

HyDelta 2

WP6a – Veiligheid waterstof in distributienet en gebouwde omgeving

D6a_4 – Overige aanbevelingen: toepasbaarheid QRA tools, detectie waterstofbranden, effectiviteit odorisatie en effect permeatie

Status: final

Document samenvatting

Corresponderende auteur

Corresponderende auteur	Albert van den Noort
Verbonden aan	DNV
E-mailadres	Albert.vandenNoort@dnv.com

Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzigingen
1	4-5-2023	Albert van den Noort	DNV	Samenvoegen 4 bestaande notities in 1 deliverable
		John Zevenbergen	TNO	Hoofdstuk Toepasbaarheid QRA tools
		Rob van Aerde	KIWA	Hoofdstuk Detectie waterstofbrand, Effectiviteit THT odorisatie en Effect van Permeatie

Verspreidingsniveau

PU	Publiek	x
RE	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> Project partners inclusief Expert Assessment Group Externe entiteit met wie een geheimhoudingsplicht bestaat 	

Document review

Partner	Naam
	EAG:
Enexis	Raymond van Hooijdonk;
Alliander	Pascal te Morsche
Rendo	Johan Jonkman, Roy Scholten
Stedin	Gilles de Kok
NetbeheerNL	Tom Eijsackers
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC, Hanze	HyDelta Supervisory Group

Samenvatting

In het werkpakket 'Veiligheid van waterstof in het distributienet en woningen' van Hydelta 2.0 is onderzoek gedaan naar de risico's van waterstof door middel van een kwantitatief risicomodel en aanvullende experimenten rond het effect van ventilatie op de verspreiding van gas in een woning. In aanvulling op deze twee hoofdtaken, zijn een aantal kleinere onderwerpen die aan dezelfde hoofddoelstelling gerelateerd zijn uitgevoerd. Deze kennishiaten zijn tijdens de scoping fase van Hydelta geïdentificeerd en kunnen leiden tot additionele maatregelen in de pilotprojecten. Het gaat hierbij om:

1. Zijn bestaande QRA tools toepasbaar voor waterstof distributie stations?
2. Is vlamdetectie noodzakelijk bij waterstof branden?
3. In hoeverre wordt de effectiviteit van de barrière odorisatie beïnvloed door bijvoorbeeld adsorptie en/of absorptie van het odorant?
4. Wat is het effect op veiligheid en gaskwaliteit van de permeatie van stikstof, zuurstof en water van buiten de buisleiding naar binnen?

Op basis van literatuuronderzoek zijn deze 4 vragen beantwoord.

Toepasbaarheid bestaande QRA tools voor waterstof districtstations

De meest gangbare en beschikbare tools voor het uitvoeren van een zogenaamde Quantitative Risk Assessment (QRA) zijn beoordeeld en onderling vergeleken. Voor het vergelijk is specifiek gekeken welke tools geschikt zouden zijn voor het vaststellen van de risicocontouren rond een zogenaamde districtstation opererend op waterstof

Van iedere tool zijn het toepassingsgebied en de reikwijdte geanalyseerd. Uit de analyse volgt dat de softwaretools Safeti-NL en Conifer geschikt zijn voor het bepalen van de risicocontouren rond een districtstation, waarbij de eerste tool door het Nederlands bevoegd gezag als een eenduidige rekenmethode voor inrichtingen voor het uitvoeren van een QRA wordt geaccepteerd. Conifer is minder bekend in Nederland en heeft niet de optie tot het verkrijgen van een licentie, maar is daarentegen specifiek ontwikkeld voor dat deel van het gasnet dat loopt van het districtstation (<8 barg) tot aan de gasmeter (20 – 25 mbar). De validatieprogramma's van beide tools in acht nemende, is het de verwachting dat de risicocontouren van beide tools rond een districtstation goeddeels overlappend zullen zijn. Beide tools zijn gevalideerd voor gebruik met aardgas en voor beide tools wordt de validatie met waterstof gestaag uitgebreid. Op basis van de huidige validatie-datasets zijn de risicocontouren voor eenzelfde situatie voor die van waterstof groter dan die van aardgas. Er dient hierbij te worden opgemerkt dat voor beide softwaretools - in geval van waterstof - gerekend wordt met worst case scenario's. Zo wordt onder meer de ontstekingskans van waterstof standaard op 100% gezet. Deze parameters hebben een duidelijke invloed op de risicocontouren. Wetende dat het validatieproces nog in volle gang is, is het daarmee niet opportuun een uitspraak te doen over hoe de risicocontouren van waterstof en aardgas zich met elkaar verhouden in termen van grootte. De eerste resultaten vergelijkende, is het de verwachting dat na volledige validatie het verschil beperkt zal zijn.

Detectie waterstofbranden

Een waterstofvlam kan afhankelijk van de omstandigheden minder goed zichtbaar zijn. Het minder goed zichtbaar zijn kan tot gevolg hebben dat personen letsel oplopen wanneer zij te dicht bij de vlam komen. Op dit moment ontbreekt het aan ervaring met de zichtbaarheid van waterstofvlammen onder verschillende omstandigheden. Omdat de ervaring ontbreekt wordt aanbevolen om voor monteurs bij pilotprojecten middelen ter beschikking te stellen voor het detecteren van een waterstofvlam en

monteurs bewust te maken van de mogelijke aanwezigheid van een waterstofvlam. Met de ervaring die wordt opgedaan tijdens de pilotprojecten en eventueel onderzoek kan bepaald worden of in de toekomst vlamdetectie apparatuur beschikbaar moet blijven voor werkzaamheden aan waterstofnetten. Het verzamelen van informatie over de zichtbaarheid van brandend geodoriseerd waterstof en de zichtbaarheid van vlammen tijdens incidenten wordt aanbevolen.

Het bepalen van de effectiviteit van THT odorant

Aan de hand van het literatuur onderzoek is vastgesteld dat, in specifieke situaties, de effectiviteit van odorisatie door middel van THT negatief kan worden beïnvloed. Ondanks deze beïnvloeding is de effectiviteit van odorisatie van waterstof door middel van THT vergelijkbaar met die van aardgas. Er is hiermee geen aanleiding om bij de distributie van waterstof, geodoriseerd met THT aanvullende beheersmaatregelen te nemen.

Het bepalen van het effect op veiligheid en gaskwaliteit als gevolg van permeatie van stikstof, water en zuurstof

Permeatie is een natuurlijk verschijnsel dat zich zowel bij de distributie van aardgas als bij de distributie van waterstof voordoet. Zolang er gastransport is door de leidingen, is het effect ten aanzien van veiligheid en kwaliteit verwaarloosbaar. In situaties waarbij er sprake is van een afgesloten leidingdeel, zal er op basis van een theoretische beschouwing naar verloop van tijd effect zijn ten aanzien van veiligheid en kwaliteit. Bij deze beschouwing is gekeken naar de permeatie van individuele componenten, zuurstof, stikstof en water, van buiten de leiding naar binnen de leiding. Om inzicht te krijgen in het totale proces van permeatie en het effect ervan op de veiligheid en gaskwaliteit, is het aan te bevelen om bij pilotprojecten de gassamenstelling te monitoren met name in situaties waarbij er sprake is van langdurige stilstand van waterstof in leidingen.

	Kennishiaat	Aanbeveling
Detectie van waterstofbrand	Ervaring met de zichtbaarheid van een waterstofvlam.	Aan monteurs beschikbaar stellen van middelen voor detectie van waterstofvlam. Verzamelen van informatie over de zichtbaarheid van geodoriseerd waterstof en de zichtbaarheid van vlammen tijdens incidenten.
Effectiviteit van THT odorant	Geen.	Geen.
Effect van permeatie	Inzicht in het totale proces van permeatie.	Monitoren van de gassamenstelling wanneer er sprake is van langdurige stilstand van waterstof in leidingen.

Inhoud

Samenvatting.....	3
Inhoud	5
1 Inleiding	7
2 Toepasbaarheid bestaande QRA tools voor een gasstation	8
2.1 Introductie	8
2.2 Pipesafe / Carola.....	8
2.2.1 Introductie	8
2.2.2 Toepassingsgebied van softwarepakket.....	8
2.2.3 Generieke beschrijving van het softwarepakket.....	8
2.2.4 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstation.....	9
2.3 Safeti-NL	10
2.3.1 Toepassingsgebied van softwarepakket.....	10
2.3.2 Generieke beschrijving van het softwarepakket.....	10
2.3.3 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstation.....	12
2.4 RBM II	12
2.4.1 Toepassingsgebied van softwarepakket.....	12
2.4.2 Generieke beschrijving van het softwarepakket.....	12
2.4.3 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstations	14
2.5 Conifer	14
2.5.1 Toepassingsgebied van softwarepakket.....	14
2.5.2 Generieke beschrijving van het softwarepakket.....	14
2.5.3 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstations	16
2.6 Discussie en vergelijking van de softwarepakketten	16
2.6.1 Introductie	16
2.6.2 Conifer – aardgas versus waterstof.....	17
2.6.3 Safeti-NL – aardgas versus waterstof - hogedrukbuisleidingen	18
2.6.4 Safeti-NL – aardgas versus waterstof - districtstation.....	20
2.7 Conclusies	23
3 Detectie van een waterstofbrand	24
3.1 Inleiding	24
3.2 Eigenschappen van een waterstofvlam.....	24
3.3 Factoren die zichtbaarheid waterstofvlam beïnvloeden	25
3.4 Detectietechnieken	27
3.5 Vlamzichtbaarheid en -detectie in waterstoftoestellen.....	28

3.6	Is vlamdetectieapparatuur noodzakelijk voor netbeheerders?	28
3.7	Geplande gasuitstroom	28
3.8	Ongeplande uitstroom	28
3.9	Aanbeveling	29
4	Effectiviteit van THT odorisatie	30
4.1	Inleiding	30
4.2	Scope	30
4.3	Wat bepaalt de effectiviteit van de barrière odorisatie?	30
4.4	Welke fenomenen kunnen de effectiviteit van de barrière odorisatie beïnvloeden?	30
4.5	Conclusie	32
5	Het effect op veiligheid en gaskwaliteit van permeatie van stikstof, zuurstof en water van buiten de gasleiding naar binnen.	33
5.1	Inleiding	33
5.2	Samengevat	34
5.3	Aanbeveling	34
6	Referenties	35

1 Inleiding

Voor de toepassing van waterstof in woningen en het distributienet is het van belang om de bijbehorende risico's te kennen en daar waar nodig te beperken. Om een inschatting te kunnen maken van de risico's bij het gebruik van waterstof in het distributienet in vergelijking met aardgas, is het van belang de verschillen in kans en gevolg te weten. De kans heeft betrekking op de mogelijkheid dat een gevaarlijke situatie zich voordoet; de gevolgen kunnen worden uitgedrukt in schade die ontstaat bij een brand of explosie. Mitigerende maatregelen zijn er vervolgens op gericht om de kans op het ontstaan van een gevaarlijke situatie of de gevolgen daarvan te verkleinen.

In het HyDelta programma is daartoe het werkpakket 'Waterstof en Veiligheid' gedefinieerd waarin de hoofddoelstelling als volgt geformuleerd is:

Risico's in kaart brengen omtrent het gedrag van waterstof bij lekkages in huizen en in het distributienet en aan de hand van de risico's beheersmaatregelen definiëren.

Om een eerste inschatting te kunnen maken van de risico's van waterstof in het Nederlandse distributienet, is een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) uitgevoerd met behulp van een speciaal hiervoor ontwikkeld model. Daarin wordt het risico vergeleken tussen het huidige aardgasdistributiesysteem en het toekomstige waterstofdistributiesysteem. Het totale risico bestaat in de analyse uit het risico dat ontstaat door lekken in het distributienet en het risico dat ontstaat bij lekken in de woning zelf. De uitkomsten van de analyse geven een kwantitatieve basis of de waterstofdistributie meer risico oplevert voor de maatschappij en als dit het geval is, welke maatregelen de meeste invloed hebben om dit risico te verkleinen. In [1] wordt het QRA model voor Nederland beschreven en worden de uitkomsten voor zowel het risico van lekkages in de woning als in het distributienet gegeven. Een van de belangrijke gevoeligheden voor het risico van waterstof in de woning is de ventilatievoud in de woning. Slecht geventileerde woningen kunnen sneller leiden tot gevaarlijke concentraties bij eenzelfde lekkage. Om dit effect in de praktijk te onderzoeken zijn binnen het werkpakket metingen uitgevoerd aan de invloed van ventilatie op de opbouw van concentraties bij relatief kleine lekkages. Deze worden beschreven in [2].

In aanvulling op deze twee hoofdtaken in het werkpakket van Hydelta zijn een aantal kleinere onderwerpen die aan dezelfde hoofddoelstelling gerelateerd zijn uitgevoerd. Deze kennishiaten zijn tijdens de scoping fase van Hydelta geïdentificeerd en kunnen leiden tot additionele maatregelen in de pilotprojecten. Het gaat hierbij om:

1. Zijn bestaande QRA tools toepasbaar voor waterstofdistributie stations?
2. Is vlamdetectie noodzakelijk bij waterstof branden?
3. In hoeverre wordt de effectiviteit van de barrière odorisatie beïnvloed door bijvoorbeeld adsorptie en/of absorptie van het odorant?
4. Wat is het effect op veiligheid en gaskwaliteit van de permeatie van stikstof, zuurstof en water van buiten de buisleiding naar binnen?

Door middel van literatuurstudie is gezocht naar relevante informatie om de vragen te kunnen beantwoorden. Het uitvoeren van experimenteel onderzoek of analyses was geen onderdeel van het onderzoek. De resultaten van de literatuurstudie worden per vraag toegelicht in de respectievelijke hoofdstukken.

2 Toepasbaarheid bestaande QRA tools voor een gasstation

2.1 Introductie

Als onderdeel van de doorontwikkeling van het QRA-model, toegesneden op de situatie in Nederland [1], is een specifieke taak geformuleerd om de geschiktheid van de beschikbare tools voor het bepalen van de veiligheidscontouren rond gasdrukregel- en meetstations opererend met waterstof te beoordelen.

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van mogelijke modellen die beschikbaar zijn voor de beoordeling van risicocontouren rond zogenaamde districtstations (van 8 barg tot ongeveer 100 mbarg) en de toepasbaarheid van deze tools voor specifiek zuivere waterstof. Per tool wordt een beschrijving gegeven voor de toepassing(en) waarvoor de tool is ontwikkeld en gevalideerd. Verder wordt een generiek overzicht gegeven van de mogelijkheden en daarmee of de tool bruikbaar of toepasbaar gemaakt kan worden voor het berekenen van de risicocontouren rond districtstations. Tenslotte wordt per tool bepaald of het in staat is om risicocontouren voor waterstof te berekenen en/of het kan worden aangepast om dergelijke berekeningen voor waterstof mogelijk te maken. Indien één of meerdere geschikte hulpmiddelen geïdentificeerd zijn, worden de berekende risicocontouren (veiligheidsafstanden) gepresenteerd voor een waterstofscenario rond een districtstation. Opgemerkt dient te worden dat de toepasbaarheid van de verschillende softwarepakketten voor het bepalen van de risicocontouren rond pijpleidingen of andere elementen in een gasdistributienet buiten de scope valt.

2.2 Pipesafe / Carola

2.2.1 Introductie

De softwarepakketten PipeSafe en Carola [3] zijn gebaseerd op dezelfde methodiek, met het verschil dat Carola gebruik maakt van het 'opzoektabel'-principe. Met andere woorden, de Carola-software interpoleert tussen waarden die in de database aanwezig zijn, terwijl PipeSafe gebruik maakt van directe (niet openbare) berekeningsmethoden voor de verschillende parameters. Het verschil in eindresultaat tussen beide softwaretools is beperkt (< 2%) en wordt veroorzaakt door de hogere nauwkeurigheid van de parameters zoals bepaald met PipeSafe. Omdat dezelfde methode wordt gebruikt, wordt in dit document alleen naar PipeSafe verwezen.

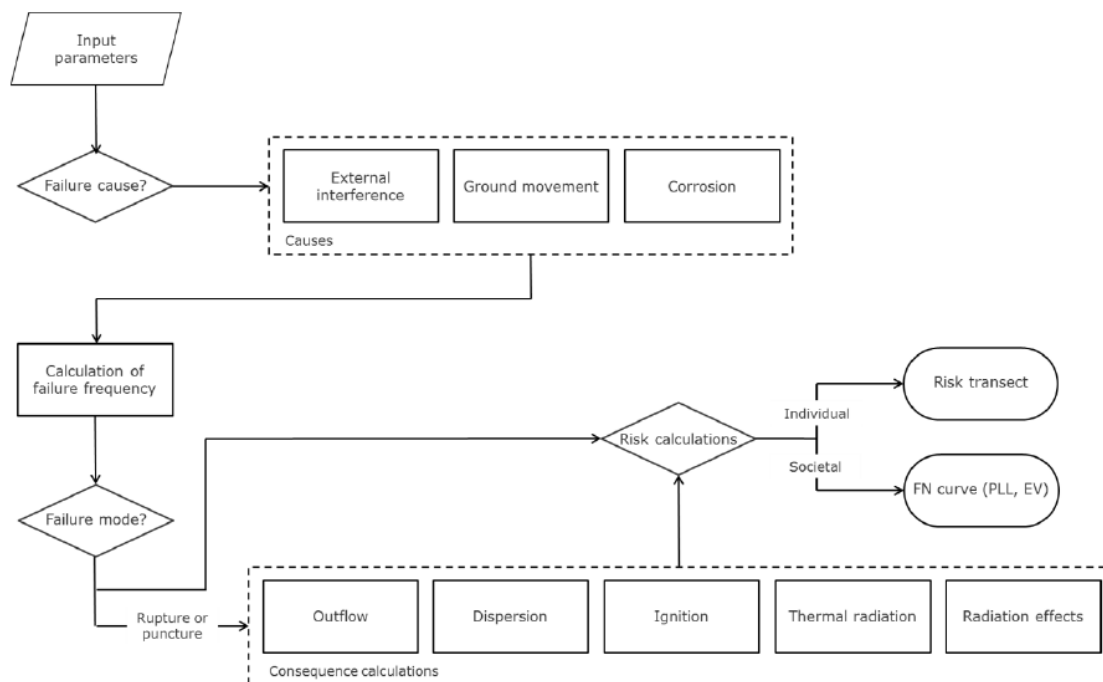
2.2.2 Toepassingsgebied van softwarepakket

PipeSafe [4] is ontwikkeld als een kwantitatieve risicobeoordelingspakket (QRA) voor ondergrondse (hoge druk - 40, 66 en 80 bar) transportleidingen voor aardgas en de bijbehorende componenten. De tool is gecentreerd rond wiskundige modellen voor het voorspellen van de effecten van gaslekken, zoals een brand, op mensen en gebouwen in de buurt. De softwaretool is in staat om de faalfrequentie van een pijpleiding in te schatten en de individuele en maatschappelijke risiconiveaus te bepalen. De modellen zijn door de jaren heen gevalideerd aan de hand van experimentele gegevens, van kleine tot grote schaal.

2.2.3 Generieke beschrijving van het softwarepakket

Voor de risicobeoordeling van een hogedruk aardgasleiding houdt PipeSafe rekening met de volgende vier aspecten [4], schematisch weergegeven in Figuur 1:

- 1) Evaluatie van de faalfrequentie
- 2) Waarschijnlijkheid van ontsteking
- 3) Vaststelling van de gevolgen
- 4) Berekening van het risico



Figuur 1 Risicoberekeningsmethode van de PipeSafe softwaretool voor hogedruk ondergronds aardgastransmissieleidingen [4]

Voor het bezwijken van de pijpleiding worden drie oorzaken in aanmerking genomen, namelijk een externe oorzaak (zoals bouwwerkzaamheden), grondbewegingen en corrosie. Als de pijpleiding faalt, houdt PipeSafe rekening met twee faalwijzen: lekken (perforatie) of breuk (in tweeën breken van de leiding). De faalwijze wordt bepaald door de lengte, diepte en type defect en is vooral afhankelijk van de leidingdiameter, wanddikte, materiaaleigenschappen en de werkdruk. De kans op elke faalwijze kan worden opgeteld en wordt uitgedrukt in een faalfrequentie per jaar en per lengte-eenheid van de leiding. De daaropvolgende ontstekingskans is gebaseerd op historische gegevens en is verder afhankelijk van het feit of er ontsteking optreedt en, indien dit het geval is, of dit een directe ontsteking is die leidt tot een zogenoemde fakkels, of een vertraagde ontsteking die leidt tot een vuurbal en drukgolven. De consequentiemodellering in geval van ontsteking is afhankelijk van de gasleksnelheid en de bijbehorende thermische stralingsprofielen (fakkels versus vuurbal). Deze laatste profielen hebben effect op de mensen en gebouwen in de buurt. Om de mogelijke effecten nauwkeuriger in te schatten, houdt het model rekening met de meteorologische omstandigheden die de gevolgen van het aardgaslek beïnvloeden. Aangezien PipeSafe is ontwikkeld voor ondergrondse pijpleidingen, houdt het ook rekening met de grootte van de potentiële krater die wordt gevormd, afhankelijk van de faalwijze (perforatie versus breuk). Het risico voor de bevolking kan worden uitgedrukt als individueel risico, ofwel de frequentie waarmee een persoon op een bepaalde locatie naar verwachting een slachtoffer zal worden, of als een maatschappelijk risico, gedefinieerd als de relatie tussen de frequentie van een incident en het aantal slachtoffers dat kan ontstaan.

2.2.4 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstation

PipeSafe (Carola) is ontwikkeld voor ondergrondse hogedruk aardgastransportleidingen. Voor de hogedruktransportleidingen van de Gasunie zijn de meest gebruikte drukken 40, 66 en 80 barg en de experimentele validatieprogramma's zijn dan ook grotendeels bij deze drukken uitgevoerd. Voor de aardgassituatie kan het pakket betrouwbaar worden gebruikt vanaf 7 barg. Onder de 7 barg geeft het softwarepakket aan dat de resultaten buiten het validatiebereik vallen en daarom minder accuraat kunnen zijn. De ondergrens van PipeSafe komt ongeveer overeen met de hoogste druk welke in de

gasdistributienetwerken van de regionale netbeheerders (RNB) voorkomen. De validatie van PipeSafe wordt momenteel uitgebreid met waterstof, bijvoorbeeld via het HyWay27-project [5]. Technisch kan de huidige versie van PipeSafe worden gebruikt om de risicocontouren van waterstof te bepalen bij een leidingdiameter van 18 inch of meer bij een druk vanaf 16 barg [6]. Gezien de huidige versie van PipeSafe kan deze niet worden gebruikt voor het bepalen van de risicocontouren rond waterstofdistrictstations. In de toekomst, met verdere validatie met waterstofgegevens en wetende dat de tool is gebaseerd op ondergrondse pijpleidingen, is de toepasbaarheid voor waterstofdistrictstations beperkt. Er zijn specifieke modellen in de tool voor risicobeoordelingen van componenten (zoals verbindingen, kleppen) die worden gebruikt in pijpleidingen, die ook kunnen worden gebruikt voor stations bij hoge druk (7 barg en hoger). In die specifieke gevallen kan er enige toepasbaarheid zijn met toekomstige versies van de tool.

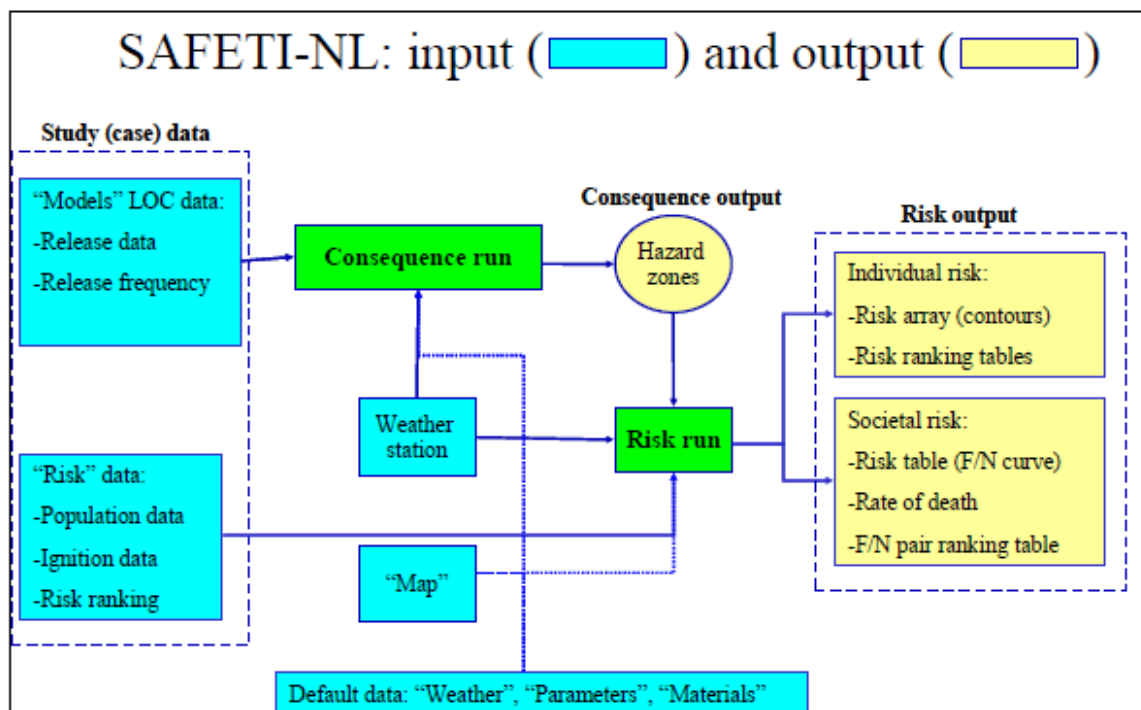
2.3 Safeti-NL

2.3.1 Toepassingsgebied van softwarepakket

Safeti-NL is de Nederlandse versie van de Safeti softwaretool van DNV [7] en houdt rekening met de risicoregelgeving en -methodiek zoals beschreven in het zogenaamde Paarse Boek [8]. Safeti-NL is een generiek instrument voor kwantitatieve risicobeoordeling dat kan worden toegepast voor alle installaties waarbij toxische en/of brandbare chemicaliën betrokken zijn, zoals die worden aangetroffen in de chemische procesindustrie en andere industrieën die dergelijke materialen hanteren, transporteren en opslaan.

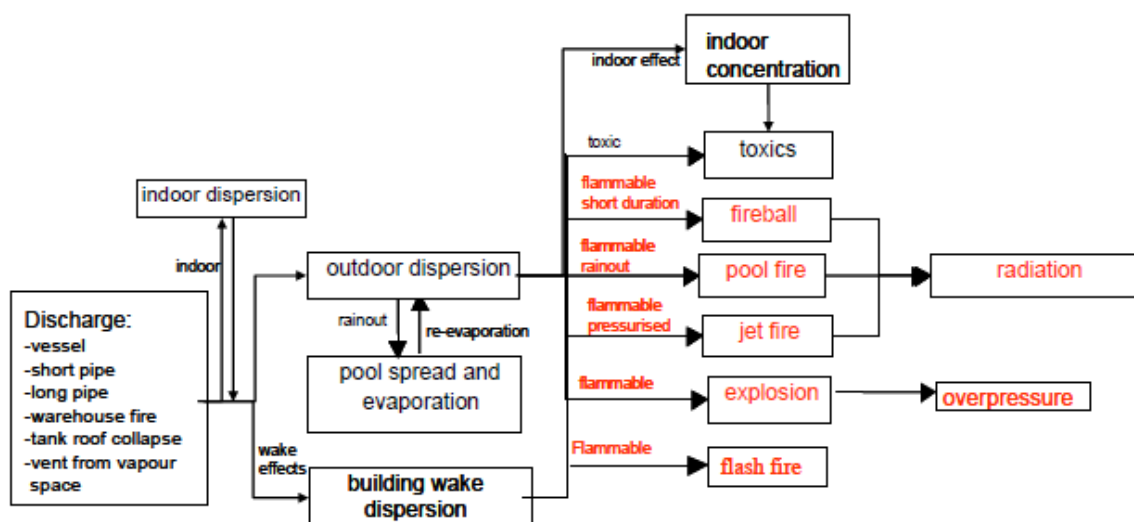
2.3.2 Generieke beschrijving van het softwarepakket

Safeti-NL berekent het individuele risico en het groepsrisico bij het per ongeluk vrijkomen van brandbare en/of giftige stoffen in de atmosfeer vanaf een bepaalde locatie, zoals weergegeven in Figuur 2 [7]. Door een kaart in de software te uploaden en het dichtstbijzijnde weerstation te selecteren, importeert de tool automatisch de relevante weergegevens van die locatie. De gebruiker definieert vervolgens onder andere de faalfrequentie, de bedrijfsomstandigheden (stof, druk, temperatuur, volume), type scenario (doorboring, breuk, catastrofale breuk vat/leiding) en of de lekkage binnen of buiten plaatsvindt.



Figuur 2 Risicoberekeningsmethode van de softwaretool Safeti-NL [7]

Met deze invoer berekent SAFETI-NL thermische, overdruk- en concentratieprofielen. Wanneer de gebruiker ook input definieert over de populatie in de directe omgeving van de gekozen locatie, en in het geval van een brandbare stof, de ontstekingsbron en de ontstekingswijze (direct versus vertraagd), berekent Safeti-NL de individuele en groepsrisicocontouren. Opgemerkt moet worden dat Safeti-NL geen correlaties heeft voor de ontstekingskans. Dit moet door de gebruiker worden gedefinieerd. Voor het per ongeluk vrijkomen van waterstof heeft Safeti-NL specifieke modellen voor het lekken (expansie uit opening) en verspreiding van brandbare stoffen, zie ook Figuur 3.



Figuur 3 Submodellen voor thermische en overdrukprofielen van de Safeti-NL softwaretool. [7]

De lekkage- en verspreidingsmodellen en de daaropvolgende effecten na ontsteking zijn gevalideerd met gepubliceerde experimentele gegevens, waaronder waterstof. Safeti-NL definieert geen

drukdrempelwaarde waaronder de resultaten niet geldig zijn en/of met zorg moeten worden behandeld. De gebruiker moet er echter op bedacht zijn dat de mogelijke foutmarges aanzienlijk kunnen zijn. Bij lage drukken (tot 100 mbar) en bij een perforatie zal de omvang van een eventuele fakkel en daarmee de bijbehorende risicocontour (straling) in bereik beperkt zijn en de foutmarges groter, zonder noodzakelijkerwijs significant foutieve inschattingen te geven. Hetzelfde geldt voor lage drukken (tot 100 mbar) en een breuk onder conventionele ventilatieregimes; de kans op vorming van een brandbare wolk is klein en dus zullen de berekende risicocontouren ook klein zijn. Naarmate de druk toeneemt, zal de nauwkeurigheid van de resultaten verbeteren. Er moet worden opgemerkt dat de Safeti-modellen vaker worden gevalideerd tegen experimentele gegevens verkregen bij hogere initiële drukken, simpelweg omdat er meer literatuurgegevens beschikbaar zijn voor dergelijke omstandigheden, maar niet uitsluitend (zie ook volgende sectie).

2.3.3 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstation

Safeti-NL beschikt over alle relevante gegevens over waterstof en daarmee kunnen de risicocontouren voor een districtstation worden berekend. Specifiek voor een fakkel van waterstof kan door de gebruiker gekozen worden voor het model van Miller [9], zoals geïmplementeerd in Safeti-NL. Dit specifieke model is gevalideerd aan de hand van experimentele gegevens voor zowel verticale als horizontale fakkel en voor leksnelheden variërend van 0,02 tot meer dan 100 kg/s waterstof. Het Miller-model [10] is ontwikkeld met het oog op vlammen met een lage stralingssterkte, wat tot uiting komt in de meer realistische inschattingen van de (stralings)risicocontouren versus modellen die sterk luminescerende (koolwaterstof)vlammen gebruiken als referentie voor het bepalen van de contouren van waterstof. De validatie van Safeti-NL voor waterstof wordt gestaag uitgebreid en hierbij wordt ook aandacht geschonken aan het implementeren van een realistische ontstekingskans.

2.4 RBM II

2.4.1 Toepassingsgebied van softwarepakket

RBM II (RisicoBerekeningsMethodiek Versie 2) berekent het risico van het vervoer van gevaarlijke stoffen over de weg, het spoor en het water [11] zoals voorgeschreven in de Handreiking risicoberekening transport (HART) [12]. De effectmodellen zijn gebaseerd op die zoals beschreven in het zogenaamde Gele Boek [13].

2.4.2 Generieke beschrijving van het softwarepakket

RBM II is een QRA-tool die is gebaseerd op een beperkt aantal 'model'-stoffen en bijbehorende ongeval scenario's. De stoffen zijn ingedeeld naar toestand (vloeistof, gas), ontvlambaarheid en toxiciteit [11]. De scenario's zijn gebaseerd op continue, openbare transportwegen (spoor, water of weg) op maaiveldniveau. Met open transportwegen wordt hier alles bedoeld behalve geheel of gedeeltelijk gesloten locaties, zoals tunnels, specifieke spoorwegsituaties op stations (daken) of vaarwegsituaties (bruggen). Met RBM kan een groepsrisico en/of het risico voor een (set van) gebouw(en) worden berekend. Voor stationaire situaties is de tool niet van toepassing en wordt de gebruiker doorverwezen naar Safeti-NL. Door het importeren van een kaart kan de gebruiker aangeven welk pad gevolgd gaat worden en kan gebruik worden gemaakt van de ingebouwde toepassing van het geografisch informatiesysteem (GIS). Door een weerstation in de buurt te selecteren, kunnen de overeenkomstige meteorologische gegevens worden opgevraagd en wordt de verspreiding van de gevaarlijke (gasvormige) stoffen gemodelleerd. Het aantal personen op de opgegeven route kan handmatig worden ingevoerd of er kan gebruik worden gemaakt van de Landelijke Bevolkingsservice [14]. De gebouwen zijn woongebieden, bedrijven 'overdag', bedrijven 'doorlopend' (zoals ziekenhuizen, hotels), evenementen tijdens de werkweek en evenementen in het weekend, zie ook Figuur 4.

Type bebouwing	Aantal aanwezigen en fractie buitenshuis dag (8.00 – 18.30 uur)	Aantal aanwezigen en fractie buitenshuis nacht (18.30 – 8.00 uur)	Mensen aanwezig werkdagen	Mensen aanwezig in weekend
Woonbebouwing	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Ja	Ja
Bedrijven (dagdienst) (*)	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Nee	Ja	Nee
Bedrijven (continu dienst) (*)	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Ja	Ja
Evenementen (op werkdagen) (**)	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Ja	Nee
Evenementen (in het weekend) (**)	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Variabel: kan per bebouwingsblok worden ingevoerd	Nee	Ja
Bouwplannen (+)	Standaard nul	Standaard nul	N.v.t.	N.v.t.
Bouwputten (')	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.	N.v.t.

Figuur 4 Definitie van verschillende soorten gebouwen [11]

De lengte van de route is standaard minimaal 1000 meter, hoewel kleinere routes kunnen worden gedefinieerd. Uit de groepsrisico's van de individuele bijdragen wordt het maximale groepsrisico per kilometer berekend. Het groepsrisico wordt opgeteld over 1000 meter met een resolutie van 25 meter. In Tabel 1-Tabel 3 [12] is de indeling van de 'model' gevaarlijke stoffen gegeven voor de verschillende logistieke opties. Afhankelijk van de brandbare modelstof staat de ontstekingskans vast voor zowel instantane als vertraagde ontsteking, evenals de bijbehorende effecten (BLEVE, fakkel, flash fire, explosie of plasbrand). Er wordt geen specifieke informatie gegeven over de validatie van de gekozen ontstekingskans en bijbehorende effecten. De drukken van de gasvormige stoffen waarmee gerekend kan worden, komt overeen met de drukken die van toepassing zijn op een districtstation.

Categorie		Modelstof
A	Brandbaar gas	Propan
B2	Toxisch gas	Ammoniak
B3	Zeer toxisch gas	Chloor
C3	Zeer brandbare vloeistof	Pentaan
D3	Toxische vloeistof	Acrylonitril
D4	Zeer toxische vloeistof	Acroleïne

Tabel 1 Gevaarlijke modelstoffen gebruikt in het RBM II softwarepakket voor transport per spoor [12].

	Categorie	Modelstof
GF1	Brandbaar gas	Ethyleenoxide
GF2	Brandbaar gas	Butaan
GF3	Brandbaar gas	Propaan
GT2	Toxisch gas	Methyl-mercaptan
GT3	Toxisch gas	Ammoniak
GT4/GT5	Toxisch gas	Chloor
LF1	Brandbare vloeistof	Heptaan (diesel)
LF2	Brandbare vloeistof	Pentaaan (gasoline)
LT1	Toxische vloeistof	Acrylonitril
LT2	Toxische vloeistof	Propylamine
LT3	Toxische vloeistof	Acroleïne
LT4	Toxische vloeistof	Methylisocyanaat

Tabel 2 Gevaarlijke modelstoffen gebruikt in het RBM II softwarepakket voor wegtransport [12]

	Categorie	Modelstof
GF2	Brandbaar gas	Butaan
GF3	Brandbaar gas	Propaan
GT3	Toxisch gas	Ammoniak
LF1	Brandbare vloeistof	Heptaan (diesel)
LF2	Brandbare vloeistof	Pentaaan (gasoline)
LT1	Toxische vloeistof	Acrylonitril
LT2	Toxische vloeistof	Propylamine

Tabel 3 Gevaarlijke modelstoffen gebruikt in het RBM II softwarepakket voor transport over water [12]

2.4.3 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstations

Het RBM II-model kan veiligheidscontouren van waterstof niet direct berekenen. Doordat de tool gebruik maakt van zogenaamde modelstoffen, kan een chemische stof worden gekozen die het gedrag van waterstof het beste benadert. Gezien de modelstoffen is er geen chemische stof in de database die in de buurt komt van het gedrag (lichter dan lucht) van waterstof. Indien een modelstof aanwezig zou zijn, dient de ontstekingskans gecorrigeerd te worden voor die van waterstof en mogelijk ook het bijbehorende effect. RBM II is bedoeld voor mobiele toepassingen, aangezien het risico wordt uitgedrukt per afgelegde lengte-eenheid. Aangezien het districtstation een stationaire voorziening is, zullen de resulterende berekende veiligheidscontouren daardoor afwijken van de werkelijke.

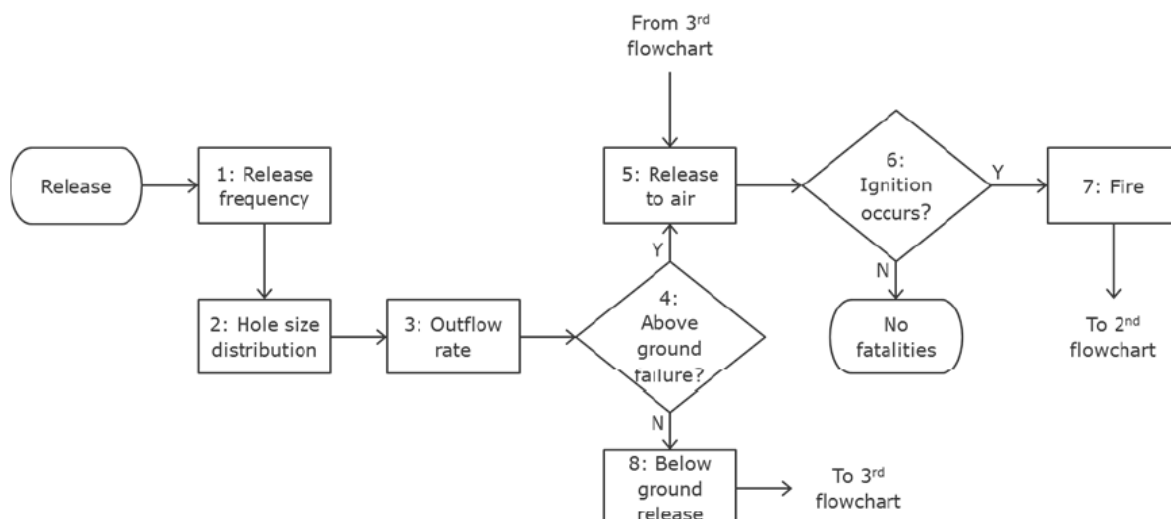
2.5 Conifer

2.5.1 Toepassingsgebied van softwarepakket

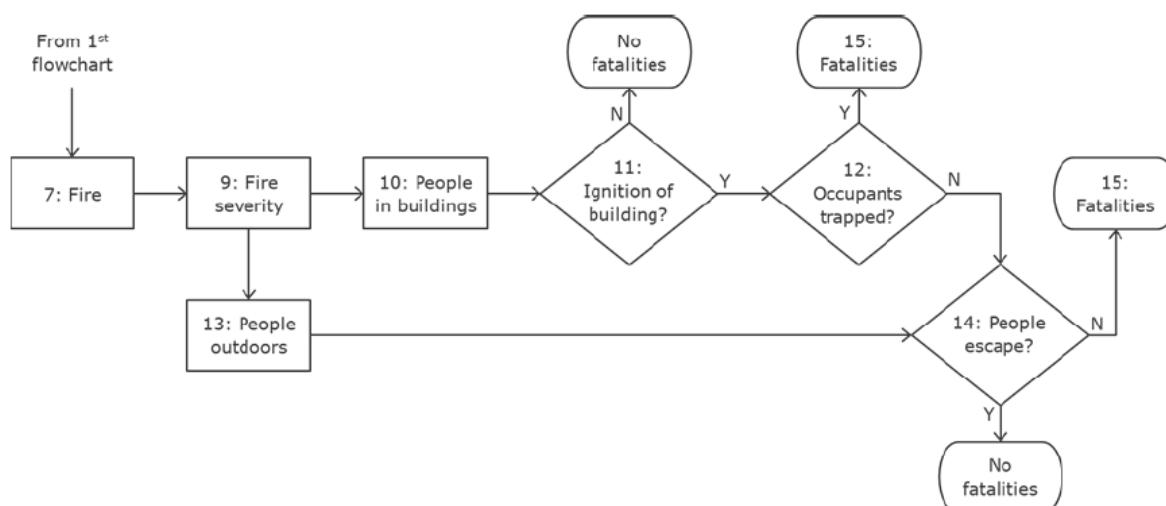
Het QRA softwarepakket CONIFER [15] [16] is speciaal ontwikkeld voor dat deel van het aardgasdistributienet dat gaat van de districtstations (7 barg) tot de gasmeters (21 mbarg) in bijvoorbeeld een huis. Met het oog op de energietransitie is de tool uitgebreid met waterstof/aardgasmengsels en puur waterstof. De tool is gebaseerd op bestaande aardgasmodellen en wordt nu uitgebreid met modellen die op puur waterstof zijn gebaseerd.

2.5.2 Generieke beschrijving van het softwarepakket

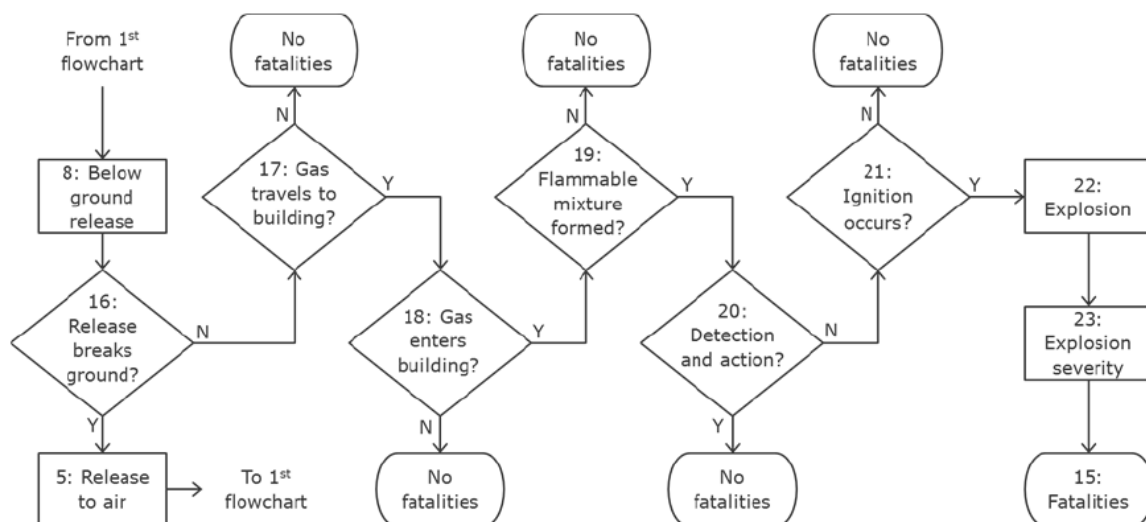
De door Conifer gebruikte methodologie is schematisch weergegeven in Figuur 5 tot Figuur 7 en bestaat uit verschillende modules om een veiligheidscontour te geven van een object dat een lek van aardgas of waterstof ervaart. Conifer is gevalideerd voor aardgas en is onlangs gevalideerd voor waterstof op basis van literatuurgegevens en gegevens verkregen uit het H21-project [17].



Figuur 5 Schema 1 van de door Conifer gehanteerde methodiek om de gevolgen te bepalen van het ongecontroleerd vrijkomen van aardgas/waterstofgas



Figuur 6 Schema 2 van de door Conifer gehanteerde methodiek om de gevolgen van het ongecontroleerd vrijkomen van aardgas/waterstofgas te bepalen



Figuur 7 Schema 3 van de door Conifer gehanteerde methodiek om de gevolgen van het ongecontroleerd vrijkomen van aardgas/waterstofgas te bepalen.

De faalfrequenties op basis van historische gegevens zijn geïmplementeerd in de tool en de faalfrequenties voor waterstof en aardgas worden voorsnag gelijk verondersteld. Aangezien in de toekomst nieuwe data voor waterstof wordt verkregen, zal de database hierop worden aangepast. Bijbehorend is een vast bereik van vijf perforatie-groottes beschikbaar met de bijbehorende kansen van optreden. Er zijn verschillende faalwijzen beschikbaar, zoals externe schade door bijvoorbeeld graafwerkzaamheden, corrosiedefecten op metalen buizen en verbindingsdefecten. Elke combinatie van leidingmateriaal en faalwijze heeft een specifieke frequentie- en perforatie-grootteverdeling. Afhankelijk van het scenario kan de gebruiker een bovengrondse of ondergrondse vrijgave selecteren, waarbij de ontstekingskansen gebaseerd zijn op historische gegevens voor aardgas. Voor waterstof is de dataset voor de ontstekingskansen in ontwikkeling. De gebruiker kan kiezen voor instantane en vertraagde ontsteking. In geval van een brand buiten wordt het effect van wind meegenomen, maar niet de meteorologische condities voor die locatie. De gegeven risicovoorspellingen worden weergegeven in termen van potentieel verlies aan mensenlevens, die het maatschappelijke risico vertegenwoordigen, afgezien van individuele risicowaarden. In de risicoberekeningen kunnen verschillende bouwtypen en bezettingspatronen worden meegenomen.

2.5.3 Toepasbaarheid voor waterstofdistrictstations

De Conifer QRA-tool is ontwikkeld specifiek voor gasreductiestations van aardgas en omvat alle bedrijfsomstandigheden tussen een dergelijk station en een gasmeter. Het softwarepakket is uitgebreid met waterstofgas en er wordt gewerkt aan verdere validatie van de waterstofmodellen.

2.6 Discussie en vergelijking van de softwarepakketten

2.6.1 Introductie

Van de voornoemde QRA modellen die veelvuldig gebruikt worden voor de Nederlandse situatie (Pipesafe, RBM II en Safeti-NL) kan Safeti-NL toegepast worden voor het bepalen van de veiligheidscontouren rondom een gasreductiestation voor waterstof. Een vierde model, Conifer, is een reeds bestaand model ontwikkeld voor de situatie in het Verenigd Koninkrijk en volledig gevalideerd voor aardgas. Dit model wordt momenteel uitgebreid met modellen voor waterstof en wordt meer toegesneden op de situatie in Nederland, zoals de aanwezigheid van kruipruimtes (niet van toepassing in het VK). Voor een vergelijking van de pakketten, zijn daarmee alleen Safeti-NL en Conifer van belang.

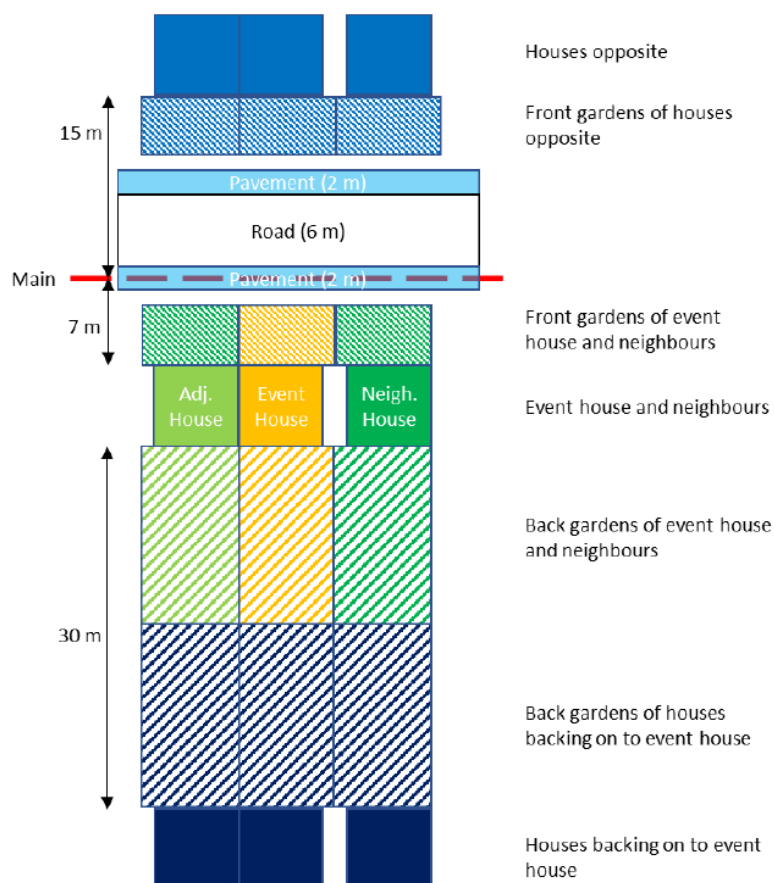
Gezien het ontwikkelingstraject van Conifer, het feit dat dit pakket binnen Nederland nog niet wijdverbreid gebruikt wordt en het opzetten van een QRA tijdrovend is, zeker als precies dezelfde situatie in de respectievelijke pakketten moet worden ingebracht, is er gekozen voor een indirecte vergelijking. In deze vergelijking wordt er binnen 1 softwarepakket gekeken – voor dezelfde situatie – wat het effect is van het gebruik van aardgas versus waterstof op het risico. Daarmee kunnen de pakketten niet direct met elkaar worden vergeleken, maar kan wel worden vastgesteld of het overschakelen van aardgas naar waterstof een verandering in risico teweegbrengt. Voor wat betreft Conifer (zie hieronder) geldt dat dit pakket specifiek is ontwikkeld voor het bepalen van de risicocontouren rondom districtstations tot en met de aansluiting in een huis.

2.6.2 Conifer – aardgas versus waterstof

Om het verschil tussen waterstof en aardgas te illustreren, is er gekeken naar de overdrukken die beide gassen kunnen produceren [16]. Van waterstof is bekend dat de kans op catastrofale schade aan een gebouw of aan mensen groter is dan voor aardgas. Bij het vrijkomen van aardgas en waterstof in de open lucht is er weinig kans op de schade aan mensen of gebouwen.

Voor de vergelijking wordt gebruik gemaakt van de situatieschets zoals weergegeven in Figuur 8. Het huis waarin de explosie plaatsvindt is aangeduid als 'Event house'. Dit specifieke huis is een twee-onder-één-kap huis met één aanpalend maar niet aangrenzend huis. In de risicoberekeningen is rekening gehouden met schade aan personen in deze drie huizen, de drie huizen aan de overkant en de drie huizen met tuinen die uitkomen op het 'Event House' en de directe burens. De afmetingen van het huis en de tuin en de breedte van de weg zijn representatief voor een woongebied binnen Groot-Brittannië.

Tabel 4 geeft een overzicht van het voorspelde aantal dodelijke slachtoffers voor een waterstof- en aardgasexplosie, gebaseerd op een bevolking van drie mensen per huis en rekening houdend met de tijd niet aanwezig in het huis (overdag – op het werk) en de tijd buitenshuis terwijl de mensen niet op het werk zijn. De kolom 'Gemiddeld' geeft het totale aantal voorspelde dodelijke slachtoffers weer, gemiddeld over explosies die zich op elk moment van de dag voordoen. De kolom 'Bereik' geeft de variatie weer in het totaal aantal voorspelde dodelijke slachtoffers, afhankelijk van het tijdstip waarop de explosie plaatsvindt.



Figuur 8 Gevolgen van een explosie in een huis op de naastgelegen huizen in geval van een waterstof- dan wel aardgasexplosie [16]

Explosie	Aantal door Conifer voorspelde dodelijke slachtoffers					
	'Event house'		Andere huizen		Totaal	
	Binnenshuis	In tuin	Binnenshuis	In tuin	Binnenshuis	In tuin
Stoichiometrisch CH ₄	0,27	< 0,01	0,10	< 0,01	0,37	0,19 – 0,56
Stoichiometrisch H ₂	0,96	0,02	1,43	0,03	2,44	1,30 – 3,67
Representatief CH ₄ -lek	0,10	< 0,01	0	< 0,01	0,10	0,05 – 0,15
Representatief H ₂ -lek	0,06	0	0	0	0,05	0,03 – 0,08

Tabel 4 Voorspelde aantal doden voor een waterstof- en aardgasexplosie voor de situatie zoals aangegeven in Figuur 6, zoals berekend door het softwarepakket Conifer [16]

In geval van een stoichiometrische aardgasexplosie zijn de effecten met name het grootst voor het huis waarin de explosie optreedt. Dat in tegenstelling tot een stoichiometrische waterstofexplosie, waarbij de effecten met name het grootst zijn voor de omliggende huizen.

2.6.3 Safeti-NL – aardgas versus waterstof - hogedrukbuisleidingen

De Antea-groep [18] heeft een risico-onderzoek uitgevoerd naar het plaatsgebonden risico en warmtestralingseffecten voor hogedrukbuisleidingen (> 40 bar) middels Safeti-NL versie 8.5 voor waterstof. Dit is vergeleken met data voor dezelfde aardgasleidingen middels de Carola methodiek. Idealiter was de vergelijking uitgevoerd met Safeti-NL. Door het Centrum Veiligheid van het RIVM is vastgesteld [19] dat er geen noemenswaardige verschillen zijn voor gastransportleidingen tussen Carola enerzijds en Safeti-NL anderzijds in termen van robuustheid, validiteit en verifieerbaarheid. Als zodanig worden de resultaten van Carola in deze vergelijking meegenomen als zijnde representatief,

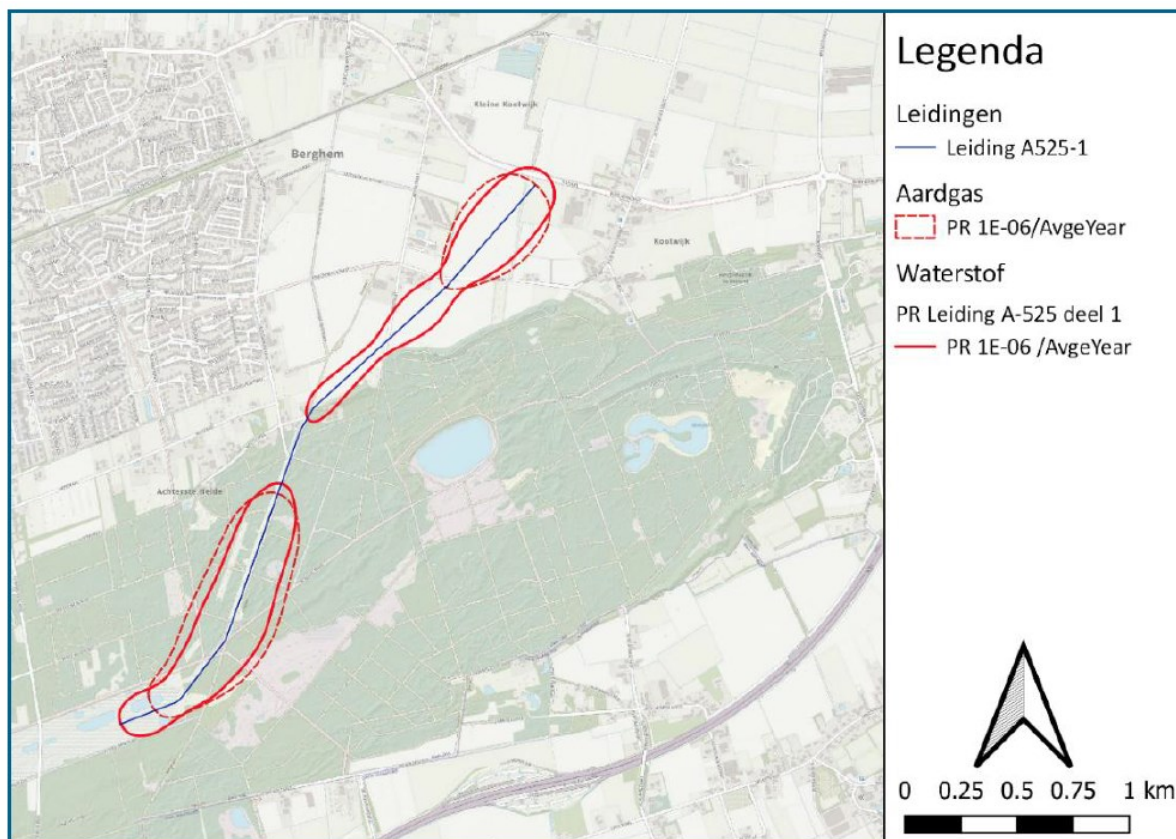
wetende dat er tijdens de modelering met Safeti-NL expliciete verschillen is opgenomen voor een aantal parameters, zie verder hieronder.

In eerste instantie is uitgegaan van een directe vergelijking van een aantal buisleidingen en is er geen rekening gehouden met eventuele mitigerende maatregelen die in werkelijkheid van kracht zijn, zie Tabel 5. Hierbij is onder meer gekeken naar het maximale risico ter hoogte van de waterstofbuisleidingen ("op leiding") zelf.

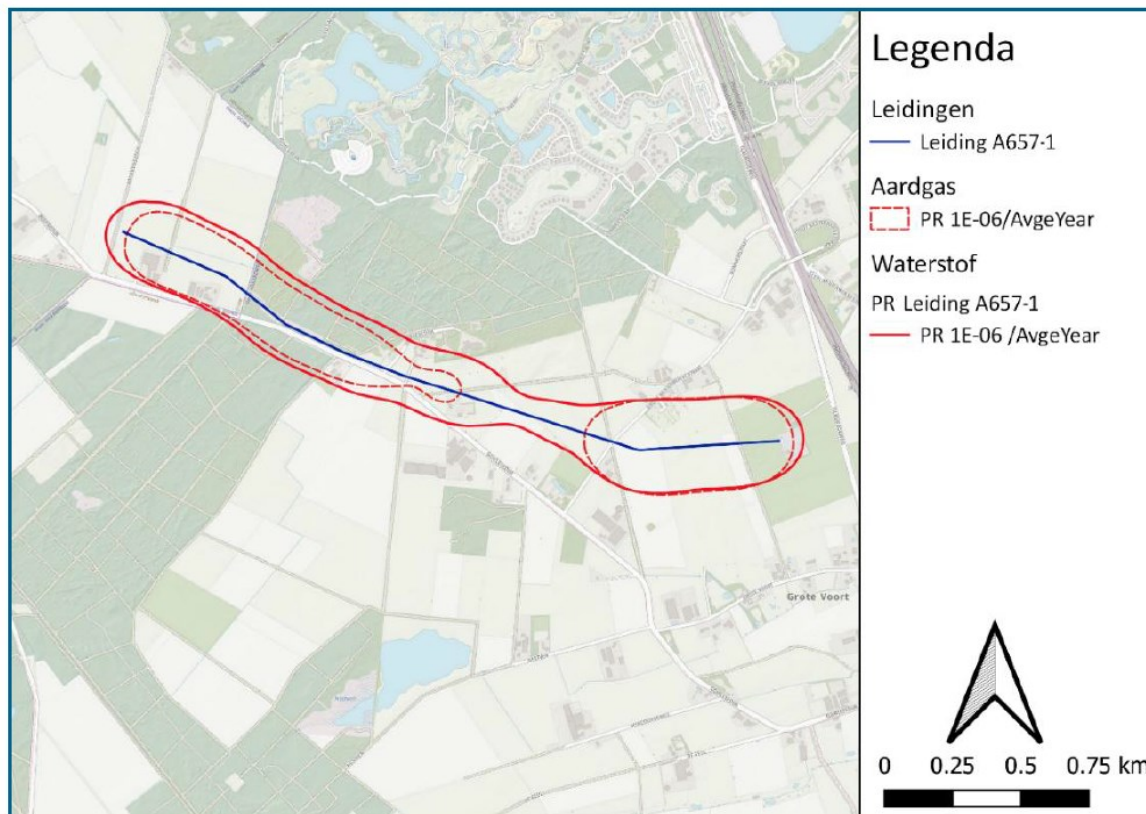
Buis- diameter [mm]	Druk [barg]	Wanddikte [mm]	Risico H ₂ 'op leiding' [10 ⁻⁶ /jaar]	Risico CH ₄ 'op leiding' [10 ⁻⁶ /jaar]	Ratio	10 kW/m ² H ₂ [m]	10 kW/m ² CH ₄ [m]	Ratio
323,9	40	7,1	1,65	0,22	7,4	132	138	0,96
406,4	80	6,6	8,46	1,82	4,7	203	231	0,88
610	66,2	9,3	0,62	0,17	3,6	263	315	0,83

Tabel 5 Risico en warmtestralingseffecten van geselecteerde hogedrukbuisleidingen voor waterstof en aardgas [18]

Uit deze berekeningen volgt dat de 10⁻⁶/jaar plaatsgebonden risicocontouren voor waterstofbuisleidingen groter zijn dan die van die van aardgasbuisleidingen. Gezien het verschil in verschijningsvorm van de vlammen van waterstof en aardgas zijn de warmtestralingscontouren van waterstof kleiner dan die van aardgas. Dit volgt ook uit de berekeningen, zie Tabel 5. Er dient te worden opgemerkt dat er een verschil is in de uitstroomsnelheid tussen waterstof en aardgas. Vervolgens zijn berekeningen uitgevoerd op bestaande buisleidingen, waarbij rekening is gehouden met de ter plaatse van kracht zijnde mitigerende maatregelen, zie figuren hieronder.



Figuur 9. Plaatsgebonden risicocontouren van buisleiding A525-1 (diameter 914 mm, druk 66,2 barg) [18]



Figuur 10 Plaatsgebonden risicocontouren van buisleiding A657-1 (diameter 610 mm, druk 66,2 barg) [18]

Uit de berekeningen volgt dat er sprake is van een toename van het risico indien er in dezelfde aardgastransportleidingen waterstof wordt toegepast. Er dient opgemerkt te worden dat voor de berekeningen is aangenomen dat de ontstekingskans van waterstof 100% bedraagt, terwijl die van aardgas – afhankelijk van de diameter van de buisleiding – kleiner is. Verder is ook de faalfrequentie voor de waterstofleidingen hoger aangenomen dan die van aardgas. Beide parameters hebben effect op de gevonden risicocontouren. Deze uitgangspunten komen niet overeen met de tot nu toe opgedane kennis voor wat betreft waterstof in distributienetten.

2.6.4 Safeti-NL – aardgas versus waterstof - districtstation

Arcadis [20] heeft risicoberekeningen uitgevoerd voor een waterstofwijk in Hoogeveen met Safeti-NL, versie 8.3. Onderdeel van deze wijk is een reduceerstation/districtstation, waarbij de waterstofdruk van 4 barg naar 100 mbar wordt gereduceerd, zie Figuur 11. Parallel aan het reduceerstation bevindt zich de NAM locatie Ten Arlo. Op 115 meter ten zuiden van het station ligt de A28 en op 200 meter ten oosten ligt de bestaande woonwijk Erflanden. Op 80 meter ten noorden van het station ligt de waterstofwijk. In Figuur 11 staat ook een ontvangststation afgebeeld, maar deze is niet onderdeel van voorliggende QRA. Een concept van het reduceerstation is afgebeeld in Figuur 12.

Voor de berekening van het risico van het reduceerstation is uitgegaan van de situatie dat er 900 kg waterstof kan vrijkomen. Dit is conform het leeglopen van een trucktrailer met waterstof, die upstream van het ontvangststation geparkeerd staat. Voor de meteorologische gegevens is uitgegaan van het weerstation te Twente. Voor de risicoberekeningen is uitgegaan van een horizontaal gerichte uitstroming (standaard in Safeti-NL), met een uitstroomduur van 30 minuten, en zijn de risico's voor een fakkelbrand uniform over alle richtingen verspreid. Directe ontsteking is aangenomen en aangezien er geen potentiële ontstekingsbronnen zijn buiten de erfgrans, is vertraagde ontsteking niet van toepassing verklaard.

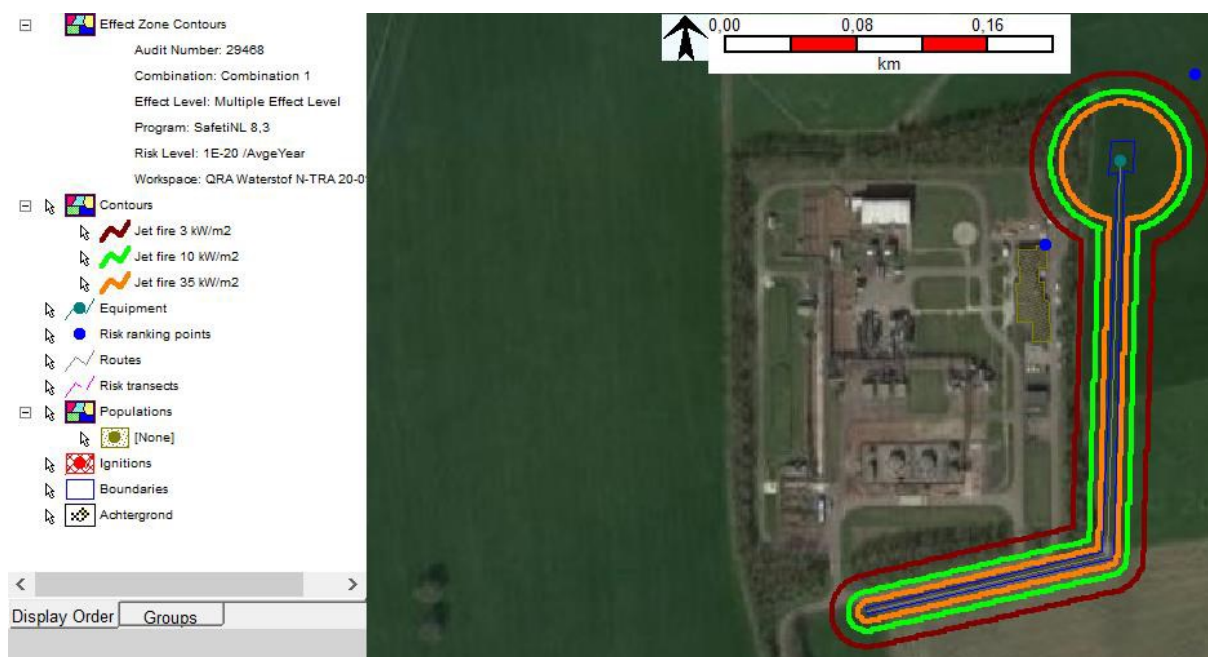


Figuur 11 Omgevingsschets van het reduceerstation in Hoogeveen [20]

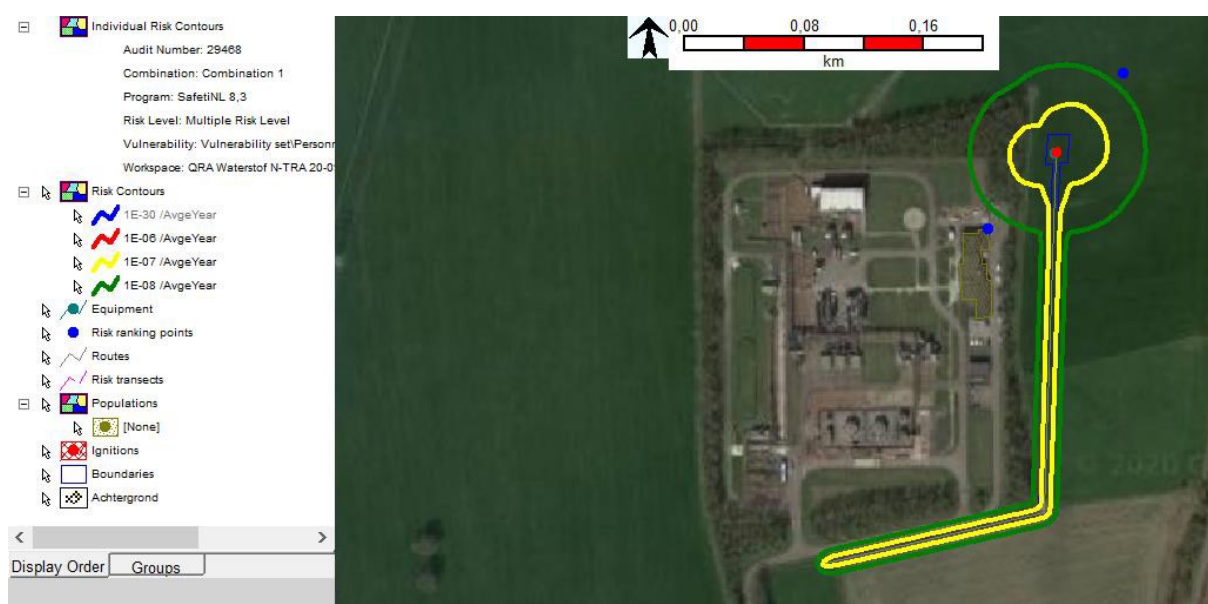


Figuur 12 Concept van het reduceerstation voor de waterstofwijk in Hoogeveen [20]

Op basis van de positie van het reduceerstation, is er alleen sprake van een brandaandachtsgebied, zie Figuur 13. De resulterende plaatsgebonden risicocontouren zijn weergegeven in Figuur 14.



Figuur 13 Berekend brandaandachtsgebied van het reduceerstation en bijhorende lage drukleidingen (4 bar) voor de waterstofwijk in Hoogeveen [20]



Figuur 14 Plaatsgebonden risicocontouren van het reduceerstation en bijhorende lage drukleidingen (4 bar) voor de waterstofwijk in Hoogeveen [20]

Zoals genoemd, is de locatie van dit reduceerstation zodanig dat er geen extern veiligheidsrisico valt te verwachten van dit station.

Zoals gesteld is deze analyse uitgevoerd voor een reduceerstation op basis van waterstof. Zoals benoemd in hoofdstuk 2.6.3, volgt er uit berekeningen uitgevoerd met Safeti-NL een toename van het risico indien er in dezelfde applicatie voor aardgas, waterstof wordt toegepast. Dit heeft ook te maken met het feit dat voor de berekeningen in Safeti-NL is aangenomen dat de ontstekingskans van waterstof 100% bedraagt, terwijl die van aardgas kleiner is, wat een effect heeft op de gevonden risicocontouren. Indien de berekeningen hierboven derhalve met aardgas worden herhaald, ligt het in de lijn der verwachtingen dat de risicocontouren kleiner zijn. Gezien het feit dat dit station op een afgelegen locatie staat, zal voor de externe veiligheid daarmee geen verandering veroorzaken.

2.7 Conclusies

Een inventarisatie van de verschillende Quantitative Risk Assessment (QRA) tools voor het bepalen van de risicocontouren rond een zogenaamd districtstation (druk < 8 barg) is uitgevoerd. Van deze tools zijn PipeSafe, Carola en RisicoBerekeningsMethodiek Versie 2 (RBM II) niet geschikt. Pipesafe en Carola zijn ontwikkeld voor het bepalen van de risicocontouren van ondergrondse buisleidingen bij drukken vanaf 7 bar. Districtstations zijn bovengronds en werken met lagere drukken. De RBM II tool maakt gebruik van een beperkt aantal modelstoffen, welke geen van allen het gedrag van waterstof simuleren. Tevens is deze tool bedoeld voor mobiele toepassingen en niet voor stationaire toepassingen zoals een districtstation.

De QRA tools Safeti-NL en Conifer zijn geschikt voor het bepalen van de risicocontouren rond een districtstation. Conifer is specifiek ontwikkeld voor het vaststellen van de risico's voor dat deel van het gasnetwerk vanaf een districtstation tot een gasmeter. Origineel ontwikkeld voor aardgas en momenteel uitgebreid voor waterstof. Safeti-NL is het meest gangbare QRA softwarepakket dat in Nederland door het bevoegd gezag wordt (h)erkend als tool voor het vaststellen van de risicocontouren voor installaties waarbij toxische en/of brandbare stoffen.

Een directe vergelijking tussen beide tools Safeti-NL en Conifer voor specifiek een districtstation is niet gemaakt. Wanneer beide tools worden toegepast voor een (willekeurige) situatie waarbij de risicocontouren van waterstof worden vergeleken met die aardgas, laten beide tools grotere risicocontouren zien voor waterstof vergeleken met aardgas. Beide tools zijn hun databases voor waterstof verder aan het uitbreiden en daarmee is ook het validatietraject in volle gang. In de situatie van onvolledige validatie rekenen beide softwaretools in geval van waterstof met worst case scenario's, zoals een ontstekingskans van 100%. Daarmee zijn de contouren voor waterstof groter dan die voor aardgas. Met verdere invulling van de databases, zeker voor een openlucht situatie, is het de verwachting dat de contouren dichter op elkaar komen te liggen.

Er dient opgemerkt te worden dat Safeti-NL door het Nederlands bevoegd gezag wordt geaccepteerd en dat een licentie op deze tool verkregen kan worden. Voor Conifer geldt dat deze minder bekend is in Nederland en er geen licentie van verkregen kan worden.

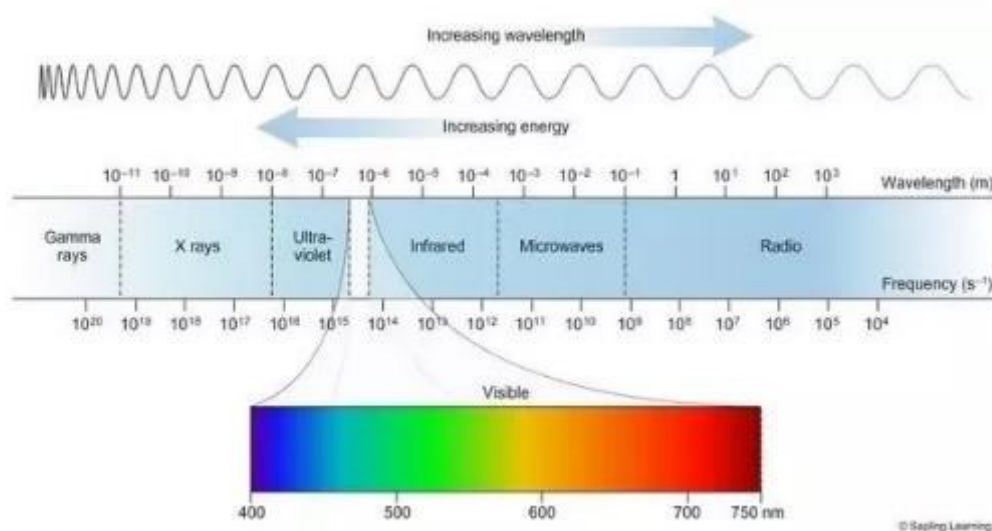
3 Detectie van een waterstofbrand

3.1 Inleiding

Vanuit veiligheidsoogpunt is het belangrijk dat een waterstofvlam of -brand visueel kan worden waargenomen. De eigenschappen van waterstof en zijn verbrandingsgassen maken de zichtbaarheid van de vlam met het blote oog uiterst situatieafhankelijk. Hoe dat precies zit, wat de praktijksituaties uit de literatuur laten zien en welke detectiemethoden er beschikbaar zijn voor het waarneembaar maken van de waterstofvlam, wordt hieronder besproken.

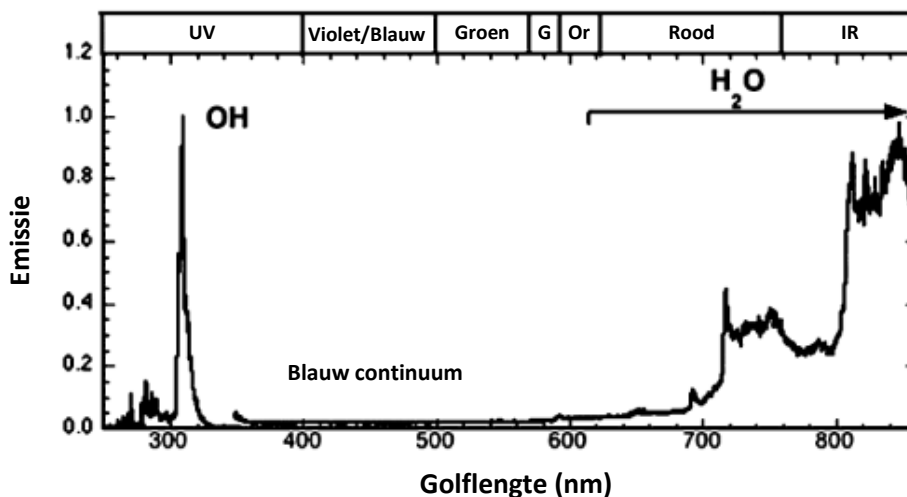
3.2 Eigenschappen van een waterstofvlam

We kunnen objecten waarnemen met het blote oog doordat het oog straling opvangt die door objecten wordt uitgezonden. Er zijn verschillende vormen van straling, van gammastraling tot radiogolven, maar alleen de straling met golflengtes tussen de ruwweg 400-750 nm kunnen als kleuren worden waargenomen door het blote oog. Dat golflengtegebied wordt ook wel het zichtbare spectrum genoemd (zie Figuur 15).



Figuur 15 De verschillende soorten straling van het elektromagnetisch spectrum. Het zichtbaar licht spectrum en de kleuren die geassocieerd worden met specifieke golflengtes zijn uitvergroot

De zichtbaarheid van een vlam is afhankelijk van de componenten (moleculen/radicalen/atomen) die zich in het gas-luchtmengsel bevinden. De energie die bij verbranding vrijkomt, zorgt voor excitatie van elektronen van componenten in de vlam. Wanneer die componenten weer terugvallen in hun oorspronkelijke grondtoestand, komt straling vrij. Een vlam bestaand uit moleculen/radicalen/ atomen die meer straling uitzenden in het zichtbare spectrum, zal dan ook beter waarneembaar zijn met het blote oog. De emissie van straling van een vlam kan worden gemeten en weergegeven in de vorm van een emissiespectrum. Het emissiespectrum van een typische waterstofvlam is weergegeven in Figuur 16. De piek in het golflengtegebied van 600 tot ongeveer 900 nm wordt toegeschreven aan sterk geëxciteerde en vibrerende watermoleculen (H₂O) en produceert het rode schijnsel in een waterstofvlam. Het langgerekte, relatief zwakke, blauwe emissie continuüm rechts van de OH-piek wordt toegeschreven aan de reactie tussen OH- en H-radicalen waarbij H₂O wordt gevormd. Deze reactie is verantwoordelijk voor de blauwe kleur in de vlam [21]. Deze laatste reactie vindt ook plaats bij de verbranding van aardgas en zorgt ook daar voor eenzelfde blauwe tint. De geeloranje kleuren in een aardgasvlam worden toegeschreven aan reacties waarbij moleculen/ radicalen met koolstof betrokken zijn. Moleculen/ radicalen met koolstof ontbreken bij de verbranding van waterstof.

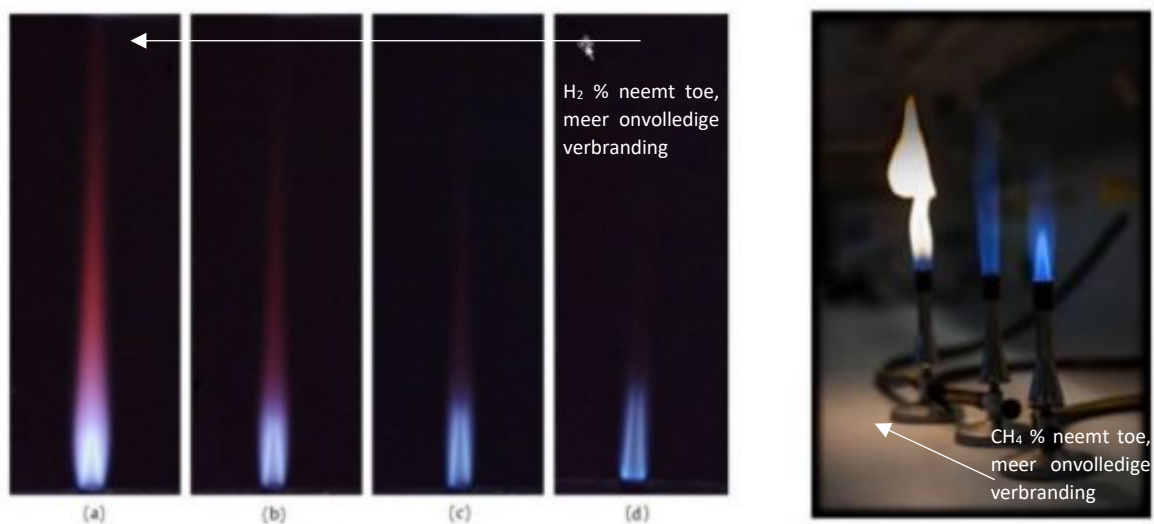


Figuur 16 typisch emissiespectrum van een waterstofvlam van ultraviolet tot infrarood (bewerkt naar [21])

3.3 Factoren die zichtbaarheid waterstofvlam beïnvloeden

Gas-luchtverhouding

De intensiteit van de vlam en de vlamkleur zijn naast aanwezige radicalen/atomen ook afhankelijk van de gas-luchtverhouding van het brandbare mengsel. Normaal gesproken heeft de waterstofvlam een grauwbloeiende kleur. Echter, wanneer de ratio gas/lucht toeneemt, worden ook roodtinten zichtbaar en wordt de intensiteit van de vlam licht verhoogd. Eenzelfde effect zien we bij aardgas, waar verschuiving naar geeloranje tinten plaatsvindt naarmate de ratio gas/lucht en daarmee onvolledige verbranding toeneemt. Dit wordt verklaard door toenemen van onvolledige verbranding [21]. Figuur 17 zijn de foto's te zien uit de studie die dit illustreren.



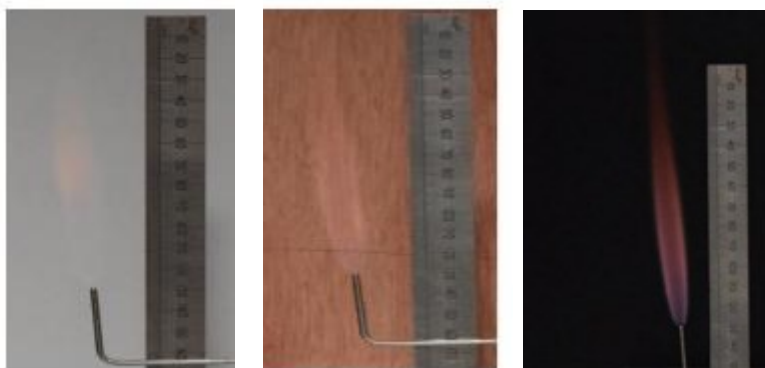
Figuur 17 Waterstofvlam (links) en aardgasvlam (rechts) [21]

Omgevingsfactoren (achtergrond en vervuilende elementen)

Door de omgevingssituatie kan een waterstofvlam beter of slechter afsteken tegen de achtergrond en daarmee beter of minder goed waarneembaar zijn. Een donkere achtergrond, zoals een nachtelijke situatie of een donker materiaal vergroot de waarneembaarheid van de waterstofvlam. Dit is duidelijk te zien in beelden van een experiment van de AIChE Academy (Figuur 18) [22] en zoals opgenomen in het Hydrogen Colourant report van DNV [23] (Figuur 19).



Figuur 18 Een propaanvlam en waterstofvlam in nachtelijke situatie (links) en overdag (rechts) [22].



Figuur 19 Waterstofvlam (80 mbar) tegen een witte achtergrond, houten achtergrond en zwarte achtergrond [23]

Naast een donkere achtergrond, kan de waarneembaarheid ook worden vergroot door de aanwezigheid van vervuilende elementen. De verbrandingsproducten daarvan kunnen bij excitatie ook straling uitzenden in het zichtbare spectrum.

De waarneembaarheid van een waterstofvlam of -brand in praktijksituaties in hoge- en lagedruk distributieleidingen is in verschillende onderzoeken beschreven [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29]. De beschikbare literatuur laat geen eenduidig beeld zien en stelt niet onomstotelijk vast of een waterstofvlam in een situatie voldoende zichtbaar is. Als onderdeel van het H21-project werden grootschalige waterstofbranden in 8 inch stalen leidingen onder drukken van 350 mbar, 2 bar en 7 bar onderzocht [28], [17]. De resultaten laten zien dat de waarneembaarheid van de vlammen bij leidingen zonder grondbedekking verschillend wordt geïnterpreteerd. Een studie van DNV GL voor het H21-project stelt dat 'zeer weinig zichtbare straling' te zien is, zie Figuur 20 [27]. Tegelijkertijd wordt in een rapport van DNV GL voor het H100 Fife-project de vlamwaarneembaarheid van exact dezelfde foto's in Figuur 20 gekwalificeerd als 'duidelijk zichtbaar, hoewel zichtbaarheid van de vlammen door de achtergrond (donkere bomenrij) kan worden bevorderd' [26]. Data over waterstofbranden bij leidingbreuken met grondbedekking is schaars. Een gesimuleerde leidingbreuk en -brand in een 60 bar transportleiding uitgevoerd in de nacht [29] is zeer duidelijk waarneembaar [23], [26]. In het H21-project (H21 Phase1B) worden meer testen voorzien met distributieleidingen met grondbedekking

[12]. Bij het afblazen en affakkelen van waterstof zijn kleuren overdag nauwelijks tot niet waarneembaar tegen een blauwe hemel of groen bladerdek [24], [25].



Figuur 20 Zichtbaarheid van waterstofbranden in 8 inch stalen leidingen onder drukken van (v.l.n.r.) 350 mbar, 2 bar en 7 bar en zonder grondbelasting [26] [27]

De waarneembaarheid van een waterstofvlam in praktijksituaties voor gasdistributieleidingen verschilt per toepassing en is sterk afhankelijk van omgevingsfactoren, zoals dag/nacht, achtergrond en aanwezig materiaal voor 'vlamvervuiling', maar ook menselijke interpretatie.

Aanwezigheid van odorant

In de literatuur over de zichtbaarheid van waterstofvlammen is geen informatie gevonden over de invloed van odorant op de zichtbaarheid van een waterstofvlam.

3.4 Detectietechnieken

Voor industriële toepassingen worden sensoren al jaren gebruikt voor waterstofvlamdetectie. Het gaat hierbij hoofdzakelijk om stationaire sensoren die vaak zijn gekoppeld aan de waterstoftoevoer en -installatie en zorgen voor een veilige automatische uitschakeling en isolatie van waterstofbronnen, alsmede auditieve en visuele alarmen. Deze sensoren richten zich niet op het visueel waarneembaar maken van de vlammen. Monteurs werkzaam aan het gasnet (waterstof) en hulpverleners, zoals bijvoorbeeld de brandweer, werken meestal op plekken waar geen continue vlambewaking aanwezig is. Om een waterstofbrand te kunnen zien, zullen zij draagbare, eenvoudig te hanteren hulpmiddelen nodig hebben die een snelle en betrouwbare indicatie geven van het bestaan, de locatie en de grootte van een waterstofvlam.

Kijkend naar het elektromagnetische spectrum van waterstofvlammen, zijn sensoren die de schakel vormen tussen onzichtbare ultraviolet- en infraroodstraling en het menselijk oog mogelijk geschikte detectietechnieken. Een draagbare warmtebeeldcamera die door middel van thermografie infraroodstraling meet en in 'real-time' omzet in een thermisch beeld dat door het menselijk oog kan worden waargenomen, is hier een voorbeeld van. Sensoren die ultravioletstraling omzetten in een waarneembaar beeld, zijn nog niet beschikbaar op de markt maar de techniek is wel bewezen [30]. Daarnaast zijn er infrarood-ultraviolet combisensoren beschikbaar voor industriële toepassingen (vaste opstelling). Combisensoren zorgen voor snellere detectie en hogere betrouwbaarheid door middel van filteren van valse alarmen zoals vonken, bliksem en andere UV-rijke niet-vlambronnen. Ook deze combisensoren voor draagbare toepassing zijn nog niet op de markt.

3.5 Vlamzichtbaarheid en -detectie in waterstoftoestellen

Verschillende manieren om de zichtbaarheid van een waterstofvlam te garanderen zijn beschreven in het Hy4heat Hydrogen Colourant report [23]. Hier wordt vooral de nadruk gelegd op waterstoftoestellen. Een thermochrome coating die verkleurt bij verwarming [31], metalen staafjes die gloeien in de vlam en manieren van ‘warm oppervlak indicatie’ met thermokoppels gekoppeld aan LED-displays, zoals ook in elektrische fornuizen worden gebruikt, worden als opties genoemd. Ook detectieapparatuur gebaseerd op infrarood- en ultravioletstraling (IR-sensoren en UV-sensoren) worden als potentiële kandidaten gezien. Deze zullen wel moeten worden ontwikkeld voor lage niveaus van radiatie [23]. De verantwoordelijkheid en ontwikkeling hiervan ligt echter bij de fabrikanten en zal hier verder niet worden besproken. Het toevoegen van een kleurstof wordt uitgesloten als optie, omdat dit potentieel kan resulteren in het ontstaan van schadelijke bijproducten en leiden tot corrosie van materialen [23].

3.6 Is vlamdetectieapparatuur noodzakelijk voor netbeheerders?

Om de vraag of vlamdetectieapparatuur noodzakelijk is voor netbeheerders te kunnen beantwoorden, is gekeken naar de situaties waarin er sprake kan zijn van een waterstofuitstroom en eventueel een waterstofvlam. Een waterstofuitstroom kan gepland zijn, bijvoorbeeld in het geval van affakkelen of afblazen. Een waterstofuitstroom kan ook ongepland zijn, bijvoorbeeld als gevolg van lekkage of als gevolg van beschadiging door werkzaamheden.

3.7 Geplande gasuitstroom

Een geplande waterstofuitstroom doet zich voor bij het affakkelen en afblazen van gas. Kiwa rapport GT-200096 [25] beschrijft het onderzoek naar het veilig en doelmatig in- en uit bedrijf stellen van waterstofleidingen door middel van affakkelen of afblazen. Het uitgevoerde onderzoek gaf geen aanleiding om het beschikbaar hebben van middelen voor vlamdetectie op te nemen als aanbeveling. Inmiddels is meer ervaring opgedaan met het affakkelen van waterstof. Omdat de zichtbaarheid van de waterstofvlam bij affakkelen, afhankelijk van de omgeving slecht kan zijn, is het van belang dat de personen die aanwezig zijn bij het affakkelen zich bewust zijn van de aanwezigheid van een vlam. Naar aanleiding van deze ervaring is het een aanbeveling om in de veiligheidswerk instructies voor het affakkelen van waterstof het gevaar te benoemen van het zich niet bewust zijn van de aanwezigheid van een waterstofvlam specifiek.

3.8 Ongeplande uitstroom

Kiwa heeft in 2021 ten behoeve van de klankbordgroep van het Kenniscentrum Gasnetbeheer een analyse uitgevoerd van de incidentmeldingen volgens het Staatstoezicht op de Mijnen (SodM) meldingscriteria in de periode 2017 tot en met 2019. In deze periode zijn er 572 incidenten gemeld waarbij er sprake was van gasuitstroom. Bij 505 incidenten was er geen ontsteking van het vrijgekomen gas, bij 5 incidenten was er sprake van een vertraagde ontsteking van het gas en bij 62 incidenten was er sprake van directe ontsteking van het gas en daarmee sprake van een gasbrand.

De 62 incidenten met directe ontsteking van het vrijgekomen gas onderscheiden zich als volgt:

- Bij 31 incidenten met directe ontsteking betroffen branden in de meterkast, waarbij de gasbrand het gevolg was van een andere brand.
- Bij 16 incidenten was de gasbrand het gevolg van graafwerk waarbij de gas- en elektriciteitsleiding gelijktijdig werden beschadigd.

- Bij 15 incidenten was de gasbrand het gevolg van werkzaamheden aan of in de nabijheid van gasleidingen. De oorzaak van het ontstaan van de brand was het beschadigen van de gasleidingen in combinatie met het gebruik van elektrisch gereedschap of branders. Deze incidenten hebben zowel binnen als buiten de gevel plaatsgevonden.

Wanneer deze incidenten zich voor zouden doen met waterstof, dan is het aannemelijk dat de waterstofvlam zichtbaar is doordat er ook materiaal uit de omgeving verbrandt. Op dit moment ontbreekt echter de ervaring om deze aanname te onderbouwen.

Daarnaast ontbreekt het inzicht of de lekkages die zich nu voordoen bij de distributie van aardgas als gevolg van asset falen (bijvoorbeeld als gevolg van corrosie of zakkende grond) en die niet leiden tot een gasbrand, bij de distributie van waterstof wel zullen leiden tot een gasbrand.

Door het gebrek aan praktijkervaring met waterstofbranden wordt ervan uitgegaan dat situaties waarbij een waterstofvlam niet- of slecht zichtbaar zal zijn, niet zijn uitgesloten.

3.9 Aanbeveling

Omdat de ervaring ontbreekt wordt een aanbeveling gedaan om voor monteurs bij pilotprojecten middelen ter beschikking te stellen voor het detecteren van een waterstofvlam en monteurs bewust te maken van de mogelijke aanwezigheid van een waterstofvlam. Met de ervaring die wordt opgedaan tijdens de pilotprojecten en eventueel onderzoek kan bepaald worden of in de toekomst vlamdetectie apparatuur beschikbaar moet blijven voor werkzaamheden aan waterstofnetten.

Omdat informatie ontbreekt over de zichtbaarheid van brandend geodoriseerd waterstof is de aanbeveling om door middel van onderzoek vast te stellen of THT odorisatie effect heeft op de zichtbaarheid van een waterstofvlam.

Om kennis over de zichtbaarheid van waterstofvlammen te verkrijgen is de aanbeveling om in het geval van incidenten te informeren naar de zichtbaarheid van de waterstofvlam en deze informatie vast te leggen in de incidentrapportage.

4 Effectiviteit van THT odorisatie

4.1 Inleiding

Omdat waterstofgas net als aardgas geen kenmerkende geur heeft. Zal bij een toekomstige distributie van waterstof het gas geodoriseerd worden.

De vraag die in het kader van het HyDelta 2.0 programma is gesteld, is het volgende:

In hoeverre wordt de effectiviteit van de barrière odorisatie beïnvloed door bijvoorbeeld adsorptie en/of absorptie van het odorant?

Bij de huidige distributie van aardgas wordt een odorant toegevoegd aan het gas. Dit odorant moet ervoor zorgen dat een gaslek kan worden waargenomen door reuk. De odorisatie heeft tot doel om personen te alarmeren in het geval van een gaslekage. Door het odoriseren moet de geur ver beneden de onderste brandbaarheidsgrens van het gas kunnen worden waargenomen. Het alarmeren moet leiden tot het nemen van actie (zelf sluiten van gastoevoer, bellen hulpdiensten, bellen landelijk storingsnummer). Het geheel van waarnemen en actie nemen vormt daarmee een barrière (maatregel) die moet voorkomen dat een gaslekage escaleert tot bijvoorbeeld een brand of explosie.

4.2 Scope

Het niet of te laat nemen van actie na het ruiken van het odorant is ook van invloed op de effectiviteit van de barrière (maatregel). In deze analyse is de beïnvloeding van 'het nemen van actie' buiten beschouwing gelaten.

Odorant wordt door middel van een odorisatie-unit toegevoegd aan het gas. De situatie waarbij er onvoldoende odorant is toegevoegd aan het gas als gevolg van het falen van de odorisatie-unit wordt in deze analyse buiten beschouwing gelaten.

4.3 Wat bepaalt de effectiviteit van de barrière odorisatie?

De barrière (maatregel) odorisatie bestaat uit de activiteiten waarnemen en nemen van actie. De odorisatie van gas moet het waarnemen van dat gas mogelijk maken. Wanneer het waarnemen niet mogelijk is, of wanneer het waarnemen pas plaatsvindt bij een hogere gasconcentratie, dan neemt de effectiviteit van de barrière (maatregel) af.

4.4 Welke fenomenen kunnen de effectiviteit van de barrière odorisatie beïnvloeden?

Met input van de leden van HyDelta werkpakket 6a en aan de hand van vindbare literatuur is een inventarisatie gemaakt van fenomenen die mogelijk van invloed kunnen zijn op de effectiviteit van de barrière (maatregel) odorisatie.

- **Vervagen van de ruikbaarheid bij gebruik van nieuwe gasleidingen**

Bij gasnetbeheerders heeft men de ervaring bij aardgas dat bij het in gebruik nemen van nieuwe gasleidingen er een periode is waarin het gas dat vrijkomt niet ruikbaar is. Verschillende publicaties bevestigen het verschijnsel, onder andere; odor fading in natural gas distribution systems [32] en odor fade – possible causes and remedies [33]. In de publicaties wordt onderscheid gemaakt tussen enerzijds het vervagen van odorant als gevolg van oxidatie en anderzijds als gevolg van adsorptie en/of absorptie.

De oxidatie van odorant ontstaat door de aanwezigheid van ijzeroxide en lucht in een leiding. Door deze aanwezigheid oxideert het odorant in componenten die nauwelijks ruikbaar zijn. De op sulfide gebaseerde odoranten, zoals THT, zijn niet gevoelig voor deze oxidatie. De absorptie en/of adsorptie van odorant doet zich voor bij nieuwe leidingen, zowel kunststof als staal. Er zijn geen onderzoeksresultaten gevonden welke inzicht geven in de mate van absorptie en/of adsorptie van THT bij nieuwe stalen- en/of kunststofleidingen.

Om de vervaging van odorant als gevolg van absorptie/ adsorptie te voorkomen, wordt geadviseerd om bij ingebruikname van een nieuwe leiding de hoeveelheid odorisatie tijdelijk te verhogen.

De hierboven beschreven effecten zullen zich bij zowel de distributie van aardgas als bij de distributie van waterstof voordoen.

- **Adsorptiegedrag van odorant in de bodem.**

Bij een ondergrondse gaslekage zal het gas zich verspreiden in de bodem en uiteindelijk het grondoppervlak bereiken. In het kader van het Kenniscentrum Gasnetbeheer is onderzoek uitgevoerd naar het adsorptiegedrag van THT in de bodem [34].

De voornaamste conclusie uit dit onderzoek is volgende;

Het onderzoek laat zien dat er tijd zit tussen het moment dat waterstof (of aardgas) uit de bodem vrij komt en het moment dat het gas ruikbaar wordt doordat ook het THT in voldoende mate boven de grond detecteerbaar (ruikbaar) is. Een uitspraak of dit tot een acceptabel risico leidt, kan met dit onderzoek niet worden verkregen. Daarvoor is een risicoafweging nodig. Hierbij kunnen factoren als de kans dat detectie door omstanders op basis van reuk plaatsvindt als ook de kans dat dit tot een klasse 1 of 2 lek zal leiden, worden meegenomen. Aanbevolen wordt een dergelijke risicoafweging op sectorniveau uit te voeren.

Het onderzoek beschrijft dat het de vertraging in het waarnemen van het THT bij een aardgas lekkage circa 40 uur bedraagt en bij gelijke lek grootte bij waterstof circa 100 uur bedraagt. Door de snellere verspreiding van waterstof ten opzichte van aardgas is er geen aanleiding te veronderstellen dat er sprake is van een groter risico in het geval van een ondergrondse waterstof lekkage.

- **Scheiding tussen het waterstof en het odorant bij lekkage**

In het Marcogaz rapport “odorisation of natural gas and hydrogen mixtures” [35] wordt als aandachtspunt de gelaagdheid genoemd die ontstaat in een waterstof – aardgasmengsel bij lekkage en daarmee de scheiding tussen het waterstof en het aardgas met odorant. Een referentie naar de herkomst van dit aandachtspunt ontbreekt in het rapport.

In Hydelta 1.0 is in Werkpakket 2 “odorisation of hydrogen” literatuuronderzoek gedaan naar het gedrag van een odorant in een gaswolk van waterstof [36]. De conclusie in dit rapport is volgende:

Onderzoeken uitgevoerd in het kader van de projecten Hyhouse en H100, alsmede onderzoek van het Britse HSE en van Pulles vanuit het Kenniscentrum Gasnetbeheer tonen aan dat de verspreiding in lucht van een gasmengsel en van de individuele componenten in het gasmengsel, wordt bepaald door de dichtheid van het gehele gasmengsel. Er zal geen spontane ontmenging van lichtere of zwaardere componenten plaatsvinden. Er kunnen grote verschillen zijn tussen de gasvormige componenten, wat betreft de laminaire diffusiecoëfficiënten in lucht, maar convectie is bepalend voor de verspreiding in lucht en laminaire diffusie is zo traag dat dit geen rol speelt. Experimenten in het kader van het Hy100 project hebben aangetoond dat dit ook geldt voor een mengsel van een odorant in waterstof. Bij een gaslek blijft de odorant in de waterstofwolk en treedt geen spontane ontmenging op.

Voor de ontmenging van waterstof en odorant bij een (bovengronds) gaslek, lijkt er vooralsnog geen aanwijzing te zijn. De enige bron die waarschuwt voor dit verschijnsel is een Marcogaz rapport, maar dit lijkt eerder gebaseerd op een verwachting dan op experimenten of berekeningen.

4.5 Conclusie

De effectiviteit van de barrière odorisatie (met THT) is voor waterstof vergelijkbaar met die van aardgas.

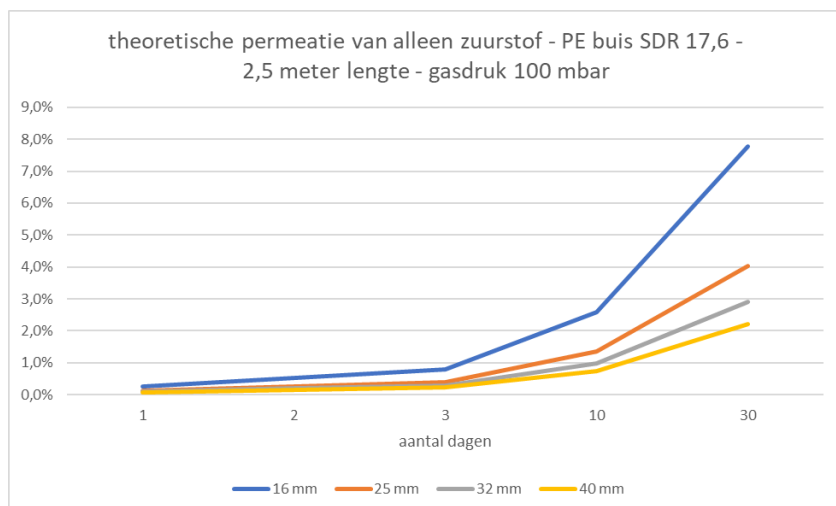
5 Het effect op veiligheid en gaskwaliteit van permeatie van stikstof, zuurstof en water van buiten de gasleiding naar binnen.

5.1 Inleiding

In het kader van het HyDelta 2.0 programma is de volgende vraag gesteld; wat is het effect op veiligheid en gaskwaliteit van de permeatie van stikstof, zuurstof en water van buiten de buisleiding naar binnen?

Permeatie is een natuurlijk proces waarbij een vloeistof, gas of damp door een vaste stof beweegt. Dit proces wordt gedreven door een verschil in concentratie. Bij gasleidingen is de concentratie stikstof, zuurstof en water buiten de leiding hoger dan in de leiding. Hierdoor zal het stikstof, zuurstof en water van buiten de leiding naar binnen permeëren. Andersom zal het gas in de leiding naar buiten permeëren.

In HyDelta 1 werkpakket 1C 'Leidingen en binneninstallaties' is onderzoek gedaan naar de permeatie van stikstof, zuurstof en water van buiten de buiswand naar binnen. Hierbij is de permeatiecoëfficiënt bepaald van de materialen PVC en PE. De resultaten hiervan zijn vastgelegd in rapport D1C3 vraagnummer 135 – de invloed van bestaande aardgasdistributienetten op de kwaliteit van waterstof [37]. In het rapport zijn met de vastgestelde permeatiecoëfficiënt enkele scenario's (verschillende buizen, buismaterialen, lengte en drukken) doorgerekend waarbij bepaald is hoeveelheid zuurstof, stikstof en water er per tijdseenheid in de leiding komt. Om meer inzicht te krijgen in de mate van permeatie, is overeenkomstig deze scenarioberekeningen een aantal aanvullende berekeningen gemaakt. De berekeningen laten zien dat in het geval van stilstaand gas in een leiding (bijvoorbeeld in het geval van afgesloten leidingdelen of in een situatie van geen gasverbruik), de hoeveelheid zuurstof toeneemt tot enkele procenten van het gasvolume in de leiding. Met name bij PE leidingen met kleine diameter (kleiner DN40) treedt dit effect sneller op dan bij leidingen met diameters boven de DN40 of bij PVC leidingen.



Figuur 21 Indicatief het percentage zuurstof na x dagen t.o.v. het totale gasvolume in een buis van 2,5 meter met een gasdruk van 100 mbar. (na 30 dagen bestaat 8% van het totale gasvolume uit zuurstof).

Bovenstaande wekt de indruk dat permeatie effect zal hebben op de veiligheid en de gaskwaliteit. Bovenstaande figuur laat zien dat, theoretisch, in geval van een 16mm leiding na ongeveer 15 dagen

er zich 5 vol% zuurstof in de leiding kan bevinden. Met het aanwezige waterstof in de leiding ontstaat er daarmee een brandbaar mengsel. De bevindingen zijn echter niet zonder kanttekeningen. De scenario's gaan uit van een situatie waarbij er dagenlang geen gasstroming is. De vraag is of dit een reële situatie is. In het rapport 'Een verkenning naar waterstofspectificaties' [38] wordt een worst case situatie van 6 uur stilstand beschouwd. Hierbij is bepaald dat na 6 uur er 6,5 ppm zuurstof en 10,4 ppm stikstof in de leiding is gepermeëerd. Deze mate van permeatie geeft in het rapport geen aanleiding om te spreken van een onacceptabel effect ten aanzien van veiligheid en gaskwaliteit.

Daarnaast wordt in de hiervoor genoemde rapporten de permeatie van buiten naar binnen van stikstof, water en zuurstof individueel beschouwd. De werkelijke situatie is dat er componenten van buiten naar binnen gaan en van binnen naar buiten. Dit totale proces heeft effect op de gassamenstelling en daarmee op de kwaliteit en de veiligheid. Er is voor zover bekend geen onderzoek geweest naar de verandering in samenstelling van een gas gedurende een periode van stilstand. Onderzoek naar de verandering van gassamenstelling wordt op het moment van schrijven van dit rapport uitgevoerd in opdracht van Netbeheer Nederland.

5.2 Samengevat

Het antwoord op de vraag; wat is het exacte effect is op veiligheid en gaskwaliteit van de permeatie van stikstof, zuurstof en water van buiten de buisleiding naar binnen, is op dit moment niet te geven. Permeatie is een natuurlijk proces en zal effect hebben op de gassamenstelling in een leiding met name in situaties van langdurige stilstaand gas. Wat het effect is van deze verandering van gassamenstelling op de veiligheid en gaskwaliteit is op basis van de beschikbare informatie (nog) niet bekend.

5.3 Aanbeveling

Omdat het effect van permeatie op de veiligheid en gaskwaliteit onbekend is, is het aan te bevelen om bij pilotprojecten de gassamenstelling te monitoren met name in situaties waarbij er sprake is van langdurige stilstand van waterstof in leidingen.

6 Referenties

- [1] A. Van den Noort, „D6a_2_3: Toepassen QRA model Nederland en Uitkomsten QRA model case studies,” HyDelta, 2023.
- [2] H. Salomons, „D6a_1: Uitkomsten uitstroomexperimenten - Concentratieopbouw bij lekkages tussen (50–1000 dm³/h),” HyDelta, 2023.
- [3] RIVM, „Carola - Computerapplicatie voor risicoberekeningen aan ondergrondse leidingen met aardgas,” Version 1.2, June 2013.
- [4] PipeSafe Group, „An overview of the Pipesafe risk assessment package for natural gas transmission pipelines. PipeSafe version 2.19.0, Document number PG/15/01,” March 2015.
- [5] „HyWay 27,” [Online]. Available: <https://www.hyway27.nl>.
- [6] *Personal communication John Zevenbergen (TNO) and Marc Dröge (GasUnie).* [Interview].
- [7] DNV, „Handleiding Safeti-NL versie 8.5,” 2022.
- [8] Committee for the Prevention of Disasters, Guideline for Quantitative Risk Assessment (“Purple Book”) CPR 18E, The Hague : SDU, 1999, renumbered to PGS 3 in 2005.
- [9] D. Miller, „New model for predicting thermal radiation from flares and high pressure jet fires for hydrogen and syngas,” *Process Safety Progress*, vol. 36, nr. 3, pp. 237-251, 2017.
- [10] D. Worthington, „Application of Phast and Safeti to hydrogen consequences and risks,” June 2022.
- [11] Adviesgroep AVIV BV, Handleiding RBM II Version 2.0, 2011.
- [12] RIVM, Handleiding Risicoanalyse Transport (HART) Version 1.2, January 2017.
- [13] Committee for the prevention of Disasters, Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) (“Yellow Book”), CPR 14E, The Hague: SDU, 2005, renumbered to PGS 2 in 2005.
- [14] Projectteam informatieproducten externe veiligheid (IPO), „Landelijke Populatieservice, Version 2.0,” April 2022.
- [15] M. Acton, A. Halford, P. A., R. Oxley en D. Evans, „Quantification of the risks associated with a hydrogen gas distribution network,” in *Hazards 31 Conference*, 2021.
- [16] A. Philips, A. Halford en O. R., „Comparison of the risks associated with natural gas and hydrogen distribution networks,” in *HAZARDS 32, Symposium Series 168*, 2022.

- [17] „H21 website,” [Online]. Available: www.h21.green.
- [18] AnteaGroup, „Consequentieonderzoek externe veiligheid – waterstofbuisleidingen. Projectnummer 0473733.100,” 2023.
- [19] Centrum Veiligheid, RIVM, „Rekenmethodiek transport waterstof in (aardgas)transportleidingen, 2021-0074/VLH/HdW/ibm,” 2021.
- [20] Arcadis, „Kwantitatieve risicoanalyse (QRA) N-TRA - Waterstofwijk Hoogeveen,” oktober 2021.
- [21] R. Schefer, W. Kulatilaka, B. Patterson en T. Setterst, „Visible emission of hydrogen flames,” *Elsevier*, vol. June 2009, nr. Volume 156, Issue 6, pp. 1234-1241, 2009.
- [22] A. adademy. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=r-8H5u4YzuY>. [Geopend 2022].
- [23] DNV, „Hydrogen Colourant – Final Report,” Hy4Heat - Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2019.
- [24] S. Lueb, A. Kooiman en C. Lock, „Spoelen van aardgasleidingen met waterstof,” HyDelta 1 - WP 1C Leidingen en binneninstallaties (componenten) - D1C.1 vraagnummer 187, 2021.
- [25] C. Lock, C. Pulles en J. de Laat, „Affakkelen en afblazen van waterstof,” rapport GT-200096, Kiwa Technology in opdracht van Netbeheer Nederland, april 2021.
- [26] M. Caulfield, S. Kimpton en A. Phillips, „Flame Visibility Risk Assessment,” DNV GL in opdracht van SGN - H100 Fife, 2021.
- [27] D. Allason, L. Jenney en M. Acton, „Thermal radiation properties of large hydrogen leaks from gas distribution network,” DNV GL voor H21 (ICHS conference 2019), 2019.
- [28] „HySafe conference papers and presentations (2019),” [Online]. Available: <https://hysafe.info/ichs2019/conference-papers-and-presentations/>. [Geopend 2022].
- [29] M. Acton, D. Allason, L. Creitz en B. Lowesmith, „Large Scale Experiments to Study Hydrogen Pipeline Fires,” 2011.
- [30] O. Toru, „A Real-Time Ultraviolet Radiation Imaging System Using an Organic Photoconductive Image Sensor,” MDPI open access journals, 2018.
- [31] Y. Shibarashi, „Thermochromic materials”. US patent Patent 4,425,161, 1984.
- [32] S. Mehrrad, F. Hooman, D. Tingsong, M. Trinayan, B. Tsilla en F. Ramin, „Odor fading in natural gas distribution systems,” Process safety and Environmental protection - Elsevier, 2015.
- [33] M. J. Usher, „Odor Fade - Possible Causes and Remedies,” 1999.
- [34] R. Hermkens en D. Reekers, „Adsorptiegedrag van THT in de bodem,” Kiwa Technology in opdracht van Netbeheer Nederland, 2022.
- [35] Marcogaz, „odorisation of natural gas and hydrogen mixtures,” Marcogaz, 2021.

- [36] E. Polman, „Hydelta WP2- D2.3 Stability of odorants in hydrogen,” 2022.
- [37] S. Jansma en D. Rekers, „Hydelta WP1C-D1C.3 vraagnummer 135 - invloed van aardgasdistributienet op kwaliteit waterstof,” Hydelta 1.0, 2022.
- [38] E. Polman, H. Vlap, P. Visser en A. v. d. Noort, „Een verkenning naar waterstofsificaties,” Netbeheer Nederland, 2021.
- [39] T. Bailey, „Slideplayer,” [Online]. Available: <https://slideplayer.com/slide/14808479/>. [Geopend 2022].
- [40] European Commission, „Gas Appliances Regulation,” 9 March 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/growth/sectors/pressure-equipment-and-gas-appliances/gas-appliances-sector/gas-appliances-regulation_en. [Geopend 2022].