



Adviesgroep AVIV BV
M.H. Tromplaan 55
7513 AB Enschede

Risicoanalyse / Risicomodellering buisleidingtransport van waterstof

Project 193851
Datum 22 november 2019

Opdrachtgever
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Postbus 20904
2500 EX 's Gravenhage

Risicoanalyse / Risicomodellering buisleidingtransport van waterstof

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| Project | 193851 |
| Datum | 22 november 2019 |
| Auteur(s) | ir. J. Heitink ir. G.A.M. Golbach |
| Versie nr. | Eindrapport |

Opdrachtgever Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
Postbus 20904
2500 EX 's Gravenhage

Inhoudsopgave

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inleiding | 5 |
| 2 | Ongevalsscenario's algemeen | 7 |
| 3 | Scenario's bijzondere aspecten | 9 |
| 3.1 | Ontstekingskans | 9 |
| 3.1.1 | Aardgas | 9 |
| 3.1.2 | Waterstof | 9 |
| 3.1.3 | Mengsels | 10 |
| 3.2 | Experimenten | 11 |
| 3.3 | Aanpak waterstof in PIPESAFE | 13 |
| 4 | Plaatsgebonden risico | 14 |
| 5 | Verschillen tussen PIPESAFE en Safeti-nl 8 | 18 |
| 5.1 | PR6 en PR_max PIPESAFE en SAFETI-NL 8 | 18 |
| 5.2 | Vergelijking PR-x curves | 19 |
| 5.2.1 | PIPESAFE-vs. SAFETI-NL H2 | 20 |
| 5.2.2 | PIPESAFE-H-gas vs. SAFETI-NL CH4 | 21 |
| 5.3 | Invloed breukfrequentie | 22 |
| 5.3.1 | Ondergrondse buisleiding met waterstof | 22 |
| 5.3.2 | Ondergrondse buisleiding met aardgas | 23 |
| 5.3.3 | Invloed breukfrequentie en effectmodellering gecombineerd | 23 |
| 6 | Invloed lekscenario | 26 |
| 7 | Waterstoftransport bij 8, 12 en 16 bar | 28 |
| 8 | Conclusies | 29 |
| 8.1 | De modellen | 29 |
| 8.2 | De uitkomsten | 30 |
| 8.2.1 | Algemeen | 30 |
| 8.3 | Breukfrequentie module D | 31 |
| 8.4 | Breukfrequentie module B | 34 |
| | Referenties | 36 |
| | Bijlage 1. Waterstof Safeti-NL versie 8 | 38 |
| | Bijlage 2. Methaan Safeti-NL versie 8 | 40 |
| | Bijlage 3. Waterstof Safeti-NL versie 6.54 | 42 |

| | |
|---|-----------|
| Bijlage 4 Verschillen PIPESAFE-Safeti-nl 8 | 44 |
| 1 Enkele tussenresultaten | 44 |
| 1.1 Diversen | 44 |
| 1.2 Kraterafmeting | 46 |
| 1.3 Warmtestraling als functie van de afstand | 47 |
| 1.3.1 Waterstof | 47 |
| 1.3.2 Aardgas | 49 |
| Bijlage 5 PR-x-curves PIPESAFE H-gas en H2 | 51 |
| Bijlage 6 Kenmerken lekscenario waterstof | 52 |
| Bijlage 7 Kenmerken breukscenario lage werkdrukken | 53 |
| Bijlage 8 Beknopte modelbeschrijvingen | 54 |
| Bijlage 9 Begeleidingscommissie | 57 |
| Bijlage 10 Doorgerekende leidingen | 58 |
| 1 Invoer | 58 |
| 2 Uitvoer | 61 |
| Bijlage 11 Relatie vermogen-stralingsbelasting | 62 |

1 Inleiding

Dit rapport geeft de resultaten weer van een onderzoek naar en vergelijking van aardgas en waterstof voor de modellering van de scenario's en de effecten van het onbedoeld vrijkomen van gas uit ondergrondse buisleidingen in de publieke ruimte. Het vrijkomen en ontsteken van uitstromend gas bij een buisleidingincident in een bebouwde omgeving brengt een risico voor omwonenden met zich mee.

Het accent ligt bij dit onderzoek op de effectenkant van het incident: de modellering van het uitstromen van het gas, het vuurverschijnsel en de hittestraling naar de omgeving. De frequentie van vrijkomen komt zijdelings aan de orde. De materiaal-aspecten van het transport van waterstof of aardgas-waterstof mengsels door nieuwe of bestaande aardgastransportleidingen is onderzocht in een parallel onderzoek [11]. Het onderzoek is begeleid en van commentaar voorzien door een begeleidingscommissie. De schrijvers zijn de commissieleden daarvoor erkentelijk. De leden zijn te vinden in bijlage 9.

Het onderzoek heeft een inventariserend karakter. In een latere fase wordt onderzocht of aanpassingen nodig zijn in de Handleiding risicoberekeningen buisleidingen in het licht van de komst van de omgevingswet.

De rekenmethodiek voor de risico's van het buisleidingtransport van aardgas en waterstof is beschreven in de handleiding risicoberekeningen Besluit externe veiligheid buisleidingen module B (aardgas) respectievelijk Module D (waterstof). De volgende modellen zijn in de vergelijking betrokken:

1. Carola/Pipesafe 2005 (huidige rekengrondslag aardgas)
2. Pipesafe actuele versie (2019, verwerking nieuwere kennis/experimenten)
3. Safeti-nl versie 6.54 (huidige rekengrondslag waterstof, in combinatie met 1 voor wat betreft luchtinmenging en kratermodel)
4. Safeti-nl versie 8 (beoogde rekengrondslag 2021)

De uitgangspunten voor de berekeningen zijn vastgelegd in een eerdere notitie [1] en hier opgenomen in bijlage 10.

Leeswijzer

Hoofdstuk 2 licht de uitgangspunten van de studie toe. De vigerende rekenmethodiek wordt kort weergegeven. Hoofdstuk 3 behandelt de bevindingen uit de literatuur. Met name twee grootschalige experimenten met ondergrondse buisleidingen blijken van belang voor de modellering van de effecten.

De resultaten voor het plaatsgebonden risico worden gepresenteerd in hoofdstuk 4. De bijlagen geven meer detail van de risicoberekening. Hoofdstuk 5 gaat in op de verschillen tussen de modeluitkomsten en behandelt de gevolgen van verschillende keuzes voor de

breukfrequenties van de buisleidingen. De hoofdstukken 6 en 7 behandelen twee aparte onderwerpen: de invloed van het lekscenario op het plaatsgebonden risico en het plaatsgebonden risico van leidingen met wat lagere drukken dan de huidige ondergrens voor de toepasselijkheid van het besluit externe veiligheid buisleidingen. Hoofdstuk 8 sluit af met de hoofdconclusies.

2 Ongevalsscenario's algemeen

De modellering van de risico's van ondergrondse buisleidingen met aardgas en waterstof is voorgeschreven in de Handleiding risicoberekeningen buisleidingen respectievelijk de modules B en D.

Aardgas

Het rekenprotocol heeft betrekking op ondergrondse aardgastransportleidingen met een diameter groter dan 50 mm en een druk groter dan 16 bar. De risico's worden berekend met CAROLA, een op PIPESAFE gebaseerde applicatie.

Het scenario is leidingbreuk (full bore); de breukfrequentie wordt berekend met een PIPESAFE module (FFREQ) op grond van diameter, druk, wanddikte, rekgrens, diepteligging en Charpy energie. Een lekscenario wordt niet beschouwd, omdat de bijdrage aan het risico verwaarloosbaar is [3]. De beschouwde oorzaak voor leidingbreuk is graafschade door derden. Daarnaast wordt alleen corrosie als oorzaak beschouwd, maar deze oorzaak is voor aardgas meestal geëlimineerd door technische en procedurele voorzieningen.

De kans op directe ontsteking wordt verdeeld over twee tijdsperiodes: 0-20 sec. (75%) en 120-140 sec. (25%). De kans op directe ontsteking is druk- en diameterafhankelijk [5]. Het stralingsmodel is een jefire model met een over de lengte van de vlam variërende stralingssterkte berekend met submodellen voor turbulente menging, verbranding en roetvorming [6]. De invoer in het vlammodel is verticale uitstroming uit een krater. De krater bepaalt de ingemengde hoeveelheid lucht en de verticale snelheid na expansie.

Waterstof

Het rekenprotocol heeft betrekking op ondergrondse transportleidingen met een diameter groter dan 70 mm en een druk groter dan 16 bar. De risico's worden berekend met Safeti-nl 6.54.

Voor waterstof wordt uitgegaan van twee scenario's: leidingbreuk (full bore) en een lek ter grootte van 10% van de inwendige diameter met een maximum van 20 mm. De faalfrequentie voor beide scenario's voor een leiding die voldoet aan de stand der techniek is gegeven in de handleiding module D. De faaloorzaken zijn in zes categorieën ondergebracht: graafschade door derden, mechanisch, inwendige corrosie, uitwendige corrosie, natuurlijke oorzaken en operationele oorzaken. Voor de beheersing van alle zes oorzaakgroepen zijn voorwaarden geformuleerd om aan 'stand der techniek' te voldoen. De breukfrequentie bedraagt $3.7 \cdot 10^{-5}$ /km.jr, de lekfrequentie $1.2 \cdot 10^{-4}$ /km.jr.

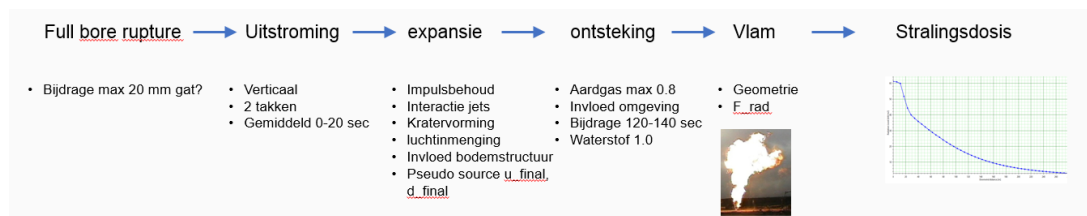
De kans op directe ontsteking is voor zowel het breuk als het lekscenario gelijk aan 1. Het stralingsmodel is een jefire model met een over de lengte van een kegelvormige vlam constante stralingssterkte. De gemiddelde uitstroming over 0-20 sec. is de invoer voor het

vlammodel. Kraterinvloed wordt gesimuleerd met een gereduceerde uitstroomsnelheid en luchtinmenging gebaseerd op PIPESAFE berekeningen aan H-gas leidingen met gelijke drukken en diameters.

Vergelijkende berekeningen

Voor methaan is ter vergelijking met Safeti-nl 8 een berekening gemaakt met dezelfde breukfrequentie en verder de uitgangspunten van de handleiding risicoberekeningen BevB module B. Zie ook de eerdere scenarionotitie [1] en bijlage 10.

Figuur 1 geeft de volgorde van uitstromingsberekening tot aan de schade- en risicoberekening. PIPESAFE en Safeti-nl maken “onderweg” verschillende modelkeuzes, maar uiteindelijk is de vraag welke verschillen in risico mogelijk ontstaan.



Figuur 1. Modelaspecten scenario van vrijkomen tot schade

Tabel 1 vat de uitgevoerde berekeningen samen.

| Diameter Buiten (mm) | Wd (mm) | Druk (barg) | Staal | Medium | P_ontsteking H ₂ /aardgas | Bodem | Dekking (m) | Breukfreq (/km.jr) |
|----------------------|---------|-------------|---------|-------------------------|--------------------------------------|-------|-------------|----------------------|
| 168 | 4,8 | 40 | Grade B | H ₂ /aardgas | 1.0/0.19 | Mixed | 1.2 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 323 | 5.2 | 40 | Grade B | H ₂ /aardgas | 1.0/0.24 | Mixed | 1.2 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 609 | 9.3 | 66.2 | X60 | H ₂ /aardgas | 1.0/0.44 | Mixed | 1.75 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 914 | 11.8 | 66.2 | X70 | H ₂ /aardgas | 1.0/0.8 | Mixed | 1.75 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 1219 | 18,7 | 80 | X70 | H ₂ /aardgas | 1.0/0.8 | Mixed | 1.75 | 3.7.10 ⁻⁵ |

Tabel 1. Overzicht uitgevoerde berekeningen

Daarnaast zijn berekeningen uitgevoerd voor:

- Mengsels van methaan en waterstof (10%, 30% en 70% waterstof)
- Een waterstofleiding met een werkdruk van 8, 12 en 16 bar (onderzoek naar de ondergrens voor toepassing van de Revb)
- De invloed van het lekscenario op het plaatsgebonden risico van een waterstofleiding

3 Scenario's bijzondere aspecten

3.1 Ontstekingskans

3.1.1 Aardgas

De kans op directe ontsteking is afhankelijk van druk en diameter. In de handleiding is de kans opgenomen in tabelvorm, zie tabel 2. In de ontstekingskansen voor diameters tussen 4 en 16 inch is een toeslag van 0.1 verwerkt voor ligging in bebouwde omgeving [5].

| Diameter (inch) | Druk (bar) | Kans directe ontsteking |
|-----------------|------------|-------------------------|
| 4 | 40 | 0.18 |
| 6 | 40 | 0.19 |
| 8 | 40 | 0.20 |
| 10 | 40 | 0.22 |
| 12 | 40 | 0.24 |
| 14 | 40 | 0.25 |
| 16 | 40 | 0.27 |
| 18 | 66.2 | 0.28 |
| 20 | 66.2 | 0.33 |
| 24 | 66.2 | 0.44 |
| 30 | 66.2 | 0.65 |
| 36 | 66.2 | 0.8 |
| 42 | 66.2 | 0.8 |
| 48 | 66.2 | 0.8 |

Tabel 2. Kans op directe ontsteking na leidingbreuk aardgas [2]

3.1.2 Waterstof

Gezien de lage ontstekingsenergie (circa een factor 10 lager dan voor aardgas) en de zeer brede range van explosiegrenzen (4-75%) is de kans op ontsteking voor alle scenario's 1.0 [2]. Dit is een conservatief uitgangspunt. In een onderzoeksproject in het kader van Natural Hy wordt bijvoorbeeld geopperd dat de ontstekingskans bij lekkages circa de helft van die bij breuk zou kunnen zijn [8].

3.1.3 Mengsels

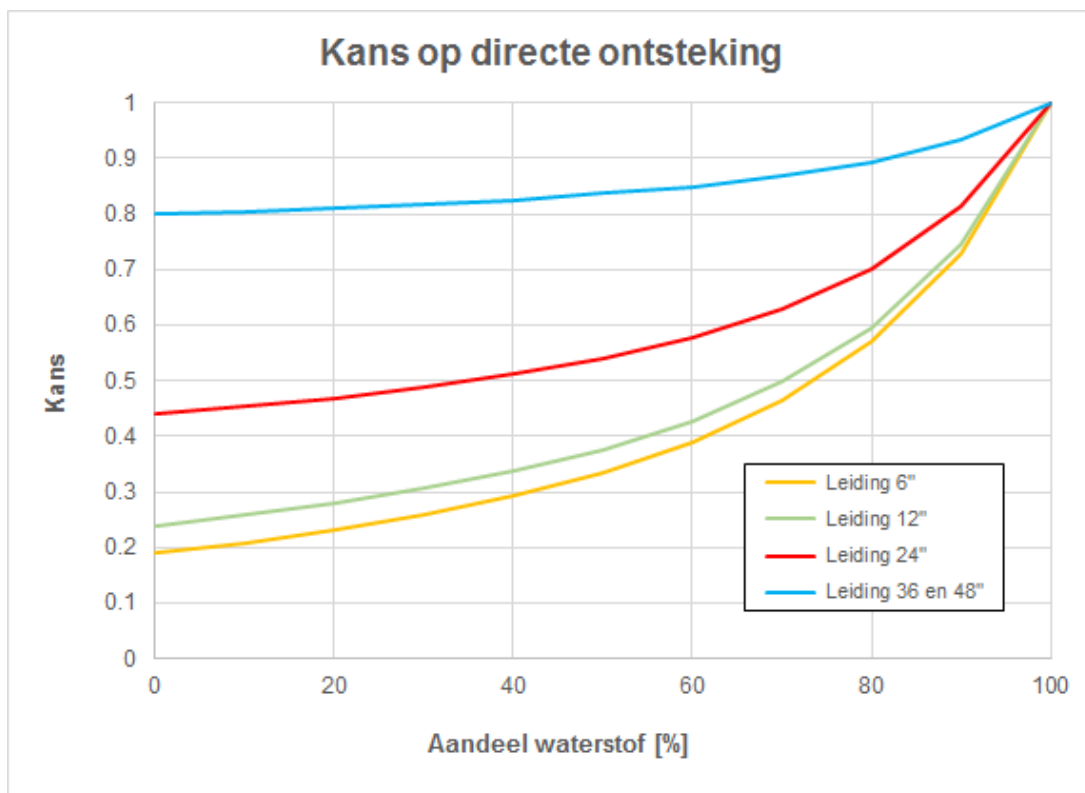
Bijmengen van waterstof in methaan verhoogt met name de bovenste explosiegrens. Deze is maatgevend voor directe ontsteking gezien de hoge gasconcentraties in de nabijheid van de breuk. De bovenste explosiegrens van een waterstof-methaan mengsel kan worden benaderd met de regel van Le Chatelier (al is deze nauwkeuriger voor de onderste explosiegrens):

$$UEL_{mix} = \frac{100}{\frac{\%H_2}{75} + \frac{\%CH_4}{16.5}}$$

Laboratoriumexperimenten bevestigen de toepasbaarheid van deze regel [7]. De ontstekingskans van het mengsel kan nu worden bepaald als [8]:

$$P_{ont,mix} = P_{ont,CH_4} + (P_{ont,H_2} - P_{ont,CH_4}) * \frac{(UEL_{mix} - UEL_{CH_4})}{(UEL_{H_2} - UEL_{CH_4})}$$

Figuur 2 toont het resultaat voor de hier beschouwde leidingdiameters. Duidelijk is dat de afhankelijkheid van de ontstekingskans van het aandeel waterstof afneemt naarmate de diameter groter wordt.



Figuur 2. Kans op ontsteking afhankelijk van het aandeel waterstof

3.2 Experimenten

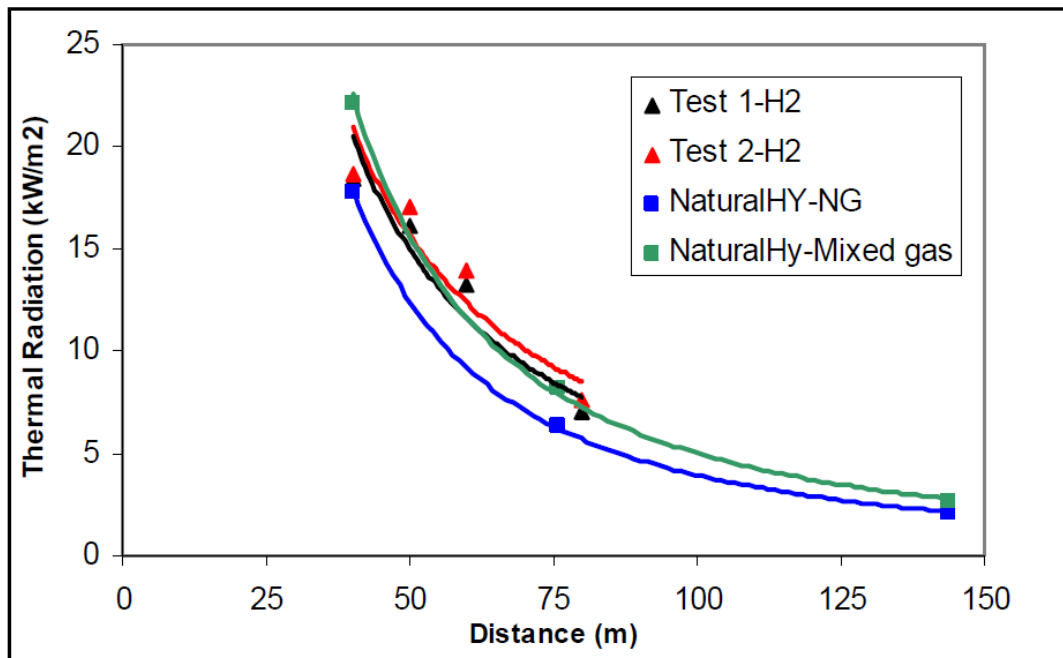
Er zijn zeer veel experimenten uitgevoerd met waterstof lekkages op relatief kleine schaal. Voor de onderhavige vraagstelling naar de risico's van het transport van waterstof door ondergrondse buisleidingen zijn deze minder relevant. Te meer daar de twee in de literatuur gerapporteerde grootschalige experimenten [4,9] duidelijk andere karakteristieken lieten zien dan de kleinschalige proeven.

| Variabele | Acton 2010 [4] | Lowesmith 2013 [9] |
|------------------|--|--|
| Druk (bar) | 60 | 70 |
| Diameter (inch) | 6 | 6 |
| bodem | Fine soil en mixed sand, 1 m dekking | Geen, voorgevormde krater |
| krater | LxBxH=5x4x1.8 en 5x6x1.8 | LxBxH=3.3x1.7x0.5 |
| medium | H ₂ | CH ₄ en CH ₄ /H ₂ 77.7%/22.3% |
| Wind m/s | 4-8 en 1-2 | 5.7 en 2 |
| Stralingsfractie | 0.29 | 0.29 |
| Bijzonderheden | Enige vervorming van de buis, daardoor wat kleiner dan full bore | |

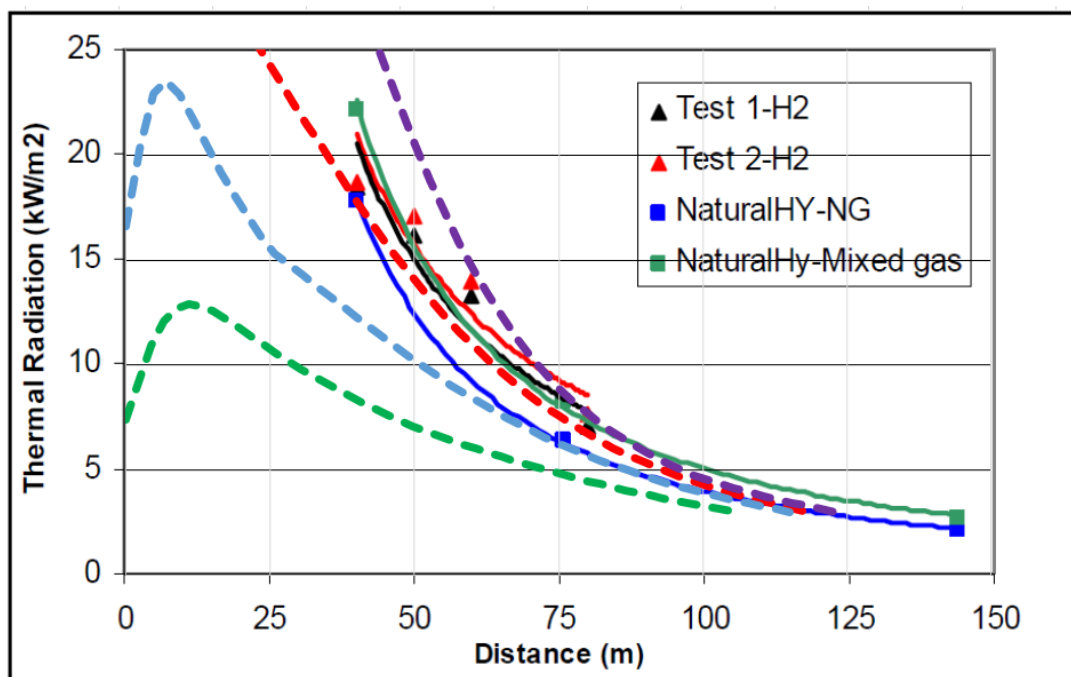
Tabel 3. Kenmerken experimenten

Hier zijn twee conclusies van belang.

- Uit deze experimenten wordt duidelijk dat de fysische verschijnselen bij een breuk van een ondergrondse buisleiding met waterstof wezenlijk verschillen van die bij kleinschalige waterstofbranden: *“Perhaps, the most surprising aspect was the high luminosity of the flames produced in these large scale hydrogen fires, unlike small scale hydrogen fires.”* [5]
- Jet fires van verschillende brandstoffen, en ook waterstof blijkt zo te beschrijven, hebben dezelfde stralingskarakteristieken *bij gelijk uitgestroomd vermogen* [10,5]. Een illustratie is getoond in figuur 17. Dit experimentele resultaat geeft de mogelijkheid een waterstofvlam te benaderen met een op vermogen gematchte methaanuitstroming. Hier is wel enige voorzichtigheid geboden. In het experiment is de overeenkomst beschreven op 40-80 m van de bron. Figuur 4 laat zien dat een redelijke match te verkrijgen is bij zeer verschillende stralingswaarden tussen 0 en 40 m. *Bearing in mind that at locations near the flame, the results are sensitive to the flame tilt and position of the flame relative to the radiometer, the overall conclusion is that no significant difference is apparent that is attributable to the fuel type, suggesting similar radiative characteristics.*[5]



Figuur 3. Warmtestraling vs. afstand (crosswind), experimenten waterstof en aardgas bij 2800 MW output [5]



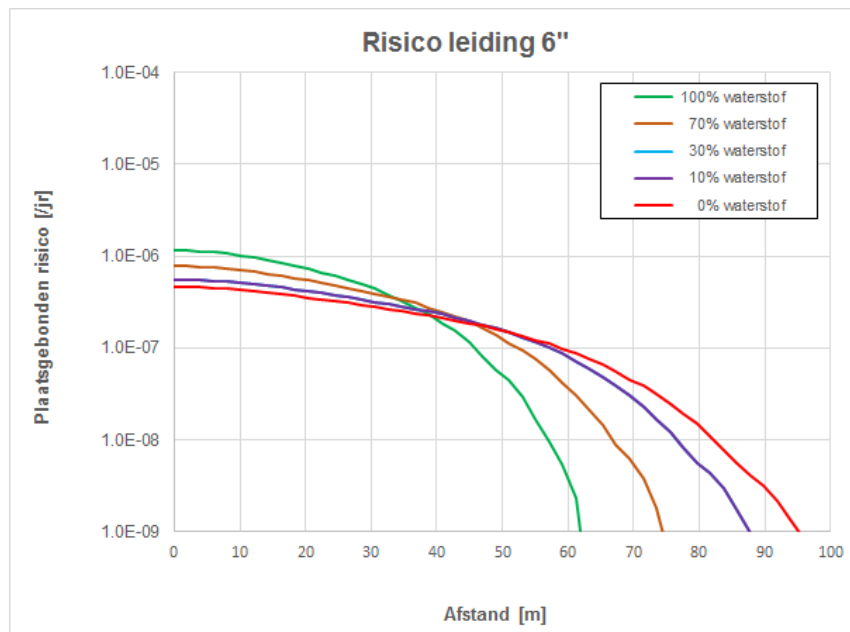
Figuur 4. Benadering veldexperimenten met Safeti-nl 8 model bij windsnelheden 1.5, 3, 5 en 9 m/s

3.3 Aanpak waterstof in PIPESAFE

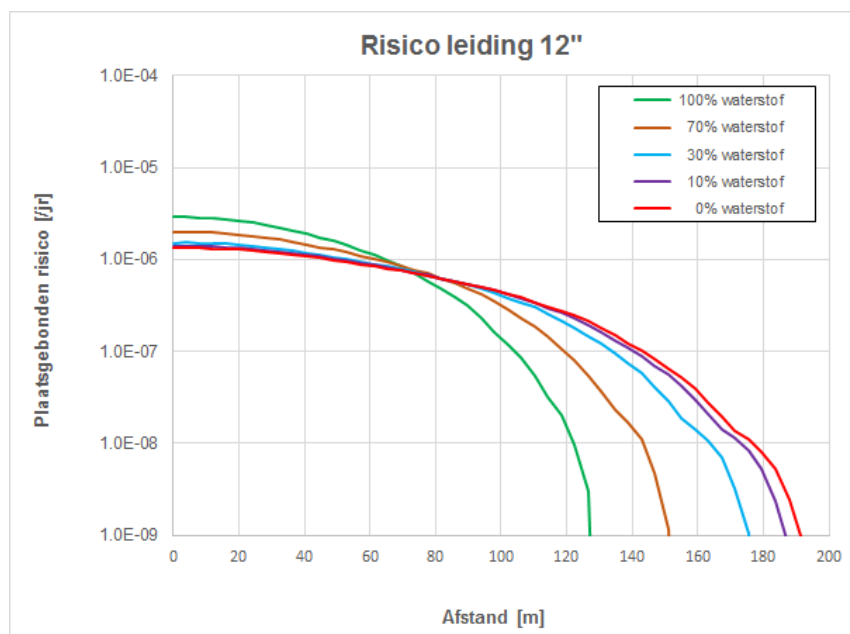
PIPESAFE is ontwikkeld voor aardgas. De uitstromingsmodule kan ook andere media aan waaronder waterstof. De modules voor vlamstructuur en warmtestraling zijn echter alleen geschikt voor aardgas. Als benadering wordt daarom gebruik gemaakt van het in paragraaf 3.2 genoemde experimentele resultaat: bij gelijk uitgestroomd vermogen zijn de stralingskarakteristieken van verschillende koolwaterstoffen en ook van waterstof gelijk. Het uitgestroomd vermogen is de massastroom maal de verbrandingswaarde. De berekende uitstroming van waterstof wordt daarom vertaald in een equivalente uitstroming van H-gas met een factor 2.69 (verbrandingswaarde waterstof is 120.1 MJ/kg, van H-gas 44.6 MJ/kg). Daarmee worden de warmtestraling en het plaatsgebonden risico berekend. Bijlage 11 laat zien dat ook binnen het Safeti-nl jettfire model dit een voor risicoberekening bruikbare veronderstelling is.

4 Plaatsgebonden risico

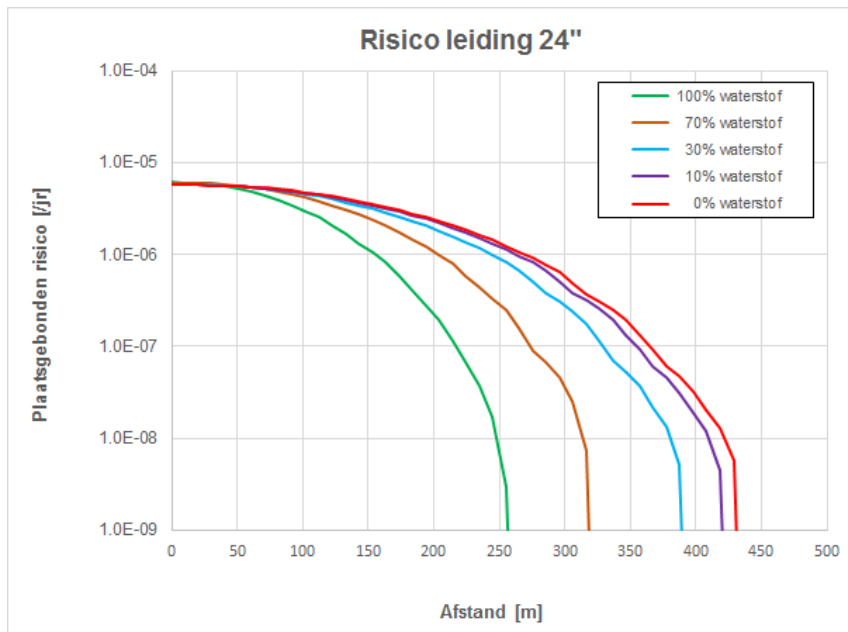
Figuur 5 t/m figuur 9 tonen de uitkomsten van de Safeti-nl 8 berekening.



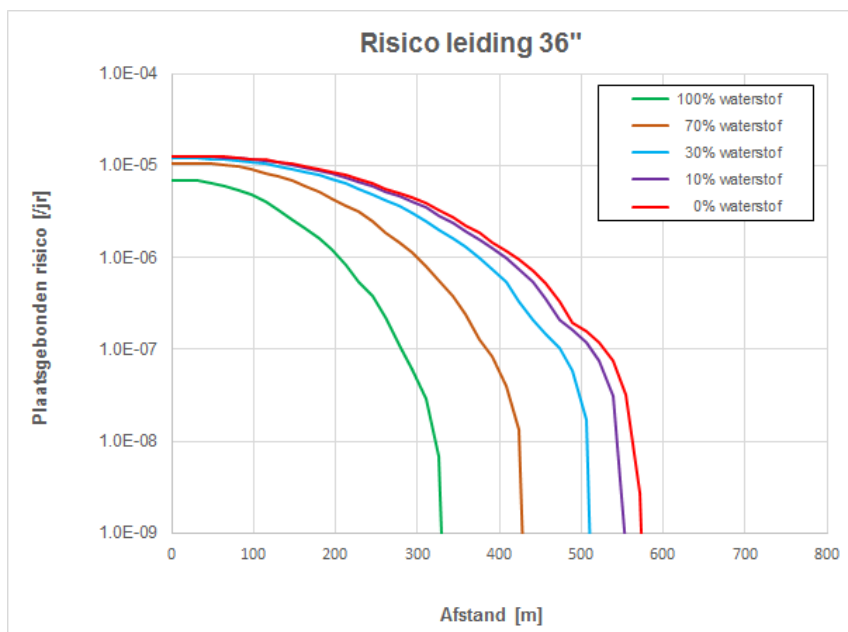
Figuur 5. Plaatsgebonden risico als functie van de afstand, leiding 6", 40 bar



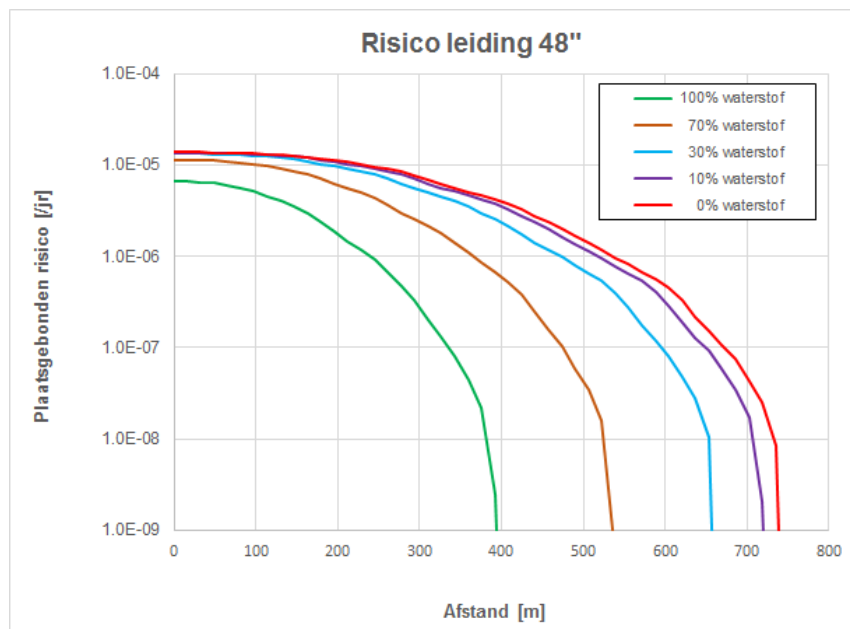
Figuur 6. Plaatsgebonden risico als functie van de afstand, leiding 12", 40 bar



Figuur 7. Plaatsgebonden risico als functie van de afstand, leiding 24", 66.2 bar



Figuur 8. Plaatsgebonden risico als functie van de afstand, leiding 36", 66.2 bar



Figuur 9. Plaatsgebonden risico als functie van de afstand, leiding 48", 80 bar

Tabel 4 geeft de afstanden tot de 10⁻⁶-contour in meters. Tabel 5 geeft de reductiefactor op de breukfrequentie van een leiding die voldoet aan de stand der techniek die nodig is om de plaatsgebonden risicocontour binnen de belemmeringenstrook (5 m aan weerszijden van de leiding) te brengen.

| Diameter inch | Druk bar | 0%H2 | 10% H2 | 30% H2 | 70% H2 | 100% H2 |
|---------------|----------|------|--------|--------|--------|---------|
| 6 | 40 | - | - | - | - | 11 |
| 12 | 40 | 48* | 50 | 54 | 62 | 65 |
| 24 | 66.2 | 271* | 263 | 245 | 204 | 156 |
| 36 | 66.2 | 421* | 407 | 375 | 301 | 205 |
| 48 | 80 | 536* | 517 | 471 | 365 | 239 |

Tabel 4. Afstanden tot de 10⁻⁶-contour in meters

* Alleen ter vergelijking; deze gevallen worden met CAROLA berekend.

| Diameter inch | Druk bar | 0%H2 | 10% H2 | 30% H2 | 70% H2 | 100% H2 |
|--|----------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 6 | 40 | 0.5* | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 1.1 |
| 12 | 40 | 1.3* | 1.4 | 1.5 | 2.0 | 2.9 |
| 24 | 66.2 | 5.7* | 5.8 | 5.8 | 6.1 | 6.1 |
| 36 | 66.2 | 12.7* | 12.6 | 12.2 | 10.7 | 7.0 |
| 48 | 80 | 13.7* | 13.6 | 13.3 | 11.3 | 6.6 |
| Huidige benadering (Safeti-nl 6.54 met gereduceerde uitstroomsnelheid) | | | | | | |
| 6 | 40 | | | | | 1.5 |
| 12 | 40 | | | | | 3.1 |

Tabel 5. Benodigde reductiefactor breukfrequentie voor plaatsgebonden risico 10^{-6} op de leiding

* Alleen ter vergelijking; deze gevallen worden met CAROLA berekend.

Conclusies

- De huidige aanpak (SAFETI-NL 654 met luchtinmenging) geeft voor de 6" 40 bar leiding een wat grotere 10^{-6} -afstand, voor de 12" 40 bar leiding een wat kleinere dan de met SAFETI-NL 8 berekende afstand.
- Om het plaatsgebonden risico voor waterstof op 5 m van de leiding terug te brengen tot 10^{-6} is een reductie van de breukkans t.o.v. de stand der techniek ($3.7 \cdot 10^{-5}$ /km.jr) nodig van een factor 1-7 (7 voor de grotere diameters).
- Gebaseerd op dezelfde breukfrequentie is de PR6 van waterstof voor 6 en 12" groter dan die voor methaan; voor grotere diameters kleiner.
- Wanneer wordt geabstraheerd van de invloed van de kans op ontsteking en dus alleen wordt gekeken naar het verschil in stofeigenschappen is het plaatsgebonden risico op de leiding voor waterstof ca. een factor 2 kleiner dan voor methaan.
- Voor diameters groter dan 24 inch is het plaatsgebonden risico van waterstof voor alle afstanden kleiner dan voor aardgas.

5 Verschillen tussen PIPESAFE en Safeti-nl 8

In figuur 1 is al aangegeven dat PIPESAFE en Safeti-nl in de verschillende deelmodellen andere keuzes maken. Om enig inzicht te geven in de verschillen “onderweg” zijn in bijlage 4 een aantal tussenresultaten opgenomen. De hoofdtekst beperkt zich tot de vergelijking van de uitkomsten voor het plaatsgebonden risico.

In paragraaf 5.1 en 5.2 is de frequentie van een volledige leidingbreuk gelijk aan $3.7 \cdot 10^{-5}$ /km.jr. Dit is de waarde voor een chemicaliënleiding die voldoet aan de stand der techniek [2]. Conform module D van de handleiding wordt deze frequentie toegepast voor ondergrondse waterstofleidingen. Voor ondergrondse aardgastransportleidingen wordt de frequentie van een volledige leidingbreuk berekend met de PIPESAFE module FFREQ. Paragraaf 5.3 gaat in op de verschillen die ontstaan wanneer de breukfrequentie van aardgastransportleidingen wordt gehanteerd.

5.1 PR6 en PR_max PIPESAFE en SAFETI-NL 8

Tabel 6 geeft de afstanden tot het plaatsgebonden risico 10^{-6} (PR6) berekend met PIPESAFE en Safeti-nl met dezelfde kansen op breuk en ontsteking. Het verschil tussen de uitkomsten is terug te voeren op verschillen in de modellen. Het plaatsgebonden risico op de leiding wordt aangeduid met PR_max.

| | PIPESAFE | | SAFETI-NL 8 | |
|-------------------|----------|--------------------|-------------|--------------------|
| | PR6 | PR_max | PR6 | PR_max |
| H2 | | | | |
| 6 inch, 40 bar | 28 | 2.3 ^{E-6} | 11 | 1.1 ^{E-6} |
| 12 inch, 40 bar | 65 | 4.5 ^{E-6} | 65 | 2.9 ^{E-6} |
| 24 inch, 66.2 bar | 169 | 1 ^{E-5} | 156 | 6.1 ^{E-6} |
| 36 inch, 66.2 bar | 257 | 1.4 ^{E-5} | 205 | 7 ^{E-6} |
| 48 inch, 80 bar | 346 | 1.9 ^{E-5} | 239 | 6.6 ^{E-6} |
| | | | | |
| CH4 | | | | |
| 6 inch, 40 bar | - | 5.1 ^{E-7} | - | 4.6 ^{E-7} |
| 12 inch, 40 bar | 42 | 1.3 ^{E-6} | 48 | 1.3 ^{E-6} |
| 24 inch, 66.2 bar | 180 | 5 ^{E-6} | 271 | 5.7 ^{E-6} |
| 36 inch, 66.2 bar | 300 | 1.3 ^{E-5} | 421 | 1.3 ^{E-5} |
| 48 inch, 80 bar | 411 | 1.7 ^{E-5} | 536 | 1.4 ^{E-5} |

Tabel 6. Afstand tot plaatsgebonden risico 10^{-6} berekend met PIPESAFE en Safeti-nl

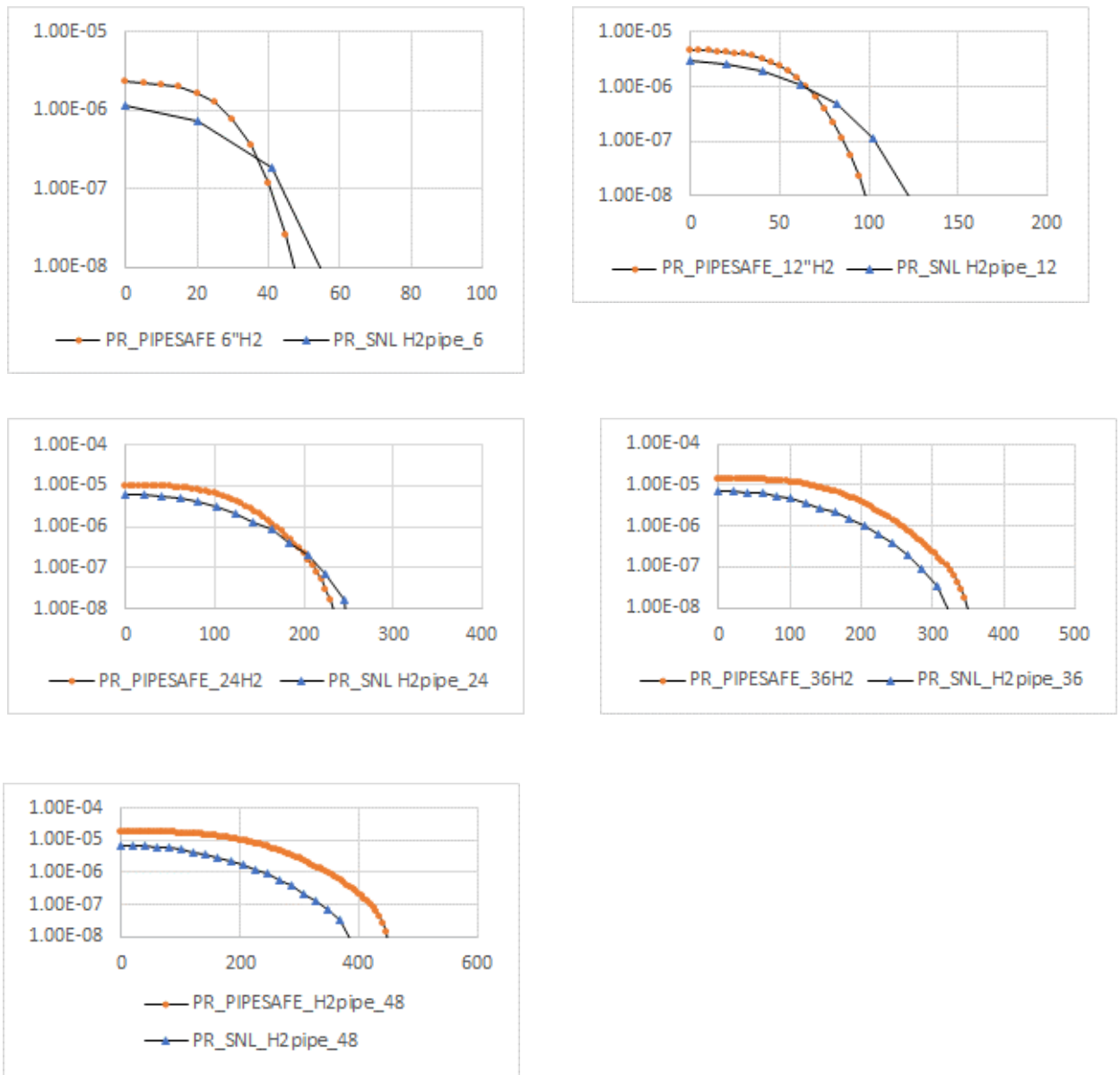
Conclusies

- Voor waterstof komt de afstand tot 10^{-6} tot een diameter van 24 inch tussen PIPESAFE en SAFETI-NL 8 ongeveer overeen. Voor grotere diameters berekent SAFETI-NL 8 een kleinere contourafstand dan PIPESAFE.
- Voor aardgas is voor 6 en 12 inch de contourafstand voor beide modellen ongeveer gelijk. Voor grotere diameters is de SAFETI-NL 8 afstand groter dan die van PIPESAFE.

5.2 Vergelijking PR-x curves

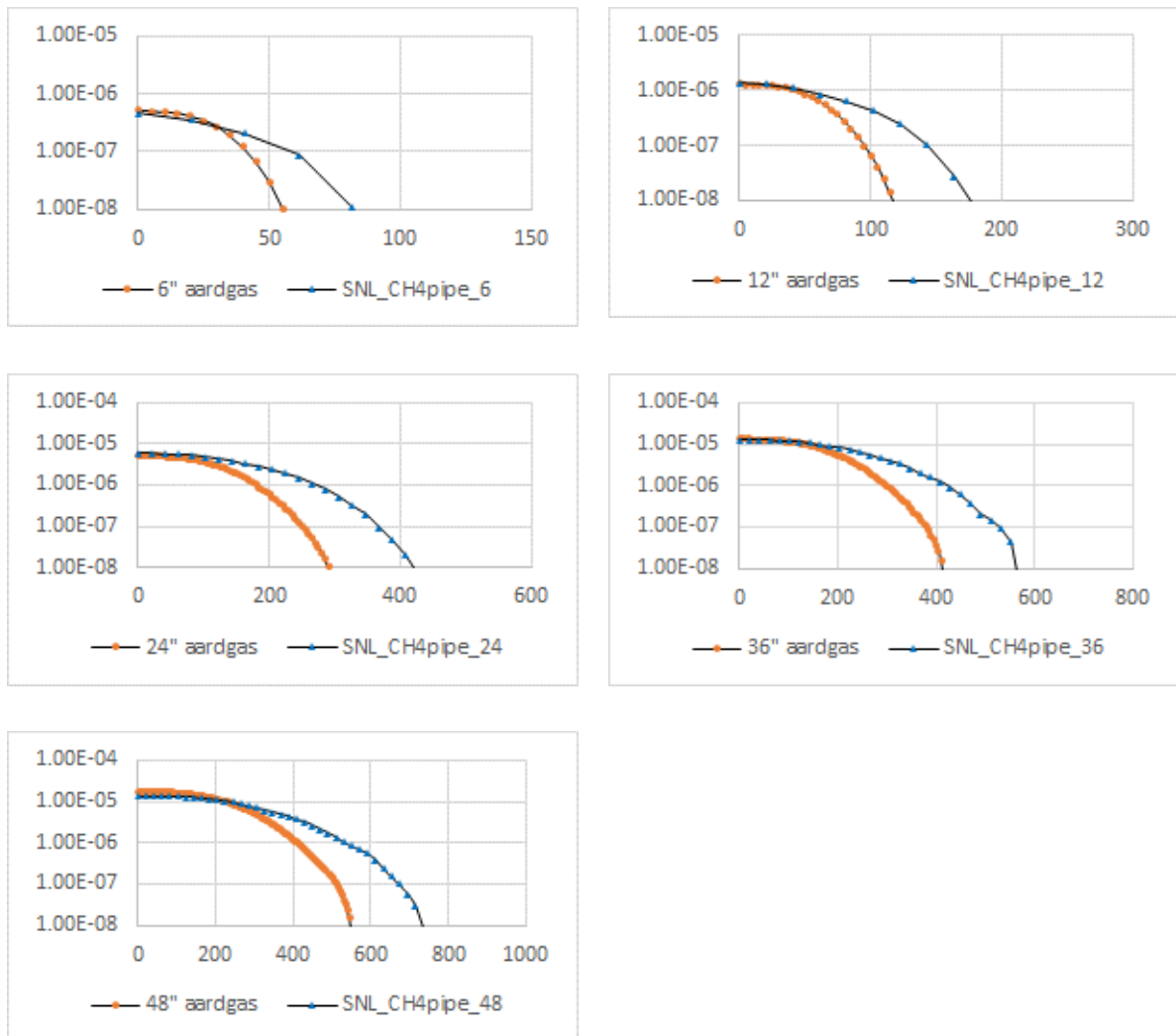
Waar de vorige paragraaf alleen de 10^{-6} -afstanden toonde, geeft deze paragraaf het plaatsgebonden risico als functie van de afstand voor waterstof en aardgas.

5.2.1 PIPESAFE-vs. SAFETI-NL H2



Figuur 10. PR-x-curves waterstof

5.2.2 PIPESAFE-H-gas vs. SAFETI-NL CH4



Figuur 11. PR-x-curves H-gas/CH₄

5.3 Invloed breukfrequentie

5.3.1 Ondergrondse buisleiding met waterstof

De frequenties voor breuk en lek van een ondergrondse chemicaliënleiding die voldoet aan de stand der techniek zijn opgenomen in module D van de handleiding [2]. De bijdrage van zes groepen van oorzaken is gegeven in tabel 7.

| Faaloorzaak | Frequentie (/km.jr) | | | Aandeel % | |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|------|
| | Breuk | lek | Totaal | Breuk | Lek |
| Beschadiging door derden | $1.77 \cdot 10^{-5}$ | $2.63 \cdot 10^{-5}$ | $4.4 \cdot 10^{-5}$ | 47.9 | 21.9 |
| Mechanisch | $7.96 \cdot 10^{-6}$ | $3.86 \cdot 10^{-5}$ | $4.66 \cdot 10^{-5}$ | 21.5 | 32.2 |
| Inwendige corrosie | $1.41 \cdot 10^{-6}$ | $1.17 \cdot 10^{-5}$ | $1.31 \cdot 10^{-5}$ | 3.8 | 9.8 |
| Uitwendige corrosie | $4.25 \cdot 10^{-6}$ | $3.52 \cdot 10^{-5}$ | $3.95 \cdot 10^{-5}$ | 11.5 | 29.3 |
| Natuurlijke oorzaken | $2.26 \cdot 10^{-6}$ | $3.6 \cdot 10^{-6}$ | $5.86 \cdot 10^{-6}$ | 6.1 | 3.0 |
| Operationeel | $3.40 \cdot 10^{-6}$ | $4.56 \cdot 10^{-6}$ | $7.96 \cdot 10^{-6}$ | 9.2 | 3.8 |
| Totaal | $3.7 \cdot 10^{-5}$ | $1.2 \cdot 10^{-4}$ | $1.57 \cdot 10^{-4}$ | 100 | 100 |

Tabel 7. Frequenties en bijdragen faaloorzaken [2]

Voor elke groep van faaloorzaken geeft de handleiding beheersmaatregelen en bijbehorende reductiefactoren voor de bijdrage van die groep. Een significante reductie vergt meestal aanvullende beheersmaatregelen in alle groepen. Tabel 8 geeft een voorbeeld.

| Faaloorzaak | Frequentie | Maatregel | Reductie factor | Frequentie | Reductie factor |
|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| Beschadiging door derden | $1.77 \cdot 10^{-5}$ | Lint plus 1.3 m dekking | 9.0 | $3.51 \cdot 10^{-6}$ | |
| Mechanisch | $7.96 \cdot 10^{-6}$ | ILI plus defectanalyse en reparatie | 10 | $7.96 \cdot 10^{-7}$ | |
| Inwendige corrosie | $1.41 \cdot 10^{-6}$ | Corrosiebewaking | 10 | $1.41 \cdot 10^{-7}$ | |
| Uitwendige corrosie | $4.25 \cdot 10^{-6}$ | Buismateriaal niet corrosief | ∞ | 0 | |
| Natuurlijke oorzaken | $2.26 \cdot 10^{-6}$ | Zettingsevaluatie | 10 | $2.26 \cdot 10^{-7}$ | |
| Operationeel | $3.40 \cdot 10^{-6}$ | Overdrukbeveiliging SIL +1 | 10 | $3.40 \cdot 10^{-7}$ | |
| Totaal | $3.7 \cdot 10^{-5}$ | | | $5.02 \cdot 10^{-6}$ | 7.4 |

Tabel 8. Voorbeeld verwerken reductiefactoren

Zo kan een waterstofleiding met behulp van maatregelen worden ingepast in de omgeving.

5.3.2 Ondergrondse buisleiding met aardgas

Voor een ondergrondse aardgastransportleiding wordt de breukfrequentie berekend met de module FFREQ uit Pipesafe. Tabel 9 toont de berekende breukfrequenties voor de hier doorgerekende gevallen. De genoemde reductiefactoren zijn vermenigvuldigingsfactoren. Voor diameters groter dan 24 inch zijn de berekende breukfrequenties ca. 2 grootteordes kleiner dan de basisfrequentie voor een chemicaliënleiding.

| Diameter (inch), druk (bar) | Breukfrequentie (/km.jr) | Reductiefactor t.o.v. stand der techniek chemicaliënleiding ($3.7 \cdot 10^{-5}$ /km.jr) |
|--------------------------------|-----------------------------|--|
| 6, 40 | $2.00 \cdot 10^{-5}$ | 0.53 |
| 12, 40 | $2.95 \cdot 10^{-5}$ | 0.8 |
| 24, 66 | $1.23 \cdot 10^{-6}$ | 0.03 |
| 36, 66 | $3.81 \cdot 10^{-7}$ | 0.01 |
| 48, 80 | $1.83 \cdot 10^{-8}$ | 0.0005 |

Tabel 9. Breukfrequentie ondergrondse aardgastransportleiding¹

De handleiding geeft in module B maatregelen en bijbehorende reductiefactoren voor de kans op schade door derden in vijf clusters. De totale reductiefactor is het product van de deelfactoren.

| Cluster | Benaming | Voorbeeld | Factor |
|-----------|-------------------------------------|-------------------------------|--------|
| Cluster 1 | Regelgeving en casuïstiek | WION-wet | 0.4 |
| Cluster 2 | Afdekking met beschermend materiaal | Lint plus betonplaten | 0.033 |
| Cluster 3 | Beheermaatregelen | Graven/boren verboden | 0.1 |
| Cluster 4 | Fysieke barrières op maaiveld | Dijklichaam | 0.1 |
| Cluster 5 | Overig | Strikte begeleiding plus WION | 0.33 |

Tabel 10. Voorbeelden van reductiefactoren per cluster [2]

5.3.3 Invloed breukfrequentie en effectmodellering gecombineerd

De toepassing van de breukfrequenties voor ondergrondse aardgastransportleidingen leidt tot kleinere afstanden tot de 10^{-6} -contour en kleinere reductiefactoren benodigd om de 10^{-6} -contour binnen de belemmeringsstrook te brengen. Deze waarden worden getoond in tabel 11 voor waterstof en in tabel 12 en tabel 13 voor waterstof-aardgas mengsels.

¹ De getoonde breukfrequenties zijn berekend inclusief de reductiefactoren 2.5 (WION), 1.2 (verscherpt toezicht) en 2.8 (Gasunie casuïstiek), totaal 8.4, zie [2].

| | Pipesafe breukfrequentie | | Mod D breukfrequentie | |
|--|--|-----------|-----------------------|-----------|
| | Afstand tot 10 ⁻⁶ contour (m) | | | |
| Diameter (inch), druk (bar) | SNL effect | PS effect | SNL effect | PS effect |
| 6, 40 | 0 | 16 | 11 | 28 |
| 12, 40 | 58 | 62 | 65 | 65 |
| 24, 66 | 0 | 0 | 156 | 169 |
| 36, 66 | 0 | 0 | 205 | 257 |
| 48, 80 | 0 | 0 | 239 | 346 |
| Benodigde reductiefactoren breukfrequentie voor 10 ⁻⁶ binnen de belemmeringenstrook | | | | |
| 6, 40 | Geen | 1.2 | 1.1 | 2.3 |
| 12, 40 | 2.3 | 3.6 | 2.9 | 4.5 |
| 24, 66 | Geen | Geen | 6.1 | 10.1 |
| 36, 66 | Geen | Geen | 7.0 | 14.2 |
| 48, 80 | Geen | Geen | 6.6 | 18.6 |

Tabel 11. Invloed frequentie en risicomodellering gecombineerd voor waterstof

Toelichting:

| | |
|--------------------------|---|
| Pipesafe breukfrequentie | Zie tabel 9 |
| Mod D breukfrequentie | 3.7.10 ⁻⁵ /km.jr [2] |
| SNL effect | Effect- en risicoberekening met Safeti-nl 8 |
| PS effect | Effect- en risicoberekening met Pipesafe |

| Diameter inch | Druk bar | 0%H2 *) | 10% H2 | 30% H2 | 70% H2 | 100% H2 |
|---------------|----------|---------|--------|--------|--------|---------|
| 6 | 40 | - | - | - | - | - |
| 12 | 40 | 25 | 30 | 36 | 50 | 58 |
| 24 | 66.2 | - | - | - | - | - |
| 36 | 66.2 | - | - | - | - | - |
| 48 | 80 | - | - | - | - | - |

 Tabel 12. Afstanden tot de 10⁻⁶-contour in meters, breukfrequentie Pipesafe

* Alleen ter vergelijking; deze gevallen worden met CAROLA berekend.

| Diameter inch | Druk bar | 0%H2 *) | 10% H2 | 30% H2 | 70% H2 | 100% H2 |
|---------------|----------|---------|--------|--------|--------|---------|
| 6 | 40 | Geen | Geen | Geen | Geen | Geen |
| 12 | 40 | 1.1 | 1.1 | 1.2 | 1.6 | 2.3 |
| 24 | 66.2 | Geen | Geen | Geen | Geen | Geen |
| 36 | 66.2 | Geen | Geen | Geen | Geen | Geen |
| 48 | 80 | Geen | Geen | Geen | Geen | Geen |

Tabel 13. Benodigde reductiefactor breukfrequentie voor plaatsgebonden risico 10^{-6} op de leiding, breukfrequentie Pipesafe

* Alleen ter vergelijking; deze gevallen worden met CAROLA berekend.

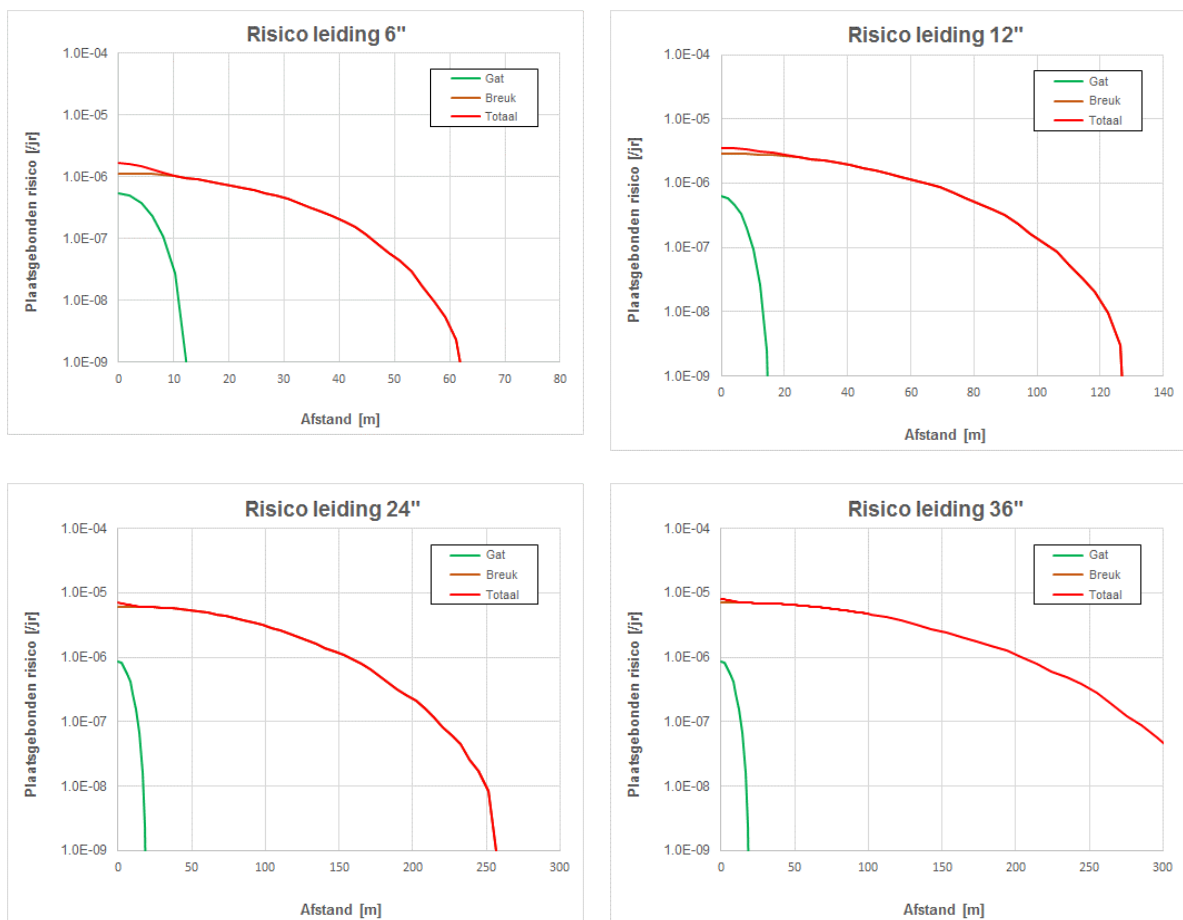
6 Invloed lekscenario

In bovenstaande berekeningen voor het plaatsgebonden risico is de bijdrage van het lekscenario verwaarloosd. In dit hoofdstuk wordt de bijdrage van het lekscenario in beeld gebracht.

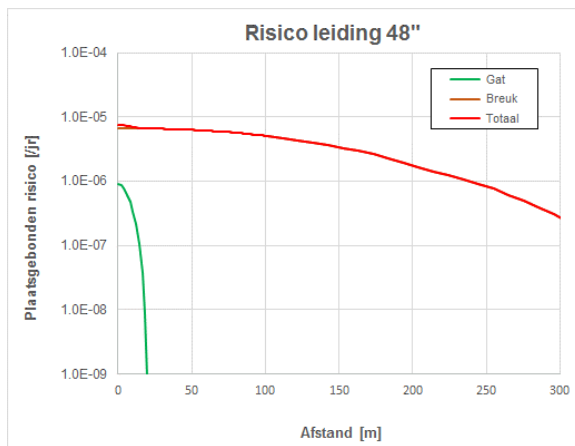
Safeti-nl biedt de optie de locatie van het lek te specificeren (top, middle, bottom). Voor deze toepassing is het scenario "puncture top" uitgewerkt. De meest waarschijnlijke oorzaak van een lekkage is immers inwerking door derden.

Het lekscenario is voorgeschreven in de handleiding [2]: een gat met een diameter van 10% van de inwendige leidingdiameter met een maximum van 20 mm. De kenmerken van de uitstroming en vlam zijn gegeven in bijlage 6.

De afstand tot 100% overlijden is kleiner dan 2.2 m, de afstand tot 1% overlijden varieert van 11 tot 17 m, zodat het lekscenario een beperkte bijdrage aan het risico zal leveren op de eerste 10 m. Dit leidt tot een klein "bobbeltje" op de PR-x-curve, zoals getoond in figuur 12 en figuur 13. De ligging van de 10^{-6} -contour wordt niet beïnvloed.



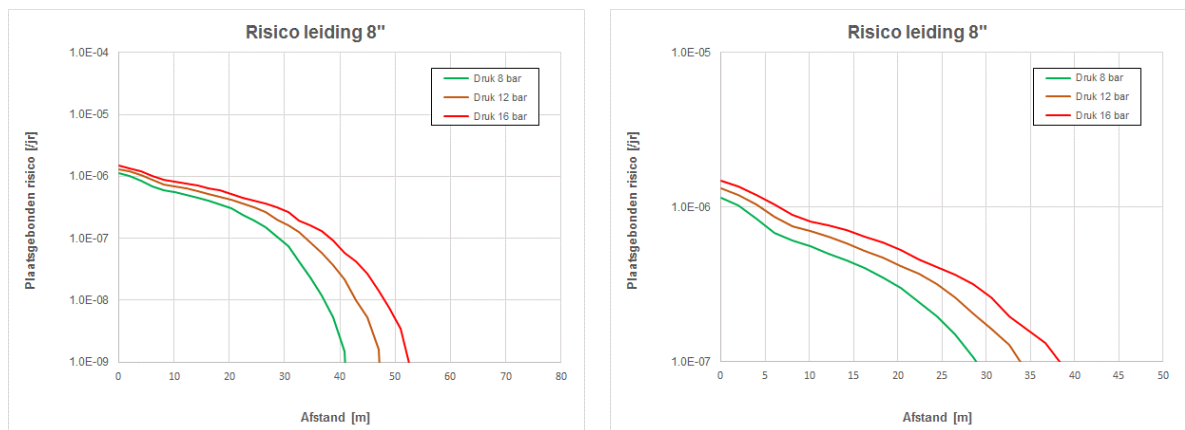
Figuur 12. PR-x-curves met lekscenario toegevoegd.



Figuur 13. PR-x-curve met lekscenario toegevoegd.

7 Waterstoftransport bij 8, 12 en 16 bar

In de regeling externe veiligheid buisleidingen is het toepassingsgebied bepaald met een minimale werkdruk van 16 bar. Om de gevoeligheid van de resultaten voor deze waarde te onderzoeken zijn berekeningen uitgevoerd voor een fictieve leiding met een diameter van 8 inch en werkdrukken van respectievelijk 8, 12 en 16 bar. De kenmerken van het breukscenario zijn weergegeven in bijlage 7. Figuur 14 toont de resultaten.



Figuur 14. PR-x-curves 8\"leiding met 8, 12 en 16 bar werkdruk

Het lekscenario zorgt ervoor dat een kleine 10^{-6} -contour ontstaat van respectievelijk 2.2, 4.5 en 6.5 m voor de werkdrukken 8, 12 en 16 bar. Het maximale plaatsgebonden risico bedraagt respectievelijk $1.1 \cdot 10^{-6}$, $1.3 \cdot 10^{-6}$ en $1.5 \cdot 10^{-6}$

8 Conclusies

8.1 De modellen

- De verschillen in de submodellen tussen Safeti-nl en PIPESAFE (uitstroming, kraterafmeting, luchtinmenging, vlamstructuur en stralingsfractie) leiden tot een vergelijkbare vorm van het verloop van het plaatsgebonden risico met de afstand.
- De verhouding tussen het plaatsgebonden risico op de leiding, berekend met een PIPESAFE effectberekening, en het plaatsgebonden risico op de leiding, berekend met een Safeti-nl effectberekening, bedraagt voor waterstof een factor 1.6-2.8.
- Voor aardgas is die verhouding kleiner. De verhouding tussen het plaatsgebonden risico op de leiding, berekend met een PIPESAFE effectberekening, en het plaatsgebonden risico op de leiding, berekend met een Safeti-nl effectberekening, bedraagt voor aardgas een factor 0.9-1.3.
- Omdat de vlamstralingsmodule van PIPESAFE niet is ontwikkeld voor waterstof wordt de waterstofvlam in PIPESAFE benaderd met een equivalente aardgasvlam. De verbrandingswarmte van waterstof per kg is 2.69 maal zo groot als die van aardgas. Het equivalente uitstroomdebiet voor aardgas wordt daarom berekend als 2.69 maal het berekende waterstofdebiet, zodat een gelijk uitstromend vermogen wordt verondersteld. De aanname bij deze werkwijze is dat bij gelijk uitgestroomd vermogen de stralingskarakteristieken van de vlam hetzelfde zijn. Bij een vergelijking van de warmtestralingsintensiteit op een bepaalde afstand van een jefire van waterstof met een equivalente jefire van aardgas blijkt deze aanpak voldoende nauwkeurig voor risicoberekening.
 - Voor afstanden tot 40 m kunnen weliswaar verschillen bestaan in de berekende warmtestralingsintensiteit op een bepaalde plaats, maar die verschillen zijn uit oogpunt van risico minder relevant. De stralingsintensiteit is dan immers zo hoog dat de kans op overlijden vrijwel gelijk is aan 1.
 - Voor afstanden tussen 40 en 80 m hebben twee grootschalige experimenten aangetoond dat de veronderstelling “gelijk uitgestroomd vermogen = gelijke stralingsintensiteit op afstand x” correct is.
 - Voor afstanden groter dan 80 m convergeren de warmtestralingsintensiteiten van beide jefires naar dezelfde waarde.
- Het jefire model in Safeti-nl is een voor de verticale uitstroming van koolwaterstoffen uit bovengrondse leidingen gevalideerd vlammodel (Chamberlain 1987, [12]). Het model is niet gevalideerd voor krateruitstromingen waarbij lucht (zuurstof) een groot bestanddeel van de massastroom uitmaakt. De invoerde massastroom in dit model is het berekende waterstofdebiet. De in de krater bijgemengde luchtstroom is in het jefire-model niet ingebracht. De door het model ondanks de in de krater gedissipeerde impuls berekende lift-off wordt bij breuk van ondergrondse transportleidingen niet waargenomen [13].
 - Voor afstanden tot een stralingsniveau van ca. 50 kW/m² is er een groot verschil in de berekende warmtestralingsintensiteit op een bepaalde plaats. Dit betreft afstanden van ca. 20 m voor een leidingdiameter van 6 inch tot ca. 160 m voor

- een leidingdiameter van 48 inch. Omdat de kans op overlijden in dit gebied vrijwel 1 is, zijn er geen grote verschillen in het berekende risico.
- o Voor grotere afstanden convergeren de warmtestralingsintensiteiten van beide modellen naar dezelfde waarde.

8.2 De uitkomsten

8.2.1 Algemeen

De effecten van de breuk van een ondergrondse waterstofleiding zijn kleiner dan voor een ondergrondse aardgasleiding. Beide modellen, zowel PIPESAFE als Safeti-nl geven deze uitkomst. Als voorbeeld geeft tabel 14 de afstanden tot 10 kW/m², de grens van huidige invloedsgebied, tot een overlijdenskans van 1%.

| Diameter (inch) | Afstand tot 10 kW/m ² weersklasse D5 (m) | | | |
|-----------------|---|-----------|----------|-----------|
| | Safeti-nl | | PIPESAFE | |
| | Methaan | Waterstof | Aardgas | Waterstof |
| 6 | 93 | 57 | 63 | 48 |
| 12 | 186 | 120 | 131 | 101 |
| 24 | 433 | 236 | 299 | 237 |
| 36 | 567 | 295 | 420 | 352 |
| 48 | 690 | 343 | 610 | 453 |

Tabel 14. Afstanden tot 10 kW/m² bij weersklasse D5

Het is echter niet zo dat het plaatsgebonden risico van de breuk van een ondergrondse waterstofleiding altijd kleiner is dan van een ondergrondse aardgasleiding. De uitkomsten van de risicoberekening voor een ondergrondse transportleiding van waterstof zijn niet alleen afhankelijk van de effecten, maar ook van de breukfrequentie van de leiding en van de ontstekingskans.

De breukfrequentie van een ondergrondse waterstofleiding die voldoet aan de stand der techniek is 3.7.10⁻⁵ per kilometer per jaar. Deze waarde is onafhankelijk van diameter en druk en voorgeschreven voor ondergrondse chemicaliënleidingen in de handleiding risicoberekeningen BevB module D. De breukfrequentie voor ondergrondse aardgastransportleidingen wordt berekend en is afhankelijk van diameter, druk, diepteligging en staalkwaliteit. Deze werkwijze wordt voorgeschreven in de handleiding risicoberekeningen BevB module B. De verhouding tussen de breukfrequentie van een chemicaliënleiding en een aardgastransportleiding met gelijke druk en diameter varieert voor leidingen met een diameter van 6 tot 48 inch van respectievelijk 1.9 tot 2000.

De ontstekingskans van een uitstroming van waterstof is altijd 1.0; de ontstekingskans van een uitstroming van aardgas is afhankelijk van diameter en druk. De verhouding tussen beide ontstekingskansen varieert voor leidingen met een diameter van 6 tot 48 inch van respectievelijk 5 tot 1.25. Voor waterstof-aardgas mengsels liggen de verhoudingen daar tussen in. Hierdoor kan het plaatsgebonden risico van een waterstofleiding groter zijn dan dat van een aardgasleiding ondanks het kleinere effect. Dit treedt met name op bij diameters tot en met 12 inch.

De afhankelijkheid van het plaatsgebonden risico van ontstekingskans en breukfrequentie maakt dat conclusies over bijvoorbeeld toename van het plaatsgebonden risico met diameter en druk of met het waterstofgehalte altijd beperkt geldig zijn in een bepaalde range. Daarom worden de conclusies in de volgende paragrafen per diameter beschreven. Hiermee wordt verwezen naar de in deze studie doorgerekende combinatie van diameter, druk, diepteligging enz.

Voor de breukfrequentie onderscheiden we de frequentie voor een chemicaliënleiding die voldoet aan de stand der techniek zoals beschreven in Module D van de handleiding risicoberekeningen BevB en de frequentie voor een aardgastransportleiding zoals berekend volgens module B van de handleiding.

Voor de effectmodellen onderscheiden we PIPESAFE en Safeti-nl 8.

De conclusies zijn hieronder in tabelvorm weergegeven. De term “plaatsgebonden risico op de leiding” wordt gebruikt om aan te geven welke extra reductie op de breukfrequentie door maatregelen gerealiseerd zou moeten worden om de plaatsgebonden risicocontour voor de grenswaarde 10^{-6} per jaar binnen de ruimtelijke belemmeringenstrook (4 of 5 m) te brengen. Bij voorbeeld: een plaatsgebonden risico op de leiding van $2.9 \cdot 10^{-6}$ per jaar vraagt een reductiefactor 2.9. De doorwerking van maatregelen in de reductiefactor op de breukfrequentie is hierboven toegelicht in paragraaf 5.3.

8.3 Breukfrequentie module D

Wanneer de breukfrequentie van een ondergrondse buisleiding gelijk is aan $3.7 \cdot 10^{-5}$ /km.jr, onafhankelijk van diameter, druk en andere eigenschappen van de leiding, (Dit is de waarde voor een leiding die voldoet aan de stand der techniek zoals beschreven in de handleiding risicoberekeningen BevB module D), gelden de volgende conclusies.

| Diameter (inch) | Safeti-nl effectberekening | PIPESAFE effectberekening |
|-----------------|---|---|
| 6 | <ul style="list-style-type: none"> - Tussen 0 en 40 m neemt het plaatsgebonden risico toe met het waterstofgehalte - Tussen 0 en 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding - Voor afstanden groter dan 40 m neemt het plaatsgebonden risico af met het waterstofgehalte. - Voor afstanden groter dan 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding - Bij een waterstofgehalte tussen 0 en 70% is het plaatsgebonden risico kleiner dan 10^{-6} - Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $1.1 \cdot 10^{-6}$ - Het lekscenario draagt niet bij aan de 10^{-6}-contour | <ul style="list-style-type: none"> - Tussen 0 en 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding - Voor afstanden groter dan 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding - Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $2.3 \cdot 10^{-6}$ |
| 8 | <ul style="list-style-type: none"> - Een nieuw te leggen leiding met een diameter van 8 inch en een werkdruk van 16 bar heeft een 10^{-6}-contour van ca. 6.5 m. Voor werkdrukken van 12 en 8 bar is dit respectievelijk 4.5 m en 2.2 m. Deze afstand wordt bepaald door het lekscenario | |
| 12 | <ul style="list-style-type: none"> - Tussen 0 en 70 m neemt het plaatsgebonden risico toe met het waterstofgehalte - Tussen 0 en 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding - Voor afstanden groter dan 70 m neemt het plaatsgebonden risico af met het waterstofgehalte. - Voor afstanden groter dan 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding - De afstand tot de 10^{-6}-contour neemt toe bij toenemend waterstofgehalte. - Bij 10% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $1.4 \cdot 10^{-6}$ - Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $2.9 \cdot 10^{-6}$ - Het lekscenario draagt niet bij aan de 10^{-6}-contour | <ul style="list-style-type: none"> - Tussen 0 en 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding - Voor afstanden groter dan 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding - Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $4.5 \cdot 10^{-6}$ |

| Diameter (inch) | Safeti-nl effectberekening | PIPESAFE effectberekening |
|-----------------|---|--|
| 24 | <ul style="list-style-type: none"> – Het plaatsgebonden risico neemt af met toenemend waterstofgehalte. – De afstand tot de 10⁻⁶-contour neemt af bij toenemend waterstofgehalte. – Het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding is kleiner dan van aardgas in de leiding – Bij 10% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 5.8.10⁻⁶ – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 6.1.10⁻⁶ – Het lekscenario draagt niet bij aan de 10⁻⁶-contour | <ul style="list-style-type: none"> – Tussen 0 en 160 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding – Voor afstanden groter dan 160 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 1.0.10⁻⁵ |
| 36 | <ul style="list-style-type: none"> – Het plaatsgebonden risico neemt af met toenemend waterstofgehalte. – De afstand tot de 10⁻⁶-contour neemt af bij toenemend waterstofgehalte. – Het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding is kleiner dan van aardgas in de leiding – Bij 10% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 1.3.10⁻⁵ – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 7.0.10⁻⁶ – Het lekscenario draagt niet bij aan de 10⁻⁶-contour | <ul style="list-style-type: none"> – Het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding is kleiner dan van aardgas in de leiding – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 1.4.10⁻⁵ |
| 48 | <ul style="list-style-type: none"> – Het plaatsgebonden risico neemt af met toenemend waterstofgehalte. – De afstand tot de 10⁻⁶-contour neemt af bij toenemend waterstofgehalte. – Het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding is kleiner dan van aardgas in de leiding – Bij 10% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 1.4.10⁻⁵ – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 6.6.10⁻⁶ – Het lekscenario draagt niet bij aan de 10⁻⁶-contour | <ul style="list-style-type: none"> – Het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding is kleiner dan van aardgas in de leiding – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding 1.9.10⁻⁵ |

Tabel 15. Conclusies bij breukfrequentie chemicaliënleiding volgens module D

8.4 Breukfrequentie module B

Wanneer de breukfrequentie van een ondergrondse buisleiding wordt berekend met de PIPESAFE module FFREQ, de rekenwijze voor een ondergrondse aardgastransportleiding zoals beschreven in de handleiding risicoberekeningen BevB module B, gelden de volgende conclusies.

- De berekende breukfrequentie voor een ondergrondse aardgastransportleiding is een factor 1.25 tot 2000 kleiner dan de breukfrequentie voor een ondergrondse chemicaliënleiding die voldoet aan de stand der techniek volgens module D. Hoe groter de diameter hoe groter de reductiefactor.

| Diameter (inch) | Safeti-nl effectberekening | PIPESAFE effectberekening |
|-----------------|--|--|
| 6 | <ul style="list-style-type: none"> – Tussen 0 en 40 m neemt het plaatsgebonden risico toe met het waterstofgehalte – Tussen 0 en 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding – Voor afstanden groter dan 40 m neemt het plaatsgebonden risico af met het waterstofgehalte. – Voor afstanden groter dan 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding – Het plaatsgebonden risico is voor zowel aardgas als waterstof kleiner dan 10^{-6} – | <ul style="list-style-type: none"> – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $1.2 \cdot 10^{-6}$ – Tussen 0 en 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding – Voor afstanden groter dan 40 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding – |
| 12 | <ul style="list-style-type: none"> – Tussen 0 en 70 m neemt het plaatsgebonden risico toe met het waterstofgehalte – Tussen 0 en 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding – Voor afstanden groter dan 70 m neemt het plaatsgebonden risico af met het waterstofgehalte. – Voor afstanden groter dan 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding – De afstand tot de 10^{-6}-contour neemt toe bij toenemend waterstofgehalte. – Bij 10% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $1.1 \cdot 10^{-6}$ | <ul style="list-style-type: none"> – Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $3.6 \cdot 10^{-6}$ – Tussen 0 en 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding groter dan van aardgas in de leiding – Voor afstanden groter dan 70 m is het plaatsgebonden risico van waterstof in de leiding kleiner dan van aardgas in de leiding |

| Diameter (inch) | Safeti-nl effectberekening | PIPESAFE effectberekening |
|-----------------|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> - Bij 100% waterstof is plaatsgebonden risico op de leiding $2.3 \cdot 10^{-6}$ - | |
| 24 | <ul style="list-style-type: none"> - Het plaatsgebonden risico is voor zowel aardgas als waterstof kleiner dan 10^{-6} - | <ul style="list-style-type: none"> - Het plaatsgebonden risico is voor zowel aardgas als waterstof kleiner dan 10^{-6} |
| 36 | <ul style="list-style-type: none"> - Het plaatsgebonden risico is voor zowel aardgas als waterstof kleiner dan 10^{-6} - | <ul style="list-style-type: none"> - Het plaatsgebonden risico is voor zowel aardgas als waterstof kleiner dan 10^{-6} |
| 48 | <ul style="list-style-type: none"> - Het plaatsgebonden risico is voor zowel aardgas als waterstof kleiner dan 10^{-6} - | <ul style="list-style-type: none"> - Het plaatsgebonden risico is voor zowel aardgas als waterstof kleiner dan 10^{-6} |

Tabel 16. Conclusies bij breukfrequentie aardgasleiding volgens module B

Referenties

1. AVIV 2019 Vergelijkende berekeningen waterstof/aardgas met PIPESAFE en Safeti-nl 3-7-2019
2. RIVM 2014 Handleiding risicoberekeningen buisleidingen versie 2.0
3. Gilisse M., Dröge M.T., Kuik G.R. 2008 Risicoanalyse aardgastransportleidingen, Gasunie DEI 2008.R.0939
4. Acton, M.R., Allason, D., Creitz, L.W., Lowesmith, B.J. 2010 Large scale experiments to study hydrogen pipeline fires, IPC2010-31391. In: International Pipeline Conference, Calgary, Canada.
5. Laheij G.M.H., Vliet A.A.C. van, Kooi E.S. 2008 Achtergronden bij de vervanging van zoneringsafstanden hoge druk aardgastransportleidingen van de N.V. Nederlandse Gasunie, RIVM rapport 620121001/2008
6. Acton M.R., Baldwin T.R., Jager E.R. 2002 Recent developments in the design and application of the Pipesafe risk assessment package for gas transmission pipelines, Proceedings of the IPC 2002, Calgary
7. Askar E. Schröder V., Schütz S., Semann A. 2016 Power-to-gas: safety characteristics of Hydrogen/natural gas mixtures, Chemical Engineering Transactions vol. 48, 2016, 397-402
8. Lowesmith B., Hankinson G. 2009 A risk assessment methodology for high pressure transmission pipelines conveying natural gas/hydrogen mixtures, Natural Hy, deliverable D64, R0075-WP2-R-0, Loughborough university, october 2009
9. Lowesmith B.J., Hankinson G. 2013 Large scale experiments to study fires following the rupture of high pressure pipelines conveying natural gas and natural gas/hydrogen mixtures. Process Safety Environ.Protect. 91, 101–111
10. Lowesmith B.J., Hankinson G., 2007 An overview of the nature of hydrocarbon jet fire hazards in the oil and gas industry and an simplified approach to assessing the hazards, Process safety

| | | | |
|-----|--|------|---|
| | Acton M.R., Chamberlain G. | | and environmental protection, Trans IChemE, part B May 2007 |
| 11. | Tebodin | 2019 | Onderzoek technische aspecten van waterstof |
| 12. | DNV GL | 2015 | Jet Fire, Theory manual PHAST/SAFETI |
| 13. | Cleaver R.P., Halford A.R. | 2015 | A model for the initial stages following rupture of a natural gas transmission pipeline, Process Safety and Environmental protection vol. 95 (2015) 202-214 |
| 14. | DNV GL | 2015 | Crater modelling for long pipelines Theory manual PHAST/SAFETI 8 |
| 15. | Cleaver R.P., Cumber P.S., Genillon P. | 2001 | A model to predict the characteristics of fires following the rupture of natural gas transmission pipelines, Trans. IChemE vol. 79 Part B January 2001 |
| 16. | DNV GL | 2015 | Gaspipes, pure vapour discharge from a long pipeline Theory manual PHAST/SAFETI 8 |
| 17. | Fairweather M., Jones W.P., Lindstedt R.P. | 1992 | Predictions of radiative transfer from a turbulent reacting jet in a cross-wind, Combustion and Flame, 89: 45-63, 1992 |

Bijlage 1. Waterstof Safeti-NL versie 8

| | | | | | | |
|---|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Input | | | | | | |
| Diameter | inch | 6 | 12 | 24 | 36 | 48 |
| Druk | bar | 40 | 40 | 66.2 | 66.2 | 80 |
| Buitendiameter | mm | 168.3 | 323.9 | 610 | 914 | 1219 |
| Wanddikte | mm | 4.8 | 5.2 | 9.3 | 11.8 | 18.7 |
| Binnendiameter | mm | 158.7 | 313.5 | 591.4 | 890.4 | 1181.6 |
| Gronddekking | m | 1.2 | 1.2 | 1.75 | 1.75 | 1.75 |
| Bronsterkte | | | | | | |
| Bronsterkte 0-20 s | kg/s | 15.9 | 77.1 | 553.6 | 1446.1 | 3360.5 |
| Krater diepte | m | 1.7 | 2.1 | 3.9 | 5.0 | 6.5 |
| Krater lengte | m | 15.6 | 17.6 | 23.7 | 28.5 | 30.8 |
| Krater breedte | m | 4.4 | 7.1 | 15.3 | 21.9 | 26.6 |
| Krater oppervlak | m ² | 59.1 | 99.8 | 246.7 | 384.3 | 475.2 |
| Bijgemengde lucht | kg/s | 19.4 | 94.3 | 676.6 | 1384.7 | 2235.2 |
| Snelheid | m/s | 129.5 | 132.9 | 204.5 | 288.7 | 423.7 |
| Temperatuur | oC | -76.7 | -83.6 | -98.6 | -100.6 | -103.8 |
| Jet fire weersklasse D-5.0 (dag) | | | | | | |
| Flame emissive power | kW/m ² | 240.0 | 305.7 | 350.0 | 350.0 | 350.0 |
| Fraction of emissivity | fraction | 0.25 | 0.25 | 0.22 | 0.19 | 0.16 |
| Jet velocity | m/s | 129.5 | 132.9 | 204.5 | 288.7 | 423.7 |
| Flame length | m | 49.1 | 94.7 | 207.6 | 300.8 | 413.1 |
| Frustum length | m | 44.3 | 85.3 | 181.3 | 257.2 | 346.8 |
| Frustum base width | m | 4.2 | 9.4 | 22.0 | 31.0 | 40.2 |
| Frustum tip width | m | 19.3 | 37.1 | 74.8 | 101.5 | 130.7 |
| Frustum lift off distance | m | 5.0 | 9.8 | 26.9 | 44.1 | 66.7 |
| Flame length in still air | m | 87.8 | 169.4 | 371.4 | 538.1 | 739.0 |
| Hole to flame angle | deg | 21.1 | 18.2 | 12.0 | 9.1 | 6.8 |
| Expanded Diameter | m | 1.1 | 2.4 | 4.9 | 6.7 | 8.3 |
| Plane angular rotation | deg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 kW/m ² | m | 9.3 | 30.0 | 46.0 | n.v.t. | n.v.t. |
| 10 kW/m ² | m | 57.3 | 119.6 | 235.7 | 295.0 | 342.9 |
| 3 kW/m ² | m | 102.6 | 214.0 | 449.9 | 601.7 | 758.9 |
| Jet fire weersklasse F-1.5 (nacht) | | | | | | |
| Flame emissive power | kW/m ² | 174.6 | 222.2 | 313.4 | 350.0 | 350.0 |
| Fraction of emissivity | fraction | 0.25 | 0.25 | 0.22 | 0.19 | 0.16 |
| Jet velocity | m/s | 129.5 | 132.9 | 204.5 | 288.7 | 423.7 |
| Flame length | m | 67.2 | 129.6 | 284.2 | 411.8 | 565.5 |
| Frustum length | m | 56.3 | 108.6 | 234.6 | 337.0 | 459.6 |
| Frustum base width | m | 5.0 | 10.8 | 23.9 | 32.9 | 41.8 |
| Frustum tip width | m | 21.2 | 40.7 | 84.4 | 118.1 | 157.6 |
| Frustum lift off distance | m | 10.9 | 21.1 | 49.7 | 74.9 | 106.0 |
| Flame length in still air | m | 87.2 | 168.3 | 369.2 | 534.8 | 734.5 |
| Hole to flame angle | deg | 6.3 | 5.5 | 3.6 | 2.7 | 2.0 |
| Expanded Diameter | m | 1.1 | 2.4 | 4.9 | 6.7 | 8.3 |
| Plane angular rotation | deg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 kW/m ² | m | n.v.t. | n.v.t. | n.v.t. | n.v.t. | n.v.t. |
| 10 kW/m ² | m | 26.6 | 69.9 | 187.8 | 270.1 | 323.3 |
| 3 kW/m ² | m | 93.3 | 199.0 | 473.5 | 680.8 | 873.5 |
| Plaatsgebonden risico | | | | | | |
| PR6 | m | 10.0 | 65.0 | 100.0 | 200.0 | 240.0 |
| PR7 | m | 43.0 | 105.0 | 216.0 | 280.0 | 335.0 |

| | | | | | | |
|-----|---|------|-------|-------|-------|-------|
| PR8 | m | 58.0 | 122.0 | 248.0 | 310.0 | 380.0 |
|-----|---|------|-------|-------|-------|-------|

Bijlage 2. Methaan Safeti-NL versie 8

| | | | | | | |
|---|-------------------|-------|-------|--------|--------|---------|
| Input | | | | | | |
| Diameter | inch | 6 | 12 | 24 | 36 | 48 |
| Druk | bar | 40 | 40 | 66.2 | 66.2 | 80 |
| Buitendiameter | mm | 168.3 | 323.9 | 610 | 914 | 1219 |
| Wanddikte | mm | 4.8 | 5.2 | 9.3 | 11.8 | 18.7 |
| Binnendiameter | mm | 158.7 | 313.5 | 591.4 | 890.4 | 1181.6 |
| Gronddekking | m | 1.2 | 1.2 | 1.75 | 1.75 | 1.75 |
| Bronsterkte | | | | | | |
| Bronsterkte 0-20 s | kg/s | 71.2 | 330.7 | 2398.1 | 6174.0 | 14493.3 |
| Krater diepte | m | 1.7 | 2.2 | 4.0 | 5.1 | 6.6 |
| Krater lengte | m | 15.7 | 17.8 | 24.1 | 29.0 | 30.4 |
| Krater breedte | m | 4.5 | 7.4 | 15.8 | 22.6 | 26.6 |
| Krater oppervlak | m ² | 60.9 | 103.8 | 256.3 | 400.8 | 478.0 |
| Bijgemengde lucht | kg/s | 87.0 | 404.2 | 2448.3 | 4558.3 | 6971.4 |
| Snelheid | m/s | 47.6 | 51.6 | 93.7 | 132.4 | 192.7 |
| Temperatuur | oC | -74.2 | -77.8 | -89.4 | -91.2 | -95.5 |
| Jet fire weersklasse D-5.0 (dag) | | | | | | |
| Flame emissive power | kW/m ² | 198.4 | 251.0 | 349.3 | 350.0 | 350.0 |
| Fraction of emissivity | fraction | 0.29 | 0.29 | 0.27 | 0.25 | 0.22 |
| Jet velocity | m/s | 47.6 | 51.6 | 93.7 | 132.4 | 192.7 |
| Flame length | m | 71.6 | 134.7 | 293.0 | 422.5 | 584.2 |
| Frustum length | m | 69.2 | 129.6 | 271.1 | 380.6 | 512.2 |
| Frustum base width | m | 7.3 | 17.0 | 56.8 | 85.0 | 114.9 |
| Frustum tip width | m | 32.1 | 60.1 | 122.2 | 165.8 | 212.9 |
| Frustum lift off distance | m | 2.9 | 5.9 | 23.7 | 43.8 | 73.7 |
| Flame length in still air | m | 128.1 | 240.9 | 524.2 | 755.8 | 1045.1 |
| Hole to flame angle | deg | 34.3 | 29.9 | 23.0 | 17.6 | 13.2 |
| Expanded Diameter | m | 1.4 | 2.8 | 5.5 | 7.4 | 9.3 |
| Plane angular rotation | deg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 kW/m ² | m | 39.2 | 83.1 | 196.6 | 215.1 | 205.4 |
| 10 kW/m ² | m | 92.9 | 185.5 | 432.6 | 567.3 | 690.2 |
| 3 kW/m ² | m | 157.3 | 314.4 | 735.2 | 997.5 | 1277.9 |
| Jet fire weersklasse F-1.5 (nacht) | | | | | | |
| Flame emissive power | kW/m ² | 120.9 | 155.3 | 249.4 | 309.3 | 350.0 |
| Fraction of emissivity | fraction | 0.29 | 0.29 | 0.27 | 0.25 | 0.22 |
| Jet velocity | m/s | 47.6 | 51.6 | 93.7 | 132.4 | 192.7 |
| Flame length | m | 98.0 | 184.3 | 401.1 | 578.4 | 799.7 |
| Frustum length | m | 87.1 | 162.8 | 341.5 | 484.6 | 661.2 |
| Frustum base width | m | 15.6 | 32.8 | 70.1 | 97.1 | 125.7 |
| Frustum tip width | m | 37.1 | 68.7 | 133.5 | 181.9 | 239.2 |
| Frustum lift off distance | m | 11.2 | 22.0 | 60.0 | 94.1 | 138.7 |
| Flame length in still air | m | 127.3 | 239.4 | 521.0 | 751.2 | 1038.7 |
| Hole to flame angle | deg | 14.0 | 11.7 | 7.0 | 5.3 | 4.0 |
| Expanded Diameter | m | 1.4 | 2.8 | 5.5 | 7.4 | 9.3 |
| Plane angular rotation | deg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 kW/m ² | m | 3.7 | 15.7 | 56.8 | 89.0 | 52.5 |
| 10 kW/m ² | m | 59.2 | 130.2 | 316.7 | 479.2 | 650.5 |
| 3 kW/m ² | m | 145.3 | 296.8 | 702.9 | 1042.6 | 1418.8 |
| Plaatsgebonden risico | | | | | | |
| PR6 | m | 0 | 50 | 260 | 450 | 530 |
| PR7 | m | 57 | 140 | 370 | 520 | 670 |

PR8

m

80

175

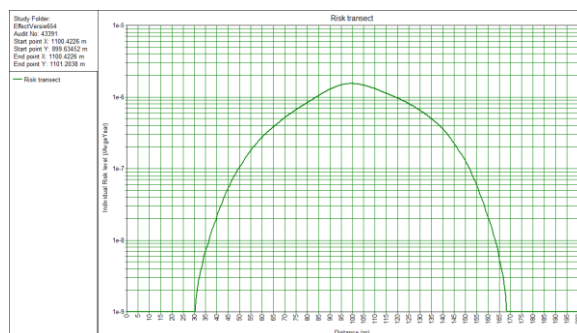
420

550

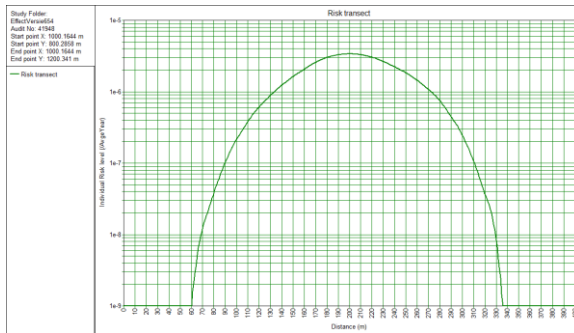
720

Bijlage 3. Waterstof Safeti-NL versie 6.54

| Input | | | |
|---|-------------------|--------|-------|
| Diameter | inch | 6 | 12 |
| Druk | bar | 40 | 40 |
| Buitendiameter | mm | 168.3 | 323.9 |
| Wanddikte | mm | 4.8 | 5.2 |
| Binnendiameter | mm | 158.7 | 313.5 |
| Grondekking | m | 1.2 | 1.2 |
| Bronsterkte | | | |
| Bronsterkte 0-20 s | kg/s | 15.3 | 74.2 |
| Krater diepte | m | | |
| Krater lengte | m | | |
| Krater breedte | m | | |
| Krater oppervlak | m ² | | |
| Bijgemengde lucht | kg/s | | |
| Snelheid | m/s | 41.0 | 69.0 |
| Temperatuur | oC | | |
| Jet fire weersklasse D-5.0 (dag) | | | |
| Flame emissive power | kW/m ² | 199.90 | 277.4 |
| Fraction of emissivity | fraction | 0.29 | 0.28 |
| Jet velocity | m/s | 41.0 | 69.0 |
| Flame length | m | 52.7 | 97.9 |
| Frustum length | m | 51.2 | 92.4 |
| Frustum base width | m | 3.7 | 7.8 |
| Frustum tip width | m | 23.7 | 42.6 |
| Frustum lift off distance | m | 1.7 | 5.9 |
| Flame length in still air | m | 94.2 | 175.0 |
| Hole to flame angle | deg | 28.6 | 23.5 |
| Expanded Diameter | m | 2.3 | 4.0 |
| Plane angular rotation | deg | 0 | 0 |
| 35 kW/m ² | m | 21.9 | 45.3 |
| 10 kW/m ² | m | 66.1 | 130.6 |
| 3 kW/m ² | m | 111.5 | 224.0 |
| Plaatsgebonden risico | | | |
| PR6 | m | 20 | 72 |
| PR7 | m | 52 | 110 |
| PR8 | m | 63 | 129 |



Figuur 15. Risico transect voor leiding 6



Figuur 16. Risico transect voor leiding 12

Bijlage 4 Verschillen PIPESAFE-Safeti-nl 8

1 Enkele tussenresultaten

1.1 Diversen

Deze bijlage bevat een aantal tussenresultaten uit de submodellen van de berekening .

Tabel 17 geeft een vergelijking van de resultaten van PIPESAFE en Safeti-nl 8. In de cellen van de tabel zijn steeds de resultaten weergegeven als [resultaat pipesafe]/[resultaat SAFETI-NL 8].

| | PIPESAFE/SAFETI-NL 8 | | | | | | | | |
|-------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|--------------|----------------|----------|---------------------|--------------|---------------|
| | Flow kg/s | Flow_ equiv kg/s | Vlam- lengte D5 m | SEP kW/m2 | Rad- frac | U m/s | 35 kW/m2 | 10 kW/m2 | 3 kW/m2 |
| H2 | | | | | | | | | |
| 6 inch, 40 bar | 12/15.9 | 32/15.9 | 34/49 | 350/240 | 0.17/ 0.25 | 345/130 | 25/9 | 48/57 | 82/103 |
| 12 inch, 40 bar | 57/77 | 153/77 | 76/95 | 350/306 | 0.16/ 0.25 | 345/133 | 48/30 | 101/120 | 179/214 |
| 24 inch, 66.2 bar | 434/553 | 1168/554 | 208/208 | 350/350 | 0.13/ 0.22 | 345/205 | 94/46 | 237/236 | 466/450 |
| 36 inch, 66.2 bar | 1153/1446 | 3107/1446 | 331/301 | 350/350 | 0.12/ 0.19 | 395/289 | 123/niet bereikt | 352/295 | >500/60 2 |
| 48 inch, 80 bar | 2686/3361 | 7236/3361 | 481/413 | 350/350 | 0.09/ 0.16 | 525/424 | 154/niet bereikt | 453/343 | >500/75 9 |
| | | | | | | | | | |
| Aardgas/CH4 | | | | | | | | | |
| 6 inch, 40 bar | 55/71 | | 46/72 | 350/198 | 0.17/ 0.29 | 345/48 | 32/39 | 63/93 | 108/157 |
| 12 inch, 40 bar | 283/331 | | 106/135 | 350/251 | 0.16/ 0.29/ | 345/52 | 58/83 | 131/186 | 245/314 |
| 24 inch, 66.2 bar | 2166/2398 | | 286/293 | 350/349 | 0.12/ 0.27 | 345/94 | 109/197 | 299/433 | >500/73 5 |
| 36 inch, 66.2 bar | 5573/6174 | | 439/423 | 350/350 | 0.1/0. 25 | 395/132 | 145/215 | 420/567 | >500/99 8 |
| 48 inch, 80 bar | 13126/144 93 | | 641/584 | 350/350 | 0.08/ 0.22 | 525/193 | 171/205 | >500/69 0 | >500/12 78 |

Tabel 17. *Vergelijking PIPESAFE-SAFETI-NL 8*

Toelichting rekenwijze PIPESAFE

Om de risicoberekeningen met PIPESAFE te kunnen uitvoeren is de uitstroming van waterstof getransformeerd in een equivalente hoeveelheid aardgas. Dit kan met gebruik making van het experimentele resultaat dat de warmtestraling als functie van de afstand bij gelijk uitgestroomd vermogen voor waterstof en aardgas ongeveer gelijk is vanaf ca. 40 m (zie o.a. Acton 2010 [4]). De gecorrigeerde flow (2.69 maal de berekende waterstofflow) is opgenomen in de kolom flow_equiv.

Conclusies

- Voor waterstof is de uitstroming gemiddeld over 0-20 seconden in Safeti-nl ca. 30% groter dan in PIPESAFE
- Voor methaan is de uitstroming gemiddeld over 0-20 seconden in Safeti-nl ca. 30% groter dan in PIPESAFE (H-gas) voor diameters 6" en 12"; voor grotere diameters is de uitstroming ca. 10% groter².
- De vlamlengte is voor diameters kleiner dan 24 inch in Safeti-nl groter, voor grotere diameters is de door PIPESAFE berekende lengte groter.
- Het jetfire model in Safeti-nl hanteert alleen de gasstroom waterstof als invoer voor de vlameigenschappen. De hoeveelheid ingemengde lucht heeft geen invloed daarop. Alleen de door de kratervorming gereduceerde uitstroomsnelheid wordt gebruikt in de berekening van de stralingsfractie.
- Beide rekenpakketten begrenzen de SEP op 350 kW/m².
- Stralingsfracties in Safeti-nl zijn een factor 1.5 à 2 groter dan in PIPESAFE. Dit is gerelateerd aan de uitstroomsnelheid (groter in PIPESAFE) en de kraterafmetingen (groter in Safeti-nl , zie volgende paragraaf).
- De afstand tot 35 kW/m² is in PIPESAFE groter dan in Safeti-nl (factor 1.5-2). Voor de grote diameters wordt in Safeti-nl dit stralingsniveau zelfs niet bereikt.
- De afstand tot 10 kW/m² is in PIPESAFE en Safeti-nl van vergelijkbare grootte voor diameters tot 24". Voor de grote diameters is de PIPESAFE afstand wat groter dan die van Safeti-nl .

² Pipesafe berekent de gemiddelde uitstroming als de totale uitgestroomde massa tot 20 seconden gedeeld door 20. Safeti-nl integreert de tijdsafhankelijke uitstroming tot 20 seconden en deelt die uitkomst door 20. De "Total expelled mass", die het programma ook uitvoert, geeft een afwijkende waarde (ca. 7% lager), maar wordt in de berekening niet gebruikt.

1.2 Kraterafmeting

| | 6 inch, 40 bar | 12 inch, 40 bar | 24 inch, 66.2 bar | 36 inch, 66.2 bar | 48 inch, 80 bar |
|---|----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| PIPESAFE waterstof en aardgas/SAFETI-NL 8 waterstof | | | | | |
| Crater depth m | 1.6/1.7 | 2.0/2.1 | 3.3/3.9 | 4.1/5.0 | 4.8/6.5 |
| Crater Length m | 14.6/15.6 | 14.6/17.6 | 15.8/23.7 | 16.0/28.5 | 16.3/30.8 |
| Crater Width m | 5.0/4.4 | 6.2/7.1 | 10.1/15.3 | 12.5/21.9 | 14.8/26.6 |

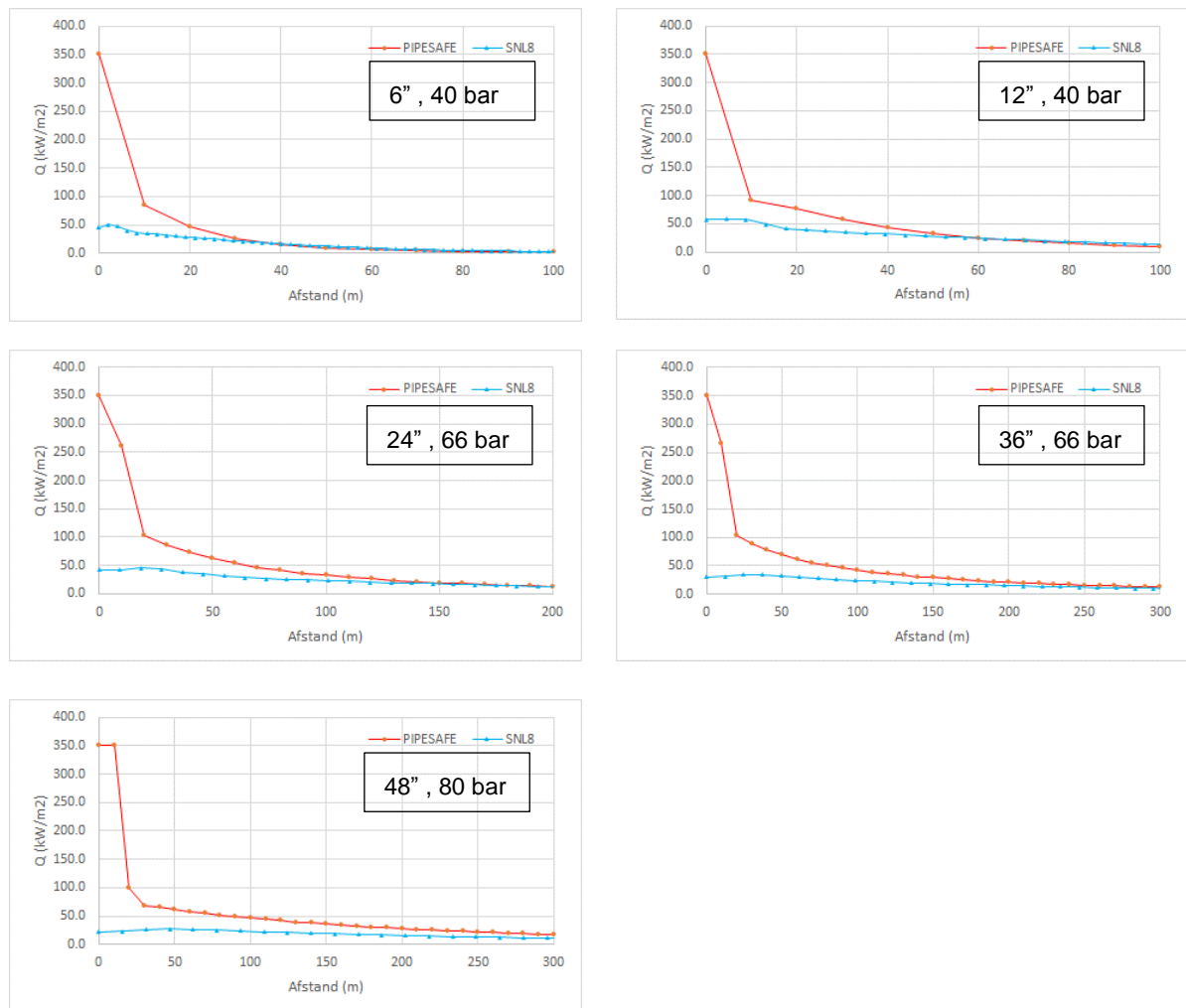
Conclusie

- De kraterafmetingen in Safeti-nl zijn voor kleine diameters vergelijkbaar met die van PIPESAFE. Voor de grotere diameters berekent Safeti-nl aanzienlijk grotere lengtes en breedtes.

1.3 Warmtestraling als functie van de afstand

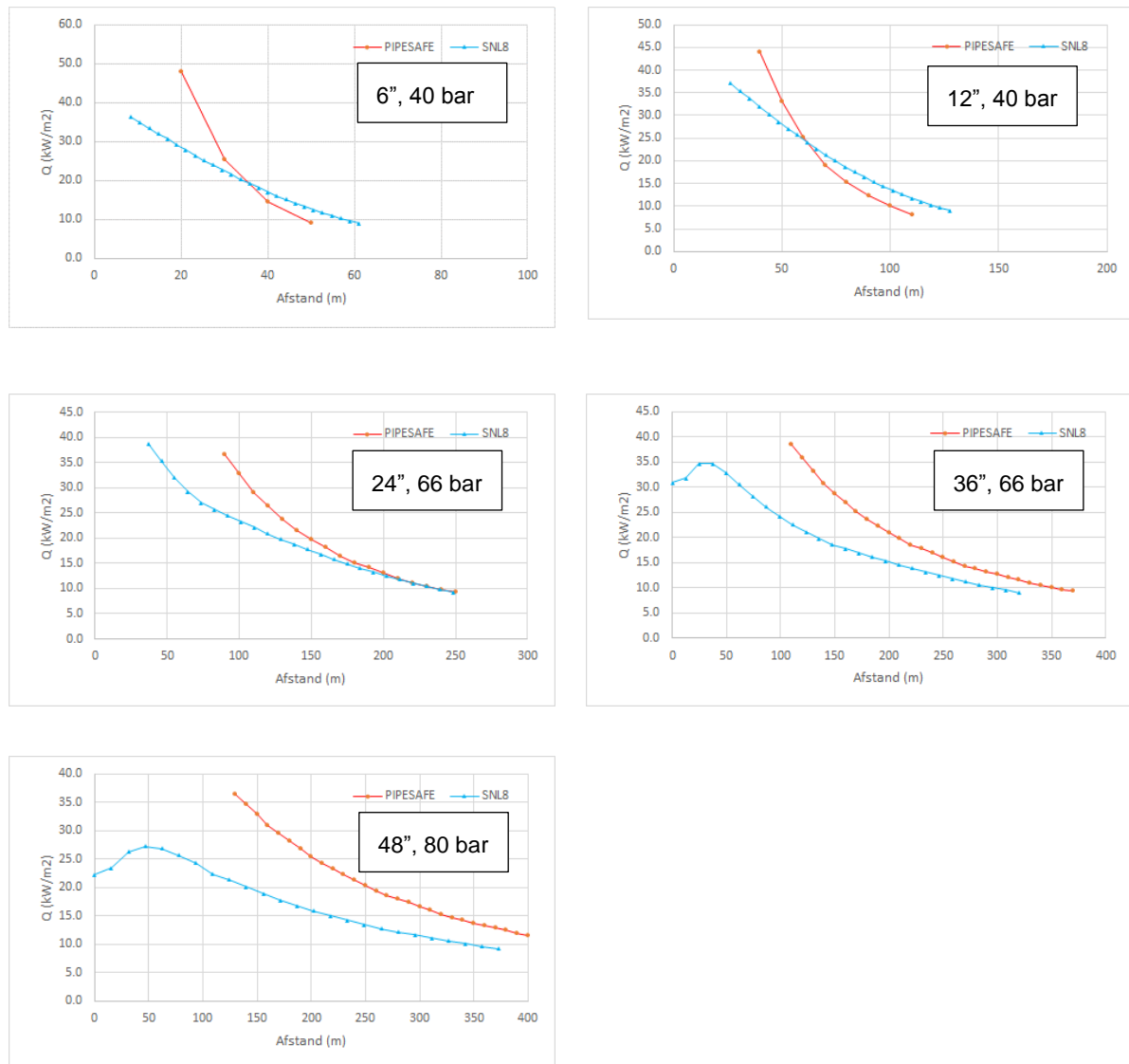
1.3.1 Waterstof

Figuur 17 geeft de vergelijking tussen de uitkomsten van de stralingsberekeningen van het breuksenario voor PIPESAFE en Safeti-nl 8 voor waterstof (weersklasse D5, in de windrichting).



Figuur 17. Warmtestraling waterstof als functie van de afstand bij D5 voor PIPESAFE en SAFETI-NL

Figuur 18 toont dezelfde informatie, maar nu ingezoomd op het gebied tussen 35 en 10 kW/m², respectievelijk 100% en 1% overlijdenskans bij 20 seconden onbeschermde blootstelling.



Figuur 18. Warmtestraling waterstof als functie van de afstand bij D5 voor PIPESAFE en SAFETI-NL

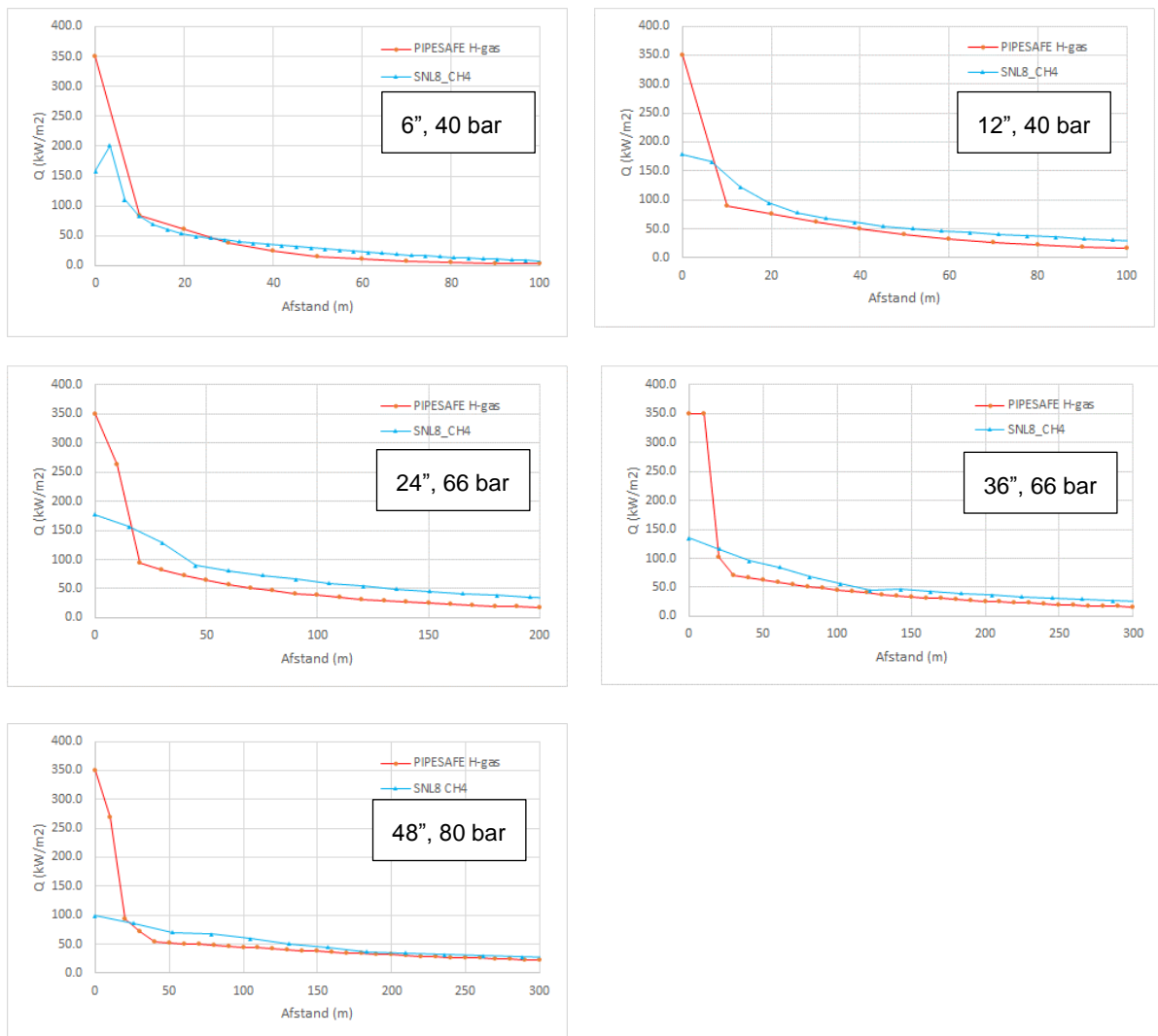
Conclusies

- PIPESAFE berekent op korte afstand van de leiding een aanzienlijk hogere warmtestraling dan SAFETI-NL . Dit is een gevolg van de verschillen in het gekozen vlammodel. Met name de lift-off in het Safeti-nl model (5-67 m) en de geringe tilt van de vlam (20-7 graden met de verticaal) zorgen voor een groot verschil tussen beide modellen dichtbij de leiding. Voor de risicoberekening is de invloed hiervan gering, omdat voor warmtestralingsniveaus groter dan 35 kW/m² alle personen, binnen en buiten, overlijden.
- Met name voor de grotere diameters berekent PIPESAFE een wat grotere afstand tot warmtestralingsniveaus tussen 10 en 35 kW/m². Dit wordt mede veroorzaakt door de

grote lift off in het jetfire model van Safeti-nl 8, voor de 36 en 48" leiding maar liefst respectievelijk 44.1 en 66.7 m. In het laatste geval wordt in de Safeti-nl berekening het 35 kW/m² -niveau voor geen enkele afstand bereikt.

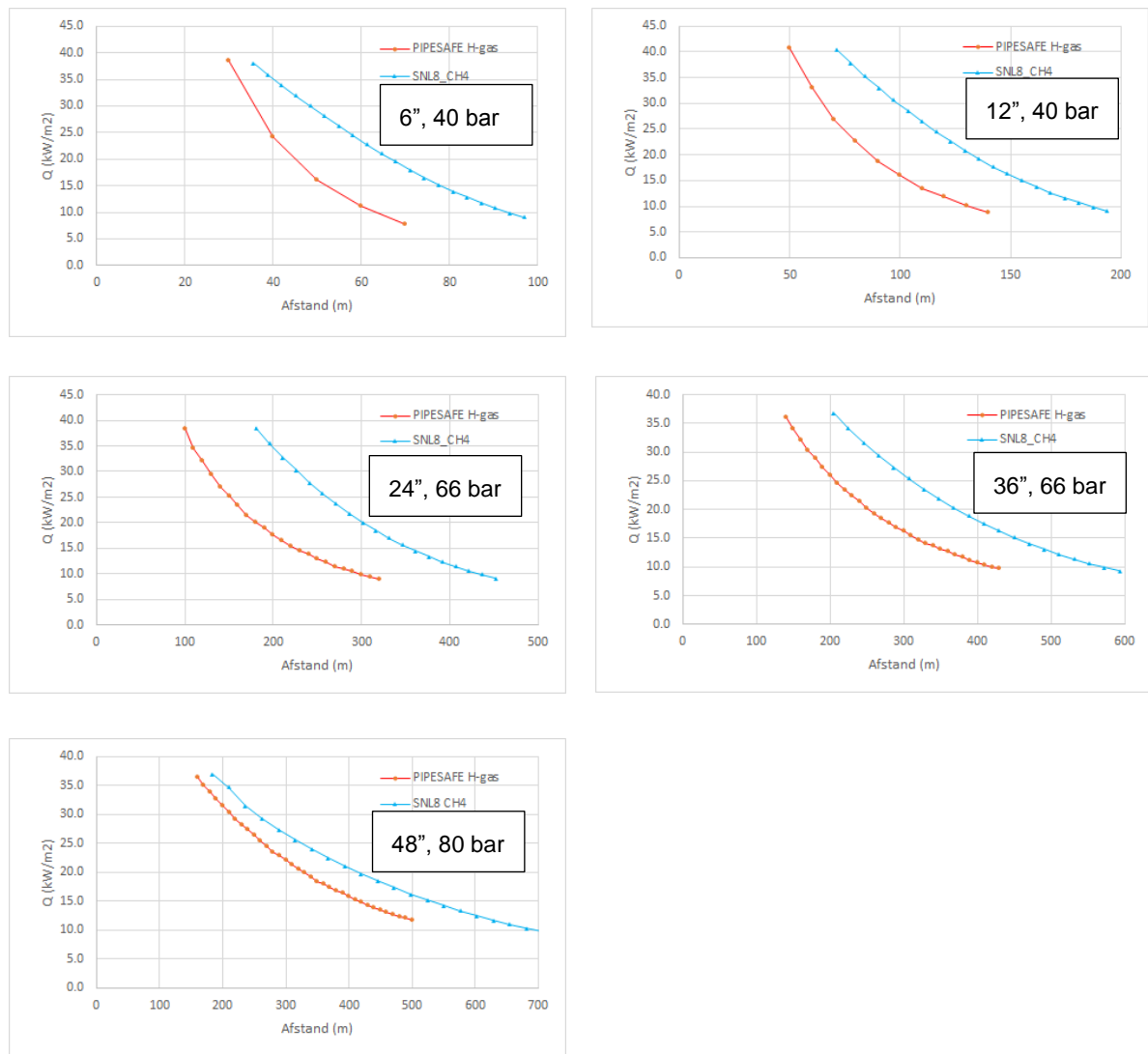
1.3.2 Aardgas

Figuur 19 geeft de vergelijking tussen de uitkomsten van de stralingsberekeningen van het breukscenario voor PIPESAFE en Safeti-nl 8 voor aardgas.



Figuur 19. Warmtestraling aardgas als functie van de afstand bij D5 voor PIPESAFE en SAFETI-NL

Figuur 20 toont dezelfde informatie, maar nu ingezoomd op het gebied tussen 35 en 10 kW/m², respectievelijk 100% en 1% overlijdenskans.

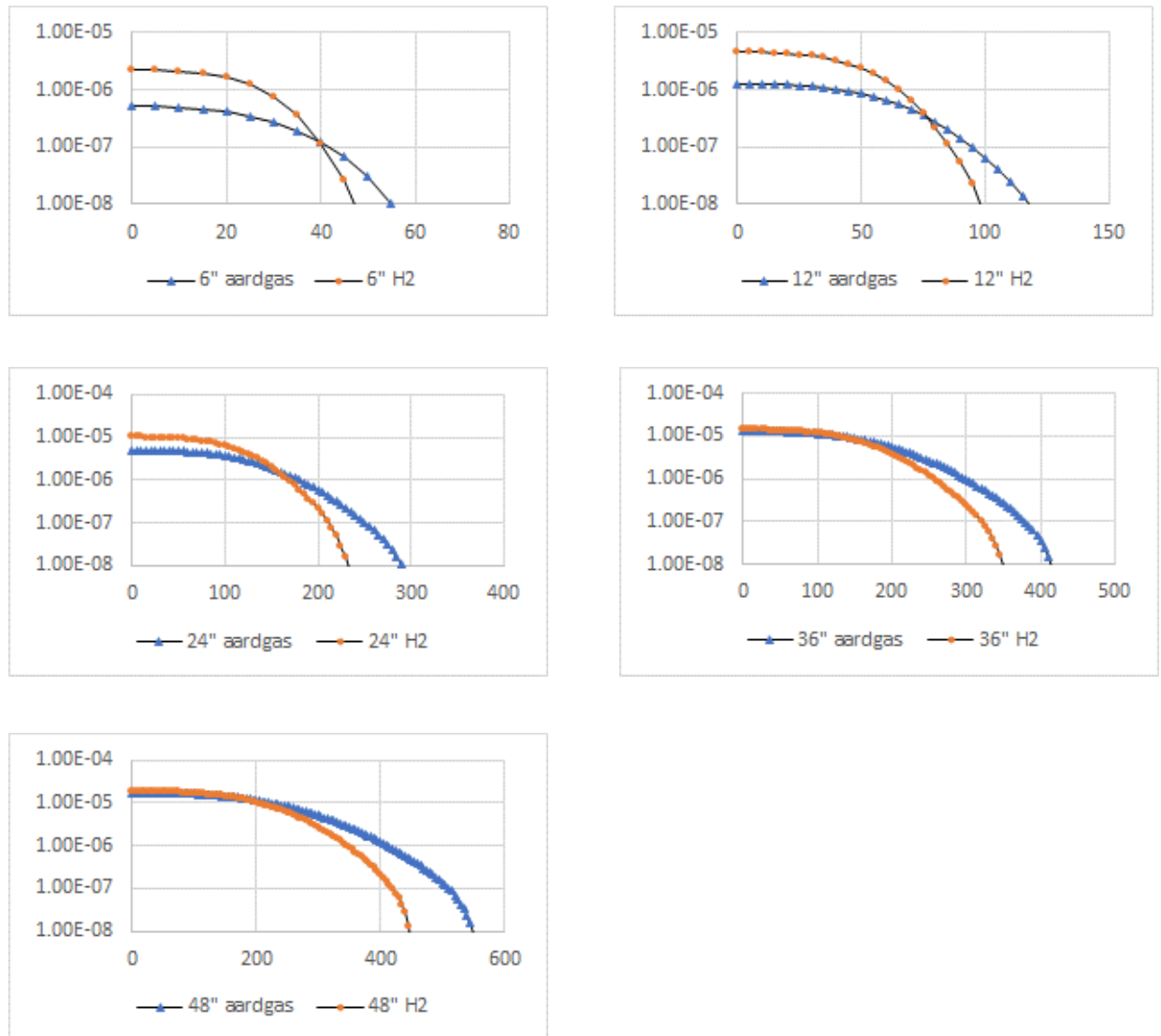


Figuur 20. Warmtestraling aardgas als functie van de afstand bij D5 voor PIPESAFE en SAFETI-NL

Conclusies

- PIPESAFE berekent op korte afstand van de leiding een aanzienlijk hogere warmtestraling dan SAFETI-NL, maar de verschillen zijn kleiner dan voor waterstof.
- Voor alle diameters berekent Safeti-nl een wat grotere afstand tot warmtestralingsniveaus tussen 10 en 35 kW/m².

Bijlage 5 PR-x-curves PIPESAFE H-gas en H2



Figuur 21. PR-x-curves PIPESAFE berekening voor waterstof en H-gas

Bijlage 6 Kenmerken lekscenario waterstof

Input

| | | | | | | |
|----------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Diameter | inch | 6 | 12 | 24 | 36 | 48 |
| Druk | bar | 40 | 40 | 66.2 | 66.2 | 80 |
| Buitendiameter | mm | 168.3 | 323.9 | 610 | 914 | 1219 |
| Wanddikte | mm | 4.8 | | 9.3 | 11.8 | 18.7 |
| Binnendiameter | mm | 158.7 | 323.9 | 591.4 | 890.4 | 1181.6 |
| Gronddekking | m | 1.2 | 1.2 | 1.75 | 1.75 | 1.75 |

Bronsterkte

Top

| | | | | | | |
|--------------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Bronsterkte 0-20 s | kg/s | 0.4409 | 0.7003 | 1.1433 | 1.1433 | 1.3747 |
| Krater diepte | m | 1.2 | 1.2 | 1.75 | 1.75 | 1.75 |
| Krater lengte | m | 1.7 | 1.7 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Krater breedte | m | 1.7 | 1.7 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Krater oppervlak | m ² | 2.2 | 2.3 | 4.8 | 4.8 | 4.9 |
| Bijgemengde lucht | kg/s | 0.5 | 0.9 | 1.4 | 1.4 | 1.7 |
| Snelheid | m/s | 133.95 | 158.26 | 141.81 | 141.81 | 153.29 |
| Temperatuur | oC | -126.84 | -126.84 | -129.46 | -129.46 | -130.27 |

Jet fire weersklasse D-5.0 (dag)

| | | | | | | |
|---------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Flame emissive power | kW/m ² | 144.2 | 160.3 | 167.2 | 167.2 | 174.9 |
| Fraction of emissivity | fraction | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 |
| Jet velocity | m/s | 133.9 | 158.3 | 141.8 | 141.8 | 153.3 |
| Flame length | m | 10.8 | 12.9 | 16.1 | 16.1 | 17.2 |
| Frustum length | m | 9.8 | 11.5 | 14.4 | 14.4 | 15.4 |
| Frustum base width | m | 0.6 | 0.8 | 1.1 | 1.1 | 1.2 |
| Frustum tip width | m | 4.2 | 4.9 | 6.2 | 6.2 | 6.6 |
| Frustum lift off distance | m | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 1.8 | 2.0 |
| Flame length in still air | m | 19.3 | 23.0 | 28.7 | 28.7 | 30.8 |
| Hole to flame angle | deg | 28.4 | 24.9 | 25.3 | 25.3 | 23.8 |
| Expanded Diameter | m | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| Plane angular rotation | deg | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 35 kW/m ² | m | 2.2 | 1.8 | 2.2 | 2.2 | 1.6 |
| 10 kW/m ² | m | 11.0 | 12.8 | 16.5 | 16.5 | 17.5 |
| 3 kW/m ² | m | 19.0 | 23.0 | 29.5 | 29.5 | 31.7 |

Bijlage 7 Kenmerken breukscenario lage werkdrukken

Input

| | | | | |
|----------------|------|-------|-------|-------|
| Diameter | inch | 8 | 8 | 8 |
| Druk | bar | 8 | 12 | 16 |
| Buitendiameter | mm | 203.2 | 203.2 | 203.2 |
| Wanddikte | mm | 5 | 5 | 5 |
| Binnendiameter | mm | 193.2 | 193.2 | 193.2 |
| Gronddekking | m | 1.2 | 1.2 | 1.2 |

Bronsterkte

| | | | | |
|--------------------|----------------|------|-------|-------|
| Bronsterkte 0-20 s | kg/s | 5.5 | 8.0 | 10.5 |
| Krater diepte | m | 1.5 | 1.6 | 2.2 |
| Krater lengte | m | 14.9 | 15.1 | 16.0 |
| Krater breedte | m | 3.4 | 3.7 | 4.7 |
| Krater oppervlak | m ² | 44.8 | 48.7 | 63.8 |
| Bijgemengde lucht | kg/s | 6.8 | 9.8 | 12.8 |
| Snelheid | m/s | 73.8 | 96.4 | 108.2 |
| Temperatuur | oC | 10.8 | -18.4 | -37.0 |

Jet fire weersklasse D-5.0 (dag)

| | | | | |
|---------------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| Flame emissive power | kW/m ² | 187.7 | 205.4 | 217.7 |
| Fraction of emissivity | fraction | 0.28 | 0.26 | 0.26 |
| Jet velocity | m/s | 73.8 | 96.4 | 108.2 |
| Flame length | m | 33.2 | 37.9 | 41.9 |
| Frustum length | m | 31.3 | 35.0 | 38.4 |
| Frustum base width | m | 1.9 | 2.8 | 3.4 |
| Frustum tip width | m | 14.3 | 15.7 | 17.1 |
| Frustum lift off distance | m | 2.2 | 3.2 | 3.8 |
| Flame length in still air | m | 59.3 | 67.8 | 75.0 |
| Hole to flame angle | deg | 28.7 | 26.3 | 24.3 |
| Expanded Diameter | m | 1.0 | 1.0 | 1.1 |
| Plane angular rotation | deg | 0 | 0 | 0 |
| 35 kW/m ² | m | 8.9 | 10.2 | 10.6 |
| 10 kW/m ² | m | 39.2 | 44.7 | 49.3 |
| 3 kW/m ² | m | 66.5 | 77.3 | 86.5 |

Bijlage 8 Beknopte modelbeschrijvingen

Deze bijlage geeft een korte beschrijving van de diverse deelmodellen van Safeti-nl 8 en PIPESAFE.

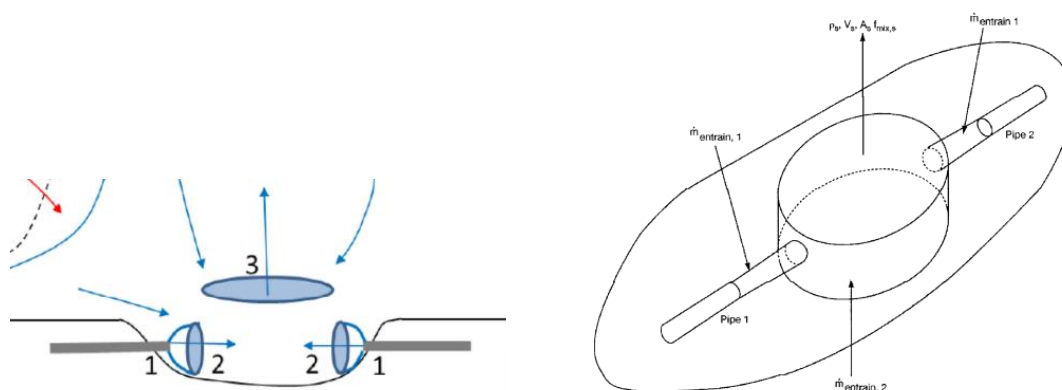
Uitstroming

Beide modellen beschrijven de sterk tijdsafhankelijke uitstroming na leidingbreuk met een oplossing van de ééndimensionale differentiaal vergelijkingen voor massa, impuls en energie. De bijdrage uit de twee takken van de breuk is verschillend door de omkering van de stroming in de downstream tak, verschillen in de plaats van kleppen, diameterwijzigingen enz. [15, 16]. Het gemiddelde debiet over de eerste 20 seconden wordt als invoer voor de vervolmodellen gebruikt.

Kratervorming

Beide modellen combineren de bijdrage van de beide takken met een hoeveelheid ingemengde lucht. De lucht wordt ingemengd door de meesleuring ('entrainment') in de jet, de interactie van beide jets en de interactie met de kraterwanden. In de krater treedt een verlies aan impuls op. De uitstroming is na expansie tot atmosferische druk verticaal gericht vanuit een "pseudo-source" op korte afstand boven de krater.

De afmetingen van de krater worden berekend met empirische relaties en zijn afhankelijk van de grondsoort [14, 15]. Het kratermodel is geïllustreerd in figuur 22. Het PIPESAFE



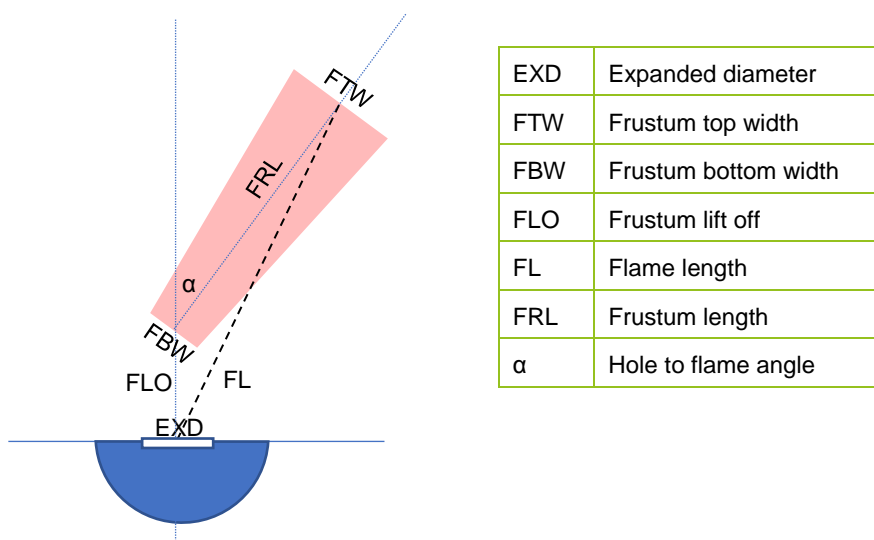
Figuur 22. Modelling krater, luchtinmenging en pseudo source Safeti 8 (links) en PIPESAFE (rechts) [14, 15]

kratermodel is gevalideerd voor leidingbreuken door middel van grootschalige experimenten met aardgas. Het Safeti 8 kratermodel is gevalideerd door middel van grootschalige experimenten met CO₂ en ook geschikt voor andere stoffen in tegenstelling tot PIPESAFE.

Vlammodel

In PIPESAFE wordt de reactiekinetiek in rekening gebracht met daarin de vorming van roet uit acetyleen als één van de tussenproducten. De inwendige warmteoverdracht door straling en convectie in de vlam wordt berekend met in acht neming van de verschillen in stralingsabsorptie en –emissie van de reactieproducten met een water-CO₂ verhouding van 2:1. Langs de vlam-as worden de stralende oppervlakken van de vlam gemodelleerd als een set van ringen met verschillende stralingssterktes. De blootstelling op een bepaalde afstand wordt bepaald door de bijdragen van alle ringen te sommeren [15]. PIPESAFE kent een initiële vuurbal-fase model, dat echter niet wordt gebruikt voor risicoberekening. De gemiddelde uitstroming over de eerste 20 seconden wordt als invoer voor het jetfire model gebruikt.

Het vlammodel van Safeti 8 is geïllustreerd in figuur 23. De vlam wordt gemodelleerd door een afgeknotte kegel met een lift-off en een uniforme stralingssterkte. Dit is het welbekende model van Chamberlain voor verticaal gerichte jet fires [12]. Als invoer in het vlammodel wordt de gasuitstroming gebruikt.



Figuur 23 Vlammodel SAFETI-NL

Blootstellingsmodel

PIPESAFE berekent de stralingsintensiteit op een ontvanger met analytische viewfactoren voor de verschillende vlamdelen. Safeti-nl hanteert een numerieke integratie over het vlamoppervlak. Beide modellen houden rekening met absorptie van de straling door waterdamp en koolzuur in de atmosfeer.

Vulnerability model

Beide modellen gebruiken de voorgeschreven probitrelatie voor overlijden [2].

Bijlage 9 Begeleidingscommissie

Het onderzoek is begeleid en van commentaar en aanvullingen voorzien door een commissie met de volgende deelnemers.

| | | |
|------------------------|--------------------------------------|--|
| C. Theune (voorzitter) | Projectleider, | Ministerie Infrastructuur en Waterstaat |
| M. Dröge | Expert externe veiligheid, | N.V. Nederlandse Gasunie, Groningen |
| H. van der Heden | Manager engineering pipelines, | Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Schiedam |
| W. Huinen | Senior pipeline engineer, | Bilfinger Tebodin Netherlands B.V., Schiedam |
| G. de Kok | Manager operations & risk management | Zebra Gasnetwerk B.V., Bergen op Zoom |
| G. Laheij | Onderzoeker | Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven |
| L. Vijgen | Senior policy maker external safety, | DCMR Milieudienst Rijnmond, Schiedam |
| K. Wezenbeek | Pipeline network manager, | Air Liquide Benelux Industries - Large Industries, Antwerpen |

Bijlage 10 Doorgerekende leidingen

De door te rekenen scenario's met zowel PIPESAFE als Safeti-nl zijn gedefinieerd in een aparte notitie [1]. Deze is hierna onverkort openomen.

1 Invoer

Doel

Het gaat om de vergelijking van de risico's van het transport van waterstof door bestaande aardgas transportleidingen met het transport van aardgas door diezelfde leidingen. De vergelijking betreft hier de effecten kant. De berekening van de effecten wordt uitgevoerd met PIPESAFE en met Safeti-nl (twee versies).

Het resultaat is dan per leiding 5 uitkomsten:

- Een PIPESAFE berekening met aardgas
- Een PIPESAFE berekening met waterstof
- Een SNL 6.54 berekening met waterstof
- Een SNL 8.12 berekening met methaan
- Een SNL 8.12 berekening met waterstof

Om de invloed van de keuze van een rekenmodel op het externe veiligheidsrisico na te gaan worden de volgende situaties doorgerekend.

Rekenmodel

De leidingscenario's worden berekend voor aardgas en waterstof. AVIV voert de berekeningen uit met SNL 6.54 en SNL 8.12; Gasunie met PIPESAFE.

Medium

Aardgas wordt in Safeti-nl gemodelleerd als methaan. In PIPESAFE wordt met hoogcalorisch gas gerekend (stikstof 3.826 mol%, helium 0.06 mol%, methaan 87.875 mol%, ethaan 4.947 mol%, propaan 0.974 mol%, butaan 0.189 mol%, isobutaan 0.16 mol%).

Uitstroming

Voor de uitstroming wordt de CAROLA aanpak gekozen: een volledige breuk van een buisleiding van 64 km lengte met de breuk in het midden. In het model wordt de gemiddelde uitstroming 0-20 sec uit beide takken gebruikt. De uitstromingsrichting is verticaal.

Breukfrequentie

Uitgegaan wordt van volledige breuk met de breukfrequentie uit Module D voor leidingen die voldoen aan de stand der techniek ($3.7 \cdot 10^{-5}$ /km.jr). Voor de grotere diameters aardgas betekent dit een overschatting, maar uitgaan van dezelfde breukfrequentie geeft voor de vergelijking dan zuiver de invloed van de modelkeuze weer.

Omdat ook de PR-x wordt uitgevoerd (zie paragraaf uitvoer) komt ook de invloed van de "normale aardgasfrequenties" duidelijk in beeld.

Breuklengte

Verondersteld wordt dat 12 m pijplengte open scheurt.

Ligging en oriëntatie

- 10 km leiding oost-west
- Weerstation Schiphol
- Omgevingstemperatuur 12 °C
- Luchtvochtigheid 83%
- Terreinruwheid 0.3 m

Bodem

Bodemtype: mixed (zand en klei)

Diepteligging

Afstand van maaiveld tot bovenzijde leiding. Voor de RTL leidingen (diameters 6 en 12 inch) 1.2 m, voor de HTL leidingen 1.75 m.

Krater

PIPESAFE en SNL 8.12 hebben een eigen krater model. Voor SNL 6.54 wordt de aanpak met een UDS en luchtinmenging/impulsreductie uit de handleiding risicoberekeningen buisleidingen gevolgd.

Ontstekingskans

Voor aardgas geldt de diameter/druk-afhankelijke kans op ontsteking. Voor de RTL leidingen wordt bebouwde omgeving aangenomen (0.1 toeslag). Voor waterstof geldt kans op ontsteking 1.0.

Leidingen

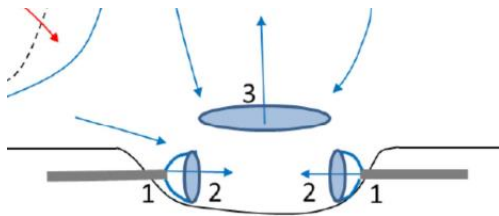
| Diameter Buiten (mm) | Wd (mm) | Druk (barg) | Staal | Medium | P_ontsteking H ₂ /aardgas | Bodem | Dekking (m) | Breukfrek (/km.jr) |
|----------------------|---------|-------------|---------|-------------------------|--------------------------------------|-------|-------------|----------------------|
| 168 | 4,8 | 40 | Grade B | H ₂ /aardgas | 1.0/0.19 | Mixed | 1.2 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 323 | 5.2 | 40 | Grade B | H ₂ /aardgas | 1.0/0.24 | Mixed | 1.2 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 609 | 9.3 | 66.2 | X60 | H ₂ /aardgas | 1.0/0.44 | Mixed | 1.75 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 914 | 11.8 | 66.2 | X70 | H ₂ /aardgas | 1.0/0.8 | Mixed | 1.75 | 3.7.10 ⁻⁵ |
| 1219 | 18,7 | 80 | X70 | H ₂ /aardgas | 1.0/0.8 | Mixed | 1.75 | 3.7.10 ⁻⁵ |

Tabel 18. Door te rekenen situaties

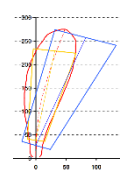
De diameters en wanddiktes zijn gelijk aan die uit een eerdere vergelijkingsstudie (RIVM 2009).

2 Uitvoer

Ten behoeve van de vergelijking tussen de modellen worden de volgende uitkomsten gepresenteerd. De volgende figuur [14] dient ter oriëntatie.



1. Uitstromingsdebiet gemiddeld over 0-20 sec. uit twee takken gesommeerd [kg/s]; uitstromingsdebiet als functie van de tijd tussen 0 en 300 sec (tabel).
2. Per tak: snelheid na expansie [m/s], temperatuur na expansie [K] als functie van de tijd tussen 0 en 300 sec (tabel)
3. Uit de krater: Temperatuur [K], uitstroomsnelheid [m/s], ingemengde lucht [kg/s] als functie van de tijd tussen 0 en 300 sec (tabel)
4. Kraterlengte, breedte en diepte [m]
5. Voor de jetfire
 - a. Geometrie van de vlam (afmetingen in [m], tilt in ° t.o.v. de verticaal (alleen SNL)) voor weersklasse D-1.5, D-5 en D-9
 - b. Diameter uitstroming [m]
 - c. Snelheid uitstroming [m/s]
 - d. SEP van de vlam [kW/m²] (voor PIPESAFE een aantal cilinders langs de vlamas)
 - e. Stralingsfractie [-]
6. Stralingssterkte downwind op 1 m hoogte als functie van de afstand [kW/m²] voor weersklasse D-1.5, D-5 en D-9.
7. Plaatsgebonden risico (risicotransect in richting noord-zuid in het midden van de leiding) als functie van de afstand (grafiek en tabel).



Specifiek voor PIPESAFE

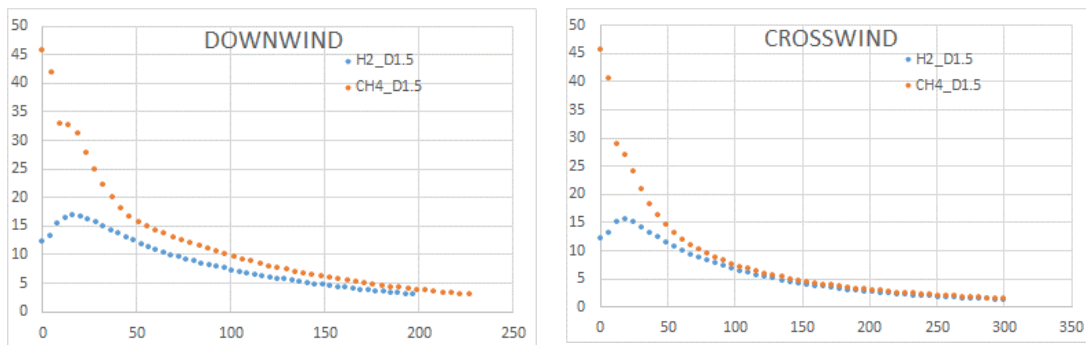
8. Representatieve breukfrequentie huidige (aardgas)leidingen per druk/diametercombinatie [/km.jr]

Bijlage 11 Relatie vermogen-stralingsbelasting

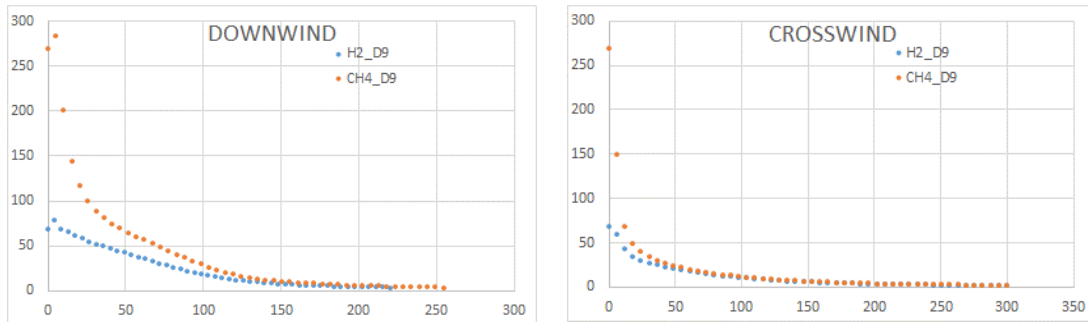
De veronderstelling op grond van de in paragraaf 3.2 genoemde experimenten is dat een jetfire van verschillende stoffen met een gelijk uitstromend vermogen dezelfde warmtestralingskarakteristieken hebben. Figuur 3 laat de verschillende experimenten in één figuur zien. Hiervan is gebruik gemaakt voor de PIPESAFE berekening in dit rapport, zie paragraaf 3.3.

De vraag is nu of deze veronderstelling ook voor het jetfire model van Safeti-nl valide is: geeft een warmtestralingsberekening voor een jetfire van waterstof een vergelijkbaar patroon van de warmtestralingsintensiteit als functie van de afstand met een jetfire van methaan bij een gelijk uitgestroomd vermogen?

Onderstaande figuren geven de vergelijking van de stralingsbelasting als functie van de afstand voor een leidingbreuk van een leiding met een diameter van 12 inch en een werkdruk van 40 bar. Inderdaad blijkt een vergelijkbaar patroon van de warmtestraling als functie van de afstand. In de windrichting ("Downwind") zijn de verschillen wat groter dan loodrecht op de windrichting ("Crosswind"). Dichtbij de vlam, tussen 0 en 40 m, zijn de verschillen groter. De kans op overlijden is dan echter in beide gevallen hoog. In de grootschalige experimenten bleek de variabiliteit van de warmtestraling in de windrichting groter dan loodrecht erop en daardoor moeilijker voorspelbaar, zie paragraaf 3.2.



Figuur 24. Warmtestraling als functie van de afstand voor waterstof (blauw) en methaan (oranje) bij gelijk uitgestroomd vermogen en lage windsnelheid



Figuur 25. Warmtestraling als functie van de afstand voor waterstof (blauw) en methaan (oranje) bij gelijk uitgestroomd vermogen en hoge windsnelheid

De veronderstelling “gelijk uitgestroomd vermogen=gelijke stralingsbelasting” is derhalve voor risicoberekening bruikbaar, ook met het jetfire model van Safeti-nl.