

HyDelta 3

WP5a – QRA and Purging

D5a.1 – QRA waterstof in de gebouwde omgeving – effect van mitigerende maatregelen

Status: Final

Document samenvatting

Corresponderende auteur

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

Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzigingen
1	04-9-2024	Albert van den Noort	DNV	1e Draft
2	07-10-2024	Albert van den Noort	DNV	verwerking commentaar EAG
3	15-11-2024	Albert van den Noort	DNV	Verwerking commentaar extended EAG
4	27-11-2024	Albert van den Noort	DNV	Verwerking commentaar EAG op v3. Versie voor review Supervisory group
5	20-12-2024	Albert van den Noort	DNV	Final

Verspreidingsniveau

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

Document review

Partner	Naam
DNV	Johan Knijp, Harm Vlap
EAG	Raymond van Hooijdonk (Enexis), Peter Verstegen (Alliander)
EAG – extended	Alliander: Bart Vogelzang, Rob Nispeling, Pascal te Morsche, Joyce Wiersma Enexis: Gido Brouns, Wim de Rooij Stedin: Jan Scheepstra
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC	HyDelta Supervisory Group

Tag voor website (kies één):

Technology and Safety

- Activities (e.g. maintenance, purging etc.)
- Assets
- Digitalisation
- End use
- Gas network
- QRA

Social aspects

- Conversion (of the distribution network)
- Education

Social

System and Economy

- Business Development
- Production and supply
- Value chains

Gas Quality

- Admixing
- Gas Quality
- Odourisation

Samenvatting

Om de risico's van het gebruik van waterstof in distributie- en transportnetwerken te kunnen beoordelen in vergelijking met aardgas, is het essentieel om de verschillen in kans en gevolg te begrijpen. Binnen het HyDelta-programma is hiervoor het werkpakket 'Waterstof en Veiligheid' opgezet, met als hoofddoelstelling:

Het in kaart brengen van risico's met betrekking tot het gedrag van waterstof bij lekkages in woningen en in het distributienet, en op basis van deze risico's beheersmaatregelen definiëren.

Hiertoe is een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) uitgevoerd. Deze analyse vergelijkt de risico's tussen het huidige aardgasdistributiesysteem en het mogelijke toekomstige waterstofdistributiesysteem en vergelijkt deze ook met andere risico's in onze samenleving. De totale risicobeoordeling omvat risico's die ontstaan door lekken in het distributienet en door lekken in woningen. Gegeven de benadering van de werkelijkheid levert het model het plaatsgebonden risico ten gevolge van een brand of explosie. De resultaten van deze analyse geven een kwantitatieve basis om te beoordelen of de waterstofdistributie meer risico voor de maatschappij met zich meebrengt en welke maatregelen het meeste effect hebben om deze risico's te beperken.

Risico's zijn klein, maar wat is klein?

De plaatsgebonden risico's van waterstof en aardgas in distributienetten zijn klein en blijven ver onder de aanvaardbare 1×10^{-6} contour per jaar. De perceptie van risico's kan echter variëren bij het publiek, afhankelijk van emotionele, normatieve en informatiegerelateerde factoren. Het is belangrijk dat risicobeoordelingen niet alleen met cijfers, maar ook via begrijpelijke methoden of vergelijk met andere risico's worden gepresenteerd om het publiek juist te informeren en te betrekken bij de besluitvorming, zonder overdreven of misleidende informatie.

De berekende risico's voor het gebruik van waterstof in de voorbeeldwijk in het referentie scenario zonder aanvullende risicoverlagende maatregelen is $\sim 0.2 \times 10^{-6}$ /jaar. Bij de meest effectieve risicobeperkende maatregel in deze studie, wordt dit risico verlaagd tot $\sim 0.05 \times 10^{-6}$ /jaar is. De grootte van deze risico's ligt in dezelfde orde als het aantal slachtoffers van blikseminslag in de afgelopen jaren. De koolmonoxidevergiftiging slachtoffers zijn een factor twee groter ten opzichte van de referentie situatie (0.4×10^{-6} /jaar). Jaarlijks komen er ongeveer 10x zoveel mensen om door branden in gebouwen (2×10^{-6} /jaar) of 25x zoveel door accidentele verdrinking (5×10^{-6} /jaar). De wegverkeersslachtoffers liggen ongeveer 250x zo hoog (50×10^{-6} /jaar). Vergelijk met andere oorzaken van overlijden is het risico van waterstof (en aardgas) in de gebouwde omgeving dus erg klein¹.

Ook al zijn de risico's gering, de perceptie ervan kan door initiële incidenten snel veranderen. Het is daarom van belang om bij de introductie van nieuwe technologie, zoals bijvoorbeeld waterstof in de gebouwde omgeving in pilotprojecten, gedegen te werk te gaan. Bij nieuwe technologie is immers nog geen statistiek opgebouwd over het falen van deze technologie, wat kan leiden tot ongelukken. Door bij de introductie een groot aantal extra veiligheidsmaatregelen te implementeren, kan bij het grote publiek echter ook de perceptie ontstaan dat de nieuwe technologie inherent onveilig is. Het is daarom belangrijk om gevoel te krijgen bij de grootte van de risico's en bijdrage van verschillende maatregelen in de reductie van dit risico.

¹ Een andere manier om gevoel bij een risico van 2×10^{-7} te geven: de kans is ongeveer even groot als de kans om 22x achter elkaar kop te gooien met een munt.

Een simulatie van de risico's voor een voorbeeldwijk geeft inzicht

Om een beter inzicht te krijgen in de relatieve effecten van de lekkages achter de meter en vanuit het distributienet is in deze studie een representatieve voorbeeldwijk doorgerekend. Deze wijk bestaat uit 57 woningen die verbonden zijn aan een 100 mbar hoofdleiding middels aansluitleidingen. Het 100 mbar net wordt gevoed door een stalen 8 bar leiding die door de wijk loopt. De woningen zijn gemodelleerd op basis van hun oppervlak en bestaan zowel uit vrijstaande woningen als twee-onder-één-kapwoningen. Daarnaast is voor elk van de woningen ook het risico door lekkages achter de meter bepaald. Op basis van faalfrequenties in de woning, blijkt dat het plaatsgebonden risico voor aardgas door lekkages achter de meter goed overeenkomt met de (beperkte) praktijkdata.

Uit de analyse blijkt dat het plaatsgebonden risico voor waterstof groter is dan voor aardgas door heftigere explosies, maar kleiner als het risico door koolmonoxidevergiftiging wordt meegenomen. Koolmonoxidevergiftiging is een veelvoorkomend gevolg van onvolledige verbranding van aardgas, maar komt niet voor bij waterstof door de afwezigheid van koolstof. 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.

Verschillende mitigerende maatregelen mogelijk met verschillend effect

In de studie zijn een aantal maatregelen doorgerekend. Deze maatregelen kunnen effect hebben op de kans van optreden van een lek, bijvoorbeeld door regelmatige inspectie van de leidingen en apparatuur, of het beperken van de gevolgen van een lekkage. Voor de regelmatige inspectie is onderscheid gemaakt in een jaarlijkse check van de installatie, waarbij een reductie van de kans op spontane lekkage van 20% wordt aangenomen, en een automatische dagelijkse inspectie met een reductie van 80% van de kans op spontane lekkage. Voor het beperken van de gevolgen van een lekkage valt te denken aan gasstoppers, sensoren al dan niet gekoppeld aan een automatische afsluiter van de toevoer of het verhogen van de ventilatie.

Bij het modeleren van de maatregelen wordt aangenomen dat alle maatregelen 100% effectief zijn. Dat wil bijvoorbeeld zeggen dat elke gasstopper altijd dicht valt bij een overschrijding van de maximale flow en dat elke concentratie boven de grenswaarde gedetecteerd wordt door de sensor op de plek waar deze opgehangen is. Voor het realiseren van de genoemde maatregelen in de praktijk dient echter wel rekening gehouden te worden met een onzekerheid in deze effectiviteit. Enkele maatregelen liggen in het domein van de netbeheerders, zoals de gasstopper, veel van de andere maatregelen zullen in de woning geplaatst worden en zijn daarmee de verantwoordelijkheid van de huiseigenaar. Dit betekent dat naast de geschatte reductie op het risico, de maatregelen elk ook hun eigen voor- en nadelen hebben. In onderstaande tabel worden deze voor- en nadelen per maatregel opgesomd.

Maatregel	Risicoreductie (% t.o.v. referentiewaarde)	Voordelen	Nadelen
Verdubbelen ventilatie woning	54%	- Effectieve maatregel	- Lage controleerbaarheid - Vergroot warmtevraag
Jaarlijkse inspectie uitvoeren	19%	- Beperkte impact voor de woning - Kan gecombineerd worden met ketel inspectie	- Beperkt effect - Vergt veel inspecties (personeel; hoge kosten) - Regelgeving aanpassen voor toegangsmogelijkheden

Automatische inspectie installeren	51%	<ul style="list-style-type: none"> - Effectieve maatregel - Beperkte impact voor de woning 	<ul style="list-style-type: none"> - Storingsgevoeligheid en betrouwbaarheid moeten aangetoond worden
Gasstopper plaatsen bij de gas meter(20m ³ /uur)	20%	<ul style="list-style-type: none"> - Beperkte impact voor de woning, niet zichtbaar - Goedkope oplossing - Ook effect bij opzettelijke lekkages 	<ul style="list-style-type: none"> - Beperkt effect - Nog geen standaard oplossing
Gasstopper plaatsen op het zadel	22.5%	<ul style="list-style-type: none"> - Beperkte impact voor de woning, niet zichtbaar - Ook effect bij opzettelijke lekkages en lekkages in de aansluitleiding tot de meter. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gering extra effect t.o.v. gasstopper bij de meter - Duurdere, arbeidsintensieve oplossing
Gassensor met alarm in de woning plaatsen	31%	<ul style="list-style-type: none"> - Goedkope, algemeen geaccepteerde oplossing 	<ul style="list-style-type: none"> - Beperkt effect - Bewoner verantwoordelijk (batterijen vervangen etc.)
Gassensor + automatische afsluiter in de woning plaatsen	77%	<ul style="list-style-type: none"> - Zeer effectief 	<ul style="list-style-type: none"> - Conceptueel, nog niet op de markt. Storingsgevoeligheid en betrouwbaarheid moet aangetoond worden - Privacy issues (op afstand kunnen afsluiten)

Tenslotte wordt opgemerkt dat het doel van deze studie was een kwantitatieve basis te bieden voor de risico's van waterstof in de gebouwde omgeving en het effect van mitigerende maatregelen daarop te verkennen. Het doel is niet om mitigerende maatregelen op te leggen. Elk van de extra maatregelen zal extra kosten vergen. Daarom zullen de beschreven voor- en nadelen van de individuele maatregelen per situatie afgewogen moeten worden. Daarnaast is het van belang om de komende periode in de pilotprojecten ervaring op te doen met waterstof als energiedrager voor de gebouwde omgeving en de effectiviteit van maatregelen verder te onderzoeken.

Inhoud

Document samenvatting	2
Samenvatting.....	3
1 Inleiding	8
1.1 Randvoorwaarden van het model	9
1.2 In dit rapport	10
2 QRA model.....	11
2.1 CONIFER	11
2.2 Lekkages in het gasdistributienet	11
2.3 Lekkages achter de meter	12
2.4 Implementatie van mitigerende maatregelen.....	12
2.4.1 Ventilatie	12
2.4.2 Verhoogde inspectie.....	12
2.4.3 Gasstopper.....	14
2.4.4 Gasdetectie door sensoren.....	15
2.5 Validatie van het model voor aardgas	16
3 Samenvatting uitkomsten voorbeeldwijk	18
3.1 Voorbeeldwijk in het QRA-model	18
3.2 Risico waterstof vanuit een lek in het distributienet.....	19
3.3 Risico waterstof vanuit een lek in de binneninstallatie	21
3.4 Totale risico voorbeeldwijk.....	22
3.5 Verschil risico waterstof en aardgas	22
4 Effect beheersmaatregelen	24
4.1 Ventilatie van de woning	24
4.2 Verhoogde inspectiefrequentie van de binneninstallatie	25
4.3 Gasstopper	25
4.4 Gasdetectie	27
4.5 Gecombineerd effect van maatregelen	28
5 Effect van andere woningtypen	31
5.1 Woningtypen.....	31
5.2 Voorbeeldwijk met rijtjeshuizen en appartementenblokken.....	31
6 Risicoperceptie	35
6.1 Kwantitatief risicoanalyse versus risicoperceptie.....	35
6.2 Vergelijk risico waterstof met andere risico's.....	36
7 Conclusie	38

8	Referenties	43
---	-------------------	----

1 Inleiding

Waterstof kan worden ingezet als schoon alternatief voor aardgas, zowel voor verwarming en warmtapwaterbereiding voor huishoudens, als voor het leveren van energie aan bedrijven. Om waterstof op een veilige en efficiënte manier in te passen in de bestaande infrastructuur, is het cruciaal om de bijbehorende risico's goed in kaart te brengen en te beheersen.

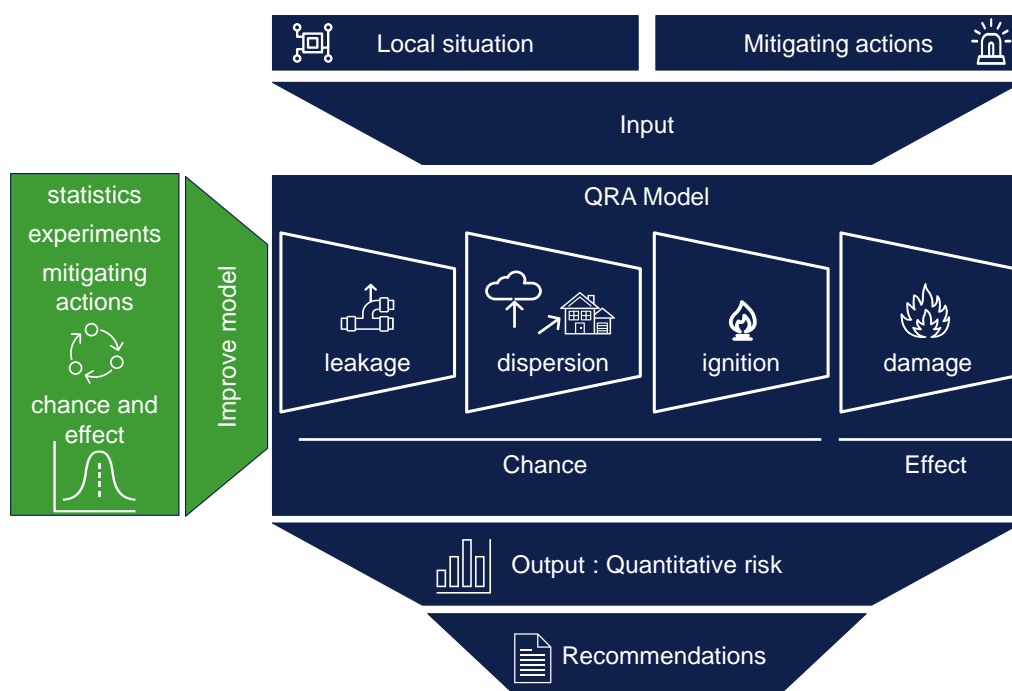
In het HyDelta programma is daartoe het werkpakket 'Waterstof en Veiligheid' gedefinieerd waarin de hoofddoelstelling als volgt geformuleerd is:

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 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. Deze analyse biedt een solide basis om te beoordelen of waterstof meer risico met zich meebrengt voor de maatschappij en welke maatregelen het meest effectief zijn om deze risico's te verkleinen. De resultaten van dergelijke analyses zijn van essentieel belang om de veiligheid van waterstofgebruik in de gebouwde omgeving te waarborgen en het vertrouwen van de bevolking in deze nieuwe technologie te versterken.

Het totale risico bestaat in de analyse uit het risico dat ontstaat door zowel lekken in het distributienet als 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. Een veelgebruikte maatstaf voor het risico van een gevaarlijke activiteit is de 1×10^{-6} contour, wat betekent dat de kans op een dodelijk ongeval binnen een bepaald gebied rond de activiteit gelijk is aan 1×10^{-6} , ofwel één op een miljoen, per jaar. Dit wordt in onze maatschappij in het algemeen als een aanvaardbaar of verwaarloosbaar risico beschouwd volgens sommige normen of richtlijnen.

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 voorliggende distributienet en om aan de hand van de risico's beheersmaatregelen te definiëren, wordt gebruik gemaakt van de schematische aanpak zoals weergegeven in Figuur 1. In deze aanpak zijn twee 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 1 Modelmatige aanpak kwantitatieve risicoanalyse

Logischerwijs zal het model, voordat deze toegepast kan worden, geschikt gemaakt moeten worden voor de gegeven situatie in het Nederlandse waterstof distributienetwerk.

Op basis van de model input, zoals de faalfrequenties en eigenschappen van het net en de gebouwen, is voor aardgas het risico berekend (het aantal verwachte slachtoffers). Dit risico van aardgas is gevalideerd 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 [1]. In de tweede fase van HyDelta is het model verder vertaald en zijn de uitkomsten gevalideerd tegen de historische statistische gegevens beschikbaar voor aardgas (storingsdata). Voor een aantal situaties zijn de risico's bepaald voor zowel aardgas en waterstof. Vervolgens is de specifieke oorzaak van verhoogde risico's bepaald en kan de invloed van beheersmaatregelen met behulp van het model worden ingeschat [2]. In de huidige fase van HyDelta wordt het effect van beheersmaatregelen verder uitgewerkt.

1.1 Randvoorwaarden van het model

Het model dat in HyDelta is ontwikkeld, beschouwt het gasdistributiesysteem voor drukken tot en met 8 bar(g), 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:

- Hoofdleidingen in het distributienet
- Aansluitleidingen tussen de hoofdleiding en de meteraan sluiting in de woning
- De binneninstallatie in de woning vanaf meterkast tot aan de CV-ketel

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 effecten van mitigerende maatregelen op de risico's van waterstof in het Nederlandse distributiesysteem en bouwt daarmee voort op de rapportage [2] van HyDelta 2.

In hoofdstuk 2 wordt een samenvatting gegeven van de werking van het model en de implementatie van de mitigerende maatregelen daarin. Voor de analyse van de effecten van deze maatregelen wordt de voorbeeldwijk uit [2] gebruikt als voorbeeld van een typische woonwijk met een representatief waterstofnetwerk (met voorkomende materialen, drukken en diameters). Hoofdstuk 3 geeft een korte samenvatting van de uitkomsten van de risicoberekeningen zoals die in de vorige fase zijn bepaald.

De effecten van de mitigerende maatregelen op het risico in de wijk wordt beschreven in hoofdstuk 4. Ter discussie van de uitkomsten van het model wordt in hoofdstuk 5 het effect op andere type woningen beschreven. Hoofdstuk 6 zet de uitkomsten in een breder perspectief rond risicoperceptie in vergelijking met andere risico's. De bevindingen van het rapport worden samengevat in de conclusie in hoofdstuk 7.

2 QRA model

2.1 CONIFER

DNV heeft een gestandaardiseerde methode ontwikkeld, genaamd CONIFER, voor risicoanalyse van het gasdistributienet. Dit model, oorspronkelijk voor het gasnetwerk in de VK, is aangepast voor waterstoftransportsystemen als onderdeel van het H21-project [3, 4]. Het model maakt gebruik van incidentdata, meetdata uit onder andere experimenten (Spadeadam) en gevalideerde modeldata, en is verder ontwikkeld in modules binnen een softwarepakket. Het model hanteert invoerparameters zoals materialen, gasdrukken, diameters, gassoorten, lekkageoorzaken, fysische verschijnselen, binneninstallatie opzet en woningcomposities. De resultaten worden vertaald naar risico's op individueel en groepsniveau, inclusief de effecten van explosies en branden. In HyDelta 1 en 2 is het bestaande model uit het VK vertaald naar de Nederlandse situatie. Hieronder wordt een korte samenvatting gegeven over de werking van het model. Een uitgebreide versie van de werking en gebruikte aannames voor het QRA-model van de Nederlandse gebouwde omgeving is te vinden in [2].

Het softwarepakket CONIFER wordt voortdurend aangepast om nieuwe functionaliteiten toe te voegen en onderliggende modellen te verfijnen. Door deze verfijningen kunnen de uitkomsten van de verschillende versies onderling verschillen. Het overgrote deel van de berekeningen in dit rapport zijn uitgevoerd in versie 8.0.8.39. Deze versie geeft vergelijkbare resultaten als in het rapport uit HyDelta2 en geeft de mogelijkheid om de meeste mitigerende maatregelen door te rekenen. Voor het variëren van de capaciteit van de gasstopper is deels een nieuwere versie van het pakket gebruikt (v8.0.9.16).

2.2 Lekkages in het gasdistributienet

De belangrijkste invoerparameter voor het model is de faalfrequentie van de hoofd- en aansluitleidingen. Deze zijn voor de Nederlandse situatie bepaald op basis van statistiek van storingen zoals deze wordt gemonitord in de NESTOR database. Voor de frequentie van lekken in de binneninstallatie wordt, bij ontbreken van Nederlandse statistiek², de data uit het VK gebruikt. Op basis van de faalfrequentie, de grootte van lekken en de opbouw van het netwerk, worden de frequentie en kans op verschillende lekgroottes vastgesteld (zie in [2]). Het uitstroomdebiet wordt bepaald door lek grootte, gasdruk, tegendruk, gronddekking en toplaag. Het model simuleert het gedrag van gasstroming door verschillende grondsoorten en ruimtes. Het onderscheidt tussen uitstroom naar de open lucht, wat kan leiden tot brand, en ondergrondse verplaatsing naar gesloten ruimtes, wat na ontsteking kan resulteren in explosies.

In het model worden de effecten van zowel branden als explosies meegenomen. De effecten van explosies zijn uitvoerig beschreven in HyDelta2. In aanvulling beschrijven we in deze rapportage de manier waarop branden ten gevolge van lekkages in het distributienet worden meegenomen in de risicoberekening. Branden kunnen buiten ontstaan als gevolg van ontstoken vrijkomend gas uit een hoofdleiding of aansluitleiding. De thermische straling wordt voorspeld in de omgeving van de brand, rekening houdend met variatie in afstand tot het vrijkomingspunt en windrichting. Veel lekken, waaronder leidingbreuken, resulteren in een uitstroomsnelheid die afneemt met de tijd. Voor deze uitstroom worden op verschillende tijdstippen stralingsvoorspellingen gedaan om rekening te houden met de afnemende omvang van de brand.

De kwetsbaarheid van mensen buitenshuis wordt berekend op basis van de thermische dosis die ze ontvangen. In deze berekening wordt aangenomen dat mensen zich van de brand verwijderen met

² Bij een (slimme) meterwissel wordt standaard een lekdichtheidsbeproeving uitgevoerd. Er blijkt daarvan meer statistiek beschikbaar te zijn bij de netbeheerders, maar deze was niet beschikbaar op het moment van maken van het model (in HyDelta2). Daarnaast leidt de gebruikte data tot overeenstemming van het aantal slachtoffers bij aardgas en vormt daarmee de validatie van het model.

een snelheid van 2,5 m/s, en de berekening houdt rekening met de afnemende warmtestraling naarmate ze zich verder van de brand verwijderen en naarmate de omvang van de brand in de loop van de tijd afneemt. Afhankelijk van de hoeveelheid warmtestraling (thermische dosis) wordt de kans op dodelijke verwonding berekend.

Voor bewoners in woningen die binnen de voorspelde ontstekingsafstand liggen wordt aangenomen dat 90% op het moment van ontsteken de woning kan verlaten. Deze mensen ontvangen een thermische dosis terwijl ze proberen te ontsnappen, en hun kans om een dodelijke slachtoffer te worden wordt op dezelfde manier berekend als voor mensen die in eerste instantie buiten zijn. Voor de overige 10% bewoners wordt aangenomen dat zij het huis niet kunnen verlaten en tot dodelijke slachtoffers leidt.

2.3 Lekkages achter de meter

Voor lekkages in de binneninstallatie wordt een versimpeld schema gebruikt. De faalkans van de meterinstallatie, het binnenleidingwerk en de eindgebruikersapparatuur wordt bepaald op basis van historische gegevens uit het VK. De hoeveelheid gas die de woning instroomt en de kans op een brandbaar mengsel worden bepaald door de lekgrootte en ventilatievoud van de ruimte. De kans op ontsteking wordt ingeschat op basis van de aanwezigheid van ontstekingsbronnen en de aanwezigheidsduur van personen. Het ontstaan van brandbare mengsel in de leiding door (langdurig) stilstand van het gas wordt niet meegenomen in het model.

2.4 Implementatie van mitigerende maatregelen

In deze studie worden een aantal mitigerende maatregelen doorgerekend:

- Ventilatie in de woning
- Verhoogde inspectie van de binneninstallatie
- Gasstoppers
- Gasdetectie door middel van sensoren.

De manier waarop deze in het model zijn geïmplementeerd wordt hierna besproken.

2.4.1 Ventilatie

In de HyDelta 2 werd de ventilatievoud in een ruimte aangemerkt als een belangrijke factor bij het bepalen van het risico op het ontstaan van een explosie. Het verhogen van de ventilatievoud kan de mogelijkheid wegnemen dat een bepaald lek een brandbare gas-luchtconcentratie vormt, of in ieder geval de concentratie beperken die kan worden bereikt. Bovendien neemt de tijd die nodig is om een concentratie brandbaar gas in de lucht te bereiken toe naarmate de ventilatievoud toeneemt. Het verhogen van de ventilatievoud in gebouwen, vooral in ruimtes waar gasmeters of gastoestellen aanwezig zijn, is een mogelijke risicobeperkende maatregel.

Het CONIFER model biedt de mogelijkheid om de ventilatievoud van de referentie met een factor te verhogen of verlagen. De referentiewaarde komt overeen met een ventilatievoud van 0.8 uur^{-1} en is gevalideerd op basis van metingen aan de testwoningen in het H21 project bij DNV in Spadeadam (VK). In de modelering van de huizen is geen kruipruimte meegenomen.

2.4.2 Verhoogde inspectie

Op dit moment worden gasleidingen en -apparatuur in de woning behalve na ingebruikname meestal niet geïnspecteerd. Er zijn mogelijkheden om sommige lekken op te sporen of te voorkomen, bijvoorbeeld tijdens het opnemen van meterstanden of bij het onderhouden van CV-ketels of meters. Meterstanden worden echter steeds meer geautomatiseerd uitgelezen en niet elke ketel wordt

regelmatig onderhouden. Bovendien worden leidingen en andere apparaten zelden geïnspecteerd tot er een storing is.

Bij de omschakeling van aardgas naar waterstof is het te verwachten dat elke aansluiting geïnspecteerd zal gaan worden, zodat de aansluitingen aan de gespecificeerde normen voldoen. Het leidingwerk wordt daarbij gecontroleerd, een dichtheid- en lekttest wordt uitgevoerd en indien nodig worden onderdelen vervangen.

In sommige gevallen kunnen deze maatregelen problemen opsporen en potentiële lekken voorkomen voordat ze zich voordoen. Men zou kunnen aanvoeren dat sommige van deze effecten tijdelijk zijn, aangezien alleen de lekken die de komende paar jaar optreden voorkomen zouden worden, en de storingsfrequenties geleidelijk zouden toenemen naarmate de apparatuur begint te verslechteren. Ten minste enkele van deze effecten zouden echter permanent zijn als problematische leidingen of toestellen worden vervangen.

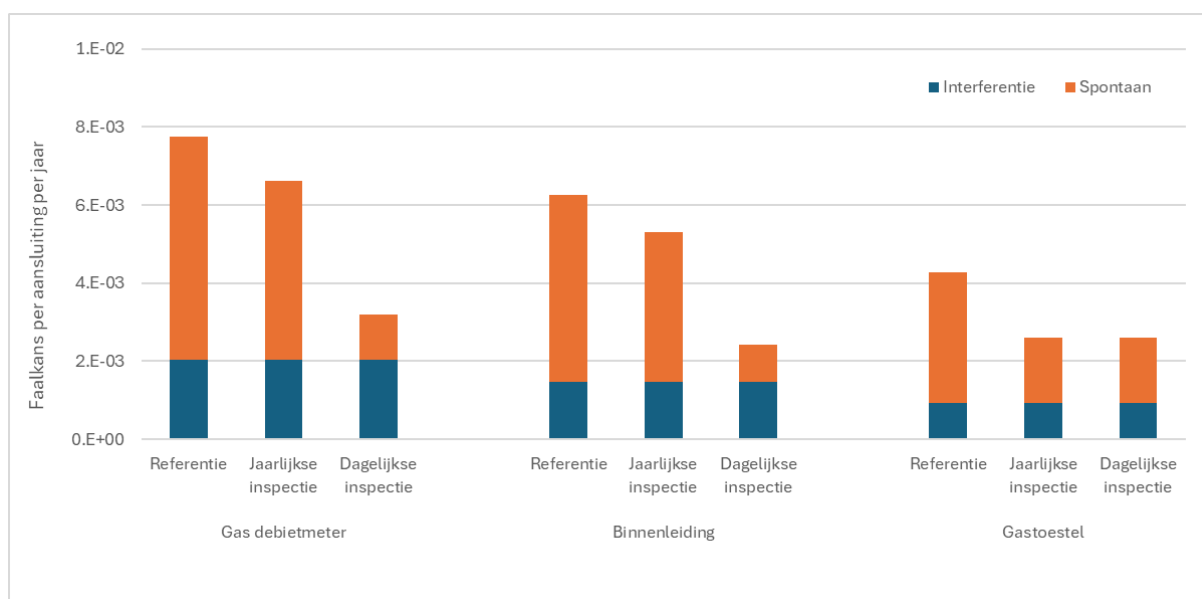
Uit de storingsstatistiek in het VK blijkt dat de meeste spontane³ lekkages in de woning deels kunnen worden voorkomen door regelmatige inspectie. Dat betekent niet dat alle defecten of potentiële problemen in de praktijk zouden worden opgespoord. In het model wordt aangenomen dat 20% van de spontane lekkages zou kunnen worden voorkomen bij een jaarlijkse inspectie van de gasmeterinstallatie en binnenleidingen na de ombouw naar waterstof. Een hoogfrequente inspectie, bijvoorbeeld door een dagelijkse automatische drukval meting over de binnenleiding, zou een groter deel van de spontane lekken kunnen voorkomen. Om het effect van deze maatregel te kunnen afschatten wordt aangenomen dat de frequentie van spontane lekken in de binnenleiding en meteropstelling met 80% wordt verlaagd. Merk op dat de aangenomen afnames van de frequentie van spontane lekken inschattingen zijn.

Daarnaast is het waarschijnlijk dat bij overgang van aardgas naar waterstof de eindgebruikertoepassingen worden vervangen, waarbij extra veiligheidsvoorzieningen zoals vlambeveiliging kunnen worden aangebracht. Dit soort voorzieningen zal naar verwachting standaard in waterstoftoestellen zitten, maar ze zitten niet in alle aardgastoestellen die momenteel in gebruik zijn (hoewel ze vaak wel in nieuwe aardgastoestellen zitten). In deze studie wordt ervan uitgegaan dat 50% van de spontane storingen van apparaten voorkomen kunnen worden door verbeteringen aan het ontwerp en extra veiligheidsvoorzieningen. Lekkages door derden (interferentie) wordt hiermee niet beïnvloed. De verlaagde faalkansen bij betere inspectie worden weergegeven in onderstaande tabel en figuur.

Tabel 1 Faalkansen per aansluiting per jaar, achter de meter (bron: H21)

Faalkans per aansluiting per jaar	Interferentie	Spontaan	Spontaan bij jaarlijkse inspectie	Spontaan bij dagelijkse inspectie
Gas debietmeter	2.040×10^{-3}	5.720×10^{-3}	4.576×10^{-3} (-20%)	1.144×10^{-3} (-80%)
Binnenleiding	1.460×10^{-3}	4.810×10^{-3}	3.848×10^{-3} (-20%)	0.962×10^{-3} (-80%)
Gastoestel	0.916×10^{-3}	3.370×10^{-3}	1.685×10^{-3} (-50%)	1.685×10^{-3} (-50%)

³ Onder spontane schade wordt schade zonder direct menselijke interactie bedoeld. Te denken valt dan aan bijvoorbeeld het falen van koppelingen of corrosie. Schade door derden of externe interferentie wordt veroorzaakt door menselijke interactie zoals bijvoorbeeld graafschade waarbij per ongeluk een leiding wordt geraakt.



Figuur 2 Faalkansen per aansluiting per jaar, achter de meter (op basis van VK data) en aangenomen reductie ten gevolge van verhoogde inspectie (aannames HyDelta).

2.4.3 Gasstopper

Een gasstopper of Excess Flow Valve (EFV) is een component geïnstalleerd op een gasleiding die de gastoevoer stopt boven een ingestelde gasdoorzet waarde. Deze stopper 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 m³/uur. Dit komt ongeveer overeen met het maximale verbruik van alle gastoeppassingen in een woning, een hoger debiet wordt vaak veroorzaakt door een lekkage. De door dit onderzoek aanbevolen waarden zijn geïmplementeerd in het QRA-model voor gasstoppers⁴. Er worden 2 mogelijke locaties voor de gasstopper onderzocht: vlak voor de meter in de meterkast en op de aansluiting van de aansluitleiding op de hoofdleiding. In de eerste situatie zal de gasstopper alleen ingrijpen bij lekkages in de binneninstallatie, in de tweede situatie worden ook lekkages in de aansluitleiding meegenomen.

In het model kan het gebruik van eindgebruikapparatuur het sluiten van de gasstopper beïnvloeden. Als de gasstopper is afgesteld op debieten van meer dan 20 m³/uur, is het mogelijk dat lekken met uitstroomdebiet van minder dan 20 m³/uur de gasstopper doen sluiten als gelijker tijd ook andere apparaten gas gebruiken. Bijvoorbeeld, een huishoudelijke cv-ketel die op waterstof werkt verbruikt naar schatting tussen 7 en 10 m³/uur. Daarom zou een lek waarbij meer dan 13 m³/uur vrijkomt, resulteren in een totale stroom van meer dan 20 m³/uur door de meter als er op dat moment een ketel in werking is, met een waterstofverbruik van 7 m³/uur. Dit zou resulteren in het sluiten van de gasstopper.

Er wordt aangenomen dat 25% van de lekken tussen 12 m³/uur en 20 m³/uur ertoe leiden dat de EFV sluit. Dit is gebaseerd op een ketel die gas gebruikt met een capaciteit van 8 m³/uur, waarbij de centrale verwarming in een woonhuis 6 maanden per jaar in gebruik is en de ketel de helft van de tijd in bedrijf is. Deze periode is 25% van de totale tijd. Het gebruik van de ketel voor warmwatervoorziening wordt verwaarloosd in deze aanname omdat de tijd waarin de ketel hiervoor aanstaat relatief kort is.

⁴ Een nieuwere versie van het model geeft een mogelijkheid om de capaciteit van de gasstopper zelf in te stellen (zie 2.1)

2.4.4 Gasdetectie door sensoren

Gasdetectie geïnstalleerd in huizen heeft het potentieel om de waarschijnlijkheid te vergroten dat een gasontsnapping wordt gedetecteerd, zonder afhankelijk te zijn van een persoon die het gas ruikt, en ook om de tijd te verkorten die nodig is voor het nemen van mitigerende maatregelen. In de referentiesituatie wordt ervanuit gegaan dat het gas geodoriseerd is.

In CONIFER wordt de kans dat een lekkage wordt gedetecteerd, berekend voor intervallen van 15 minuten in de periode van 24 uur na het begin van de lekkage. De kans dat een lekkage wordt gedetecteerd hangt af van het aantal mensen dat zich in het pand bevindt en van het tijdstip van de dag. Bewoners hebben de meeste kans hebben om een lek te detecteren tussen 9 uur 's ochtends en 9 uur 's avonds, wanneer ze waarschijnlijk wakker en actief zijn, en de minste tussen middernacht en 6 uur 's ochtends, wanneer ze waarschijnlijk slapen. Het is dus onwaarschijnlijk dat een lek dat om middernacht begint, vóór 6 uur 's ochtends wordt gedetecteerd, waardoor de kans groter wordt dat er onvlambare concentraties ontstaan voordat de vrijkoming wordt gedetecteerd.

Wanneer een bewoner gas detecteert, kan hij dit melden door het alarmnummer te bellen. In het CONIFER-model meldt 90% van de mensen gedetecteerd gas binnen een uur, 5% van de mensen meldt gedetecteerd gas na meer dan een uur en 5% meldt nooit gedetecteerd gas. Wanneer een bewoner een lekkage meldt, wordt hem geadviseerd het pand te ventileren en de gaskraan te sluiten. Op basis van enquêtegegevens van H21 onderneemt 44% van de mensen beide acties, 16% sluit alleen de gaskraan, 12% ventileert alleen het pand en de resterende 28% onderneemt geen van beide. De storingsdienst arriveert nadat de lekkage is gemeld. De kans dat deze in elke periode van 15 minuten arriveert, is ontleend aan gegevens van NGN (VK) op basis van vele duizenden meldingen⁵. De storingsdienst zorgt ervoor dat de gastoevoer wordt gesloten en het pand wordt geventileerd, als de bewoner deze handelingen nog niet heeft uitgevoerd.

Een eenvoudige optie is het installeren van een gasdetector met een alarm dat afgaat als er gas wordt gedetecteerd. Dit zou op dezelfde manier werken als rookmelders of koolmonoxidemelders die al gebruikelijk zijn in huizen. Er worden twee gevallen bekeken:

- In het eerste geval wordt aangenomen dat een alarm de waarschijnlijkheid van gasdetectie verhoogt tot 100% wanneer er ten minste één persoon in het huis is, maar dat het verder geen effect heeft. In sommige gevallen hoort de bewoner het alarm, maar wacht hij toch voordat hij de aanwezigheid van gas meldt, of meldt hij het helemaal niet, zoals beschreven hierboven.
- Het is mogelijk dat een alarm dat afgaat door een gasdetector de tijd verkort voordat een bewoner het alarmnummer belt. De bewoner zou bijvoorbeeld niet hoeven te vragen of andere aanwezigen ook gas ruiken. Om dit te onderzoeken, wordt in het tweede geval verder aangenomen dat 90% van de bewoners het alarmnummer binnen 30 minuten belt, in plaats van 1 uur in het basisscenario.

Wanneer de monteurs bij het pand aankomen, wordt aangenomen dat ze de gastoevoer sluiten en het pand ventileren. Dit houdt geen rekening met de mogelijkheid dat het pand onbewoond is wanneer de monteurs arriveren, en dat ze het pand niet kunnen betreden. In deze situatie wordt er ook vanuit gegaan dat een alarm ook binnenshuis afgaat en de bewoner reageert zoals hierboven beschreven.

Tenslotte, zouden gasdetectoren mogelijk geconfigureerd kunnen worden om de gastoevoer te sluiten zonder menselijke tussenkomst wanneer ze gas detecteren. Het sluiten van de gastoevoer als gevolg

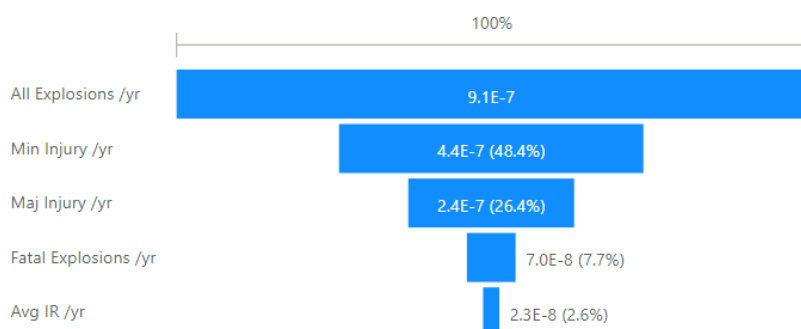
⁵ De aannames vanuit het VK zijn in het model geprogrammeerd en kunnen niet eenvoudig aangepast worden. In Nederland wordt doorgaans ook het storingsnummer van de netbeheerder gebeld. Deze bepaalt of de brandweer gealarmeerd dient te worden. De werkwijze komt overeen met de situatie in het VK. We nemen daarom aan dat we dezelfde instellingen als het VK kunnen hanteren in het model.

van een vals alarm kan ongemak veroorzaken voor de bewoners van het pand. Daarom is aangenomen dat deze alleen wordt gesloten als de concentratie hoger is dan de helft van de LFL. Deze berekeningen gaan ervan uit dat er ook een alarm in de woning afgaat. Deze optie resulteert ook in het sluiten van de toevoer als de lekkage niet uit de binneninstallatie maar uit het distributienet zou komen, zonder dat daarbij dan het lek verholpen zou worden. In het model wordt echter de binneninstallatie los van de buiteninstallatie gemodelleerd. De effecten van deze maatregel in het model zijn dus alleen van toepassing op lekkages in de woning.

2.5 Validatie van het model voor aardgas

In HyDelta 2 is het model, zonder additionele mitigerende maatregelen gevalideerd voor aardgas. Hierbij is de statistiek voor het voorkomen van lekken gebruikt en worden de resultaten voor zowel aardgaslekkages in de binneninstallatie als in het distributienet berekend en vergeleken met historische data in Nederland.

Het model voor lekkages in de binnenaansluiting geeft daarmee aan dat de kans op een explosie per jaar ongeveer eens per twee miljoen gasaansluitingen is (1.8×10^{-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 3. 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 plaatsgebonden risico van ruim 0.02×10^{-6} per jaar.



Figuur 3 plaatsgebonden 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 HyDelta 1 [1]:

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}
Koolmonoxide-vergiftiging	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	-	-	-	
TOTAAL	68,7	9,6	5,27	152,5	24,3	

Tabel 2 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 [1]

*) 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

De kans op een dodelijk slachtoffer in Nederland ten gevolge van een explosie of brand per woning is 0.06×10^{-6} /jaar, exclusief gevallen waarbij opzet in het spel is. Daarnaast is de kans op verwondingen 1.1×10^{-6} /jaar. Het model geeft respectievelijk 0.02×10^{-6} voor dodelijke slachtoffers en 0.4×10^{-6} /jaar voor gewonden en levert daarmee dezelfde orde van grootte als de praktijk.

De verhouding tussen gewonde slachtoffers en dodelijke slachtoffers is 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 gelijk aan 0.4×10^{-6} per aardgasaansluiting. Voor de validatie van het model van het distributienet wordt gekeken naar het totaal aantal slachtoffers ten gevolge van lekken in het distributienet in heel Nederland. In HyDelta 2 is hiervoor een benadering gemaakt op basis van de samenstelling van het distributienet in Nederland, qua materialen, drukken, diameters allen met bijbehorende lengtes en aangesloten huishoudens. Het totaal aantal slachtoffers, Potential Loss of Life (PLL), is 0.64 per jaar. Dit wordt beschouwd als dezelfde orde grootte als de praktijkdata (~ 0.3 op basis van een heel beperkt aantal incidenten).

3 Samenvatting uitkomsten voorbeeldwijk

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 leidingfalen kan hiermee op lokaal niveau worden onderzocht. Interessant is bijvoorbeeld de invloed van woningen op elkaar, zoals dicht bij elkaar staande of twee-onder-één-kapwoningen, maar ook het verschil in risico tussen woningen bij bijvoorbeeld een hoge of (meerdere) lagere druk leidingen.

3.1 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 opbouw en 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.

Op basis van een bestaande wijk is een model gemaakt van een wijk met 57 woningen. In deze wijk zijn verschillende segmenten van de hoofdleidingen aangebracht elk met een specifieke soort materiaal, diameter en druk. De topologie van het distributienet is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4 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 twee-onder-één-kapwoningen aanwezig, herkenbaar aan de dubbele aansluitleiding in Figuur 4.

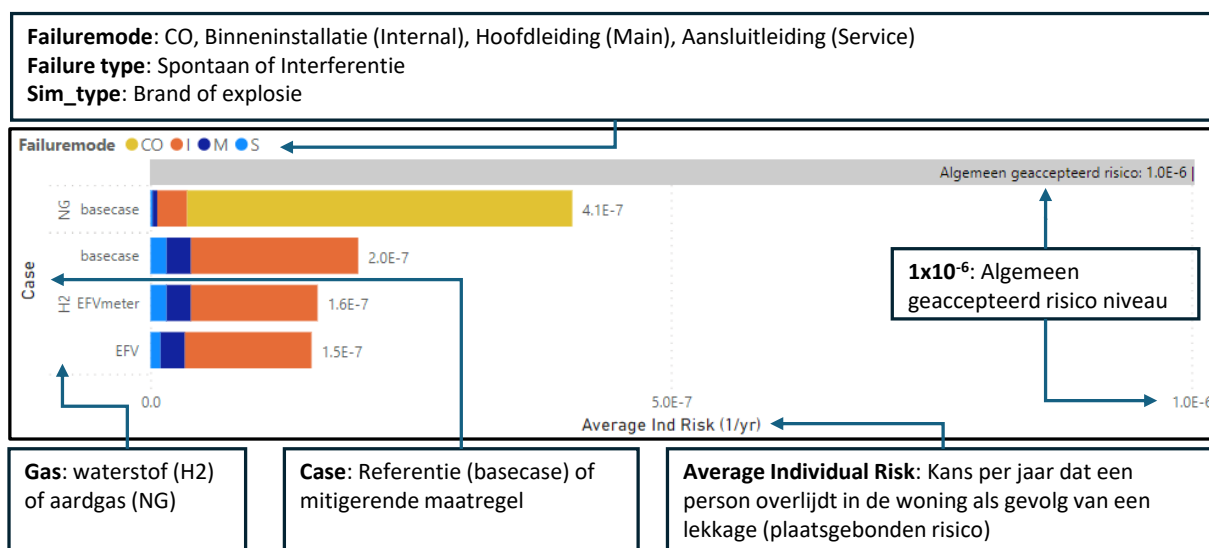
Het distributienetwerk bestaat uit en is gemodelleerd volgens de onderstaande sectieverdeling;

- 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 [2]. Ook de configuratie en faalkansen van de binneninstallatie zijn gelijk genomen als gebruikt in [2]. Het individuele risico is voor elke woning bepaald voor zowel waterstof als aardgas.

In dit rapport worden de uitkomsten van het model op onderstaande manier weergegeven. Er is voorgekozen om in alle figuren de plaatsgebonden risico's op een schaal van 0 tot 1×10^{-6} per jaar weer te geven. Per figuur kan het faaloorzaak, het effect of de getoonde mitigerende maatregel variëren.



3.2 Risico waterstof vanuit een lek in het distributienet

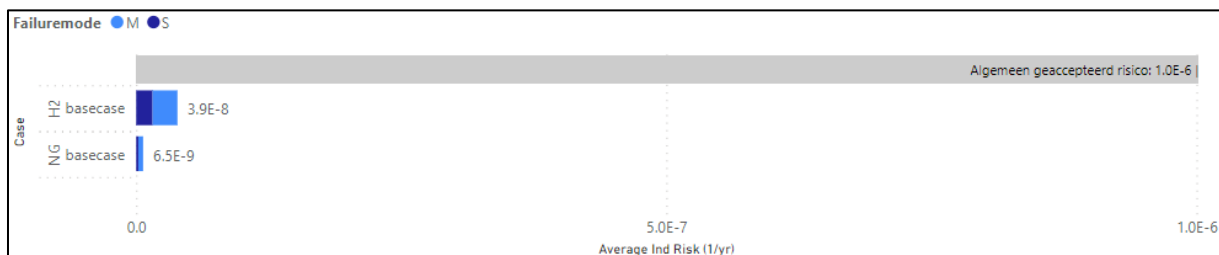
De risico's van waterstof voor elke individuele woning door een lek in het distributienet wordt in Figuur 5 gepresenteerd. Voor elk onderdeel van de hoofdleidingen uit het overzicht in Figuur 4 als ook voor de aansluitleidingen is het risico per woning uitgerekend. De resultaten zijn voor de hoofdleidingen per drukklasse samengevoegd. Er wordt een kleurschaal gebruikt om het verschil in risico tussen de woningen aan te duiden.



Figuur 5 Totale risico door een waterstoflek vanuit het distributienet.

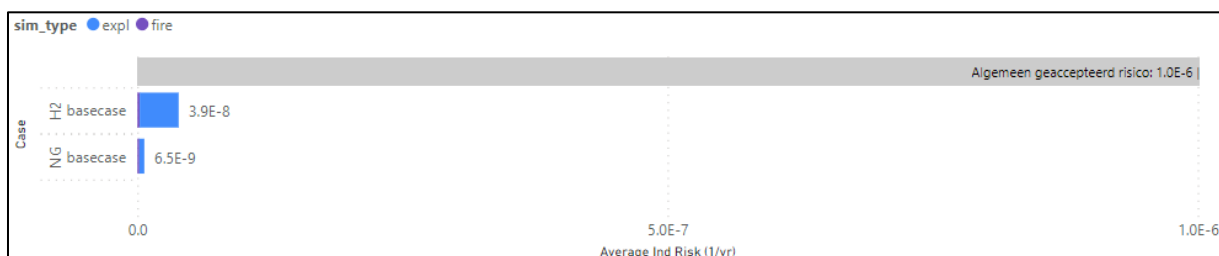
Het totale risico per woning in de voorbeeldwijk door een waterstoflek vanuit het distributienet is weergegeven in Figuur 5. Woningen die dicht bij elkaar staan en dicht bij (meerdere) hoofdleidingen staan laten een hoger risico zien. Het hoogste risico wordt dan ook gevormd door twee-onder-één-kapwoningen. Dit effect op het risico is groter dan dat van een woning vlakbij de 8 bar hoofdleiding.

Het gemiddelde effect over de woningen in de wijk wordt hieronder weergegeven, waarbij een uitsplitsing is gemaakt tussen de bijdrage van de hoofdleidingen en van de aansluitleidingen.



Figuur 6 Gemiddeld plaatsgebonden risico per woning voor waterstof (H2) en aardgas (NG) vanuit het distributienet met een onderverdeling naar hoofdleiding ('Main') en aansluitleiding ('Service')

In onderstaande figuur wordt het risico vanuit lekken in het distributienet uitgesplitst naar bijdrage van explosies en branden. Het risico van branden is van dezelfde orde grootte voor beide gassen ($\sim 2 \times 10^{-9}$ /jaar), maar door de grotere bijdrage van explosies voor waterstof in vergelijking met aardgas, is de relatieve bijdrage bij waterstof lager dan bij aardgas (6% tegenover 39%).

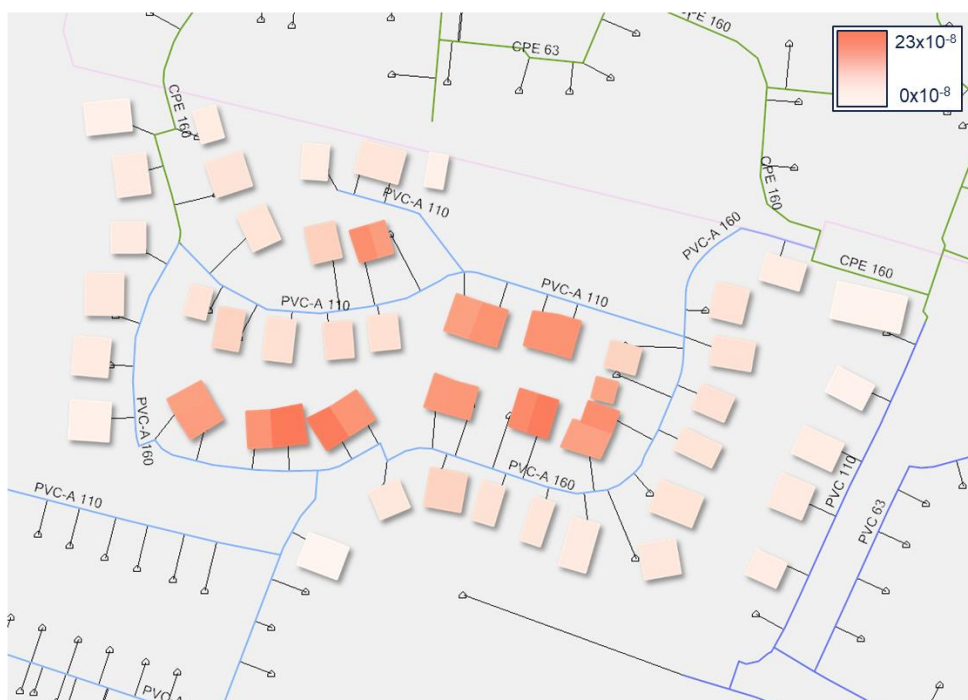


Figuur 7 Gemiddeld plaatsgebonden risico per woning vanuit het distributienet, uitgesplitst naar bijdrage van explosies en branden.

3.3 Risico waterstof vanuit een lek in de binneninstallatie

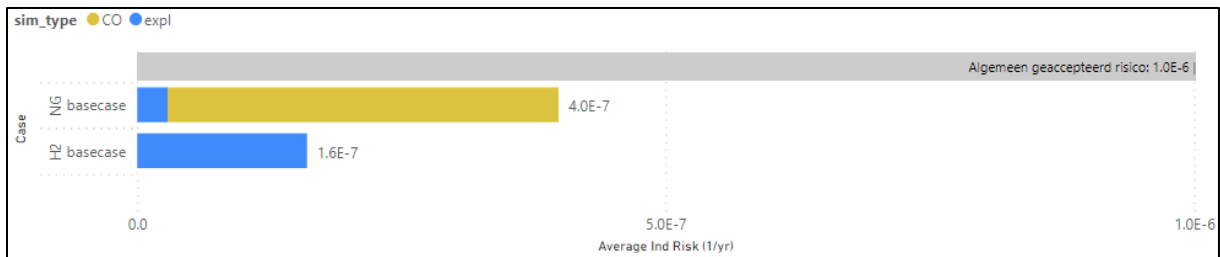
In de binneninstallatie, vanaf de meter tot aan de ketel, kunnen ook lekkages voorkomen. De binneninstallatie is opgedeeld in drie stukken: de meterinstallatie, de binnenleidingen en de ketel.

Onderstaand is in Figuur 8 het risico per woning in de voorbeeldwijk weergegeven door een lek vanuit de gehele binneninstallatie. Voor een duidelijke weergave is de kleurschaal die het risico aangeeft afwijkend ten opzichte van de figuren uit de vorige paragraaf.



Figuur 8 Risico in woningen voorbeeldwijk door waterstoflek 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 invloed van nabijgelegen woningen zichtbaar. Met name twee-onder-één-kapwoningen in de voorbeeldwijk hebben een verhoogd risico, als ook vrijstaande woningen dichtbij andere woningen, door de hogere overdruk die bij een explosie in vergelijking met aardgas wordt veroorzaakt. Het risico dat ontstaat door een lek in de binneninstallatie is aanzienlijk groter in vergelijking met het risico door een lek vanuit het distributienet, waarvoor een andere kleurschaal is gekozen.



Figuur 9 Gemiddeld plaatsgebonden risico per woning vanuit de binneninstallatie, uitgesplitst naar bijdrage van explosies en CO vergiftiging.

3.4 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 10 geeft het totale risico weer voor waterstof.

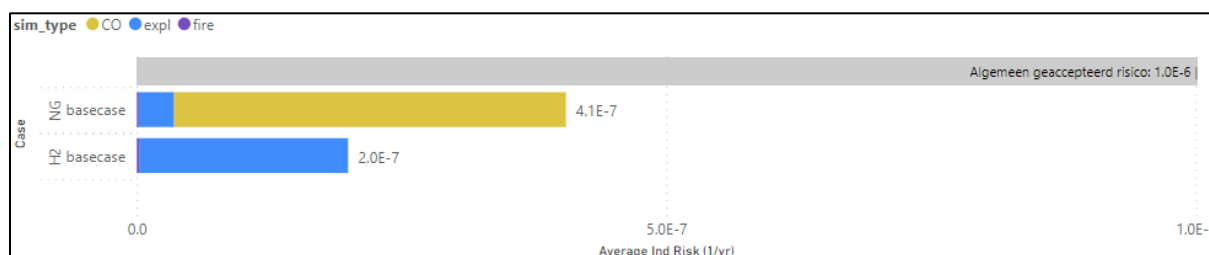


Figuur 10 Totale risico waterstof voor de woningen in de voorbeeldwijk

Veruit de grootste bijdrage aan het totale risico is voor waterstof de binneninstallatie, met daaropvolgend de 100 mbar hoofdleidingen. De twee-onder-één-kapwoningen, woningen relatief dicht bij elkaar en woningen met meerdere hoofdleidingen in de buurt hebben het grootste plaatsgebonden risico. Vrijstaande woningen bij een enkele hoofdleiding hebben het laagste plaatsgebonden risico.

3.5 Verschil risico waterstof en aardgas

Figuur 11 hieronder geeft een gemiddeld totaal individueel risico over de 57 woningen uit de voorbeeldwijk voor zowel waterstof als aardgas.



Figuur 11 Gemiddeld plaatsgebonden risico per woning in de voorbeeldwijk voor waterstof en aardgas

Een vergelijking van de risico's in woningen van waterstof ten opzichte van aardgas laat een verhoogd risico voor waterstof ten opzichte van aardgas zien door explosies ten gevolge van lekken vanuit zowel de binneninstallatie als vanuit het distributienet. Door de heftigere explosie van waterstof in vergelijking met aardgas is het risico in nabijgelegen woningen ten opzichte van de leklocatie groter. Voor aardgas wordt ook het risico op koolmonoxidevergiftiging weergegeven (donkergeel), 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. Als het risico van CO vergiftiging meegenomen wordt in de vergelijking, blijkt dat er dus 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. 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.

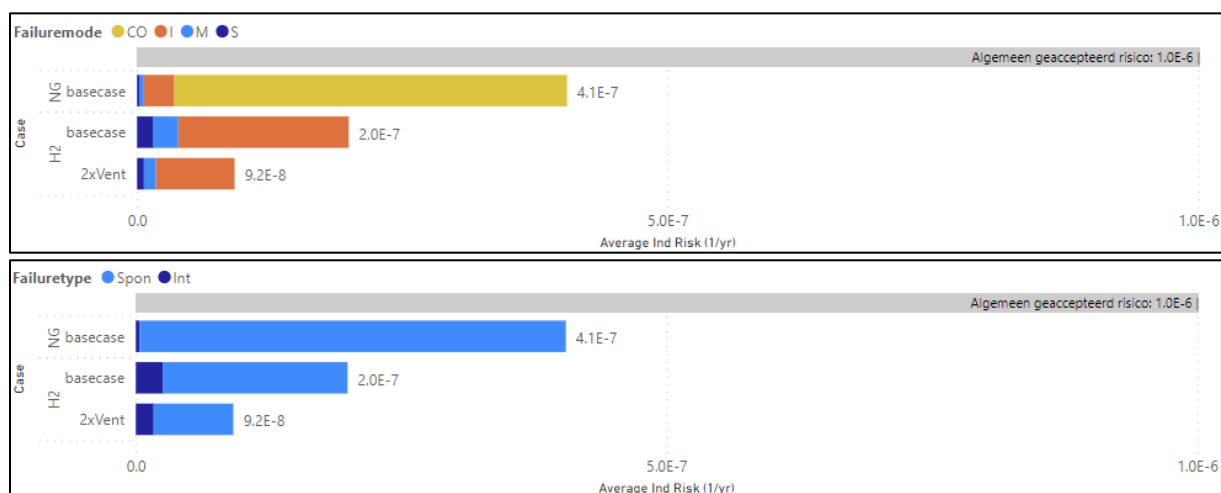
4 Effect beheersmaatregelen

In dit hoofdstuk wordt de impact besproken van beheersmaatregelen op het 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, het plaatsen van een gasstopper en een gassensor beschouwd in deze studie. Het verlagen van de (spontane) faalfrequenties is ook een belangrijke beheersmaatregel die wordt meegenomen. Dit kan worden bereikt door middel van bijvoorbeeld (periodieke) inspecties, het vervangen van materialen en het vernieuwen van apparaten.

4.1 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 hogere ventilatievoud van een woning heeft een sterk reducerend effect op het risico in een woning. Dit is aangetoond in QRA-studies voor H21 en Hy4Heat en blijkt ook vanuit de analyses gedaan in HyDelta 2. 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.

Om een inschatting te maken van het effect van ventilatie is voor de voorbeeldwijk de ventilatievoud van de woningen verdubbeld. Dit betekent dat de opbouw van concentraties in alle kamers in de woning wordt verlaagd. Een verdubbeling van de ventilatie ten opzichte van de referentiewaarde van 0.8 uur^{-1} naar een ventilatievoud van 1.6 uur^{-1} levert een reductie van het locatiegebonden risico op van 54%, gemiddeld over de woningen in het de wijk. De maatregel heeft invloed op zowel de risico's vanuit het netwerk, de hoofd- en aansluitleiding, als op lekkages in de woning. Het effect wordt weergegeven in onderstaande figuur.



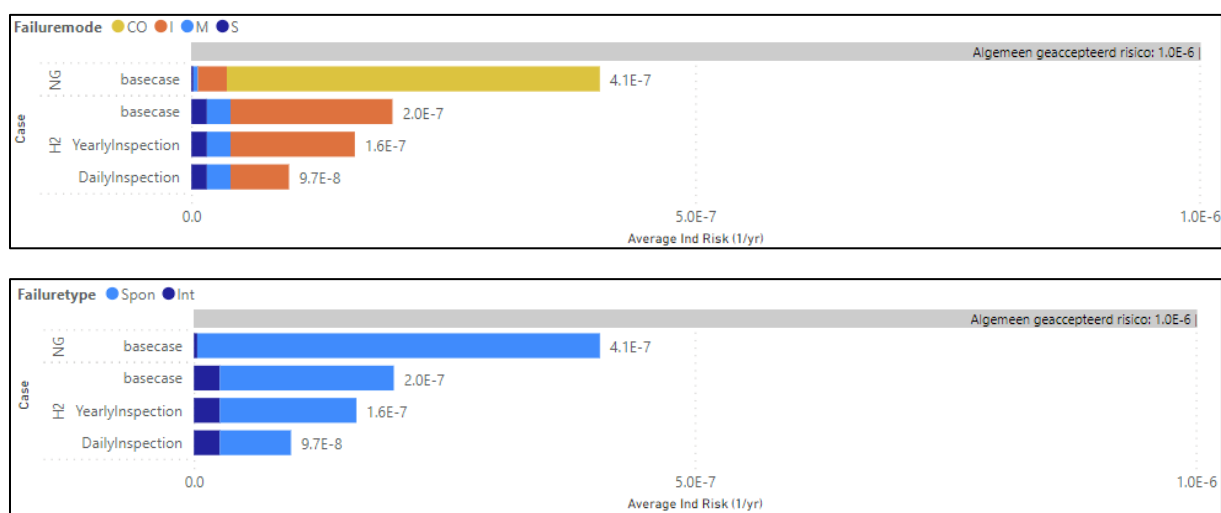
Figuur 12 Effect van verdubbelde ventilatie op het risico, uitgesplitst naar oorzaak (hoofd- (M), aansluitleiding (S), achter de meter (I) en CO; boven) en type lekkage (interferentie of spontaan; onder)

Voor de realisatie van een dubbele ventilatie kunnen wel de nodige kanttekeningen gemaakt worden. Een grotere ventilatievoud heeft namelijk ook impact op de warmtevraag in de woningen. 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. Hiermee is de uitvoerbaarheid en controleerbaarheid van deze maatregel mogelijk problematisch.

4.2 Verhoogde inspectiefrequentie van de binneninstallatie

In de ombouw naar waterstof en in de operatie daarna zou door regelmatige inspectie de kans op spontane lekken verlaagd kunnen worden. Zoals beschreven in 2.4.2 wordt ervan uitgegaan dat de kans op spontane lekken met 20% verlaagd wordt voor de meterinstallatie en de binnenleidingen en met 50% voor de eindgebruikerapparatuur. Aangenomen wordt dat bij een hoogfrequente automatische meting van de drukval in de binnenleiding, de kans op spontane lekken met 80% wordt verlaagd. In beide gevallen worden lekkages door derden (interferentie) hiermee niet beïnvloed. Het effect van deze reductie van de faalkans leidt tot een verlaging van het risico met 19% bij een verlaging van de kans met 20% en 51% bij een verlaging van de kans met 80%. Deze reductie geldt uiteraard alleen voor de lekken achter de meter. Over het algemeen schaal het risico lineair met de faalfrequentie. Op deze manier kan ook een eventuele reductie door verhoogde inspectie van het distributienet worden ingeschat. Vooral nog wordt in deze studie daar geen aanname voor gemaakt.



Figuur 13 Effect van meer inspectie op het risico, uitgesplitst naar oorzaak (hoofd-, aansluitleiding, achter de meter en CO-detector; boven) en type lekkage (interferentie of spontaan; onder). YearlyInspection heeft een 20% lagere kans op spontane lekken, DailyInspection heeft een 80% lagere kans op spontane lekken.

Regelmatige inspectie van de binneninstallatie vergt de nodige arbeidskracht, tenzij deze automatisch uitgevoerd kan worden. Mogelijk kan een dergelijke inspectie gecombineerd worden met een (jaarlijkse) inspectie van de verwarmingsinstallatie. Mogelijk zal de regelgeving moeten worden aangepast zodat inspecteurs goede toegangsmogelijkheden hebben voor inspecties achter de voordeur. Een automatische inspectie middels druksensoren in de binneninstallatie moet verder ontwikkeld worden en er zal moeten worden aangetoond dat deze betrouwbaar uitgevoerd kan worden.

4.3 Gasstopper

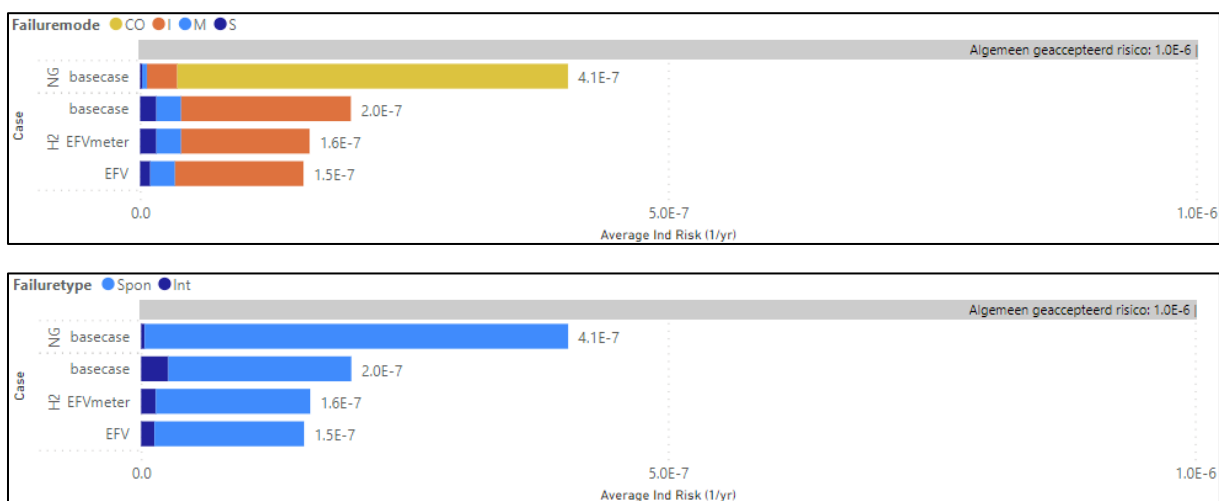
Voor de inzet van een gasstopper met een capaciteit van 20 m³/h voor waterstof is de risicoreductie bepaald in de voorbeeldwijk. Er zijn hierbij twee situaties onderkend:

1. Bij de eerste situatie zit de **gasstopper direct bij de meter**, maar deze neemt nu mee dat het gebruik van apparaten in huis de gasstopper sluitcondities beïnvloeden. De gasstopper sluit bij een debiet hoger dan 20 m³/uur, dat wil zeggen dat bijvoorbeeld bij een gezamenlijk verbruik

van apparaten in een woning van 8 m³/uur, de gasstopper sluit bij een lek van 12 m³/uur. Om dit te benaderen in het model worden aannames gedaan met betrekking tot het moment en de omvang van het verbruik van apparaten. De gasstopper direct bij de meter is nog niet beschikbaar op de Nederlandse markt.

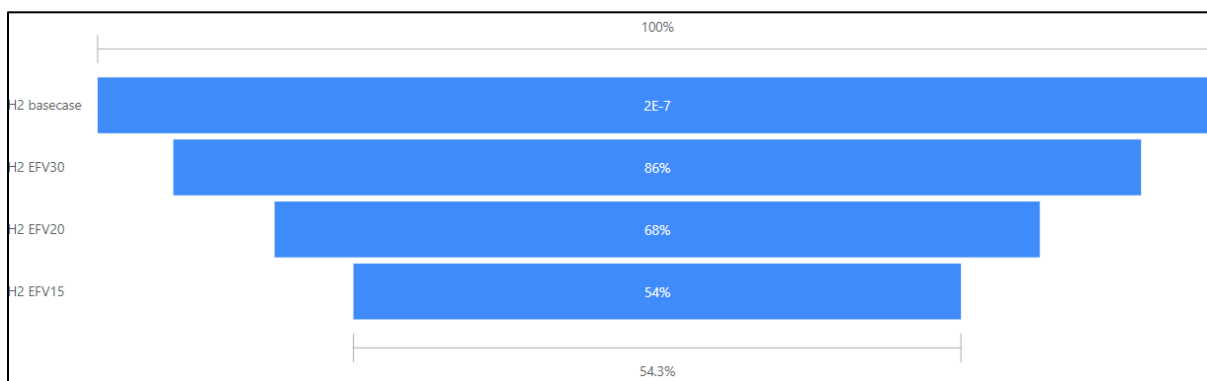
2. Bij de tweede situatie wordt de **gasstopper geplaatst op koppeling (zadel) tussen de hoofdleiding en de aansluitleiding**. De gasstopper heeft hierdoor ook een effect op het risico door lekkages in aansluitleidingen. Verder worden de aannames gebruikt zoals beschreven voor situatie 1.

De reductie van het risico door het toepassen van de gasstopper is weergegeven in onderstaand figuur. Een gasstopper met een aanspreekwaarde van 20 m³/uur geeft een reductie op het risico in de binneninstallatie van 20%, gemiddeld over de 57 woningen in de voorbeeldwijk. De bijdrage van het risico door lekken in het distributienet blijft in deze situatie gelijk met de referentiesituatie. Als de gasstopper op de koppeling van de aansluitleiding op de hoofdleiding wordt geplaatst, reduceert het risico van aansluitleiding met een extra 2.5% tot een totale reductie van 22.5%.



Figuur 14 Effect van de gasstopper op het risico, uitgesplitst naar oorzaak (hoofd-, aansluitleiding, achter de meter en CO; boven) en type lekkage (interferentie of spontaan; onder). Bij EFVmeter is de gasstopper bij de meter geplaatst, bij EFV zit deze op het zadel van de hoofdleiding.

Om het effect van de grootte van de gasstopper op het risico te onderzoeken, is een nieuwere versie van het softwarepakket CONIFER gebruikt (v8.0.9.16). Deze versie heeft een aantal veranderingen in de onderliggende modellen, die invloed kunnen hebben op de berekende risico's. Daarom zijn de resultaten van deze versie niet 1-op-1 vergelijkbaar met de resultaten van de vorige versie (v8.0.8.39), die gebruikt is voor de meeste berekeningen in dit rapport en het eerder onderzoek in HyDelta 2. De grafiek hieronder geeft daarom een indicatie hoe het risico verandert als de gasstopper een andere grootte heeft. De grootte van de gasstopper is gevarieerd met een limietwaarde van 15 tot 30 m³/uur. De reductie in het risico ten opzichte van de referentiesituatie is 14%, 32% en 46% voor respectievelijk 30 m³/uur, 20 m³/uur en 15 m³/uur.



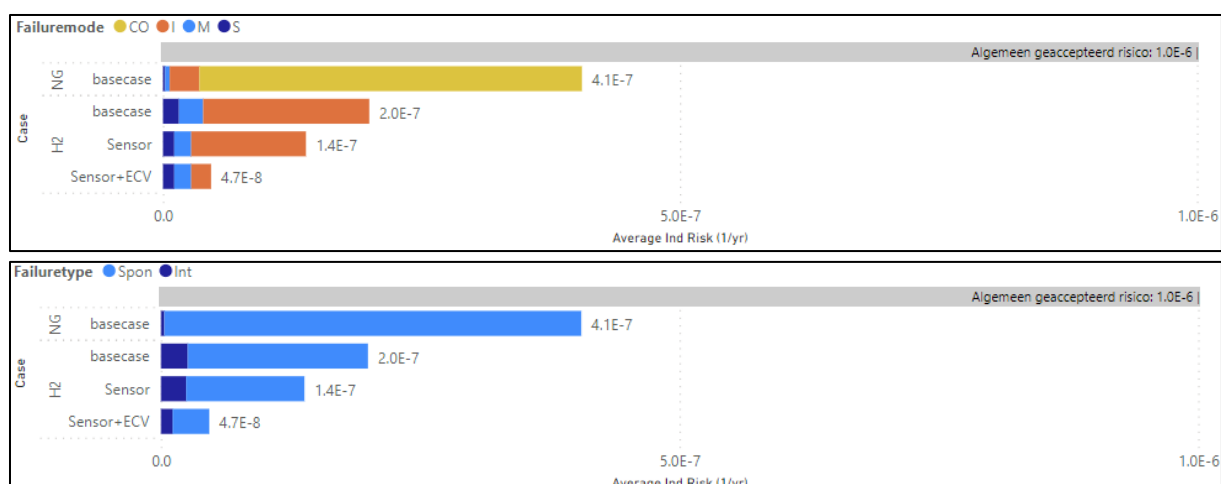
Figuur 15 Effect van de grootte van de gasstopper op het risico

De gasstopper is een vrij goedkope oplossing, vooral als deze bij de meter geïnstalleerd wordt. Installatie op het zadel van de hoofdleiding vergt meer installatiekosten en heeft volgens het model een beperkt additioneel effect op het risico. De gasstopper werkt mechanisch en is als zodanig minder gevoelig voor storingen. Het is een voor de bewoner onzichtbare maatregel, wat zou kunnen helpen in het gevoel van veiligheid. Uit de verkennende berekeningen blijkt dat een gasstopper met een lagere capaciteit een groter risico mitigerend effect heeft. Voorkomen moet echter worden dat een gasstopper met een te lage capaciteit niet onterecht dicht valt bij een hogere gasvraag bij het opstarten van bijvoorbeeld ketels. Afstemming tussen de toegestane piekvraag van ketels en de capaciteit van de gasstopper is daarbij aan te bevelen.

Het is belangrijk op te merken dat de resultaten in dit rapport geen opzettelijke lekkages in de interne installatie omvatten. In zulke situaties zal de gasstopper vermoedelijk ook activeren, wat helpt om een explosief mengsel in de woning te voorkomen

4.4 Gasdetectie

Door een gassensor met akoestisch signaal in een woning te installeren kan een gaslek potentieel eerder worden gedetecteerd dan enkel bij odorisatie en detectie door de bewoners van het huis. 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 kelder. Na alarmering wordt aangenomen dat de gastoevoer eerder afgesloten wordt en er door de bewoners 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 31% reductie. Als de gasdetectie direct gekoppeld wordt aan de gastoevoer (Emergency Close Valve) wordt een reductie van 77% gerealiseerd.

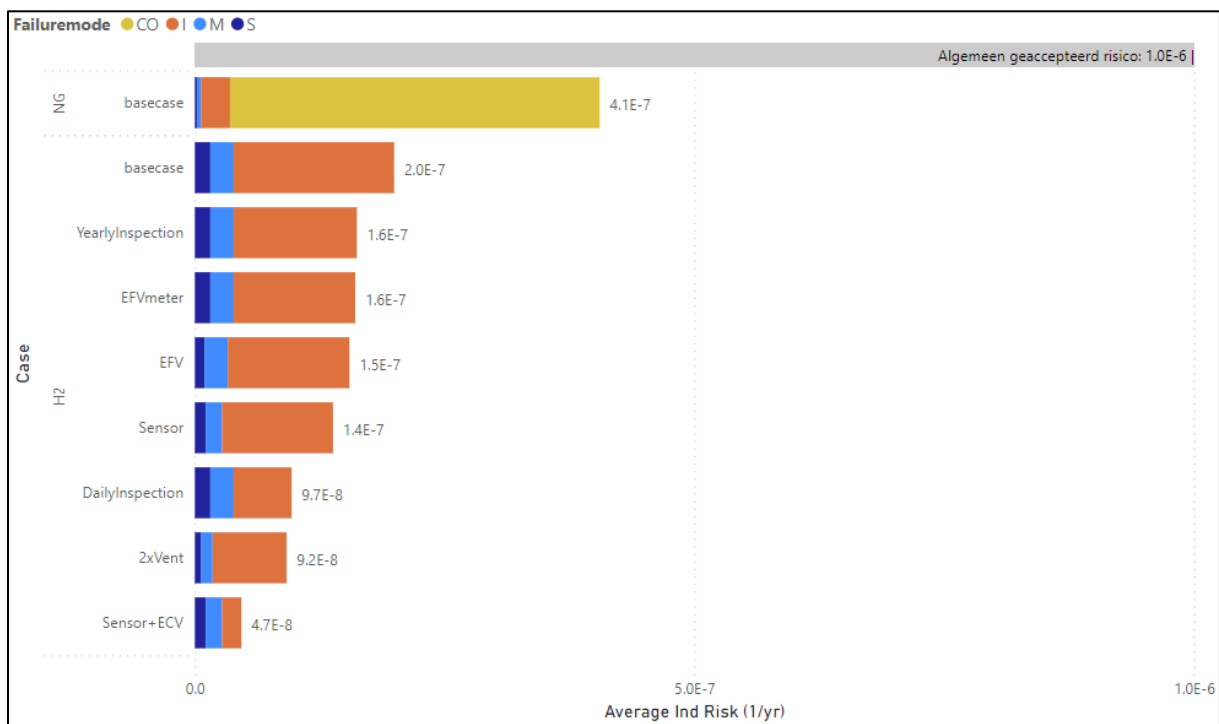


Figuur 16 Effect van een sensor op het risico, uitgesplitst naar oorzaak (hoofd-, aansluitleiding, achter de meter en CO; boven) en type lekkage (interferentie of spontaan; onder). Sensor+ECV is een sensor gekoppeld aan een automatische sluiters van de toevoer ('Emergency Close Valve').

Gasdetectie van waterstof is vergelijkbaar met gangbare rookmelders of CO-melders. Het is daarmee een maatregel die waarschijnlijk snel geaccepteerd wordt. Ook de benodigde technologie is zeer vergelijkbaar met huidige CO-melders. De combinatie van een sensor gekoppeld aan een automatische afsluiter van de gastoevoer lijkt een erg effectieve maatregel. Deze maatregel is nog conceptueel en nog niet op de markt. Aangevoerd dient te worden dat een dergelijk systeem storingsvrij en betrouwbaar kan worden bedreven. Het mogelijk (te vaak) onterecht afsluiten van de toevoer kan leiden tot overlast en daarmee verlaagde acceptatie van deze maatregel.

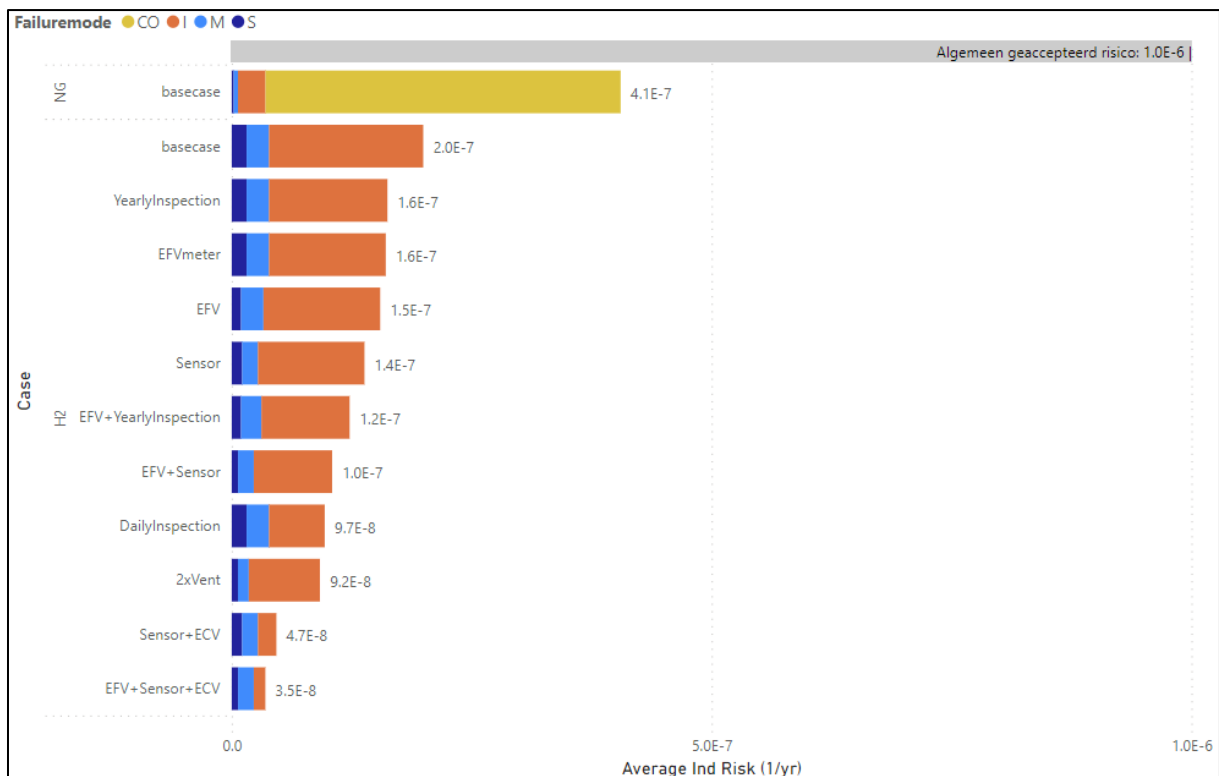
4.5 Gecombineerd effect van maatregelen

In de hiervoor beschreven secties zijn de verschillende bijdragen per mitigerende maatregel is opgesomd. Figuur 17 geeft de bijdrage van de individuele maatregelen vergeleken met de referentie situatie voor waterstof alsmede voor aardgas in toenemend effect. In deze figuur wordt de berekende reductie van het risico van de maatregelen weergegeven. Uiteraard moet opgemerkt worden voor het bepalen van de gewenste maatregelen niet alleen de berekende reductie van het risico van belang is maar ook de maatschappelijke impact, kosten en betrouwbaarheid een belangrijke rol spelen. Een vroege automatische detectie van een lek door een sensor die automatisch de waterstoftoevoer in de woning afsluit, lijkt de meest effectieve maatregel waarbij het berekende risico het berekende risico van aardgas zonder CO- bijdrage benaderd. De regelmatige inspectie met een reductie van 80% van de spontane lekken geeft een vergelijkbaar risico reductie als een verdubbeling van de ventilatievoud in de woning. Beide realiseren een reductie van ruim 50% ten opzichte van de referentiewaarde. De gasstopper van 20 m³/uur en de installatie van een waterstofsensor met alarm geven een reductie van 20-30% ten opzichte van de referentie.



Figuur 17 Overzicht bijdrage individuele maatregelen op het risico

Naast de individuele maatregelen zouden ook maatregelen gecombineerd kunnen worden om daarmee het risico nog verder te verlagen. Figuur 18 geeft een overzicht van de gesimuleerde maatregelen en een aantal combinaties van individuele maatregelen.



Figuur 18 Overzicht bijdrage individuele en combinaties van maatregelen op het risico

Bij het combineren van maatregelen is de reductie niet automatisch de som van de reductie van de individuele maatregelen. Als bijvoorbeeld een gasstopper met een sensor wordt gecombineerd, is de gezamenlijke reductie 50%. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat een sensor al een deel van het risico van de lekkages voorkomt die anders door de gasstopper voorkomen zouden worden. Door een combinatie te kiezen van een gasstopper samen met een sensor met automatische sluiting van de toevoer, zou een risico lager dan voor aardgas gerealiseerd worden onder de gekozen aannames in het model.

5 Effect van andere woningtypen

5.1 Woningtypen

In de voorbeeldwijk is een combinatie van vrijstaande en twee-onder-één-kapwoningen gekozen. In het totale woningbestand in Nederland zijn echter nog meer typen woningen aanwezig zoals rijtjeshuizen en flats of appartementen. Het is interessant om te weten wat het effect van het type woning is op het totale risico.

Volgens het CBS⁶ zijn er in Nederland ongeveer 8 miljoen woningen, waarvan ongeveer 13% vrijstaand, 9% twee-onder-één-kap, 42% rijtjeshuis (waarvan 13% hoekhuizen zijn en daarmee gelijk aan een twee-onder-één-kap in het model) en 36% meergezinswoningen (flat of appartement).

De verdeling van het aantal huizen naar type verschilt per regio, afhankelijk van de stedelijkheid, de historische ontwikkeling en de beschikbare ruimte. Over het algemeen zijn vrijstaande woningen vaker te vinden in landelijke gebieden, terwijl flats en appartementen meer voorkomen in stedelijke gebieden. Rijtjeshuizen en twee-onder-één-kapwoningen zijn verspreid over het hele land, maar zijn ook geconcentreerd in bepaalde wijken of buurten.

De gekozen verandering van de voorbeeldwijk geeft een eerste indicatie voor het verschil in risico voor verschillende typen huizen. In deze wijk is het distributienetwerk hetzelfde gehouden. Rijtjeshuizen en appartementenblokken komen in verschillende vormen en samenstellingen voor, met bijbehorende configuratie van het distributienet. Om een representatief beeld te geven voor heel Nederland zouden verschillende combinaties van woningtype en infrastructuur gesimuleerd moeten worden en zou op basis van hun aandeel in de totale mix in Nederland een groepsrisico voor heel Nederland (PLL) bepaald moeten worden. Deze generalisatie zou een veelvoud aan berekeningen vergen en valt buiten de scope van het huidige project.

5.2 Voorbeeldwijk met rijtjeshuizen en appartementenblokken

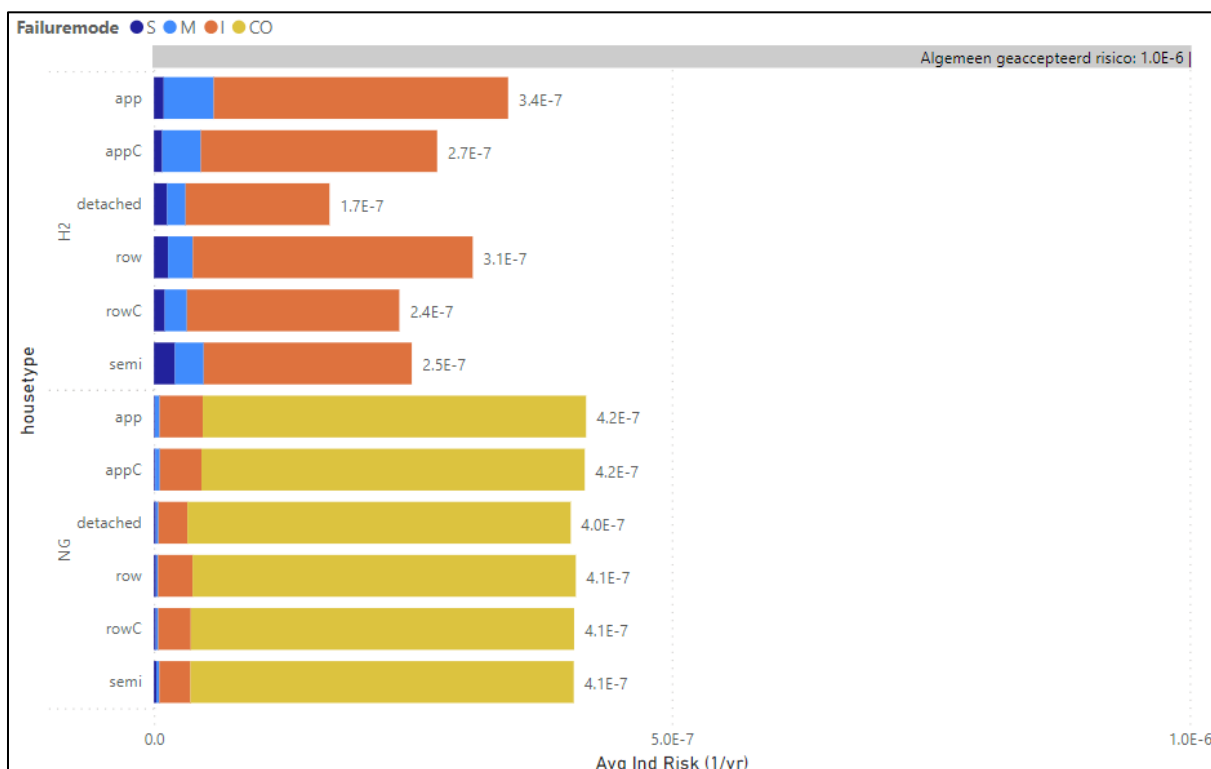
Om een idee te krijgen van de risico's in rijtjeshuizen en appartementenblokken zijn een aantal modelberekeningen gemaakt in dezelfde voorbeeldwijk maar met andere type woningen. Hiertoe zijn 40 rijtjeshuizen bestaand uit 10 hoekwoningen en 30 tussenwoningen, in de voorbeeldwijk geplaatst. Daarnaast zijn ook vijf appartementenblokken toegevoegd. Deze bestaan uit drie appartementen naast elkaar en vier boven elkaar. De appartementenblokken zijn met één aansluitleiding per blok aangesloten op de hoofdleiding. Figuur 19 geeft de schematische wijk weer.

⁶ <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/85035NED/table?ts=1658417234523>



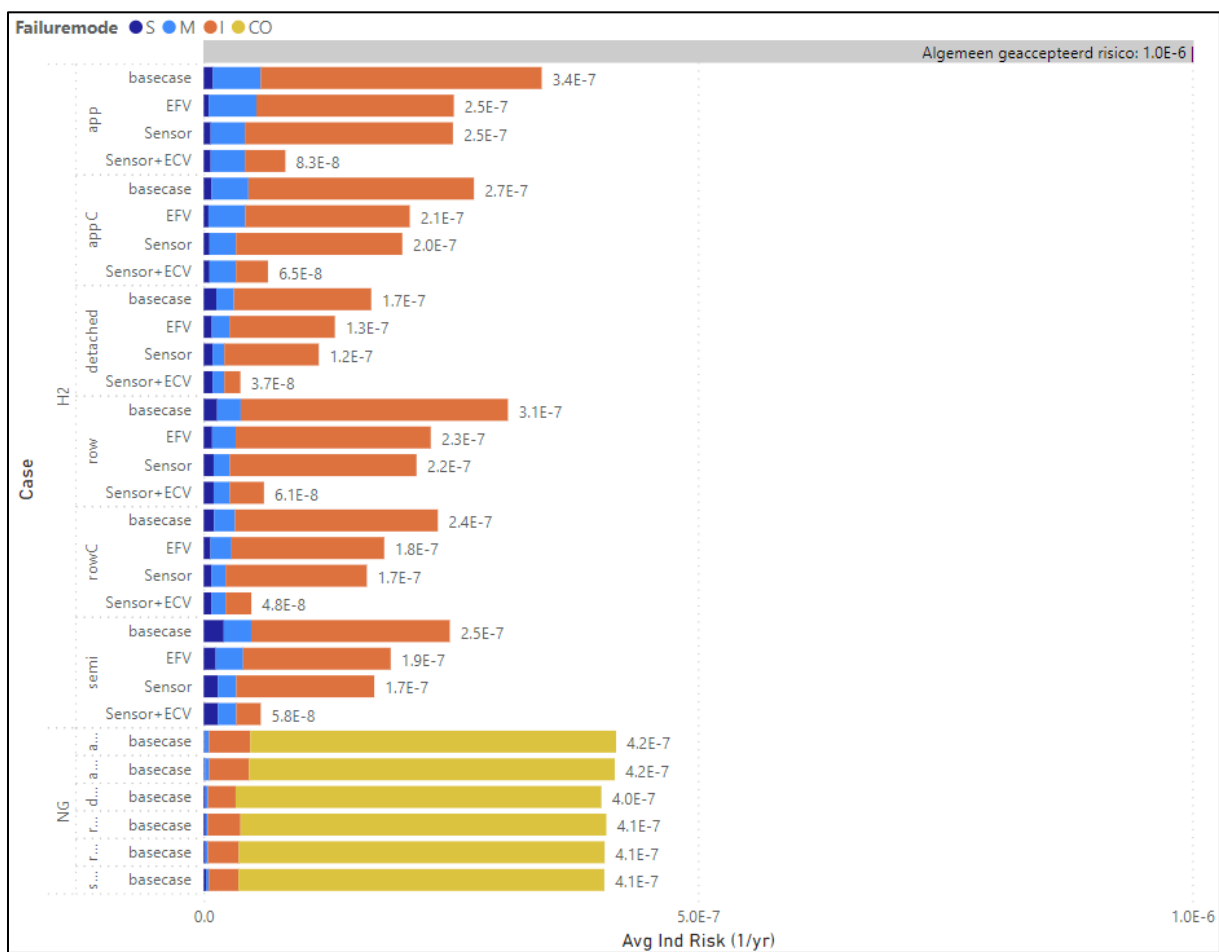
Figuur 19 Voorbeeldwijk met rijtjeshuizen en appartementenblokken

De uitkomsten van het model voor de verschillende woningtypen zijn weergegeven in Figuur 20. Hierin wordt het gemiddelde individuele risico per woning type van zowel de oorspronkelijke voorbeeldwijk met vrijstaande en twee-onder-één-kapwoningen gegeven als de nieuwe wijk met rijtjeshuizen en appartementen. Voor de laatste twee categorieën wordt onderscheid gemaakt tussen de hoekwoning van een huizenrijtje of appartementenblok ('appC' en 'rowC') en de tussenwoningen ('app' en 'row'). Uit de resultaten blijkt dat het risico in woningen die dicht bij elkaar staan (appartementen en rijtjes) groter is dan voor vrijstaande woningen. Hoekhuizen van rijtjeshuizen en twee-onder-één-kapwoningen hebben een vergelijkbaar risico, waarbij verschillen te verklaren zijn door de ligging ten opzichte van de hoofdleiding en de grootte van het huis. In de figuur wordt tevens een vergelijking gegeven met de situatie voor aardgas. In deze situatie wordt het risico weer gedomineerd door het effect van CO, welke voor alle huistypen even groot is afgeschat. Voor elk van de woningtypen is het risico bij waterstof weer ruim onder de 1×10^{-6} norm en in alle gevallen kleiner dan het risico van aardgas inclusief CO.



Figuur 20 Gemiddeld individueel risico voor verschillende woningtypes zonder mitigerende maatregelen: Hoekappartement (appC), tussenappartement (app), vrijstaand (detached), (hoek)rijtjeshuis (row, rowC) en twee-onder-één-kap (semi), onderverdeeld naar bijdragen vanuit het net, de binneninstallatie en CO.

Ook voor de verschillende woning typen is gekeken wat het effect is van een aantal mitigerende maatregelen. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 21. De gasstopper geeft een reductie van 22% tot 26% op de referentiewaarde van het risico. Bij de sensor reduceert het risico tussen de 26% en 31%. De sensor met automatische afsluiter geeft een reductie tussen de 76% en 80%. In alle gevallen is er dus een verschil in reductie tussen de verschillende woningtypen in de orde grootte van 5%. Bij de sensor wordt de grootste reductie gehaald in vrijstaande huizen en twee-onder-één-kap, terwijl bij de gasstopper het effect bij appartementen het grootst is. Rijtjeshuizen laten de grootste reductie zien bij de gasstopper met automatische afsluiter ten opzichte van de andere woning typen.



Figuur 21 Gemiddeld individueel risico per woningtype met verschillende mitigerende maatregelen voor waterstof (gasstopper, sensor en sensor met automatische afsluiter)

6 Risicoperceptie

In dit hoofdstuk onderzoeken we de perceptie van risico's bij het grote publiek en hoe deze verschilt van de objectieve risicobeoordelingen. Vaak heeft het publiek moeite om de grootte van een risico te begrijpen of te vergelijken met andere risico's. Dit wordt een uitdaging bij het communiceren over een kwantitatieve risicobenadering. De risico's uit het QRA model voor waterstof worden daarom in perspectief gezet tot andere risico's waaraan het grote publiek blootgesteld wordt.

6.1 Kwantitatief risicoanalyse versus risicoperceptie

Een kwantitatieve risico benadering is een methode om het risico van een bepaalde situatie of activiteit te berekenen op basis van objectieve data en modellen. Het risico wordt meestal uitgedrukt als de kans dat een ongewenste gebeurtenis plaatsvindt vermenigvuldigd met de ernst van de gevolgen. Bijvoorbeeld, het risico van een waterstoflek in een woning kan worden berekend door de kans op een lek te vermenigvuldigen met de kans op een ontsteking en de mogelijke schade aan mensen en eigendommen.

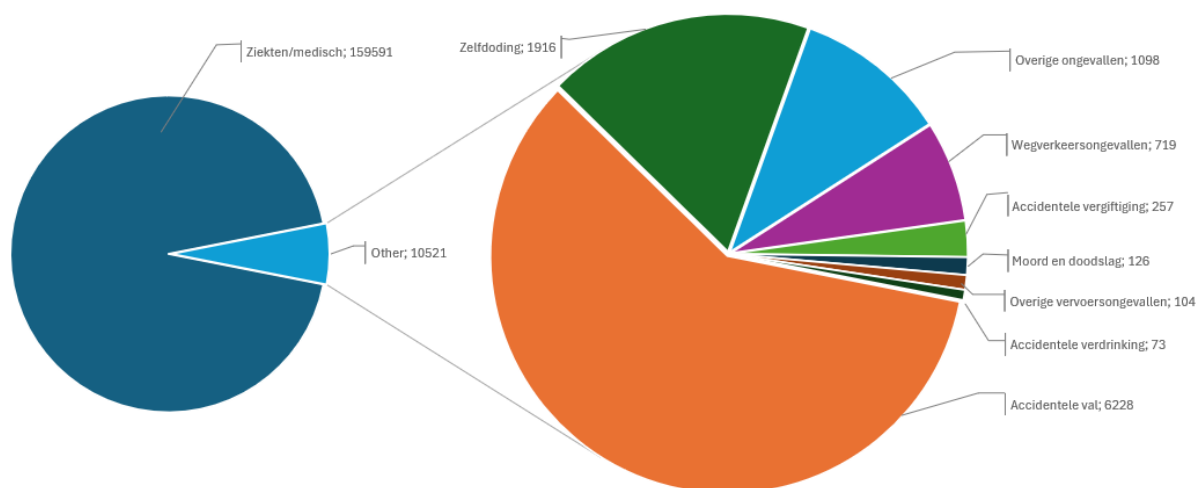
Een uitdaging bij het communiceren over een kwantitatieve risicobenadering is dat het publiek vaak moeite heeft om de grootte van een risico te begrijpen of te vergelijken met andere risico's. Een veelgebruikte maatstaf voor het plaatsgebonden risico is de 10^{-6} contour, wat betekent dat de kans op een dodelijk ongeval binnen een bepaald gebied rond de activiteit gelijk is aan 1×10^{-6} , of één op een miljoen, per jaar. Dit wordt in onze maatschappij in het algemeen als een aanvaardbaar of verwaarloosbaar risico beschouwd volgens sommige normen of richtlijnen.

Echter, voor veel mensen is een 1×10^{-6} contour een abstract en moeilijk te begrijpen concept, dat lastig te visualiseren of te relateren is aan hun eigen situatie of ervaringen. Bovendien kan het publiek verschillende percepties hebben van wat een aanvaardbaar of verwaarloosbaar risico is, afhankelijk van de aard, de context en de voordelen van de activiteit. Bijvoorbeeld, sommige mensen kunnen een hoger risico accepteren voor een activiteit die ze vrijwillig kiezen, zoals roken of autorijden, dan voor een activiteit die ze niet kunnen beïnvloeden of vermijden, zoals wonen in de nabijheid van een chemische fabriek of een kerncentrale. Ook kunnen mensen sommige risico's overschatten of onderschatten op basis van hun persoonlijke of sociale voorkeuren. Bijvoorbeeld, het risico van een accidentele val kan worden onderschat door mensen die zich gezond en fit voelen, of overschat door mensen die angstig of depressief zijn. Risicoperceptie is de subjectieve inschatting van het risico. Risicoperceptie wordt beïnvloed door verschillende factoren, zoals emoties, waarden, normen, ervaringen, media, vertrouwen en kennis.

Het verschil tussen een kwantitatieve risico benadering en risicoperceptie kan leiden tot misverstanden, conflicten of weerstand bij het implementeren van maatregelen om het risico te verminderen of te beheersen. Daarom is het belangrijk om het risico niet alleen te presenteren met cijfers of contouren, maar ook met andere methoden die het publiek kunnen helpen om het risico te schatten of te vergelijken met andere bekende of relevante risico's. Bijvoorbeeld, het risico kan worden uitgedrukt in termen van de frequentie of de duur van de blootstelling, de waarschijnlijkheid of het aantal verwachte slachtoffers, de vergelijking met andere oorzaken van overlijden of ziekte, of de vermindering van de levensverwachting of de kwaliteit van leven. Het is echter belangrijk om te vermijden dat het risico wordt overdreven of gebagatelliseerd, of dat er onjuiste of misleidende informatie wordt gegeven. Het doel is om het publiek te informeren en te betrekken, niet om het te manipuleren of te overtuigen.

6.2 Vergelijk risico waterstof met andere risico's

Om het risico van waterstof te kunnen vergelijken met andere risico's en zorgvuldig te communiceren met betrokkenen, is het nuttig om te kijken naar de doodsoorzaken in Nederland. Volgens de statistiek van het Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS)⁷ waren er in 2022 ongeveer 170 duizend overledenen in Nederland, zoals weergegeven wordt in Figuur 22.

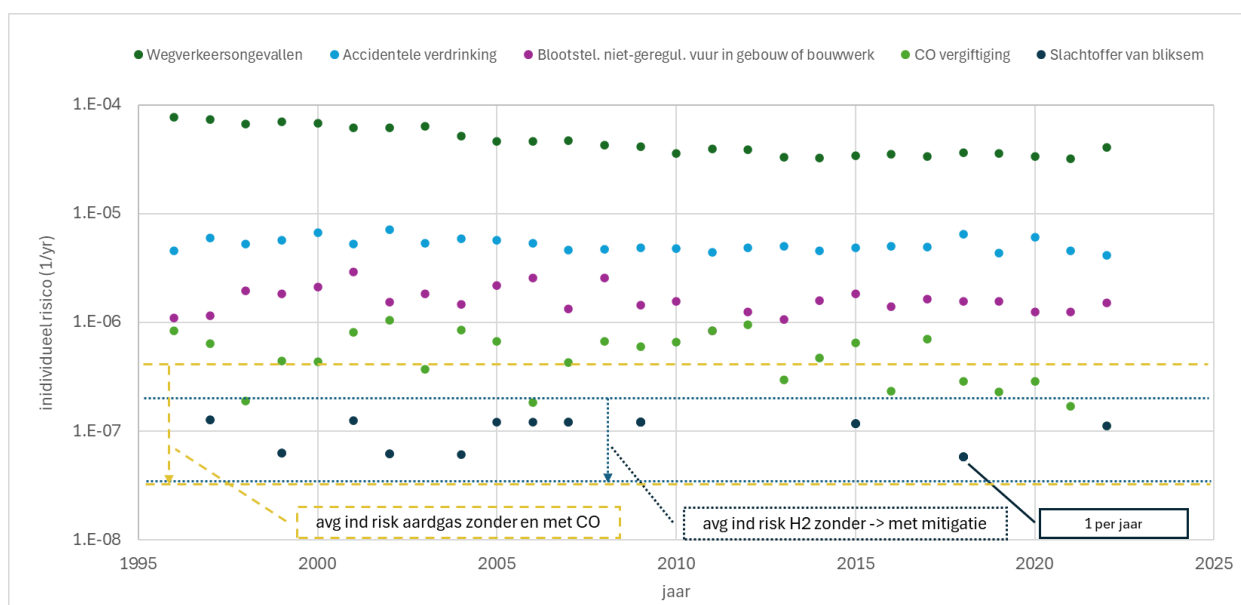


Figuur 22 Doodsoorzaken in Nederland in 2022 (bron: CBS)

Het overgrote deel is terug te voeren op ziekten of medische oorzaken. Daarnaast waren er ook ruim 10 duizend sterfgevallen door andere oorzaken waarvan een accidentele val de belangrijkste externe doodsoorzaak was. Volgens de definitie van de statistiek is een 'accidentele val' een ongeval waarbij iemand onopzettelijk valt, struikelt of uitglijdt. Overlijden door een accidentele val hangt samen met een hoge leeftijd en met bepaalde ziekten. Vooral bij mensen met dementie of een andere zogenaamde degeneratieve aandoening (ziekte van Alzheimer, ziekte van Parkinson of multiple sclerose) komen fatale vallen vaak voor. Uit de CBS-data blijkt dat vier op de tien mensen die in 2021 aan een accidentele val overleden één van deze aandoeningen als onderliggende dan wel bijdragende doodsoorzaak. Andere relatief grote overlijdensoorzaken zijn zelfdoding (ruim 1900) en verkeers- en vervoersongevallen (ruim 800).

In de QRA berekeningen voor de waterstof/aardgas voorbeeldwijk is het risico uitgedrukt in een gemiddeld individueel risico per jaar. Als we de ongevallen zoals gerapporteerd door het CBS delen door de totale bevolking wordt het individueel risico voor deze doodsoorzaken bepaald. Ter vergelijking met de uitkomsten van het model zijn een aantal van deze oorzaken weergegeven in Figuur 23. Er is daarbij statistiek voor de periode 1996 tot 2022 gebruikt.

⁷ <https://opendata.cbs.nl/#/CBS/nl/dataset/7233/table?dl=92F2D>



Figuur 23 Vergelijk verschillende individuele risico's in Nederland tussen 1996 en 2022. De gemiddelde plaatsgebonden risico's voor waterstof in woningen in de voorbeeldwijk zijn weergegeven met gestippelde lijnen voor zowel de referentiesituatie als een wijk met mitigerende maatregelen (sensor met automatische afsluiter van de gastoevoer). De gemiddelde plaatsgebonden risico's voor aardgas met en zonder het effect van CO vergiftiging worden als donkergele stippellijnen weergegeven. Merk op dat de y-as logaritmisch is.

Het individueel risico is op een logaritmische schaal geplott. Daarbij ontstaat een grotere spreiding naar mate er minder slachtoffers per jaar zijn, zoals goed te zien is bij de CO-vergiftiging en slachtoffers van bliksem. Bij deze laatste categorie zijn er ook jaren zonder slachtoffer, die niet weergegeven kunnen worden op een de logaritme schaal. Het berekende risico voor het gebruik van waterstof in de voorbeeldwijk is met twee gearceerde lijnen ingetekend. De bovenste lijn representeert de referentie situatie met een gemiddeld risico van $\sim 0.2 \times 10^{-6}$ /jaar. De onderste lijn laat de situatie zien met een gassensor met automatische sluiting van de toevoer, waarbij het individuele risico $\sim 0.05 \times 10^{-6}$ /jaar is. In vergelijking met andere oorzaken is het risico van waterstof in de voorbeeldwijk, zelfs zonder mitigerende maatregelen dus erg klein.

7 Conclusie

Kwantitatieve risicoanalyse om gevoel bij waterstofveiligheid in de gebouwde omgeving te krijgen

Om de risico's van het gebruik van waterstof in distributie- en transportnetwerken te kunnen beoordelen in vergelijking met aardgas, is het essentieel om de verschillen in kans en gevolg te begrijpen. De kans betreft de mogelijkheid dat een gevaarlijke situatie zich voordoet, terwijl de gevolg zich vertaalt naar schade door brand of explosie. Mitigerende maatregelen zijn gericht op het verkleinen van de kans op gevaarlijke situaties of het verminderen van de gevolgen ervan. Binnen het HyDelta-programma is hiervoor het werkpakket 'Waterstof en Veiligheid' opgezet, met als hoofddoelstelling:

Het in kaart brengen van risico's met betrekking tot het gedrag van waterstof bij lekkages in woningen en in het distributienet, en op basis van deze risico's beheersmaatregelen definiëren.

Om de risico's van waterstof in het Nederlandse distributienet te verkennen, is een kwantitatieve risicoanalyse (QRA) uitgevoerd. Deze analyse vergelijkt de risico's tussen het huidige aardgasdistributiesysteem en het mogelijke toekomstige waterstofdistributiesysteem. De totale risicobeoordeling omvat risico's die ontstaan door lekken in zowel het distributienet als in de binneninstallatie in de woning. De resultaten van deze analyse geven een kwantitatieve basis bieden om te beoordelen of de waterstofdistributie meer risico voor de maatschappij met zich meebrengt en welke maatregelen het meeste effect hebben om deze risico's te beperken.

Risico's zijn klein, maar wat is klein?

Gegeven de benadering van de werkelijkheid op basis van hiervoor genoemde aannames levert het model een benadering van het plaatsgebonden risico in de woning ten gevolge van een brand of explosie. Een veelgebruikte maatstaf voor het plaatsgebonden risico is de 10^{-6} contour, wat betekent dat de kans op een dodelijk ongeval binnen een bepaald gebied rond de activiteit gelijk is aan 1×10^{-6} , of één op een miljoen, per jaar. Dit wordt algemeen beschouwd als een aanvaardbaar of verwaarloosbaar risico. Alle berekende plaatsgebonden risico's in deze studie voor zowel aardgas als waterstof blijven ver onder de 1×10^{-6} per jaar en geven daarmee een zeer beperkt risico.

Een vaak voorkomende uitdaging bij het uitleggen van een kwantitatieve risicobenadering is dat het publiek vaak moeite heeft om de ernst van een risico te begrijpen of het met andere risico's te vergelijken. Voor veel mensen is een 1×10^{-6} contour een abstract en moeilijk te visualiseren concept dat niet eenvoudig te relateren is aan hun eigen situatie of ervaringen. Bovendien heeft het publiek uiteenlopende percepties van wat een acceptabel of verwaarloosbaar risico is, afhankelijk van de aard, context en voordelen van de activiteit. Zo kunnen sommige mensen bereid zijn om een hoger risico te accepteren voor een door henzelf gekozen activiteit, zoals roken of autorijden, dan voor iets waar ze geen invloed op hebben, zoals een chemische fabriek of kerncentrale in de buurt. Risicoperceptie, of de subjectieve inschatting van risico, wordt beïnvloed door verschillende factoren zoals emoties, waarden, normen, ervaringen, media, vertrouwen en kennis.

Het verschil tussen een kwantitatieve risicobenadering en risicoperceptie kan leiden tot misverstanden of weerstand bij de uitvoering van maatregelen om risico's te verminderen of te beheersen. Daarom is het belangrijk om risico's niet alleen met cijfers of grafieken te presenteren, maar ook via andere methoden die het publiek helpen om risico's in te schatten of te vergelijken met andere bekende of relevante risico's. Bijvoorbeeld, risico's kunnen worden weergegeven in termen van aantal verwachte slachtoffers, vergelijking met andere oorzaken van ziekte of overlijden. Het is echter van essentieel belang om te vermijden dat risico's worden overdreven of gebagatelliseerd, en om onjuiste of

misleidende informatie te vermijden. Het doel is om het publiek te informeren en te betrekken, niet om hen te manipuleren of beïnvloeden.

De berekende risico's voor het gebruik van waterstof in de voorbeeldwijk in het referentie scenario zonder aanvullende risicoverlagende maatregelen is $\sim 0.2 \times 10^{-6}$ /jaar. Bij de meest effectieve risicobeperkende maatregel in deze studie, wordt dit risico verlaagd tot $\sim 0.05 \times 10^{-6}$ /jaar is. De grootte van deze risico's ligt in de zelfde orde als het aantal slachtoffers van blikseminslag in de afgelopen jaren. De koolmonoxidevergiftiging slachtoffers zijn een factor twee groter ten opzichte van de referentie situatie (0.4×10^{-6} /jaar). Jaarlijks komen er ongeveer 10x zoveel mensen om door branden in gebouwen (2×10^{-6} /jaar) of 25x zoveel door accidentele verdrinking (5×10^{-6} /jaar). De wegverkeersslachtoffers liggen ongeveer 250x zo hoog (50×10^{-6} /jaar). Vergelijk met andere oorzaken van overlijden is het risico van waterstof (en aardgas) in de gebouwde omgeving dus erg klein⁸.

Ook al zijn de risico's gering, de perceptie ervan kan door initiële incidenten snel veranderen. Het is daarom van belang om bij de introductie van nieuwe technologie, zoals bijvoorbeeld waterstof in de gebouwde omgeving in pilot projecten, gedegen te werk te gaan. Bij nieuwe technologie is immers nog geen statistiek opgebouwd over het falen van deze technologie, wat kan leiden tot ongelukken. Door bij de introductie een groot aantal extra veiligheidsmaatregelen te implementeren, kan bij het grote publiek echter ook de perceptie ontstaan dat de nieuwe technologie inherent onveilig is. Het is daarom belangrijk om gevoel te krijgen bij de grootte van de risico's en bijdrage van verschillende maatregelen in de reductie van dit risico.

Een simulatie van de risico's voor een voorbeeldwijk geeft inzicht

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 tweede fase van HyDelta is het model verder vertaald en zijn de uitkomsten gevalideerd tegen de historische gegevens beschikbaar van aardgas. In deze tweede fase is de 'Voorbeeldwijk' geïntroduceerd als casestudie voor een typische woonwijk waar waterstof toegepast kan worden. In de derde, huidige fase van HyDelta wordt specifiek gekeken naar het effect van mitigerende maatregelen op het risico en is ervoor gekozen voort te bouwen op de eerdergenoemde 'Voorbeeldwijk'. De gebruikte modellen maken gebruik van doorgaande ontwikkeling van het model in het VK.

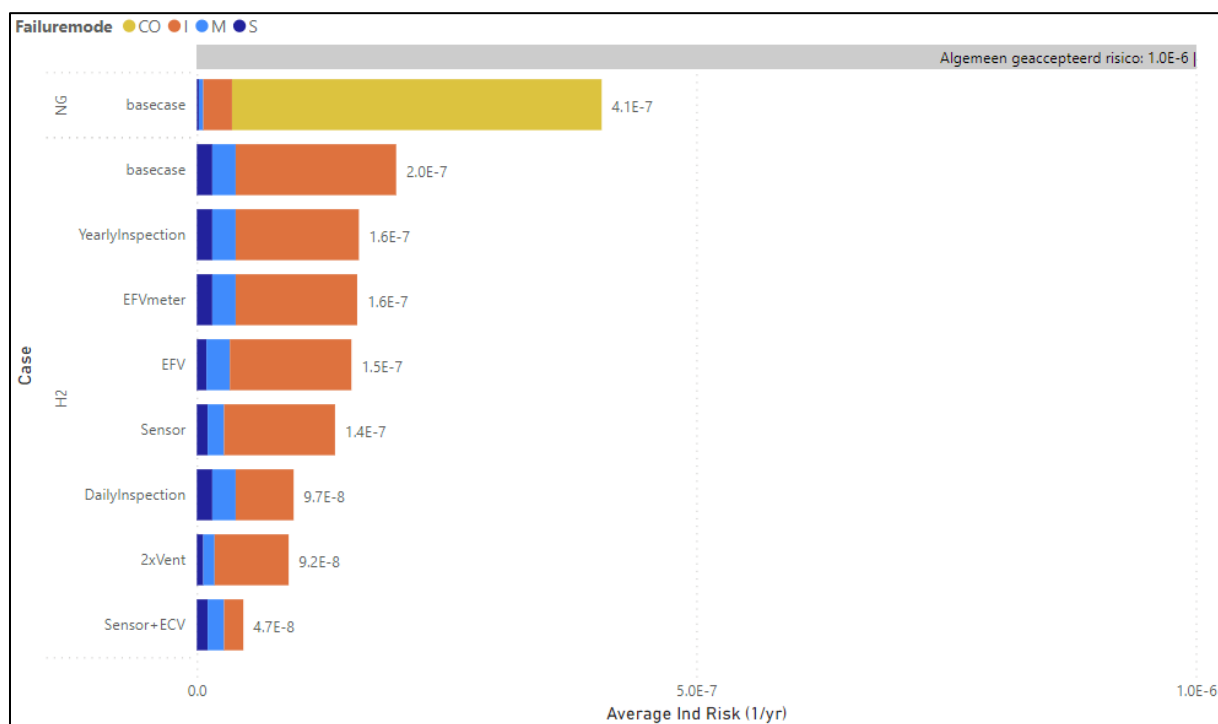
Om een beter inzicht te krijgen in de relatieve effecten van de lekkages achter de meter en vanuit het distributienet is een representatieve voorbeeldwijk doorgerekend. Deze wijk bestaat uit 57 woningen die verbonden zijn aan een 100 mbar hoofdleiding middels aansluitleidingen. Het 100 mbar net wordt 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 twee-onder-één-kapwoningen. Daarnaast is voor elk van de woningen ook het risico door lekkages achter de meter bepaald. Op basis van faalfrequenties in de woning, blijkt dat het plaatsgebonden risico voor aardgas door lekkages achter de meter goed overeenkomt met de (beperkte) praktijkdata.

⁸ Een andere manier om gevoel bij een risico van 2×10^{-7} te geven: de kans is ongeveer even groot als de kans om 22x achter elkaar kop te gooien met een munt.

Uit de analyse blijkt dat het plaatsgebonden risico voor waterstof groter is dan voor aardgas door heftigere explosies, maar kleiner als het risico door koolmonoxidevergiftiging wordt meegenomen. Koolmonoxidevergiftiging is een veelvoorkomend gevolg van onvolledige verbranding van aardgas, maar niet van waterstof. 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.

Verschillende mitigerende maatregelen mogelijk met verschillend effect

In de studie zijn een aantal maatregelen doorgerekend. Deze maatregelen kunnen effect hebben op de kans van optreden van een lek, bijvoorbeeld door regelmatige inspectie van de leidingen en apparatuur, of het beperken van de gevolgen van een lekkage. Voor de regelmatige inspectie is onderscheid gemaakt in een jaarlijkse check van de installatie, waarbij een reductie van de kans op spontane lekkage van 20% wordt aangenomen, en een automatische dagelijkse inspectie met een reductie van 80% van de kans op spontane lekkage. Voor het beperken van de gevolgen van een lekkage valt te denken aan gasstoppers ('EFV'), sensoren of het verhogen van de ventilatie.



Figuur 24 Overzicht bijdrage individuele maatregelen op het risico van waterstof in vergelijking met aardgas. Het risico is uitgesplitst naar het aandeel door lekkages in het distributienet (M en S), de binneninstallatie (I) en CO.

Bovenstaand figuur geeft een overzicht van de bijdragen van de maatregelen. In deze figuur wordt de berekende reductie van het risico van de maatregelen weergegeven. Uiteraard moet opgemerkt worden voor het bepalen van de gewenste maatregelen niet alleen de berekende reductie van het risico van belang is maar ook de maatschappelijke impact, kosten en betrouwbaarheid een belangrijke rol spelen. Een vroege automatisch detectie van een lek met een sensor die automatisch de toevoer doet sluiten lijkt de meest effectieve maatregel waarbij het risico het berekende risico van aardgas zonder CO-bijdrage benadert. De regelmatige inspectie met een reductie van 80% van de spontane lekken geeft een vergelijkbaar risico als een verdubbeling van de ventilatievoud in de woning. Beide realiseren een reductie van ruim 50% ten opzichte van de referentiewaarde. De gasstopper met een

aanspreekwaarde van 20 m³/uur en de installatie van een waterstofsensoren met alarmsignaal geven een reductie van 20-30% ten opzichte van de referentie.

Bij het modelleren van de maatregelen wordt aangenomen dat alle maatregelen 100% effectief zijn. Dat wil bijvoorbeeld zeggen dat elke gasstopper altijd dicht valt bij een overschrijding van de maximale flow en dat elke concentratie boven de grenswaarde gedetecteerd wordt door de sensor op de plek waar deze opgehangen is. Voor het realiseren van de genoemde maatregelen in de praktijk dient echter wel rekening gehouden te worden met een onzekerheid in deze effectiviteit. Enkele maatregelen liggen in het domein van de netbeheerders, zoals de gasstopper, veel van de andere maatregelen zullen in de woning geplaatst worden en zijn daarmee de verantwoordelijkheid van de huiseigenaar. Dit betekent dat naast de geschatte reductie op het risico, de maatregelen elk ook hun eigen voor- en nadelen hebben. In onderstaande tabel worden deze voor- en nadelen per maatregel opgesomd.

Maatregel	Risicoreductie (% t.o.v. referentiewaarde)	Voordelen	Nadelen
Verdubbelen ventilatie woning	54%	- Effectieve maatregel	- Lage controleerbaarheid - Vergroot warmtevraag
Verhoogde inspectie uitvoeren	19%	- Beperkte impact voor de woning - Kan gecombineerd worden met ketel inspectie	- Beperkt effect - Vergt veel inspecties (personeel en daarmee hoge kosten) - Regelgeving aanpassen voor toegangsmogelijkheden
Automatische inspectie installeren	51%	- Effectieve maatregel - Beperkte impact voor de woning	- Storingsgevoeligheid en betrouwbaarheid moeten aangetoond worden -
Gasstopper plaatsen bij de gas meter(20m ³ /uur)	20%	- Beperkte impact voor de woning, niet zichtbaar - Goedkope oplossing - Ook effect bij opzettelijke lekkages	- Beperkt effect - Nog geen standaard oplossing
Gasstopper plaatsen op het zadel	22.5%	- Beperkte impact voor de woning, niet zichtbaar - Ook effect bij opzettelijke lekkages	- Gering extra effect t.o.v. gasstopper bij de meter - Duurdere, arbeidsintensieve oplossing
Gassensor met alarm in de woning plaatsen	31%	- Goedkope, algemeen geaccepteerde oplossing	- Beperkt effect - Bewoner verantwoordelijk (batterijen vervangen etc.)
Gassensor + automatische afsluiter in de woning plaatsen	77%	- Zeer effectief	- Conceptueel, nog niet op de markt. Storingsgevoeligheid en betrouwbaarheid moet aangetoond worden - Privacy issues (op afstand kunnen afsluiten)

Tenslotte wordt opgemerkt dat het doel van deze studie was een kwantitatieve basis te bieden voor de risico's van waterstof in de gebouwde omgeving en het effect van mitigerende maatregelen daarop

te verkennen. Het doel is niet om mitigerende maatregelen op te leggen. De beschreven voor- en nadelen van de individuele maatregelen zullen per situatie afgewogen moeten worden. Daarnaast is het van belang om de komende periode in de pilotprojecten ervaring op te doen met waterstof als energiedrager voor de gebouwde omgeving en de effectiviteit van maatregelen verder te onderzoeken.

8 Referenties

- [1] H. J. M. Rijpkema and S. Delnooz, “D1A.1 Insights from the Hy4Heat and H21 projects, translated to the Dutch situation,” HyDelta, 2022.
- [2] A. van den Noort and V. Zwanenburg, “D6A.2 & D6A.3 Quantitative Risk Assessment of the distribution grid and built environment in the Netherlands: application and case studies.,” HyDelta, 2023.
- [3] DNV, “H21, QRA model for hydrogen gas distribution networks,” DNV report 10078380-2 Rev 0, 2020.
- [4] DNV, “H21, Risk predictions for hydrogen gas distribution networks,” DNV report 10078380-2 Rev 0, 2020.