

# HyDelta 2

## **WP6a– Veiligheid waterstof in distributienet en gebouwde omgeving**

D6a\_2 – Toepassen QRA model Nederland

D6a\_3 – Uitkomsten QRA model case studies

Status: final

## Document samenvatting

### Corresponderende auteur

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

### Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzigingen
1	3-3-2023	Albert van den Noort; Vincent Zwanenburg	DNV	Draft
2	22-3-2023	Albert van den Noort; Vincent Zwanenburg	DNV	Verwerking reviews begeleiding- en sparringgroep

### Verspreidingsniveau

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

### Document review

Partner	Naam	Naam:
	<i>Begeleidingsgroep:</i>	<i>Sparringsgroep:</i>
Enexis	Raymond van Hooijdonk;	Wim de Rooij; Ton Rovers
Alliander	Pascal te Morsche	Erik Rikken; Peter Verstegen
Rendo	Johan Jonkman, Roy Scholten	Ferry de Roo; Ed Verhagen
Stedin	Gilles de Kok	Robert van den Brink
NetbeheerNL	Tom Eijsackers	
KIWA	Rob van Aerde	
TNO	John Zevenbergen	
N-tra		Bastiaan Meijer
NIPV		Margreet Spoelstra
Westland infra		Rick den Hartog; Fabian Verweij
Coteq		Sytze Buruma
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC, Hanze	HyDelta Supervisory Group	

## Samenvatting

Om een eerste inschatting te kunnen maken van de risico's van waterstof in het Nederlandse distributienet, is een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) uitgevoerd. 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.

Het model versimpelt de gebouwde omgeving in Nederland om daarmee het aantal te variëren parameters en bijbehorende berekeningen in de hand te houden. Er is voor gekozen om in deze eerste versie met vrijstaande huizen te rekenen voor de validatie van het model. In de Voorbeeld Wijk studie zijn daarnaast ook 2-onder-1-kap woningen gebruikt. Het distributienet is versimpeld door gebruik te maken van een beperkt aantal materialen, drukken en diameters. Een belangrijke inputparameter van het model is de faalkans van de verschillende onderdelen. Voor het distributienet zijn de faalkansen bepaald aan de hand van historische storingsmeldingen. Voor de componenten achter de meter (meteropstelling, binnenleidingwerk en eindgebruikerstoestel) is geen betrouwbare dataset voor Nederland gevonden en is ervoor gekozen om de waarden uit het VK te gebruiken. Gegeven de benadering van de werkelijkheid op basis van hiervoor genoemde aannames levert het model een benadering van het plaatsgebonden risico ten gevolge van een brand of explosie. **Alle berekende plaatsgebonden risico's in deze studie voor zowel aardgas als waterstof blijven ver onder de  $1 \times 10^{-6}$  per jaar** en geven daarmee een zeer beperkt risico.

Op basis van hierboven besproken faalfrequenties in de woning, blijkt dat **het plaatsgebonden risico voor aardgas door lekkages achter de meter goed overeenkomt met de (beperkte) praktijkdata**. De kans op een dodelijk slachtoffer in Nederland ten gevolge van een explosie of brand per woning is op basis van de praktijk  $0.06 \times 10^{-6}$ , exclusief gevallen waarbij sprake was van opzet. Daarnaast is de kans op verwondingen  $1.1 \times 10^{-6}$ . Het model geeft respectievelijk  $0.02 \times 10^{-6}$  voor dodelijke slachtoffers en  $0.4 \times 10^{-6}$  voor gewonden en levert daarmee dezelfde orde van grootte als de praktijk. Het risico blijkt lineair te schalen met de faalfrequentie.

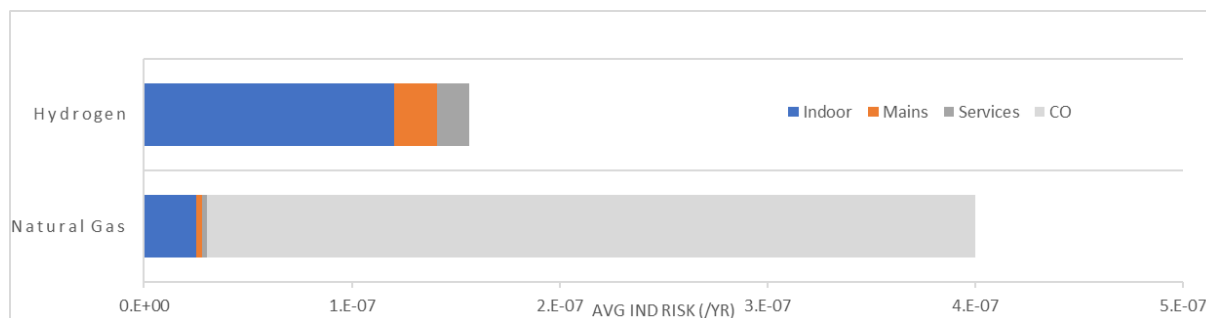
Bij dezelfde set aan parameters en zonder additionele maatregelen, blijkt dat het effect van de explosies bij waterstof heftiger te zijn dan bij aardgas. Het plaatsgebonden risico bij waterstof een factor 3.8 groter:  $0.18 \times 10^{-6}$ , indien het koolmonoxidevergiftiging risico buiten beschouwing wordt gelaten. Bij een vergelijk van het risico tussen waterstof en aardgas in de woning zal ook de risico ten gevolge van koolmonoxidevergiftiging meegenomen moeten worden. Het risico op overlijden ten gevolge van CO is  $0.37 \times 10^{-6}$  per aardgasaansluiting. Als dit risico meegenomen wordt in de vergelijking, blijkt dat er **een verschuiving optreedt van het verminderde risico door CO vergiftiging en een verhoogd risico vanuit explosies. Het totale plaatsgebonden risico is bij de gekozen set van aannames en zonder aanvullende maatregelen bij waterstof daarbij lager dan voor aardgas.**

Het effect van ventilatie op de opbouw van (gevaarlijke) concentraties in de woning is bepaald door een tiental identieke woningen met een verschillende ventilatievoud door te rekenen. Bij waterstof levert een halvering van de ventilatievoud een verhoging van het risico met een factor 1.8 op, terwijl een verdubbeling van de ventilatie een verlaging van het risico met een factor 2.2 oplevert. **Ventilatie heeft een sterker effect op het risico in de woning bij waterstof in vergelijking met aardgas.**

**De factor tussen het totale risico vanuit het distributienet zonder additionele maatregelen voor waterstof en aardgas is bijna 2.5x.** Op basis van de aannames gemaakt in het model en gemiddeld per aansluiting (7.2 miljoen) is het risico vanuit het distributienet in de woning ongeveer  $0.2 \times 10^{-6}$  voor waterstof, uitgaand dat er geen additionele mitigerende maatregelen getroffen worden.

Om een beter inzicht te krijgen in de relatieve effecten van de lekkages achter de meter en vanuit het distributienet is een representatieve voorbeeldwijk doorgerekend. Deze wijk bestaat uit 57 woningen verbonden zijn aan een 100mbar hoofdleiding middels aansluitleidingen. Het 100mbar net wordt gevoed door een stalen 8 bar leiding die door de wijk loopt. Het 100 mbar net is gemodelleerd in een aantal segmenten met verschillende materialen en diameters. De woningen zijn gemodelleerd op basis van hun oppervlak en bestaan zowel uit vrijstaande woningen als 2-onder-1-kap woningen. Daarnaast is voor elk van de woningen ook het risico door lekkages achter de meter bepaald.

De kans op lekkages die leiden tot ophoping van gas in een woning is groter voor lekkages achter de meter. **Voor waterstof blijkt het grootste deel van het plaatsgebonden risico veroorzaakt te worden door lekkages achter de meter (ongeveer 73%). Het overige deel wordt veroorzaakt door de hoofdleiding en aansluitleiding waarop de woning is aangesloten, maar ook nabijgelegen hoofdleiding delen geven een risico.** Over het algemeen is de bijdrage van de 100mbar leiding groter dan van de 8 bar leiding, uiteraard afhankelijk van de afstand tussen de woningen en deze leidingen. De risico's zijn het grootst bij 2-onder-1-kap woningen vergeleken met de vrijstaande woningen. Bij waterstof is, net als bij de hiervoor beschreven risico's, het effect van explosies groter dan van aardgas. Echter het totale risico is gemiddeld per woning in de wijk bij waterstof kleiner dan het risico van aardgas als de bijdrage van CO vergiftiging meegenomen wordt, zoals blijkt uit onderstaand overzicht. **Ook hier geldt dat het totale risico, zelfs zonder additionele maatregelen, ver onder de  $1 \times 10^{-6}$  blijft in beide gevallen en er dus over een relatief klein risico gesproken wordt.**



Figuur 1 Gemiddeld locatiegebonden risico per woning in de voorbeeldwijk voor waterstof en aardgas

**Samenvattend wordt geconcludeerd dat de risico's zoals berekend in het model relatief klein zijn.** In perspectief was het totaal aantal dodelijke ongevallen in Nederland in 2021 ongeveer 6500. Het grootste aandeel daarvan had als oorzaak een accidentele val (5430 overeenkomend met een risico per inwoner van ongeveer  $3 \times 10^{-4}$ /jaar). Het totaal van dodelijke ongevallen door rook, vuur en vlammen was in 2017 43, overeenkomend met een risico van  $2 \times 10^{-6}$ . Het aandeel veroorzaakt door aardgas in de gebouwde omgeving is hier een fractie van.

Het risico bij waterstof kan verlaagd worden door de lagere faalfrequenties te realiseren. Het blijkt dat vooral spontane lekken in veel voorkomende delen van het net (100 mbar) bijdragen aan het totale risico. Interferentie schade wordt eerder opgemerkt en leidt daardoor minder vaak tot ophoping van gas tot gevaarlijke concentraties in gesloten ruimtes. Het grootste effect kan daarbij gerealiseerd worden door mitigerende maatregelen die zorgen voor minder spontaan falen van de leidingen of componenten, zoals periodiek lekzoeken of het vervangen van koppelingen die vaak tot lekkages leiden. Er is een eerste benadering gedaan van de impact van gasstoppers en gassensoren met akoestisch signaal toegepast op het risico van waterstof in de voorbeeldwijk. Dit is gebaseerd op (nog) niet gepubliceerde eerste berekeningen geldend voor de VK-situatie. De benadering toont aan dat gasstoppers, afhankelijk van de aannames in het model, een mogelijke reductie van het risico voor

waterstof van ongeveer 20% kunnen realiseren. Bij gassensoren is deze geschatte reductie ongeveer 27%.

De resultaten beschreven in dit rapport zijn verkregen binnen de set met aannames zoals die beschreven zijn. In dit versimpelde model van het distributienet en de gebouwde omgeving zijn meerdere verfijningen van het model mogelijk. Aanbevolen wordt het model verder te verbeteren door een grotere variatie in type woningen. In het model is voornamelijk gebruik gemaakt van vrijstaande woningen. Het effect van explosies wordt in het model doorgerekend voor nabijgelegen woningen. Daarmee is het risico in 2-onder-1-kap woningen groter. In een verfijnd model zou een verdeling van de woning typen (vrijstaand / 2-onder-1-kap / rijtjes / kleine appartementen etc.) toegepast moeten worden. Een van de gebruikte aannames, momenteel limitatie van het model, is dat de PVC-leidingen dezelfde lekgrootte verdeling hebben als PE leidingen. In de praktijk zou dit anders kunnen zijn. Hard PVC heeft een brosser karakter en kan mogelijk meer tot brosse breuken leiden. Dit resulteert in een andere lekgrootte verdeling, die daarmee invloed heeft op het berekende risico. Nader onderzoek naar de lekgrootte verdeling wordt aanbevolen. Tenslotte wordt aanbevolen om het effect van de gasstopper en gassensoren te modeleren. Op basis van eerste uitkomsten uit het VK is een eerste inschatting gemaakt. Het verdient de aanbeveling om het model voor Nederland uit te breiden met het doorrekenen van deze maatregelen.

## Inhoudsopgave

Document samenvatting.....	2
Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave .....	6
1 Inleiding.....	8
1.1 Randvoorwaarden van het model.....	9
1.2 In dit rapport .....	10
2 Historische gegevens voor incidenten .....	11
3 Methodologie.....	13
3.1 Beschrijving risicomodel.....	13
3.2 Lekkages in het distributienet .....	14
3.3 Lekkages achter de meter .....	17
4 Aanpassingen Nederlandse model.....	18
4.1 Het huidige netwerk.....	18
4.2 Faalkansen.....	21
4.3 Afstand tussen de woningen en het net .....	24
4.4 Woningen en bewoners .....	25
4.5 Overige aannames.....	26
5 Resultaten risico door een lek in de binneninstallatie .....	27
5.1 Aardgas.....	27
5.2 Waterstof.....	29
5.3 Effect van ventilatie.....	30
6 Resultaten risico door lek vanuit het distributienet.....	32
6.1 Aardgas.....	33
6.2 Waterstof.....	34
6.3 Effect ventilatie .....	37
7 Resultaten risico voorbeeldwijk .....	39
7.1 Voorbeeldwijk in het QRA-model.....	39
7.2 Risico waterstof vanuit een lek in het distributienet .....	40
7.3 Risico waterstof vanuit een lek in de binneninstallatie.....	43
7.4 Totale risico voorbeeldwijk .....	44
7.5 Verschil risico waterstof en aardgas.....	47
8 Beheersmaatregelen .....	50
8.1 Ventilatie van de woning.....	50
8.2 Gasstopper .....	50

8.3	Gassensor .....	51
8.4	Inschatting effect gasstoppers en gassensoren in voorbeeldwijk.....	51
9	Discussie en conclusie .....	53
9.1	Risico achter de meter.....	54
9.2	Risico vanuit het distributienet .....	54
9.3	Risico in de voorbeeldwijk.....	55
9.4	Effectieve maatregelen .....	56
9.5	Aanbevelingen.....	57
10	Referenties .....	58

## 1 Inleiding

Om een inschatting te kunnen maken van de risico's bij het gebruik van waterstof in het distributienet en transportnet in vergelijking met aardgas, is het van belang de verschillen in kans en effect te weten. De kans heeft betrekking op de mogelijkheid dat een gevaarlijke situatie zich voordoet; de effecten 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 effecten daarvan te verkleinen.

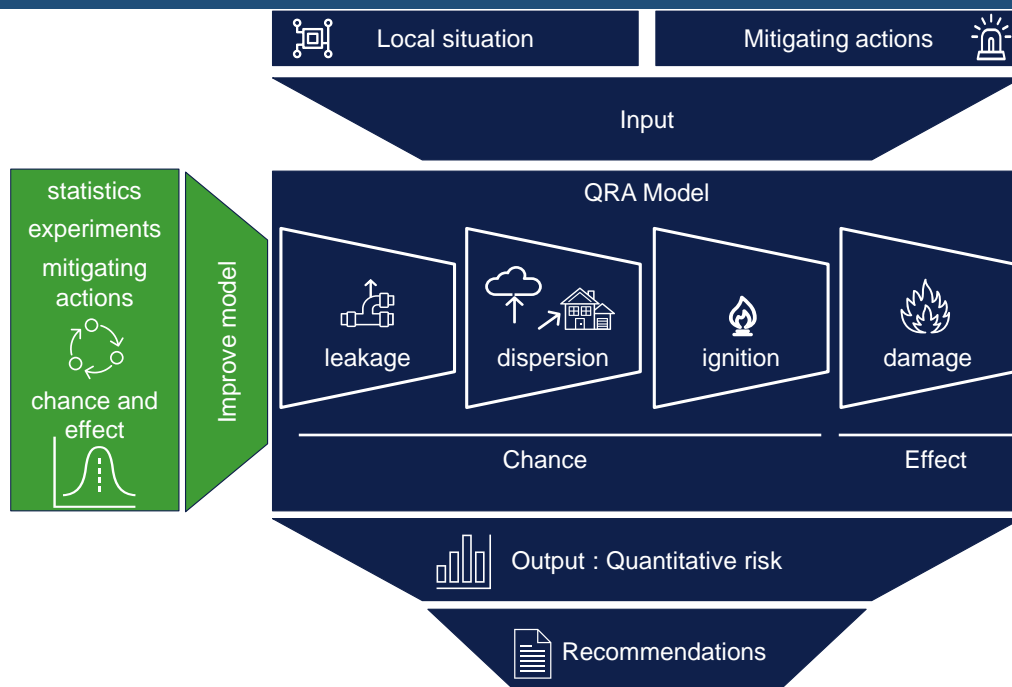
In het HyDelta programma is daartoe het werkpakket 'Waterstof en Veiligheid' gedefinieerd waarin de hoofddoelstelling als volgt geformuleerd is:

*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. 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 een dergelijke 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. Het QRA-model dat door DNV is ontwikkeld voor een soortgelijke analyse in het Verenigd Koninkrijk, vormt de basis voor deze analyse.

Om de risico's in kaart te brengen van het gedrag van waterstof bij lekkages in huizen en in het distributienet en om aan de hand van de risico's beheersmaatregelen te definiëren, wordt gebruik gemaakt van de schematische aanpak zoals weergegeven in Figuur 2. In deze aanpak zijn 2 processen te herkennen: een verticaal proces waarin via een kwantitatieve risicoanalyse aanbevelingen worden gedaan om tot een acceptabel risico te komen, en een horizontaal proces dat erop gericht is om het risicomodel te verbeteren voor de gegeven situatie.





Figuur 2 Modelmatige aanpak risicoanalyse

Logischerwijs zal het model eerst geschikt gemaakt moeten worden voor de gegeven situatie, het Nederlandse waterstofdistributienetwerk, voordat deze toegepast kan worden. Het oorspronkelijke model is ontwikkeld voor de situatie in het Verenigd Koninkrijk (VK) en is gevalideerd voor de risico's van aardgas op basis van historische gegevens. Om de toepasbaarheid van een dergelijk model aan te tonen voor de Nederlandse situatie, is in de eerste fase van HyDelta een eerste aanzet gemaakt tot de vertaling van het model naar de Nederlandse situatie. Er is daarbij vooral gefocust op de onderdelen die een groot effect op het risico hebben en die duidelijk afwijken in Nederland ten opzichte van de situatie in het VK. In de huidige fase van HyDelta wordt het model verder vertaald en worden de uitkomsten gevalideerd tegen de historische gegevens beschikbaar van aardgas. Hierna worden voor een aantal situaties de risico's bepaald voor zowel aardgas en waterstof. Vervolgens wordt de specifieke oorzaak van verhoogde risico's bepaald en kan de invloed van beheersmaatregelen met behulp van het model worden ingeschat.

### 1.1 Randvoorwaarden van het model

Het model dat in HyDelta is ontwikkeld, beschouwt het gasdistributiesysteem voor drukken tot en met 8 bar, zoals dat door de regionale netbeheerders wordt bedreven. Het regionale en hogedruktransportnet van Gasunie valt buiten deze analyse. Meer specifiek focussen we in het model op de volgende punten:

- Ondergrondse hoofdleidingen in het distributienet
- Aansluitleidingen tussen de hoofdleiding en de metaansluiting in de woning
- De binneninstallatie in de woning

Het model is gebaseerd op de samenstelling van het Nederlandse distributienet, met verschillende drukregimes, materiaaltypen, diameters en lengtes, alsmede op de storingsdata van de afgelopen jaren voor het aardgasnet.

## 1.2 In dit rapport

In dit rapport wordt met behulp van het kwantitatieve risicoanalyse model een analyse uitgevoerd voor de risico's van waterstof in het Nederlandse distributiesysteem. Hoofdstuk 2 bespreekt de historische gegevens van incidenten met aardgas als uitgangspunt voor de validatie van de modeluitkomsten. In Hoofdstuk 3 wordt de methodologie beschreven door de algemene stappen die het risicomodel doorloopt te beschrijven. Hoofdstuk 4 richt zich op de vertaling van het model naar de Nederlandse situatie. Hier worden ook de uitgangspunten en daarmee invoerwaarden voor de Nederlandse situatie besproken. In hoofdstuk 5 wordt het berekende risico gegeven voor lekkages achter de meter voor zowel aardgas als waterstof. Ook wordt het effect van ventilatie en een gevoeligheidsanalyse van de ingevoerde faalkansen besproken. Hoofdstuk 6 presenteert de berekende risico's die ontstaan in de woning vanuit een lek in het distributienet. De berekende risico's worden weer vergeleken met de historische data beschikbaar voor aardgas. In Hoofdstuk 7 worden de uitkomsten van de modellen voor risico's van lekken in de binneninstallatie en in het distributienet gecombineerd in een specifiek gedefinieerde typische wijk. In Hoofdstuk 8 wordt een afschatting gegeven van het effect van beheersmaatregelen op het risico. Het rapport eindigt met de discussie en conclusie in Hoofdstuk 9.

Met deze opzet combineert het rapport twee Deliverables voor het HyDelta 2.0 project:

- D6a\_2 – Toepassen QRA model Nederland
- D6a\_3 – Uitkomsten QRA model case studies

## 2 Historische gegevens voor incidenten

Uitgangspunt voor de risicoanalyse bij de overgang van aardgas naar waterstof in deze studie is dat het veiligheidsniveau van het toekomstige waterstofnet minimaal gelijk blijft aan het veiligheidsniveau voor aardgas op dit moment. Aardgas wordt al decennia gebruikt in de gebouwde omgeving. Het bijbehorend veiligheidsniveau is in die periode sterk verbeterd.

In Nederland moeten storingen met aardgas in het distributienet door netbeheerders verplicht worden gemeld bij de betreffende toezichthouder. Deze historische gegevens van incidenten die in de afgelopen jaren hebben plaatsgevonden in het Nederlandse aardgasdistributienet spelen een grote rol in het valideren van het QRA-model. De risicoberekeningen worden, waar relevant, steeds in tweevoud uitgevoerd: voor aardgas en voor waterstof. De uitkomsten voor aardgas worden uitgezet tegen de beschikbare historische data en hiermee kan de validiteit van het model worden bepaald. Als de uitkomsten voldoende overeenkomen voor aardgas, worden zo ook de uitkomsten van dezelfde berekening voor waterstof als realistisch beschouwd, zonder beschikbare historische gegevens.

In dit rapport wordt voor deze validatie van resultaten gebruik gemaakt van de analyse van de incidentenregistratie in Nederland in aardgasdistributienetten, uitgevoerd door Kiwa in HyDelta WP1a (D1A1) [1]. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de incidenten veroorzaakt door een lek na de meter (2.1), en door een lek vanuit het distributienet tot en met de gasmeter (2.2).

### 2.1 Risico in woning door lek achter de meter

De analyse van Kiwa van de incidenten na de meter, die zich meestal in de woning zelf bevindt, is te vinden in Tabel 1. De tabel bevat gegevens over incidenten (zoals aantallen), wat wordt vertaald naar een kwantitatieve uitdrukking in de vorm van de kans op een slachtoffer per gasaansluiting. Hiervoor wordt onderscheid gemaakt tussen koolmonoxidevergiftiging en brand en/of explosie. Gevallen waarin sprake is van een opzettelijk incident, opzetgevallen, worden voor het laatstgenoemde soort incidenten apart weergegeven.

Tabel 1 Overzicht incidenten met aardgas in Nederland na de meter (periode 2010-2020) vertaald naar gemiddeld aantal per jaar. Kans per aansluiting ( $\leq G6$ ), betrokken op 7,2 miljoen aansluitingen. Per incident kunnen er meerdere slachtoffers zijn.

Soort incident na de gasmeter	Aantal aardgas-incidenten	Kans Incident per aansluiting x $10^{-6}$	Aantal dodelijke slachtoffers	Aantal gewonden *	Aantal grote schades #)	Kans slachtoffer per gasaansluiting x $10^{-6}$
Koolmonoxidevergiftiging	39,5	5,5	2,64	138,2	-	0,37 (dodelijk) 19,2 (gewond)
Brand en/of explosie (exclusief opzetgevallen*)	14,5	2,0	0,45	7,8	14,5	0,06 (dodelijk) 1,1 (gewond)
Opzet* resulterend in brand en/of explosie	9,8	1,4	2,18	6,5	9,8	
Opzet* niet resulterend in brand of explosie)	4,9	0,7	-	-	-	
<b>TOTAAL</b>	<b>68,7</b>	<b>9,6</b>	<b>5,27</b>	<b>152,5</b>	<b>24,3</b>	

\*) Opzet: vandalisme, leidingdiefstal, doelbewust veel aardgas laten ontsnappen, etc.

#) Grote materiële schade: meer dan € 10.000, -.

*\*) Gewonden: personen die behandeld worden na een incident en/of naar het ziekenhuis worden vervoerd voor verdere behandeling*

Het QRA-model baseert de uitkomst van de risicoberekeningen op de gevolgen van explosies en branden. Voor de validatie van de uitkomsten voor het risico van aardgas achter de meter wordt daarom in Tabel 1 gekeken naar de “Kans slachtoffer per gasaansluiting” voor “Brand en/of explosie (exclusief opzetgevallen)”. De waarden zijn in de tabel uitgedrukt in dodelijke slachtoffers ( $0.06 \times 10^{-6}$ ) en gewonden ( $1.1 \times 10^{-6}$ ) met een verhouding van ongeveer 20 (gewonden ten opzichte van doden). De gevolgen van koolmonoxidevergiftiging worden niet door het model berekend en daarom worden de historische gegevens ervan ook niet gebruikt voor de modelvalidatie. Wel moet dit risico worden meegenomen bij een vergelijking van het totale risico achter de meter tussen aardgas en waterstof. De kans op een slachtoffer door koolmonoxidevergiftiging komt volgens Tabel 1 overeen met  $0.37 \times 10^{-6}$  per aardgasaansluiting. Bij waterstof ontstaat bij (onvolledige) verbranding geen koolmonoxide.

## 2.2 Risico in woning door lek vanuit distributienet

De analyse van Kiwa van de gevolgen van lekkages in het distributienet voor de periode van 2014 – 2020 is te vinden in Tabel 2. De tabel geeft per jaar het aantal doden en gewonden weer als gevolg van lekkages in hoofdleidingen en aansluitleidingen, welke samen het distributienet vormen. Er kan bij deze data geen onderverdeling worden gemaakt naar leidingmaterialen, drukregimes en diameters. We gaan ervan uit dat de gebruikte materialen in deze periode nagenoeg overeenkomen met de beoogde materialen voor het toekomstige waterstofdistributienet<sup>1</sup>.

*Tabel 2 Overzicht aantal gasincidenten in het distributiedomein leidend tot letsel (dode of gewonde in Nederland)*

	Doden	Gewonden (omstanders/ bewoners)
2020	0	0
2019	0	10
2018	0	1 (+1 twijfelachtig of dit door het gas was)
2017	0	2
2016	0	8
2015	0	8 (waarvan 2 a.g.v. meterkastbrand met onbekende oorzaak)
2014	2	10 (+6 inademen van gas + 10 inademen van rook)
<b>Gemiddelde</b>	<b>0.3</b>	<b>~ 6</b>

Het aantal dodelijke slachtoffers door gasincidenten vanuit het distributiedomein in Nederland is gelukkig erg laag. Een enkel incident, of het uitblijven hiervan, heeft grote impact op het getal voor het gemiddelde aantal doden per jaar dat gebruikt kan worden voor de validatie van de uitkomsten van het model voor aardgas. Met de beschikbare data komt dit getal uit op ongeveer 0.3 doden per jaar als gevolg van lekken vanuit het distributienet. Voor gewonden komt dit aantal uit op ongeveer 6, uitgaande van de gevolgen van branden en explosies. De verhouding van het aantal gewonden ten opzichte van doden is ongeveer 20.

<sup>1</sup> Zoals verderop beschreven bestaat 4% van de lengte van het leidingnet nog uit gietijzer en asbest-cement leidingen. In de modelering gaan we ervanuit dat deze t.z.t. vervangen zijn door moderne materialen.

## 3 Methodologie

### 3.1 Beschrijving risicomodel

Binnen DNV is een gestandaardiseerde risicoanalysemethode ontwikkeld voor risico's van het distributienet (CONIFER: Calculation of Networks and Installations Fire and Explosions Risk). Het model is oorspronkelijk ontwikkeld als risicoanalysemodel voor het gasnetwerk van het VK om de prioritering te bepalen in het vervangen van gietijzeren leidingen door polyethyleen (PE). Het model is in de loop der jaren doorontwikkeld. Het model is gebaseerd op incidentdata, meetdata (specifiek voor het model) en gevalideerde modeldata. Als onderdeel van het H21-project in het VK is het model aangepast en gevalideerd voor waterstoftransportsystemen. Hiertoe zijn in het VK aanvullende experimenten uitgevoerd en zijn de resultaten daarvan geïmplementeerd in modules in het model.

Details voor het model en de ontwikkeling ervan worden gegeven in de QRA-rapporten voor H21 [2] [3] [4]. De modules in het model zijn in een softwarepakket gebouwd door DNV en bieden de mogelijkheid tot modelering van het risico, gegeven de volgende invoerparameters:

- Materialen, zoals staal en polyethleen (PE), gasdrukken en diameters voor de hoofd- en aansluitleidingen.
- Aardgas, volledig waterstof en alle blends daartussen als gas wat door de leiding stroomt
- Verschillende oorzaken van lekkage: Spontaan en schade door derden (externe interferentie)<sup>2</sup>. De faalfrequentie voor deze oorzaken is input voor het model.
- Fysische verschijnselen zoals uitstroom, dispersie, ophoping en ontsteking van gassen.
- De opzet van de binneninstallatie inclusief de meter<sup>3</sup>, het leidingwerk en huishoudelijke apparaten.
- Verschillende samenstellingen van woningen, zoals type woningen (bungalows, rijtjeshuizen, twee-onder-een-kap huizen en vrijstaande huizen) inclusief verschillende groottes van kamers, aanwezigheid van kelders en aanwezigheid van bewoners.

De uitkomsten, inclusief de effecten van explosies en branden, worden uiteindelijk vertaald naar plaatsgebonden-, individuele- of groepsrisico's.

Het model kan gebruikt worden voor zowel lekken door externe interferentie als voor lekken door falen van de infrastructuur zelf. Ook al worden deze oorzaken anders behandeld, beiden kunnen leiden tot bovengrondse branden, of dispersie van het gas door de ondergrond naar gesloten ruimten (bijvoorbeeld huizen) en daar mogelijk leiden tot explosies. De uitkomsten van het model zijn risico's voor personenongevallen maar ook kansen op branden of explosies.

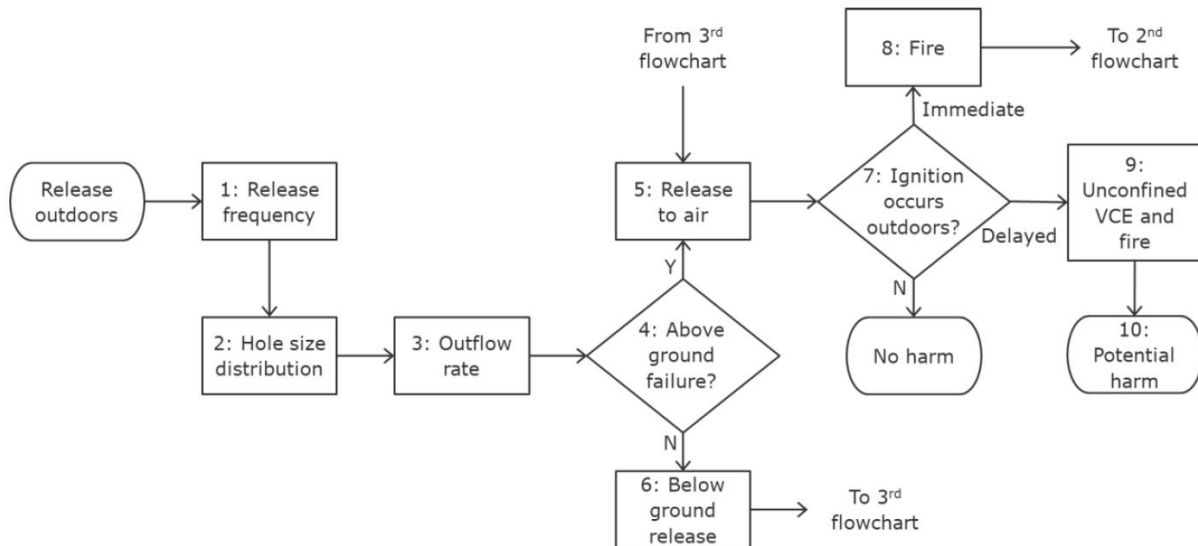
Het model is modulair opgebouwd en bestaat uit verschillende individuele modellen, zoals weergegeven in Figuur 3, Figuur 4, Figuur 5 en Figuur 6. Elk van de genummerde stappen in de figuren bevatten gedetailleerde submodellen die verder gaan dan een enkele (set van) vergelijk(en). Details over deze submodellen worden gegeven in [2], hieronder wordt een korte samenvatting gegeven. Er is daarbij een onderscheid gemaakt tussen lekkages vanuit het distributienet en lekkages achter de

<sup>2</sup> Schade door derden of externe interferentie wordt veroorzaakt door menselijke interactie zoals bijvoorbeeld graafschade waarbij per ongeluk een leiding wordt geraakt. Onder spontane schade wordt schade zonder direct menselijke interactie verstaan. Te denken valt dan aan bijvoorbeeld het falen van koppelingen of corrosie.

<sup>3</sup> In Nederland behoort de meter, samen met de aansluitleiding tot de aansluiting, waar de netbeheerder verantwoordelijk voor is. Het model rekent echter lekkages in de meteropstelling mee in de binneninstallatie.

meter. De eerste drie figuren behandelen de lekkages vanuit het net, de lekkages vanuit de binneninstallatie worden daarna besproken.

### 3.2 Lekkages in het distributienet



Figuur 3 Structuur van het QRA-model: kans op lekkage uit het net. (eerste stroomschema)

Voor lekkages vanuit het distributienet start het model met een uitstroom van gas, waarbij in de eerste stappen de faalfrequentie, het aantal en de grootte van de lekken en de uitstroomhoeveelheid wordt bepaald. Op basis van de gebruikte materialen, drukken en diameters in het aardgassysteem kan op basis van incidentdata een inschatting gemaakt worden voor de faalfrequenties in het pipe fracture model. In Nederland worden lekken en incidenten in het distributienet geregistreerd in de registratiedatabase 'Nestor'. Het overgrote deel daarvan is geconstateerd in aansluitleidingen en werden als urgent ingedeeld. De aard van de lekken voor wat betreft grootte en snelheid van ontwikkeling varieert. Veroudering en corrosie zijn vaak kleinere lekken die langzaam groter worden terwijl het bezwijken van koppelingen, zadels, losraken van aansluitingen door zakkende grond en dergelijke en breuken in brosse materialen plotseling optreden en direct een aanzienlijke gasuitstroom tot gevolg hebben. Door verschillen in gebruikte materialen, drukken en inrichting van het distributienet zullen de data gebruikt in het model voor het VK niet 1-op-1 toepasbaar zijn voor Nederland.

In de voor HyDelta ontwikkelde Nederlandse versie van het QRA-model wordt op basis van Nederlandse historische lekdata en opbouw van het distributienetwerk de volgende stappen doorlopen.

- De frequentie van ieder lek wordt bepaald door de pipeeigenschappen (zoals druk, diameter en constructiedetails) en faalmodus (interferentie en/of spontaan). Elke faalmodus wordt achtereenvolgens in de volgende stappen beschouwd.
- Op basis van dezelfde gegevens die zijn gebruikt in de eerste stap, wordt de kans over een reeks van lekgroottes bepaald. Specifieke data voor de lekgrootte is zeldzaam, bij incidenten wordt vaak niet bijgehouden hoe groot het lek is. In het model voor het VK is voor aardgas een set aannames gemaakt, er wordt vanuit gegaan dat deze verdeling bij waterstof ook geldt.

- Voor iedere lek grootte wordt het uitstroomdebiet bepaald. De verschillen tussen de hoeveelheid waterstof en aardgas die vrijkomen bij een gegeven druk en lek grootte zijn in de praktijk gevalideerd in H21.

De hoeveelheid gas die uit een lek stroomt, wordt bepaald door de lek grootte, de gasdruk (30 mbar, 100 mbar, 1 bar, 4 bar en 8 bar), de tegendruk die het uitstromende gas ondervindt, of en wat voor gronddekking en toplaag (tegels, klinkers, asfalt, gras) er is en waar het naar toe kan stromen (kruipruimte, kelder, meterkast, woning, grondoppervlak en dergelijke).

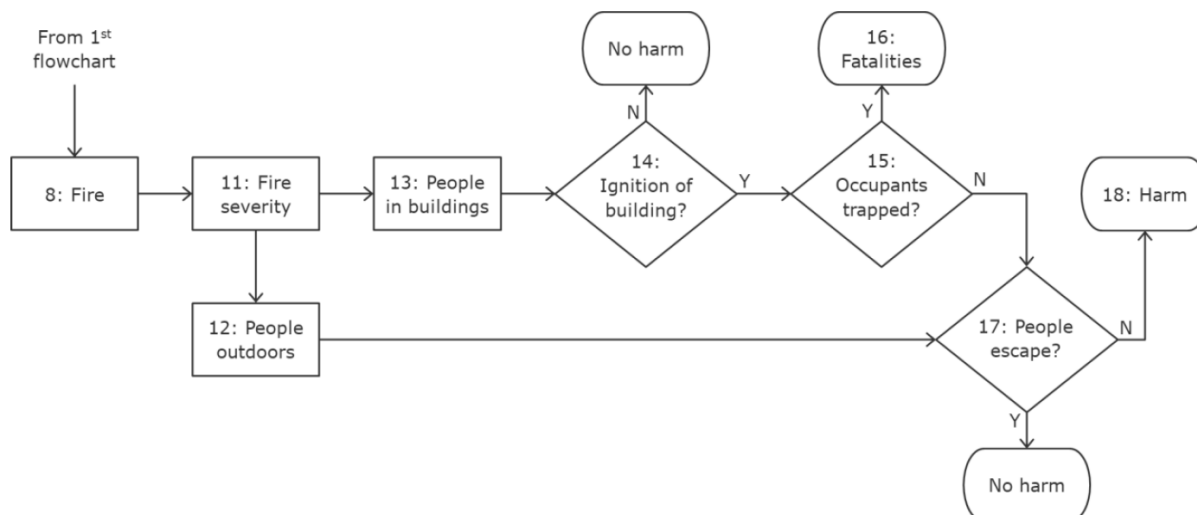
Vanuit de statistische gegevens voor aardgas is het ondergrondse gedrag en de kans op uitstroom naar een kelder en dergelijke te benaderen. Ook zijn er modellen beschikbaar die het gedrag simuleren van stroming door verschillende grondsoorten, in pandig en in de open lucht. Daarmee kan een goede indicatie worden verkregen van de mogelijke verschillen in gedrag tussen waterstof en aardgas.

Hierbij is van belang om te bepalen welke grondsoorten de dekking van leidingen vormen en welke bestrating aanwezig is, welke volume kelders, kruipruimten, meterkasten en andere in pandige ruimten hebben. Op basis van het experimentele programma van H21 (phase 1b) is een aangepast model ontwikkeld voor de stroming van waterstof door de bodem richting een woning.

In Figuur 3, stap 4 wordt vervolgens onderscheid gemaakt voor uitstroom naar de open lucht resulterend in een brand, en ondergrondse verplaatsing van het gas naar gesloten ruimtes. Deze laatste stap wordt verder uitgewerkt in Figuur 5. Uit de hierboven omschreven data kan worden afgeleid welke concentraties zullen optreden in samenhang met weersomstandigheden (vochtige grond is minder doorlaatbaar; wind verandert de grootte en concentratie in de gas-“wolk”) en hoe deze gedetecteerd kunnen worden, bijvoorbeeld tijdens lekzoeken.

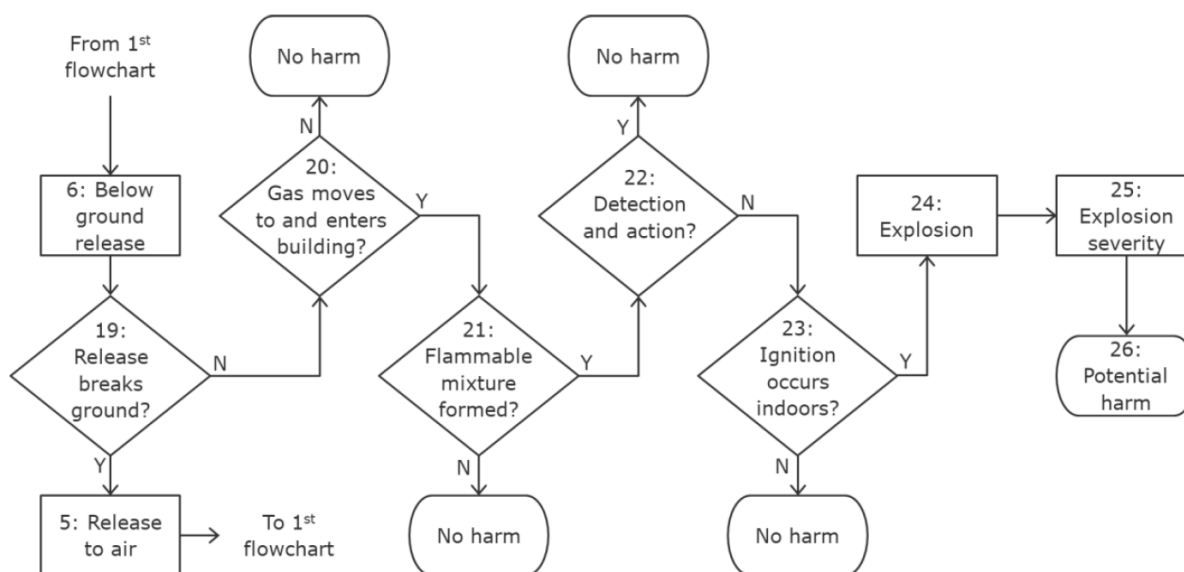
De benodigde energie om waterstof en aardgas te ontsteken varieert met de concentratie van het betreffende gasluchtmengsel. In het model wordt een kans op ontsteking ingeschat op basis van de aanwezigheid van potentiële ontstekingsbronnen, maar ook op basis van de aanwezigheidsduur van personen in de woning en hun reactie op het detecteren van een lekkage. Enerzijds bepaalt de kans op aanwezigheid van bewoners de potentiële schade aan personen, zoals in het volgende stroomschema (Figuur 4) beschreven. Anderzijds kunnen bewoners de kans op schade verlagen doordat zij bijvoorbeeld door het ruiken van odorant actie ondernemen, zoals het openen van ramen en deuren en waarschuwen van de hulpdiensten.

Mocht een ontsteking leiden tot een brand, dan beschrijft Figuur 4 de stappen die gevolgd worden ter bepaling van het risico. Vanuit de hittebelasting van het ontbrandde waterstof wordt bij een brand de kans bepaald dat de woning ook vlamvat en dat bewoners de woning niet uit kunnen komen. Deze kansen zijn, uitgaand van een eenmaal brandende woning niet anders voor waterstof dan voor aardgas, zodat het bestaande model voor aardgas hier ook toegepast kan worden. In het model wordt uitgegaan dat 10% van de bewoners de woning niet uitkomt, wat een conservatieve aanname is. Omdat de meeste branden als gevolg van graafschade, overdag plaatsvinden, blijkt in de praktijk deze kans kleiner te zijn.



Figuur 4 Structuur van het QRA-model: effecten van branden. (tweede stroomschema)

In het geval van een gasroom, die ontstaat buiten de woning en zich verplaatst naar een besloten ruimte, ontstaat er een kans op een explosie. Figuur 5 geeft de stappen weer die daarbij gevolgd worden.



Figuur 5 Structuur van het QRA-model: effecten van explosies (derde stroomschema)

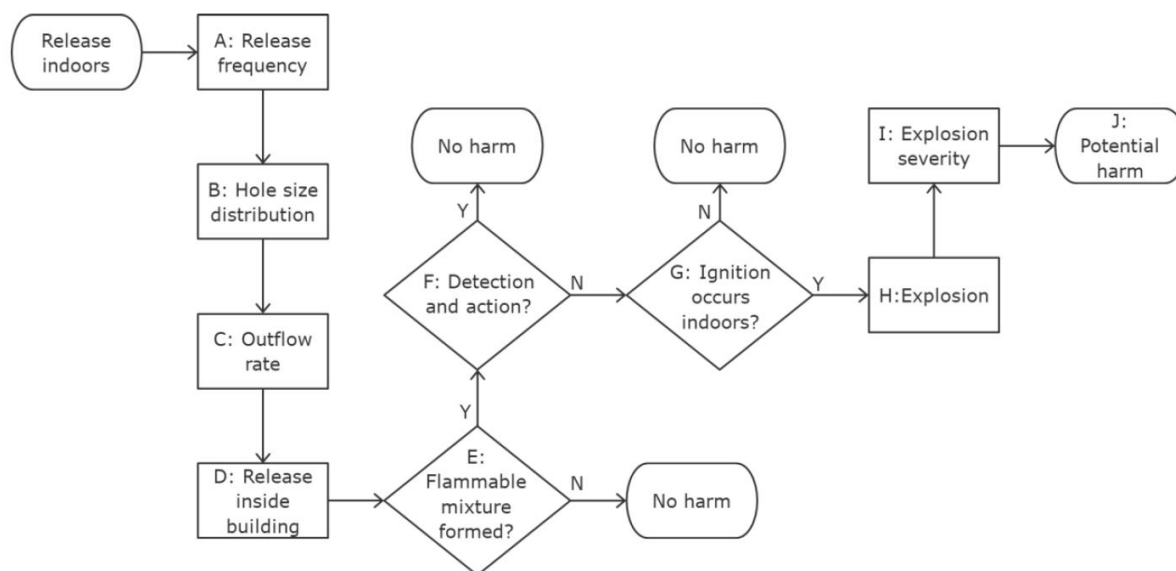
Bij de ophoping van waterstof in de woning (stap 21) wordt het effect van ventilatie in de woning en de migratie van waterstof naar verschillende kamers in de woning meegenomen. Op basis van experimenteel onderzoek in H21 zijn deze modellen voor waterstof gevalideerd. Afhankelijk van de aanwezigheid van personen in de woning, die een lekkage kunnen opmerken door geodoriseerd gas of door sensoren, wordt de kans geschat dat potentiële ontstekingsbronnen een ontbranding in de woning veroorzaken. De concentratie waterstof op het moment van ontbranden wordt in de modellen meegenomen. Vooral voor explosies is de overdruk erg afhankelijk van de concentratie waterstof. Potentieel zijn waterstofexplosies veel schadelijker dan aardgasexplosies, rond een stoichiometrisch mengsel. Bij lagere concentraties (tussen de 5 en 10 vol%) zijn de gevolgen gelijk of minder in vergelijking met aardgas.



Voor explosies wordt de overdruk meegenomen in het model. Bij explosies van waterstof (boven de 10vol%) is de overdruk groter dan voor aardgas. Op basis van de overdruk wordt een inschatting gemaakt van het aantal slachtoffers. Net als bij de branden is deze inschatting voor slachtoffers bij een gegeven overdruk voor waterstof hetzelfde als bij aardgas.

### 3.3 Lekkages achter de meter

Voor lekkages achter de meter, in de binneninstallatie wordt een versimpeld schema gebruikt zoals weergegeven in Figuur 6. Op basis van historische gegevens voor aardgas wordt een inschatting gemaakt van de faalkans van de verschillende onderdelen van de binneninstallatie. In het model wordt de binneninstallatie onderverdeeld in de meterinstallatie, het binnenleidingwerk en de eindgebruikersapparatuur. Voor elk onderdeel vormt de spontane en interferentie faalkans de input voor het model. Gegeven de verdeling van lekgroottes wordt de hoeveelheid gas bepaald die de woning in stroomt. Op basis van de concentratie die ontstaat, mede bepaald door de ventilatievoud, wordt de kans op het ontstaan van een brandbaar mengsel bepaald. De ventilatievoud kan in het model aangepast worden per woning. In de risicoberekeningen in deze studie, is de gevoeligheid van de ventilatievoud bepaald. Tenslotte bepaalt de kans op ontsteking, net zoals ontsteking van gas door ophoping gas in woningen ten gevolge van lekkages buiten de woning, de kracht van de explosie en daarmee de gevolgen.



Figuur 6 Structuur van het QRA-model: lekken in de binneninstallatie

## 4 Aanpassingen Nederlandse model

In een kwantitatieve risicoanalyse worden voor een gegeven situatie of configuratie van het netwerk en aangesloten woningen de kansen op lekkage en de gevolgen daarvan berekend. Het ontwikkelde model houdt daarbij voor het distributienetwerk rekening met een aantal parameters:

- Gebruikte drukken
- Variatie in diameter van de hoofdleidingen
- Gebruikte materialen in de hoofdleidingen (bv. staal of PE)
- PE koppelingen (bv. elektrolassen)
- Diepte van de leidingen in de grond
- Opbouw van de aansluitleidingconstructie
- Configuratie van de binneninstallatie
- Faalkansen per systeemcomponent (opgesplitst in spontaan en interferentie)

In het ontwikkelde QRA-model voor Nederland worden bovenstaande parameters in dit hoofdstuk beschreven. Daarbij is gefocust op de variatie in drukken, diameters en materialen en de afstand van de woningen tot de hoofdleiding die specifiek in Nederland voorkomt.

### 4.1 Het huidige netwerk

In dit hoofdstuk worden de aannames beschreven voor het Nederlandse netwerk en woningen zoals ze zijn meegenomen in de modelering. Om het model niet onnodig complex te maken, is er in deze fase voor gekozen om de gietijzeren en asbest-cement leidingen zoals die nog deels gebruikt worden in het huidige aardgassysteem (samen slechts 4%) niet mee te nemen. Het is de verwachting dat deze materialen niet gebruikt zullen worden in de toekomstige waterstofdistributienetten en vervangen zullen worden door PE of (slagvast) PVC-leidingen.

De aannames die hier beschreven worden, worden gebruikt voor het huidige aardgasnet en ook voor het toekomstige waterstofnet. Ook wordt aangenomen dat de samenstelling qua materialen in beide situaties hetzelfde zal blijven, met uitzondering van de eerdergenoemde materialen. Nieuw te bouwen woningen worden door middel van PE- of (slagvast) PVC-aansluitleidingen aangesloten.

#### 4.1.1 Hoofdleidingen

Bij de risicoanalyses wordt gebruik gemaakt van vijf veel voorkomende drukken en vier representatieve diameters. Elke van de vier diameters vertegenwoordigt daarbij een range van diameters, bijvoorbeeld 160 mm wordt gebruikt voor alle diameters tussen 125 mm en 200 mm. Tabel 3 geeft de gebruikte representatieve diameters weer.

Tabel 3 Representatieve diameters met de bijbehorende range van diameters zoals gebruikt in het model

	Buiten Diameter hoofdleiding (mm)			
Range van diameters	≤ 63	75 –110	125 – 200	>250
Representatieve diameter in het model	63	110	160	315

De veel voorkomende drukken en materiaaltypen in het hoofdleidingnet worden opgesomd in Tabel 4. Hierbij is gebruik gemaakt van data uit 2020. De waarden in de tabel geven de fractie van deze drukken en materialen in het totale net.

Tabel 4 Percentage hoofdleiding per druk en materiaal type voor Nederland

	30 mbar	100 mbar	1 bar	4 bar	8 bar	Totaal
PE	0.8%	9.6%	0.6%	5.1%	1.1%	17.2%
Hard PVC	1.1%	15.2%	0.0%	0.0%	0.0%	16.3%
Slagvast PVC	5.7%	43.0%	0.0%	0.0%	0.0%	48.7%
Staal	0.1%	3.3%	0.2%	0.5%	9.7%	13.7%
Grijs gietijzer	1.0%	1.1%	<0.1%	<0.1%	0.0%	2.2%
Nodulair gietijzer	0.2%	0.5%	0.1%	0.0%	0.3%	1.2%
Asbest-cement	0.2%	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%
Overig	0.0%	<0.1%	0.0%	<0.1%	<0.1%	<0.1%
Onbekend	0.0%	<0.1%	0.0%	<0.1%	0.0%	<0.1%
Totaal	9.2%	73.1%	0.9%	5.6%	11.1%	100.0%

Zoals eerder genoemd worden in deze versie van het model de gietijzeren en AC-leidingdelen niet meegenomen in de berekeningen omdat deze slechts een fractie (4%) uitmaken en niet ingezet zullen worden in het waterstofnet. De kleine fracties in de tabel worden toegekend aan de 4 gemodelleerde materialen (PE, Hard PVC, Slagvast PVC en Staal). Tabel 5 en Tabel 6 geven de diameter, drukken en gebruikte materialen zoals gemodelleerd in het QRA-model als fractie van de totale lengte van het hoofdleiding netwerk voor zowel lage als hogere (>100 mbar) drukken. Het totale distributienet bestaat dus grotendeels uit lagedrukleidingen (ongeveer 82%).

Tabel 5 Fractie van lagedruk leidingen ten opzichte van totale lengte, per materiaal, druk en diameter in Nederland

Fractie van de totale lengte	30 mbar				100 mbar			
	63 mm	110 mm	160 mm	315 mm	63 mm	110 mm	160 mm	315 mm
PE	0.3%	0.3%	0.2%	<0.1%	5.2%	3.4%	1.0%	0.1%
Hard PVC	<0.1%	0.6%	0.4%	0.1%	1.8%	9.1%	4.0%	0.3%
Slagvast PVC	0.4%	3.1%	2.0%	0.3%	8.2%	24.9%	9.6%	0.4%
Staal	<0.1%	0.6%	0.6%	0.2%	1.2%	2.2%	1.3%	0.3%

Tabel 6 Fractie van hogedruk leidingen ten opzichte van totale lengte, per materiaal, druk en diameter in Nederland

Fractie van de totale lengte	1 bar				4 bar				8 bar			
	63 mm	110 mm	160 mm	315 mm	63 mm	110 mm	160 mm	315 mm	63 mm	110 mm	160 mm	315 mm
PE	0.3%	0.2%	0.1%	0.1%	2.0%	2.1%	0.9%	0.1%	0.1%	0.6%	0.4%	<0.1%

Hard PVC	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Slagvast PVC	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Staal	<0.1%	<0.1%	0.1%	0.2%	<0.1%	0.1%	0.3%	0.1%	0.5%	3.7%	4.9%	0.9%

In het VK wordt geen PVC gebruikt en is daarmee ook niet beschikbaar binnen de database die ten grondslag ligt aan het QRA-model. Voor het Nederlandse model wordt daarom aangenomen dat zowel hard als slagvast PVC zich hetzelfde gedraagt als PE: er wordt aangenomen dat de verdeling van lekgroottes bij zowel spontane als interferentie schade hetzelfde is bij PVC als bij PE. Verschillen in het lekgroottes tussen (hard en slagvast) PVC- en PE-leidingen bij verschillende typen lekken zal nader onderzocht moeten worden en daarna geïmplementeerd in de code van het model. Dit was binnen de huidige scope van het project niet haalbaar. Wel worden de frequenties van lekkage bij zowel PVC als PE aangepast op basis van beschikbare Nederlandse data (zie hoofdstuk 4.2).

Voor de PE-leidingen wordt aangenomen dat deze door elektrolassen worden gekoppeld. PE-leidingen die door oude stalen of gietijzeren leidingen zijn getrokken worden niet meegenomen in het model. In de NEN norm wordt voor hoofdleidingen een minimaal gronddek van 0.8 m voorgeschreven. Er wordt aangenomen in het model dat alle leidingen 1 meter onder de grond liggen. De diepte van de leiding is van belang voor het bepalen van de verspreiding van gas langs de leiding, waarbij de grond niet openbreekt. Uit de onderzoeken in het VK blijkt dat deze situaties niet veel bijdragen aan het totale risico. In de praktijk kan deze diepte minder zijn en is deze aanname aan de conservatieve kant. Het model voorspelt verdere verspreiding van gas langs de leiding bij dieper gelegen leidingen.

#### 4.1.2 Aansluitleidingen

De volgende aannames zijn gemaakt in het model met betrekking tot de aansluitleidingen, die zich tussen de hierboven beschreven hoofdleidingen en de woningen bevinden:

- Alle aansluitleidingen zijn van PE.
- De aansluitleiding eindigt in de woning bij de meter.
- De lengte van de aansluitleiding wordt geschat op 120% van de minimumafstand tussen het gebouw en de hoofdleiding.
- De diameter van de aansluitleiding is standaard 32 mm, tenzij anders gespecificeerd zoals in de voorbeeldwijk. Grotere diameters die in flatgebouwen of bij commerciële aansluitingen worden gebruikt, vallen buiten de huidige analyse.
- De verdeling van de aansluitleidingen over de drukregimes (30 mbar, 100 mbar, 1 bar, 4 bar en 8 bar) is bepaald op basis van de aangeleverde lengtes van de aansluitleidingen van Enexis en Alliander en is geëxtrapoleerd voor het totale netwerk in Nederland. Onderstaande tabel geeft de gebruikte verdeling weer. De aansluitleidingen op de hogere druk hoofdleidingen (1 tot 8 bar) worden gemodelleerd op 100 mbar, omdat in de praktijk geen hogere druk aansluitleidingen tot woningen lopen<sup>4</sup>. Voor de lagere drukken wordt de druk in de hoofdleiding overgenomen voor de aansluitleiding (30 en 100 mbar).

Tabel 7 Verdeling drukklasse aansluitleidingen

<sup>4</sup> Bij grootverbruikers kan dit wel voorkomen maar deze worden niet meegenomen in deze studie.

Druk	Aandeel
30 mbar	15.28%
100 mbar	83.99%
1 bar	0.07%
4 bar	0.27%
8 bar	0.39%

- Net als voor de hoofdleidingen wordt een diepte van 1 meter aangenomen voor alle aansluitleidingen. Ook hier geldt dat deze aanname conservatief is<sup>5</sup> en slechts van invloed op een beperkt deel van de lekken.

## 4.2 Faalkansen

Voor de faalkansen wordt geen onderscheid gemaakt tussen aardgas- en waterstofleidingen. Dit veronderstelt feitelijk dat er door de omschakeling naar waterstof geen nieuwe oorzaken voor lekkage worden geïntroduceerd.

In dit rapport worden faalkansen in twee verschillende categorieën gegeven:

- ‘Interferentie’-schade wordt veroorzaakt door menselijk handelen waarbij de leiding beschadigd raakt. Veelvoorkomende faaloorzaken zijn graafwerkzaamheden, bijvoorbeeld om bouwtechnische of agrarische redenen, of werkzaamheden aan nabijgelegen nutsvoorzieningen, die per ongeluk de gasleiding raken. Onder interferentieschade valt ook opzettelijke schade aan de leidingen, maar dit is eerder relevant voor aansluitleidingen dan voor hoofdleidingen.
- Bij ‘spontane’ storingen is geen menselijke interactie nodig. Voorbeelden zijn lekkages in leidingen of in koppelingen door bijvoorbeeld corrosie of grondzakking, zoals opgesomd in onderstaande tabel.

Tabel 8 Indeling faaloorzaken vanuit NESTOR

Categorie	Oorzaak
Interferentie	Graafwerk
	Vandalisme / diefstal
Spontaan	Aanlegfout (in het verleden)
	Corrosie / veroudering
	Inwendig defect
	Montagefout (nu)
	Productfout
	Puntbelasting
	Werkings van de bodem

Details voor de verdeling van lekgrootte die in de risicobeoordeling worden gebruikt, worden gegeven in de H21 Fase 1B-projectrapporten [2] [3] [4]. Merk op dat de term 'lekgrootte' in dit rapport wordt

<sup>5</sup> Volgens de norm wordt voor aansluitleidingen een minimaal gronddek van 0.4 m voorgeschreven in particuliere grond en 0.5 m in openbare grond.

gebruikt voor elk potentieel lek waaruit gas kan ontsnappen. Voor interferentie en spontane lekken worden verschillende lekgrootte verdelingen gebruikt. Op basis van aardgasstatistiek is een kansverdeling gemaakt voor een volledige breuk (full bore rupture) als functie van de diameter van de hoofdleiding bij interferentie schade. Daarnaast is een soortgelijke kansverdeling gemaakt voor de kans op een niet-volledige breuk waarbij de verhouding tussen de gat oppervlak en de dwarsoppervlakte van de leiding wordt genomen. Voor PE leidingen blijkt dat 60% van de schades leidt tot een lek met een gatoppervlak / dwarsoppervlak van 0.2. Voor spontane lekkages, zoals bijvoorbeeld door het lekken van een koppeling, is de kans meer dan 90% dat de gatbreedte gedeeld door de omtrek van de leiding kleiner is dan 0.01. Spontane lekken leiden vooral tot kleinere lekkages ten opzichte van schade door derden.

De storingsdata voor de Nederlandse distributienetten wordt verzameld in Nestor. In dit onderzoek is gebruik gemaakt van de data voor de jaren 2018-2021. Initieel is gebruik gemaakt van de data voor 2020 en later wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd voor de andere beschikbare jaren. De gegevens uit Nestor zijn geanalyseerd en gecombineerd met de eveneens verstrekte lengtegegevens voor 2020, om zowel spontane storings- als storingsstoringsfrequenties te berekenen voor zowel hoofdleidingen als aansluitleidingen. Daarbij wordt een onderverdeling gemaakt voor gebruikte diameter, werkdruk en leidingmateriaal. Vanwege beperkingen aan de hoeveelheid faalgegevens of de bijbehorende lengtes van leidingen, werden in sommige gevallen de gegevenscategoriën gecombineerd om meer statistisch betrouwbare frequenties te bieden.

#### 4.2.1 Hoofdleidingen

Voor een representatie van het hoofdleidingnet zijn vier verschillende diameters gemodelleerd voor vijf verschillende drukklassen en vier verschillende materialen. Onderstaande tabellen geven de faalkans voor deze parameters op basis van de Nestor storingsdata en de verdeling van voorkomende leidingen in het Nederlandse distributienet.

Tabel 9 Faalkansen per km per jaar, voor hoofdleiding met een diameter van 63mm

Oorzaak	Materiaal	Faalkans (# per km per jaar)				
		30 mbar	100 mbar	1 bar	4 bar	8 bar
Interferentie	PE	0.009	0.009	0.004	0.004	0.004
	Hard PVC	0.030	0.030	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.011	0.011	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001
Spontaan	PE	0.017	0.017	0.030	0.030	0.030
	Hard PVC	0.053	0.045	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.028	0.021	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.188	0.186	0.084	0.084	0.084

Tabel 10 Faalkansen per km per jaar, voor hoofdleiding met een diameter van 110mm

Oorzaak	Material	Faalkans (# per km per jaar)				
		30 mbar	100 mbar	1 bar	4 bar	8 bar

Interferentie	PE	0.009	0.009	0.004	0.004	0.004
	Hard PVC	0.019	0.019	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.010	0.010	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001
Spontaan	PE	0.036	0.036	0.032	0.032	0.032
	Hard PVC	0.053	0.045	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.028	0.021	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.134	0.316	0.023	0.023	0.023

Tabel 11 Faalkansen per km per jaar, voor hoofdleiding met een diameter van 160mm

Oorzaak	Material	Faalkans (# per km per jaar)				
		30 mbar	100 mbar	1 bar	4 bar	8 bar
Interferentie	PE	0.009	0.009	0.004	0.004	0.004
	Hard PVC	0.011	0.011	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.008	0.008	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001
Spontaan	PE	0.048	0.048	0.038	0.038	0.038
	Hard PVC	0.053	0.045	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.049	0.041	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.240	0.158	0.023	0.023	0.023

Tabel 12 Faalkansen per km per jaar, voor hoofdleiding met een diameter van 315mm

Oorzaak	Materiaal	Faalkans (# per km per jaar)				
		30 mbar	100 mbar	1 bar	4 bar	8 bar
Interferentie	PE	0.009	0.009	0.004	0.004	0.004
	Hard PVC	0.011	0.011	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.008	0.008	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.003	0.003	0.001	0.001	0.001
Spontaan	PE	0.208	0.208	0.038	0.038	0.038
	Hard PVC	0.053	0.045	N/A	N/A	N/A
	Slagvast PVC	0.121	0.066	N/A	N/A	N/A
	Staal	0.279	0.215	0.023	0.023	0.023

#### 4.2.2 Aansluitleidingen

Aangezien alle aansluitleidingen zijn gemodelleerd als PE-leidingen van 32 mm, wordt in de QRA voor de verschillende werkdrukken slechts één set van spontane en storingsfaalkansen gebruikt. Tabel 13 geeft de gehanteerde faalkansen weer voor de aansluitleidingen in het Nederlandse net.

Tabel 13 Faalkansen per km per jaar, voor aansluitleidingen met een diameter van 40mm

Oorzaak	Faalkans (# per km per jaar)				
	30 mbar	100 mbar	1 bar	4 bar	8 bar
Interferentie	0.038	0.045	0.081	0.081	0.081
Spontaan	0.058	0.051	0.233	0.233	0.233

#### 4.2.3 Achter de meter

Er is ook data beschikbaar in Nestor voor storingen achter de meter. Vergeleken met VK-data lijkt de Nederlandse data echter niet volledig te zijn. Storingen achter de meter worden minder volledig geregistreerd ten opzichte van storingen in het distributienet, waarvoor de netbeheerders die de gegevens invoeren verantwoordelijk zijn. Voor de risicoberekeningen achter de meter worden daarom de faalkansen voor de UK in het model gebruik weergegeven in Tabel 14.

Tabel 14 Faalkansen per aansluiting per miljoen jaar, achter de meter

Faalkans per aansluiting per 10 <sup>6</sup> jaar	Spontaan	Interferentie
Meter	5720	2040
Binnenleiding	1460	4810
Gastoestel	916	3370

#### 4.3 Afstand tussen de woningen en het net

Twee Nederlandse netbeheerders hebben gegevens aangeleverd over de representatieve afstanden tussen hoofdleidingen van het net en de nabijgelegen gebouwen. Deze gegevens zijn geanalyseerd om voor elke bedrijfsdruk een verdeling van de nabijheid van gebouwen te verkrijgen. Bij deze benadering wordt rekening gehouden met de kans dat een bepaalde hoofdleiding dicht bij gebouwen ligt. Hogedrukleidingen (>200 mbar) bevinden zich bijvoorbeeld doorgaans verder van gebouwen dan lagedrukleidingen. Op basis van deze gegevens wordt het aantal huizen berekend dat zich op een bepaalde afstand van elke hoofdleiding bevindt. Tabel 15 geeft een overzicht van het percentage woningen dat dichtbij elk type hoofdleiding ligt.

Tabel 15 Verdeling percentages woningen binnen afstand van de hoofdleiding

Afstand (m)		Lagedruk hoofdleidingen (≤200 mbar)	Hogedruk hoofdleidingen (>200 mbar)
Afstand Range	Gemiddelde afstand		
0 tot 4	2.5	25.3%	15.2%
4 tot 10	8	41.2%	20.3%
10 tot 20	15	19.1%	24.8%



20 tot 40	30	7.8%	17.3%
> 40	50	6.5%	22.3%
Totaal		100.0%	100.0%

#### 4.4 Woningen en bewoners

Voor het bepalen van het maatschappelijk risico is het nodig om de kenmerken van de woningen die zijn aangesloten op het net, te specificeren, naast de configuratie en de aannames over het gasnet zelf. In het model is de samenstelling van de woningen in Nederland versimpeld en zijn dezelfde aannames gemaakt als in het model voor het VK. Dit houdt in het type en indeling van de woning maar ook de binnen systemen zoals leidingen, de meter en eindgebruikersapparatuur. Verder zijn het totaal aantal woningen en de bezetting per woning belangrijke factoren voor het bepalen van het maatschappelijke risico.

##### 4.4.1 Definitie woning

De woningen zijn als volgt gedefinieerd voor het bepalen van het risico door een lek zowel in de binneninstallatie als voor het distributienetwerk. Voor de voorbeeldwijk wordt de woningconfiguratie gevarieerder gemodelleerd als beschreven in Hoofdstuk 7.

- Alle woningen worden als vrijstaande huizen verondersteld met twee verdiepingen. In de voorbeeldwijk worden ook 2-onder-1-kap woningen gemodelleerd. Flats kunnen niet worden meegenomen in het model.
- De woning wordt verondersteld te beschikken over drie ruimtes per verdieping met een totale bebouwde grondoppervlakte van 37,2 m<sup>2</sup>. Daarbij wordt verder aangenomen dat:
  - De grondoppervlakte is per verdieping verdeeld in ruimtes van 20,7 m<sup>2</sup>, 9,9 m<sup>2</sup> en 6,6 m<sup>2</sup>.
  - De plafondhoogte van de ruimtes wordt verondersteld 2,4 meter te zijn.
  - Er is een meterkast aanwezig.
- De gevel van elk gebouw, evenwijdig aan het tracé van de hoofdweg, is verondersteld 7 meter breed te zijn.
- Alle huizen worden verondersteld dubbele beglazing te hebben, wat invloed heeft op de voorspelde overdruk bij interne explosies.
- De huizen hebben geen kelder of kruipruimte.
- Er worden verschillende ventilatievouden toegepast op de woningen (0.04 – 4 uur<sup>-1</sup>)
- De binneninstallatie bestaat uit een meter in de meterkast, binnenleidingen verdeeld over de drie kamers en een gastoestel.

##### 4.4.2 Aantal woningen en aantal personen per woning

In de Nederlandse QRA wordt uitgegaan van de volgende populatie- en aanwezigheidsaannames:

- 7.2 miljoen huizen op het netwerk
- Gemiddeld 2,4 personen per huis

- 75 % aanwezigheid van personen

Merk op dat het Engelse-model in staat is om geavanceerdere aanwezigheidspatronen te gebruiken dan hierboven beschreven. In het bijzonder worden drie generieke aanwezigheidspatronen gebruikt om de populatie van huizen in het H21 Fase 1B-project weer te geven. De drie patronen vertegenwoordigen 50%, 75% en 100% bezetting voor de individuele persoon, en kunnen worden gecombineerd om het totale bezettingspatroon van alle bewoners van een huis te specificeren. Bij de bezettingspatronen van 50% en 75% is de kans groter dat een persoon 's nachts in huis is dan overdag, waarbij rekening wordt gehouden met verschillende bevolkingsniveaus in perioden van drie uur.

Bij de explosierisicoberekeningen kan rekening gehouden worden met de kans op dodelijke slachtoffers in huizen die fysiek verbonden zijn met die waarin de explosie plaatsvindt. In deze eerste berekening wordt echter alleen rekening gehouden individuele huizen en slachtoffers die daar kunnen voorkomen.

#### 4.5 Overige aannames

Diverse overige aannames die gebruikt worden in de risicoberekeningen, zijn onder meer:

- Voor een leiding is de kans op storingen even groot op elke locatie langs hun lengte.
- Bij een gegeven storing op een hoofdleiding wordt op basis van statistiek uit het VK aangenomen dat het gat in 6% van de gevallen een traceerroute vindt door de grond en langs een leiding naar een nabijgelegen gebouw stroomt. Dit geldt voor alle type gassen, echter de hoeveelheid gas is afhankelijk van de fysische eigenschappen. Dit wordt op elk gebouw afzonderlijk toegepast, dus de kans hierop is groter als er meer dan één gebouw in de buurt van het lek is. Er wordt geen rekening gehouden met lekken die traceerroutes naar meerdere huizen vinden, waardoor gas zou kunnen worden weggeleid van het huis dat wordt beoordeeld. Bij een gegeven storing op een aansluitleidingen is deze verhouding 24% voor de woning waar de leiding naartoe leidt. Dit is ongeveer gelijk aan een gaslek in de aansluitleiding die in 50% van de gevallen een traceerroute vindt die weer in de helft van die gevallen naar het aangesloten huis leidt.
- Bij lekken buiten gebouwen, zowel vanuit hoofd- als aansluitleidingen, wordt bij het voorspellen van het uitstroomdebiet rekening gehouden met de eigenschappen van de grond.

Met de genoemde aannames wordt verondersteld dat de grootste invloeden op het risico hiermee zijn meegenomen in de berekeningen. Voor verdere details van aannames wordt verwezen naar de rapportages van H21.

## 5 Resultaten risico door een lek in de binneninstallatie

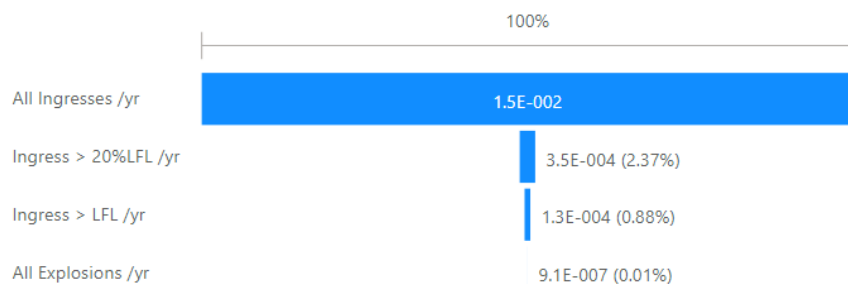
Op basis van de in het vorige hoofdstuk beschreven aannames voor de configuratie van de binneninstallatie in de woning en de bijbehorende faalkansen wordt de instroom in gas en de gevolgen daarvan in de woning berekend. Ter validatie van het model wordt eerst de situatie voor aardgas bekeken. Vervolgens worden de uitkomsten voor waterstof besproken en wordt het effect van ventilatie in de woning onderzocht.

We merken op dat de getoonde resultaten in dit hoofdstuk zijn berekend op basis van een versimpelde weergave van de werkelijkheid, zo is bijvoorbeeld maar één type woning gebruikt. Het doel van de validatie is daarom om in de juiste orde van grootte te komen.

### 5.1 Aardgas

#### 5.1.1 Instroom

Op basis van de gekozen faalkansen van zowel de meterinstallatie als de binnenleiding en het toestel wordt het aantal keer bepaald waarin een instroom (*ingress*) in de woning plaats gaat vinden. De frequenties worden per jaar per woning weergegeven in Figuur 7. In de referentiesituatie<sup>6</sup> wordt uitgegaan van een ventilatievoud van ongeveer 0.8 uur<sup>-1</sup>. Ten gevolge van de grootte van de kamers, fysische eigenschappen van het gas en de ventilatievoud kan de concentratie in de woning oplopen of afnemen. Ten opzichte van het totaal aantal instroomgevallen wordt in 2.4% van de gevallen een concentratie van 20% van de onderste ontbrandingswaarde (LFL) bereikt. Bij deze concentratie zal het geodoriseerde gas ruikbaar zijn. In 0.9 % van alle instroomgevallen zal de concentratie boven de LFL komen en is een brandbaar mengsel in de woning aanwezig. Op basis van de kans op ontsteking van dit mengsel zal in 0.01% van alle instroomgevallen een explosie ontstaan.

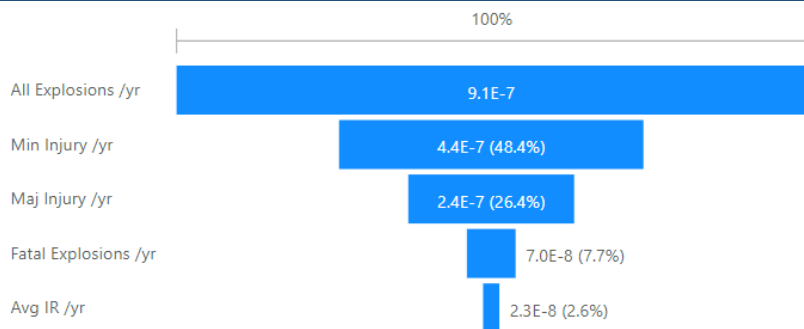


Figuur 7 Instroom- en concentratieopbouw frequenties voor aardgas in de referentiewoning door een lek in de binneninstallatie.

#### 5.1.2 Validatie risico

Het model geeft daarmee aan dat de kans op een explosie per jaar ongeveer eens per twee miljoen gasaansluitingen is ( $1.8 \times 10^{-6}$ ). Op basis van de concentratie van het gas bij een explosie en de daarbij behorende kracht van de explosie wordt de kans op letsel of overlijden bepaald. Deze kansen worden weergegeven in Figuur 8. Het model berekent dat grofweg de helft van de explosies kan leiden tot tenminste verwondingen en ongeveer 8% heeft de kracht om dodelijke slachtoffers te veroorzaken. Als de aanwezigheid van personen in de woning wordt meegenomen, leidt dit tot een gemiddeld individueel risico van ruim  $2 \times 10^{-8}$  per jaar.

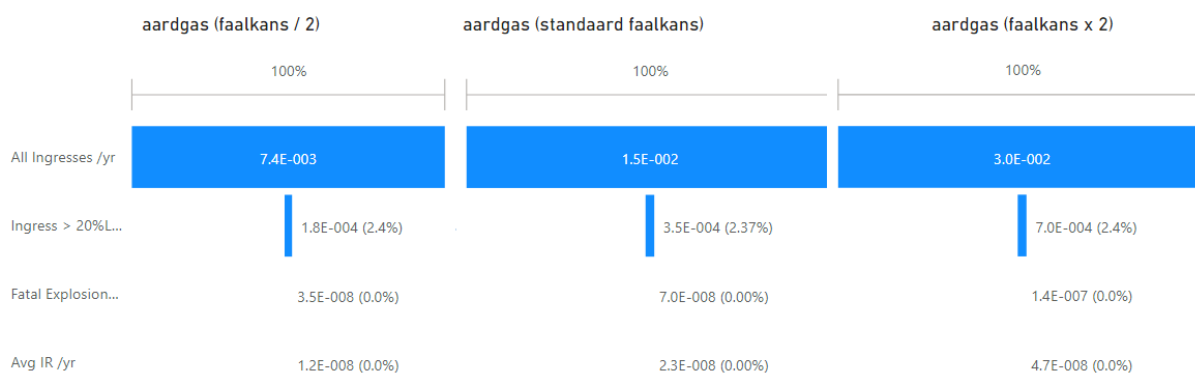
<sup>6</sup> Op basis van ventilatiemetingen aan de testwoning op Spadeadam. Deze woning is waarschijnlijk iets slechter geventileerd dan het gemiddelde in het VK.



Figuur 8 Individueel risico bij aardgas explosies als gevolg van een lekkage in de binneninstallatie.

Het berekende individuele risico komt goed overeen met de historische ongevalsdata voor aardgas zoals beschreven in hoofdstuk 2. Tabel 1 geeft aan dat de kans op een dodelijk slachtoffer in Nederland ten gevolge van een explosie of brand per woning  $0.06 \times 10^{-6}$  is, exclusief opzet gevallen. Daarnaast is de kans op verwondingen  $1.1 \times 10^{-6}$ . Het model geeft respectievelijk  $0.02 \times 10^{-6}$  voor dodelijke slachtoffers en  $0.4 \times 10^{-6}$  voor gewonden en levert daarmee dezelfde orde van grootte als de praktijk. Tevens is de verhouding tussen gewonde slachtoffers en dodelijke slachtoffers in zowel de historische data als de uitkomsten van het model vrijwel gelijk (historisch:  $1.1/0.06 = 18$ ; model  $0.44/0.023 = 19$ ). Deze risico's zijn exclusief het risico op koolmonoxidevergiftiging die bij aardgas groter zijn dan de hier getoonde risico's (De kans op een slachtoffer door koolmonoxidevergiftiging is volgens Tabel 1 gelijk aan  $0.37 \times 10^{-6}$  per aardgasaansluiting).

Het individuele risico zoals berekend door het model schaalt lineair met de faalkans, zoals weergegeven in Figuur 9. Bij een twee keer zo grote of kleine faalkans van de binneninstallatie zal het risico respectievelijk twee keer zo groot of klein worden. Als door mitigerende maatregelen de kans op lekkage met een factor verlaagd kan worden – bijvoorbeeld door het regelmatig testen op lekken van de binneninstallatie - is op basis van de berekeningen de verwachting dat het risico daarmee met dezelfde factor verlaagd kan worden. Omdat de uitkomsten van de standaardwaarden voor de faalkans al goed overeenkomen met de historische data wordt in het vervolg van deze studie de faalkans niet verder aangepast.



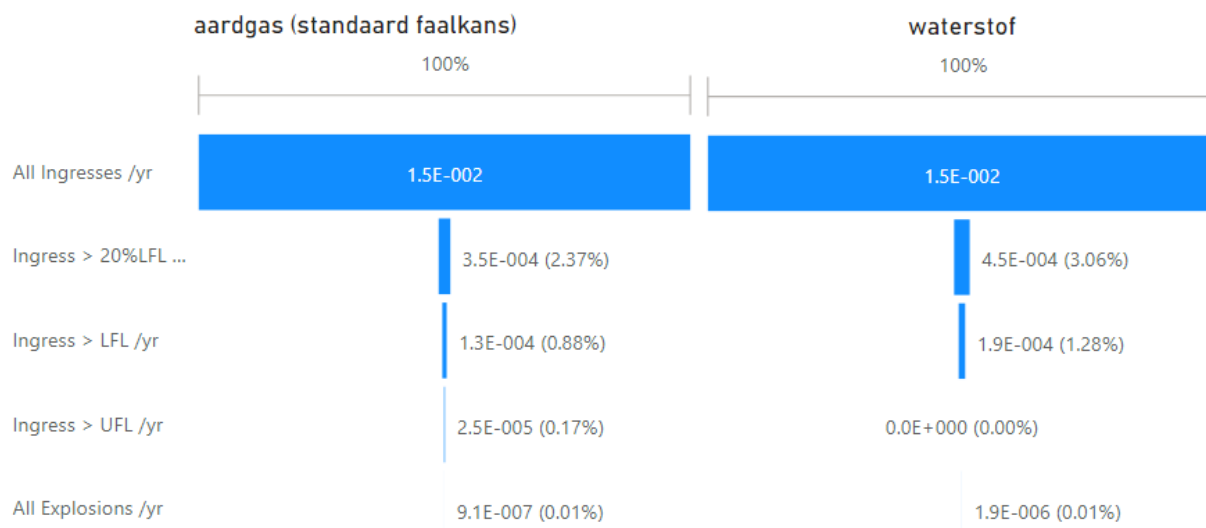
Figuur 9 Effect faalkans op uitkomsten model voor aardgas bij een lekkage in de binneninstallatie.

## 5.2 Waterstof

Door dezelfde instellingen als voor aardgas te gebruiken in de berekeningen voor waterstof, kan het verschil in risico tussen beide gasen inzichtelijk gemaakt worden. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat dezelfde binneninstallatie gebruikt wordt voor beide gasen en dat deze dezelfde faalfrequenties heeft als nu de situatie voor aardgas is. Waarschijnlijk zullen er voor waterstof minder toestellen per woning aanwezig zijn, en daarmee ook minder binnenleidingen. Deze aanname is daardoor conservatief.

### 5.2.1 Verschil instroom door een lekkage in de binneninstallatie

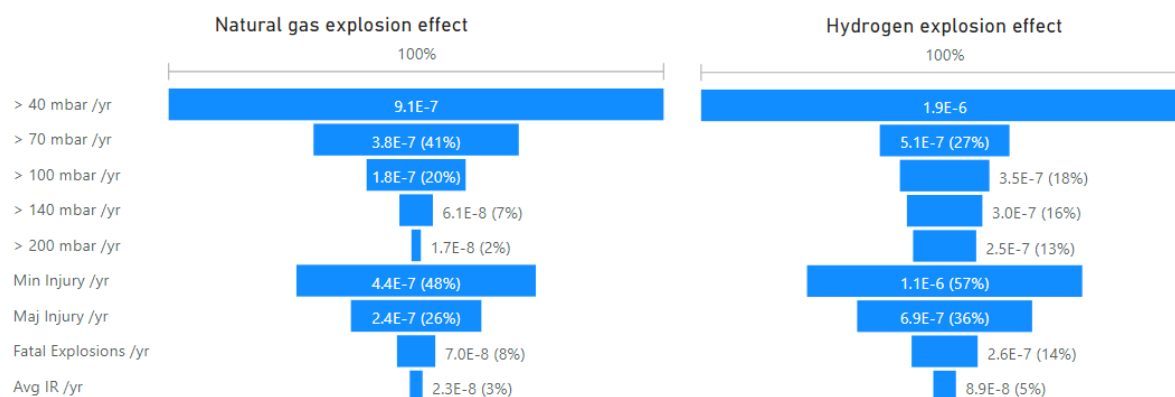
Figuur 10 laat de verschillen in concentratie opbouw zien tussen aardgas en waterstof. Omdat beide berekeningen dezelfde faalkansen van de binneninstallatie gebruiken is het totaal aantal instroomgebeurtenissen in beide situaties identiek en wordt dezelfde verdeling van uitstroomgrootte gebruikt. Echter door een verschil in de fysische eigenschappen van beide gasen zal de hoeveelheid gas die uitstroomt verschillend zijn. Bij eenzelfde ventilatievoud in de woningen, maar verschillende LFL- en UFL-waarden van beide gasen ontstaan verschillende kansen op een concentratie opbouw. Bij waterstof zal de onderste ontstekingsgrens ongeveer 1.5 keer vaker bereikt worden, zie Figuur 10. De hoge bovenste ontstekingsgrens van waterstof (75 vol.%), wordt volgens de berekeningen niet bereikt, in tegenstelling tot de situatie bij aardgas. Het totaal aantal explosies bij ontsteking van de opgebouwde concentraties ligt bij waterstof ruim 2x zo hoog.



Figuur 10 Verschil instroom en concentratieopbouw aardgas en waterstof bij gelijke faalkansen van de binneninstallatie.

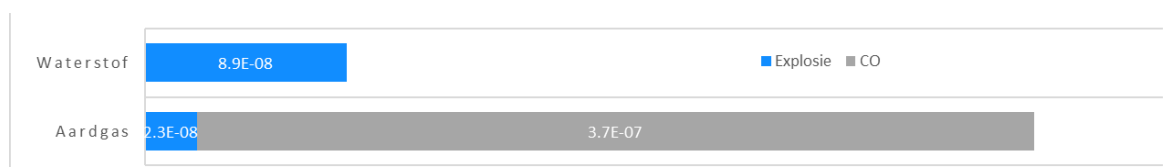
### 5.2.2 Verschil risico door een lekkage in de binneninstallatie

Het effect van de explosies bij waterstof zijn heftiger dan bij aardgas, zoals blijkt uit Figuur 11. Het bovenste deel van de figuur laat het aantal explosies per jaar zien met tenminste een overdruk van 40 tot 200 mbar. Duidelijk is dat de grotere explosies met hogere overdrukken vaker voorkomen bij waterstof in vergelijking met aardgas. Als gevolg van deze grotere overdrukken is ook het aantal verwondingen en dodelijke slachtoffers hoger bij waterstof. Rekening houdend met de aanwezigheid van personen in de woning, is het individuele risico op overlijden een factor 3.8 groter bij waterstof, zonder additionele maatregelen. Om het verschil in risico te verkleinen zullen dus met name lekkages voorkomen moeten worden die leiden tot explosieve concentraties in de woning (>10vol%) door gerichte maatregelen. In de volgende paragraaf wordt hiertoe het effect van ventilatie verder besproken.



Figuur 11 Verskil in effect explosies aardgas en waterstof door een lekkage in de binneninstallatie.

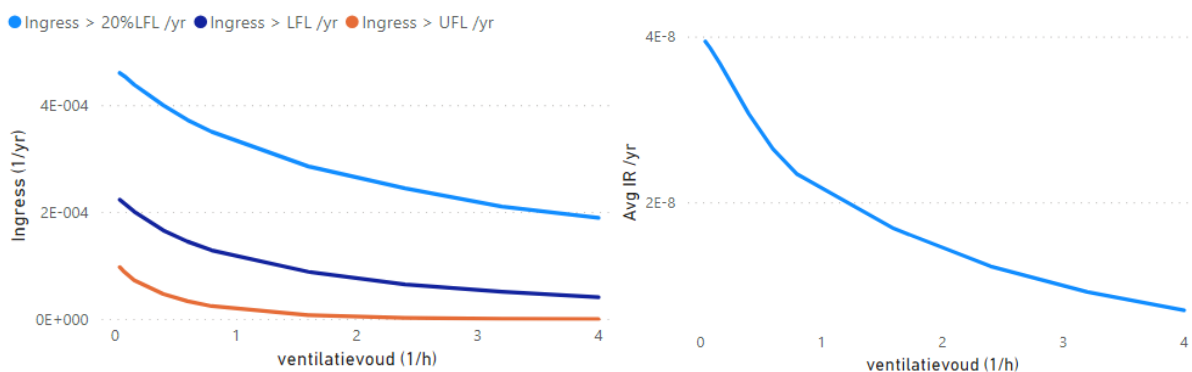
Bij een vergelijking van het risico tussen waterstof en aardgas in de woning zal ook het risico ten gevolge van koolmonoxidevergiftiging meegenomen moeten worden. Tabel 1 geeft aan dat het risico op overlijden ten gevolge van koolmonoxidevergiftiging  $0.37 \times 10^{-6}$  per aansluiting is. Als dit risico meegenomen wordt in de vergelijking, blijkt dat er een verschuiving optreedt van het verminderde risico door koolmonoxidevergiftiging en een verhoogd risico vanuit explosies. Zoals uit het volgende hoofdstuk zal blijken, zal bij waterstof het risico voor explosies als gevolg van lekkages in het distributienet ook toenemen. Daarnaast wordt in de hier beschreven simulaties geen rekening gehouden met de effecten van een explosie in een woning op nabijgelegen woningen. In de Voorbeeldwijk studie (hoofdstuk 7) wordt dit effect wel bekeken.



Figuur 12 Vergelijking individueel risico waterstof en aardgas voor explosies door een lekkage in de binneninstallatie en CO vergiftiging.

### 5.3 Effect van ventilatie

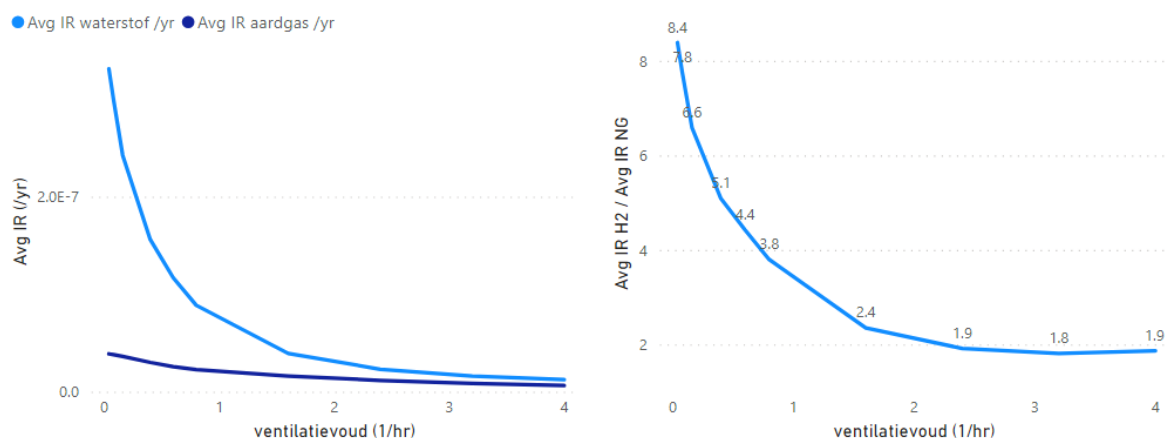
Het effect van ventilatie op de opbouw van (gevaarlijke) concentraties in de woning is bepaald door een tiental identieke woningen met een verschillende ventilatievoud door te rekenen. In deze berekening worden alle overige parameters constant gehouden en gaan we uit van de eerder gebruikte faalkansen. De concentratie opbouw en bijbehorend individuele risico is voor zowel aardgas als waterstof bepaald. Het model biedt de mogelijkheid om de ventilatievoud van de referentie met een factor te verhogen of verlagen. Gekozen is om een serie van huizen met een factor tussen de 0.05 en 5 te modeleren. Gegeven de referentiesituatie met een ventilatievoud van  $0.8 \text{ uur}^{-1}$  resulteert dit in een ventilatievoud tussen de  $0.04 \text{ uur}^{-1}$  en  $4 \text{ uur}^{-1}$ . Het veranderen van de ventilatievoud heeft een effect op de opbouw van de concentratie in de woning. Voor aardgas wordt dit effect weergegeven in Figuur 13.



Figuur 13 Effect van ventilatie op de concentratieopbouw (links) en het individuele risico (rechts) bij lekkage in de binneninstallatie voor aardgas.

Bij lagere ventilatievouden neemt het aantal keer dat een concentratie boven de LFL komt sterk toe. Als gevolg hiervan neemt ook het individuele risico toe. Bij aardgas levert een halvering van de ventilatievoud een verhoging van het risico met een factor 1.3 op, terwijl een verdubbeling van de ventilatie een verlaging van het risico met een factor 1.3 oplevert. Bij waterstof is dit effect sterker aanwezig.

Bij waterstof levert een halvering van de ventilatievoud een verhoging van het risico met een factor 1.8 op, terwijl een verdubbeling van de ventilatie een verlaging van het risico met een factor 2.2 oplevert. Bij zowel aardgas als waterstof levert een verhoging van de ventilatievoud ongeveer gelijke verlaging op van de kans op een concentratie boven de LFL. Omdat bij waterstof de effecten van een mogelijke explosie groter zijn, neemt het risico sterker af. De verhouding tussen het risico van aardgas en waterstof wordt daarom kleiner met toenemende ventilatie en juist groter als de ventilatievoud verder afneemt. Dit wordt weergegeven in onderstaande figuur.

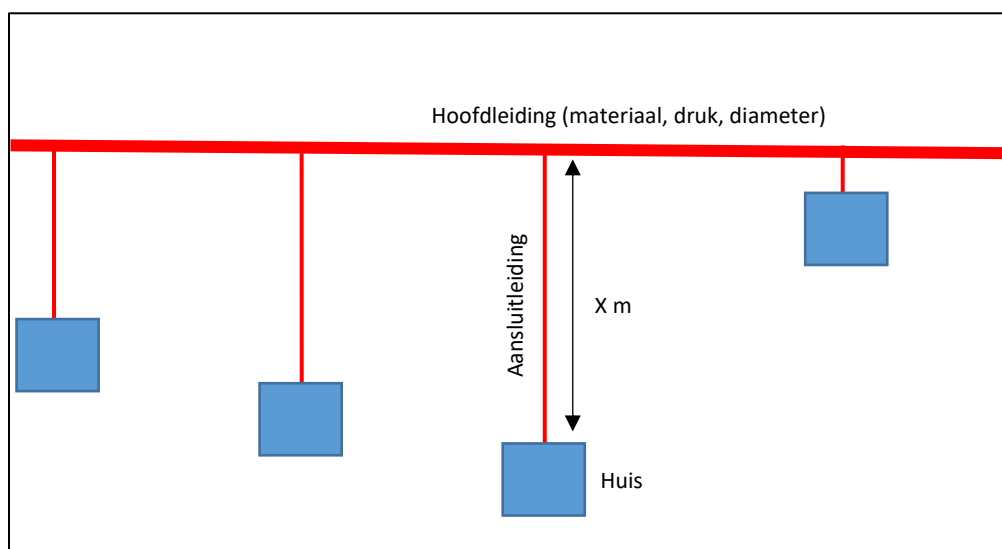


Figuur 14 Individueel risico waterstof en aardgas (links) en hun verhouding (rechts) als functie van de ventilatievoud bij lekkages in de binneninstallatie.

## 6 Resultaten risico door lek vanuit het distributienet

In tegenstelling tot het doen van een kwantitatieve risicoanalyse op een object, zoals een lekkage in de binneninstallatie van een woning, is het maken van een analyse van het gehele distributienet een stuk complexer. Gezien de omvang van de berekeningen is het ondoenlijk om het hele distributienet en alle aangesloten woningen direct door te rekenen.

Om toch een uitspraak te kunnen doen, is het distributiesysteem opgeknipt in typische configuraties. Zo kan bijvoorbeeld het risico van een hoofdleiding met een gegeven druk, diameter en materiaaleigenschappen op een woning op een vastgestelde afstand bepaald worden (zie Figuur 15). Door een aantal berekeningen te doen waarbij elk van de parameters (druk, diameter, materiaal) gevarieerd worden, kan een database met bijdragen aan het totale risico worden opgebouwd. De gebruikte parameters voor de individuele risicoberekeningen zijn in Tabel 16 opgesomd.



Figuur 15 Voorbeeld van de lay-out met de posities van een hoofdleiding en een aansluitleiding ten opzichte van een aantal huizen.

Tabel 16 Gemodelleerde parameters voor distributienet

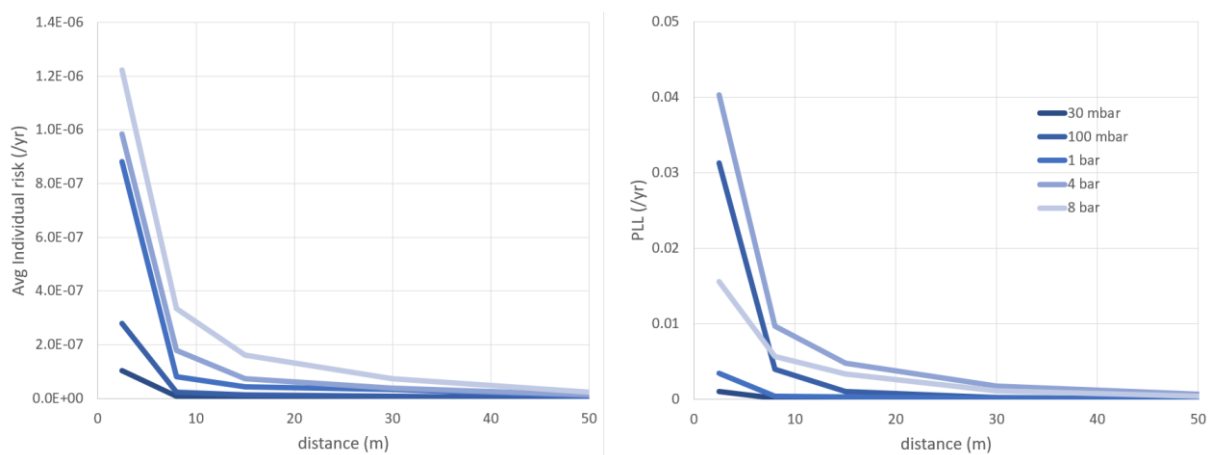
Parameter	Waarden
Druk	0.03 – 0.1 – 1 – 4 – 8 bar
Materiaal hoofdleiding	PE – PVC – Slagvast PVC – Staal
Diameter hoofdleiding	63 – 110 – 160 – 315 mm
Diameter aansluitleiding	32 mm
Afstand hoofdleiding – woning	2.5 – 8 – 15 – 30 – 50 m
Woning	Vrijstaand
Ventilatie woning	0.8 – 1.6 uur <sup>-1</sup>

Voor elke combinatie van de gemodelleerde parameters wordt op basis van de bijbehorende faalfrequentie het risico bepaald. De faalfrequenties zijn, zoals in hoofdstuk 4 schreven, gebaseerd op de beschikbare historische data. Hierbij is alleen bekend dat er een lekkage is geweest, niet wat de bijbehorende uitstroomhoeveelheid is geweest, noch wat de gevolgen waren. Op basis van de kans op een lekkage in een leiding met een bepaalde druk, diameter en materiaal, wordt in het model het individuele, plaatsgebonden risico bepaald. Dit individuele risico ten gevolge van brand of explosie kan niet per leidingtype (druk, diameter, materiaal) gevalideerd worden.



Om tot een totaal risico door lekken in het hele distributienet te komen, worden de individuele risico's per leidingtype gewogen opgeteld, op basis van hoe vaak deze voorkomen in Nederland. Een soortgelijke weging wordt bij het bepalen van het totale risico ook gemaakt voor de verdeling van afstanden ten opzichte van de hoofdleiding. Op deze manier wordt het totale risico voor het distributienet wordt uitgedrukt in een Potential Loss of Life (PLL), een te verwachten (gemiddeld) jaarlijks aantal slachtoffers. Deze waarde kan vergeleken worden met de, wel beschikbare, historische ongevalsdata.

Een voorbeeld van het verschil tussen de individuele, plaatsgebonden risico's en hun bijdrage aan het totaal risico wordt in Figuur 16 gegeven. Het risico ten gevolge van een lek in een PE-hoofdleiding met een diameter van 110 mm in een woning op een gegeven afstand van deze leiding, neemt toe met toenemende druk in de leiding en af naarmate de woning verder van de leiding ligt. Omdat echter 100 mbar leidingen van dit materiaal en deze diameter meer voorkomen in Nederland is de bijdrage van deze leidingen tot het totale risico bij woningen dichtbij de leiding groter dan het risico van een 8 bar leiding.



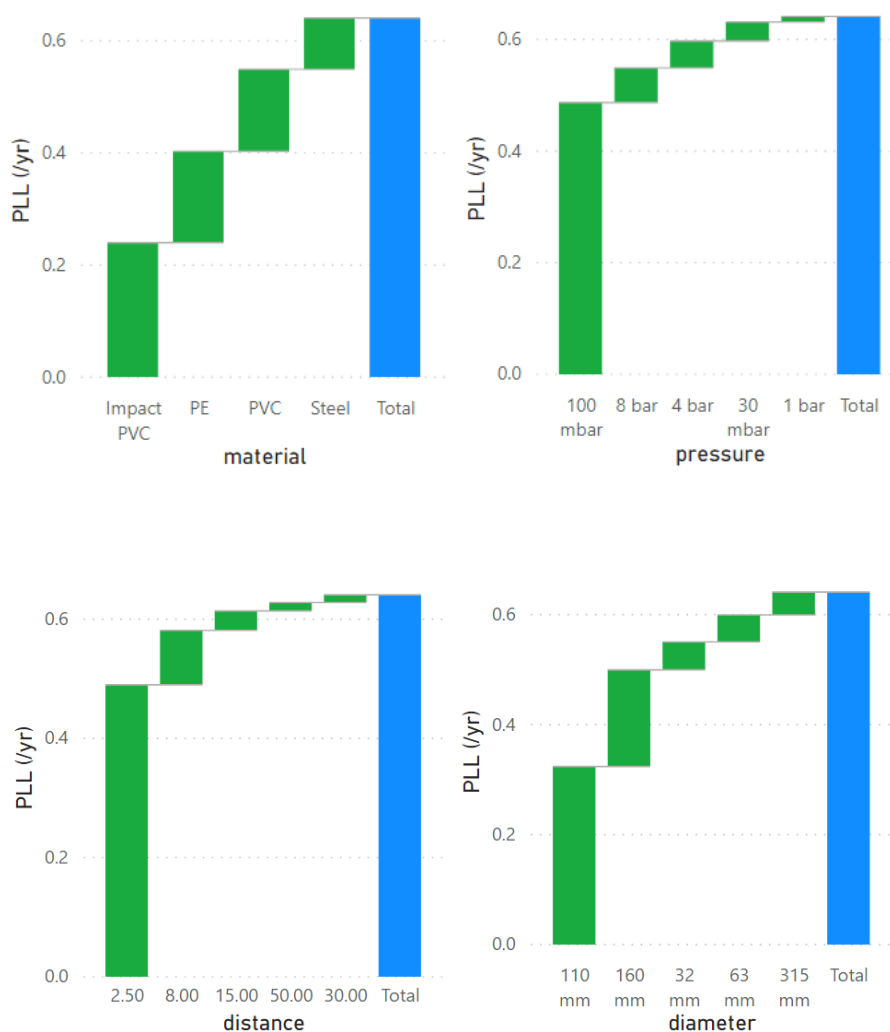
Figuur 16 Individueel risico (links) en de bijdrage aan het totale PLL (rechts) voor PE hoofdleidingen met een diameter van 110 mm en waterstof

Zo ook kunnen twee leidingen even vaak voorkomen en dezelfde faalkans hebben, maar toch een verschillend aandeel hebben in het totale risico door een verschil in diameter of druk. De faalkans geeft alleen de kans op lekkage aan en niet het effect.

Voor elk risico wordt de bijdrage voor het type lek (spontaan of interferentie), type leiding (hoofdleiding of aansluitleiding) en effect (brand of explosie) apart opgeslagen. Op deze manier kan het totale risico voor het distributienet bepaald worden en kunnen de grootste bijdragen aan dit risico geïnventariseerd worden. Analoog aan de opzet bij de risico's vanuit de binneninstallatie is ook hier eerst het model gevalideerd voor aardgas om vervolgens naar de verschillen met waterstof te kijken. Tenslotte is het effect van het toevoegen ventilatie op het risico onderzocht.

## 6.1 Aardgas

Het totale risico door lekkages in het distributienet zijn in Figuur 17 weergegeven en onderverdeeld in de bijdragen van de verschillende materialen, diameters, drukken en afstanden. De 32 mm leidingen betreft de aansluitleidingen en de overige diameters de hoofdleidingen.

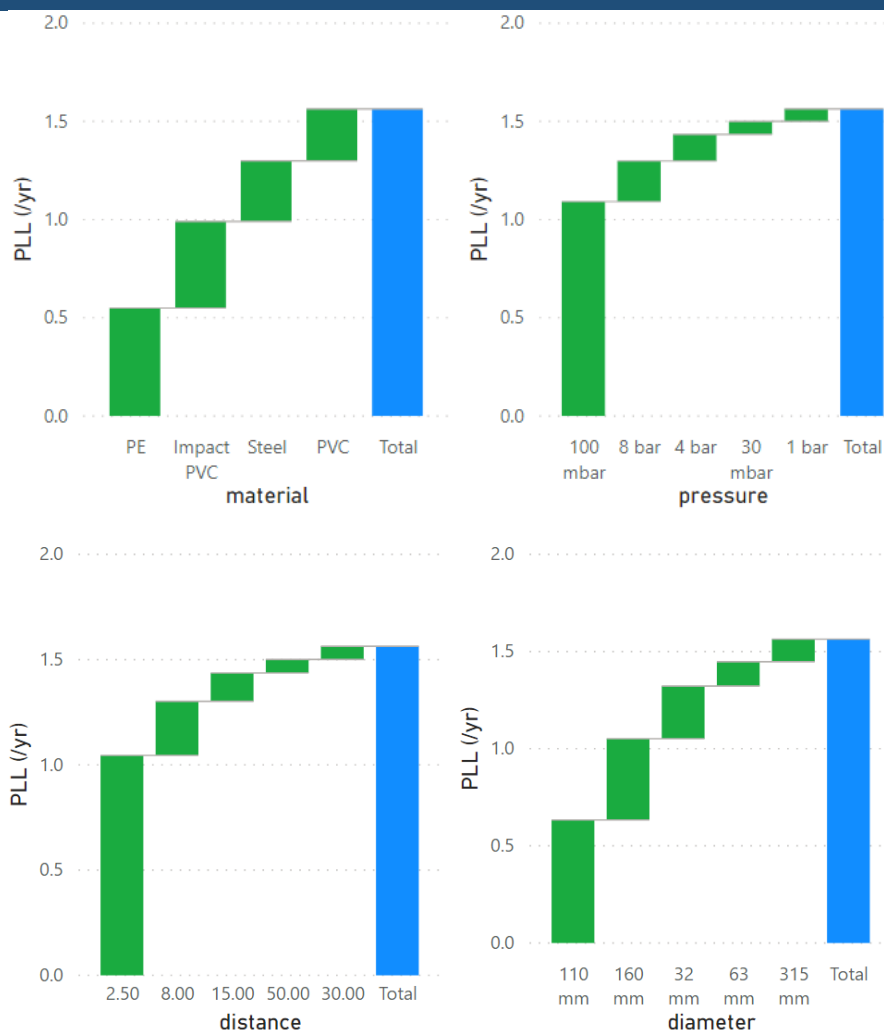


Figuur 17 Totale risico vanuit het distributienet (PLL=0.64) voor aardgas en de onderverdeling naar druk, diameter, materiaal en afstand.

Uit de figuren blijkt dat de grootste bijdrage aan het totale risico wordt veroorzaakt door het 100 mbar net en door woningen die dicht bij de hoofdleiding staan (2.5 meter). In het model zijn alle aansluitleidingen van PE, waardoor deze druk- en materiaalcombinatie een grote bijdrage levert aan het totale risico. Zoals eerder aangetoond geven de hogere drukken een wat groter risico, maar door het vaker voorkomen van lage druk netten is de bijdrage daarvan aan het totale risico groter. Het berekende totale risico in termen van PLL is 0.64 per jaar. Dit wordt beschouwd als dezelfde ordegrootte als de praktijkdata (~0.3 op basis van een heel beperkt aantal incidenten).

## 6.2 Waterstof

Door dezelfde instellingen als voor aardgas te gebruiken in de berekeningen voor waterstof, kan het verschil in risico tussen beide gassen inzichtelijk gemaakt worden. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat dezelfde netconfiguratie gebruikt wordt voor beide gassen en dat deze dezelfde faalfrequenties heeft als nu de situatie voor aardgas is.



Figuur 18 Totale risico vanuit het distributienet (PLL=1.56) voor waterstof en de onderverdeling naar druk, diameter, materiaal en afstand.

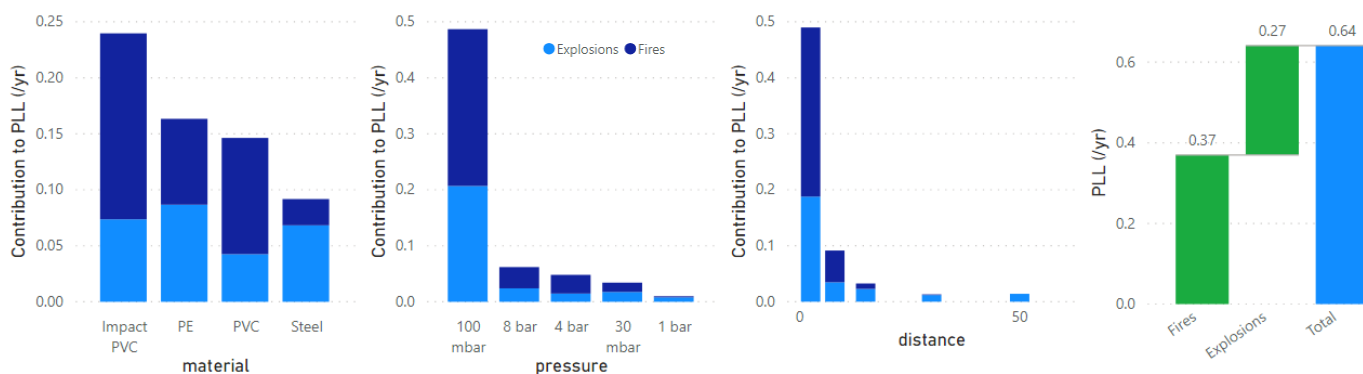
Voor waterstof is het aandeel van de hogere drukdelen (1 tot 8 bar) tot het totale risico groter dan bij aardgas: 26% tegenover 19%. Toch blijft het grootste risico ook bij waterstof veroorzaakt worden door het 100 mbar net, omdat dit het meest voorkomt. Een kleine verschuiving is ook waar te nemen in de gebruikte materialen. Bij waterstof is daar de grootste bijdrage vanuit de PE-leidingen, gevolgd door de slagvast PVC delen. Bij aardgas zijn deze twee materialen omgedraaid als het gaat om de grootste bijdrage, al is het verschil klein.

De factor tussen het PLL vanuit het distributienet voor waterstof en aardgas is bijna 2.5 (1.56 versus 0.64), hetgeen lager is dan de factor voor het risico door lekkages achter de meter. Daarnaast is het totale risico vanuit het distributienet erg klein ten opzichte van andere, algemeen geaccepteerde, risico's. Op basis van de aannames gemaakt in het model en gemiddeld per aansluiting (7.2 miljoen), is het individuele risico in de woning door lekkages vanuit het distributienet ongeveer  $2 \times 10^{-7}$  voor waterstof, uitgaand dat er geen additionele mitigerende maatregelen getroffen worden.

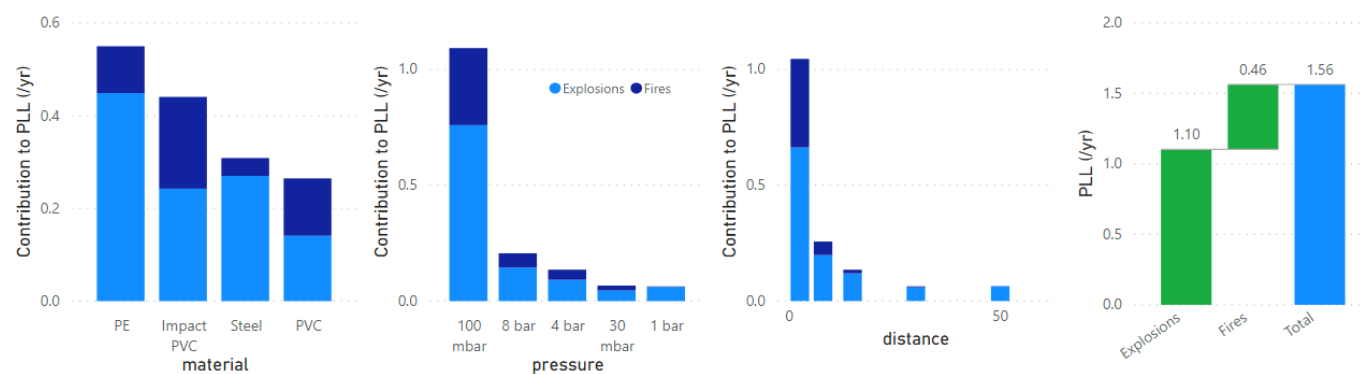
Er kunnen verschillende maatregelen getroffen worden om het risico voor waterstof (en ook voor aardgas) verder te reduceren. De bijdrage van zowel explosies/branden en spontane/interferentie lekken tot het risico kan verder uitgesplitst worden om meer inzicht te geven welke maatregelen bijdragen tot de grootste reductie van het risico.

### 6.2.1 Verschil bijdrage explosie/brand

Een duidelijker verschil is te zien bij het aandeel in het risico door explosies ten opzichte van de branden, zoals weergegeven in Figuur 19 en Figuur 20. Naar verhouding worden de meeste slachtoffers bij aardgas veroorzaakt door branden, bijna 60%. De grootste bijdrage aan het risico bij waterstof wordt veroorzaakt door explosies (70%), in tegenstelling tot de situatie bij aardgas. Dit is in lijn met de resultaten zoals die ook achter de meter in het vorige hoofdstuk naar voren komen. Lekkages in hogere druk leidingen leiden tot grotere hoeveelheden waterstof die vrij komen en daarbij in de woning kunnen opbouwen tot hogere concentraties. Bij ontsteking leidt dit tot heftigere explosies en daarmee een hoger risico.



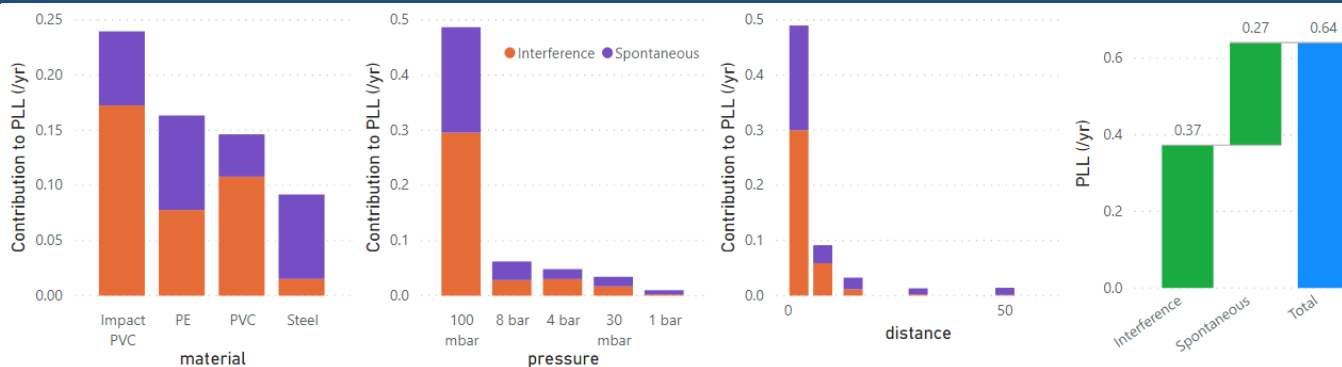
Figuur 19 Onderscheid tussen bijdrage van branden en explosies tot het risico vanuit het distributienet voor aardgas.



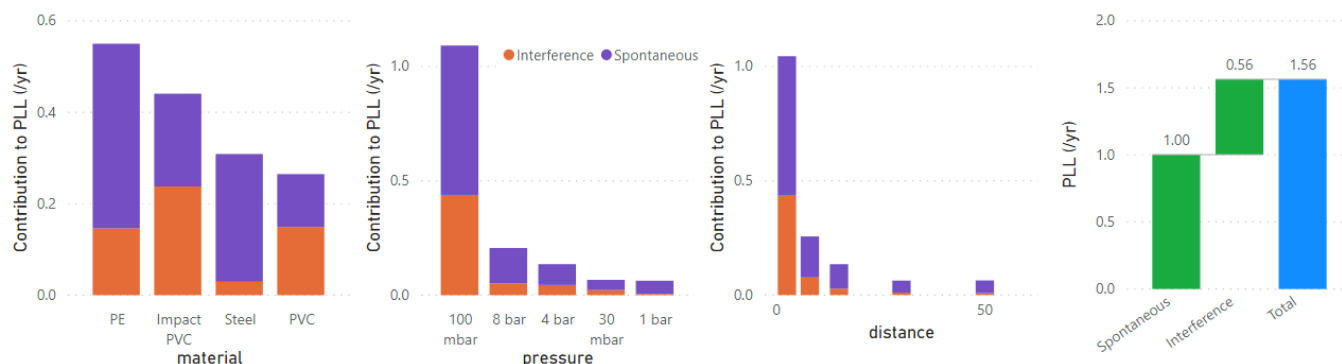
Figuur 20 Onderscheid tussen bijdrage van branden en explosies tot het risico vanuit het distributienet voor waterstof.

### 6.2.2 Verschil bijdrage spontaan/interferentie oorzaak

Het model voor zowel aardgas als waterstof gebruikt dezelfde faalkansen in de verschillende leidingtypen. Toch is de bijdrage aan het totale risico verschillend zoals blijkt uit Figuur 21 en Figuur 22. Bij waterstof is de bijdrage door spontaan ontstane lekken groter dan bij aardgas. In het model worden lekken door derden (interferentie) over het algemeen sneller opgemerkt en wordt eerder actie ondernomen in vergelijking met lekken die spontaan ontstaan. Deze laatste categorie kan voor langere tijd onopgemerkt blijven met als gevolg dat hogere concentraties opgebouwd kunnen worden. Bij waterstof resulteert dat in een hoger risico door een groter effect van de explosie. In het model schaal het risico lineair met de faalkansen van de leidingen. Dit betekent dat als door meer inspecties de faalkansen op spontane lekkages verlaagd kan worden, het risico met eenzelfde factor verlaagd wordt. Vooral spontane lekkages in de PE-leidingen van 100mbar dragen daarbij relatief veel bij.



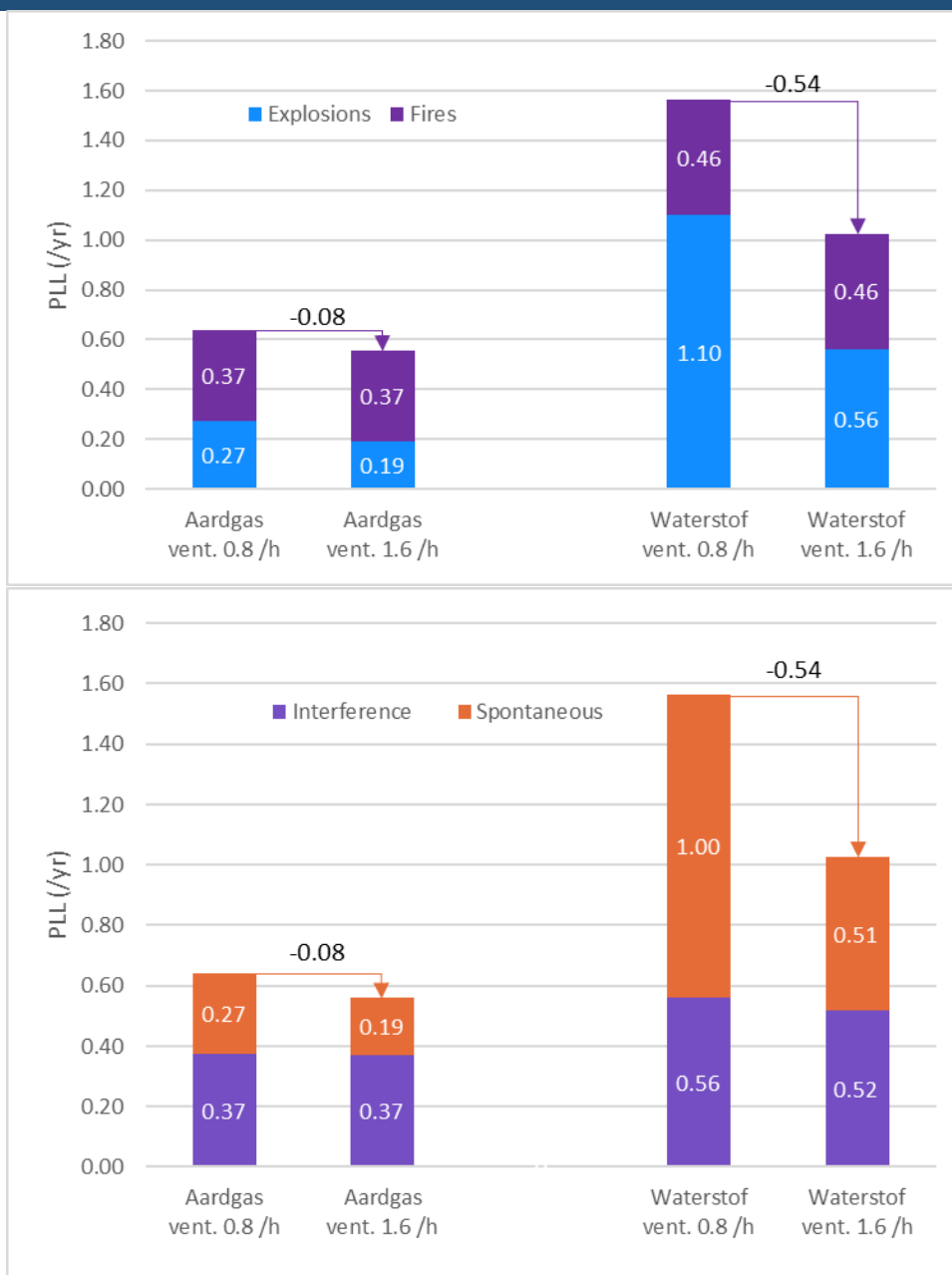
Figuur 21 Onderscheid tussen bijdrage van spontane en interferentie tot het risico vanuit het distributienet voor aardgas.



Figuur 22 Onderscheid tussen bijdrage van spontane en interferentie tot het risico vanuit het distributienet voor waterstof

### 6.3 Effect ventilatie

Vanuit de analyse in hoofdstuk 5 blijkt dat ventilatie een groot effect heeft op het risico in de woning, vooral bij waterstof. Het effect van ventilatie op het totale risico vanuit het distributienet is berekend door alle bovenstaande berekeningen te herhalen met woningen met een dubbele ventilatievoud (1.6 uur<sup>-1</sup>). De uitkomsten zijn samengevat in onderstaande grafiek.



Figuur 23 Effect van verdubbeling van de ventilatievoud in de woning op het risico voor aardgas en waterstof ontstaan door een lek vanuit het distributienet, uitgesplitst naar bijdrage van explosies/branden (boven) en interferentie/spontane lekken (onder).

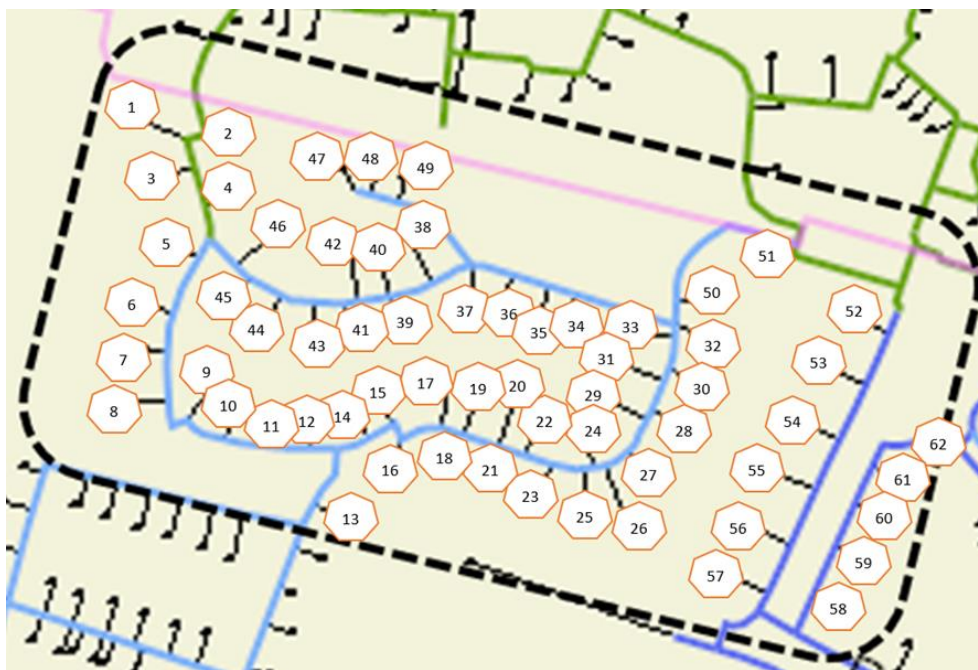
De ventilatievoud lijkt vooral invloed te hebben op de effecten van explosies. Dit effect is bij waterstof veel groter, een reductie van het totale risico met een PLL van 0.51 per jaar in vergelijking met aardgas (0.08 per jaar lager). Als de verdeling van het risico naar de oorzaak van de lekkage wordt gemaakt, blijkt dat met name de spontaan gevormde lekken een lagere bijdrage hebben: van een PLL van 1.0 naar 0.5 /jaar. Ditzelfde effect, zij het in veel mindere mate, is ook het geval bij aardgas (-0.08). Schade door derden leidt in het algemeen tot lekkages naar de open lucht en wordt eerder opgemerkt. Het effect van ventilatie heeft daardoor meer effect op het voorkomen van opbouw van gevaarlijke waterstofconcentraties in gesloten ruimtes die uiteindelijk tot explosies leiden.

## 7 Resultaten risico voorbeeldwijk

In de voorgaande twee hoofdstukken zijn de risico's besproken van waterstof voor lekken in de binneninstallatie en het distributienetwerk. Samen vormt dit een beeld hoe het totale veiligheidsrisico verandert bij het vervangen van aardgas door waterstof. Dit hoofdstuk presenteert en bespreekt de impact van waterstof in het netwerk van een stukje van een typische Nederlandse woonwijk. Door deze zogenaamde voorbeeldwijk als input in het QRA-model te zetten, kan een vergelijking in individueel risico worden gemaakt tussen aardgas en waterstof geldend voor een gedetailleerd en realistisch distributienetwerk met woningen. Dit geldt als aanvulling op de risico resultaten voor de algemene Nederlandse situatie. De impact op het individuele risico van leiding falen kan hiermee op lokaal niveau worden onderzocht. Interessant is bijvoorbeeld de invloed van woningen op elkaar, zoals dicht bij elkaar staande of 2-onder-1-kap woningen, maar ook het verschil in risico tussen woningen bij bijvoorbeeld een hoge of (meerdere) lagere druk leidingen.

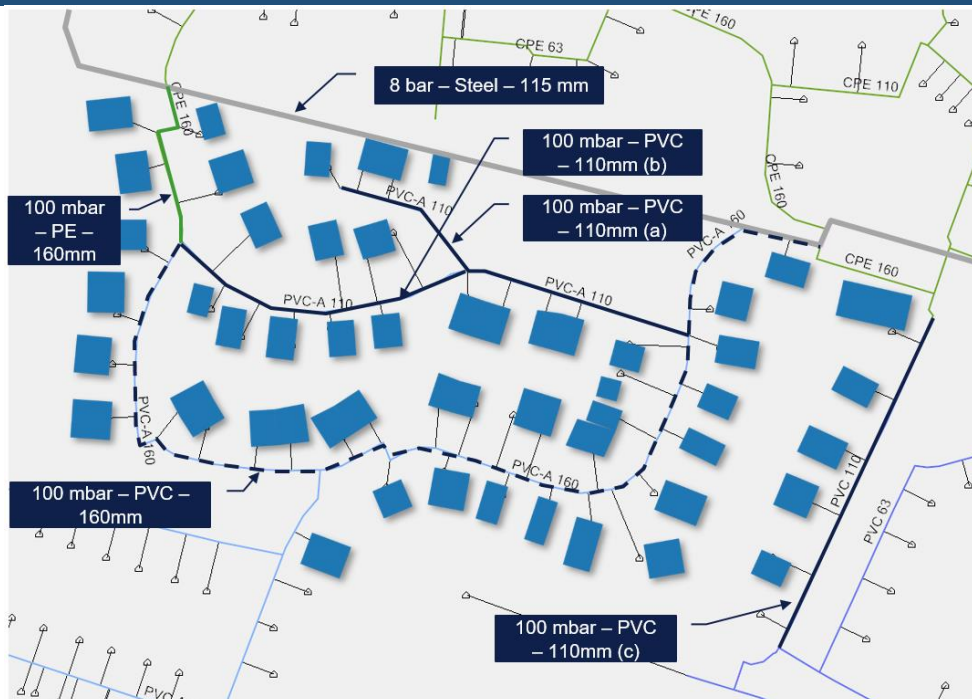
### 7.1 Voorbeeldwijk in het QRA-model

De samenstelling van de voorbeeldwijk is erg belangrijk voor de relevantie van de resultaten. Daarom is het definiëren van de voorbeeldwijk in samenspraak met de netbeheerders uitgevoerd. De wijk moest ogen als een typisch stukje uit een dorp of stadje. Verder zijn verschillen in de topologie van het distributienet interessant zoals voorkomende materialen, drukken en diameters. Enige variatie in het type huizen en de afstanden tot het distributienet vergroot de waarde van de resultaten.



Figuur 24 Kaart met genummerde woningen en distributienet gedefinieerd als voorbeeldwijk.

Bovenstaande kaart geeft een overzicht met de woningen en het distributienet voor de voorbeeldwijk. De hoofdleidingen binnen de stippellijn en de woningen 1 tot en met 57 zijn in het model gezet als input. Verschil in kleur van hoofdleidingen geeft een specifieke soort materiaal, diameter en druk aan. Deze topologie van het distributienet is weergegeven in Figuur 25.



Figuur 25 Overzicht huizen en met distributienet topologie van de gedefinieerde voorbeeldwijk.

In de voorbeeldwijk zijn vrijstaande woningen aanwezig met verschillende groottes en afstanden tot elkaar en het distributienet. Verder zijn er een aantal 2-onder-1-kap woningen aanwezig, herkenbaar aan de dubbele aansluitleiding in Figuur 25.

Het distributienetwerk bestaat uit en is gemodelleerd volgens de onderstaande sectieverdeling;

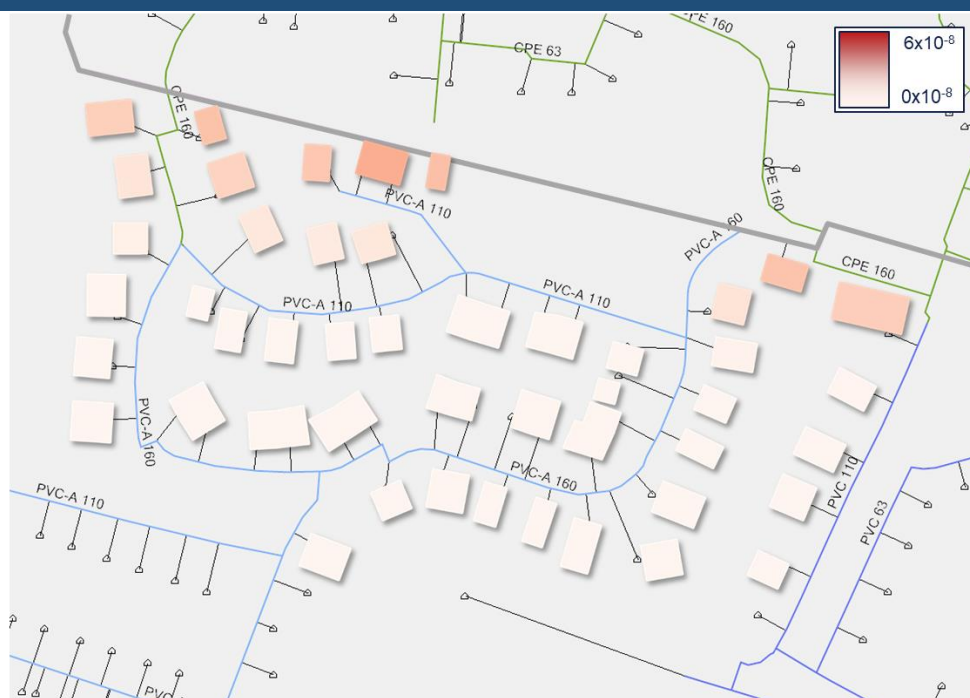
- 8 bar hoofdleiding, Staal, 115 mm
- 100 mbar hoofdleiding, PE, 160 mm
- 100 mbar hoofdleiding, PVC-A, 160 mm
- 100 mbar hoofdleiding, PVC-A, 110 mm (a, b & c)
- Aansluitleidingen van PE, 32 of 25 mm

Verder zijn de ingevoerde faalkansen voor de sectie van het distributienet specifiek voor de gebruikte combinatie van diameter, druk en materialen zoals gegeven in Paragraaf 4.2. De configuratie en faalkansen van de binneninstallatie zijn gelijk genomen als gebruikt in Hoofdstuk 5. Het individuele risico is voor elke woning bepaald voor zowel waterstof als aardgas.

## 7.2 Risico waterstof vanuit een lek in het distributienet

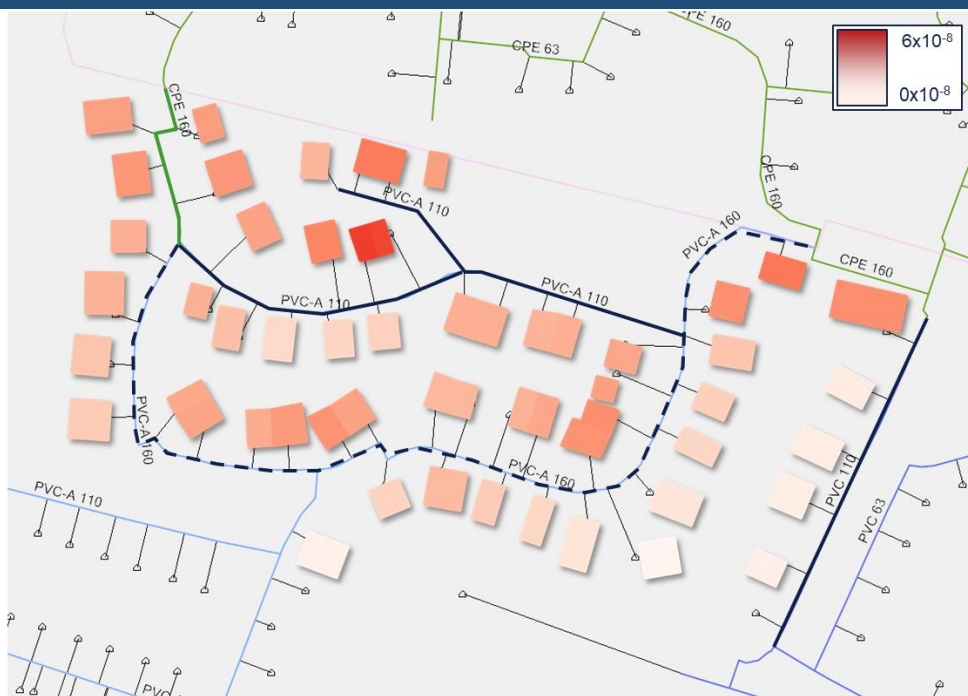
De risico's van waterstof door een lek in het distributienet worden in Figuur 26 tot en met Figuur 28 gepresenteerd. Voor elk onderdeel van de hoofdleidingen uit het overzicht in Figuur 25 als ook voor de aansluitleidingen is het risico per woning uitgerekend. De resultaten zijn voor de hoofdleidingen per drukklasse samengevoegd. Er wordt een kleurschaal gebruikt om het verschil in risico tussen de woningen aan te duiden. In deze paragraaf is de gebruikte schaal gelijk tussen de verschillende figuren.





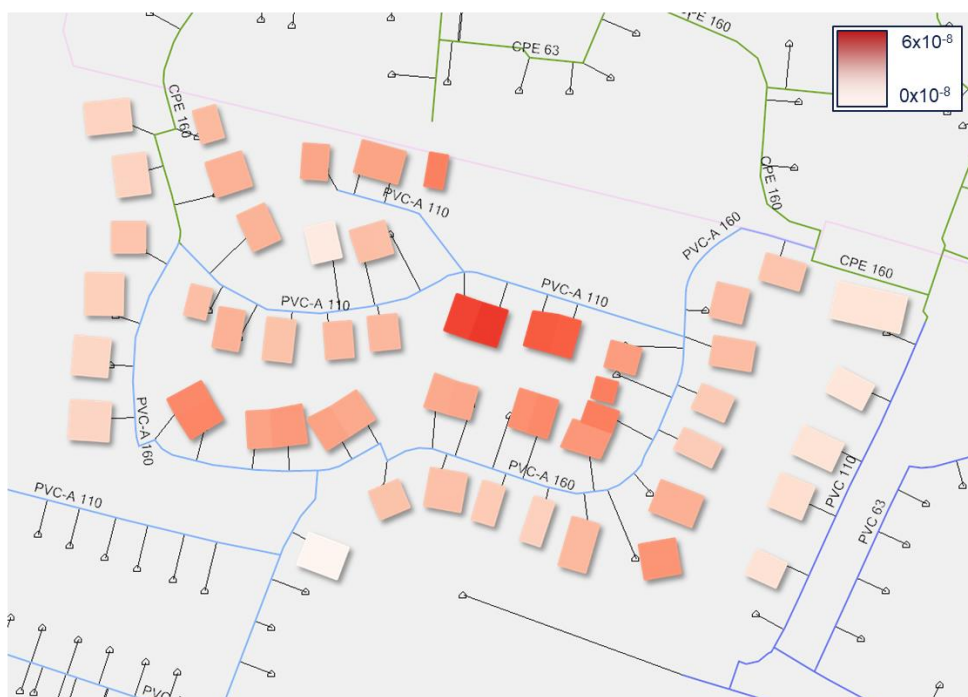
Figuur 26 Risico door lek in 8 bar hoofdleiding.

Uit de bovenstaande figuur volgt zoals verwacht dat huizen die grenzen aan of dichtbij de 8 bar hoofdleiding staan een hoger risico ondervinden vergeleken met huizen die verder van de leiding afliggen. Het risico neemt snel af bij een toenemende afstand. Vergeleken met het risico vanuit de 100 mbar hoofdleidingen uit de volgende figuur is het risico van de 8 bar leiding relatief klein. De oorzaak hiervan kan gevonden worden in de input van het model. De faalkansen van een 110 mm 8 bar stalen leiding zijn een factor 2.7 lager vergeleken met de faalkansen van een 110 mm 100 mbar PVC leiding (Tabel 9). Daarnaast is de totale lengte van de 100 mbar hoofdleiding rondom de huizen groter vergeleken met de rechte 8 bar leiding, wat ook bijdraagt aan een hoger risico.



Figuur 27 Risico door lek in 100 mbar hoofdleiding.

In bovenstaande figuur is een duidelijk verband te zien tussen het risico en het aantal nabijgelegen 100 mbar hoofdleidingdelen. Een voorbeeld hiervan is te zien aan de rechterzijde waar verticaal een rij van vijf huizen gesitueerd is. De onderste vier ondervinden een aanzienlijk lager risico vergeleken met de bovenste. Deze vier huizen hebben vrijwel alleen risico van het PVC-110 (c) hoofdleidingdeel terwijl het bovenste huis daarnaast een risico heeft vanuit het PVC-160 hoofdleidingdeel.



Figuur 28 Risico door lek in aansluitleidingen.

Het risico vanuit de aansluitingen is het hoogste voor woningen die zich dicht bij elkaar bevinden, zoals 2-onder-1-kap woningen. Een goed voorbeeld is te zien in het midden van Figuur 28. Deze twee woningen ondervinden risico van de eigen aansluitleiding, die van de aangebouwde burens en ook van nabije huizen. Vrijstaande huizen relatief ver van andere woningen ondervinden het minste risico.

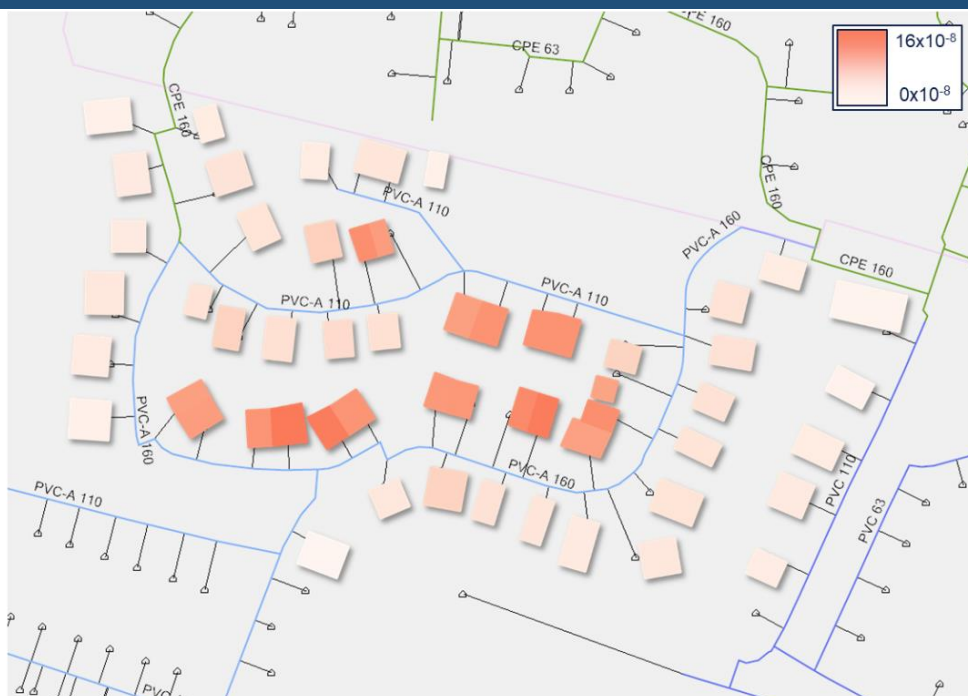


Figuur 29 Totale risico door lek vanuit het distributienet.

Het totale risico per woning in de voorbeeldwijk door een waterstof lek vanuit het distributienet is weergegeven in Figuur 29. Er is een duidelijke relatie tussen woningen dicht bij elkaar in de nabijheid van meerdere delen hoofdleiding en een hoger risico. Het hoogste risico wordt dan ook gevormd door 2-onder-1-kap woningen. Dit effect op het risico is groter dan dat van een woning vlakbij de 8 bar hoofdleiding.

### 7.3 Risico waterstof vanuit een lek in de binneninstallatie

Onderstaand in Figuur 30 is het risico per woning in de voorbeeldwijk weergegeven door een lek vanuit de binneninstallatie. Voor een duidelijke weergave is de kleurschaal die het risico aangeeft afwijkend ten opzichte van de figuren uit de vorige paragraaf.

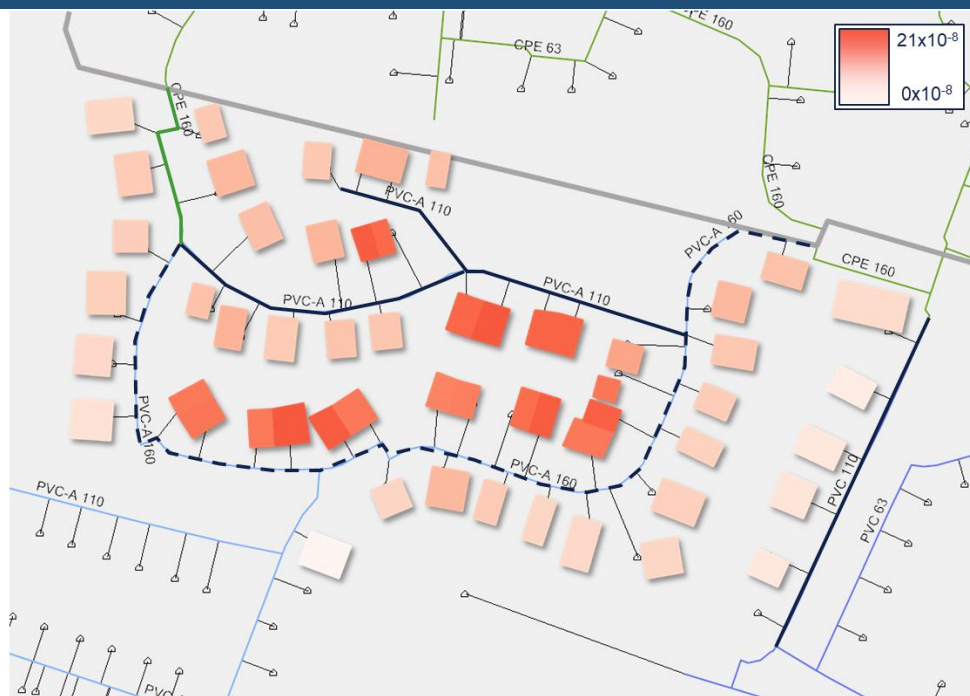


Figuur 30 Risico in woningen voorbeeldwijk door lek in binneninstallatie.

De uitkomsten van het model voor een lek in de binneninstallatie laat voor de woningen in de voorbeeldwijk een duidelijke trend zien. Naast dat er risico is in een woning door een lek met explosie als gevolg in de eigen binneninstallatie, is er een sterke invloed van nabijgelegen woningen zichtbaar. Met name 2-onder-1-kap woningen in de voorbeeldwijk hebben een sterk verhoogd risico, als ook vrijstaande woningen dichtbij andere woningen. Het risico dat ontstaat door een lek in de binneninstallatie is aanzienlijk groter in vergelijking met het risico door een lek vanuit het distributienet, rekening houdend met het verschil in kleurschaal.

#### 7.4 Totale risico voorbeeldwijk

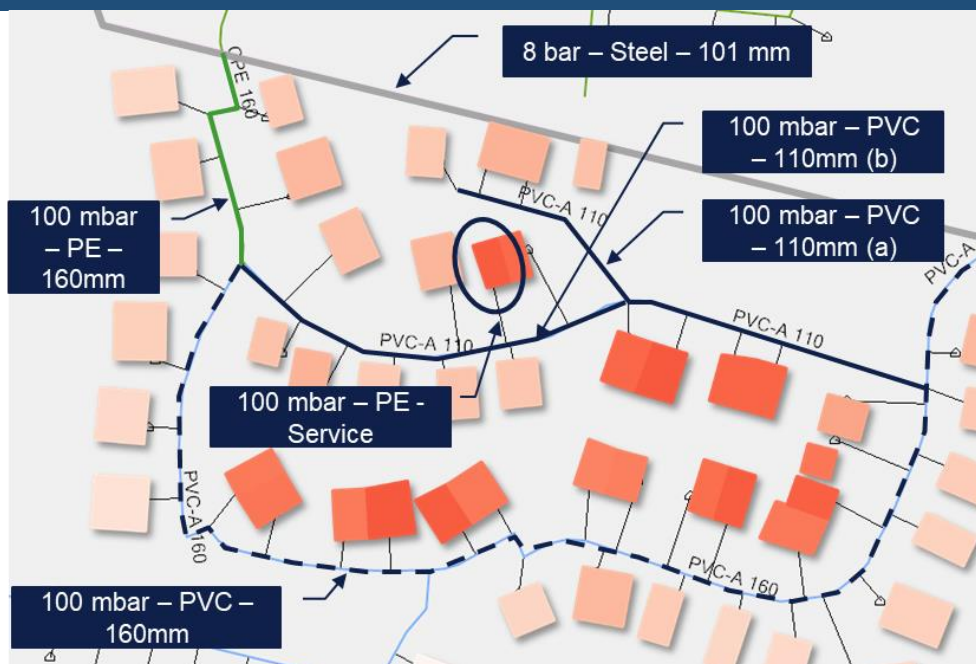
De combinatie van het risico ontstaan door zowel een lek in het distributienet als in de binneninstallatie geeft het totale individuele risico per woning in de voorbeeldwijk. Figuur 31 geeft het totale risico weer voor waterstof.



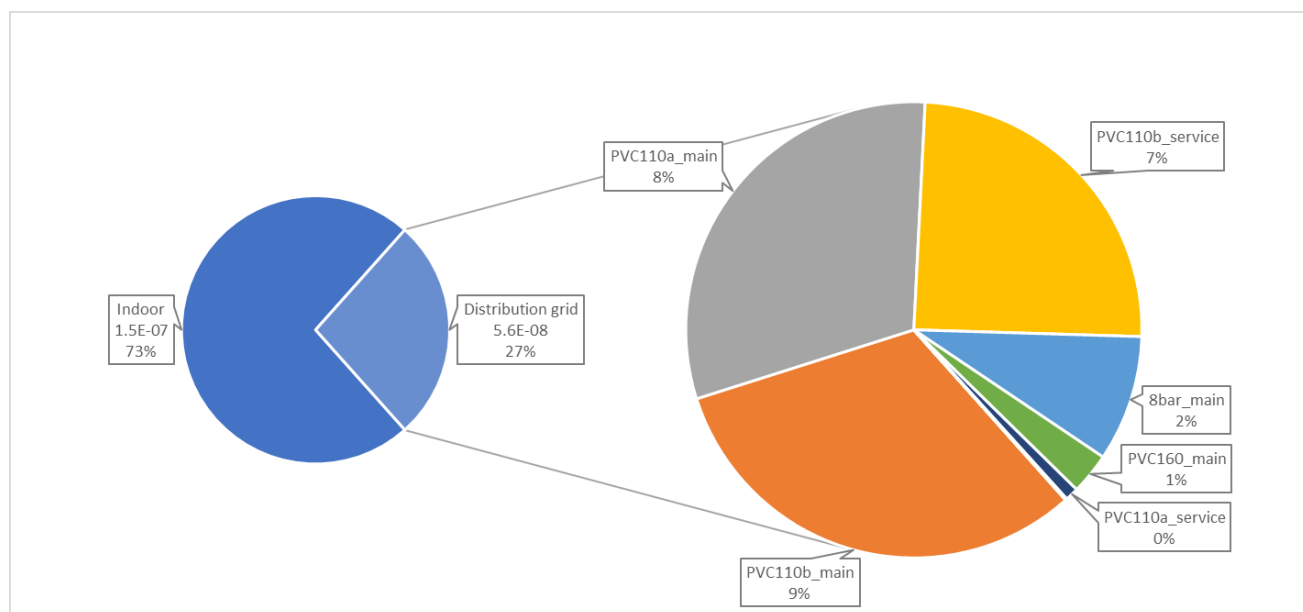
Figuur 31 Totale risico waterstof voor de woningen in de voorbeeldwijk

Veruit de grootste bijdrage aan het totale risico is voor waterstof de binneninstallatie, met daaropvolgend de 100 mbar hoofdleidingen. De verhouding van het totale individuele risico tussen de woningen in de voorbeeldwijk in Figuur 31 lijkt dan ook erg een combinatie van de verhoudingen in Figuur 30 en Figuur 27. De 2-onder-1-kap woningen, woningen relatief dicht bij elkaar en woningen bij meerdere hoofdleidingen in de buurt hebben het grootste individuele risico. Vrijstaande woningen bij een enkele leiding hebben het minste individuele risico.

In Figuur 32 is woning nummer 40 omcirkeld. Dit is een 2-onder-1-kap woning gesitueerd nabij twee 100 mbar hoofdleidingen en in de buurt van de 8 bar hoofdleiding. Voor specifiek deze woning is in Figuur 33 de relatieve bijdrage van het individuele risico weergegeven van een lek in de binneninstallatie en in het distributienet. Deze laatstgenoemde is aan de rechterzijde van de figuur verder uitgesplitst.



Figuur 32 Woning nummer 40 omcirkeld in het overzicht van huizen en distributienet van de voorbeeldwijk

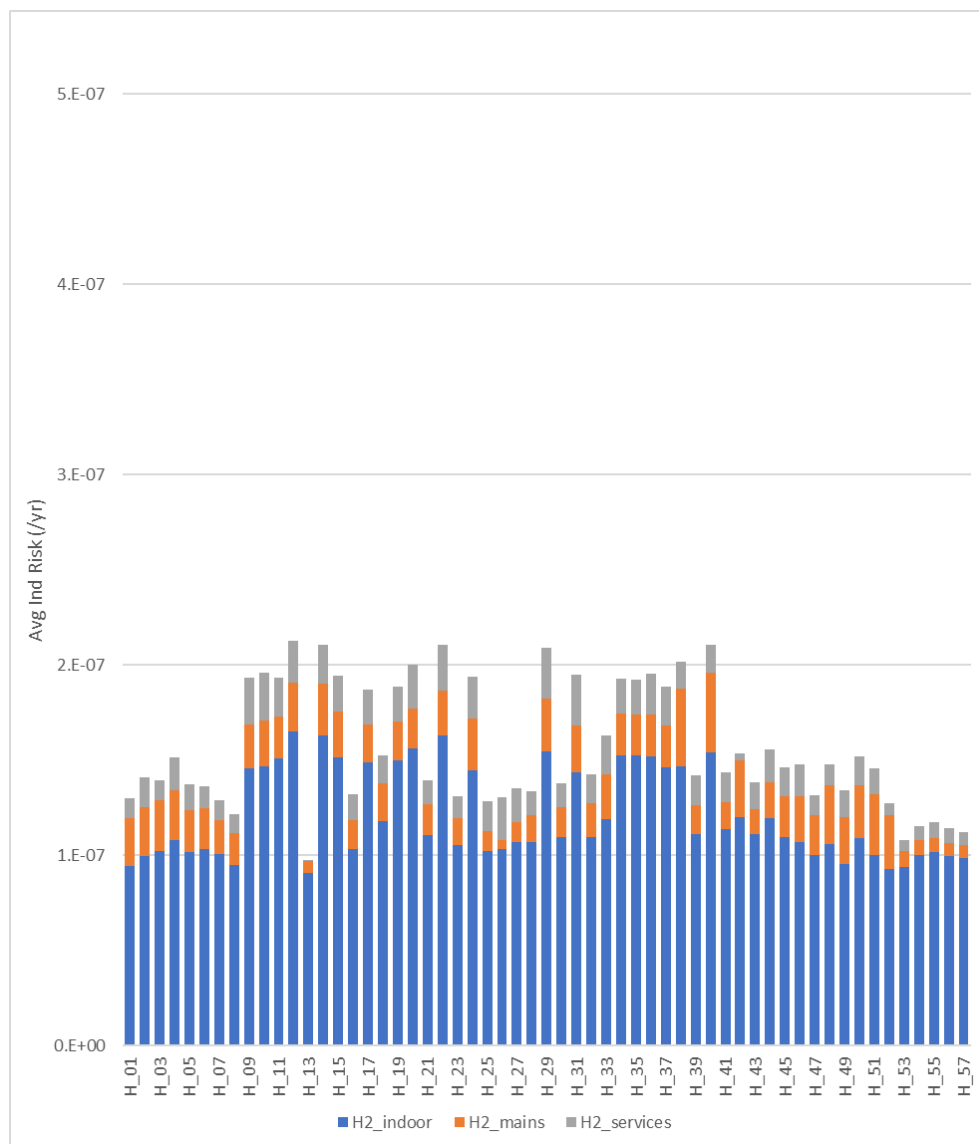


Figuur 33 Risico voor 1 woning (nummer 40) in de voorbeeldwijk. Van het totale risico ( $2 \times 10^{-7}$ ) is de relatieve bijdrage van de binneninstallatie en de onderdelen van het distributienet uitgesplitst.

Het totale individuele risico van woning nummer 40 ( $2 \times 10^{-7}$ ) bestaat voor bijna driekwart uit risico door een lek vanuit de binneninstallatie (73%). Het overige risico door een lek vanuit het distributienet bestaat voornamelijk uit de 100 mbar hoofdleidingen aan weerszijden van de woning, en de aansluitleiding naar de woning toe als ook naar nabijgelegen huizen. De bijdrage aan het risico van een lek in de 8 bar leiding is slechts 2% van het totaal.

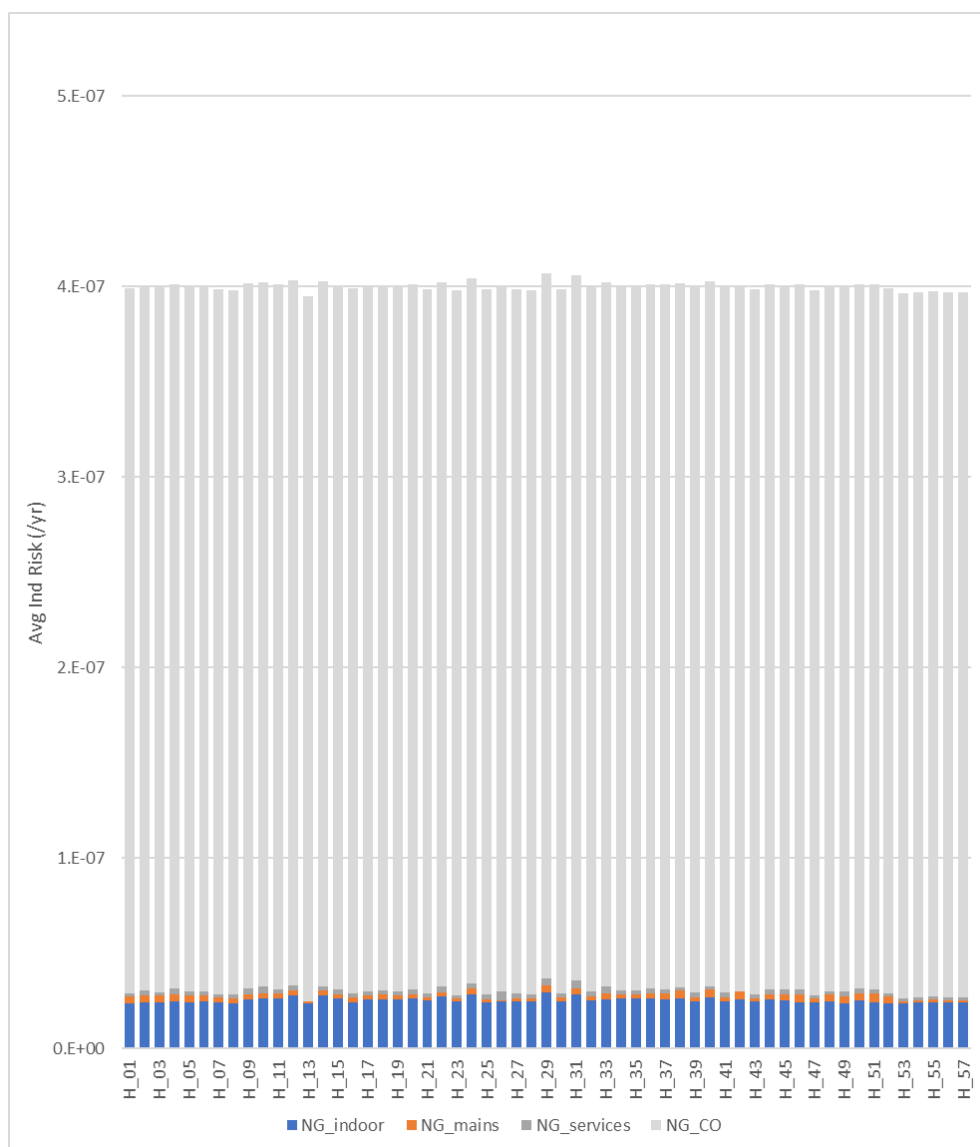
## 7.5 Verschil risico waterstof en aardgas

In Figuur 34 en Figuur 35 wordt respectievelijk voor waterstof en aardgas het totale individuele risico weergegeven. Per woning in de voorbeeldwijk wordt de bijdrage aan het totale risico weergegeven met een onderverdeling tussen risico door een lek vanuit de binneninstallatie, vanuit hoofdleidingen en vanuit aansluitleidingen. Voor aardgas wordt ook het risico op vergiftiging door koolmonoxide weergegeven. De schaal van beide figuren is gelijk om een goede vergelijking te kunnen maken.



Figuur 34 Individueel risico van waterstof per woning in de voorbeeldwijk

Een vergelijking van de risico's in woningen van waterstof ten opzichte van aardgas geeft een overeenkomend beeld als gevonden in Hoofdstukken 5 en 6, namelijk, het algehele verhoogde risico voor waterstof ten opzichte van aardgas door lekken vanuit zowel de binneninstallatie als vanuit het distributienet. Opvallend is ook voor waterstof de onderlinge verschillen in individueel risico tussen woningen. Voor aardgas zijn deze verschillen relatief gezien aanzienlijk kleiner. Dit komt door de sterke toename in risico door incidenten in nabijgelegen woningen en leidingen door het grotere effect van explosies voor waterstof. De 2-onder-1-kap woningen ondervinden daarom ook het grootste risico. Voor aardgas is het risico per woning bij lekken vanuit de binneninstallatie en het distributienet aanzienlijk stabielier zoals te zien in Figuur 35.

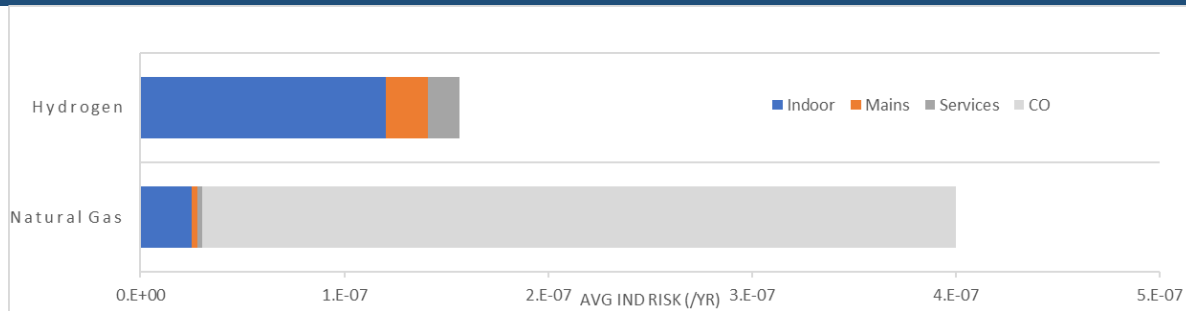


Figuur 35 Individueel risico van aardgas per woning in de voorbeeldwijk

Voor aardgas wordt ook het risico op koolmonoxidevergiftiging weergegeven (licht grijs), hetgeen niet aanwezig zal zijn bij waterstof. Ook al is het gecombineerde risico ontstaan door lekken in het distributienet en in de binneninstallatie groter, is hierdoor het totale risico voor waterstof voor elke woning een factor van ongeveer twee of meer lager. Door het toepassen van mitigerende maatregelen kan het vergrootte effect van de explosies bij waterstof naar beneden gebracht worden. Deze worden in het volgende hoofdstuk verder besproken.

Figuur 36 hieronder geeft een gemiddeld totaal individueel risico over de 57 woningen uit de voorbeeldwijk voor zowel waterstof als aardgas.





*Figuur 36 Gemiddeld locatiegebonden risico per woning in de voorbeeldwijk voor waterstof en aardgas*

## 8 Beheersmaatregelen

In dit hoofdstuk wordt de impact besproken van beheersmaatregelen op risiconiveau voor waterstof. Odorisatie van zowel aardgas als waterstof wordt standaard al meegenomen in de berekeningen van het QRA model. Als additionele beheersmaatregelen worden ventilatie van de woning, een gasstopper en een gassensor beschouwd in deze studie. Het verlagen van de faalfrequenties is echter ook een belangrijke beheersmaatregel. Dit kan worden bereikt door middel van bijvoorbeeld (periodieke) inspecties, het vervangen van materialen en het vernieuwen van apparaten. Het grootste effect kan bereikt worden door het verminderen van spontane lekken met name achter de meter.

De invloed van ventilatie van de woning op het risico is reeds berekend voor zowel een lek in de binneninstallatie als ook voor een lek vanuit het distributienet. Dit is besproken in hoofdstukken 5 en 6, beide voor aardgas en waterstof. In de voor deze studie gebruikte versie van het QRA-model was het nog niet mogelijk de effecten van een gasstopper of gassensor te modelleren voor de Nederlandse situatie. Gelijktijdig aan deze studie is in het VK de tweede fase van het H21 project uitgevoerd. In deze fase zijn de effecten van de gasstopper, gassensoren en andere mitigerende maatregelen geïmplementeerd in het model. De eerste inzichten van de effecten van beheersmaatregelen op de risico's voor de situatie in het VK worden in dit hoofdstuk besproken. De uitkomsten van H21 Phase 2, zijn op het moment van schrijven nog niet gepubliceerd. Op basis van deze inzichten wordt een eerste afchatting van de invloed op de risico's voor waterstof in de Nederlandse situatie.

Het ventileren van een woning als beheersmaatregel wordt in de volgende paragraaf besproken. De mogelijke effecten van gasstoppers en gassensoren worden in de daaropvolgende paragrafen besproken, op basis van eerste modelleringen uit het VK.

### 8.1 Ventilatie van de woning

Het verhogen van de ventilatie in een woning kan de mogelijkheid van het ontstaan van een ontvlambare gas-luchtmengsel bij een bepaalde lekkage wegnemen, of op zijn minst de concentratie beperken die kan worden bereikt. Bovendien wordt de tijd die nodig is om een ontvlambaar gas-luchtmengsel te bereiken, verlengd naarmate de ventilatiesnelheid toeneemt. De ventilatievoud van een woning heeft een sterk reducerend effect op het risico in een woning. Dit is aangetoond in QRA-studies zoals H21 en Hy4Heat en blijkt ook vanuit de analyses gedaan in hoofdstukken 5 en 6. Dit reducerende effect is sterker voor waterstof in vergelijking met aardgas. Het verhogen van de ventilatievoud in woningen is een daarom een belangrijke potentiële beheersmaatregel voor een distributiesysteem met waterstof. Het is echter mogelijk dat eventuele extra ventilatie wordt tenietgedaan door de bewoner die opzettelijk ventilatieopeningen afsluit en tocht voorkomt, om zo bijvoorbeeld de energiekosten voor het verwarmen van het huis te verlagen.

### 8.2 Gasstopper

Een gasstopper of Excess Flow Valve (EFV) is een apparaat geïnstalleerd op een gasleiding die de gastoevoer stopt boven een ingestelde waarde. Deze wordt gebruikt om vrije uitstroom van gas af te sluiten in geval van een lekkage of ongeval.

Meerdere onderzoeken uit het VK bevelen een ingesteld maximum debiet aan voor waterstof van 20 m<sup>3</sup>/uur, wat overeenkomt met 6 m<sup>3</sup>/uur voor aardgas. Dit komt ongeveer overeen met het maximale verbruik van alle huishoudelijke apparaten in een woning, een hoger debiet wordt vaak veroorzaakt door een lekkage. De door onderzoek aanbevolen waarden worden in het QRA-model gebruikt voor gasstoppers.

Bij de eerste berekeningen van de impact van een gasstopper op het risico voor waterstof in het VK zijn verschillende scenario's in het model benaderd:

- A. Benadering A bevat een gasstopper geïnstalleerd direct bij de meter die sluit bij een *lekkage* groter dan 20 m<sup>3</sup>/uur. De effecten van lekken in het distributienetwerk worden hierdoor niet beïnvloed. De impact van een gasstopper op het totale risico met deze benadering is een 14% reductie.
- B. Bij benadering B zit de gasstopper ook direct bij de meter, maar deze neemt nu mee dat het gebruikt van apparaten in huis de gasstopper sluitcondities beïnvloeden. De gasstopper sluit bij een debiet hoger dan 20 m<sup>3</sup>/uur, dat wil zeggen dat bijvoorbeeld bij een gezamenlijk verbruik van apparaten in een woning van 8 m<sup>3</sup>/uur, de gasstopper sluit bij een lek van 12 m<sup>3</sup>/uur. Om dit te benaderen in het model worden aannames gedaan met betrekking tot het moment en de omvang van het verbruik van apparaten. Het effect van deze benadering is een reductie van 21% op het totale risico.
- C. Benadering C gebruikt de aannames gedaan in B maar verplaatst de gasstopper van bij de meter naar de koppeling (zadel) tussen de hoofdleiding en de aansluitleiding. De gasstopper heeft hierdoor ook een effect op het risico door lekkages in aansluitleidingen. Het effect van deze benadering is een reductie van 25% op het totale risico. Dit komt overeen met een reductie van 4% ten opzichte van benadering B met dezelfde aannames maar andere locatie van de gasstopper.

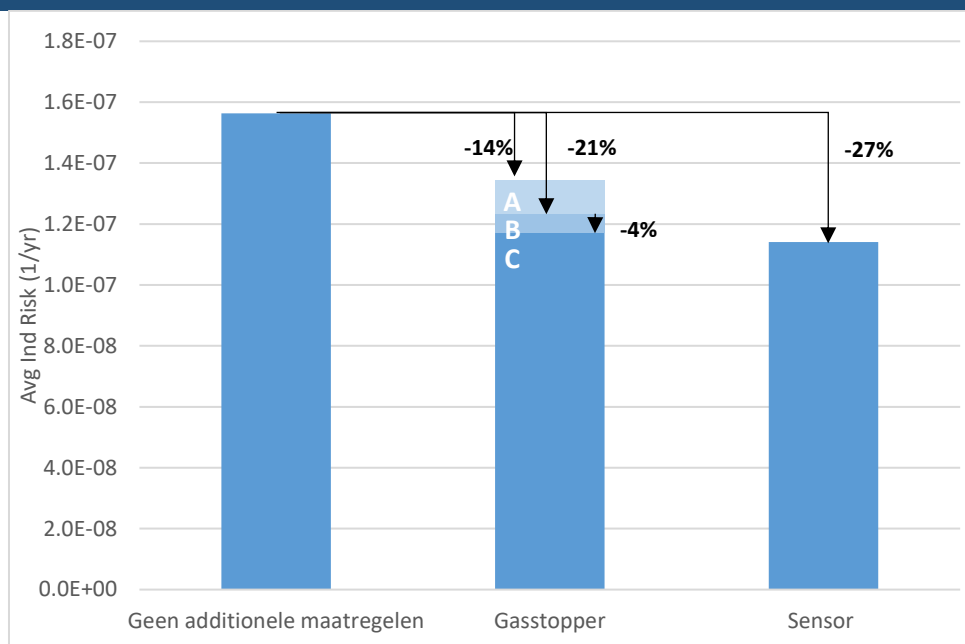
Op basis van de verschillende benaderingen in het model van een gasstopper kan grofweg een gemiddelde risicoreductie van 20% aangenomen worden.

### 8.3 Gassensor

Door een gassensor met akoestisch signaal in een woning te installeren kan een gaslek potentieel eerder worden gedetecteerd dan bij enkel odorisatie. Bijvoorbeeld als een lek 's nachts optreedt of doordat een geluidssignaal door burens eerder opgemerkt wordt. Ook geldt dit voor ruimtes met hoog risico op lekkage, of waar bewoners weinig of nooit aanwezig zijn, zoals de meterkast of kelders. Na alarmering wordt aangenomen dat de gastoevoer eerder afgesloten wordt en er meer geventileerd wordt, waardoor uiteindelijk de concentraties in de woning lager blijven en er minder explosies zullen optreden. Het effect van de sensoren wordt gemodelleerd door een hogere kans op detectie van een gegeven concentratie in de woning. De impact van gassensoren op het totale risico is een 27% reductie.

### 8.4 Inschatting effect gasstoppers en gassensoren in voorbeeldwijk

De effecten van de gasstoppers en gassensoren op basis van eerste modelleringen gebaseerd op de VK-situatie kunnen worden toegepast op het risico van waterstof van de voorbeeldwijk. Dit moet gezien worden als een eerste benadering. Verdere uitwerking en validatie van de specifieke Nederlandse situatie is nodig, maar toch kan deze benadering een eerste indruk geven van de mogelijke effecten van deze additionele beheersmaatregelen op het risico van waterstof.



Figuur 37 Eerste benadering van de mogelijke impact van additionele beheersmaatregelen<sup>7</sup>, op basis van VK-gegevens, toegepast op het risico van waterstof in de voorbeeldwijk.

Een gasstopper met benadering A heeft een geschat effect van 14% risicoreductie in vergelijking met de situatie zonder aanvullende mitigatiemaatregelen. Benadering B heeft een effect van 21% reductie. Het verplaatsen van de gasstopper van de meter naar de koppeling tussen de hoofd- en aansluitleiding (Benadering C met aannames Benadering B) heeft een extra effect van -4% op het risico. Door het verplaatsen van de gasstopper van bij de meter naar de koppeling tussen de hoofdleiding en aansluitleiding (verschil B en C) heeft een effect van -4% op het risico. Dit vermindert het risico in de woning dat ontstaat door een lek in een aansluitleiding naar deze woning. Een voordeel voor een gasstopper dicht bij de hoofdleiding is dat bij een woningbrand die niet veroorzaakt is door een gaslek het gas wordt afgesloten bij het falen van de binneninstallatie. Het plaatsen van een gasstopper bij de meter heeft als voordeel dat er niet gegraven hoeft te worden. Het plaatsen van een gassensor met akoestisch signaal in een woning heeft een geschat effect van 27% reductie op het risico voor waterstof.

Bij een combinatie van gasstoppers met sensoren vermindert het risico niet evenredig aan de losstaande maatregelen. Dit komt omdat een deel van de lekkages al voorkomen wordt door de ene maatregel voordat de ander kan ingrijpen.

<sup>7</sup> Odorisatie zit standaard in het model. Met 'additionele maatregelen' wordt bedoeld ten opzichte van odorisatie.

## 9 Discussie en conclusie

Om een eerste inschatting te kunnen maken van de risico's van waterstof in het Nederlandse distributienet, is een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) uitgevoerd. 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 een dergelijke 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.

Het risicomodel is een aaneenschakeling van een aantal modules die respectievelijk de kans op falen van componenten, de verspreiding van gas, de kans op ontsteking en de gevolgen daarvan doorrekenen. De uitkomst van het model is uiteindelijk plaatsgebonden risico (average individual risk). Tussenuitkomsten van de verschillende modules geven daarnaast inzicht in bijvoorbeeld het aantal keer dat een bepaalde concentratie gas in een woning wordt bereikt. Zowel de tussenuitkomsten als de berekende plaatsgebonden risico's zijn gebruikt ter validatie van het model voor aardgas. Het model is gesplitst in een deel met lekkages achter de meter (de binneninstallatie) en een deel met lekkages in het distributienet.

Het model versimpelt de gebouwde omgeving in Nederland om daarmee het aantal te variëren parameters en bijbehorende berekeningen in de hand te houden. Er is voor gekozen om in deze eerste versie met vrijstaande huizen te rekenen voor de validatie van het model. In de Voorbeeld Wijk studie zijn daarnaast ook 2-onder-1-kap woningen gebruikt. Het distributienet is versimpeld door gebruik te maken van een beperkt aantal materialen (PE, slagvast PVC, PVC en staal), drukken (0.03-0.1-1-4-8 bar) en diameters (63 – 110 – 160 – 315mm).

Een belangrijke inputparameter van het model is de faalkans van de verschillende onderdelen. Voor het distributienet zijn de faalkansen bepaald aan de hand van historische storingsmeldingen zoals die opgenomen worden in het Nestor-systeem. Aan de hand van deze storingen en de verdeling van lengte van het leidingen met verschillende drukken, materialen en diameter is een faalfrequentie per kilometer bepaald. Voor de componenten achter de meter (meteropstelling, binnenleidingwerk en eindgebruikerstoestel) is geen betrouwbare dataset voor Nederland gevonden en is ervoor gekozen om de waarden uit het VK te gebruiken.

Gegeven de benadering van de werkelijkheid op basis van hiervoor genoemde aannames levert het model een benadering van het plaatsgebonden risico ten gevolge van een brand of explosie. In het Besluit kwaliteit leefomgeving is een grenswaarde voor het plaatsgebonden risico opgenomen van ten hoogste één op de miljoen per jaar ( $1 \times 10^{-6}$ /jaar) voor (zeer) kwetsbare gebouwen en kwetsbare locaties<sup>8</sup>. In het omgevingsplan moet deze grenswaarde in acht worden genomen. Dit betekent dat mensen in (zeer) kwetsbare gebouwen, zoals woningen, scholen en ziekenhuizen en op kwetsbare locaties, zoals grote recreatieterreinen, niet aan een plaatsgebonden risico van meer dan één op de miljoen per jaar mogen worden blootgesteld. (Zeer) kwetsbare gebouwen en kwetsbare locaties mogen daarom niet binnen de plaatsgebonden risico- $10^{-6}$ -contour van een activiteit worden gerealiseerd. De risico's die in deze studie berekend zijn, op basis van de aannames, vallen voor zowel waterstof als aardgas binnen de  $10^{-6}$  contour.

<sup>8</sup> Zie: <https://www.rivm.nl/omgevingsveiligheid/handboek/toelichtingen-kernbegrippen/afstanden-en-gebieden>

## 9.1 Risico achter de meter

Op basis van hierboven besproken faalfrequenties in de woning, blijkt dat **het plaatsgebonden risico voor aardgas door lekkages achter de meter goed overeenkomt met de (beperkte) praktijkdata**. De kans op een dodelijk slachtoffer in Nederland ten gevolge van een explosie of brand per woning is op basis van de praktijk  $0.06 \times 10^{-6}$ , exclusief gevallen waarbij sprake was van opzet. Daarnaast is de kans op verwondingen  $1.1 \times 10^{-6}$ . Het model geeft respectievelijk  $0.02 \times 10^{-6}$  voor dodelijke slachtoffers en  $0.4 \times 10^{-6}$  voor gewonden en levert daarmee dezelfde orde van grootte als de praktijk. Het risico blijkt lineair te schalen met de faalfrequentie.

Bij dezelfde set aan parameters en zonder additionele maatregelen, blijkt dat het effect van de explosies bij waterstof heftiger is dan bij aardgas en dat het totaal aantal explosies een factor 2 hoger ligt dan bij aardgas. De explosies met hogere overdrukken vaker voorkomen bij waterstof in vergelijking met aardgas. Als gevolg van deze grotere overdrukken is ook het aantal verwondingen en dodelijke slachtoffers hoger bij waterstof. Rekening houdend met de aanwezigheid van personen in de woning, is **het plaatsgebonden risico bij waterstof een factor 3.8 groter:  $0.18 \times 10^{-6}$ , indien het koolmonoxidevergiftiging risico buiten beschouwing wordt gelaten**. Bij een vergelijking van het risico tussen waterstof en aardgas in de woning zal ook de risico ten gevolge van koolmonoxidevergiftiging meegenomen moeten worden. Het risico op overlijden ten gevolge van CO is  $0.37 \times 10^{-6}$  per aardgasaansluiting. Als dit risico meegenomen wordt in de vergelijking, blijkt dat er een verschuiving optreedt van het verminderde risico door CO vergiftiging en een verhoogd risico vanuit explosies. **Het totale plaatsgebonden risico is bij de gekozen set van aannames en zonder aanvullende maatregelen bij waterstof daarbij lager dan voor aardgas**. In beide gevallen is het plaatsgebonden risico overigens ver onder de  $1 \times 10^{-6}$  waarde en daarmee een zeer beperkt risico.

Het effect van ventilatie op de opbouw van (gevaarlijke) concentraties in de woning is bepaald door een tiental identieke woningen met een verschillende ventilatievoud door te rekenen. Bij waterstof levert een halvering van de ventilatievoud een verhoging van het risico met een factor 1.8 op, terwijl een verdubbeling van de ventilatie een verlaging van het risico met een factor 2.2 oplevert. Bij zowel aardgas als waterstof levert een verhoging van de ventilatievoud ongeveer gelijke verlaging op van de kans op een concentratie boven de LFL. Omdat bij waterstof de effecten van een mogelijke explosie groter zijn, neemt het risico sterker af. De verhouding tussen het risico van aardgas en waterstof wordt daarom kleiner met toenemende ventilatie en juist groter als de ventilatievoud verder afneemt. **Ventilatie heeft een sterker effect op het risico in de woning bij waterstof**. In het praktijkonderzoek binnen dit Hydelta werkpakket wordt de concentratieopbouw bij verschillende ventilatievouden bepaald en wordt aangetoond dat bij voorkomende ventilatievouden in woningen de concentratieopbouw bij kleine lekken zeer beperkt blijft (ver onder de 10vol%).

## 9.2 Risico vanuit het distributienet

In tegenstelling tot het doen van een kwantitatieve risicoanalyse op een object, zoals een lekkage in de binneninstallatie van een woning, is het maken van een analyse van het gehele distributienet een stuk complexer. Gezien de omvang van de berekeningen is het ondoenlijk om het hele distributienet en alle aangesloten woningen direct door te rekenen. Om toch een uitspraak te kunnen doen is het distributiesysteem opgeknipt in typische configuraties. Zo kan bijvoorbeeld het risico van een hoofdleiding met een gegeven druk, diameter en materiaaleigenschappen op een woning op een vastgestelde afstand bepaald worden. Door een aantal berekeningen te doen waarbij elk van de parameters (druk, diameter, materiaal) gevarieerd worden kan een database met bijdragen aan het totale risico worden opgebouwd. Het totale risico wordt uitgedrukt in een Potential Loss of Life (PLL).

Leidingen met hogere drukken (>1 bar) leveren een wat groter risico, maar door het vaker voorkomen van lage druk netten is de bijdrage daarvan aan het totale risico groter. Het berekende totale risico voor aardgas in termen van PLL is 0.64 per jaar. Dit wordt beschouwd als in redelijke overeenkomst met de praktijkdata (~0.3 op basis van een heel beperkt aantal incidenten).

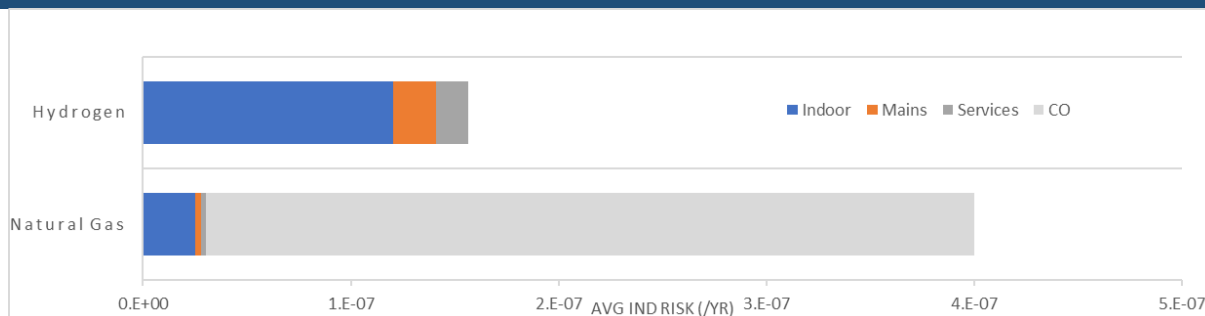
**De factor tussen het totale risico vanuit het distributienet zonder additionele maatregelen voor waterstof en aardgas is bijna 2.5x.** Op basis van de aannames gemaakt in het model en gemiddeld per aansluiting (7.2 miljoen) is het risico vanuit het distributienet in de woning ongeveer  $0.2 \times 10^{-6}$  voor waterstof, uitgaand dat er geen additionele mitigerende maatregelen getroffen worden. Ook hier geldt weer dat het risico lineair schaalbaar is met de faalfrequentie. De grootste bijdrage tot het risico ligt bij de 100mbar PE leidingen. In het model zijn alle aansluitleidingen van PE, waardoor deze druk- en materiaalcombinatie een grote bijdrage levert aan het totale risico. Als door inspecties daarbij de faalkans voor spontane lekken gereduceerd kan worden, zal het risico met eenzelfde factor verlaagd worden.

Daarnaast is het effect van ventilatie doorgerekend. De ventilatievoud lijkt vooral invloed te hebben op de effecten van explosies. Dit effect is bij waterstof veel groter. **Bij een verdubbeling van de ventilatievoud verlaagt het totale risico van waterstof met een PLL van 0.51 per jaar, bij aardgas slechts 0.08 per jaar.** Als de verdeling van het risico naar de oorzaak van de lekkage wordt gemaakt, blijkt dat met name de spontaan gevormde lekken een lagere bijdrage hebben: van een PLL van 1.0 naar 0.5 /jaar.

### 9.3 Risico in de voorbeeldwijk

Om een beter inzicht te krijgen in de relatieve effecten van de lekkages achter de meter en vanuit het distributienet is een representatieve voorbeeldwijk doorgerekend. Deze wijk bestaat uit 57 woningen verbonden zijn aan een 100mbar hoofdleiding middels aansluitleidingen. Het 100mbar net wordt gevoed door een stalen 8 bar leiding die door de wijk loopt. Het 100 mbar net is gemodelleerd in een aantal segmenten met verschillende materialen (PVC en PE) en diameters (110 en 160mm). De woningen zijn gemodelleerd op basis van hun oppervlak en bestaan zowel uit vrijstaande woningen als 2-onder-1-kap woningen. Daarnaast is voor elk van de woningen ook het risico door lekkages achter de meter bepaald.

De kans op lekkages die leiden tot ophoping van gas in een woning is groter voor lekkages achter de meter. **Voor waterstof blijkt het grootste deel van het plaatsgebonden risico veroorzaakt te worden door lekkages achter de meter (ongeveer 73%). Het overige deel wordt veroorzaakt door de hoofdleiding en aansluitleiding waarop de woning is aangesloten, maar ook nabijgelegen hoofdleiding delen geven een risico.** Over het algemeen is de bijdrage van de 100mbar leiding groter dan van de 8 bar leiding, uiteraard afhankelijk van de afstand tussen de woningen en deze leidingen. De risico's zijn het grootst bij 2-onder-1-kap woningen vergeleken met de vrijstaande woningen. Bij waterstof is, net als bij de hiervoor beschreven risico's, het effect van explosies groter dan van aardgas. Echter het totale risico is gemiddeld per woning in de wijk bij waterstof kleiner dan het risico van aardgas als de bijdrage van CO vergiftiging meegenomen wordt, zoals blijkt uit onderstaand overzicht. **Ook hier geldt dat het totale risico, zelfs zonder additionele maatregelen, ver onder de  $1 \times 10^{-6}$  blijft in beide gevallen en er dus over een relatief klein risico gesproken wordt.**



Figuur 38 Gemiddeld locatiegebonden risico per woning in de voorbeeldwijk voor waterstof en aardgas

Samenvattend wordt geconcludeerd dat de risico's zoals berekend in het model relatief klein zijn. In perspectief was het aantal dodelijke ongevallen<sup>9</sup> in Nederland in 2021 ongeveer 6500. Het grootste aandeel daarvan had als oorzaak een accidentele val (5430 overeenkomend met een risico per inwoner van ongeveer  $3 \times 10^{-4}$ /jaar) gevolgd door vervoersongevallen (608 overeenkomend met een risico van  $3 \times 10^{-5}$ ). Het totaal van dodelijke ongevallen door rook, vuur en vlammen<sup>10</sup> was in 2017 43, overeenkomend met een risico van  $2 \times 10^{-6}$ .

#### 9.4 Effectieve maatregelen

Zonder additionele maatregelen blijkt het risico-aandeel door explosies bij waterstof groter te zijn dan bij aardgas. In deze berekening is uitgegaan van eenzelfde faalfrequentie tussen aardgas en waterstof op basis van historische storingsdata. Het risico bij waterstof kan verlaagd worden door de lagere faalfrequenties te realiseren. Het blijkt dat vooral spontane lekken in veel voorkomende delen van het net (100 mbar) bijdragen aan het totale risico. Interferentie schade wordt eerder opgemerkt en leidt daardoor minder vaak tot ophoping van gas tot gevaarlijke concentraties in gesloten ruimtes. Het grootste effect kan daarbij gerealiseerd worden door **mitigerende maatregelen die zorgen voor minder spontaan falen van de leidingen en componenten**, zoals periodiek lekzoeken of het vervangen van koppelingen die vaak tot lekkages leiden.

Een andere maatregel die onderzocht is, is het effect van ventilatie. Bij lekken zowel in de woning als vanuit het net naar de woning toe blijkt dat bij **een verhoging van de ventilatievoud het risico bij waterstof sterk verlaagd wordt**. Anderzijds is het ook zo dat het risico sterk toeneemt als de ventilatievoud in de woning verlaagd wordt. Het verdient dus de aanbeveling om ruimtes waarin waterstof zou kunnen ophopen goed te ventileren. Daarnaast dient het besef aanwezig te zijn bij bewoners en hulpdiensten dat bij het opmerken van een gaslucht (geodoriseerd waterstof), zo snel mogelijk de gastoevoer gesloten dient te worden en de woning geventileerd dient te worden. Op deze manier kan voorkomen worden dat gevaarlijke concentraties waterstof opgebouwd worden die uiteindelijk leiden tot gevaarlijke explosies.

Er is een eerste benadering gedaan van de impact van gasstoppers en gassensoren toegepast op het risico van waterstof in de voorbeeldwijk. Dit is gebaseerd op (nog) niet gepubliceerde eerste berekeningen geldend voor de VK-situatie. De benadering toont aan dat gasstoppers, afhankelijk van de aannames in het model, een mogelijke reductie van het risico voor waterstof van ongeveer 20% kunnen realiseren. Bij gassensoren is deze mogelijke reductie ongeveer 27%.

<sup>9</sup> [https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/7052\\_95/table?ts=1683028703713](https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/7052_95/table?ts=1683028703713) (2021: 17.5 miljoen inwoners)

<sup>10</sup> <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/81452NED/table?ts=1683029694112> (data voor latere jaren niet gevonden; 2014: 17.1 miljoen inwoners)



## 9.5 Aanbevelingen

De resultaten beschreven in dit rapport zijn verkregen binnen de set met aannames zoals die beschreven zijn. In dit versimpelde model van het distributienet en de gebouwde omgeving zijn meerdere verfijningen van het model mogelijk. Op basis van de uitkomsten worden onderstaande punten ter verbetering van het model aanbevolen:

- **Grotere variatie in type woningen.** In het model is voornamelijk gebruik gemaakt van vrijstaande woningen. In de voorbeeldwijk zijn enkele 2-onder-1-kap woningen gesimuleerd. Het effect van explosies wordt in het model doorgerekend voor nabijgelegen woningen. Daarmee is het risico in 2-onder-1-kap woningen groter. In een verfijnd model zou een verdeling van de woning typen (vrijstaand / 2-onder-1-kap / rijtjes / kleine appartementen etc.) toegepast moeten worden. Dit leidt wel tot een (veel) groter aantal benodigde individuele simulaties en daarmee langere rekentijd voor de berekeningen. Een eerste run van het model voor lekkages uit het distributienet naar vrijstaande woningen met een kruipruimte is uitgevoerd. Deze variatie leidde tot een verhoging van het risico voor zowel waterstof (+28%) als aardgas (+40%). Een nadere analyse en bepaling van het effect bij lekkages achter de meter is aan te bevelen.
- **Onderzoek naar lekgrootte verdelingen.** Een van de gebruikte aannames, momenteel limitatie van het model, is dat de PVC-leidingen dezelfde lekgrootte verdeling hebben als PE leidingen. In de praktijk zou dit anders kunnen zijn. Hard PVC heeft een broos karakter en kan mogelijk meer tot brosse breuken leiden. Dit resulteert in een andere lekgrootte verdeling, die daarmee invloed heeft op het berekende risico. Nader onderzoek naar de lekgrootte verdeling wordt aanbevolen.
- **Effect van gasstopper en gassensoren (specifiek voor NL situatie).** In de versie van het model gebruikt voor deze studie was het nog niet mogelijk om het effect van de gasstopper en gassensoren te modeleren. Gelijktijdig aan deze studie is in het VK de tweede fase van het H21 project uitgevoerd. In deze fase zijn de effecten van de gasstopper, gassensoren en andere mitigerende maatregelen geïmplementeerd in het model. De gasstopper beperkt de uitstroom van gas bij overschrijding van een ingesteld debiet (20 m<sup>3</sup>/hr). Het effect van de sensoren wordt gemodelleerd door een hogere kans op detectie van een gegeven concentratie in de woning (bijvoorbeeld als deze 's nachts optreedt of doordat een geluidssignaal door burens eerder opgemerkt wordt). Na alarmering wordt aangenomen dat de gastoevoer eerder afgesloten wordt en er meer geventileerd wordt, waardoor uiteindelijk de concentraties in de woning lager blijven en er minder explosies zullen optreden. De uitkomsten van H21 Phase 2, zijn op het moment van schrijven nog niet gepubliceerd. In hoofdstuk 8 is een eerste afschatting gemaakt van de impact van de gasstopper en gassensor op basis van de uitkomsten in het VK en toegepast voor de risico's van waterstof in de voorbeeldwijk. Het verdient de aanbeveling om het model voor Nederland uit te breiden met het doorrekenen van deze maatregelen.

## 10 Referenties

- [1] KIWA, DNV, „Hydelta D1a\_1 Uitkomsten onderzoeken Verenigd Koninkrijk Hy4Heat en H21 vertaald naar Nederlandse situatie,” 2022.
- [2] DNV, „H21, QRA model for hydrogen gas distribution networks,” DNV report 10078380-2 Rev 0, 2020.
- [3] DNV, „H21, Risk predictions for hydrogen gas distribution networks,” DNV report 10078380-2 Rev 0, 2020.
- [4] M. Acton, A. Halford en A. Phillips, „Quantification of the Risks Associated with a Hydrogen Gas Distribution Network,” in *Hazards 30 (paper accepted)*, Manchester, November 2021.