



## Kennisnotitie

# Effectafstanden buisleidingbreuk ammoniak

## Inleiding

Ammoniak wordt gezien als een veelbelovende waterstofdrager voor de energietransitie. Er lopen diverse onderzoeken naar de mogelijkheden van grootschalig ammoniak transport per buisleiding vanuit zeehavens naar het achterland. De giftigheid van ammoniak maakt grootschalig transport tegelijkertijd omstreden. Recent is de kabinetsvisie waterstofdragers behandeld in de Tweede Kamer (1). Hieruit volgt dat gebruik of conversie van ammoniak zoveel mogelijk in de zeehavens moet plaatsvinden. Ook volgt uit de visie dat grootschalig transport van ammoniak richting het achterland bij voorkeur via buisleiding of binnenvaart moet plaatsvinden.

In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat heeft het RIVM onderzoek gedaan naar de effecten die kunnen optreden bij een breuk van een ondergrondse buisleiding. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van het softwarepakket Safeti-NL, waarbij ook het effect van verschillende parameters op de grootte van de effecten is gemodelleerd. De resultaten kunnen in andere onderzoeken gebruikt worden om bijvoorbeeld het handelingsperspectief of de beheersbaarheid te onderzoeken.

De kennisnotitie is als volgt opgebouwd. Eerst wordt relevante achtergrond informatie van een leidingbreuk beschreven. Hierna volgt een algemene beschrijving van de modellering, bestaande uit twee hoofdsenario's, en wordt bepaald welke type afstanden relevant zijn om over te rapporteren. Vervolgens worden de resultaten per hoofdsenario beschreven inclusief de gemaakte aannames die nodig zijn voor de berekening. Tenslotte volgt een conclusie en een bijlage met tabellen waarin de resultaten zijn weergegeven.

## Achtergrond modellering buisleidingbreuk

Bij een breuk van een ondergrondse ammoniakbuisleiding stroomt ammoniak uit. Een gedeelte daarvan vormt een gifwolk die afdrijft, maar een groot gedeelte regent uit en vormt een plas, die vervolgens verdampt en bijdraagt aan de gifwolk. In eerste instantie draagt vooral de uitstroom uit de buisleiding bij aan de gifwolk, maar naarmate het scenario vordert wordt de uitstroming minder en de relatieve bijdrage van de plasverdamping steeds groter. Wanneer de uitstroom gestopt is, draagt alleen de plasverdamping nog bij aan de gifwolk.

## Beschrijving uitstroom

De modellering van een uitstroom vanuit een ammoniakbuisleiding vindt plaats in vier fases (2):

1. Een bijna directe drukverlaging van de operationele druk (bijvoorbeeld 80 of 100 bar) naar ongeveer 6 bar.
2. Een *superheated state*, waarin de temperatuur van de vloeistof boven het kookpunt ligt, maar bij de heersende druk niet kan verdampen. Door de druk in buisleiding stroomt de vloeistof uit. Zodra het vrijkomt valt de druk terug naar atmosferische druk en verdampt een gedeelte onmiddellijk, de zogenaamde *flash expansion*.

RIVM

A. van Leeuwenhoeklaan 9  
3721 MA Bilthoven  
Postbus 1  
3720 BA Bilthoven  
www.rivm.nl

T 088 689 89 89

### Auteurs:

Elin Bloem,  
Yannick Geertzema

### Centrum:

Veiligheid

### Contact:

Elin Bloem  
elin.bloem@rivm.nl

### Kenmerk:

KN-2025-0022

### DOI:

10.21945/RIVM-KN-2025-0022

### Datum:

3 juni 2025

3. De kokende fase. In deze fase verdampt de ammoniak in de buisleiding door de toegevoegde warmte uit de grond. Dit zorgt voor een overdruk in de buisleiding waardoor er een uitstroming in de gas en vloeistoffase blijft bestaan.
4. Atmosferische uitstroom. Als de druk in de buisleiding gelijk is aan de druk in de buitenlucht stopt Safeti-NL met het modelleren van de uitstroom.

In de modellering in Safeti-NL draagt de uitstroom tijdens fase 2 en 3 bij aan de gifwolk. Vanaf fase 2 ontstaat daarnaast een plas die bijdraagt aan de gifwolk.

De dynamiek van de directe drukverlaging, in de eerste fase, wordt in Safeti-NL niet gemodelleerd. Deze aanname kan redelijkerwijs gedaan worden als een vloeistof niet compressibel is. Ammoniak is onder de kritische druk (113 bar) en temperatuur (132,1 °C) niet compressibel. In de berekeningen van deze notitie is de werkdruk 100 bar en de temperatuur 10 °C en is ammoniak niet compressibel. De invloed van het niet meenemen van de eerste fase is daarmee beperkt. De tweede fase start bij de dampdruk, voor ammoniak bij 10 °C ongeveer 6 bar. In de modellering wordt deze druk gerealiseerd door voor de start van de modellering de druk te verlagen van de werkdruk naar de dampdruk.

De tweede en derde fase worden in Safeti-NL wel gemodelleerd. De tweede fase is uitgebreid gevalideerd. De derde fase is ook gevalideerd, maar gaat (net als de vierde fase) uit van een horizontaal profiel van de buisleiding en uitstroom boven een eventuele vloeistofspiegel. Of dit daadwerkelijk het geval is hangt af van de lokale situatie en wordt in QRA's in Nederland niet meegenomen. Doordat Safeti-NL uitgaat van een horizontaal lopende buisleiding én het een ondergrondse buisleiding betreft, is er geen uitstroom tijdens de vierde fase. De vierde fase wordt daarom niet gemodelleerd.

Tijdens de tweede en derde fase is er in de berekeningen sprake van plasvorming. Enerzijds doordat er vloeibaar ammoniak uit de buisleiding stroomt en anderzijds door het uitregenen van ammoniak druppels uit de wolk. Ongeveer de helft tot twee derde van de ammoniak in de buisleiding komt in de plas terecht, afhankelijk van onder andere de weersomstandigheden.

### **Plasvorming**

Bij plasvorming gaat Safeti-NL standaard uit van een platte, cirkelvormige plas, dat wil zeggen een plas van 5-20 mm diep (afhankelijk van de ondergrond). In het geval van een ondergrondse buisleidingbreuk kan door het uitregenen van ammoniak de krater ook gevuld worden met ammoniak. Een plas in een krater zal een grotere diepte en kleiner oppervlakte hebben dan een plas zonder krater. Om verwarring met het kratermodel voor de uitstroming te voorkomen zal de plas in de krater als "diepe plas" aangeduid worden. Omdat de plasverdamping lineair schaalst met de oppervlakte van de plas heeft dit een groot effect op de hoeveelheid ammoniak die per seconde verdampt. Bij een diepe plas zal de plasverdamping lager zijn dan een platte plas en daarmee een kleiner effectgebied hebben maar een langere tijdsduur. In dit memo worden de effecten van verschillende plassen beschouwd.

### **Ondergrondse buisleiding**

De resultaten van dit onderzoek gaan enkel over een breuk van een ondergrondse buisleiding. Een krater zorgt voor een andere dynamiek in de uitstroom waardoor de pluim minder stijgt en meer vloeistof in de plas terecht komt. Hierdoor zijn de effectafstanden groter en duurt het scenario langer. Berekeningen aan ondergrondse buisleidingen zonder kratermodel geven een grote onderschatting van de effecten en

risico's. Het gebruik van het kratermodel sluit aan bij de laatste wetenschappelijke inzichten en zorgt voor de beste inschatting van de effecten en risico's van de uitstroom van een ondergrondse buisleiding (3).

### **Algemene beschrijving van de berekeningen**

Voor de berekeningen in dit onderzoek is gebruik gemaakt van Safeti-NL 8.8. In dit onderzoek zijn berekeningen gedaan aan breuken. DNV werkt aan een nieuw model voor lekken van buisleidingen. Dit model is begin 2025 opgenomen in de commerciële versie van Safeti. In afwachting van dit model zijn er geen berekeningen gedaan voor lekken.

### ***Splitsen breukscenario en plasverdampingsscenario***

In dit onderzoek is het bepalen van de effectafstanden opgesplitst in twee afzonderlijke berekeningen:

1. Breukscenario: de effectafstanden van de breuk en de direct daarop volgende plasverdamping;
2. Plasverdampingsscenario: de effectafstanden van de plasverdamping, voor zowel een platte als diepe plas.

De plasverdamping begint tijdens de tweede en derde fase van de uitstroom. Door het breukscenario los te beschouwen van het plasverdampingsscenario wordt een deel van de ammoniak bij beide berekeningen meegenomen. Desalniettemin is de keuze gemaakt om de berekening te splitsen. Allereerst omdat de effectafstanden een orde van grootte anders zijn. In het volledige scenario worden de effectafstanden gedomineerd door de initiële wolk als gevolg van de buisleidingbreuk. De effecten ten gevolge van de plasverdamping zijn dan niet (duidelijk) zichtbaar. Tevens lopen de tijdschalen van de twee berekeningen ver uiteen. Zo wordt de breuk van de buisleiding gemodelleerd voor 30 minuten, de plasverdamping voor 24 uur.

### ***Selectie scenario's en scenarioduur***

Om de bandbreedte van effectafstanden voor het breukscenario te berekenen is met verschillende buisleidingdiameters- en lengtes gerekend. De scenarioduur was 30 minuten om aan te sluiten bij het Rekenvoorschrift omgevingsveiligheid (4). Voor de effecten van het plasverdampingsscenario is de massa ammoniak in de plas gevarieerd. Deze massa is afhankelijk van de diameter van de buisleiding, de afstand tussen afsluiters, en het percentage van de uitgestroomde ammoniak dat in de plas terecht komt. Hierdoor kunnen buisleidingen met verschillende lengtes en diameter een plas met vergelijkbare massa hebben. Onderscheid maken op basis van de massa van de plas is inzichtelijker. De massa in de plas kan worden bepaald door voor een specifieke buisleiding de uitstroom te berekenen. Naast de variatie in massa is ook de gevoeligheid voor weertypen en ondergrond onderzocht. Er is gekozen voor een scenarioduur van 24 uur omdat de effecten van de plasverdamping, bijvoorbeeld het afkoelen van de plas, zich over een langere tijd ontwikkelen.

### ***Selectie effectafstanden***

In de resultaten worden de afstanden tot bepaalde concentraties, bepaalde niveaus van letaliteit, en het aandachtsgebied weergegeven. De limiet voor dispersieberekeningen in Safeti-NL is 50 km omdat grotere afstanden als onbetrouwbaar worden gezien. Voor het bepalen van de effectafstanden zijn interventiewaarden, de 'acute-duration Minimal Risk Level' (MRL), en de 'Level of distinct odour awareness' (LOA) gebruikt.

Interventiewaarden voor incidentbestrijding bestaan uit de voorlichtingsrichtwaarde (VRW), de alarmeringsgrens waarde (AGW) en de levensbedreigende waarde (LBW) en

zijn afgeleid voor maximaal 8 uur. Tabel 1 laat de interventiewaarden voor incidentbestrijding voor ammoniak zien (5).

*Tabel 1: Interventiewaarden voor incidentbestrijding voor ammoniak, in ppm berekend voor 9°C.*

| (ppm)      | 10 min | 30 min | 1 uur | 2 uur | 4 uur | 8 uur |
|------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| <b>VRW</b> | 29     | 29     | 29    | 29    | 29    | 29    |
| <b>AGW</b> | 272    | 272    | 190   | 135   | 135   | 135   |
| <b>LBW</b> | 2583   | 1495   | 1060  | 748   | 530   | 381   |

Bij het plasverdampingsscenario is volgens berekeningen sprake van een blootstelling tot 15 dagen, veel langer dan waarvoor interventiewaarden zijn afgeleid. De 'acute-duration Minimal Risk Level' (MRL) van ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) uit 2004 is een alternatief voor de interventiewaarden voor incidentbestrijding. Dat is een gezondheidskundige grenswaarde voor blootstelling van de algemene bevolking tot 14 dagen en bedraagt 1,7 ppm (6). Verondersteld wordt dat herhaalde blootstelling aan deze gezondheidskundige grenswaarde niet tot gezondheidsnadelige effecten zal leiden. Er is niet onderzocht of er nieuwe inzichten zijn.

De 'level of distinct odour awareness' (LOA) is een schatting van de concentratie in lucht waarboven meer dan de helft van de blootgestelde bevolking een geur duidelijk waarneemt. De LOA is dus geen geurdrempel maar geeft een indicatie op welke afstand burgers mogelijk gealarmeerd worden door de geur van ammoniak. Het RIVM heeft de LOA voor ammoniak bepaald op 2,3 ppm (5), welke ruim een factor 10 lager is dan de VRW.

Voor de berekeningen van het breukscenario zijn een reeks verschillende interventiewaarden geselecteerd: 29 ppm (VRW), 272 ppm (AGW 10 en 30 minuten), 1060 ppm (LBW 60 minuten), 1495 ppm (LBW 30 minuten), en 2583 ppm (LBW 10 minuten). Bij het breukscenario is geen sprake van langdurige blootstelling en de afstanden tot de LOA zijn groter dan de dispersielimiet. Beide waarden zijn daarom niet meegenomen.

Bij de berekeningen van het plasverdampingsscenario is gekozen om de afstanden tot 1,7 ppm (acute-duration MRL), 29 ppm (VRW), en 135 ppm (AGW 2-8 uur) te berekenen. 2,3 ppm (LOA) is niet meegenomen omdat de berekende afstanden vergelijkbaar zullen zijn met de afstanden tot 1,7 ppm.

### **Effectafstanden tot letaliteit en aandachtsgebieden**

De effectafstand tot de interventiewaarden geven een goede indicatie van de gevaren, echter hebben deze ook beperkingen. De berekende afstand is de maximale afstand waarbij deze waarden zijn bereikt. De resultaten zijn daarmee een momentopname en geven geen inzicht in het verloop van het scenario en de blootstellingsduur. Voor gezondheidseffecten is naast de concentratie vaak ook de blootstellingsduur van belang. De combinatie van concentratie en blootstelling wordt de dosis genoemd. In de buitenlucht, waar mensen direct in de gifwolk staan, kunnen probitrelaties<sup>1</sup> worden gebruikt om de letaliteit op basis van zowel de concentratie als blootstellingsduur te berekenen. De afstanden tot 1, 3, 10, en 99% letaliteit (outdoors) worden weergegeven.

<sup>1</sup> Een probitrelatie geeft het verband weer tussen de concentratie van een stof in de lucht, de blootstellingsduur en het effect op de mens. Met een probitrelatie voor een giftige stof kan voor iedere willekeurige combinatie van concentratie en blootstellingsduur het percentage mensen worden geschat dat komt te overlijden.

Op verzoek van het ministerie van IenW wordt de voorgeschreven probitrelatie uit 2011 gebruikt.<sup>2</sup> (7) In 2017 is de probitrelatie volgens een betere methode afgeleid. Het RIVM beveelt aan de probitrelatie met het meest actuele wetenschappelijke inzicht te gebruiken. De afstand tot de outdoor letaliteit met de nieuwe probitwaarde is gemiddeld 30% korter.

In gebouwen stijgt de concentratie van ammoniak door beperkte ventilatie minder snel dan buiten. Gifwolkaandachtsgebieden op basis van dosis (8) geven inzicht in de afstand waarop mensen in een gebouw negatieve gezondheidseffecten kunnen verwachten. De afstand tot het gifwolkaandachtsgebied op basis van dosis wordt weergegeven.

### Breukscenario

Dit scenario betreft een breuk van een ammoniak buisleiding waarbij een deel van het uitstromende ammoniak direct verdampt en een ander deel in een plas terecht komt, waarna plasverdamping zorgt voor extra toevoer van ammoniak naar de lucht.

### Parameters

Voor het modelleren van de effectafstanden bij een breuk van een ammoniakbuisleiding is aangesloten bij de parameters die ook gebruikt zijn in het onderzoek van AVIV en Witteveen+Bos naar de veiligheid van ammoniakbuisleidingen (9).

Tabel 2: De belangrijkste parameters voor het breukscenario.

| Parameter                   | Waarde                                  |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| Materiaal                   | Ammoniak (voorgeschreven probitrelatie) |
| Diameters                   | 6, 8, 10, 12, 24, 30 en 36 inch         |
| Lengte buisleiding          | 50 km                                   |
| Inbloklengte                | 1, 5, en 10 km                          |
| Weer                        | F1,5, Soesterberg                       |
| Temperatuur                 | 10 °C                                   |
| Druk                        | 100 bar                                 |
| Stroomsnelheid              | Ca 1,5 m/s                              |
| Ligging                     | Ondergronds                             |
| Bedekking                   | 1,75 meter                              |
| Tijd tot sluiten afsluiters | 65 seconden                             |
| Scenarioduur                | 1800 seconden                           |

Voor het weer wordt F1,5 gebruikt. Dit is stabiel weer met windsnelheden van rond 5 km/u. Dit weertype komt voornamelijk 's nachts voor en levert voor gifwolken de grootste effectafstanden op. In Tabel 3 staan de posities van de afsluiters en de breuk in de buisleiding.

Tabel 3: Posities van de afsluiters en de breuk in de buisleiding

| Inbloklengte | 1 <sup>e</sup> afsluiter | 2 <sup>e</sup> afsluiter | Breuk   |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------|
| 1 km         | 25 km                    | 26 km                    | 25,5 km |
| 5 km         | 25 km                    | 30 km                    | 27,5 km |
| 10 km        | 20 km                    | 30 km                    | 25 km   |

<sup>2</sup> [Ammoniak | RIVM \(A=-15,6 ppm \(minuten\), B=1 en C=2\)](#)

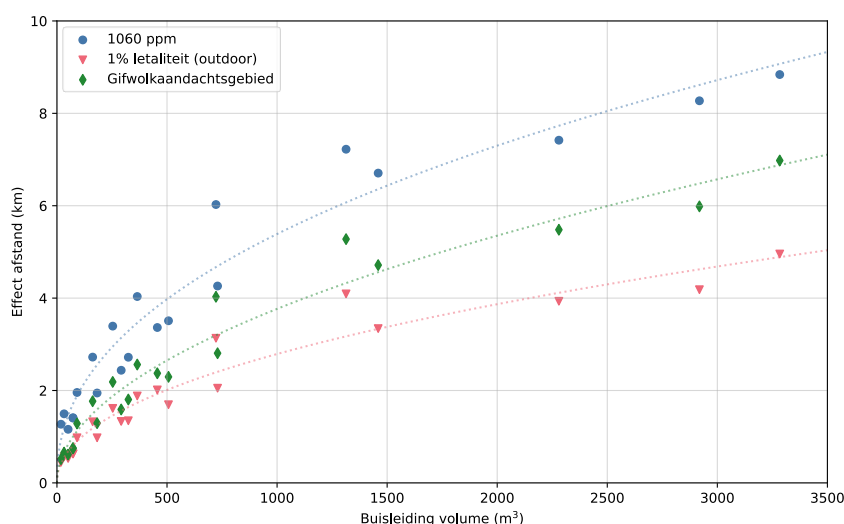
## Resultaten

In Tabel 5 in de bijlage staat een overzicht van de verschillende berekende effectafstanden afhankelijk van de parameters van de buisleidingen. Hieronder wordt een aantal trends beschreven.

### Variatie volume uitstroom

De effectafstanden worden gedomineerd door de flash expansion van de uitstroom uit de buisleiding tijdens de superheated fase. Deze fase duurt voor de 6" buisleiding voor 5 en 10 km buisleiding even lang. Daardoor zijn de effectafstanden ook ongeveer even groot. Voor buisleidingen met een grotere diameter duurt de flash expansion voor de 10 km buisleidingen langer dan voor de 5 km buisleiding. Het verschil in effectafstanden is hierdoor groter.

Figuur 1 laat de relatie tussen het volume van de buisleiding en de effectafstanden zien. Er is een duidelijke trend, maar voor een specifiek volume kunnen de effectafstanden +/- 20% verschillen. De reden voor de verschillen is niet nader onderzocht.



Figuur 1: Verschillende berekende effectafstanden van het breukscenario als functie van het volume van de buisleiding. Voor de leesbaarheid van de grafiek zijn de volumes voor de 30" en 36" 10 km buisleiding (4600 en 6600 m³) niet opgenomen in deze grafiek.

In Figuur 1 is gekozen voor 1060 ppm en 1% letaliteit omdat de berekende afstanden (in dit geval) dezelfde orde van grootte hebben als de aandachtsgebieden. De trends tussen de verschillende effecten zijn vergelijkbaar. De afstanden tot 29 ppm (VRW, het niveau waarboven gezondheidseffecten te verwachten zijn) zijn ongeveer 10 keer groter dan de afstand tot 1060 ppm (het niveau waarboven na 1 uur letale effecten te verwachten zijn). De afstand tot 2586 ppm (het niveau waarboven na 10 minuten letale effecten te verwachten zijn) is ongeveer de helft van de afstand tot 1060 ppm.

### Variatie scenarioduur

Een scenarioduur van 3600 seconden, in plaats van 1800 seconden, geeft voor buisleidingen tot en met 30 inch tussen de 1 en 10% (met een enkele uitschieter daarboven) langere afstanden op tot 29 ppm, de genoemde letaliteitswaarden, en aandachtsgebieden. De afstanden tot de overige concentraties blijven ongeveer gelijk. Voor de 36 inch buisleidingen zijn de effectafstanden wel aanzienlijk groter. Hierbij duurt de uitstroom relatief kort, maar ontstaat een veel grotere plas.

*Variatie weertype*

Bij weertype D5 is, in vergelijking met weertype F1,5, de lucht minder stabiel waardoor de ammoniak beter met de lucht mengt. Dit levert aanzienlijk kortere effectafstanden op.

*Inschatting afstand tot level of distinct odour awareness*

Zoals eerder genoemd is de LOA bepaald op 2,3 ppm. Uit de data voor de effecten van de plasverdamping (die verderop besproken worden) blijkt de afstand tot de LOA ongeveer vijf keer groter te zijn dan de afstand tot 29 ppm (en dus ongeveer 50 keer groter dan de afstand tot 1060 ppm in Figuur 1). Als deze verhouding ook geldt bij het uitstroombesnoeiingscenario dan betekent dit dat bij een breuk voor de kleinste buisleiding (6 inch, 1 km) personen tot op zo'n 55 km ammoniak kunnen ruiken en mogelijk gealarmeerd kunnen raken. Voor de grootste buisleidingen zou dit om honderden kilometers gaan. Deze afstanden zijn te groot om betrouwbaar met Safeti-NL te berekenen maar geven wel een indicatie van de schaal van een ongeval met een ammoniakbuisleiding.

**Plasverdampingsscenario**

Een gedeelte van de ammoniak zal als vloeistof uit de buisleiding stromen of uitregenen uit de gaswolk. In Safeti-NL wordt dit gemodelleerd als een platte plas. Het is echter waarschijnlijk dat de vloeistof (gedeeltelijk) in een diepe plas (i.e. krater) terecht komt. De plasverdamping voor een platte en diepe plas is heel verschillend. De snelheid van de verdamping verhoudt zich recht evenredig met het oppervlakte van de plas. Bovendien is de verdampingssnelheid afhankelijk van het type ondergrond en het weer.

In dit hoofdstuk wordt de plasverdamping berekend voor verschillende massa's ammoniak. De berekeningen worden gedaan voor zowel een platte als diepe plas. In de praktijk zal een combinatie van een platte en diepe plas ontstaan. De resultaten van de plasverdamping geven daarom de bandbreedte waarbinnen een daadwerkelijk plasverdampingsscenario zich bevindt. Naast de verschillende massa's wordt ook de gevoeligheid voor het type ondergrond en het weer onderzocht.

**Parameters**

Voor het modelleren van de effectafstanden ten gevolge van de plasverdamping is gedeeltelijk aangesloten bij de parameters die ook gebruikt zijn in het onderzoek van AVIV en Witteveen+Bos naar de veiligheid van ammoniakbuisleidingen (9). Er is uitgegaan van een atmosferische opslagtank welke in een tijdsduur van 10 seconden leegstroomt doormiddel van het lek scenario. Op deze manier wordt directe verdamping ten gevolge van de uitstroom van de tank uitgesloten en wordt enkel de plasverdamping gemodelleerd. In de paragrafen hieronder worden de belangrijkste parameters toegelicht.

*Scenarioduur*

Voor de plasverdamping is uitgegaan van een scenarioduur van 24 uur in plaats van een 1800 seconden. Daarnaast is gekozen voor een ammoniaktemperatuur van -34 °C als startpunt van de berekening. Dit komt overeen met de temperatuur tijdens de derde fase van de buisleidinguitstroom.

Bij scenario's waar de plasverdamping volgens berekeningen langer dan 24 uur duurt is de resterende massa (kg) en verdampingssnelheid (kg/s) na 24 uur gebruikt om de tijdsduur voor de verdamping te extrapoleren.

*Massa ammoniak*

Uit de berekeningen aan het breukscenario bleek dat het percentage van de uitstroom dat in de plas terecht komt, verschilt per breukscenario. Om de berekeningen onafhankelijk te maken van een specifiek scenario wordt voor het berekenen van de effectafstanden van plasverdamping uitgegaan van een massa in de plas van 50, 100, 200, en 400 ton. Om een indicatie te geven van de gekozen hoeveelheden, uitgaande van 5 km segmentlengte en een uitregenpercentage van 66%, komen de volgende leidingen en plassen ongeveer overeen: een 6 inch leiding met een 50 ton plas, 12 inch met een 200 ton plas, en 24 inch met een 1000 ton plas.

*Afmeting krater voor diepe plas*

In Safeti-NL wordt de afmeting van de krater berekend om hiermee het effect van de krater op de uitstroom uit de buisleiding te modelleren. De berekening van de krater is niet bedoeld om de plasverdamping mee te modelleren maar de afmetingen zijn wel aannemelijk. Hierom is besloten om voor dit onderzoek de afmeting van de berekende krater van het breukscenario te gebruiken als basis voor de dimensies van de krater voor het plasverdampingsscenario.

De afmeting van de krater is afhankelijk van het scenario. Voor de afmetingen van de krater zijn de uitkomsten van het breukscenario met segmentlengte 5 km in Safeti-NL geanalyseerd. De diepte van de krater was 2,1 m tot 3,3 m voor respectievelijk de 6" en 24" leiding. Het oppervlakte van de krater was 60 m<sup>2</sup> tot 168 m<sup>2</sup> voor respectievelijk de 6" en 24" leiding. Het volume van de krater – aangenomen dat de krater een rechtopstaande cilinder is – is in dezelfde orde van grootte als het volume van de vloeistoffractie van de uitgestroomde ammoniak.

De diepe plas wordt gemodelleerd als een tankput. Om ook hier de berekeningen onafhankelijk te maken van het scenario wordt voor de diepe plas/tankput een standaard diepte van 3 meter gekozen. Het oppervlakte van de diepe plas/tankput wordt zodanig gekozen dat de complete massa ammoniak in de tankput past. Dit resulteert in een oppervlakte van zo'n 25, 50, 100 en 200 m<sup>2</sup> voor respectievelijk de 50, 100, 200 en 400 ton uitstroom. Deze afmetingen komen redelijk overeen met de afmetingen van de kraterberekeningen van de buisleidingen van 6" t/m 24".

*Afmeting platte plas*

Voor de onbegrensde plas in de omgeving, ook wel platte plas, varieert de diepte afhankelijk van de gekozen ondergrond van 5 mm tot 20 mm voor respectievelijk beton en droge grond. Het oppervlakte wordt vervolgens berekend op basis van de gekozen ondergrond en het vloeistofvolume.

*Invloed van externe factoren op de verdamping en verspreiding.*

Naast de oppervlakte en diepte van de plas zijn ook enkele externe factoren welke invloed hebben op de plasverdamping en de verspreiding van de ammoniak wolk. Enkele voorbeelden hiervan zijn het oplossen van ammoniak in grondwater en het wegstromen van ammoniak in de ondergrond. Er is onderzocht welke externe factoren een sterke invloed hebben op ofwel de verdampingssnelheid ofwel de verspreiding. Uit deze analyse blijkt dat met name het type ondergrond en het weertype belangrijke factoren zijn voor de verdamping en verspreiding van ammoniak. Hierom is besloten om voor dit onderzoek enkel de externe factoren weertype en ondergrond mee te nemen.

### Ondergrond

De ondergrond heeft een sterke invloed op de plasverdamming. Grondtypen verschillen in warmte overdracht en hebben daarmee een invloed op de verdampingssnelheid. Daarnaast verschillen grondtypen in ruwheid van het terrein. Zo is droge ondergrond over het algemeen ruiger dan natte ondergrond, wat voor een vrij uitstromende plas resulteert in een dikkere plas die een kleinere oppervlakte heeft.

Bij een natte ondergrond speelt de interactie van ammoniak met water een rol. Interactie tussen water en ammoniak wordt veelal beschouwd als het versnellen van de verdamping van ammoniak. Echter, het oplossen van ammoniak in water is een endotherme reactie, daarmee onttrekt het warmte aan de omgeving. Ook zal ammonia, ammoniak opgelost in water, minder snel verdampen dan pure ammoniak. Wel is de warmteoverdracht tussen water en ammoniak hoger dan tussen grond en water. Dit is een van de zaken die is meegenomen in ondergrondtype natte ondergrond. Door het toepassen van natte ondergrond is de interactie van ammoniak met water voldoende beschouwd.

Er is voor gekozen de berekeningen voor alle massa's uit te voeren met droge grond. Daarnaast is de gevoeligheid voor de ondergrond beschouwd door de berekeningen voor de 200 ton uitstroom ook uit te voeren met natte ondergrond.

### Weertype

Het weertype heeft een sterke invloed op zowel de verdampingssnelheid als de verspreiding van de wolk. Voor toxische stoffen geldt F1,5 als het worst case weertype. Echter, gezien de berekende lange tijdsduur van de plasverdamming tot 15 dagen is een constant weertype van F1,5 niet realistisch. Gedurende het scenario zal het weer onderhevig zijn aan verandering. Het is echter niet mogelijk dit te modelleren met Safeti-NL. Hierom is ervoor gekozen de berekeningen voor alle massa's uit te voeren met gemiddelde weersomstandigheden (D5). Daarnaast is de gevoeligheid voor het weertype beschouwd door de berekeningen voor de 200 ton uitstroom ook uit te voeren met weertypen F1,5 en D9.

### Overzicht berekeningen

Samenvattend, de plasverdamming is gemodelleerd voor 50, 100, 200 en 400 ton uitstroom elk met zowel een platte als diepe plas. Al deze scenario's zijn gemodelleerd met weertype D5 en droge ondergrond. Daarnaast is de gevoeligheid voor ondergrond en weertype onderzocht door de 200 ton uitstroom ook te modelleren voor weertype D9 en F1,5 en natte ondergrond. Voor een overzicht van de berekeningen zie Tabel 4.

Tabel 4: Gemodelleerde basisscenario's met weertype D5 en droge ondergrond (linker tabel) en gevoeligheidsberekeningen bij een massa van 200 ton (rechter tabel).

| Basisscenario's |         | Gevoeligheidsberekeningen |          |            |
|-----------------|---------|---------------------------|----------|------------|
| Massa (ton)     | Platype | Platype                   | Weertype | Ondergrond |
| 50              | Plat    | Plat                      | D5       | Droog      |
| 50              | Diep    | Diep                      | D5       | Nat        |
| 100             | Plat    | Plat                      | D9       | Droog      |
| 100             | Diep    | Diep                      | D9       | Nat        |
| 200             | Plat    | Plat                      | F1,5     | Droog      |
| 200             | Diep    | Diep                      | F1,5     | Nat        |
| 400             | Plat    |                           |          |            |
| 400             | Diep    |                           |          |            |

## **Resultaten**

In de bijlage in Tabel 6 zijn de effectafstanden van de wolk als gevolg van de plasverdamping bij weertype D5, op een droge ondergrond met verschillende massa's ammoniak weergegeven. Tabel 7 geeft de effectafstanden van de gifwolk door de plasverdamping van een plas met 200 ton ammoniak weer, met variaties van het weertype en de ondergrond. De limiet voor dispersie in Safeti-NL is 50 km. Resultaten worden nabij 50 km afgekapt en zijn grijs gekleurd. Het gifwolkaandachtsgebied is berekend met de dosis-methode. Afstanden zijn afgerond op hele meters met 3 significante getallen, in werkelijkheid is de nauwkeurigheid lager.

In Figuur 2 is, voor het concentratieniveau van 29 ppm, de effectafstand van de gifwolk uitgezet tegen de duur van de verdamping. Panelen A-C lichten de variaties van de massa in de plas, het weertype, en het soort ondergrond uit. In paneel D staan alle resultaten met een massa van 200 ton in 1 figuur. Het grijze gebied geeft de bandbreedte van de resultaten aan. Bij tussenliggende situaties, zoals waar een gedeelte van de ammoniak in de diepe plas zit en een gedeelte in de platte plas, liggen de effecten waarschijnlijk in dit gebied.

### *Gevoeligheid voor massa*

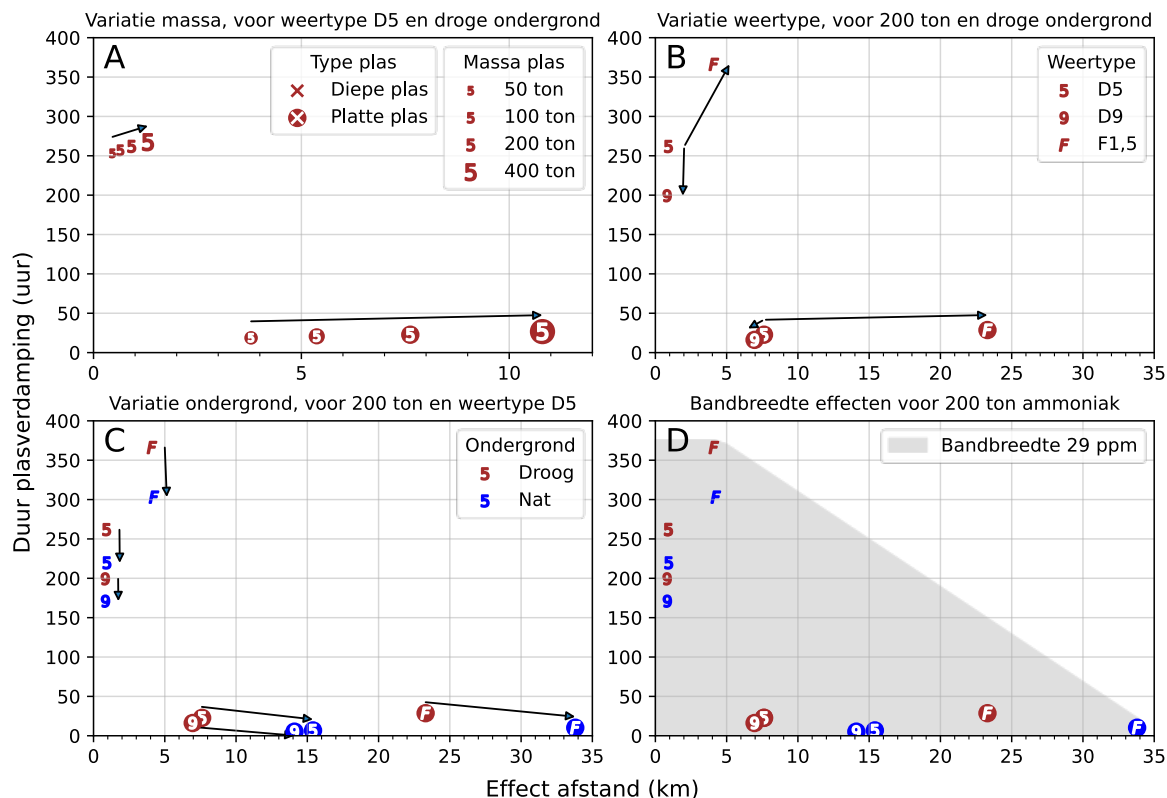
In Figuur 2A zijn de effectafstanden van de wolk als gevolg van de plasverdamping voor verschillende massa's met weertype D5 en droge ondergrond weergegeven. De effectafstanden nemen toe naarmate de massa ammoniak toeneemt. De platte plas verdampt binnen ongeveer een dag, de diepe plas verdampt volgens de berekeningen (en zonder maatregelen) na 11 dagen. De massa van zowel de platte als diepe plas heeft geringe invloed op de verdampingsduur. De reden hiervoor is de opzet van de modellering, namelijk dat alle gemodelleerde plassen dezelfde diepte hebben. Het oppervlakte van de plas groeit dan evenredig met de massa ammoniak. Omdat de verdamping ook ongeveer evenredig is met de oppervlakte van de plas zal de tijdsduur dus ongeveer gelijk blijven. Echter, de aanname dat de volledige massa in de platte of diepe plas komt heeft wel een sterke invloed op de berekende verdampingsduur. Indien bijvoorbeeld de helft van de massa in de plas komt zal de verdampingsduur ook ongeveer halveren.

### *Gevoeligheid voor weertype*

In Figuur 2B zijn de effectafstanden van de wolk als gevolg van de plasverdamping voor verschillende weertypen met 200 ton en droge ondergrond weergegeven. Voor weertype D9 worden de effectafstanden in de orde van 10 tot 20% kleiner vergeleken met weertype D5. Voor weertype F1,5 worden de effectafstanden 2,2 tot 5,5 keer groter dan voor weertype D5.

De duur van de plasverdamping moet echt als een bandbreedte worden gezien. Het is in Nederland onwaarschijnlijk dat het weertype lang hetzelfde blijft.

**Figuur 2: Effectafstanden uitgezet tegen de duur van de verdamping.** Panels A-C licht specifieke variaties uit, in D staan alle resultaten voor een plas met 200 ton massa en geeft zo de bandbreedte van de effecten weer.



### Gevoeligheid voor ondergrond

In Figuur 2C zijn de effectafstanden van de wolk als gevolg van de plasverdamping voor verschillende ondergronden met 200 ton en weertype D5 weergegeven. Voor de diepe plas maakt een natte versus droge ondergrond weinig uit voor de berekende effectafstanden. Bij de platte plas worden de effectafstanden bij natte grond wel groter. De reden is dat bij een natte ondergrond er meer warmteoverdracht naar de plas plaatsvindt. De bronterm, de massa ammoniak die per seconde verdampt, is daardoor groter. Aan de ene kant zorgt dit voor grotere effectafstanden, aan de andere kant is de ammoniak sneller verdampt. Dit speelt een veel grotere rol voor de platte plas omdat deze een veel grotere contactoppervlakte heeft met de grond.

### Overige concentratieniveaus

Voor concentratieniveaus anders dan 29 ppm zijn de trends vergelijkbaar, echter op andere afstanden. Voor 1,7 ppm zijn de afstanden zo'n 5 keer groter, voor 135 ppm zijn de afstanden zo'n 2,5 keer kleiner. Ook de letaliteit en het aandachtsgebied volgen een vergelijkbare trend maar bij korte verdampingsduur worden deze afstanden wel korter omdat de blootstellingsduur afneemt.

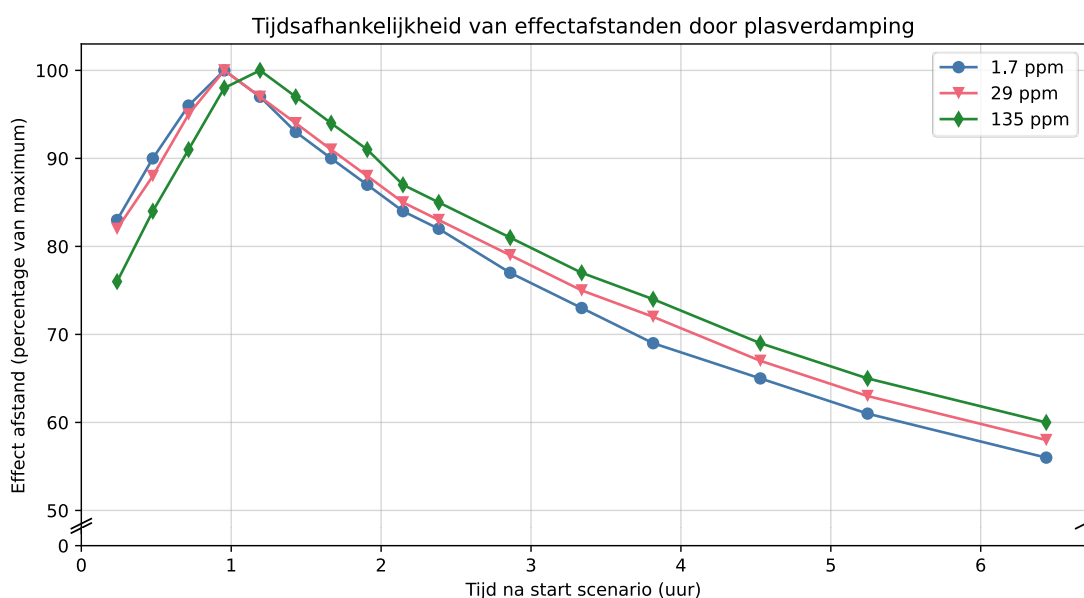
### Tijdsafhankelijkheid

In Figuur 3 zijn de effectafstanden van de wolk als gevolg van de plasverdamping voor D5, droge ondergrond met 200 ton in een diepe plas weergegeven als functie van de tijd. De maximale effectafstanden worden na ruim een uur bereikt, waarna de afstanden weer afnemen. De verdamping van ammoniak remt af omdat ammoniak warmte onttrekt uit

de plas. Er wordt echter geen stabiele toestand bereikt, de effectafstanden blijven afnemen tot alle ammoniak na 11 dagen is verdampt.

Praktisch gezien betekent dit dat volgens de berekening de verdamping van de diepe plas 11 dagen duurt, maar de in Tabel 6 en Tabel 7 weergegeven effectafstanden zijn voornamelijk van toepassing op de eerste uren van het scenario. Daarna zorgt de gedaalde verdampingssnelheid voor een kleinere wolk. Ook is het eventuele ingrijpen door hulpdiensten niet meegenomen in de berekeningen.

*Figuur 3: Genormaliseerde effectafstanden voor 200 ton ammoniak in een diepe plas, voor droge ondergrond bij weertype D5, voor drie verschillende concentraties.*



## Conclusie

Bij het modelleren van de breuk van ammoniakbuisleidingen spelen verschillende uitdagingen. Deze notitie geeft inzicht in de achtergrond van de modellen en keuzes die bij het modelleren gemaakt kunnen worden. Aanvullend geeft deze notitie inzicht in de effecten (zowel afstanden als tijdsduur) van breuken van ammoniakbuisleidingen met verschillende afmetingen.

Vanwege de grote verschillen in effectafstanden en tijdsduur zijn de berekeningen van het breuk- en plasverdampingsscenario gesplitst. De laatste is ook weer opgesplitst in een model van een platte en diepe plas. Bij een daadwerkelijk incident met ammoniakbuisleiding zijn deze scenario's niet te scheiden. Zo begint de plasverdamping al tijdens het breukscenario. De ammoniak zal ook zowel in als naast de krater terecht komen en daarmee zowel een platte als diepe plas vormen. Omdat de berekening van het breukscenario na 30 minuten stopt en de plasverdamping pas piekt na een uur is de overlap beperkt en acceptabel.

Volgens de berekeningen duurt de uitstroom uit de buisleiding 15 tot 45 minuten, en de plasverdamping tussen 5 uur en 15 dagen. Om zoveel mogelijk inzicht te krijgen zijn de afstanden voor verschillende effecten berekend. Vanwege de dynamiek van de scenario's is niet alleen de concentratie maar ook de dosis waaraan mensen worden

blootgesteld relevant. Voor inzicht in het effect op personen in gebouwen kan hiervoor het (gifwolk)-aandachtsgebied gebruikt worden.

Voor de breuk loopt het aandachtsgebied van 500 meter tot bijna 8 kilometer, voor respectievelijk een 6 inch, 1 km buisleiding en een 36 inch, 10 km buisleiding. Hierbij zit een duidelijke relatie tussen volume van de buisleiding en effectafstanden.

Bij de plasverdamping is een gevoeligheidsanalyse voor verschillende parameters gemaakt en loopt het aandachtsgebied uiteen van 80 meter tot 2,7 kilometer. Hierbij zijn steeds de uiterste effecten berekend: alle ammoniak in een platte plas òf alle ammoniak in een diepe plas, één weertype gedurende het hele scenario, een uniforme ondergrond. De resultaten geven daarmee een bandbreedte van de scenario's. Aanvullend hierop zijn er nog onbekende factoren zoals het eventueel wegstromen van ammoniak in de bodem, bevriezing van de bodem, en onzekerheid in de plasgrootte. Het gaat er ook van uit dat er niet wordt ingegrepen door de hulpdiensten. De resultaten zijn dus indicatief.

Het gebruik van het kratermodel voor het berekenen van de uitstroom uit de buisleiding sluit aan bij de laatste wetenschappelijke inzichten en zorgt voor de beste inschatting van de effecten en risico's van een ondergrondse buisleiding. Voor het goed in kaart brengen van de effecten en risico's van nieuwe ondergrondse buisleidingen is het belangrijk om het kratermodel te gebruiken. Het niet gebruiken van het kratermodel geeft een grote onderschatting van de effecten en risico's. Het RIVM raadt daarom sterk aan om de laatste wetenschappelijke inzichten te gebruiken en het kratermodel toe te passen.

Deze kennisnotitie geeft een uitgebreid beeld van de bandbreedte van effectafstanden en mogelijke duur van een incident met een ammoniakbuisleiding. Voor zowel het breuk- als plasverdampingsscenario zijn de gevolgen van de keuze voor verschillende parameters onderzocht. Dit rapport biedt daarmee een basis voor verdere onderzoeken naar bijvoorbeeld de beheersbaarheid van incidenten met een ammoniakbuisleiding.

## Referenties

1. Kamerbrief kabinetsvisie waterstofdragers Ministerie van Klimaat en Groene Groei; 2024 2024-11-22. Report No.: DGKE-DE / 90538788.
2. Stene, Oke, Vatie, Harper, Webber, Witlox. Pipebreak Model Theory. DNV A.S.; 2025.
3. Kooi ES, Zonneveld M, Boxman AMC, van Vliet AAC, Uijt de Haag PAM. Consequentieonderzoek SAFETI-NL 8: Verschillen in uitkomsten ten opzichte van SAFETI-NL 6.54 en impact daarvan. RIVM; 2018. Report No.: 2018-0040.
4. Handboek Omgevingsveiligheid: RIVM; 2025 [Available from: <https://www.rivm.nl/omgevingsveiligheid/handboek>.]
5. Mahieu K, Geraets L, Bos P. Handleiding & Stofdocumenten Interventiewaarden 2023. RIVM; 2023.
6. Toxicological profile for ammonia. U.S. Department of health and human services; 2004.
7. Probit relation ammonia 2023 [updated 2023-09-18. Available from: <https://www.rivm.nl/probitrelaties/ammoniak>.]
8. Boxman AMC, Stam G, Uijt de Haag PAM, van Vliet AAC. Advies aandachtsgebieden: Beschouwing van voorstel alternatieve benadering voor de berekening van aandachtsgebieden. RIVM; 2022. Report No.: 2022-0012.
9. de Vos C, Scheres RJM, op de Dries AM, Starostenko K, Tran QV. Veiligheid transport van ammoniak door buisleidingen. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat; 2024.

**Bijlage: Tabellen met effectafstanden.***Tabel 5: Effectafstanden voor het breukscenario voor weertype F1,5***Belangrijkste parameters**

|                    |                |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Binnendiameter     | inch           | 6     | 6     | 6     | 8     | 8     | 8     | 10   | 10    | 10    | 12    | 12    | 12    | 12    |
| Binnendiameter     | mm             | 152,4 | 152,4 | 152,4 | 203,2 | 203,2 | 203,2 | 254  | 254   | 254   | 304,8 | 304,8 | 304,8 | 304,8 |
| Segment lengte     | km             | 1     | 5     | 10    | 1     | 5     | 10    | 1    | 5     | 10    | 1     | 5     | 10    | 1     |
| Stroomsnelheid     | m/s            | 1,5   | 1,5   | 1,5   | 1,5   | 1,5   | 1,5   | 1,5  | 1,5   | 1,5   | 1,32  | 1,32  | 1,32  | 1,5   |
| Mass inflow        | kg/s           | 17    | 17    | 17    | 30    | 30    | 30    | 47   | 47    | 47    | 60    | 60    | 60    | 68    |
| Volume buisleiding | m <sup>3</sup> | 18,2  | 91,2  | 182,4 | 32,4  | 162,1 | 324,3 | 50,7 | 253,4 | 506,7 | 73,0  | 364,8 | 729,7 | 73,0  |

**Effectafstanden**

|                 |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 29 ppm          | m | 11000 | 20000 | 20200 | 13400 | 26400 | 26900 | 13700 | 32400 | 33700 | 15900 | 37900 | 40400 | 16000 |
| 272 ppm         | m | 3060  | 5500  | 5500  | 3590  | 7360  | 7460  | 3260  | 8960  | 9330  | 3840  | 10400 | 11100 | 3850  |
| 1060 ppm        | m | 1270  | 1960  | 1950  | 1500  | 2720  | 2720  | 1160  | 3390  | 3510  | 1400  | 4030  | 4260  | 1410  |
| 1495 ppm        | m | 992   | 1440  | 1430  | 1160  | 2030  | 2010  | 915   | 2550  | 2620  | 1060  | 3070  | 3200  | 1060  |
| 2583 ppm        | m | 676   | 896   | 897   | 789   | 1220  | 1220  | 636   | 1540  | 1580  | 711   | 1910  | 1930  | 715   |
| Aandachtsgebied | m | 514   | 1290  | 1290  | 656   | 1770  | 1800  | 614   | 2190  | 2300  | 747   | 2560  | 2810  | 753   |
| 1% letaliteit   | m | 444   | 976   | 976   | 563   | 1320  | 1340  | 529   | 1610  | 1690  | 626   | 1880  | 2050  | 630   |
| 3% letaliteit   | m | 364   | 796   | 793   | 489   | 1080  | 1100  | 472   | 1300  | 1370  | 556   | 1520  | 1650  | 558   |
| 10% letaliteit  | m | 292   | 597   | 597   | 416   | 805   | 820   | 411   | 964   | 1010  | 485   | 1120  | 1220  | 487   |
| 99% letaliteit  | m | 107   | 150   | 150   | 104   | 214   | 211   | 94,2  | 262   | 275   | 109   | 320   | 335   | 110   |

**Belangrijkste parameters**

|                    |                |       |        |        |       |        |        |       |        |        |        |
|--------------------|----------------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Binnendiameter     | inch           | 24    | 24     | 24     | 30    | 30     | 30     | 36    | 36     | 36     | 36     |
| Binnendiameter     | mm             | 609,6 | 609,6  | 609,6  | 762   | 762    | 762    | 914,4 | 914,4  | 914,4  | 914,4  |
| Segment lengte     | km             | 1     | 5      | 10     | 1     | 5      | 10     | 1,1   | 2      | 5      | 10     |
| Stroomsnelheid     | m/s            | 1,32  | 1,32   | 1,32   | 1,5   | 1,5    | 1,5    | 1,5   | 1,5    | 1,5    | 1,5    |
| Mass inflow        | kg/s           | 240   | 240    | 240    | 425   | 425    | 425    | 613   | 613    | 613    | 613    |
| Volume buisleiding | m <sup>3</sup> | 291,9 | 1459,3 | 2918,6 | 456,0 | 2280,2 | 4560,4 | 722,4 | 1313,4 | 3283,5 | 6566,9 |

**Effectafstanden**

|                 |   |       |        |        |       |        |        |        |        |        |        |
|-----------------|---|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 29 ppm          | m | 28200 | >50 km | >50 km | 38100 | >50 km | >50 km | >50 km | >50 km | >50 km | >50 km |
| 272 ppm         | m | 6620  | 17600  | 21200  | 8930  | 20100  | 25000  | 13900  | 17100  | 23400  | 27600  |
| 1060 ppm        | m | 2440  | 6710   | 8270   | 3360  | 7420   | 9610   | 6030   | 7220   | 8840   | 10400  |
| 1495 ppm        | m | 1860  | 5130   | 6310   | 2600  | 5650   | 7350   | 4870   | 5920   | 6780   | 7870   |
| 2583 ppm        | m | 1440  | 3260   | 3920   | 2150  | 3570   | 4630   | 3360   | 4170   | 4370   | 4850   |
| Aandachtsgebied | m | 1590  | 4710   | 5990   | 2370  | 5480   | 7180   | 4030   | 5280   | 6980   | 7840   |
| 1% letaliteit   | m | 1330  | 3340   | 4180   | 2010  | 3930   | 4970   | 3130   | 4090   | 4960   | 5320   |
| 3% letaliteit   | m | 1180  | 2720   | 3350   | 1800  | 3360   | 4020   | 2710   | 3440   | 4000   | 4180   |
| 10% letaliteit  | m | 994   | 2180   | 2520   | 1540  | 2820   | 3180   | 2280   | 2750   | 3040   | 3010   |
| 99% letaliteit  | m | 214   | 597    | 688    | 326   | 729    | 895    | 791    | 944    | 1120   | 1200   |

Tabel 6: Effectafstanden plasverdamping voor D5, droge ondergrond met variërende uitstroom zonder effecten initiële breuk.

**Belangrijkste parameters**

| Uitstroom                                | ton   | <b>50</b> |       | <b>100</b> |       | 200    |       | <b>400</b> |         |
|------------------------------------------|-------|-----------|-------|------------|-------|--------|-------|------------|---------|
| Plas type                                |       | Diep      | Plat  | Diep       | Plat  | Diep   | Plat  | Diep       | Plat    |
| Weertype                                 |       | D5        | D5    | D5         | D5    | D5     | D5    | D5         | D5      |
| Ondergrond                               |       | Dry       | Dry   | Dry        | Dry   | Dry    | Dry   | Dry        | Dry     |
| <b>Effectafstanden</b>                   |       |           |       |            |       |        |       |            |         |
| 1,7 ppm                                  | m     | 2250      | 19800 | 3270       | 28400 | 4800   | 41700 | 7130       | > 50 km |
| 29 ppm                                   | m     | 456       | 3790  | 646        | 5370  | 919    | 7620  | 1310       | 10800   |
| 135 ppm                                  | m     | 189       | 1380  | 264        | 1920  | 371    | 2680  | 522        | 3760    |
| Aandachtsgebied (dosis)                  | m     | 80        | 189   | 109        | 269   | 151    | 376   | 210        | 535     |
| 1% letaliteit (outdoor)                  | m     | 62        | 164   | 84         | 233   | 114    | 328   | 158        | 465     |
| 3% letaliteit (outdoor)                  | m     | 54        | 148   | 73         | 211   | 98     | 297   | 135        | 424     |
| 10% letaliteit (outdoor)                 | m     | 44        | 127   | 60         | 183   | 81     | 260   | 109        | 372     |
| 99% letaliteit (outdoor)                 | m     | -         | -     | -          | -     | 24     | 20    | 35         | 65      |
| Diameter plas                            | m     | 2,78      | 33,79 | 3,94       | 47,63 | 5,57   | 66,96 | 7,88       | 94,1    |
| Resterende massa na 24 uur               | ton   | 41,23     | 0     | 82,79      | 0     | 166,12 | 0     | 333,59     | 0,0139  |
| Verdampingssnelheid na 24 uur            | kg/s  | 0,05      | -     | 0,0987     | -     | 0,194  | -     | 0,381      | 0,00145 |
| Plas verdampt na                         | Uur   |           | 18,7  |            | 20,7  |        | 22,7  |            |         |
| Tijd voor verdamping<br>(geëxtrapoleerd) | Dagen | 11        | -     | 11         | -     | 11     | -     | 11         | 1       |

Tabel 7: Effectafstanden plasverdamping 200 ton uitstroom met variërende omstandigheden zonder effecten initiële breuk.

**Belangrijkste parameters**

|                                       |       |       |           |             |       |           |             |            |            |             |            |            |             |
|---------------------------------------|-------|-------|-----------|-------------|-------|-----------|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| Uitstroom                             | ton   | 200   | 200       | 200         | 200   | 200       | 200         | 200        | 200        | 200         | 200        | 200        | 200         |
| Plas type                             |       | Diep  | Diep      | Diep        | Plat  | Plat      | Plat        | Diep       | Diep       | Diep        | Plat       | Plat       | Plat        |
| Weertype                              |       | D5    | <b>D9</b> | <b>F1,5</b> | D5    | <b>D9</b> | <b>F1,5</b> | D5         | <b>D9</b>  | <b>F1,5</b> | D5         | <b>D9</b>  | <b>F1,5</b> |
| Ondergrond                            |       | Dry   | Dry       | Dry         | Dry   | Dry       | Dry         | <b>Wet</b> | <b>Wet</b> | <b>Wet</b>  | <b>Wet</b> | <b>Wet</b> | <b>Wet</b>  |
| <b>Effectafstanden</b>                |       |       |           |             |       |           |             |            |            |             |            |            |             |
| 1,7 ppm                               | m     | 4800  | 4290      | 22700       | 41700 | 37600     | >50 km      | 4910       | 4360       | 22800       | >50 km     | >50 km     | >50 km      |
| 29 ppm                                | m     | 919   | 827       | 4100        | 7620  | 6960      | 23300       | 940        | 840        | 4240        | 15400      | 14100      | 33800       |
| 135 ppm                               | m     | 371   | 335       | 1660        | 2680  | 2460      | 8370        | 381        | 341        | 1710        | 6600       | 5850       | 13400       |
| Aandachtsgebied (dosis)               | m     | 151   | 126       | 810         | 376   | 345       | 1590        | 161        | 133        | 886         | 511        | 420        | 2690        |
| 1% letaliteit (outdoor)               | m     | 114   | 96        | 611         | 328   | 296       | 1140        | 122        | 101        | 671         | 501        | 393        | 1970        |
| 3% letaliteit (outdoor)               | m     | 98    | 83        | 523         | 297   | 261       | 922         | 104        | 88         | 577         | 428        | 345        | 1600        |
| 10% letaliteit (outdoor)              | m     | 81    | 69        | 422         | 260   | 214       | 687         | 86         | 73         | 467         | 354        | 288        | 1190        |
| 99% letaliteit (outdoor)              | m     | 24    | 22        | 90          | 20    |           | 142         | 26         | 24         | 103         | 102        |            | 175         |
| Radius plas                           | m     | 5,6   | 5,6       | 5,6         | 67    | 66        | 67          | 5,6        | 5,6        | 5,6         | 86         | 86         | 86          |
| Resterende massa na 24 uur            | ton   | 166,1 | 158,4     | 178,0       | 0,0   | 0,0       | 0,5         | 162,0      | 153,7      | 174,9       | 0,0        | 0,0        | 0,0         |
| Verdampingssnelheid na 24 uur         | kg/s  | 0,19  | 0,25      | 0,14        | -     | -         | 0,03        | 0,23       | 0,29       | 0,17        | -          | -          | -           |
| Plas verdampt na                      | Uur   |       |           |             | 22,7  | 16,2      |             |            |            |             | 6,8        | 5,2        | 10,2        |
| Tijd voor verdamping (geëxtrapoleerd) | Dagen | 11    | 8         | 15          | -     | -         | 1           | 9          | 7          | 13          | -          | -          | -           |