteit is dan de coating van de rest van de leiding. Corrosie van een lasnaad is weergegeven in foto B van bovenstaande afbeelding. De corrosie onder een buisklem en van een lasnaad kan gerepareerd en onderdrukt worden door zandstralen van de leiding, gevolgd door het aanbrengen van een primer coat en tot slot het aanbrengen van twee lagen verf. In de werkgroep werd gesteld dat het verplicht is om lasnaden na elke sectie van elkaar te verschuiven om potentiële risico's te verminderen¹. Het is echter volgens het rekenvoorschrift geen verplichting om de lasnaden te verschuiven. Vanuit de industrie wordt dit gezien als een 'best practice'.

Bij een lek van ammoniak zal op de locatie van het lek geen externe corrosie optreden. Volgens een vertegenwoordiger van OCI Global komt dit doordat de ammoniak bij het vrijkomen door de atmosferische druk koud kookt. Hierdoor zijn corrosiemechanismen niet langer in werking¹.

Kathodische bescherming

Kathodische bescherming is een methode van externe corrosiebestrijding die berust op het principe van elektrische potentiaalverlaging van het te beschermen object. Dit werkt oxidatie tegen. Dit is essentieel voor de bescherming tegen corrosie van ondergrondse leidingen. Bij de oxidatie van metalen gaan metaalatomen een chemische verbinding met zuurstof aan. Elektronen stromen dan van een plek met een hoog elektrisch potentiaal naar een plek met een laag potentiaal. Kathodische bescherming heft dit potentiaal op. De elektrische stroom kan dan niet gaan lopen en oxidatie kan niet plaatsvinden. Zo wordt corrosie voorkomen. Kathodische bescherming is na het aanbrengen van een coating een secundaire beschermingsmethode. De coating reduceert de benodigde beschermstroom waardoor de bescherming toeneemt.

Druk en temperatuur

Alle constructie-elementen, zoals kleppen, flenzen en afdichtingen moeten geschikt zijn voor de maximaal toelaatbare druk plus externe krachten. Alle externe elementen moeten gemaakt zijn van koolstofstaal of roestvrijstaal waar geen koper in zit (zoals messing of brons). Gebruikte kunststoffen moeten tevens geschikt zijn voor ammoniaktransport.

¹ Vergaderverslag Ammoniak Kennissessie; *Persoonlijke communicatie*; 2023, 19 oktober.

Pijpleidingen, afsluitingen en alle andere materialen moeten drukgolven veroorzaakt door verschillen in stroomsnelheid of stroomrichting aankunnen. Ook moeten ze verschillen in temperatuur kunnen weerstaan.

3.4.1 Voorkomen van het lek

Bescherming fysieke schade van buitenaf

Ondergrondse leidingen kunnen beschadigd worden door verschillende activiteiten; waaronder graven en fysieke krachten van vrachtwagens, spoorwegen en waterwegen. De leidingen kunnen beschermd worden door middel van een aantal maatregelen:

- zoals hierboven tevens beschreven dient de gronddekking voldoende te zijn om schade van buitenaf zoveel mogelijk te voorkomen. De typische gronddekking is 1,5 m. Op sommige locaties is het grondwaterniveau dusdanig hoog dat de leiding continu in contact staat met grondwater. Er moeten maatregelen genomen worden ter voorkoming van uitwendige corrosie (zoals kathodische bescherming, zie hieronder) aan de leiding;
- er kan op ca. 0,5 m boven de leiding een alarmkabel of een systeem dat reageert op trillingen worden aangelegd. Als deze geraakt wordt door een graafmachine, kan deze kabel een waarschuwingssignaal afgeven naar het controlecentrum van de leiding nog voordat de buisleiding zelf geraakt wordt;
- de wanddikte van een vloeibare ammoniakbuisleiding kan per gebied variëren. Zo kan bijvoorbeeld voor een dikkere wand worden gekozen wanneer de leiding onder een kanaal door loopt, of kunnen afdekplaten boven de leiding worden geplaatst. Daarna kan toezicht of hekwerk worden geplaatst tegen onbevoegde toegang.

Leidingontwerp

De meeste ammoniak buisleidingen in Europa zijn voor 1997 aangelegd en de ontwerpaspecten verschillen van land tot land. In de EU bepaalt elke lidstaat zelf zijn ontwerpisen voor ammoniakbuisleidingen. Dit heeft geleid tot verschillende nationale ontwerpcodes. In sommige landen wordt dit gedaan via milieuvergunningen. Eisen kunnen zeer verschillend zijn en gerelateerd zijn aan aspecten zoals lijnmarkeringen, corrosie, ontlastkleppen etc. In de meeste gevallen betreft het koolstofstalen leidingen. Roestvrijstaal wordt echter vaak toegepast bij het vervangen van bestaande leidingen, bij het construeren van nieuwe korte leidingen of leidingen met een kleine diameter. Roestvrijstaal heeft namelijk een goede resistentie tegen externe corrosie.

In het rapport van Antea¹ is een onderzoek uitgevoerd naar potentiële maatregelen die getroffen kunnen worden bij het transport van vloeibaar ammoniak. De maatregelen die in dat rapport als meest effectief worden benoemd, zijn:

- parallelle/dubbele leidingen. Hierbij worden de leidingen aangelegd in een leidingbundel, is één van de twee leidingen beschikbaar voor noodopvang van ammoniak en hebben beide leidingen snelle afsluiters. De minst kritische leiding dient hierbij bovenop geplaatst te worden in verband met graafschade;
- dubbelwandige leidingen. Deze verlagen de kans op een breuk door externe beschadiging.

Leidingspecificaties zoals leidingmateriaal worden verder behandeld in hoofdstuk 4.

Isolatiekleppen

In buisleidingen waar vloeibaar ammoniak doorheen stroomt dienen isolatiekleppen geïnstalleerd te zijn. Deze kleppen moeten op afstand te bedienen zijn en er dienen hierbij geen problemen te ontstaan bij stroomuitval. De kleppen moeten worden geïnstalleerd op intervallen om de hoeveelheid ammoniak dat vrijkomt bij een lek zoveel mogelijk te beperken. De afstand tussen de kleppen kan gebaseerd worden op een consequentie-analyse waar factoren zoals nabijheid en dichtheid van omwonenden, milieugevoeligheid, buisleidingparameters (wanddikte, diameter, materiaal, inspectieregime), ammoniakdruk en temperatuur, klimaat en topografische condities en nationale wetgeving in acht worden genomen.

¹ Rapport buisleidingtransport waterstofdragers; Antea group; 2023.

Er moet ook worden gerealiseerd dat elke onderbreking in een lopende buisleiding door kleppen zelf een bron voor lekken kan zijn. De hoeveelheid ondersteunende materialen moet worden beperkt. In ondergrondse leidingen heeft lassen de voorkeur en zijn flenzen niet toegestaan.

In de VS worden isolatiekleppen bij buisleidingen op intervallen geïnstalleerd zodat het volume aan ammoniak dat maximaal kan vrijkomen tussen twee kleppen 400 ton bedraagt. In dichtbevolkte gebieden zijn deze volumes, gebaseerd op de hierboven genoemde consequentie-analyse, 10 tot 225 ton.

Inspectie

De meeste EU-landen hebben hun eigen specifieke inspectiecriteria voor ondergrondse vloeibare ammoniakbuisleidingen. Een opsomming van deze criteria wordt hieronder weergegeven:

Visuele inspectie

Onder visuele inspectie vallen de volgende belangrijke aspecten:

- conditie van de coating, isolatie en markeringen;
- positie van de isolatiekleppen, conditie van alle meetinstrumenten, conditie van de stations waar kleppen worden gehouden, conditie van pigging units;
- conditie van leidingondersteuning;
- conditie van voorzorgsmaatregelen voor veiligheid van de leiding bij kruispunten, spoorwegen en waterwegen;
- detectie van werk aan aangrenzende leidingen om de integriteit van de ammoniakleiding zoveel mogelijk te behouden en te zorgen dat de juiste leiding gebruikt wordt;
- detectie van ongeautoriseerd graafwerk of andere bedreigende activiteiten.

Zichtbare onderdelen van ondergrondse leidingen, zoals isolatiekleppen, dienen elke dag tot maandelijks geïnspecteerd te worden. De isolatieklepposities dienen extra aandacht te krijgen. Ook wordt in de EU een helikopter gebruikt voor de maandelijks visuele inspectie voor de detectie van graafwerkzaamheden.

Inspectie van lasnaden

Inspectie van lasnaden kan worden gedaan door middel van radiografie (röntgenfoto), met magnetisch deeltjesonderzoek of met een kleurstofpenetrant. Er is voor buisleidingen geen normen beschikbaar wat betreft de inspectiefrequentie. Vanuit de industrie is de ervaring dat dit willekeurig bepaald op elke vijf jaar of door veiligheidsstudies/onderhoud rondes bepaald.

Inspectie onder buisklemmen

Zoals hierboven genoemd, zijn buisklemmen gevoelig voor corrosie. Deze onderdelen zijn echter niet zichtbaar. Daardoor kan de conditie van de buisklemmen niet direct visueel worden geïnspecteerd. Daarom is het wenselijk een paar klemondersteuning te maken voor inspectie.

Druktests

Buisleidingen dienen in Nederland te voldoen aan NEN3650. Volgens Fertilizers Europe¹ stellen de meeste EU-bedrijven dat druktests gedaan kunnen worden direct na inbedrijfstelling van de leiding. Verdere metingen zijn volgens hen niet nodig. Sommige bedrijven in de EU rapporteren wel een beleid voor het uitvoeren van druktests. Het Europese Parlement en de Raad hebben voor drukapparatuur, zo ook leidingen die voor de verplaatsing van stoffen dienen, de 'Pressure Equipment Directive' (PED) of PED-richtlijn opgesteld. Deze heeft betrekking op leidingen met een toelaatbare druk van meer dan 0,5 bar. Hierop moet de CE-markering worden aangebracht middels de Europese richtlijn alvorens de leiding op de markt gebracht kan worden.

Inspectie van lijnmarkeringen

Voor ondergrondse buisleidingen kunnen regelmatig 'pole checks' uitgevoerd worden.

¹ Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines; Fertilizers Europe; 2013.

Inspectie van isolatiekleppen

Deze inspectie dient een keer per jaar uitgevoerd te worden. Tijdens deze inspectie wordt de geïnspecteerde klep geblokkeerd waarna gekeken wordt of de afsluittijd adequaat is.

Kathodische inspectie

Ondergrondse leidingen kunnen beschermd zijn tegen corrosie middels kathodische bescherming. De kathodische bescherming dient periodiek te worden gecontroleerd. Daarvoor dient de elektrische stroom en de bijbehorende spanning op verschillende locaties langs de leiding gemeten te worden. Ook dient een waarde voor het elektrisch leidingpotentieel ten opzichte van de grond gemeten te worden. De resultaten van deze metingen geven weer of de leiding als kathode werkt en dus beschermd is tegen corrosie. De frequentie voor deze metingen is typisch een keer per jaar, er zijn bedrijven die een frequentie van eens in de twee weken verwachten.

Pigging methode

Bij pigging wordt gebruik gemaakt van een reinigingsprop, de zogenaamde *pig*. Deze wordt via de productstroom of met een externe pomp door de leiding geperst. Het is noodzakelijk de leiding periodiek te reinigen door middel van het zogenaamde *first generation pigging*. Dit moet gedaan worden alvorens inspectie met een *second generation pig*. Verontreiniging in de leiding kan namelijk een *second generation pig* beschadigen en erosie veroorzaken. De *second generation pig* kan de wanddikte meten, lekken detecteren, de richting van de leiding bepalen (om deformaties en schade te detecteren) en de operateur in staat stellen de leiding te legen bij een noodgeval. Op industriecomplex Chemelot wordt reeds gebruik gemaakt van pigging voor vloeibare ammoniakbuisleidingen¹. Deze worden eens per 6 jaar gecontroleerd op afwijkingen.

3.4.2 Maatregelen bij ontstaan lek

Na het ontstaan van een groot lek moeten maatregelen genomen worden die zoveel mogelijk de veiligheid van omwonenden waarborgen. De maatregelen dienen rekening te houden met de omgeving van de locatie van de lek. Daarnaast moeten de gelekte stroom en de vrijgekomen damp worden teruggedrongen. Tevens kunnen noodmaatregelen en het uitvoeren van een noodplan worden ingezet.

Detectie van het lek

Ontsnappend ammoniak uit een klein of groot lek kan op verschillende manieren gedetecteerd worden. Deze worden hieronder samengevat.

Ammoniaksensoren

Deze kunnen worden geplaatst rondom een ammoniakbuisleiding. Er zijn drie veelgebruikte typen ammoniaksensoren:

- het elektrochemische type, die gebruikt wordt om concentraties tot 1.000 ppm te detecteren. Deze sensor moet echter elk half jaar gekalibreerd worden en de levensduur is meestal gelimiteerd tot 3 jaar. De investeringskosten zijn relatief laag;
- het solid-state type, die gebruikt wordt om concentraties van 10.000 tot 20.000 ppm te detecteren. Dit type sensor is minder accuraat bij lage concentraties. De kalibratiefrequentie is eens per jaar en de levensduur 5 tot 10 jaar. De zwakte van dit type is de gevoeligheid voor andere stoffen dan ammoniak;
- het infraroodtype wordt tevens gebruikt voor concentraties van 10.000 tot 20.000 ppm en is ook minder accuraat bij lage concentraties. De kalibratiefrequentie is eens in de 6 tot 12 maanden. Er is geen data over levensduur beschikbaar. Het voordeel van dit systeem is dat het ammoniakdampen kan detecteren over lange afstanden. Het elektrochemische type en het solid-state type detecteren een gasmonster, waar de infrarood sensor de omgeving scant op de aanwezigheid van ammoniak over een afstand van 10 tot 100 meter.

¹ Vergaderverslag Ammoniak Kennissessie; *Persoonlijke communicatie*; 2023, 19 oktober.

De concentratie van een ammoniakwolk neemt af na vrijkomen naarmate de wolk een grotere afstand overbrugt. Dit betekent dat de bovengenoemde sensoren verschillen in de mate van waarneming van ammoniak wat betreft afstand. De sensoren die lagere concentraties kunnen waarnemen, zijn daarmee beter inzetbaar voor de detectie van ammoniak over grotere afstanden.

Massabalanssysteem

Dit systeem detecteert spontane veranderingen in de massabalans van de vloeibare ammoniakstroom in de pijpleiding. Als er een lek ontstaat slaat dit systeem alarm. Als er niet door de operateur wordt ingegaan op dit alarm tijdens een vooraf ingesteld tijdframe, sluiten sommige systemen automatisch de isolatiekleppen ofwel in het onderdeel van het leidingsysteem waar de lek zich bevindt of in de gehele pijpleiding. Het massabalanssysteem wordt vanuit de praktijk gezien als een goed werkbaar en betrouwbaar middel om lekkages te detecteren¹.

Drukvalsysteem

Dit systeem reageert op afwijkingen van gebruikelijke drukvallen in de pijpleiding. Het is veelal gebaseerd op een serie drukvalmetingen. Wanneer een afwijking van vooringestelde waarden wordt gedetecteerd, worden isolatiekleppen automatisch gesloten. Dit wordt ook wel een dynamisch lekdetectiesysteem genoemd.

Akoestisch systeem

Het akoestisch systeem monitort akoestische signalen in de pijpleiding bij een lek. Met dit systeem kunnen kleine lekken van 0,4 kg/s al worden gedetecteerd. De lekdetectie vindt plaats binnen 10 seconden en het systeem berekent de locatie van de lek binnen 20 seconden. Het akoestisch systeem is relatief nieuw in ontwikkeling. Slecht een enkele EU ammoniakleiding bezit dit detectiesysteem.

Seismisch systeem

Dit systeem heeft seismische sensoren die langs en in nabijheid van de pijpleiding liggen. Deze draadloze sensoren detecteren activiteiten die seismische signalen in de bodem creëren. Als gevolg zenden de sensoren het opgepikte signaal naar een verwerkingsunit. Het seismisch systeem kan het verschil tussen verschillende gebeurtenissen bepalen; zoals iemand die langsloopt, een rijdende auto, werktuigen, graven, boren in de leiding, lekken, etc.

De verwerkte data wordt naar het controlecentrum van de leidingexploitant gezonden. De locatie en classificatie van de gebeurtenis wordt meegestuurd, waardoor de operateur de juiste handelingen kan uitvoeren. Dit systeem kan worden ingezet in bovengrondse en ondergrondse leidingen en is gebruikt in verschillende olieleidingen in Azië en Zuid-Amerika, maar nog niet in vloeibare ammoniakleidingen.

Een bodemtemperatuursysteem

Dit systeem is een optisch vezelsysteem dat veranderingen in temperatuur in de bodem detecteert en wordt bijvoorbeeld gebruikt op industrieterrein Chemelot (bron: OCI). Deze wordt langs en boven de leiding gepositioneerd en gekoppeld aan een interpretatiesysteem. Bij dit soort systemen is goede afstemming nodig op de lokale situatie. Externe factoren zoals sterk variërende weersomstandigheden kunnen zorgen voor false positives. Ook is er nog een menselijke factor bij betrokken, het systeem is namelijk nog afhankelijk van de operators die verantwoordelijk zijn voor de monitoring. Zij moeten het systeem zodanig begrijpen om false positives en daadwerkelijk lekkages kunnen onderscheiden, en zo het systeem optimaliseren².

Beschermen van omliggende omgeving

Wanneer er een lek van ammoniak plaatsvindt, is het noodzakelijk directe waarschuwingen af te geven. Vooral wanneer de buisleiding zich in de buurt van een bewoond gebied bevindt. De bewoners van het gebied en een gebied dat in de windrichting ligt moeten wellicht geëvacueerd worden. Evacuatie kost echter tijd en is daardoor vaak niet effectief voor voorkoming van de toxische effecten van ammoniak voor de mens.

¹ Vergaderverslag Ammoniak Kennissessie; *Persoonlijke communicatie*; 2023, 19 oktober.

² Field Experience from Fiber Optic Ammonia and LNG Leak Detection Systems Installations, D. Inaudi, R. Walder, T. Roberts, SMART-EC SA & Roctest.

Voor bewoners die in de gevarezone leven is het noodzakelijk om binnen te blijven; alle deuren, ramen en ventilatieopeningen te sluiten; en om met een natte handdoek openingen onder deuren en ramen te dicht. Bij langdurig vrijkomen is evacuatie echter veiliger.

Terugdringen van de uitstroom

Naast het in veiligheid brengen van omwonenden is het belangrijk de uitstroom van ammoniak uit de leiding zoveel mogelijk terug te dringen. De druk van de leiding blijft tijdens de uitstroom vrijwel constant zolang de bron vloeibaar ammoniak behoudt. De lekkende leiding dient niet besproeid te worden met water, omdat het water dat normaal gesproken beschikbaar is voor incidentbestrijding warmer is dan de buisleiding waar koud kokend ammoniak doorheen stroomt. De uitstroom kan gecontroleerd worden door isolatie van de lek in de leiding of door reparatie van de lek bij een lek in een klep of flens.

Terugdringen van de damp uit de koude ammoniakplas

Het controleren van de ammoniakdamp kan uitgevoerd worden door de grootte van de plas terug te dringen. Een dijk gemaakt van aarde kan hier bijvoorbeeld een oplossing voor zijn. Ook kunnen zandzakken hieraan bijdragen. Hierdoor wordt de input van warmte uit de grond teruggedrongen. Ten slotte kan de straal van de vrijkomende ammoniak worden gebroken. Er kan bijvoorbeeld een waterscherm of obstakel in het pad van de straal worden geplaatst. Daardoor zullen sommige vloeibare druppels gescheiden worden van de straal en zal er een plas op de grond ontstaan. Dit kan echter alleen worden uitgevoerd met een beschermende kleding (gasdicht pak) aan en adembescherming. Daarnaast moeten degenen die het waterscherm of obstakel plaatsen ontsmet worden en moet de inzet en tijdsduur beperkt blijven.

Ammoniak lost goed op in water waardoor ammoniakdamp snel wordt geabsorbeerd. 1 volume-eenheid water absorbeert ongeveer 200 volume-eenheden ammoniakdamp¹. Een lek van 1 liter ammoniak vormt 125 liter gasvormige ammoniak. Om uitstromende ammoniak te absorberen is echter een zeer grote hoeveelheid water benodigd. Voor 1 deel ammoniak is namelijk 5 keer zoveel water nodig. Er moet echter rekening mee gehouden worden dat dit de risico's van het vrijkomen van ammoniak slechts uitstelt, aangezien de plas weer zal uitdampen. Ook is het niet zomaar uitvoerbaar voor buisleidingstrajecten van meerdere kilometers en moet rekening gehouden worden met beschermende kleding en adembescherming. Immers, waterschermen kunnen niet over het hele traject worden geplaatst. Er zal dus een keuze gemaakt moeten worden voor de locaties van de sproeiers waardoor er altijd delen van het traject zijn zonder maatregelen. Daarnaast kan het inzetten van sproeiers extra milieurisico's opleveren wanneer de ontstane plas bijvoorbeeld naar een nabijgelegen wateroppervlak stroomt.

Volgens Fertilizers Europe mag water nooit direct op een plas vloeibaar ammoniak worden gesproeid, tenzij er een honderdvoud aan water aanwezig is. Water sproeien op vloeibare ammoniak bevordert namelijk de verdamping en dus ook de concentratie van ammoniak in de wolk.

Noodmaatregelen

De volgende veiligheidsmaatregelen kunnen van belang zijn in het geval van een lek of breuk in een ammoniakleiding voor hulpdiensten en de brandweer:

- het benaderen van de locatie van de lek met de wind in de rug;
- het dragen van beschermende kleding (een pak bestand tegen vloeibare chemicaliën), inclusief bescherming van de luchtwegen (gasmasker);
- het waarschuwen van mensen als de ontsnappende ammoniak hen kan beïnvloeden;
- het evacueren van het gebied dat benedenwinds ligt als dit veilig kan en het vrijkomen van de ammoniak levensbedreigend is;
- het zo snel mogelijk isoleren van de bron van het vrijkomen met hulp van getraind personeel als dit veilig kan;
- het insluiten van het lek als dit mogelijk is;
- het inzetten van watersprays om de gaswolk in te dammen (bij kleinere lekkages), maar niet direct te gebruiken voor de ammoniakplas;
- het voorkomen van besmetting van waterstromen in de omgeving en daarbij het zoveel mogelijk controleren van watergebruik voor het indammen van de gaswolk;

¹ Ammoniak; Algemene Directie Toezicht op het Welzijn op het Werk; 2003.

- het informeren van lokale autoriteiten voor het geval er onvoorziene besmetting van waterstromen plaatsvindt.

Ook kan het vormen van een noodplan bijdragen aan het waarborgen van de veiligheid. Locaties waar hoeveelheden van meer dan 50 ton watervrije ammoniak aanwezig zijn vallen onder de Seveso richtlijn¹. Volgens artikel 9 van deze richtlijn moet de exploitant een on- en offsite noodplan ontwikkelen en daarnaast een veiligheidsrapport opstellen. Gepaste veiligheidstoetsingen moeten uitgevoerd worden (zoals testboringen) om de noodplannen in samenwerking met relevante diensten en autoriteiten te testen. Dit moet gedaan worden met uitstroombesmettingscenario's die toepasbaar zijn op de installatie.

Tabel 3.6 Overzicht maatregelen voor behoud van de veiligheid

Maatregel	Algemeen/specifiek
lekdetectie	algemeen: seismisch systeem, bodemtemperatuursysteem, drukvalsysteem, massabalanssysteem, level-indicatiesysteem, akoestisch systeem specifiek: ammoniaksensoren
beschermen omliggende omgeving	specifiek: omwonenden alarmeren ter evacuatie of geheel afsluiten van openingen in huis
terugdringen van de uitstroom	algemeen: isolatie van lek of reparatie bij lek in klep/flens
terugdringen van de damp	specifiek: dijken, zandzakken, waterschermen (alleen voor damp)
noodmaatregelen	specifiek: set maatregelen voor vrijkomen van ammoniak en naleven van het noodplan

3.5 Faalfrequenties van ammoniakleidingen

In de voorgaande paragrafen zijn de mogelijke faalmechanismen van ammoniaktransport door leidingen beschreven met daaropvolgend een set van maatregelen om deze faalmechanismen te mitigeren. In dit onderzoek is het van belang om te analyseren of dit risicoprofiel van vloeibaar ammoniak leidt tot andere faalfrequenties dan de generieke faalfrequenties zoals beschreven in paragraaf 3.3.1, al dan wel of niet met toepassing van een set van maatregelen. Echter, data sets die het aantal ongevallen en de oorzaak erbij rapporteren zijn niet eenduidig beschikbaar bij een centrale autoriteit. Fertilizers Europe heeft echter wel een (beperkte) interne database beschikbaar. In onderstaande paragraaf wordt deze, zover mogelijk, nader geanalyseerd.

3.6 Incidenten analyse

Er is een aantal ongevallen bekend bij het transport van vloeibaar ammoniak door buisleidingen met een diameter groter dan 75 mm. De meeste van deze ongevallen vonden plaats in de VS, wat niet gek is aangezien er een groot ammoniabuisleiding netwerk in de VS ligt. In onderstaande tabel zijn deze ongevallen opgesomd:

¹ RICHTLIJN 2012/18/EU VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 4 juli 2012; Europese Unie; 2012.

Tabel 3.7 Opsomming grotere incidenten met ammoniakbuisleidingen in de VS¹

Locatie	Jaar	Buisleidingdiameter (mm)	Oorzaak
Texas City, Texas	1969	200	onvoorziene vries-dooi cyclus van water in ruimte van dubbelwandige buisleiding
McPherson, Kansas	1973	225	overdruk op eerdere mechanisch beschadigd leidingonderdeel
Texas City, Texas	1975	150	externe corrosie als gevolg van mechanische schade van de pijpcoating en storing in de katodische bescherming
Ince, England	1981	200	kleine lek bij externe corrosie door regenwater bij pijpoppervlak
Algona, Iowa	2001	200	lek door onderhoudswerkzaamheden aan een leidingklep
Grand Parish, Louisiana	2001	-	ammoniakdief heeft een gat geboord
Kingman, Kansas	2004	200	scheur in 200 mm diameter pijpleiding, waarschijnlijk door vermoeiing van metaal in combinatie met eerdere mechanische schade
Clay County, Kansas	2006	200	falen van 200 mm diameter pijpleiding, waarschijnlijk door lasnaadfalen
Mulberry, Florida	2007	100/150	falen door geboord gat door nieuwsgierige omwonende
Tekamah, Nebraska	2016	200	scheur in 200 mm diameter pijpleiding

De faaloorzaken van de ongevallen zijn voornamelijk overdruk (1x), externe corrosie (2x), onderhoudswerkzaamheden (1x), vermoeiing (2x), naadfalen (1x) en onvoorziene vries-dooicycli (1x). De geboorde gaten kunnen wijzen op vandalisme (2x) (zie tabel 5.1: ongevallen Grand Parish, Louisiana en Mulberry, Florida). Ongevallen door onbedoeld uitgraven is minimaal. Hieruit is te concluderen dat beschadiging door derden, mechanisch falen en externe corrosie een grotere faalfrequentie heeft in tegenstelling tot de overige.

De dataset is in tijdsperiode vergelijkbaar met die van de generieke faalfrequenties, namelijk 38 jaar voor ammoniakleidingen en 34 jaar voor generieke leidingen. Echter, de dataset is erg beperkt, gezien de geografie van incidenten maar ook doordat het specifiek is gericht op ammoniak, is het aantal incidenten kleiner. De database geeft ook niet aan of er maatregelen zijn toegepast en indien wel, welke maatregelen. Een analyse van de effectiviteit van de voorgenoemde maatregelen is dus ook niet mogelijk. Echter, de kans is groot dat maatregelen wel zijn toegepast, aangezien de incidenten plaatsvonden in de Verenigde Staten, waar ammoniaktransport al jaren plaatsvindt en waar ook een norm is voor transport van gevaarlijke vloeistoffen door buisleidingen².

Omdat er geen grote verschuiving is in faaloorzaken, in vergelijking met de generieke faalfrequenties, is er dus niet direct aanleiding tot aanpassen van de generieke faalfrequenties.

¹ Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines; Fertilizers Europe; 2013. En <https://www.nts.gov/investigations/Pages/DCA17FP001.aspx>

² US Code of Federal Regulations no. 49 (Transportation), deel 195 (Transportation of hazardous liquids by pipeline).

BUISLEIDINGEN VOOR AMMONIAKTRANSPORT

De aan ammoniaktransport gerelateerde veiligheidsrisico's zijn onder andere afhankelijk van de kans op falen van het gebruikte materiaal, de beoogde locatie van de beoogde buisleidingen (in hoeverre deze bijvoorbeeld in de nabijheid van woonwijken geplaatst zullen worden) en de hoeveelheid ammoniak die getransporteerd gaat worden. In hoofdstuk 3 zijn de faalmechanismen en reductiefactoren voor falen behandeld.

Nederland heeft weinig ervaring met transport van ammoniak door buisleidingen. De Verenigde Staten en andere Europese landen passen deze stof echter al wel toe als waterstofdrager en kunstmest. Dit biedt de mogelijkheid om inzicht te verkrijgen in gebruikelijke leidingspecificaties voor het transport van ammoniak in het buitenland. De optimale leidingspecificaties en effectieve maatregelen kunnen hiermee wellicht worden geïdentificeerd. Deze kennis draagt bij aan het identificeren van belangrijke aspecten voor het toekomstige ammoniaktransport in Nederland, zoals de optimale ligging van de leidingen.

Bovengenoemde informatie kan in het kader van de verwachte ammoniakstroom door Nederland op basis van de verwachte vraag tezamen met de geïdentificeerde faalfrequenties in hoofdstuk 3 als ondersteuning dienen voor het uitvoeren van berekeningen in het kader van veiligheidsrisico's voor toekomstig ammoniaktransport. De mogelijke uitstroom -hoeveelheid en -duur met het oog op het gebruikte leidingmateriaal en leidingcomponenten kunnen met de achtergrondkennis vanuit het buitenland beter inzichtelijk worden gemaakt. Ook kunnen de genomen maatregelen waar mogelijk kwantitatief gemodelleerd worden, opdat er vorm gegeven kan worden aan de technische haalbaarheid en de impact van deze maatregelen op de veiligheid.

4.1 Transport van ammoniak in het buitenland en Nederland

Fertilizers Europe heeft in 2013 een studie¹ uitgevoerd naar pijpleidingen speciaal ingericht op ammoniaktransport in verschillende landen. De resultaten worden hieronder nader samengevat. Er wordt ingegaan op het materiaalsoort, diameter van de leiding, lengte, operationele druk, operationele temperatuur, transporthoeveelheid en ligging (bovengronds/ondergronds). Hieruit ontstaat een overzicht van bestaande leidingnetwerken die als achtergrondinformatie kunnen dienen voor het opstellen van een veilige leidingspecificatie voor een bepaalde capaciteit.

Verenigde Staten

In de Verenigde Staten wordt al decennialang ammoniak getransporteerd. Het ammoniakbuisleidingnetwerk in de VS bestaat uit koolstofstaal en opereert normaal gesproken onder een druk van 17,23 bar (250psi). Over het totale netwerk wordt ongeveer 2 miljoen ton ammoniak per jaar getransporteerd. Dit komt overeen met ongeveer 350.000 ton waterstof. De hoofdleidingen hebben een diameter 200 en 250 mm. Deze leidingen liggen ondergronds en er is geen sprake van interne corrosie. In 2014 lag er circa 4.828 km aan buisleidingen voor vloeibaar ammoniak².

¹ Guidance for inspection of and leak detection in liquid ammonia pipelines; Fertilizers Europe 2013.

² Oil and Gas Industry Network; S. Papavinasam; 2014.

In 2021 stroomde vloeibaar ammoniak door een 'common carrier'- buisleidingnetwerk van NuStar Transports van meerdere punten rondom Louisiana naar de Corn Belt Region. Per jaar wordt hier over een afstand van 2.000 mijl door 4, 6, 8 en 10 inch pijpleidingen ongeveer 1,5 miljoen ton vloeibaar ammoniak getransporteerd¹.

Rusland en Oekraïne

Sinds 1983 loopt er een ammoniakbuisleiding door Rusland en Oekraïne. Deze verbindt grote industriële gebieden Togliatti in Rusland met de haven van Odessa aan de Zwarte Zee in Oekraïne. De pijpleiding opereert niet meer sinds 2022. Ook is een deel van de leiding in 2023 opgeblazen. De totale lengte van de buisleiding is 2.424 km. De diameter is 350 mm.

Europese Unie

In de Europese Unie liepen in 2012 enkel relatief korte leidingen voor vloeibaar ammoniaktransport. Onderstaande tabel geeft een overzicht van deze leidingen (alleen leidingen met een lengte van 1 km of meer zijn weergegeven).

Tabel 4.1 Vloeibaar ammoniak pijpleidingen in de Europese Unie

Locatie	Boven- /ondergronds	Lengte (km)	Operationele druk (barg)	Operationele temp. (°C)	Diameter (mm)	Capaciteit (tpd)
België						
pijpleiding 1	boven	10	22	10-15	100/150	3100
pijpleiding 2	onder	12	22	10-15	100/150	3100
Duitsland						
pijpleiding 1	boven	24	21	5-40	50-200	2600
pijpleiding 2	boven	2,8	11	5-40	150	1900
pijpleiding 3	onder	12	10-15	1-5	275	3600
Italië						
pijpleiding 1	onder	74	17	10	200	900
Nederland						
pijpleiding 1	boven	5,8	16	5	100-200	3000
pijpleiding 2	boven	1,0	10	-32	80	1000
Polen						
pijpleiding 1	boven	1,2	10-15	-30	200	1500
pijpleiding 2	boven	1,5	13	-7 tot 0	75,100,150	200
pijpleiding 3	boven	6,0	8-13	-33 tot -15	350	14000
pijpleiding 4	boven	5,9	8-13	-33 tot -15	100	600
pijpleiding 5	boven	1,2	5-22	-5	150	1680
Portugal						
pijpleiding 1	boven	1,9	13	-30	100	900
Spanje						
pijpleiding 1	65 % onder	10	14,5	13	150-350	860
pijpleiding 2	95 % onder	1,5	3,5-4,5	-33	300	10000
pijpleiding 3	90 % onder	2,4	6	-33	300	12000
pijpleiding 4	boven	4,2	15-18	8-15	100	390
Verenigd Koninkrijk						
pijpleiding 1	boven	8,8	30	-32	100/150	240
pijpleiding 2	boven	6,9	21	-33 tot +25	150	1440
pijpleiding 3	boven	6,8	21	-28	150	1440
pijpleiding 4	boven	2,2	14	-29 tot omg	100	290
pijpleiding 5	boven	1,6	14	-29 tot omg	100	240
pijpleiding 6	boven	2,0	2-5	-32	300	12000

¹ Pipeline Transportation of Ammonia; NuStar; 2021.

Locatie	Boven-/ondergronds	Lengte (km)	Operationele druk (barg)	Operationele temp. (°C)	Diameter (mm)	Capaciteit (tpd)
pijpleiding 7	boven	2,0	2-5	-32	75	600

Onderstaande tabel geeft de gebruikte constructiematerialen weer van leidingen in verschillende Europese landen.

Tabel 4.2 Gebruikte materiaalsoorten voor ammoniakbuisleidingen in Europese landen

Locatie	Leiding	Materiaaltype
België	pijpleiding 1 en 2	koolstofstaal TTst35 (zeer fijne korrel) en roestvrijstaal 1.4541
Duitsland	pijpleiding 1 en 2	koolstofstaal (niet verder gespecificeerd)
	pijpleiding 3	Koolstofstaal, H52-3 (vergelijkbaar met TSTE 355 of ASTM A 537)
Italië	pijpleiding 1	API 5L GrB, volledig gedeoxideerd, Charpy V getest bij -45 °C
Nederland	pijpleiding 1	koolstofstaal ASTM333 Gr6 en roestvrijstaal ASTM312 TP304L
	pijpleiding 2	ASTM A312 TP 304L (is symbol AISI 304L, is nummer 1.4306)
Polen	pijpleiding 1	koolstofstaal (niet verder gespecificeerd)
	pijpleiding 2,3,4 en 5	koolstofstaaltype 18G2A en API 5L GrB seamless
Spanje	pijpleiding 1	ASTM A 333 Gr.6
	pijpleiding 2	ASTM A 333 Gr.6
	pijpleiding 3 en 4	ASTM A 333 Gr.6 en St-35
V.K.	pijpleiding 1,2,3,4 en 5	LT50 (een type CS) en soms ook SS (niet gespecificeerd)
	pijpleiding 6 en 7	koolstofstaal (12'leiding) en roestvrij

4.2 Verwachte ammoniaktransport

Momenteel wordt transport van ammoniak nog zoveel mogelijk vermeden door de giftige eigenschappen van de stof. Omdat de Nederlandse overheid zich wil inzetten om risico's voor burgers te verkleinen, zijn transportbewegingen van ammoniak de laatste tijd steeds verder uitgefaseerd. Deze uitfasering betreft voornamelijk transport over het spoor. Transport via buisleidingen wordt echter als veiliger geacht. Daarnaast is er ook transport van ammoniak via binnenvaart als optie.

In het kader van transport vanaf de Nederlandse havens richting Duitsland is de huidige voorspelde vraag aan waterstoftransport door buisleidingen vanuit Duitsland circa 0,5 tot 25 MT/jaar. De verwachting is dat in 2030 tot 2035 5 Mt H_{2eq} aan ammoniak getransporteerd zal worden in Nederland vanuit Rotterdam en North Sea Port (Vlissingen en Terneuzen). Per 2 waterstofatomen is 2/3 aan ammoniak nodig voor binding. Doorerekend met molverhoudingen betekent dit dat voor de verwachte maximale hoeveelheid waterstof die getransporteerd gaat worden voor die periode van vijf jaar ~28,2 MT aan ammoniak benodigd is. Dit komt overeen met circa 15.000 ton per dag.

Verwachte buisleidingen netwerk Nederland

Onderstaande afbeelding laat een overzicht zien van de verwachte stromen van en naar locaties in en buiten Nederland in 2030-2035.

Afbeelding 4.1 Totaal overzicht van verwachte stromen van en naar locaties in en buiten Nederland in 2030-2035¹



Verwacht wordt dat er vanuit Nort Sea Port ~1,2 MT ammoniak doorgevoerd worden richting Duitsland. In de periode 2030 tot 2035 wordt in de Rotterdamse haven overwegend ammoniak geïmporteerd; waarvan het merendeel, ~3 MT, ook weer geëxporteerd wordt naar Duitsland. Wanneer alle ammoniak vanuit de haven van Rotterdam per spoor vervoerd wordt, komt dit overeen met een jaarlijkse stroom van circa 309.000 ketelwagens tegenover een paar duizend in 2020. Dit scenario is echter niet realistisch. Deze hoeveelheid wagons is namelijk niet beschikbaar en deze hoeveelheid is fysiek energetisch niet reëel in het kader van de benodigde laad- en loscapaciteit. Wanneer alle ammoniak via tankschepen vervoerd zou worden, komt dit voor alleen Rotterdam al overeen met een benodigde capaciteit van 9.190 tankertransporten. In de huidige situatie zijn er echter minder dan 10 binnenvaartschepen beschikbaar die ammoniak kunnen transporteren en voor de omgevingsveiligheid zijn deze grote hoeveelheden een struikelblok. Ammoniaktransport via het water vergt naar verwachting dus grote investeringen. Dit betreffen echter nog veelal verwachtingen en schattingen vanuit verschillende bronnen.

4.3 Voorwaarden ontwerp van buisleidingen

Aan de hand van de eerdere bevindingen kunnen nu voorwaarden voor leidingspecificaties gegeven worden om tot een veilig ontwerp te komen. In onderstaande paragrafen wordt verder ingegaan op het type materiaal.

Typen buisleidingen

De optimale karakteristieken voor ammoniakbuisleidingen zijn nog onbekend. Wel is bekend welke staaltypen er reeds gebruikt zijn voor ammoniakbuisleidingen in Europa (zie paragraaf 4.1 'Transport van ammoniak in het buitenland'). Recent lijkt het met name voor aardgastransport een trend te zijn om buisleidingen te gebruiken met een hogere sterkte. Dit komt omdat er hierdoor minder materiaal nodig is voor dezelfde veiligheidsfactor wanneer vergeleken met materiaal met een lage sterkte. Hierdoor zijn de kosten uiteindelijk lager.

¹ Omgevingsveiligheid van toekomstige stromen waterstofrijke energiedragers; TNO, Arcadis, Berenschot; 2023.

Zoals eerder genoemd lijkt corrosie bij vervoer van ammoniak door stalen buisleidingen geen issue te zijn. Bij een temperatuur van -30 °C bereikt puur staal echter een punt van broosheid¹. Daarom moet koolstofstaal als mix worden toegepast met andere staalsoorten om de flexibiliteit te behouden bij lagere temperaturen. Ook is het noodzakelijk kathodische bescherming toe te passen om externe corrosie te voorkomen en/of door bij het kiezen van de wanddikte een factor voor corrosie mee te nemen (dus het kiezen van een dikkere wand corrosie van de buitenste laag in acht nemend). Roestvrijstaal is beter bestand tegen corrosie en kan tevens worden ingezet voor transport van vloeibaar ammoniak. Dit type staal is echter dusdanig duur opdat de afname aan een koolstofstaal wand door corrosie niet teruggewonnen wordt². Daarnaast is roestvrijstaal taaier dan koolstofstaal. Hierdoor is dit type materiaal minder bestand tegen stress (bijvoorbeeld door aantal belastingcycli). Roestvrijstaal zou echter wel beter bestand zijn tegen scheurvorming. Zowel koolstofstaal als roestvrij staal zijn dus inzetbaar voor ammoniaktransport en hebben in dit kader voor- en nadelen.

Er zijn rekenparameters voor ammoniak opgenomen in de Handleiding Risicoberekeningen Bevb³ van het RIVM. Aangezien er in Nederland op industriële schaal en voor transport vanaf de haven van Urmond naar Chemelot buisleidingen voor ammoniak aanwezig zijn, is er technische kennis beschikbaar over de operatie en probleempunten voor dergelijke voorzieningen. Er is echter geen kennis beschikbaar over een voorziening op grotere schaal.

Er bestaan verschillende typen buisleidingen die variëren in eigenschappen. Buisleidingdiameter is een variabele die invloed heeft op de mogelijkheden van ammoniaktransport. De capaciteit van verschillende leidingsystemen varieert bij een verschil in diameter, wanneer de druk, temperatuur en dichtheid gelijk blijven. Zo heeft een leiding met een diameter van 50,88 mm (2 inch) een energiec capaciteit van 1.561 MW, waarbij een leiding met een diameter van 609,6 mm (24 inch) een veel hogere energiec capaciteit heeft van 224.735 MW. Antea⁴ heeft getoetst welke buisleidingdiameter nodig is voor verschillende transports scenario's van ammoniak. Een indicatie van de benodigde buisleidingdiameter is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 4.3 Indicatie benodigde buisleidingdiameter²

Variant (MT/jaar)	Ammoniak vloeistof (m ³ /s)	Benodigde diameter (inch)
0,5	0,023	5,5
2	0,093	11,1
5	0,233	17,5
10	0,466	24,8
25	1,166	39,2

Tabel 4.4 geeft een aantal aspecten weer van buisleidingen die typisch gebruikt worden voor waterstoftransport. Dit kan een indicatie geven van de buisleidingen die het beste gebruikt kunnen worden voor ammoniaktransport. De vloeispanning beschrijft een punt waarop een ductiel materiaal plastische vorming begint te vertonen. De treksterkte is de maximale mechanische spanning die een materiaal bereikt als het plastisch vervormt, voordat insnoering optreedt.

¹ Brittle Fracture Hazard in Carbon Steel AMSE-Rated Equipment; Kenexis; 2022.

² Vergaderverslag Ammoniak Kennissessie; *Persoonlijke communicatie*; 2023, 19 oktober.

³ Handleiding risicoberekeningen Bevb; Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu; 2020.

⁴ Rapport buisleidingtransport waterstofdragers; Antea group; 2023.

Tabel 4.4 Aspecten van typisch gebruikte globale waterstofleidingen¹

Leidingtype	X42	X52	X56	X60	X65	X70	X80
vloeispanning (Mpa)	289,6	358,5	386,1	413,7	488,2	482,7	551,6
treksterkte (Mpa)	413,7	455,1	489,5	517,1	530,9	565,4	620,6
maximaal toepasbare druk (bar)	20,68	20,68	20,68	20,68	10,34	10,34	10,34

Uit de tabel blijkt dat leidingtypen met een hogere vloeispanning, dus een hoger punt waarop het materiaal plastische vorming vertoont, een lagere maximaal toepasbare druk aankunnen. Deze leidingen vertonen tevens een hogere maximale mechanische spanning voordat scheurvorming optreedt. Leidingen die een lagere treksterkte hebben en waarbij dus eerder scheurvorming optreedt naarmate de spanning op de leiding wordt verhoogd, kunnen een hogere druk aan in de buisleiding. Dit komt omdat deze leidingtypen eerder plastische vervorming vertonen dan leidingtypen met een hogere treksterkte.

Naast de buisleiding zelf zijn er additionele variabelen die ammoniaktransport kunnen beïnvloeden. Denk hierbij aan het toevoegen van eventuele boosterpompen, afsluiters die leidingen inblokken of keerkleppen die het terugstromen van vloeistof in de verkeerde richting voorkomen. Bij een hogere stroomsnelheid is een kortere afstand tussen boosterpompen benodigd, omdat de drukval hoger ligt. De aanwezigheid van afsluiters en keerkleppen verhoogt tevens de drukval, waardoor er meer energie nodig zijn voor het verpompen van de vloeistof. Ook kan er gekozen worden voor het hanteren van een dubbele wand waarbij er in de buitenste mantel bijvoorbeeld water wordt opgeslagen. Dit water dient in dat geval als een absorptiesysteem bij lekken, aangezien ammoniak goed oplost in water. De resulterende hoge verdampingssnelheid door menging met water zorgt echter voor een hogere concentratie ammoniak in de gifwol, indien ook de buitenwand lekt. Ook kan het water tot versnelling van corrosiemechanismen leiden, waardoor mogelijk de buitenmantel beter met inert en droog gas (zoals stikstof) gevuld zou kunnen worden. Op dit punt liggen er dus nog vragen. Daarnaast leveren dubbelwandige leidingen een uitdaging op voor wat betreft monitoring van de integriteit van de leiding. Onvoldoende duidelijk is hoe lekkages in de binnenmantel goed gedetecteerd worden en welk handelingsperspectief er op dat moment is. Dit geldt in het bijzonder voor ondergrondse leidingen, waarbij opgraving en vervanging van lek materiaal niet eenvoudig en goedkoop te realiseren is. Om deze redenen hebben dubbelwandige leidingen potentie als risicoreducerende leidingen.

4.4 Mogelijke leidingspecificatie Nederland

Op basis van bovenstaande bevindingen, is er een aantal randvoorwaarden voor buisleidingen om de verwachte capaciteit veilig te kunnen leveren. Uit tabel 4.1 kan worden ingeschat dat voor een capaciteit van circa 15.000 ton per dag, wat hoger is dan momenteel internationaal wordt vervoerd, vooral grotere diameters van 300 mm of groter toepasbaar zijn. Bij het modelleren van de transport van vloeibaar ammoniak worden verschillende diameters in beschouwing genomen. Dit wordt nader uitgewerkt in hoofdstuk 7. Het meest gebruikelijke materiaal voor vloeibare ammoniakleidingen in Europa is roestvrijstaal of koolstofstaal. Deze hebben beiden voor- en nadelen voor transport van ammoniak (zie paragraaf 4.3) en kunnen in Nederland beiden worden ingezet. Bij aardgasleidingen van Gasunie is de afstand tussen isolatiekleppen 10 km. Er wordt nader ingegaan op de te hanteren afstand tussen isolatiekleppen voor vloeibaar ammoniakbuisleidingen in hoofdstuk 7. In dit hoofdstuk wordt tevens de invloed van deze parameter beschreven in het kader van het komen tot de meest optimale onderlinge afstand voor dit leidingonderdeel.

¹ Techno-economic analysis of green hydrogen transport for long distance pathways; Politecnico di Torino and EIFER; 2022.

RISICOBEREKENINGEN

Buisleidingen kennen geen fluctuaties in te verwachten vervoersstromen, zoals wel geldt voor vervoer over spoor en water. Ook nemen ze niet actief deel aan het verkeer, waardoor botsingen of ontsporingen uitgesloten zijn. In Nederland geldt voor risicovolle activiteiten met gevaarlijke stoffen de volgende risiconormering. Voldoen aan deze normering leidt tot een maatschappelijk verantwoord risico. De resultaten van de doorberekende leidingen (paragraaf 7.2) worden dus getoetst aan deze normering om te toetsen of er sprake is van een maatschappelijk verantwoord risico.

5.1 Normering

5.1.1 Plaatsgebonden risico

Het plaatsgebonden risico (PR) is het risico (uitgedrukt in kans per jaar) dat één persoon die zich onafgebroken en onbeschermd op die plaats bevindt, overlijdt als rechtstreeks gevolg van een calamiteit met een gevaarlijke stof. In de studie van Antea¹ is een onderzoek gedaan naar faalfrequenties van buisleidingen. Er is een kans op leidingbreuken aangenomen van $5,21 \cdot 10^{-6}$ per km per jaar en een kans op lekken van $1,38 \cdot 10^{-5}$ per km per jaar. Het rapport concludeert dat de uitstroomsnelheid bij een breuk afhankelijk is van de leidingdiameter.

5.1.2 Groepsrisico

Het groepsrisico (GR) betreft de impact van een ongeval met veel dodelijke slachtoffers tegelijkertijd. De officiële definitie luidt: 'de cumulatieve kans per jaar dat ten minste 10, 100 of 1.000 personen overlijden als rechtstreeks gevolg van hun aanwezigheid in het invloedsgebied van een inrichting en een ongewoon voorval binnen die inrichting waarbij een gevaarlijke stof of gevaarlijke afvalstof betrokken is'. Antea heeft letaliteitsafstanden bepaald voor een 609,6 mm (24 inch) buisleiding. Daaruit is geconcludeerd dat het inblokken van de leiding leidt tot een lagere letaliteitsafstand. Een inlokafstand van 1.000 m resulteerde in een lagere letaliteitsafstand ten opzichte van een inlokafstand van 5.000 m. Inlokafsluitingen liggen typisch echter niet op 1 km onderlinge afstand. Onder de Omgevingswet vervalt de berekening voor het GR maar wordt in plaats daarvan uitgegaan van zogeheten aandachtsgebieden (zie hieronder). Voor het onderhavige rapport is besloten dergelijke berekeningenniet uit te voeren.

Aandachtsgebieden

In het kader van het GR worden onder de Omgevingswet aandachtsgebieden gedefinieerd. Dit zijn zones rondom een risicobron waarbinnen de gemeente bij nieuwe ruimtelijke ontwikkelingen rekening dient te houden met de mogelijke effecten van incidenten met gevaarlijke stoffen. Er wordt daarbij gekeken naar de volgende typen aandachtsgebieden:

- brandaandachtsgebieden;
- gifwolkaandachtsgebieden;
- explosieaandachtsgebieden.

¹ Rapport buisleidingtransport waterstofdragers; Antea group; 2023.

Voor dit rapport wordt gekeken naar gifwolkaandachtsgebieden. De huidige definitie van het gifwolkaandachtsgebied is het gebied waarbinnen een concentratie giftige stoffen binnenshuis bereikt wordt die groter is dan de Levensbedreigende Waarde bij 30 minuten blootstelling (LBW). Antea heeft tevens een onderzoek uitgevoerd naar aandachtsgebieden van buisleidingen bij verschillende buisleidingdiameters. De resultaten daarvan zijn hieronder weergegeven, waarbij opgemerkt dient te worden dat de berekeningswijze voor aandachtsgebieden gaat veranderen (zie volgende paragraaf).

Tabel 5.1 Aandachtsgebieden van buisleidingen bij verschillende buisleidingdiameters

Diameter (inch)	Druk (bar)	Aandachtsgebied (m)	Aandachtsgebied bij 1 km inlokafstand (m)
10	50/100	1.600	1.100
18	50/100	4.000	2.100
24	50/100	8.900	6.000
32	50/100	10.000	3.600

Het rapport van Antea concludeert dat de grootte van het aandachtsgebied afneemt bij een kleinere diameter en bij het inblokken van de leidingen.

Dosisbenadering

Het Ministerie van IenW heeft het RIVM gevraagd of een begrenzing van brand- en gifwolkaandachtsgebieden op basis van een dosisbenadering inzicht kan bieden in de bescherming van mensen binnenshuis. Een dosisbenadering houdt expliciet rekening met de blootstellingsduur. Het RIVM concludeert dat de methodiek van de dosisbenadering, in plaats van een concentratie of warmtestralingsniveau, het meest passend is bij de beoogde functie van aandachtsgebieden.

Op 17 juli 2023 heeft de staatssecretaris van IenW een Kamerbrief verstuurd met de aankondiging dat de berekeningswijze voor gifwolkaandachtsgebieden wordt aangepast. De huidige berekeningswijze van het gifwolkaandachtsgebied gaat uit van een concentratiebenadering. De nieuwe berekeningswijze gaat daarentegen uit van een dosisbenadering. Niet alleen de concentratie van gifstoffen is namelijk van belang voor de grens van het aandachtsgebied. Ook de duur van blootstelling. Deze nieuwe berekeningswijze zorgt voor een beter onderbouwde inschatting van het gebied waar mensen binnenshuis onvoldoende beschermd kunnen zijn.

Per 1 januari 2024 geldt de Omgevingswet. Daarmee zijn ook de regels over aandachtsgebieden gaan gelden. Volgens de planning treedt per 1 januari 2025 de aangepaste berekeningswijze voor gifwolkaandachtsgebieden in werking. Voor het onderhavige onderzoek zijn we uitgegaan van de aangepaste berekeningswijze voor gifwolkaandachtsgebieden, omdat het doel van dit onderzoek is om een zo waarheidsgetrouw beeld van de risico's en effecten te modelleren.

6

MODELLERING

Voordat Safeti-NL toegepast kan worden om de effecten en risico's van mogelijke leidingspecificaties in Nederland te berekenen wordt Safeti-NL eerst gevalideerd. door de huidige analysemethode van ammoniak middels Safeti-NL te onderzoeken. Eerst wordt Safeti-NL gevalideerd met veldtesten uit het Desert Tortoise¹ onderzoek voor kleinere uitstromingen. Hierbij wordt tevens AVEVA ingezet om de uitstroomeigenschappen van Safeti-NL te valideren.

Vervolgens worden enkele vingeroefeningen uitgevoerd voor verschillende leidingspecificaties voor grotere uitstroomhoeveelheden, beginnend met een 'referentie' ontwerp op basis van al bestaande ammoniakleidingen in Europa. Hierop worden variaties berekend om te analyseren welke parameters het meest invloed hebben op de effecten. De variaties zijn ook gekozen op technische (on)haalbaarheid.

De resultaten voor beide modelleeropgaves zijn beschreven in hoofdstuk 7. Hieronder wordt ingegaan op de inputparameter en de uitgangspunten.

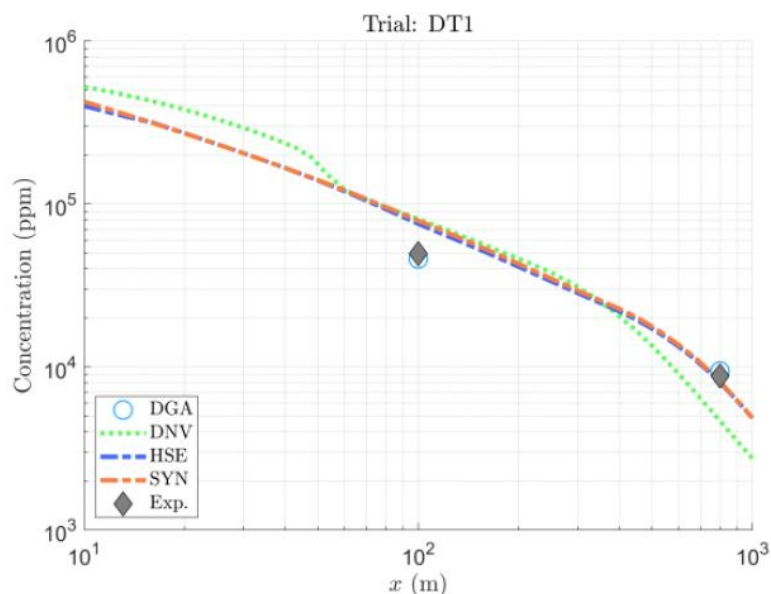
6.1 Desert Tortoise

In de onderzoeken Desert Tortoise¹ (1985) en FLADIS² (1996) zijn een serie veldexperimenten uitgevoerd om de dispersie van ammoniak in kaart te brengen. In het kader van JackRabbit III hebben vier instanties deze veldexperimenten geprobeerd te valideren met het risico rekensoftwarepakket Phast (v8.4 en 8.61), de software waar Safeti-NL op is gebaseerd. De input verschilt per instantie en leidt in alle gevallen tot vergelijkbare resultaten tussen de gehanteerde input van elke instantie die goed overeenkomen met de veldexperimenten. De resultaten zijn hieronder afgebeeld.

¹ Desert Tortoise Series Data Report 1983 Pressurized Ammonia Spills; H.C. Goldwire et al.; 1985.

² Fladis Field Experiments Final Report; M. Nielsen, S. Ott; 1996.

Afbeelding 6.1 Resultaten modellering ammoniak veldexperimenten in Phast (v8.4 en 8.61)



Doordat enkele parameters in Safeti-NL niet toegankelijk zijn voor de modelleur, kunnen er, ondanks dat Safeti-NL gebaseerd is op Phast, toch mogelijke verschillen in de rekenresultaten waarneembaar zijn. In dit rapport is geprobeerd de resultaten uit Desert Tortoise te valideren met Safeti-NL met de input die is gebruikt door de vier instanties van het JackRabbit III onderzoek. FLADIS is niet verder onderzocht, omdat de uitstroombdiameters van dat onderzoek veel kleiner waren en daarmee niet binnen de scope vallen van dit onderzoek.

6.1.1 De inputparameters

Voor het modelleren van het scenario van Desert Tortoise met Phast is de volgende input gebruikt. Deze dienen tevens zoveel mogelijk als invoer voor Safeti-NL.

Tabel 6.1 Algemene inputparameters modellering Desert Tortoise scenario met Phast

Input	DT1
opening diameter (m)	0,081
hoogte van vrijkomen	0,79
temperatuur bij opening (°C)	21,5
druk bij opening (barg)	9,22
debiet van vrijkomen (kg/s)	80
duur van vrijkomen (s)	126
gemiddelde plaatselijke windsnelheid (m/s) op referentiehoogte (m)	7,42 2
oppervlakteruwheid (m)	0,003
Pasquill stabiliteitsklasse	D
temperatuur omgevingslucht (°C)	28,8
druk omgevingslucht (bar)	0,909
relatieve luchtvochtigheid (%)	13,2

Input	DT1
middelingstijd voor gemiddelde waarden (s)	80

Tabel 6.2 Inputparameters modellering Desert Tortoise scenario met Phast

	Desert Tortoise DT1			
	HSE	DNV	Syngenta	DGA
'core averaging time' (s)	80	80	80	18,75
'final velocity' (m/s)	246	90,3	246	663
'liquid fraction'	0,825	0,82	0,83	0,09
'droplet diameter' (um)	83,7	107	83,7	0,94

In Safeti-NL is de volgende input gebruikt om een User Defined Source (UDS) in te voeren om een lek te modelleren. Input met een * zijn automatisch ingevuld door Safeti-NL.

Tabel 6.3 Inputparameters Safeti-NL voor invoer van UDS ter modellering van een lek

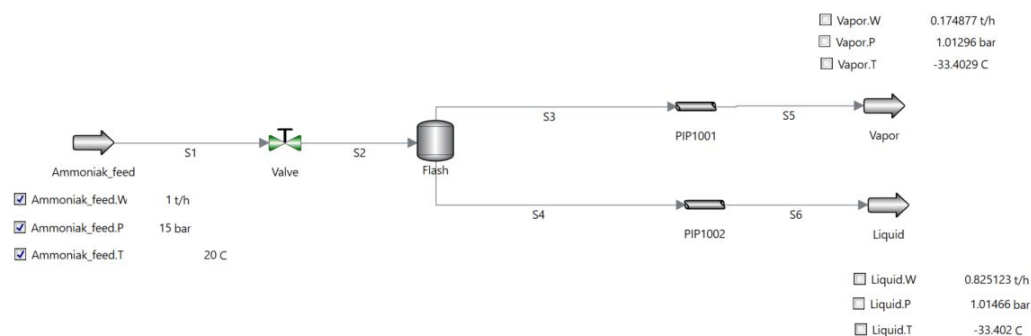
Release time [s]	Release phase	Mass flow [kg/s]	Final velocity [m/s]	Final temperature [°C]	Liquid fraction	Droplet diameter [um]
0	liquid	80	240	-33,4162*	1	84
126	two-phase	80	240	-33,4162*	0,83*	142*

De veldexperimenten van Desert Tortoise zijn uitgevoerd in de woestijn van Nevada. Om deze omgeving na te bootsen is een ruwheidslengte van 3 mm (vlakke omgeving met weinig obstakels) ingevoerd. Verder is gekozen voor het weermodel van Bonaire vanwege de hogere temperaturen in de woestijn. In de oorspronkelijke modellering is uitgegaan van een windsnelheid van 7,42 m/s bij stabiliteitsklasse D. In Safeti-NL is ervoor gekozen om windsnelheid 5 en 9 m/s bij klasse D in te voeren.

6.1.2 AVEVA

AVEVA (Flowsheeting programma) is geen risico rekensoftware en kan dus niet (direct) de effecten of risico's berekenen van een breuk of lek van een leiding. AVEVA is in dit onderzoek toegepast om de stoffeigenschaften die Safeti-NL hanteert bij een lek te valideren. Hiervoor is het volgende model opgesteld:

Afbeelding 6.2 Opgestelde model in AVEVA ter validatie van door Safeti-NL gehanteerde stoffeigenschappen



Vloeibare ammoniak met een druk van 15 bar en een temperatuur van 20 °C wordt aan een flashvat gevoed. Dit flashvat wordt geopereerd op atmosferische condities. Door een flashvat de simuleren is het mogelijk het gedrag van ammoniak bij een lek in een pijpleiding simuleren. Door de druk van de ammoniak van 15 bar plots naar 1 atmosfeer te verlagen, zal de dampdruk van de ammoniak groter worden dan de atmosferische druk. Dit heeft als gevolg dat de ammoniak verdampt. Tijdens deze operatie zal de ammoniak niet volledig verdampen, een gedeelte blijft vloeibaar. De vloeibare fractie wordt in de 'liquid' stroom afgevoerd uit het vat. De gasvormige fase wordt in de 'vapor' stroom afgevoerd. De stroomcondities zijn in afbeelding 6.2 weergegeven.

6.1.3 Blanket model

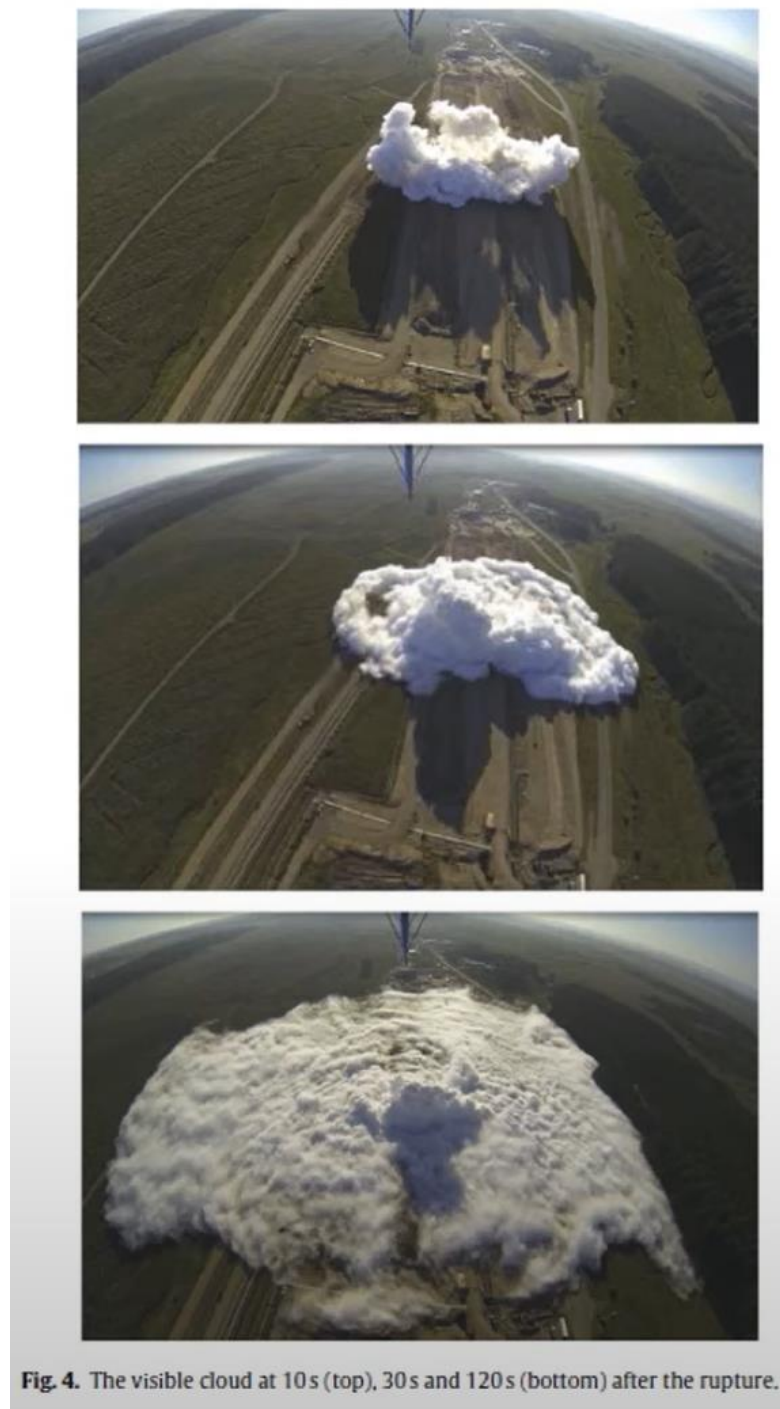
In Safeti-NL (versie 8.8) heeft men een nieuw model ingevoerd voor de verspreiding van koud CO₂ in de omgeving bij een lage windsnelheid. Eerder is beschreven dat een ammoniak-lucht wolk zich laag verspreidt. Uitstroom van CO₂ hangt ook laag bij de grond. Hieruit volgde de aanleiding om te onderzoeken of dit model ook toegepast kan worden bij de verspreiding van koud ammoniak. In deze paragraaf worden argumenten genoemd die helpen bij het beantwoorden van deze vraag.

Om deze argumenten te kunnen definiëren, wordt eerst in kaart gebracht waarom een nieuw verspreidingsmodel voor CO₂ is ontwikkeld. Vervolgens wordt gekeken hoe CO₂ zich gedraagt bij een breuk van een leiding. Tenslotte wordt gekeken hoe ammoniak zich gedraagt bij een breuk van een leiding en worden de verschillen en overeenkomsten tussen ammoniak en CO₂ geïnventariseerd.

Noodzaak nieuw verspreidingsmodel CO₂

In 2015 is een onderzoek uitgevoerd waarbij gekeken is naar de breuk van een ondergrondse CO₂-leiding en de daaropvolgende verspreiding van CO₂ in de omgeving¹. Uit dit onderzoek bleek dat bij het vrijkomen van de stof bij een lage windsnelheid de verspreiding anders verloopt dan nu gemodelleerd in Safeti-NL. In plaats van een gaswolk die met de wind mee beweegt ontstaat er een gebied direct om de locatie van de breuk waar het gas blijft hangen. De breuk ligt in het midden van dit gebied. Onderstaande afbeelding toont een bovenaanzicht van deze breuk en de verspreiding van CO₂.

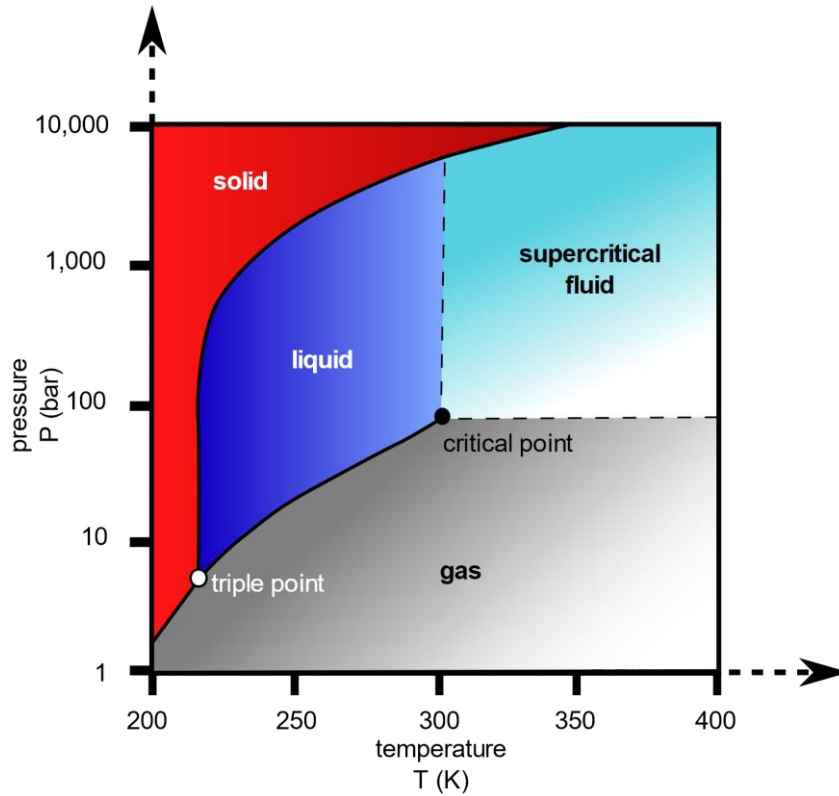
¹ COSHER joint industry project: Large scale pipeline rupture tests to study CO₂ release and dispersion; Ahmad et al.; 2015.



Fysische effecten bij breuk CO₂

In het bovenstaande experiment was de druk voor het optreden van de breuk 150 bar(g) en de temperatuur 13 °C. Bij een breuk neemt de druk snel af tot atmosferisch en zal CO₂ als gas vrijkomen. Om dit gas te vormen is energie nodig. Deze wordt zowel uit de omgeving als uit de eigen vloeistof onttrokken. De temperatuur van het vloeistof en gas neemt hierdoor sterk af en de druk en temperatuur naderen hierdoor het tripelpunt.

Afbeelding 6.4 De faseovergangen van koolstofdioxide

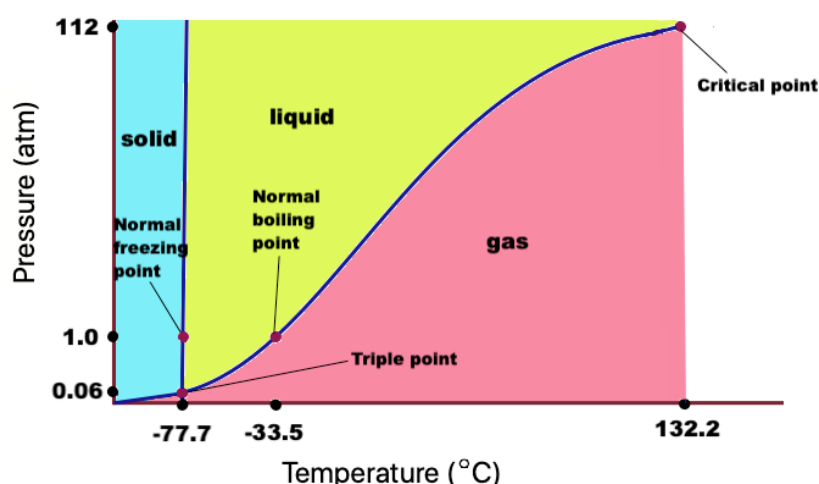


Bij een breuk van CO₂ komt hierdoor naast gas en vloeistof ook vaste stof (vlokken) vrij. Deze vlokken kunnen, zeker bij lage windsnelheid, een tijd blijven liggen en sublimeren. Hierdoor kan het CO₂ makkelijker in de omgeving van de breuk 'blijven hangen'.

Fysische effecten bij breuk ammoniak

Voor ammoniak is de verwachting dat het transport plaatsvindt onder gelijke omstandigheden, bij een druk van circa 150 bar(g) en normaaltemperatuur. Ook hier zal bij een breuk de druk van het ammoniak afnemen waardoor gasvorming ammoniak ontstaat en de temperatuur sterk zal afnemen. De druk en temperatuur komen hierbij niet in de buurt van het tripelpunt, waardoor alleen uitstroom van gas en vloeistof plaatsvindt.

Afbeelding 6.5 De faseovergangen van ammoniak



Uit bovenstaande afbeelding is op te maken dat het tripelpunt van ammoniak bij een druk lager dan normaaldruk ligt en dat het ammoniak hierdoor bij een breuk niet in de buurt komt.

Verschillen en overeenkomsten breuk ammoniak en CO₂

Uit het voorgenoemde onderzoek en latere communicatie vanuit DNV¹ blijkt dat het 'blanket effect' bij CO₂ alleen optreedt bij lage windsnelheden. Bij hogere windsnelheden verspreidt CO₂ zich op dezelfde manier als andere gassen, zoals ammoniak, in Safeti-NL. Het nieuwe 'blanket model' zal daarom alleen bij CO₂ worden gebruikt bij lage windsnelheden. CO₂ heeft een relatieve dichtheid van 1.87 kg/m³ en is daarmee circa 1.5 keer zo zwaar als lucht². Ammoniak is lichter dan lucht met een relatieve dichtheid van circa $0,717 \cdot 10^{-3}$ g/cm³.

CO₂ model is ongeschikt voor modelleren ammoniak

Het CO₂ model is door DNV en het RIVM (e-mail, 10 oktober 2023) niet geschikt gevonden voor ammoniak. Het CO₂ model op deze manier gebruiken voor het modelleren van ammoniak kan een verkeerd inzicht geven. Het nieuwe model voor CO₂ is van invloed op de uitstroom uit de krater en de dispersie van CO₂ (het vormen van een deken/blanket of pannenkoek van CO₂). Deze nieuwe modellering is gevalideerd voor CO₂ en enkel onder specifieke omstandigheden te gebruiken.

In Safeti-NL wordt bij de uitstroom van gassen de dichtheid en luchtinmenging continu berekend. Op basis van deze gegevens wordt bepaald of de wolk zich als een zwaar gas, neutraal gas of licht gas gedraagt. Bij een leidingbreuk bij een tot vloeistof verdicht gas zoals ammoniak zal de wolk in eerste instantie stijgen door de kinetische energie. Als de relatieve dichtheid van het gas/lucht mengsel hoger is dan dat van lucht zal de wolk weer naar grondniveau dalen. Zolang de dichtheid van het mengsel hoog blijft, zal de wolk ook aan de grond blijven. De wolk zal met de wind mee drijven.

Wat bij dense phase CO₂ uit (twee) COSHER experimenten bleek, is dat (1) de wolk met een lagere snelheid dan uit eerdere modellen de krater verlaat en (2) zich in eerste instantie in alle richtingen verspreidt. Dit gedrag van dense phase CO₂ wordt in het nieuwe model beschreven en is gevalideerd met de resultaten van de twee experimenten. Het is echter alleen gevalideerd voor het vrijkomen van dense phase CO₂. Of dit gedrag ook bij het vrijkomen van andere tot vloeistof verdichte gassen onder hoge druk voorkomt, is niet bekend en het gebruik van het nieuwe model voor andere tot vloeistof verdichte gassen wordt door de ontwikkelaar van Safeti-NL ontraden.

¹ How to model CO2 buried pipelines in Phast and Safeti; 2023; geraadpleegd van <https://www.youtube.com/watch?v=7JgquklfoY>.

² Safety advice Carbon Dioxide; Linde; z.d.

Het standaard model voor tot vloeistof verdichte gassen geeft een goede weergave van de verspreiding. Opgemerkt wordt dat, net als eerder bij CO₂ testen met grotere volumes ammoniak tot nieuwe inzichten en mogelijke aanpassingen van het huidige model kunnen leiden.

6.2 Leidingvariaties

In een tweede modelleeropgave zijn verschillende leidingspecificaties, beginnend met het 'referentie' ontwerp zoals beschreven in paragraaf 4.4 doorberekend om de invloed van leidingparameters te bepalen op verschillende effectafstanden. De afstand tot de volgende interventiewaarden¹ worden berekend:

- VRW (29 ppm);
- AGW (272 ppm);
- LBW (1495 ppm) en;
- 1 % letaliteit.

VRW: Voorlichtingsrichtwaarde, AGW: Alarmeringsgrenswaarde, LBW: Levensbedreigende waarde.

6.2.1 Uitgangspunten

Vloeibaar ammoniak

We gaan uit van transport van onder druk vloeibaar gemaakt ammoniak. Dat betekent dat ammoniak onder druk van minimaal 8,5 bar wordt getransporteerd. Ammoniak is bij kamertemperatuur bij een overdruk van 8,5 bar vloeibaar. Bij atmosferische druk is ammoniak vloeibaar bij een temperatuur lager dan -33° C.

Uitstroom van maximaal 50 ton ammoniak

Bij onze studie hebben we in eerste instantie gestreefd naar een maximale uitstroom van 50 ton ammoniak, analoog aan de maximale inhoud van een spoorketelwagen. In overleg met de opdrachtgever stellen we deze waarde voor, omdat de omgang (zowel in risicomodellering als bij repressie) met de uitstroom van deze hoeveelheid binnen het externe veiligheidsbeleid bekend is.

Referentiesituatie en variaties

Voor de referentiesituatie is keken naar een paar variaties in diameters, namelijk een **8', 12' 24' en 36' leiding** met een diepteligging (gronddekking) van **1,75 meter** (1 meter diepteligging is de minimale diepte die de NEN-3650 voorschrijft) en gebruik makend van het **kratermodel**. Vanuit het RIVM wordt aangeraden de nieuwste inzichten te gebruiken. In paragraaf 6.5 van Module D van de handleiding risicoberekeningen Bevb wordt aanbevolen om vanuit het oogpunt van voorzorg het kratermodel te gebruiken. Dit is echter niet voorgeschreven, maar vanuit voorzorg raadt het RIVM aan deze toch te gebruiken. Daarnaast gaan we in de referentiesituatie uit van een detectietijd van 5 seconden en een sluitertijd van 60 seconden. De waardes zijn in overleg met de werkgroep gekozen omdat ze de werkelijkheid goed benaderen. Kans op detectie is 1. M.a.w., lek of breuk wordt altijd gedetecteerd. De kleppen worden om de 1.000, en 5.000 meter (**segmentlengte 1.000 en 5.000 meter**) gemodelleerd met een druk van **100 bar**.

De berekeningen worden uitgevoerd conform de handleiding risicoberekeningen Bevb.

Tijdens dit onderzoek zijn ook enkele andere variaties onderzocht, maar die bleken of te onrealistisch of hadden geen effect op de resultaten.

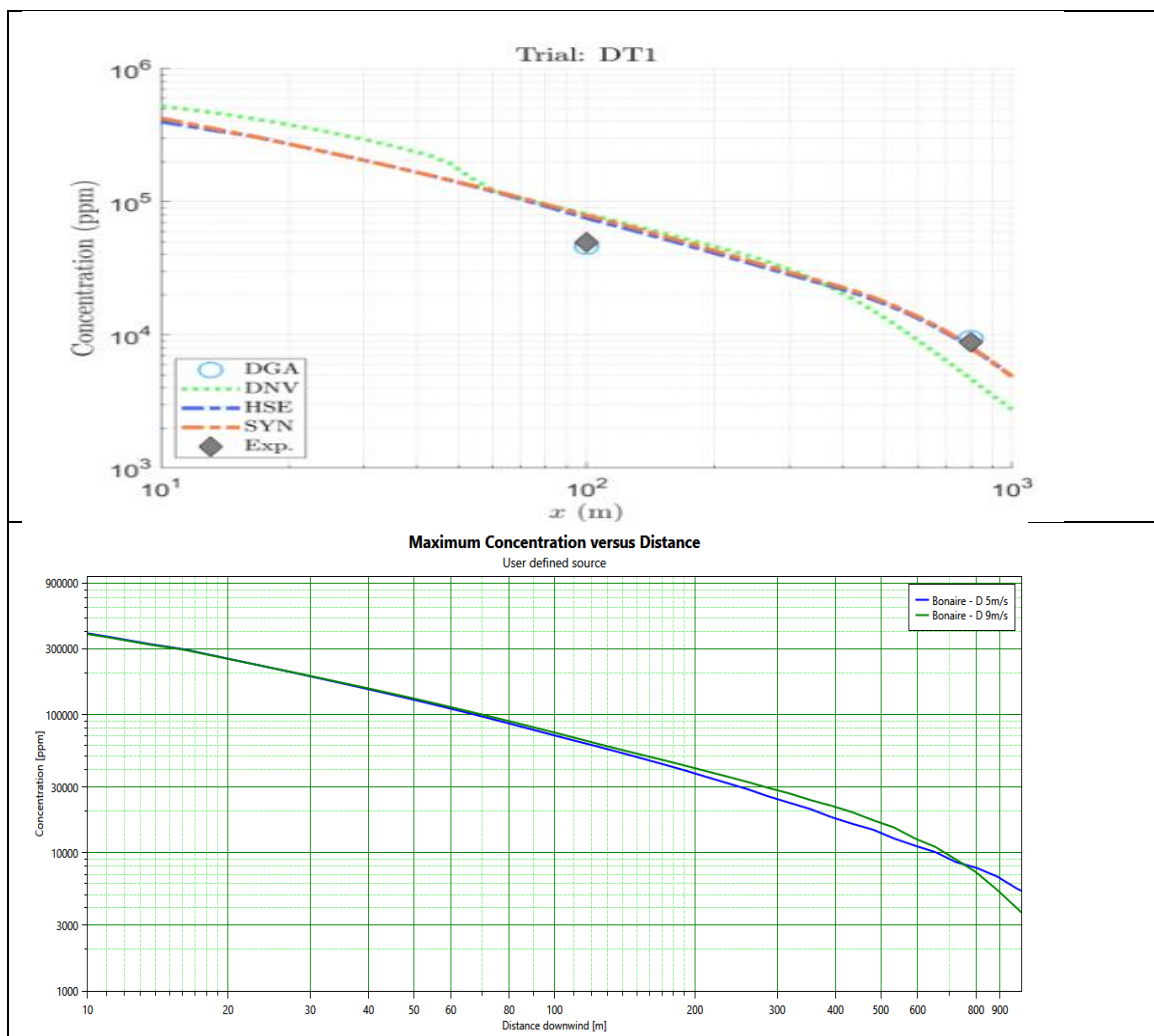
¹ De gebruikte interventiewaarden zijn te vinden in de Safeti-NL database (Phast MC) en zijn bepaald voor een duur van maximaal 1 uur blootstelling.

RESULTATEN MODELLEEROPGAVES EN RISICOANALYSES

7.1 Resultaten en conclusie Desert Tortoise validatie

In onderstaande afbeelding is de concentratie vs. afstand grafiek weergegeven die de resultaten tonen van de veldexperimenten van Desert Tortoise en de validatie exercitie in het kader van JackRabbit III. Daaronder is de concentratie vs. afstand grafiek die vanuit Safeti-NL is verkregen weergegeven ter vergelijking.

Afbeelding 7.1 Resultaten Desert Tortoise in Phast en daaronder de vanuit Safeti-NL verkregen concentratie vs. afstand ter vergelijking



In de grafieken is te zien dat de resultaten van Safeti-NL goed overeenkomen met de resultaten van Phast en dus de veldexperimenten.

Verder komen de stofeigenschappen die door AVEVA zijn berekend goed overeen met de eigenschappen die zijn gebruikt in de input van Phast en Safeti-NL en de output van beiden. Zo berekent AVEVA een vloeistoffractie van 0,83 en een temperatuur bij uitstromen van -33,4 °C.

7.1.1 Aanbevelingen uit validatiestudie

Een studie¹ naar het modelleren van het vrijkomen van vloeibaar ammoniak met Phast, aansluitend op de toekomstige Jack Rabbit III field tests, heeft een aantal verbeterpunten voor het model in kaart gebracht. Deze punten kunnen ook in acht genomen worden bij het modelleren met Safeti-NL, omdat Phast de basis is in Safeti-NL waarmee de consequenties gemodelleerd worden. Met Safeti-NL is het daarnaast mogelijk om risico's in kaart te brengen.

De volgende aanbevelingen worden in die studie gegeven voor het simuleren van vrijkomen van onder druk vloeibaar gemaakte stoffen:

- 1 controleer de specifieke druk en temperatuur bij de opening waar de uitstroom plaatsvindt, om te verifiëren dat de input condities de verwachte fase van ammoniak bij uitstroom complementeren;
- 2 bij een situatie waar uitregenen van toepassing is; controleer de diameter van de ammoniadruppels door een standaard isentropisch expansiemodel en de CCPS druppelgrootte correlatie te gebruiken;
- 3 het atmosferisch expansiemodel waarbij behoud van momentum toegepast wordt geeft een meer representatieve post-expansie snelheid van de bron.

Punt 1 vraagt mogelijk aanvullende praktijktesten. Punten 2 en 3 zullen mogelijk in Safeti-NL verwerkt moeten worden door de ontwikkelaar van het pakket.

7.1.2 Aandachtspunten

Safeti-NL 8.8: een verbeterd model voor verspreiding van zware gassen

De validatie van Safeti-NL versie 8.5 aan de Jack Rabbit II experimenten met de verspreiding van chloor laat zien dat de concentraties op grotere afstand onderschat werden. DNV heeft dit onderzocht, en een verbeterd model voor de verspreiding van zware gassen ontwikkeld en toegepast in Safeti-NL 8.8. Uit verkennende berekeningen blijkt dat voor stoffen die als zwaar gas verspreiden, zoals chloor, koud ammoniak en zwaveldioxide, grotere effectafstanden berekend worden. Dit is in het bijzonder het geval bij lage windsnelheid. Dit betekent dat de effectafstanden voor deze stoffen groter kunnen worden. De resultaten in dit rapport zijn met Safeti-NL 8.8 verkregen.

Bund toevoegen aan berekening om krater beter te beschouwen

Bij de berekening wordt onderscheid gemaakt tussen de initiële fase (de eerste 30 minuten) en de late fase. Vanuit het bepalen van de risicocontouren gaat het rekenprogramma alleen uit van de verdamping en verspreiding gedurende de eerste 30 minuten. De berekening van de breuk van de buisleiding in Safeti-NL is hiermee bedoeld voor de initiële fase. In deze fase ontstaat een krater, maar kan de vloeistof ook buiten deze krater uitspreiden in de omgeving waarna plasverdamping ontstaat. Het RIVM adviseert om met de risicoberekening niet de effecten tijdens de late fase te modelleren door het gebruik van een bund. Dit omdat het programma hier niet voor bedoeld is. Safeti-NL berekent al de grootte van de plas en deze kan worden beïnvloed door het gebruik van een bund. Om de effecten van een toxische plas toch te onderzoeken is een los scenario gemodelleerd. Hierbij is wel rekening gehouden met dat de diepte van de plas overeenkomt met de diepte van de krater. Het is daarmee mogelijk een indicatie te krijgen van de duur van een plasverdamping uit deze krater. In paragraaf 7.2.5 is dit uitgewerkt en berekend. Hierbij is geen rekening gehouden met bepaalde thermodynamica effecten, zoals het afkoelen aan grond.

¹ Phast modelling of the desert tortoise and fladis ammonia trials for the Jack Rabbit III model inter-comparison exercise; McGillivray et al.; 2022.

De invloed van deze effecten op de duur en uitdamping zouden met een ander onderzoek aanvullend kunnen worden onderzocht. De gegevens uit dit onderzoek geven een redelijke indruk waarmee rekening gehouden kan worden.

Vertraagd flashen

In dit onderzoek wordt aangenomen dat bij een breuk de ammoniak zich vrijwel direct naar buiten beweegt. De temperatuur zal door het plotselinge drukverschil na een breuk echter in de praktijk al in de leiding dalen. Daarbij wordt warmte aan de omgeving onttrokken. Dit fenomeen resulteert waarschijnlijk in een vertraging van het flashen van de ammoniak door een gebrek aan warmte input. In dit onderzoek is het vertraagd flashen niet modelmatig onderzocht. Dit omdat het fenomeen zeer complex is en daardoor moeilijk te modelleren.

7.2 Resultaten en conclusies risicoanalyses leidingspecificatie variaties

Onderstaande afbeeldingen geven de resultaten van verschillende variaties leidingspecificaties weer, berekend met Safeti-NL versie 8.8. Ook wordt de vergelijking met en zonder 'bund' berekend met Safeti-NL versie 8.8. In bijlage II zijn alle rekenresultaten in één tabel samengevoegd.

In dit hoofdstuk zijn de uitgangspunten opgesomd waarmee de kwantitatieve risicoanalyses van de buisleidingen voor ammoniak zijn uitgevoerd. De uitgangspunten zijn gebaseerd op de Handleiding risicoberekeningen Bevb¹. Op basis van de genoemde uitgangspunten zijn de berekeningen uitgevoerd met behulp van Safeti-NL 8.8. De resultaten van deze berekeningen worden in dit hoofdstuk besproken.

Voor de ondergrondse buisleidingen worden twee ongevalsscenario's beschouwd:

- breuk van de buisleiding;
- lek door een gat van 10 % van de diameter met een maximum van 20 mm.

Voor de faalkansen wordt aangenomen dat de leidingen voldoen aan de laatste stand der techniek. De faalkansen zijn getoond in tabel 7.1.

Tabel 7.1 Faalkansen leidingen volgens laatste stand der techniek zonder mitigerende maatregelen

Faaloorzaak	Breuk [km.jaar ⁻¹]	Lek [km.jaar ⁻¹]	Breuk [km.jaar ⁻¹] inclusief diepteligging	Lek [km.jaar ⁻¹] inclusief diepteligging
beschadiging door derden	1.77E-5	2.63E-5	1.99E-6	2.96E-6
mechanisch	7.96E-6	3.86E-5	7.96E-6	3.86E-5
inwendige corrosie	1.41E-6	1.17E-5	1.41E-6	1.17E-5
uitwendige corrosie	4.25E-6	3.52E-5	4.25E-6	3.52E-5
natuurlijke oorzaken	2.26E-6	3.6E-6	2.26E-6	3.60E-6
operationeel	3.4E-6	4.56E-6	3.40E-6	4.56E-6
totaal	3.7E-5	1.2E-4	2.13E-5	9.66E-5

De diepteligging (=gronddekking) wordt verdisconteerd in de faaloorzaak 'Beschadiging door derden'. De reductiefactor kan worden berekend met de formule:

$$factor = e^{-2,4 \cdot (0,84 - z)}$$

Waarbij z = diepteligging (m). In dit onderzoek is de diepteligging aangenomen van 1.75 m. De bijbehorende reductiefactor is 8.88.

¹ Handleiding Risicoberekeningen Bevb; RIVM; 2020.

In dit rapport is doorgerekend voor onderstaande variaties:

- enkelwandige leidingen;
- dubbelwandige leidingen;
- leidingen zonder gebruik betonnen platen.

7.2.1 Andere gebruikte parameters

Section breach

Voor ammoniak (tot vloeistof verdicht gas) worden beide scenario's d.m.v. 'section breach' gemodelleerd. In tegenstelling tot wat bevb voorschrijft worden de leidingen 'buried' gemodelleerd met de dieptelegging/gronddekking van 1.75 m. Dit omdat de leidingen ondergronds worden aangelegd en daardoor een krater ontstaat wanneer de leiding breekt. Wanneer de leiding niet 'buried' wordt gemodelleerd, zal het rekenprogramma ook geen krater modelleren, terwijl de krater van grote invloed kan zijn op de letale effecten en maatschappelijke ontwrichting.

Safety Integrity Level

Safety Integrity Level, afgekort SIL, is een normatieve methode voor de beoordeling van elektrische, elektronische en programmeerbare elektronische systemen met betrekking tot de betrouwbaarheid en veiligheid van de procesvoortgang. Op basis van deze classificatie wordt normatief afgeleid wat de kans op falen mag zijn. Die getolereerde kans op falen is dan een van de vier SILs. Daarnaast wordt onderscheid gemaakt tussen systemen die minder dan eenmaal per jaar, eenmaal per jaar, vaker dan eenmaal per jaar of doorlopend gebruikt worden. Voor de afsluiters wordt aangenomen dat ze beschikken over SIL niveau 1 en minder dan één keer per jaar worden gebruikt. Bijbehorende kans op falen wordt geschat op 10 % per gebruik.

Lengte leidingsegment

Conform Bevb wordt de leiding gemodelleerd als 'long pipeline'. Om het effect van de grote hoeveelheid uitstromend ammoniak juist te simuleren (bijvoorbeeld het momentum), moet de leiding voldoende lang zijn. In het model is gekozen voor 50 km. Er is in overleg met de werkgroep besloten om met segmenten van 1 en 5 km te rekenen. Het segment begint altijd op 25 km van de upstream kant. In Safeti-NL is aangegeven dat de totale leiding langer is dan het segment getekend in GIS.

Lengte inbloksegment

Een segment wordt afgebakend met kleppen. Als functie wordt gekozen 'closure' om het inblokken van het beschadigde segment te simuleren. Na het bereiken van de sluitingstijd worden de kleppen instantaan gesloten. Voor de kleinere leidingen is dat realistisch. Voor de grotere leidingen moet rekening worden gehouden met het feit dat het dichtdraaien van de klep ook enige tijd in beslag neemt en dat de doorstroming bij de klep langzaam zal afnemen. Het model gaat dus uit van een constante doorstroming tot het moment dat de klep gesloten is.

Gronddekking

Tijdens het overleg met de experts en RIVM werd voor het kratermodel de gronddekking gekozen van 1.75 m. Dit is een afwijking van het Bevb waar de ondergrondse leidingen voor ammoniak 'above ground' (dus zonder kratermodel) gemodelleerd dienen te worden. Volgens het rekenvoorschrift Omgevingsveiligheid Module V wordt nu wel aanbevolen het kratermodel te gebruiken. In Module V paragraaf 12.6 'Modellering tot vloeistof verdichte gassen' staat het volgende: 'Aanbevolen wordt het kratermodel te gebruiken; voor de pipeline surrounding characteristics wordt de keuze buried geselecteerd.'

Gebruik bund

Na overleg met RIVM is er voor de modellering geen bund gebruikt. De effecten van de plas worden apart bestudeerd. Bij de berekening moet onderscheid gemaakt worden tussen de initiële fase (de eerste 30 minuten) en de late fase.

De berekening van de breuk van de buisleiding is bedoeld voor de initiële fase. RIVM raadt het af om met deze berekening ook de effecten tijdens de late fase te modelleren door het gebruik van een bund.

Safeti-NL berekent al de grootte van de plas en deze kan worden beïnvloed door het gebruik van een bund. Om de effecten van een toxische plas in een later stadium te onderzoeken kan beter een los scenario worden gemodelleerd. Er moet dan wel rekening mee gehouden worden dat de diepte van de plas overeenkomt met de diepte van de krater. Er wordt dus strikt onderscheid gemaakt tussen de initiële fase (leiding breuk) en de langdurige fase (atmosferische tank in de krater).

Overig

- de bedrijfstemperatuur is voor alle variaties 10°C, gemiddelde omgevingstemperatuur in Nederland conform de handleiding;
- de pumped inflow wordt zodanig gekozen dat de resulterende vloeistofsnelheid tussen 1.5 en 2 m/s ligt;
- als 'Accident type' is gekozen voor 'full bore rupture'. Hiermee wordt een propagerende scheur in de leiding gemodelleerd die zich over de gegeven lengte (standaard 12 m) verspreidt;
- voor detection probability is gekozen voor 1. Dit houdt in dat een breuk altijd wordt opgemerkt en dat de kleppen altijd automatisch worden gesloten. Het weermodel van Soesterberg wordt gebruikt.

Output parameters

Na het berekenen genereert Safeti-NL een aantal scenario's. De scenario's zijn: 'no isolation', 'full isolation', 'succesful upstream or downstream isolation'. Voor het bepalen van de effectafstanden wordt uitgegaan van 'full isolation', dus dat alle kleppen sluiten na de detectietijd en sluittijd. De resultaten worden afgelezen uit de grafiek 'Max Footprint' van de tab 'Dispersion'. Daarbij wordt gekeken op welke afstand de concentraties van minimaal VRW, AGW en LBW worden gedetecteerd. Daarnaast wordt de 1 %-letaliteit afgelezen. Er is ook een mogelijkheid om de dosis af te lezen om te bepalen op welke afstand de mensen in gebouwen gevaarlijke hoeveelheid ammoniak binnen kunnen krijgen.

7.2.2 Resultaten plaatsgebonden risico enkelwandige leidingen

Onderstaande tabel toont de samenvatting van de toegepaste mitigerende maatregelen en de bijbehorende faalkansen, conform de handleiding risicoberekening Bevb. Onder de Omgevingswet, die in januari 2024 in werking is getreden, zijn berekeningswijzen veranderd, waardoor bepaalde maatregelen niet meer standaard zijn. Dit kan in detail gevolgen hebben voor de resultaten, maar blijven in orde grootte hetzelfde. Dit onderzoek is een verkennend onderzoek en is niet bedoeld om definitieve en absolute resultaten te genereren.

Tabel 7.2 Faalkansen buisleidingen inclusief mitigerende maatregelen

Faaloorzaak	Breuk (per km jaar)	Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)	Mitigerende maatregel	Reductie-factor	Nieuwe Breuk (per km jaar)	Nieuwe Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)
beschadiging door derden	1.99E-6	2.96E-6	afdekking met lint en platen 30 graven/boren verboden 10	300	6.64E-9	9.87E-9
mechanisch	7.96E-6	3.86E-5	ILI inspectie 10	10	7.96E-7	3.86E-6
inwendige corrosie	1.41E-6	1.17E-5	materiaal niet corrosief 10	10	1.41E-7	1.17E-6
uitwendige corrosie	4.25E-6	3.52E-5	kathodische bescherming 10	10	4.25E-7	3.52E-6

Faaloorzaak	Breuk (per km jaar)	Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)	Mitigerende maatregel	Reductie-factor	Nieuwe Breuk (per km jaar)	Nieuwe Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)
natuurlijke oorzaken	2.26E-6	3.60E-6	natuurlijke oorzaken redelijkerwijs uitgesloten 10	10	2.26E-7	3.60E-7
operationeel	3.40E-6	4.56E-6	toegepaste SIL = berekende SIL + 1; 10	10	3.40E-7	4.56E-7
totaal	2.13E-5	9.66E-5			1.93E-6	9.37E-6
som kansen breuk en lek [km jr]		1.18E-4				1.13E-5

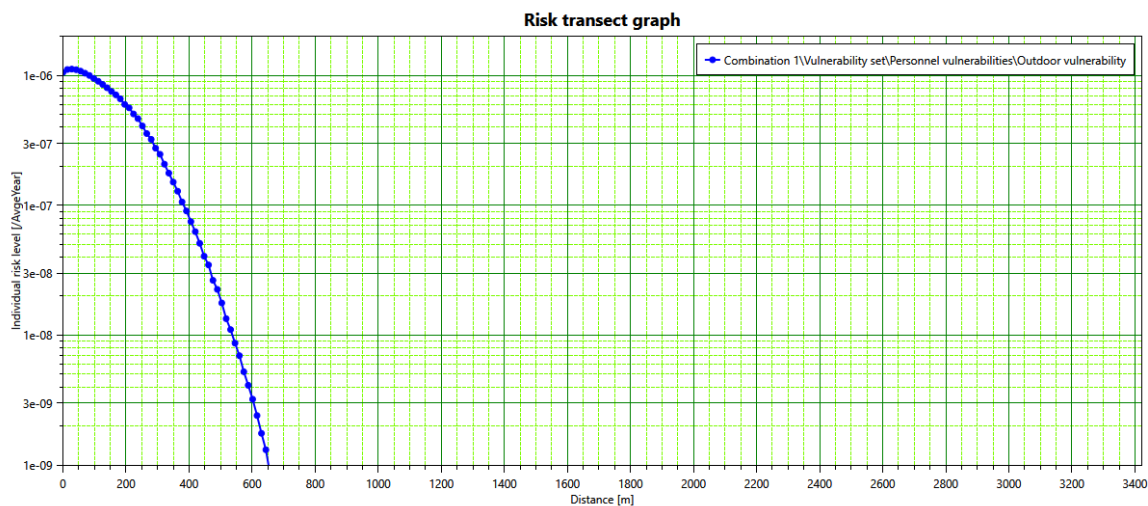
Onderstaande tabel toont de berekende maximale afstanden voor 1 10^{-6} contour voor verschillende leidingdiameters en inblok lengtes. Bij het toepassen van de genoemde mitigerende maatregelen ontstaat bij alle leidingen een (relatief grote) 1 10^{-6} contour.

Tabel 7.3 PR-contouren voor leidingen met verschillende diameters en inblok lengtes enkelwandige leiding

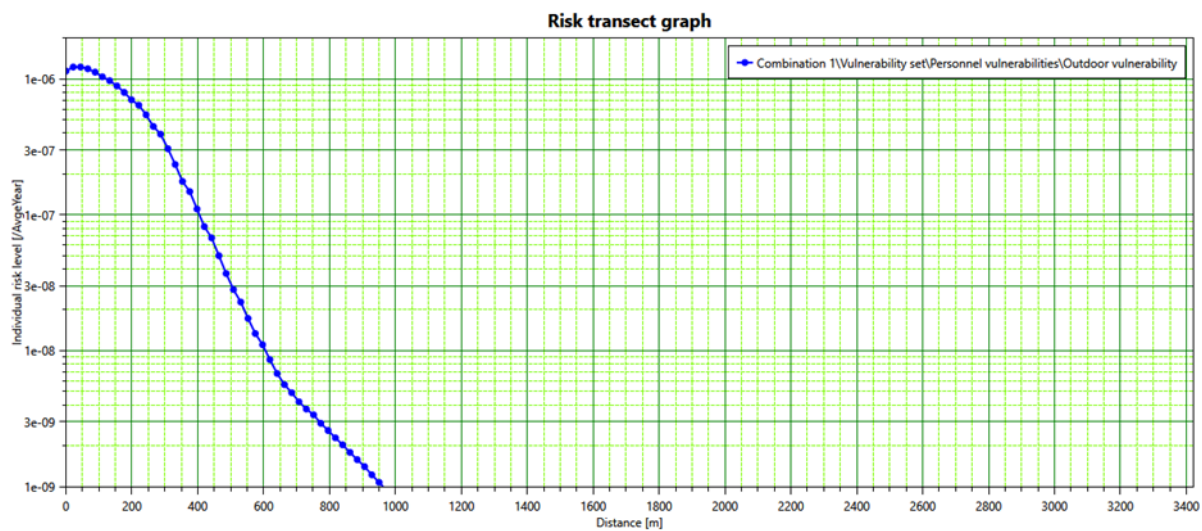
Diameter leiding [in]	Diameter leiding [mm]	Lengte segment [m]	Maximale afstand PR 1 10^{-6} [m]
8	203.2	1000	88.4
8	203.2	5000	124
12	304.8	1000	148
12	304.8	5000	189
24	609.6	1000	214
24	609.6	1000	224
24	609.6	5000	265
36	762	1000	248
36	762	5000	275

Onderstaande afbeeldingen laten zien dat de maximale PR waarde voor alle diameters net boven 1 10^{-6} ligt. Een kleine afname van de faalkansen zal de 1 10^{-6} contour doen verdwijnen.

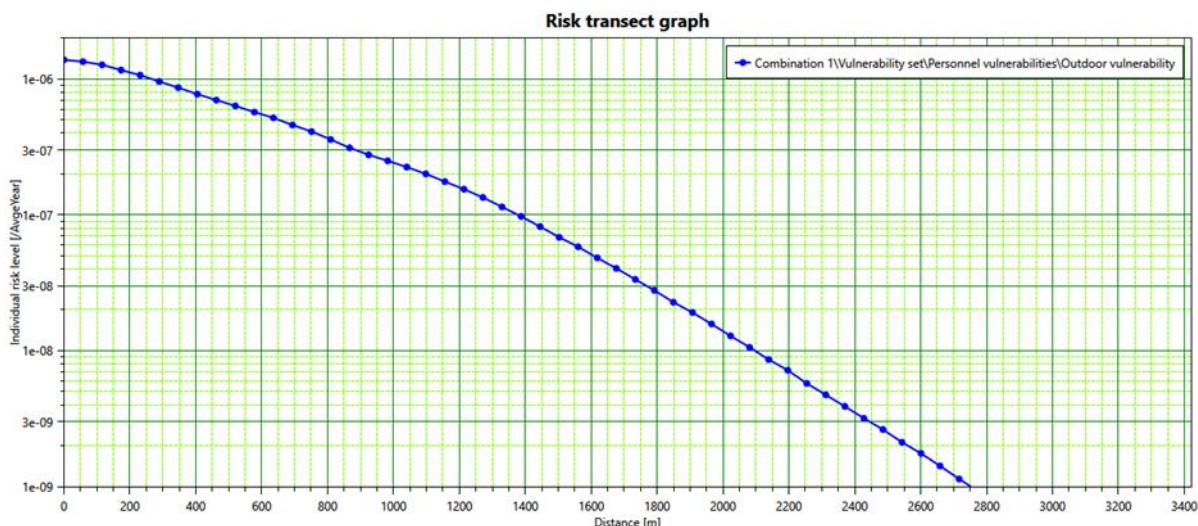
Afbeelding 7.2 Waarde PR als functie van afstand leiding 8 in 1.000 m inblok



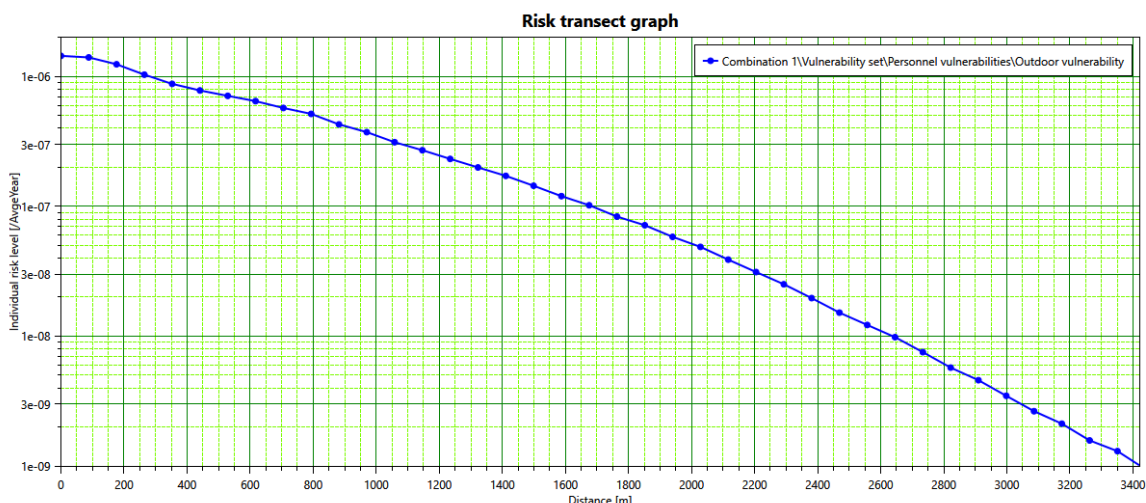
Afbeelding 7.3 Aarde PR als functie van afstand leiding 8 in 5.000 m inblok



Afbeelding 7.4 Waarde PR als functie van afstand leiding 24 in 5.000 m in blok



Afbeelding 7.5 Waarde PR als functie van afstand leiding 36 in 5.000 m in blok



7.2.3 Plaatsgebonden risico dubbelwandige leidingen

Aanvullend is een aantal risicoberekeningen gemaakt waarbij wordt uitgegaan van dubbelwandige leidingen. In paragraaf 4.3 is besproken dat dergelijke leidingen geen eenvoudige of aantrekkelijke risicoreducerende maatregelen zijn. Er is voor gekozen om de risicoreductie wel rekenkundig uit te werken.

Dubbelwandige leidingen zijn niet gedefinieerd in de handleiding risicoberekeningen Bevb, maar zou, in theorie, de kans op inwendige en uitwendige corrosie zodanig beperken dat deze faaloorzaak rekenkundig uitgesloten mag worden. Bij een dubbelwandige leiding kan de binnenste leiding worden blootgesteld aan inwendige corrosie, maar zal het falen van de binnenste leiding leiden tot het vullen van de buitenste leiding, maar niet tot het falen van deze buitenste leiding. Ook bij het falen van de buitenste leiding door uitwendige corrosie zal er niet direct ammoniak vrijkomen. De kans dat inwendige corrosie en uitwendige corrosie tegelijkertijd optreedt ligt in de ordegrootte van $1.3 \cdot 10^{-5} \times 3.9 \cdot 10^{-5} = 5.2 \cdot 10^{-10}$.

Uitgangspunten

Onderstaande tabel toont de samenvatting van de toegepaste mitigerende maatregelen en de bijbehorende faalkansen voor de dubbelwandige leidingen.

Tabel 7.4 Faalkansen dubbelwandige buisleidingen inclusief mitigerende maatregelen

Faaloorzaak	Breuk (per km jaar)	Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)	Mitigerende maatregel	Reductie-factor	Nieuwe Breuk (per km jaar)	Nieuwe Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)
beschadiging door derden	1.99E-6	2.96E-6	afdekking met lint en platen 30 graven/boren verboden 10	300	6.64E-9	9.87E-9
mechanisch	7.96E-6	3.86E-5	ILI inspectie 10	10	7.96E-7	3.86E-6
inwendige corrosie	1.41E-6	1.17E-5	dubbelwandige leiding. Effecten door corrosie onaannemelijk	∞^1	0	0
uitwendige corrosie	4.25E-6	3.52E-5	dubbelwandige leiding. Effecten door corrosie onaannemelijk	∞^2	0	0
natuurlijke oorzaken	2.26E-6	3.60E-6	natuurlijke oorzaken redelijkerwijs uitgesloten 10	10	2.26E-7	3.60E-7
operationeel	3.40E-6	4.56E-6	toegepaste SIL = berekende SIL + 1; 10	10	3.40E-7	4.56E-7
totaal	2.13E-5	9.66E-5			1.37E-6	4.69E-6
som kansen breuk en lek [km jr]		1.18E-4				6.05E-6

Resultaten

Onderstaande tabel toont de PR-contouren van de dubbelwandige leidingen met verschillende diameters en inbloeelengtes. Zowel de diameter als de inbloeelengte is relevant voor het wel of niet ontstaan van een $1 \cdot 10^{-6}$ contour. Onderstaande afbeeldingen tonen de PR als functie van afstand voor verschillende leidingen. Vergelijkbaar met de resultaten van de enkelwandige leidingen, ligt de PR waarde dichtbij $1 \cdot 10^{-6}$.

Tabel 7.5 PR-contouren voor leidingen met verschillende diameters en inbloeelengtes dubbelwandige leiding

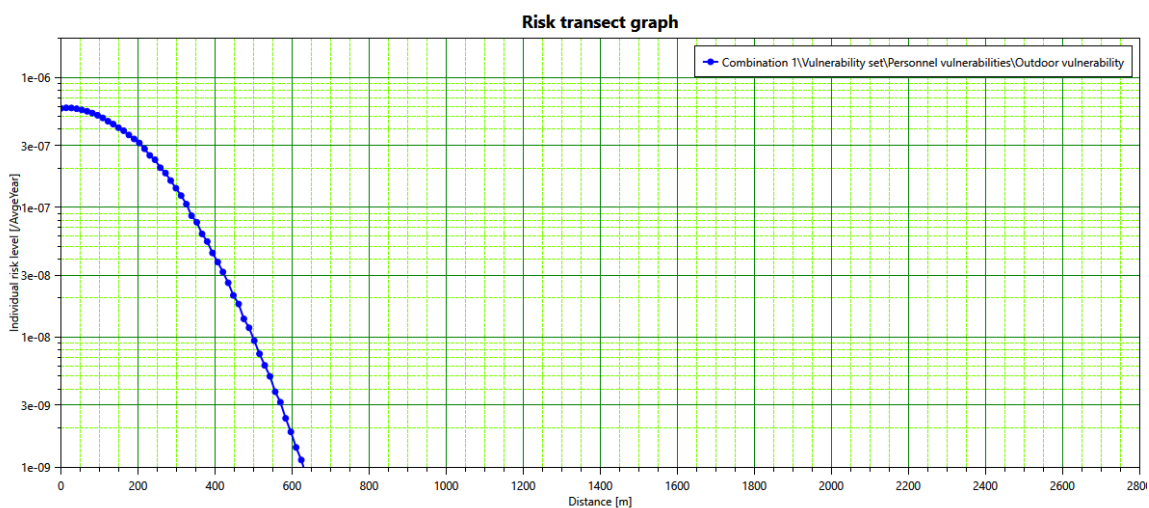
Diameter leiding [in]	Diameter leiding [mm]	Lengte segment [m]	Maximale afstand PR $1E-6$ [m]	Maximale PR waarde [jr]
1x 8 dubbelwandig	203.2	1.000	geen	5.86E-7
1x 8 dubbelwandig	203.2	5.000	geen	6.69E-7
1x 24 dubbelwandig	609.6	1.000	geen	9.30E-7

¹ Niet gevalideerde waarde. Deze waarde is in de werkgroep besproken, maar validatie kan pas na aanvullend onderzoek.

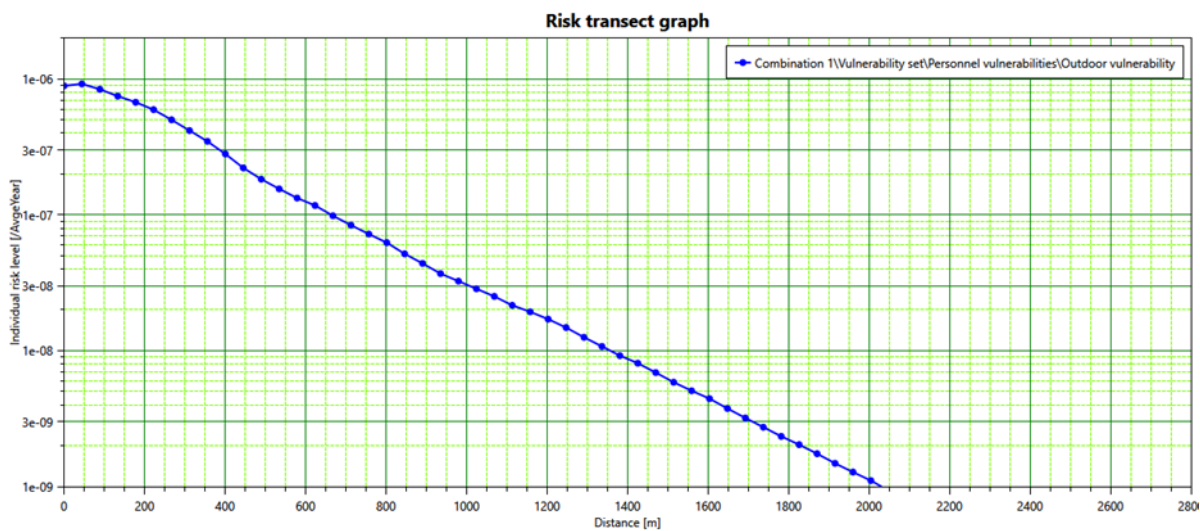
² Niet gevalideerde waarde. Deze waarde is met de werkgroep afgestemd.

Diameter leiding [in]	Diameter leiding [mm]	Lengte segment [m]	Maximale afstand PR 1E-6 [m]	Maximale PR waarde [jr]
1x 24 dubbelwandig	609.6	5.000	269,5	1.51E-6
1x 36 dubbelwandig	762	5.000	274	1.39E-6

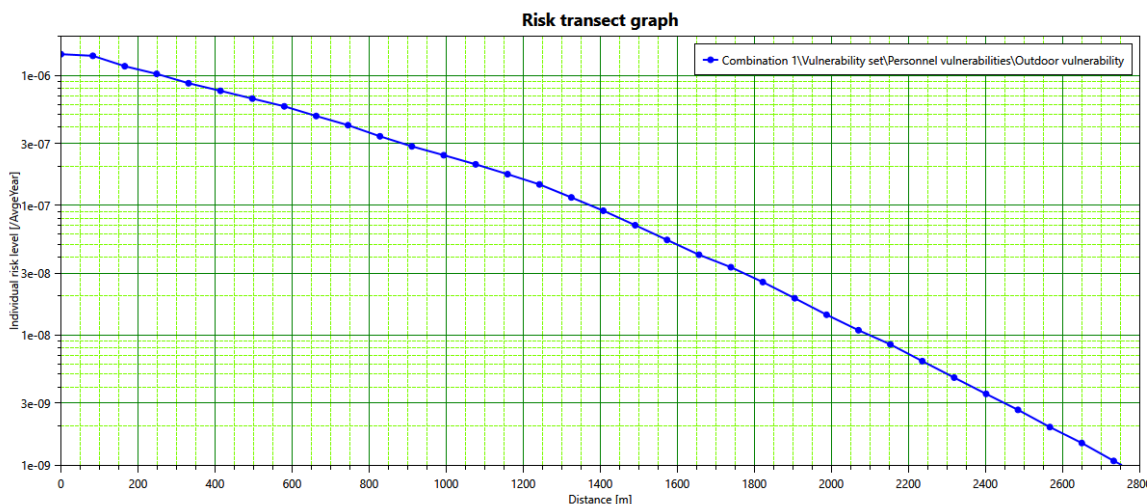
Afbeelding 7.6 Waarde PR als functie van afstand leiding 8in 1.000 m inblok, dubbelwandig



Afbeelding 7.7 Waarde PR als functie van afstand leiding 24in 1.000 m inblok, dubbelwandig



Afbeelding 7.8 Waarde PR als functie van afstand leiding 24in 5.000 m inblok dubbelwandig



Geen betonnen platen

In de werkgroep is aangegeven dat het onrealistisch is om een leidingtracé van enkele honderden kilometers te bedekken met betonnen (of kunststof) platen. Deze maatregel zal alleen worden toegepast voor kortere secties waar het nodig of gewenst is het plaatsgebonden risico te verkleinen, bijvoorbeeld in de omgeving van grote groepen personen en/of de bebouwde kom. Daarom zijn de mitigerende maatregelen nogmaals tegen het licht gehouden.

Onderstaande tabel toont de nieuwe faalkansen indien er geen betonnen platen worden gebruikt om een leiding af te dekken.

Tabel 7.6 Faalkansen door beschadiging door derden bij alternatieve mitigerende maatregelen

Faaloorzaak	Breuk (per km jaar)	Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)	Mitigerende maatregel	Reductie-factor	Nieuwe Breuk (per km jaar)	Nieuw Lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)
beschadiging door derden	1.99E-6	2.96E-6	waarschuwingslint 1.67; Graven/boren verboden 10; Wanddikte minimaal 15 mm: 10	167	1.19E-8	3.92E-7 ¹

Onderstaande tabel toont de totale faalkansen voor enkelwandige en dubbelwandige leidingen.

¹ De reductie in faalkans voor het scenario breuk wordt toegevoegd aan de faalfrequentie voor het scenario lek. De totale faalfrequentie blijft daardoor gelijk.

Tabel 7.7 Overige faaloorzaken enkelwandig versus dubbelwandig

Enkelwandig		Dubbelwandig	
breuk (per km jaar)	lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)	breuk (per km jaar)	lek (10 % van de diameter met max 20 mm) (per km jaar)
1.94E-6	9.76E-6	1.37E-6	5.07E-6
som kansen breuk en lek [/km jr]	1.17E-5		6.44E-6

Resultaten

Onderstaande tabel toont de vergelijking tussen het wel of niet aanleggen van de betonnen platen. Zoals verwacht, is de maximale waarde voor PR hoger zonder de betonnen platen. De verschillen zijn echter relatief klein.

Tabel 7.8 PR-contouren leidingen met en zonder betonnen platen

Diameter leiding [in]	Diameter leiding [mm]	Lengte segment [m]	Maximale afstand PR 1E-6 [m]	Betonnen platen?	Maximale PR waarde [/jr]
24	609.6	1.000	214	ja	1.64E-6
24	609.6	1.000	224	nee	1.70E-6
1x 24 dubbelwandig	609.6	1.000	geen	ja	9.30E-7
1x 24 dubbelwandig	609.6	1.000	15	Nee	1.06E-6

7.2.4 Domino effect

Optreden van een risico kan leiden tot een keten van gevolgen, dit worden ook wel domino effecten genoemd. Hier kijken we naar de opeenstapeling van risico's van twee leidingen waardoor vloeibaar ammoniak wordt getransporteerd.

Als onderdeel wordt het domino effect onderzocht door twee leidingen naast elkaar te leggen. In het rapport 'Domino aspecten van buisleidingen' wordt het volgende gesteld over de naast elkaar liggende leidingen [3]:

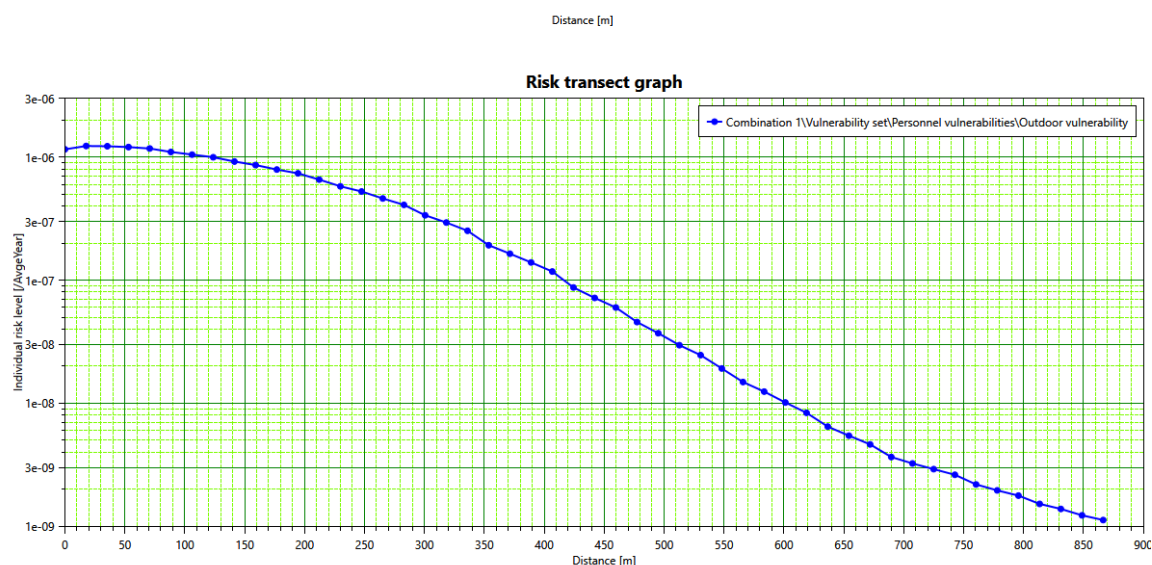
'Wanneer twee leidingen naast elkaar worden geplaatst dan moeten deze leidingen zo ver uit elkaar liggen dat deze geen effect op elkaar hebben. Er moet hierbij worden gekeken naar o.a. overdruk en de afmetingen van de krater'.

De breedte van de krater kan door Safeti-NL worden berekend. Om domino effecten tegen te gaan wordt geadviseerd om de parallel lopende ammoniak leidingen minimaal op een afstand van elkaar te leggen die gelijk is aan de helft van de breedte van de krater. Voor een 8-inch leiding is de breedte van de krater 5.3 m. De leidingen moeten dus op circa 2.7 m van elkaar liggen.

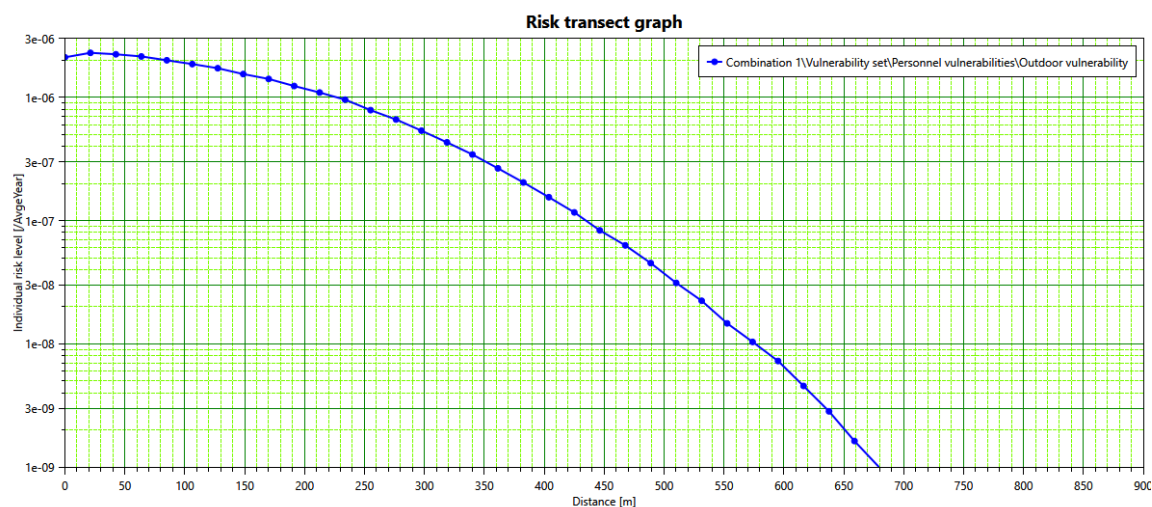
Om de effecten verder te bestuderen zijn de PR-contouren van een 12' leiding vergeleken met twee 8' leidingen. De totale doorzet van een 12' leiding (60 kg/s) is namelijk gelijk aan die van de 8' leidingen (2 x 30 kg/s). Onderstaande afbeeldingen tonen de PR waardes als functie van de afstand. Bij twee leidingen i.p.v. één is de faalkans twee keer zo groot en ligt de $1 \cdot 10^{-6}$ grenswaarde ook bijna 2 keer zo ver.

De maximale footprint wordt daartegenover lager, aangezien bij het barsten van een 8in leiding minder ammoniak vrijkomt dan bij een 12' leiding.

Afbeelding 7.9 Waarde als functie van afstand leiding 12' 1.000 m inblok



Afbeelding 7.10 Waarde PR als functie van afstand 2 leidingen 8in 1.000 m inblok



7.2.5 Bepaling van de duur van de effecten van de plas.

De externe veiligheidsberekeningen van de effect en risico's gaan uit van een maximale uitstroming van 30 minuten. Ook de effecten worden beperkt tot 30 minuten. Na deze 30 minuten wordt aangenomen dat iedereen die direct komt te overlijden door een ongeval met gevaarlijke stoffen reeds is overleden en dat de andere personen voldoende tijd hebben gehad om te vluchten of te schuilen. In dit hoofdstuk wordt inzicht gegeven in de mogelijke duur van het uitdampen van de plas die ontstaat bij een breuk van de ammoniakleiding. Dit zodat er inzicht is de ontwrichting die ontstaat door een breuk van een ammoniakleiding, ook op langere termijn.

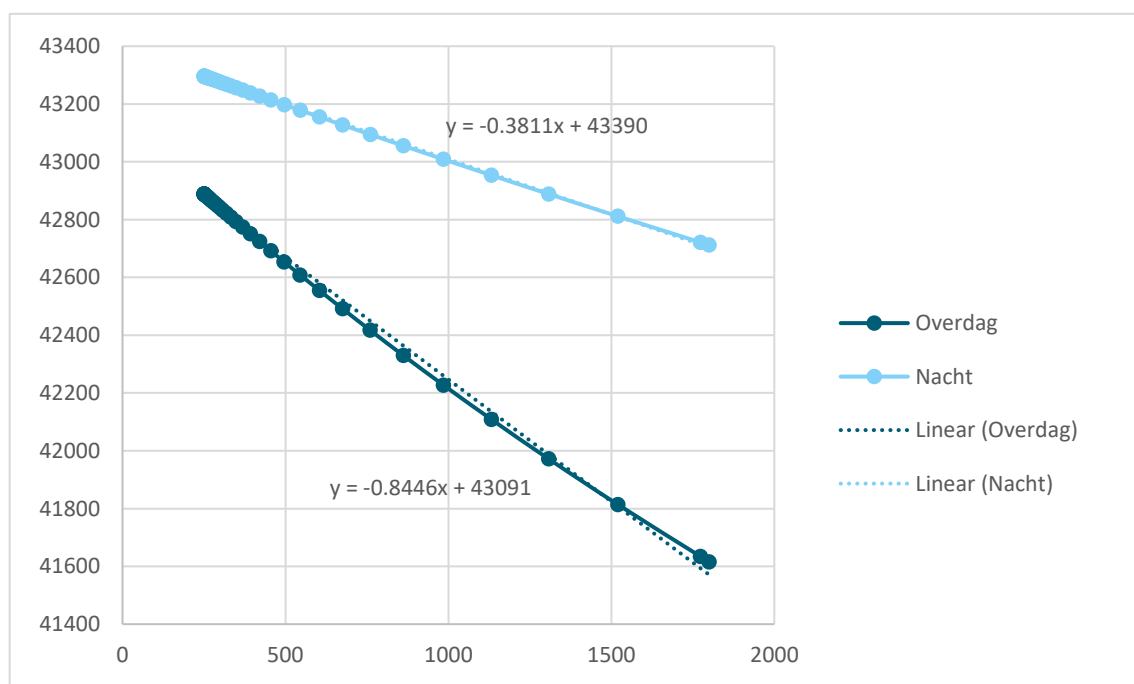
Het ontstaan van de plas is gemodelleerd m.b.v. een atmosferische tank en 'fixed duration release'. De inhoud van de tank is gelijk aan de hoeveelheid uitgestroomd ammoniak, berekend met de 'long pipe', zie modelparameters. De uitstroomtijd is gelijk aan de tijd waarbij het gebarsten leidingsegment leegstroomt.

Door het openbarsten van de leiding ontstaat een krater. Met behulp van Safeti-NL worden de afmetingen van de krater voorspeld. De krater stroomt vervolgens vol met kokend ammoniak. De kokende ammoniak heeft een temperatuur van ca -34 °C. Het verdampen van ammoniak onttrekt warmte waardoor de resterende ammoniak afkoelt. Daarnaast is de oppervlakte van de krater relatief klein. De beide effecten zorgen ervoor dat het verdampen van ammoniak lang duurt en de plas uren (tot zelfs dagen) kan blijven liggen. Hierdoor kan overlast lang aanhouden als er geen maatregelen worden getroffen om de plas op te ruimen.

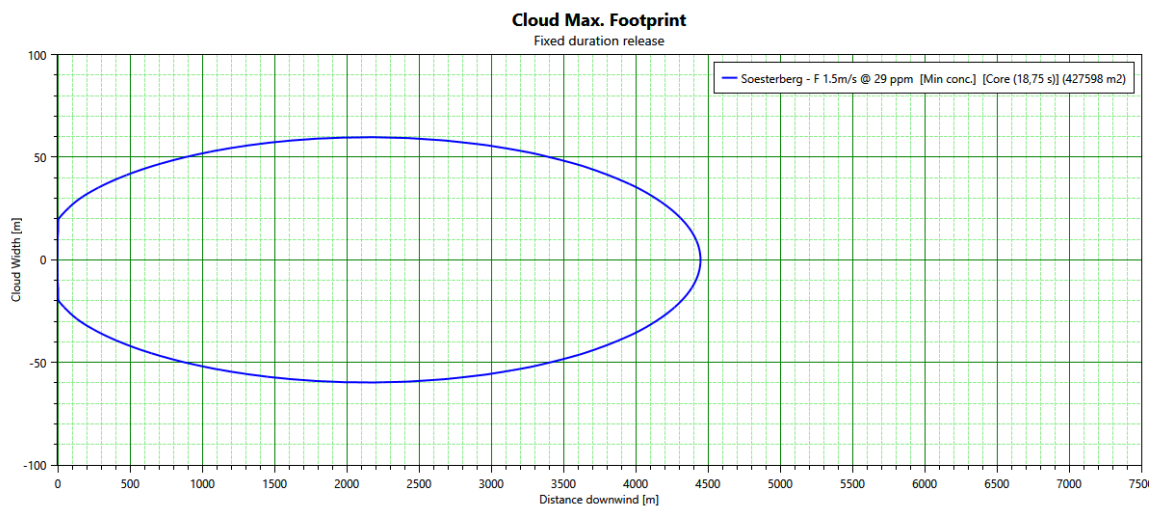
Met Safeti-NL kan worden geschat hoelang het kan duren voordat de plas is verdampt. Hiervoor wordt de resterende massa ammoniak als functie van de tijd in Excel geplotted en beschreven met een vergelijking, waarbij y gelijk is aan massa (kg) en x aan de tijd (s). De vergelijkingen worden opgelost voor y=0. Gedurende de verdamping kan het maximale effect ver reiken.

Afbeelding 7.11 toont de geschatte verdampingstijd van de plas die ontstaat bij een breuk van een 8 inch leiding, brekend voor twee verschillende weertypes. Bij het weertype D5.0 m/s (overdag) duurt de verdamping circa 14 uur. 's Nachts (weertype F1.5 m/s) duurt het circa 32 uur voordat de plas weg is. Afbeelding 7.12 toont het maximale afstand waarbij de effecten van de plas nog merkbaar zijn. Bij 29 ppm veroorzaakt de plas voornamelijk stankoverlast en in sommige gevallen irritatie aan de ogen en luchtwegen. Afbeelding 7.11 en 7.12 tonen dezelfde resultaten voor een 24' leiding. De verdampingstijden zijn 24 uur bij D5.0 m/s en 57 uur bij F1.5 m/s.

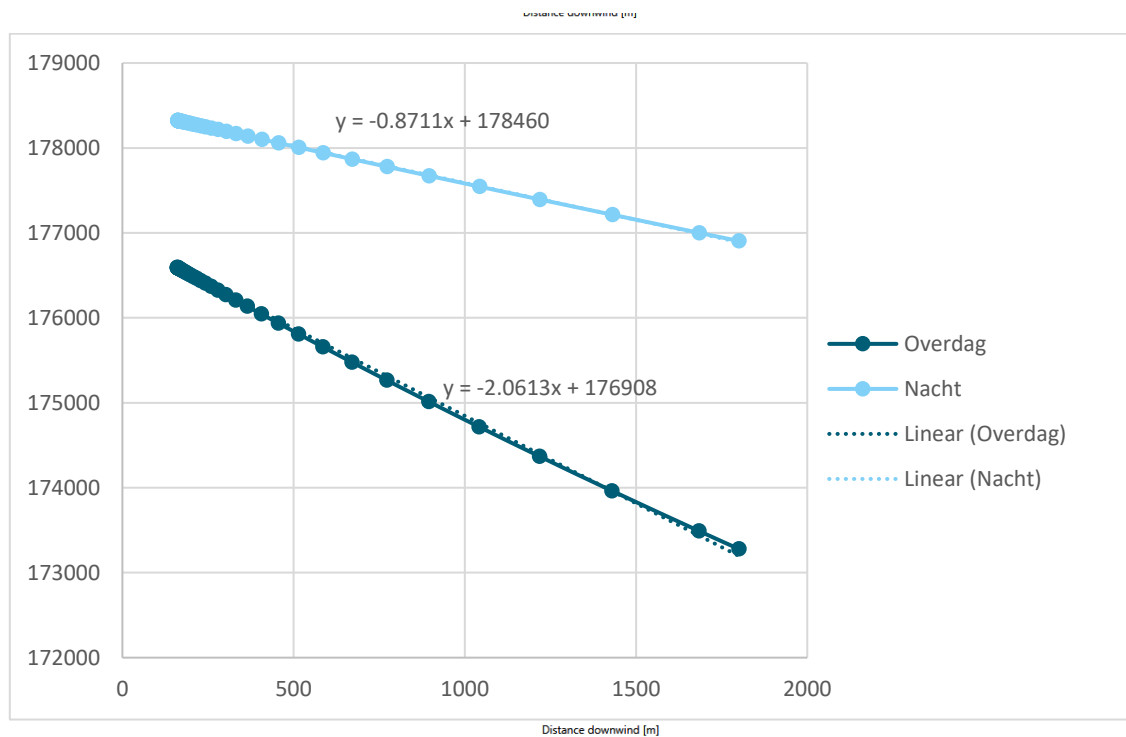
Afbeelding 7.11 Verdampingstijd plas bij 8 inch leiding (x-as: tijd in s, y-as



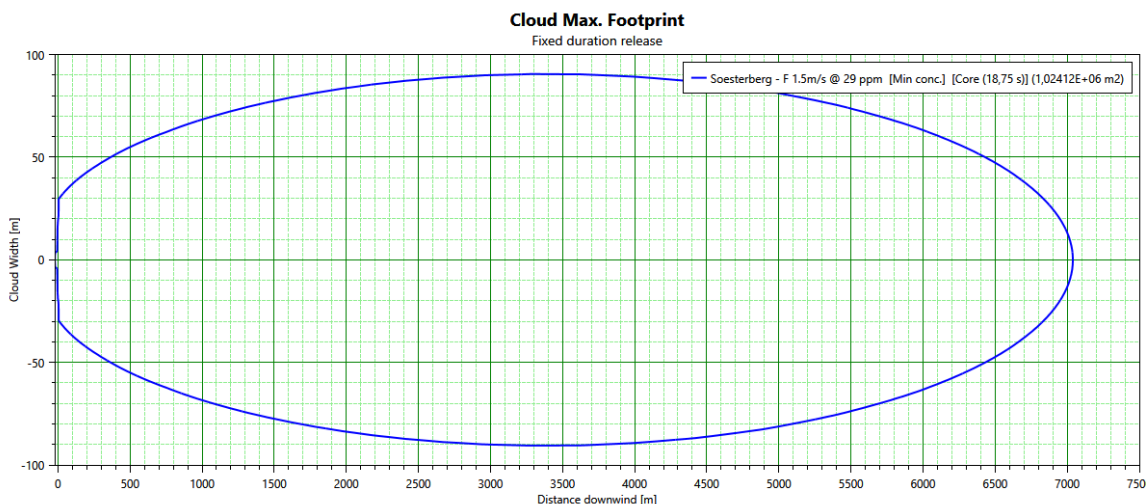
Afbeelding 7.12 Maximale effect plas 8 inch leiding



Afbeelding 7.13 Verdampingstijd bij 24 inch leiding



Afbeelding 7.14 Maximale effect plas 24 inch leiding



7.2.6 Effecten van de afkoeling van de bodem in de krater

Door de opdrachtgever is de wens uitgesproken om de koelende (of opwarmende) effecten van de grond nader te bekijken. Om de koelende effecten van de plas na te bootsen werd de uitstroming van gekoeld ammoniak (-77.7 degC) gemodelleerd. De resultaten komen echter overeen met de uitstroming van kokend ammoniak (-34 degC). Het is enkel mogelijk om de koelende effecten van ammoniak kwalitatief te beschrijven.

Het verdampen van ammoniak onttrekt warmte aan de omgeving (en de grond van de krater). De verdamping en verspreiding van gasvormig ammoniak wordt daardoor extra geremd. Er kan worden verwacht dat de plas in de krater in werkelijkheid langer blijft liggen dan wordt voorspeld door Safeti. De maximale afstand van de langdurige wolk is juist lager omdat de verdampingssnelheid afneemt naarmate de krater verder afkoelt. De max footprint, berekend door Safeti is hierdoor conservatief. Dezelfde vraag is voorgelegd aan de RIVM. Hieronder is de reactie van de RIVM:

‘Naast de bodemtemperatuur zijn ook veel andere factoren zoals bodem samenstelling van belang. In de commerciële versie van Safeti kan de bodemtemperatuur aangepast worden, maar het aanpassen van 1 van de factoren om hiermee de koelende effecten van de grond te bekijken is volgens het RIVM niet een juiste methode met veel onzekerheden. Het resultaat hiervan is niet bruikbaar.’

7.3 Conclusies risicoberekeningen

Het is mogelijk om met Safeti_NL resultaten te genereren van effecten en risico's van het transport van grote volumes vloeibaar ammoniak door buisleidingen die bruikbaar zijn voor de beoordeling van de impact op de maatschappelijke ontwrichting. Ook kan Safeti-NL de resultaten van verschillende mitigerende maatregelen in beeld brengen, zodat bij het ontwerp van de leidingen kan worden aangetoond waarom welke maatregelen nodig zijn en of getroffen worden.

Safeti-NL heeft ook haar beperkingen, te weten:

- verandering grondtemperatuur door uitstroom ammoniak;
- modellering van de duur van de uitstroom: in Safeti-NL is de uitstroom gelimiteerd tot 1.800 seconden;

- modellering gedrag ammoniak in grote volumes. Ammoniak dat in grote volumes vrijkomt gedraagt zich heel specifiek. Safeti-NL houdt hier gedeeltelijk rekening mee. Safeti-NL bepaalt wanneer welk model van toepassing is gedurende het verloop van de incidentscenario's.

Wanneer Safeti(-NL) het aangewezen rekenprogramma is, wordt aanbevolen in elk geval de bovenstaande beperkingen nader te onderzoeken of aan te passen.

Uit de rekenresultaten (zie het overzicht in bijlage II) kunnen we het volgende concluderen:

- in de meest waarschijnlijke configuraties van de leidingen zal er sprake zijn van een PR contour van 10^{-6} per jaar. Deze lopen snel op tot honderden meters;
- een dubbelwandige leiding kan eventueel ertoe leiden dat er geen PR 10^{-6} contour is;
- aandachtsgebieden variëren tussen de 1.900 meter (8", 1.000 meter segmentlengte) en 7.500 meter (36" en 5.000 meter segmentlengte);
- de 1 % letaliteitsafstanden variëren tussen de 550 meter en 3.900 meter;
- aandachtsgebieden en letaliteitsafstanden zijn gelimiteerd op een uitstroom van maximaal 1.800 seconden (limiet Safeti-NL), terwijl de uitstroom van ammoniak, en daarmee eventuele overlast veel langer duurt. Daarom zijn ook berekeningen gemaakt van langdurige uitstroom van de plas;
- maximale effecten van de langdurige uitstroom variëren tussen de 4.450 meter en 7.767 meter. Deze langdurige uitstroom varieert tussen de 14 uur (bij 8" leiding, weertype D5) en 57 uur (bij 24", weertype F1.5);
- de lengte van de segmenten heeft nauwelijks invloed op de maximale langdurige plas, en de aandachtsgebieden, wel op de PR 10^{-6} contouren en 1 % letaliteitsafstanden (korte segmenten, kleinere afstanden).

CONCLUSIE

In paragraaf 2.2 is de hoofdvraag van het onderzoek beschreven als volgt:

Wat zijn de risico's van ongevalsscenario's (leidingbreuk) bij ammoniaktransport door buisleidingen en hoe kan worden bijgedragen aan de beheersbaarheid van deze ongevalsscenario's?

Deze vraag wordt beantwoord aan de hand van de volgende deelvragen:

- *wat is de maximale hoeveelheid ammoniak die kan vrijkomen waarbij maatschappelijke ontwrichting niet optreedt?*
- *welke leidingsspecificaties zijn benodigd om te zorgen dat het maximaal acceptabele effect van het vrijkomen van ammoniak uit buisleidingen niet wordt overschreden?*
- *wat kan worden gezien als 'veilig genoeg' in het kader van het risico op ongevalsscenario's?*
- *welke configuraties en samenstellingen van leidingen kunnen voldoen aan een optimale veiligheid in relatie tot de ruimtelijke omgeving?*

De volgende stappen zijn doorlopen in het onderzoek om de deelvragen te beantwoorden:

- 1 het in kaart brengen van huidige ontwerpkeuzes, ongewenste scenario's, risico's en sets van maatregelen van leidingbreuken. Hiervoor wordt tevens de modelleerwijze middels module D van het Bevb aangewend;
- 2 het analyseren van leemtes in de huidige modelleerwijze. Daarnaast worden potentiële verbetermogelijkheden voorgesteld. Hiervoor wordt uitgezocht tot welke hoeveelheid ammoniak het huidige rekenmodel kan rekenen. Tevens wordt gekeken naar een potentieel model waarmee grote hoeveelheden uitstroom goed kunnen worden gemodelleerd;
- 3 het voorstellen van maatregelen om ongewenste scenario's te beheersen. Dit kan bijvoorbeeld in het kader zijn van uitstroomhoeveelheid en -duur;
- 4 het waar mogelijk kwantitatief modelleren van maatregelen, en de technische haalbaarheid en de impact op de veiligheid van deze maatregelen worden onderbouwd. Hierbij wordt verder gekeken dan de technische maatregelen die tot nu toe gebruikelijk zijn in de buisleiding branche. Verder wordt rekening gehouden met de geprojecteerde doorzet van ammoniak in Nederland, omdat dit mogelijk consequenties heeft voor de haalbaarheid van buisleidingconfiguratie.

Niet op alle vragen hebben we sluitende antwoorden kunnen geven, want er zijn nog leemtes die we hebben benoemd in dit rapport. Bepaalde bevindingen kunnen dus andere effecten op uitkomsten hebben bij andere uitgangspunten, inzichten of rekenmethodes.

In onderstaande paragraaf wordt ingegaan op de opgestelde deelvragen. Vervolgens wordt de hoofdvraag in hoeverre dat mogelijk is zo concreet mogelijk beantwoord middels de bevindingen. Daarbij worden de risico's van de mogelijke ongevalsscenario's beschreven en worden aanbevelingen gedaan van specificaties voor leidingontwerpen en mitigerende maatregelen om deze ongevalsscenario's te beheersen tot een maatschappelijk verantwoord risico. Verschillende termen zoals maatschappelijke ontwrichting, acceptabel effect en veilig genoeg zijn daarbij moeilijk kwantificeerbaar. Er is daarom in dit rapport invulling gegeven aan deze uitdrukkingen door ze zoveel mogelijk vanuit het kader van externe veiligheid onder de Nederlandse wetgeving te onderbouwen.

Maatschappelijke aanvaardbaarheid

Het definiëren van de maximale hoeveelheid ammoniak die kan vrijkomen en deze te koppelen aan maatschappelijke ontwrichting is moeilijk te concretiseren.

Maatschappelijke ontwrichting duidt, zoals in eerdere paragrafen beschreven, op het veroorzaken van grote gezondheidsrisico's en belemmeringen voor burgers in de omgeving (bijv. afsluiten van wegen en ontruimen van getroffen gebieden). Dit is een definitie die niet gekwantificeerd is. Het groepsrisico is een maatstaaf die mede gebruikt kan worden om maatschappelijke ontwrichting kwantificeerbaar te maken. Het groepsrisico spitst zich toe op de kans per jaar dat grote aantallen personen komen te overlijden als direct gevolg van een ongewoon voorval waarbij gevaarlijke stoffen zijn betrokken en geeft daarmee meer informatie over de mogelijke omvang van een ongewenst voorval.

Echter is het groepsrisico in de smalle betekenis van het woord gelimiteerd tot het berekenen van de kans op een aantal personen dat direct komt te overlijden. Hier is geen rekening gehouden met 1) gewonden 2) indirecte overlijdens 3) schade aan gebouwen en omgeving 4) leefbaarheid van een gebied 5) de gezondheidseffecten bij langdurige blootstelling. Daarnaast zijn de scenario's in de berekening met het voorgeschreven rekenprogramma Safeti-NL beperkt tot een duur van maximaal 1800 seconden. Een langere duur kan door de gewone gebruiker van het rekenprogramma niet worden ingesteld. Voor incidenten met ammoniak buisleidingen zou het groepsrisico als waarde voor maatschappelijke ontwrichting moeten worden aangevuld met andere gegevens, omdat een uitstroombesluit bij een breuk veel langer dan 1800 seconden duurt en het gebied dat belast wordt groot is en voor lange tijd niet leefbaar is. Onder de Omgevingswet, die sinds januari 2024 van kracht is, wordt de beschouwing van het groepsrisico gekoppeld aan de gebieden waar mensen binnenshuis, zonder aanvullende maatregelen, onvoldoende beschermd kunnen zijn tegen de gevolgen van een ongeval met gevaarlijke stoffen. Dit zijn de zogenaamde aandachtsgebieden. Deze aandachtsgebieden geven meer mogelijkheden om het groepsrisico breder te beschouwen.

Binnen dit project zijn gifwolkaandachtsgebieden bepaald voor verschillende leidingvariëaties om inzicht te geven in de mogelijke omvang van vrijkomen van ammoniak bij een breuk van de leiding. Uit de resultaten kan geconcludeerd worden dat voor zowel grote als kleine leidingdiameters er aandachtsgebieden bestaan die variëren van 1900 m tot 7500 m. De grootte van het aandachtsgebied neemt daarbij af bij een kleinere leidingdiameter en het inblokken van de leiding. De lengte van de inbloksegmenten zelf heeft daarbij nauwelijks invloed op de aandachtsgebieden. Hieruit volgt dat wanneer maatschappelijke ontwrichting gekoppeld wordt aan aandachtsgebieden kleinere leidingdiameters en kleinere leidingsegmenten maatschappelijke ontwrichting zouden terugdringen. Ook aandachtsgebieden hebben tekortkoming voor wat betreft de beoordeling van maatschappelijke ontwrichting. De belangrijkste is dat ook hier de berekende scenario's beperkt zijn tot een duur van 1.800 seconden, terwijl, zoals eerder gezegd, een uitstroombesluit bij een breuk veel langer dan 1.800 seconden duurt. Ook het getroffen gebied is dan groter dan de berekende aandachtsgebieden. Dit maakt een grote ammoniakleiding bijzonder in vergelijking met veel andere risicobronnen, waar vaak binnen 1.800 seconden de inhoud wel al uitgestroomd, verdampt, verbrand, geëxplodeerd of dermate beperkt is dat de directe effecten enorm zijn afgenomen. Vandaar dat naast de aandachtsgebieden ook onderzocht is hoelang ammoniak blijft uitstromen uit zowel de leiding als de plas die vervolgens ontstaat en hoe groot dat gebied is. Hieruit komt naar voren dat het tot dagen kan duren voordat een plas is uitgestroomd (zie par. 7.2.5). Bij deze bepaling is echter geen rekening gehouden met de invloed van thermodynamica op de verspreiding. De invloed van effecten zoals afkoeling op bodemniveau op de duur en uitdamping van de ammoniakplas kunnen verder worden onderzocht om de uitstroombuur zo accuraat mogelijk te bepalen.

Het gevolg van een langdurige uitstroom is dat in een gebied van meerdere kilometers (variërend van 4.450 m bij een 8' leiding tot 7767 m bij een 36' leiding) rondom de breuk mensen geëvacueerd moeten worden en dat het gebied meerdere dagen niet of beperkt toegankelijk is. Het beperken van de grootte van dit gebied zal de beheersbaarheid van een ongevalsscenario vergroten. Het inzetten van mitigerende maatregelen kan de noodzaak voor evacuatie terugdringen. Hier wordt verder op ingegaan in onderstaande paragraaf.

Leidingspecificaties

In het kader van externe veiligheid moet het plaatsgebonden risico in acht worden genomen. Dit is de kans op overlijden van een onbeschermd en continu aanwezig persoon buiten de begrenzing van de locatie waar een activiteit wordt verricht (in dit geval ammoniaktransport) als rechtstreeks gevolg van een ongewoon voorval veroorzaakt door die activiteit.

Dit houdt in dat (beperkt) kwetsbare gebouwen en locaties en zeer kwetsbare gebouwen niet binnen een bepaalde afstand mogen komen te liggen van de buisleidingen waar ammoniak doorheen zal stromen. Voor deze afstand geldt een PR10⁻⁶-contour als grenswaarde voor (zeer) kwetsbare gebouwen en locaties en als standaardwaarde voor beperkt kwetsbare gebouwen en locaties. De PR10⁻⁶-contour geeft de locaties waar een kans van overlijden van 1 op de miljoen per jaar is berekend.

Voor de verschillende leidingvarianties zijn PR-contouren bepaald in het geval van een breuk of lek van de leidingen. Hiervoor is gekeken naar enkelwandige en dubbelwandige leidingen. Ook is voor elke diametervariatie gerekend met een segmentenlengte van 1.000 m en van 5.000 m. Verder is de parallelle plaatsing van twee leidingen (domino-effect) vergeleken met de plaatsing van een enkele leiding en is het effect en de haalbaarheid van het omgeven van de leidingen met betonplaten onderzocht.

Uit de resultaten bleek dat voor enkelwandige leidingen voor alle diametervariaties de maximale PR waarde net boven de 1×10^{-6} ligt. Zoals bij het bepalen van de aandachtsgebieden geldt ook voor de PR10⁻⁶-contour dat deze afneemt naarmate de leidingdiameter kleiner wordt. Ook geldt dat een kleinere segmentlengte resulteert in een kleinere PR10⁻⁶-contour. Voor dubbelwandige leidingen geldt dat de PR waarden voor elke diametervariatie net onder de 1×10^{-6} ligt. Een dubbelwandige leiding kan er echter toe leiden dat er geen PR10⁻⁶-contour meer aanwezig is. Dit geldt bijvoorbeeld voor kleinere leidingdiameters van 8 inch of bij een diameter van 24 inch met een relatief korte segmentlengte. Dubbelwandige leidingen hebben echter nadelen qua onderhoudbaar en kosten, waardoor ze nog onduidelijke risico's introduceren. Het bedekken van de leiding met betonplaten geeft volgens de berekeningen een lagere maximale PR10⁻⁶ waarde dan wanneer er geen betonplaten aanwezig zijn. Het verschil is echter relatief klein en er kan geconcludeerd worden dat het onrealistisch (duur) is om een leidingtracé van enkele honderden kilometers te bedekken met deze platen. Daarom is het realistischer om deze maatregel toe te passen voor kortere secties waar het noodzaak is om het PR te verkleinen, bijvoorbeeld in een omgeving met een hoge populatiedichtheid. Daarvoor moet nader onderzocht worden waar de gebieden liggen op het beoogde leidingtraject waarvoor deze maatregel noodzakelijk geacht wordt. In het kader van het domino-effect blijkt dat de faalkans twee keer zo groot is bij een parallelle plaatsing van twee leidingen als wanneer één leiding wordt geplaast. Echter is het effect van een breuk bij een parallelle plaatsing van twee leidingen kleiner, omdat bij een breuk of lek van één van de twee leidingen minder ammoniak vrijkomt dan bij één leiding met eenzelfde hoeveelheid ammoniak. Voor het domino-effect moet dus de afweging worden gemaakt tussen aan de ene kant de faalkans en aan de andere kant de PR afstand. In de regelgeving en normering wordt niet standaard naar domino-effecten gekeken. In dit onderzoek hebben we hier wel naar gekeken, omdat het meer inzicht geeft in de risico's.

Mitigerende maatregelen

In dit rapport is gekeken naar verschillende faaloorzaken die bijdragen aan de kans op een breuk of lek van een leiding. Daaruit bleek dat de faaloorzaak 'beschadiging door derden' het meest bijdraagt aan deze kans, gevolgd door 'mechanische schade', 'inwendige en uitwendige corrosie', 'natuurlijke oorzaken' en 'operationele oorzaken'.

Ook is gekeken naar verschillende mitigerende maatregelen die de faaloorzaken kunnen inperken. Aan deze maatregelen kan vervolgens een reductiefactor worden gekoppeld. Mitigerende maatregelen zoals het verbieden van graven, het toepassen van ILL inspectie, kathodische bescherming, het gebruik van niet-corrosief materiaal en het uitsluiten van natuurlijke oorzaken kunnen elk resulteren in een faalkansreductie. Daarbij geldt dat bij het aanleggen van dubbelwandige leidingen corrosie ook geen probleem meer vormt waardoor dit niet meer kan resulteren in falen van de buisleiding volgens de rekenmethodiek. Dubbelwandige leidingen hebben echter volgens leden van de werkgroep andere nadelen. Zo zouden de afsluiters mogelijk lek- en storingsgevoeliger zijn.

Voor het bepalen van de PR10⁻⁶-contour zoals beschreven in voorgaande paragraaf zijn deze reductiefactoren tevens toegepast. Uit de resultaten blijkt dat bij het toepassen van de mitigerende maatregelen weliswaar resulteert in een reductie, maar dat voor alle leidingen alsnog een 1 x 10⁻⁶-contour bestaat. Uit de resultaten blijkt ook dat de maximale PR10⁻⁶-contour groter is zonder betonnen platen, maar dat de verschillen relatief klein zijn. Een extra (kleine) afname van de faalkansen van de leidingen zou de PR10⁻⁶-contour echter kunnen doen verdwijnen.

In het kader van mitigerende maatregelen worden leidingen idealiter dus aangelegd met relatief kleine diameters, korte inbloksegmenten en geheel bedekt met betonnen platen. Met de verwachte doorstroom van ammoniak per jaar zijn deze leidingspecificaties waarschijnlijk niet realistisch. Er zou door ontwikkelaars gekozen kunnen worden voor grotere diameters om een bepaalde doorstroom te behalen, maar de ontwikkeling van doorstroomvolumes is op dit moment nog lastig in te schatten. Ook is het aanleggen van isolatiekleppen op elke kilometer leiding kosten- en onderhoudstechnisch uitdagend en vraagt nader onderzoek. Daarnaast is het aanleggen van betonnen platen te duur om over het gehele leidingtracé te realiseren en zal dit enkel voor kortere secties gedaan worden waar het nodig of gewenst is het plaatsgebonden risico te verkleinen, bijvoorbeeld in de omgeving van grote groepen personen en/of de bebouwde kom. Het is tevens belangrijk om betrouwbare inspectiemethoden periodiek toe te passen, zoals het gebruik van pigging. Het gebruik van accurate detectiemethoden, zoals een massabalanssysteem of drukverschilmeters over afsluiters heen, kan tevens bijdragen aan het waarborgen van de veiligheid.

Maatregelen na vrijkomen

Omdat de kans op falen van een leiding nooit nul is, is het belangrijk om preventieve en repressieve maatregelen in beeld te hebben die kunnen worden toegepast om effecten te beperken na het ontstaan van een breuk of lek. Om veiligheid rondom het beoogde buisleidingtraject zo efficiënt mogelijk te kunnen waarborgen, kan in eerste instantie een overzicht van maatregelen die kunnen worden ingezet na het vrijkomen van ammoniak worden opgesteld. Hiervoor is aanvullend onderzoek benodigd. Deze maatregelen kunnen vervolgens bijvoorbeeld weergegeven worden in een overzichtelijk document en gedeeld worden met de inwoners die rond het beoogde traject wonen. Voor het transport van ammoniak van een dergelijke omvang is het namelijk van belang dat er een samenwerking plaatsvindt tussen inwoners en hulpdiensten om zo efficiënt mogelijk de veiligheid te kunnen borgen. Daarom kan het van belang zijn dat inwoners op de hoogte zijn van te nemen acties bij een ongeval met ammoniak. De hoeveelheid en/of het soort maatregelen kunnen daarnaast gerelateerd worden aan verschillende parameters, zoals de hoeveelheid personen die aanwezig is op een locatie of de mate van zelfredzaamheid van deze personen op die locatie. De verspreiding van ammoniak is daarnaast afhankelijk van de weerstabiliteit en de duur van het uitdampen van de vrijgekomen ammoniakplas verschilt gedurende de dag of nacht. Zoals eerder benoemd, dient hiervoor ook nader onderzoek uitgevoerd te worden naar de relatie tussen de uitstroomduur en thermodynamische effecten. Op die manier kan per leidingtracé in beeld worden gebracht wat de meest effectieve maatregelen zijn voor het gebied waar dit tracé doorheen loopt. Voor het optreden van hulpdiensten om een ammoniaklek en uitstroom te bestrijden is tevens aanvullend onderzoek nodig. Duidelijk is wel dat blussen of een waterscherm vaak geen soelaas biedt en de situatie zelfs kan verergeren. De plas is te groot om af te dekken, zie ook paragraaf 3.4. Hoe hulpdiensten het meest efficiënt kunnen optreden en samenwerken met omwonenden dient nader te worden onderzocht.

Het is in het geval van het transport van een toxische stof als ammoniak op de in dit onderzoek geschetste schaal belangrijk dat aan de voorkant bekend is wat een ongeval van een bepaalde omvang betekent voor de omgeving en op welke manier het beste geacteerd kan worden om de negatieve gevolgen voor de gezondheid, de leefbaarheid van een gebied, etc. te beperken. Zo is het van belang dat wordt vastgesteld bij welke hoeveelheden vrijgekomen ammoniak direct geëvacueerd moet worden en dat dit duidelijk gecommuniceerd wordt naar de omgeving.

Bijlage(n)

BIJLAGE: PROJECTORGANISATIE

Opdrachtgever: Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat.

Opdrachtnemer: Witteveen+Bos en AVIV.

Samenstelling kerngroep:

- V.A. van de Pas	Min. van IenW	Opdrachtgever;
- R.J.M. Scheres	AVIV	Projectleider;
- A.M. op den Dries	AVIV	Projectspecialist;
- K. Starostenko	AVIV	Projectspecialist;
- V. Tran	Witteveen+Bos	Projectspecialist;
- C. de Vos	Witteveen+Bos	Projectspecialist.

Werkgroep:

- C.J. Theune	Min. van EZK;
- B. Koppens	RRP;
- E. Bloem	RIVM;
- K. Winters	Velin;
- M. van den Berg	VR-RR;
- R. Coster	Rosen-Group;
- S. Post	DCMR;
- Y. Geertzema	RIVM;
- C. Deij	OCI Global;
- E.M. Algera	Gasunie;
- G. Laheij	RIVM.

De leden van de werkgroep dragen geen verantwoordelijkheid voor de inhoud van dit rapport.



BIJLAGE: INPUT EN RESULTATEN LEIDINGSPECIFICATIES

Tabel II.1 Resultaten verschillende variaties leidingspecificaties, berekend met Safeti_NL versie 8.8

Diameter leiding [in]	Diameter leiding [mm]	Lengte segment [m]	Maximale afstand PR 1E-6 [m]	Aandachts- gebied gifwolk [m]	1 % letaliteit	Max LBW 1495 ppm [F1,5]	Max AGW 272 ppm [F1,5]	Max VRW 29 ppm[F1,5]	Maximale langdurige effect plas [m] [F1,5]	Opmerking
8	203,2	1000	88,4	1909	551	1163	3596	13400	4450	
8	203,2	5000	124	1899	606	2026	7332	26377	4893	
12	304,8	1000	148	3020	872	1359	3971	15905	5322	
12	304,8	5000	189	3020	1882	3071	10384	37905	5548	
24	609,6	1000	214	6187	1319	2520	6584	28066	7039	
24	609,6	1000	224	6187	1319	2520	6584	28066	7039	geen betonnen platen
24	609,6	5000	265	6172	3340	5134	17625	61885	6720	
36	914	1000	248	7468	2014	2597	8907	37920	7767	

Diameter leiding [in]	Diameter leiding [mm]	Lengte segment [m]	Maximale afstand PR 1E-6 [m]	Aandachts-gebied gifwolk [m]	1 % letaliteit	Max LBW 1495 ppm [F1,5]	Max AGW 272 ppm [F1,5]	Max VRW 29 ppm[F1,5]	Maximale langdurige effect plas [m] [F1,5]	Opmerking
2x 12 enkelwandig	2x 304,8	1000	254	3020	872	1359	3971	15905	4788	
2x 12 dubbelwandig	2x 304,8	1000	139	3020	872	1359	3971	15905	4788	
1x 8 dubbelwandig	203.2	1000	Geen	1909	551	1163	3596	13400	4450	
1x 8 dubbelwandig	203.2	5000	Geen	1899	606	2026	7332	26377	4893	
1x 24 dubbelwandig	609.6	1000	Geen	6195	1330	5134	17625	61885	7039	
1x 24 dubbelwandig	609.6	5000	269,5	6168	3340	5137	17625	61885	6720	
1x 36 dubbelwandig	914	5000	274	7506	3930	5648	20102	64452	7446	

