

# HyDelta 2

## **WP5 – Safe operations of the high-pressure transmission grid**

D5.2 – Rapport over veilig afsluiten en evacueren van hogedruk waterstofpijpleidingen en -installaties voor onderhoudsdoeleinden.

Status: finaal

## Document samenvatting

### Corresponderende auteur

Corresponderende auteur	Pieter Wolff
Verbonden met	DNV
E-mailadres	Pieter.Wolff@dnv.com

### Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzigingen
1	12 mei 2023	Robert Mellema Dennis van Putten Pieter Wolff	DNV	1 <sup>e</sup> Conceptversie
2	27 juni 2023	Robert Mellema Dennis van Putten Pieter Wolff	DNV	2 <sup>e</sup> Conceptversie
3	29 juni 2023	Robert Mellema Dennis van Putten Pieter Wolff	DNV	Concept tbv Supervisory Group
4	19 juli 2023	Robert Mellema Dennis van Putten Pieter Wolff	DNV	Conceptvertaling naar Nederlands

### Verspreidingsniveau

<b>PU</b>	Publiek	X
<b>RE</b>	Beperkt tot Projectpartners inclusief Expert Assessment Group Externe entiteit met wie een geheimhoudingsplicht bestaat	

### Document review

Partner	Naam
Stedin	Gilles de Kok
Gasunie	Martin van Agteren
Gasunie	Martin Heren
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC, Hanze	HyDelta Supervisory Group

## Summary

Maintenance on high-pressure hydrogen pipelines, such as the Hydrogen Network Netherlands needs strategic consideration and planning. In this report, we provide an overview of the guidelines and methodology for isolating and evacuating a high-pressure pipeline or installation for a maintenance operation. The dialogues with various experts from the hydrogen gas industry provided a diverse range of perspectives and knowledge, helping to validate the nuances of different methodologies better. The general methodology of the maintenance procedure consist out of a few steps:

1. Identify the sections that need maintenance
2. Isolate the section that needs maintenance, utilizing valve schemes or stopples
3. Depressurize the system
4. Evacuate hydrogen with nitrogen, utilizing pigging, purging, or dilution techniques
5. Ensure secondary isolation and a bleed mechanism is in place
6. Execute maintenance operations
7. Flush the maintenance area with nitrogen before reintroducing hydrogen

The different evacuation and isolation methods impose slightly different methodologies, which will be explored in this report.

When isolating between valve schemes, evacuation with a separation PIG minimizes the mixing of hydrogen and nitrogen. The report discusses leakage rates along the pig for different types of pigs. These rates will be approximately 20-30% higher for hydrogen operations compared to using natural gas. Although the leakage is higher, the amount of back mixing is still very limited compared to the other techniques described in this report. Separation pigs will have an increased stick-slip behaviour since the reduction of the acoustic impedance increases 3 to 4 times. However, valve schemes with pigging facilities can be typically distanced 50 km to 100 km apart, this method requires closing down a large section of the pipeline. The process of pigging becomes less feasible for very long pipelines due to the large loss of gas volume and possible disruption of flow from suppliers and to industrial consumers.

If it is not feasible to start a pigging operation over a large section of pipeline due to loss of large volumes of hydrogen, a smaller section, between two valve schemes without the necessary facilities to perform a pigging operation, can be isolated and evacuated by performing a purge or dilution-based purge with nitrogen gas. The section cannot always be evacuated by purging due to physical constraints, such as stratification or the presence of dead volumes, dilution can be used to lower the concentration of hydrogen gas till acceptable levels. Evacuation by displacement or purging has its challenges, especially for long pipeline sections where stratification can occur. The minimum velocity requirements to prevent stratification for hydrogen and natural gas are computed and show that the velocity requirements are higher for hydrogen. The diffusion fronts of hydrogen and natural gas are computed in this report, demonstrating that the diffusion front length is velocity-independent and results in approximately equal volumes of remaining gas-air mixtures at different velocities. The distance of these valve schemes varies within the network, but can be up to up to 50 km apart. When these distance between valve schemes is high, the amount of hydrogen volume lost can still be quite large.

When it is more feasible to isolate and evacuate a smaller section, stopples can be installed to provide temporary isolation. Sections isolated with stopples can be sufficiently small to allow for the installation of a bypass, thus ensuring the continuity of gas flow to preserve gas supply within the hydrogen network.. The current procedures used for the natural gas network will not suffice for the hydrogen network, since they do not provide a double block and bleed. Alternatives techniques, such

as hydraulic stopples or a stopple train, due provide a double block and bleed and are discussed. These alternative techniques will need different equipment than the equipment currently in use and will need further research before applied in the field.

In complex systems or installations, such as the hydrogen storage facility HyStock, it is impossible to avoid dead volumes or spaces where the hydrogen flow is limited in the installation. Here, a dilution-based purge should be used. Alternating the pressure in the spaces with restricted gas exchange can also contribute in achieving a suitable dilution-based purge. Although this method will use an increased amount of nitrogen since it requires multiple purge-cycles for a successful purge, theoretical analyses and experimental data indicated that pockets of hydrogen would mix more efficiently with nitrogen compared to natural gas pockets, approximately 3.8 times faster.

These isolation methods and their preferred evacuation methods are described in the report. Table 9-1 shows an overview of the different techniques used.

*Table 9-1 Summary of advantages and disadvantages of different isolation and preferred evacuation techniques*

Isolated section	Preferred evacuation technique	Advantages	Disadvantages
Between valve schemes with pigging facilities (50~100 km distance)	Purging with a separation PIG	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Minimizes the mixing of hydrogen and nitrogen</li> <li>-No stratification problems and smaller diffusion front</li> <li>-Evacuation method is similar to natural gas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Large loss of gas volume</li> <li>-possible disruption of suppliers and industrial consumers</li> <li>-Higher flowrates along the pig w.r.t. natural gas pigging</li> </ul>
Between valve schemes without pigging facilities (10~50 km distance)	Purging	<ul style="list-style-type: none"> <li>-No disruption of suppliers and industrial consumers</li> <li>-Evacuation method is similar to natural gas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Possible large loss of gas volume</li> <li>-Stratification issues will arise more often w.r.t. natural gas</li> </ul>
Installing temporary seal with stopple	Purging	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Limited loss of gas volume</li> <li>-Possibility to install temporary bypass</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Current evacuation methods used for natural gas will not suffice</li> <li>-More research needed on stopple trains and hydraulic stopples</li> </ul>
Valve schemes (installation, complex piping systems)	Dilution-based purge	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Can be applied in many cases</li> <li>-More effective hydrogen dilution w.r.t. to natural gas dilution.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Multiple cycles of nitrogen purging needed before successful purge.</li> </ul>

## Samenvatting

Onderhoud aan hogedruk waterstofpijpleidingen, zoals het Waterstofnetwerk Nederland, vereist strategische overweging en planning. In dit rapport geven we een overzicht van de richtlijnen en methodologie voor het afsluiten en evacueren van een hogedrukpijpleiding of installatie voor een onderhoudsoperatie. Dialogen met diverse experts uit de aardgas- en waterstofgasindustrie leverden een breed scala aan perspectieven en kennis op, die hielpen om de nuances van verschillende methodologieën beter te valideren. De algemene methodologie van de onderhoudsprocedure bestaat uit enkele stappen:

1. Identificeer de sectie die onderhoud nodig hebben
2. Sluit de sectie die onderhoud nodig heeft af, met behulp van afsluiterschema's of stoppels
3. Verlaag de druk in het systeem
4. Verdring waterstof met stikstof, met behulp van een pig, verdringing, of verdunningstechnieken
5. Zorg voor secundaire afsluiting en een ontluchtingsmechanismes
6. Voer onderhoudswerkzaamheden uit
7. Spoel het onderhoudsgebied met stikstof voordat je opnieuw waterstof introduceert

De verschillende afsluit- en evacuatiemethoden vereisen enigszins verschillende methodologieën, die in dit rapport worden onderzocht.

Wanneer er afsluiting tussen afsluiterschema's plaatsvindt, kan waterstof verdrongen worden met behulp van een scheidingspig om de vermenging van waterstof en stikstof te minimaliseren. De lekkage door stroming langs verschillende types pigs zal ongeveer 20-30% hoger zal zijn voor waterstofoperaties (in vergelijking met het gebruik van aardgasoperaties). Hoewel de lekkage hoger is, is de hoeveelheid terugmenging nog steeds zeer beperkt in vergelijking met de andere technieken die in het rapport worden beschreven. Scheidingspigs zullen een verhoogd stick-slip gedrag vertonen bij waterstofleidingen, omdat de akoestische impedantie 3 tot 4 keer toeneemt. Afsluiterschema's met piggingfaciliteiten kunnen meer dan 50 km uit elkaar geplaatst zijn. Dit betekent dat er een groot deel van de pijpleiding moet worden gesloten. Het gebruik van een scheidingpig wordt minder haalbaar voor zeer lange pijpleidingen vanwege het grote verlies aan gasvolume en de mogelijke onderbreking van levering van- leveranciers en naar industriële verbruikers.

Als het niet haalbaar is om een pigging-operatie te starten over een groot stuk pijpleiding vanwege het verlies van grote volumes waterstof kan er een kleiner leidingdeel, tussen twee afsluitschema's zonder de nodige faciliteiten voor een pigging-operatie, afgesloten worden. Verdringing of verdunningstechnieken met stikstofgas kunnen gebruikt worden om de waterstof te evacueren. De sectie kan niet altijd worden geëvacueerd door verdringing vanwege fysische beperkingen, zoals stratificatie of de aanwezigheid van dode volumes. In dat geval kan verdunning gebruikt worden om de concentratie waterstofgas te verlagen tot aanvaardbare niveaus. Evacuatie door verdringing heeft zijn uitdagingen, vooral voor lange pijpleidingsecties waar stratificatie kan optreden. De minimale snelheidseisen om stratificatie voor waterstof en aardgas te voorkomen, worden berekend en tonen aan dat de snelheidseisen hoger zijn voor waterstof. De diffusiefronten van waterstof en aardgas zijn berekend in dit rapport, waaruit blijkt dat de lengte van het diffusiefront snelheidsonafhankelijk is en resulteert in ongeveer gelijke volumes van overgebleven gas-luchtmengsels bij verschillende snelheden. De afstand van deze klepschema's varieert binnen het netwerk, maar kan tot wel 50 km uit elkaar liggen. Wanneer deze afstand tussen klepschema's hoog is, kan de hoeveelheid verloren waterstofvolume nog steeds vrij groot zijn.

Wanneer het voordeliger is om een kleinere leidingsectie te evacueren, kan de leiding afgesloten worden door tijdelijke stoppels te plaatsen. Secties die afgesloten zijn met stoppels zijn vaak klein genoeg zijn om een bypass te installeren, waardoor de continuïteit van de gaslevering binnen het waterstofnetwerk gewaarborgd kan worden. blijft. De huidige onderhoudsprocedures, gebruikt bij onderhoud met stoppel, die gebruikt worden voor het aardgasnetwerk zijn niet voldoende voor het waterstofnetwerk, omdat ze geen double block and bleed bieden. Alternatieve technieken, zoals hydraulische stoppels of een stoppeltrein, bieden wel een dubbele block and bleed en worden besproken in het verslag. Deze alternatieve technieken zullen ander apparatuur nodig hebben dan momenteel gebruikt wordt en de technieken vereisen meer onderzoek voordat ze in het veld kunnen worden toegepast.

In complexe systemen of installaties, zoals de waterstofopslagfaciliteit HyStock, zijn veel dode volumes of ruimtes waar de waterstofstroom beperkt is. Hier moet een verdunning-gebaseerde verdringing worden gebruikt. Het afwisselen van de druk in de ruimtes met beperkte gasuitwisseling kan bijdragen om een geschikte verdunning-gebaseerde verdringing sneller te bereiken. Hoewel deze methode een verhoogde hoeveelheid stikstof zal gebruiken omdat het meerdere verdringingscycli vereist voor een succesvolle verdringing, tonen theoretische analyses en experimenteel onderzoek aan dat waterstofvolumes ongeveer 3.8 keer sneller mengen met stikstof in vergelijking met aardgasvolumes.

Tabel 9-1 Overzicht van de voordelen en nadelen van verschillende afsluit- en evacuatietechnieken

Afgesloten sectie	Voorkeurs-evacuatietechniek	Voordelen	Nadelen
Afsluitschema's met pig-voorzieningen (50~100 km afstand)	Verdringing met een scheidingpig	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimaliseert de vermenging van waterstof en stikstof</li> <li>- Geen stratificatieproblemen en kleinere diffusiefront</li> <li>- Evacuatiemethode is vergelijkbaar met aardgas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Groot verlies van gasvolume</li> <li>- Mogelijke leveringsonderbreking leveranciers en industriële consumenten</li> <li>- Grotere lekkage langs de pig t.o.v. aardgas</li> </ul>
Afsluitschema's zonder pig-voorzieningen (10~50 km afstand)	Verdringing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geen verstoring van leveranciers en industriële consumenten</li> <li>- Evacuatiemethode is vergelijkbaar met aardgas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mogelijk groot verlies van gasvolume</li> <li>- Stratificatieproblemen zullen eerder voorkomen t.o.v. aardgas</li> </ul>
Tijdelijke afsluiting met installeren van een stoppel	Verdringing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beperkt verlies van gasvolume- Mogelijkheid om een tijdelijke bypass te installeren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huidige evacuatiemethoden gebruikt voor aardgas zullen niet volstaan</li> <li>- Meer onderzoek nodig naar stoppeltreinen en hydraulische stoppels</li> </ul>
Afsluitschema's schemes (installatie, complexe leidingsystemen)	Verdunning	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kan in meeste situaties worden toegepast</li> <li>- Meer effectieve waterstofverdunning t.o.v. aardgas verdunning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meerdere cycli van stikstof verdringing nodig voordat succesvolle verdringing</li> </ul>

## Inhoud

Summary .....	3
Samenvatting.....	5
1 Achtergrond.....	8
2 Stappenoverzicht voor onderhoud aan waterstofinfrastructuur.....	9
3 Bepaling van gebruikte isolatie- en evacuatietechnieken.....	12
4 Onderhoudswerkzaamheden met scheidingspig .....	15
4.1 Drukverschillen en lekkages van een PIG .....	16
5 Onderhoudswerkzaamheden tussen afsluiterschema's zonder pig voorzieningen .....	18
5.1 Kritische snelheid.....	20
5.2 Difussiefront .....	23
6 Onderhoudsoperatie met stoppels .....	24
7 Evacueren van complexe systemen, installaties of moeilijk verdringbare pijpleidingen.....	26
8 Monitoring.....	29
9 Aanbevelingen .....	30
10 Appendix.....	32
11 Appendix.....	32
A Physical Effects on the various hydrogen evacuation techniques .....	32
A.1 Physical properties: .....	33
A.2 Evacuation by purging.....	35
A.3 Evacuation by PIG usage .....	42
B Notulen discussiepanel evacueren en vullen van waterstofleidingen .....	48
C Research questions.....	52
References.....	54

## 1 Achtergrond

Nederland, net als de rest van de wereld, staat voor de aanzienlijke uitdaging om over te stappen op een CO<sub>2</sub>-neutrale energievoorziening. Een van de vormen van energie die hieraan zal bijdragen is waterstof. CO<sub>2</sub>-vrije gassen zoals groene waterstof zijn essentieel voor de verduurzaming van de industrie en consumentenmarkt.

Tussen 2025 en 2030 zal Gasunie het Waterstofnetwerk Nederland in gebruik nemen, een hogedruk waterstof infrastructuur. Dit waterstofnetwerk zal van vitaal belang zijn om het gebruik van waterstof in Nederland op te schalen. Dit systeem zal verbonden worden met meerdere industriële gebieden en mogelijk regionale distributienetten, waardoor een breder gebruik van waterstof als schone en duurzame energiebron mogelijk wordt. Het hogedruk Waterstofnetwerk Nederland is ontworpen als een enkelvoudig ringnetwerk met meerdere locaties voor waterstoftoevoer.

Zowel de Transmissie Systeembeheerder (TSO) als de Distributie Systeembeheerders (DSO's) zullen hun infrastructuur moeten aanpassen om het transport en de distributie van waterstof te accommoderen. Wanneer de infrastructuur is aangepast om waterstof te accommoderen, zullen zowel de TSO als de DSO's een cruciale rol spelen in het beheren en onderhouden van de installaties en pijpleidingen die waterstof transporteren en distribueren. De TSO is verantwoordelijk voor het beheer van de hogedruktransmissiepijpleidingen die waterstofproductiebronnen verbinden met grote industriële gebieden en regionale distributienetten. Dit houdt in dat er verschillende onderhoud- en reparatiewerkzaamheden aan de pijpleidingen worden uitgevoerd, om ervoor te zorgen dat ze veilig en efficiënt geëxploiteerd kunnen worden. Aan de andere kant zullen de DSO's verantwoordelijk zijn voor het beheer van de distributiepijpleidingen die waterstof distribueren naar de kleinere industrieën en consumenten binnen hun servicegebied. Ze zullen verantwoordelijk zijn voor het veilig en betrouwbaar leveren van waterstof aan huizen en bedrijven en daarbij ook verantwoordelijk zijn voor het uitvoeren van onderhoud en reparaties aan de distributiepijpleidingen.

Om onderhoud aan leidingen en installaties uit te voeren, is het soms nodig om specifieke delen van de pijpleiding of installatie af te sluiten en te evacueren. De TSO en DSO's moeten richtlijnen volgen die voldoen aan de veiligheidsvoorschriften en -normen. Voor aardgassystemen zijn deze richtlijnen en procedures welomschreven en worden ze beheerd door brancheorganisaties en regelgevende instanties. Dit onderzoek beoogt de technische stappen te herzien die nodig zijn wanneer een hogedruk waterstofpijpleiding of installatie buiten bedrijf wordt gesteld en/of opnieuw in bedrijf wordt gesteld voor onderhoud. Het onderzoek is erop gericht om uitdagingen en overwegingen te identificeren en aan te pakken die zich voordoen bij het werken met hogedruk waterstofpijpleidingen of installaties, in tegenstelling tot aardgaspijpleidingen en installaties. Een deel van de conclusies voor hogedruk systemen zal ook inzichtelijke toepassingen hebben voor onderhoudstechnieken die toepasbaar zijn in het distributienetwerk met lagere drukklassen.

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het nationale onderzoeksprogramma, HyDelta. Dit programma is gericht op de veilige integratie van waterstof in de bestaande infrastructuur voor gastransport en distributie. Het primaire doel is het overwinnen van barrières voor innovatieve waterstofprojecten, en zo de vooruitgang van waterstoftechnologieën te bevorderen.



## 2 Stappenoverzicht voor onderhoud aan waterstofinfrastructuur

Er zijn weinig referenties of ervaringen beschikbaar in de literatuur over onderhoudswerkzaamheden aan hogedrukleidingen of installaties voor het transport van waterstof. Om deze kloof te dichten, zal dit onderzoek proberen richtlijnen op te stellen voor operationele procedures op basis van de kennis en ervaringen binnen zowel de aardgas- als de waterstofindustrie. De genoemde richtlijnen en operationele procedures worden aangevuld met enkele theoretische vergelijkingen die de verschillende fysische effecten tussen waterstof- en aardgasafvoer beschrijven. De richtlijnen zijn ontwikkeld door middel van gezamenlijke discussies met industriële experts en onderzoek van de huidige technieken.

Dit omvat verschillende methoden om een waterstofleiding en installaties af te sluiten of evacueren, met essentiële overwegingen voor de veilige en efficiënte evacuatie van waterstofleidingen. Deze richtlijnen voor operationele procedures zijn voornamelijk gericht op de door de TSO geëxploiteerde hogedrukinfrastructuur. Echter, sommige van de beschreven praktijken kunnen ook inzicht geven in onderhoudswerkzaamheden voor leidingen in andere drukklassen. Het onderzoek naar sommige fysische effecten bij het evacueren van waterstof (ten opzichte van de evacuatie van aardgas) biedt inzichten die van toepassing zijn op zowel TSO's als DSO's.

Een leiding of installatie kan om vele redenen onderhoud nodig hebben, zoals vervanging van secties, toevoegingen van vertakkingen, of noodsituaties. Er moet extra aandacht besteed worden aan vragen gerelateerd aan het veiligheidsrisico dat wordt veroorzaakt door ontsteking als gevolg van de interactie van waterstof met lucht, wat een uitdaging vormt binnen waterstofinfrastructuur: Om het risico op ontsteking tijdens onderhoudswerkzaamheden aan de waterstofinfrastructuur te beperken, is het cruciaal om waterstof met een inert gas, zoals stikstof, te verwijderen. Wanneer lucht wordt geïntroduceerd in het systeem tijdens de onderhoudsoperatie, moet ook de lucht met stikstof verwijderd worden, waardoor het contact van waterstof met lucht binnen de waterstofinfrastructuur wordt beperkt.

Deze sectie zal algemene stappen bieden die moeten worden genomen om veilig onderhoud uit te voeren aan waterstofleidingen of installaties. Sectie 3 zal een overzicht bieden van verschillende situaties en bijbehorende evacuatietechnieken. Een meer diepgaande analyse van de verschillende methoden voor specifieke situaties zal worden gegeven in secties 4 tot 7. Sectie 8 zal een achtergrond geven aan analytisch meetinstrument die gebruikt kunnen worden om de gasconcentratie tijdens onderhoudsoperaties te monitoren.

### 1. Identificeer de secties die onderhoud nodig hebben en welk deel geïsoleerd moet worden

Voordat een evacuatie kan beginnen moeten de pijpleidingsecties of installatie, die geëvacueerd wordt, geïdentificeerd en geïsoleerd worden. Het doel van de operatie, zoals het repareren van een gedeelte van de leiding, kan invloed hebben op welke gebieden moeten worden geëvacueerd. De sectie moet in kaart worden gebracht om rekening te houden met welke vertakkingen, bypasses, hevels, enz. aanwezig zijn om te bepalen of de leiding of installatie geschikt is om te worden geëvacueerd met behulp van een scheidingspig of dat er alternatieve methoden voor het evacueren moeten worden gebruikt. Bovendien moeten eindgebruikers in de buurt van de onderhoudslocatie in kaart worden gebracht om te bepalen welke sectie geïsoleerd kan worden zodat eindgebruikers operationeel blijven. Aangezien het netwerk meerdere toegangspunten zal hebben voor waterstofleveranciers, kan de waterstof in meerdere richtingen stromen, maar tijdens de initiële bouwfase is de ring mogelijk nog niet volledig verbonden, wat kan resulteren in een leveringsonderbreking naar delen van het waterstofnetwerk. Aangezien het Waterstofnetwerk

Nederland in eerste instantie is ontworpen als een eenvoudige ringpijpleiding, moet worden geïnterpreteerd of er tijdens de onderhoudswerkzaamheden een lokale tijdelijke leiding (bypass) nodig is.

## **2. Isoleren sectie, indien nodig, tijdelijke afsluitvoorzieningen plaatsen**

Na het in kaart brengen en identificeren van de sectie die zal worden geëvacueerd, moet deze sectie worden geïsoleerd van de rest van het waterstofnet. Wanneer een sectie nog onder hoge druk staat, kan een sectie worden geïsoleerd door bestaande kleppenschema's te sluiten, deze bevinden zich ongeveer elke 50 kilometer van elkaar. Het is over het algemeen de voorkeur om te isoleren tussen afsluitschema's met voorzieningen om de waterstof te evacueren met een scheidingspig om problemen met stratificatie of diffusiefront te voorkomen (zoals beschreven in secties 5.1 & 5.2), deze kleppenschema's kunnen tot 100 kilometer uit elkaar liggen. Wanneer de sectie die geïsoleerd wordt, kleiner is dan de afstand tussen twee kleppenschema's, kunnen er stoppels worden gebruikt om het gebied dat onderhoud nodig heeft af te sluiten. Voor waterstofinfrastructuur onder lage druk onder de 200mbar kunnen balgen of opblaasbare gasstoppers gebruikt worden.

## **3. Ontdrukken van het systeem**

Wanneer een sectie succesvol is geïsoleerd, kan het systeem worden ontgast door de waterstof te recomprimeren in een volgende pijpleidingsectie, opgeslagen worden in gasopslagtrucks, gefakkeld worden of het overtollige waterstofgas te ventileren als geen andere opties mogelijk zijn. Vanwege het hoge risico op ontsteking dat samenhangt met waterstof, wordt veilige bediening van fakkels beschreven in Hydelta 2 werkpakket 5.1. Het is niet nodig om het systeem te ontgassen naar atmosferische omstandigheden voordat u de waterstof begint te evacueren door verplaatsing met stikstof. Het starten met stikstofverplaatsing bij hogere drukken maakt het mogelijk om hercompressie effectiever te gebruiken.

## **4. Evacueer de waterstof met stikstof, gebruikmakend van scheidingspig-, verdringen- of verdunningstechnieken**

De waterstof in het systeem kan nu worden verplaatst met een inert gas, zoals stikstof, door het gebruik van een scheidingspig, verdringen- of verdunningstechnieken. Bij verdringen wordt een gas uit een systeem gehaald door het weg te drukken met stikstof. Verdunning wordt gebruikt wanneer een gas niet volledig kan worden verwijderd en omvat het verlagen van de concentratie van het gas om de concentratie tot een gewenst niveau te verlagen. Omdat waterstof verschillende fysische en chemische eigenschappen heeft (naast het hogere veiligheidsrisico), kan het evacueren van waterstof andere evacuatiemethodes vereisen voor bepaalde situaties t.o.v. de methode die gebruikt wordt bij de evacuatie van aardgas. Secties 4-7 zullen een meer diepgaande analyse bevatten van de verschillende fysische effecten tijdens de evacuatie.

## **5. Zorg ervoor dat er secundaire afsluiting en een ontluchtingsmechanisme is geïnstalleerd**

Nadat een sectie of systeem is ontgast en het waterstof is geëvacueerd, moet er secundaire afsluiting worden geplaatst (of bestaande kleppen kunnen worden gesloten) afhankelijk van de gebruikte primaire afsluiting en het volume (lengte) van de geïsoleerde sectie. Een balg, die is geïnstalleerd door een torr-nippel, wordt vaak gebruikt als secundaire afsluiting of een reeds bestaande klep wordt afgesloten. De combinatie van twee afzonderlijke barrières maakt een double block and bleed (DBB) mogelijk, een veiligheidsprocedure die bestaat uit het hebben van dubbele afsluiting met een ventiel om ervoor te zorgen dat eventueel gelekte gas (waterstof) aan de lucht zal worden afgegeven en niet

doorstroomt naar de onderhoudslocatie. Een extra torr-nippel kan worden gebruikt om een ventiel te installeren.

## **6. Voer onderhoudswerkzaamheden uit**

Als alle bovenstaande maatregelen zijn genomen, kan de onderhoudsoperatie worden uitgevoerd. Onderhoud worden uitgevoerd met pijpleidingen die in luchtomstandigheden gebracht zijn om het risico op verstikking te voorkomen, waarbij balgen in de leiding worden gebruikt om de uitstroom van stikstof (of waterstof) uit de leiding te voorkomen. Tijdens de onderhoudsprocedure moeten de concentraties waterstof, stikstof en zuurstof worden gemonitord om buiten de explosiegrenzen te blijven zoals vermeld in Bijlage A-1.

## **7. Spoel het onderhoudsgebied met stikstof voor het opnieuw introduceren van waterstof**

Wanneer de onderhoudswerkzaamheden zijn voltooid, zal de onderhoudslocatie (tussen de balgen) een mengsel van lucht en stikstof bevatten. Daarom moet voordat waterstof wordt geïntroduceerd, het geïsoleerde gedeelte opnieuw met stikstof worden verdrongen voordat de balgen worden verwijderd. Zodra is vastgesteld dat er geen lucht meer in de sectie zit, kunnen de balgen worden verwijderd en vervolgens kan de stikstof worden verplaatst met waterstof. Nadat de stikstof uit de leiding is verwijderd, zal de leiding opnieuw worden onder druk gezet met waterstof om deze terug te brengen naar de normale bedrijfsomstandigheden, waarna de kleppen kunnen worden geopend en de waterstof weer kan worden gebracht naar stromende omstandigheden.

Deze onderhoudsrichtlijnen voor waterstofpijpleidingen zijn besproken met experts uit de industrie tijdens een brainstormsessie in een multidisciplinaire setting. Dit omvatte onder andere operationele en veiligheid technische perspectieven. Het doel van deze collaboratieve, interdisciplinaire oefening was om discussies over de verschillende isolatie- en evacuatietechnieken te vergemakkelijken om de veiligheid en haalbaarheid van dergelijke richtlijnen voor hogedrukwaterstofpijpleidingen te beoordelen. De notulen van deze vergadering zijn te vinden in Bijlage C.

### 3 Bepaling van gebruikte isolatie- en evacuatietechnieken.

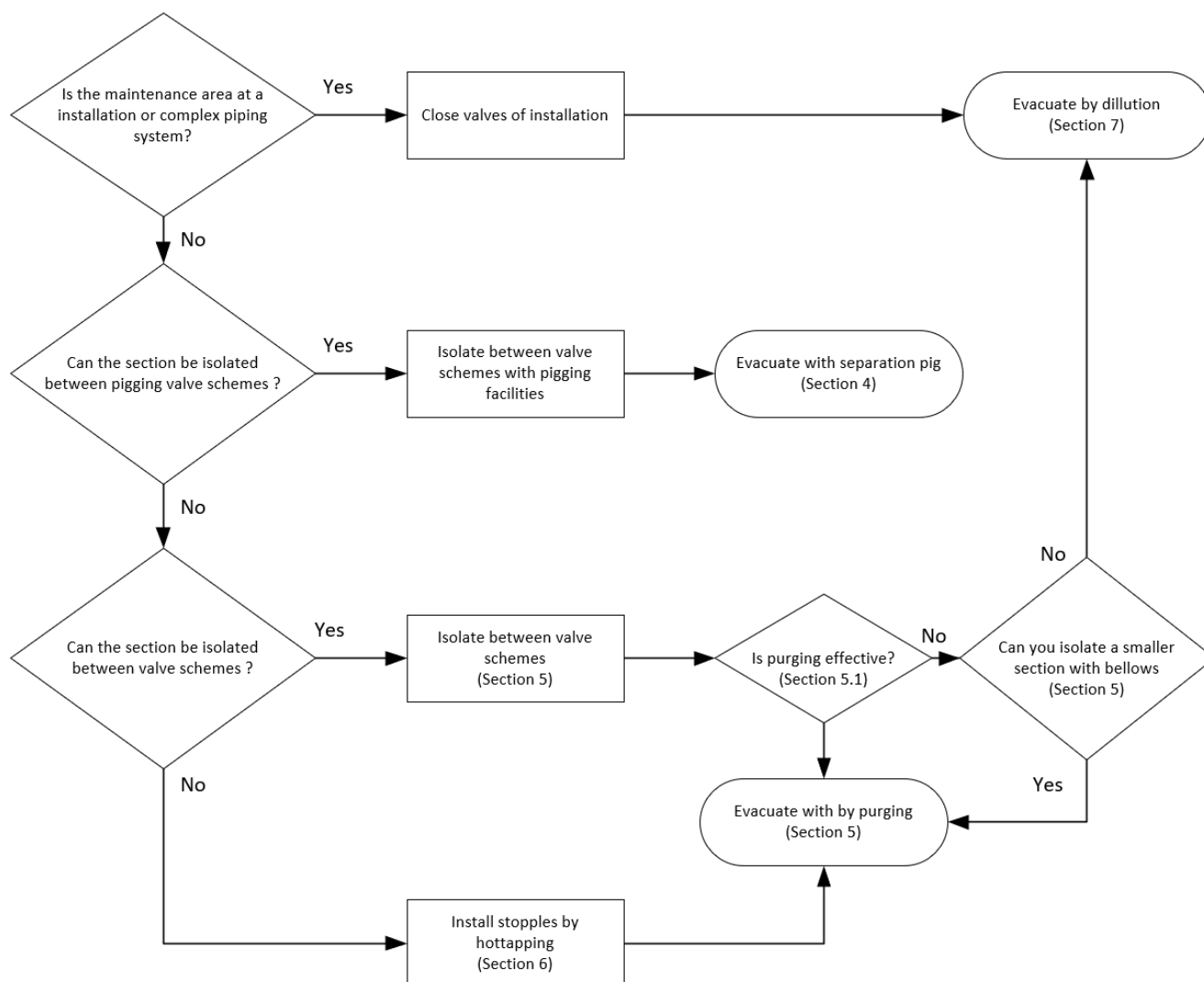
Voordat uw onderhoudsoperatie begint, moet er besloten worden welke isolatiemethode en evacuatiemethoden geschikt zijn voor het betreffende gedeelte. Om te bepalen welke soort isolatiemethode het meest wenselijk is, hebben we Figuur 3-1 gemaakt; een algemene richtlijn voor welke soort isolatiemethode en evacuatiemethode kan worden gebruikt.

De meest eenvoudige techniek voor isolatie is het gebruik van bestaande afsluiters, die te vinden zijn op afsluiter-schema's of in de buurt van een installatie. Wanneer pijpleidingen over langere afstanden moeten worden geëvacueerd en een inert gas zoals stikstof wordt gebruikt voor verdringing, is het bijna altijd raadzaam om een scheidingspig te gebruiken om het mengen van waterstof en stikstof zoveel mogelijk te minimaliseren.

Een onderscheidend aspect van het Nederlandse Waterstofnetwerk is het enkele pijpleidingontwerp. Deze ontwerpkeuze, hoewel kosteneffectief en efficiënt, legt een aanzienlijke uitdaging op voor onderhoudswerkzaamheden. Elk vereist werk, zonder tijdelijke bypass, aan een enkele pijpleiding resulteert in een volledige stillegging van de waterstofstroom in dat specifieke gebied. Dit kan gevolgen hebben voor de levering van waterstof, waardoor de installatie van een tijdelijke bypass vereist is. De afstand tussen de afsluiterschema's met voorzieningen voor het lanceren of ontvangen van scheidingspigs kan meer dan 100 kilometer uit elkaar zijn. Dit betekent dat het afsluiten van lange secties van pijpleidingen of belangrijke installaties de levering van sommige consumenten en/of leveranciers kan beïnvloeden. Bovendien kunnen delen buiten het geïsoleerde gedeelte ook een stillegging van de waterstofstroom ervaren, terwijl het cirkelvormige Waterstofnetwerk Nederland nog in aanbouw is (geschatte bouwtijd tot 2030) en nog niet cirkelvormig is. Dit gebeurt als de productie en afname aan beide zijden van het geïsoleerde gedeelte zijn gesitueerd. Het kan dan nuttig zijn om een kleiner gedeelte te af te sluiten om de levering van waterstof te waarborgen. Daarnaast, zal het stilleggen van zo'n groot pijpleiding gedeelte resulteren in groot verlies van waterstof volume. Richtlijnen en meer gedetailleerde informatie pig-operaties zijn te vinden in hoofdstuk 4.

Men zou ook een sectie tussen afsluiterschema's kunnen isoleren zonder pig voorzieningen. De afstand tussen deze schema's zal afhankelijk zijn van het aantal vestigingen, leveranciers en industriële verbruikers in het gebied, maar is zal maximaal 50 km afstand hebben. Aangezien alle vestigingen naar de leverancier of naar de klant een afsluiterschema's hebben, zal er geen leveringsonderbreking zijn naar consumenten of van leveranciers. Evacuatie zonder scheidingspig zal een verdringingsoperatie vereisen. Aangezien dit niet altijd mogelijk is vanwege stratificatieproblemen, zoals figuur 3 1 laat zien, zal er rekening gehouden moeten worden met de kritische snelheid (snelheid die nodig is om een succesvolle zuivering uit te voeren) en is deze voor waterstof anders dan voor aardgas. Deze onderwerpen worden verder besproken in hoofdstuk 5

Het installeren van een tijdelijke bypass van en naar beide zijden van de afgesloten secties kan de stroomomstandigheden en waterstoflevering waarborgen. Bij het isoleren tussen afsluiterschema's, is het installeren van een bypass niet altijd haalbaar vanwege de grote afstand tussen de afsluiterschema's. In deze gevallen kan men een kleiner gedeelte van de pijpleiding isoleren door het installeren van tijdelijke afsluiters, genaamd stoppels. De voor- en nadelen van het gebruik van een stoppels worden besproken in hoofdstuk 6. Installaties binnen het waterstofnetwerk bevatten veel verschillende kleppen en afsluitschema's die gebruikt kunnen worden om kleine delen af te sluiten. Daarbij kan de waterstof geëvacueerd met een verdunning gebaseerde spoeling zoals besproken in hoofdstuk 7.



Figuur 3-1 afsluit- en evacuatiemethode op basis van de afgesloten sectie

Wanneer een gedeelte van het waterstofnetwerk succesvol is geïsoleerd, moet de waterstof uit het onderhoudsgebied worden verwijderd. Dit wordt gedaan door eerst het pijpleidingsysteem te ontlasten, een fundamentele operatie tijdens onderhoudsprocedures of als reactie op noodstopprotocollen. Na de isolatiefase wordt de ontgassing bereikt door de waterstof uit het geïsoleerde gedeelte te recomprimeren in de waterstofinfrastructuur. Om het verlies van waterstof te voorkomen, begint de evacuatie met stikstof al bij een hogere waterstofdruk om zo lang mogelijk hercompressie mogelijk te maken en het verlies van waterstof door fakkelen tot een minimum te beperken. Het systeem wordt verder ontlast door fakkelen. Het doel van ventileren of fakkelen is om het gespoelde gas van het geïsoleerde gedeelte naar een punt te brengen vanwaar het gespoelde gas veilig kan worden verwijderd zonder een gevaar te vormen voor de omgeving, de werknemers of het milieu. Meer informatie over fakkelen, inclusief richtlijnen voor een veilige implementatie, is te vinden in de documentatie van werkpakketten van Hydelta 2 werkpakket 5.1.

Na het ontlasten van het systeem kan de waterstof in het gedeelte worden geëvacueerd met verschillende methoden. Tijdens de uitvoering van het evacuatieproces wordt verdringing of verdunning met stikstof gebruikt om het waterstofgas via aangewezen ontsnappingsventielen te verdrijven, waar het kan worden hercomprimeerd of gefakkeld, met behulp van een inert gas zoals stikstof. Idealiter is er minimaal tot geen vermenging tussen stikstof en waterstof. Echter, afhankelijk

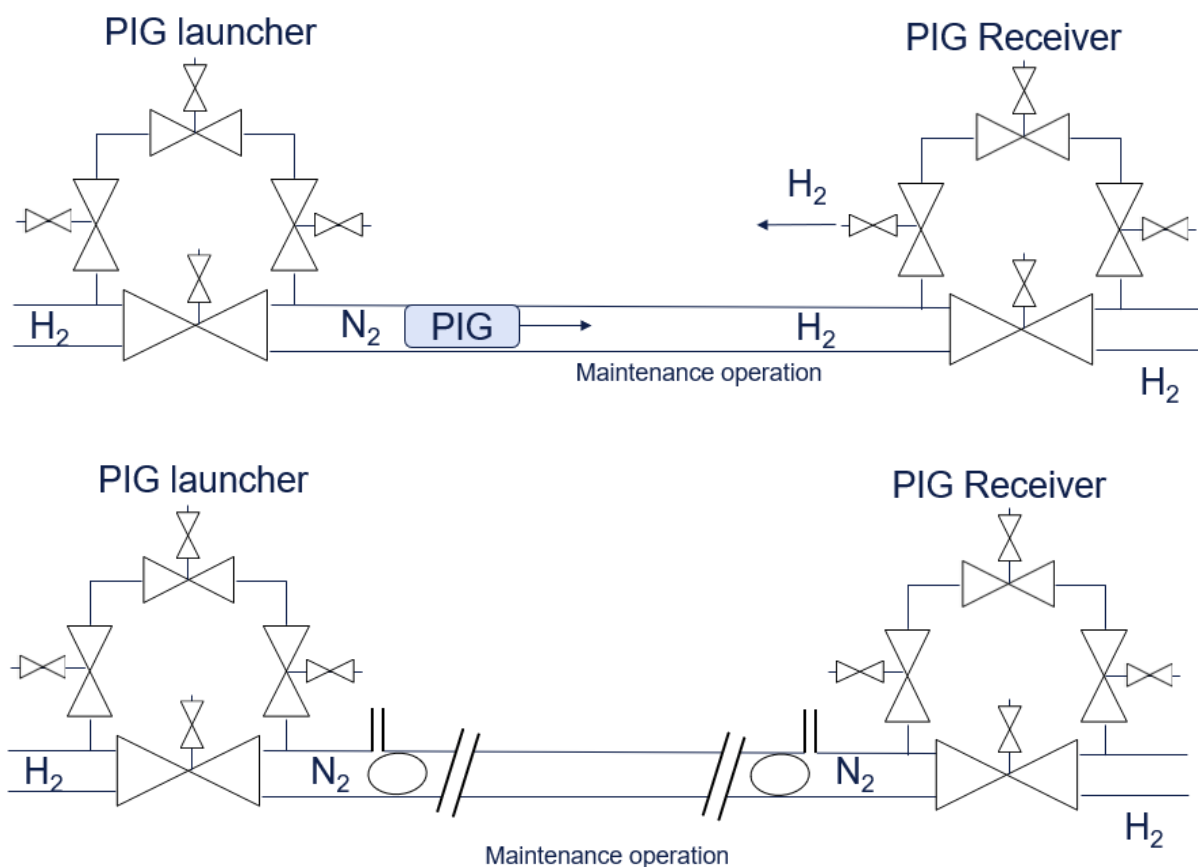
van de geometrie van het gesloten gedeelte, kan er enige mate van menging optreden. Vooral in secties met veel dode volumes of complexe installaties, is het spoelproces voornamelijk afhankelijk van verdunning, wat een specifieke manier van bedienen vereist

Bij lange en brede hogedrukleidingen, is spoelen mogelijk niet altijd een haalbare optie vanwege de inherente fysieke beperkingen van het spoelproces. Het benodigde gasvolume voor effectief spoelen kan aanzienlijk zijn en problemen, zoals stratificatie, kunnen aanzienlijke problemen veroorzaken. Voor deze leidingen is het gebruik van een afscheidingsschuif een gunstiger alternatief om het gedeelte te evacueren. Schuiven worden in de pijpleiding geplaatst en voortbewogen over de lengte ervan door de stikstofstroom. Schuiven kunnen waterstof efficiënt verdringen zonder problemen met mengen of stratificatie.

## 4 Onderhoudswerkzaamheden met scheidingspig

Wanneer pijpleidingen over langere afstanden moeten worden ontlast, en een inert gas zoals stikstof wordt gebruikt voor verdringing, is het raadzaam om scheidingspigs te gebruiken om de vermenging van waterstof en stikstof zoveel mogelijk te minimaliseren.

Als een pijpleiding of een deel van een installatie door een pig kan worden gereinigd, kan een scheidingspig als barrière worden gebruikt tussen het verdringingsgas en het gas dat geëvacueerd moet worden. Voor de evacuatieoperaties kunnen verschillende pig-typen worden gekozen en deze keuze zal invloed hebben op de mogelijke lekkage van het verdringingsgas naar het te evacueren gas. De lekkage hangt af van het type pig en het type verdringingsgas dat wordt gebruikt om de pig te drijven.



Figuur 4-1 Schematisch overzicht van onderhoudswerkzaamheden met scheidingspig. In de bovenste afbeelding is de evacuatie nog steeds aan de gang en in de onderste schema's kan de operatie worden gestart.

1. Wanneer een sectie tussen twee afsluiters, die zijn uitgerust met pig-voorzieningen, wordt geïsoleerd, wordt de druk in de pijpleidingsectie gelijkgesteld aan het drukniveau waarop de recompressie-eenheid effectief kan worden gebruikt.
2. De waterstof wordt verdrongen door stikstof, waarbij een scheidingspig wordt gebruikt. Voor een waterstofsysteem moeten maatregelen worden genomen om luchtopsluiting in pig-lanceerders en -ontvangers te voorkomen, vooral gezien de bredere explosiegrenzen van waterstof in vergelijking met aardgas. De vorming van een ontvlambaar mengsel moet altijd worden vermeden. Daarom moeten de pig-lanceerder en -ontvanger zijn uitgerust met voorzieningen voor het spoelen van gas om ervoor te zorgen dat er geen lucht in het systeem zit voordat een pig wordt gelanceerd.



3. Door druk aan te brengen aan de stikstofzijde met een overdruk van 2-3 bar, ontstaat er een drijvende kracht achter de scheidingspig waardoor de waterstof uit de pijpleiding kan worden weg gedrukt. Gezien de te verwachten grote hoeveelheden waterstof die verdrongen moeten worden, wordt recompressie aanbevolen. Wanneer recompressie niet meer mogelijk is, kan een fakkel het veilig en gecontroleerd het overtollige waterstof verbranden.
4. Het resterende stikstofgas binnen de pijpleiding wordt ontlast om gelijk te komen met de atmosferische drukk niveaus. Het installeren van balgen binnen de pijpleiding is een belangrijke maatregel om een double block and bleed te creëren die kan worden gespoeld met stikstof om te voorkomen dat waterstof vanuit de pijpleiding naar de onderhoudslocatie ontsnapt. Het proces wordt uitgevoerd onder luchtcondities om het risico op verstikking te beperken.
5. Nadat de wijziging of onderhoudsoperatie met succes is voltooid, wordt het pijpleidingsegment dat de wijziging heeft ondergaan weer gevuld met stikstof. Vervolgens worden de balgen, die hun doel hebben gediend, zorgvuldig verwijderd.
6. De pijpleiding kan met waterstof worden gespoeld en opnieuw onder druk worden gezet tot operationele niveaus, waarmee de procedure wordt afgerond.

Ondanks het nut, wordt het piggen minder haalbaar voor zeer lange pijpleidingen vanwege het grote verlies aan gasvolume. Een deel van het gas voor de pig kan worden gecompriëerd, maar het resterende gas moet worden afgefakkeld en kan niet economisch worden verzameld of hergebruikt. Dit leidt niet alleen tot economisch verlies, maar kan ook aanzienlijke milieueffecten hebben. De stillegging kan ook aanzienlijke verstoringen in de toeleveringsketen veroorzaken, met gevolgen voor leveranciers en industriële consumenten die afhankelijk zijn van een consistente en betrouwbare gasstroom uit de pijpleiding, vooral als het ringnetwerk nog niet is voltooid.

Onderzoek toont aan dat het dynamische gedrag van een pig in een waterstofpijpleiding afwijkt van dat in een aardgaspijpleiding. Door de lagere dichtheid van waterstof wordt het stick-slip gedrag versterkt, wat leidt tot een minder uniforme beweging van de pig door de pijpleiding. Het versterkte stick-slip gedrag kan ertoe leiden dat een pig vast komt te zitten in de pijpleiding. Het waterhamereffect met waterstof is 3-4 keer kleiner dan met aardgas door de lage dichtheid van waterstof. Door het waterhamereffect, een drukstoot veroorzaakt door een plotselinge verandering in de snelheid van de vloeistof (de pig die vastzit), kan soms een vastzittende pig los krijgen. Hoewel deze onregelmatige beweging misschien geen direct probleem vormt voor het evacuatieproces met pigs, kan het leiden tot minder gunstig gedrag bij het gebruik van pigs voor inspectiedoeleinden. Ook zullen metingen van een veldanalyse tijdens pig-operaties minder betrouwbaar zijn.

#### 4.1 Drukverschillen en lekkages van een PIG

De beweging van de pig door de pijpleiding wordt beïnvloed door een bepaalde differentiële druk, die varieert afhankelijk van het type pig dat wordt gebruikt. De verwachte differentiële druk over de pig kan worden benaderd met behulp van de empirische formule:

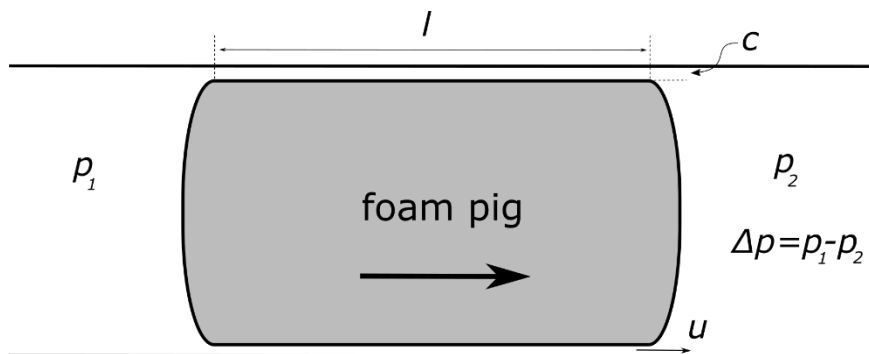
$$\Delta p = \frac{K}{D}, \quad (1)$$

waarbij D de interne diameter in inches voorstelt, de differentiële druk uitgedrukt in bar, en de K-waarde afhangt van het gebruikte pigtype, zoals gedetailleerd in Bijlage A.3.1. Bijvoorbeeld, in een pijp van 6 inch, genereert een dubbele schijf pig (K=6) een differentiële druk van 1 bar. Met behulp van de vastgestelde differentiële druk en het lekkagemechanisme, kan een kwalitatieve schatting van de lekkagesnelheid worden gemaakt. Er worden twee mogelijke lekkagemechanismen overwogen: een thin-film ringstroom (viskeuze stroom) en lekkage die ontstaat door openingen gecreëerd door onregelmatige oppervlakken (niet-viskeuze stroom).



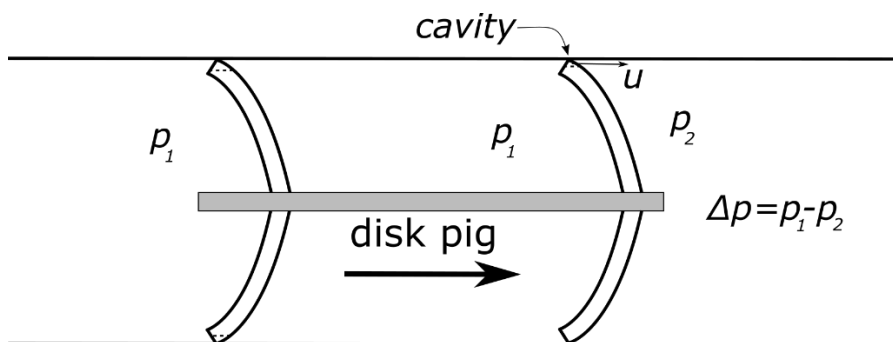
Wanneer een pig met een relatief groot contactoppervlak met de pijpwand wordt gebruikt (bijv. een schuimpig), kan er mogelijk lekkage optreden via de speling tussen de pijpwand en de pig, een situatie weergegeven in Figuur 4-2.

In bijlage A.3.1.2 kan worden gezien dat wanneer waterstof als drijfgas wordt gebruikt (d.w.z. wanneer een scheidingspig wordt gebruikt na afronding van het onderhoud) de lekkage ongeveer 20% hoger is in vergelijking met het gebruik van aardgas. Echter, wanneer een scheidingspig wordt ingezet voor het onderhoud (d.w.z. wanneer stikstof wordt gebruikt als drijfgas), wordt geen verandering verwacht in het lekkagedrag in vergelijking met de standaard aardgas evacuatieprocedure.



Figuur 4-2 Geometrische representatie van een schuimpig en het lekkagemechanisme

Als de lekkage wordt veroorzaakt door een kleine holte tussen de pijpwand en de pig als gevolg van onvolkomenheden in de pig-schijf of kleine rimpelingen (laslijnen) op het binnenoppervlak van de pijp, wordt de lekkage-stroom door die opening aangedreven door de differentiële druk. Dit lekkagemechanisme is geïllustreerd in Figuur 4-3.



Figuur 4-3 Geometrische representatie van een schijfpig en het lekkagemechanisme

Volgens Volgens Bijlage A.3.2 zal de lekkage als gevolg van kleine holtes ongeveer 30% hoger zijn voor waterstof in vergelijking met wanneer aardgas wordt gebruikt.

De theorie over de verschillende lekkagemechanismen kan ook worden toegepast op andere mogelijke lekkagefenomenen, waaronder kleppen, stoppels en balgen. Elk van deze componenten vereist een aparte beoordeling om te bepalen welk type lekkage te verwachten is, of het nu gaat om dunne film lekkage, holte lekkage, of een combinatie van beide. In het algemeen zullen alle componenten die een bepaalde lekkagesnelheid hebben ongeveer 20% tot 30% hoger zijn voor waterstof in vergelijking met aardgas.

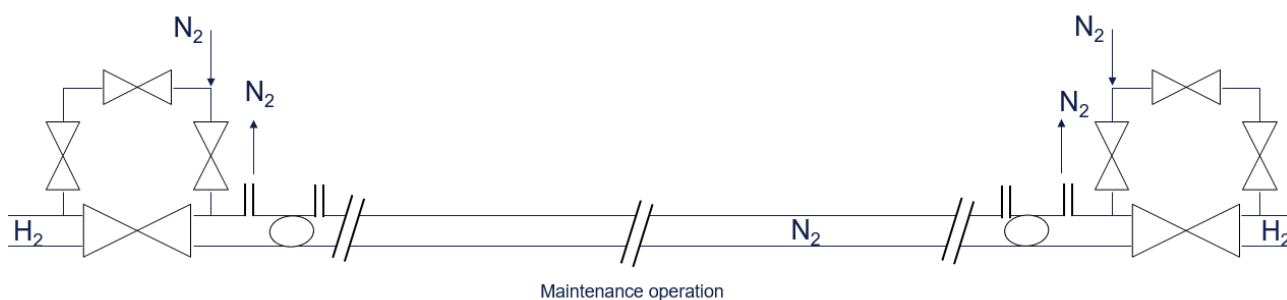
## 5 Onderhoudswerkzaamheden tussen afsluiterschema's zonder pig voorzieningen

In het geval dat de pijpleiding of de installatie niet pigbaar is, kan verdingen (zonder pig) worden gebruikt om het gas te evacueren. Tijdens een verdringingsoperatie moeten twee belangrijke fysische effecten in acht worden genomen: stratificatie en de vorming van een diffusiefront door turbulente dispersie. Het stratificatieproces zal optreden wanneer de snelheid van het spoelgas te laag is, d.w.z. onder een bepaalde kritische snelheid. Wanneer de snelheid ruim boven deze kritische snelheid ligt, zal turbulente dispersie optreden die leidt tot de vorming van een diffusiefront. Het bepalen van de lengte van dit front is belangrijk om het volume van gemengd (off-spec) gas te kwantificeren.

Bij het kiezen om een sectie tussen afsluiterschema's zonder pig faciliteiten te isoleren, kan de sectie nog steeds geïsoleerd worden met behulp van bestaande afsluiterschema's. Dit heeft als voordeel dat er geen stoppels hoeven te worden geplaatst. Als gevolg van de verschillende dichtheden van waterstof en stikstof en de snelheid van het stikstoffront, kan een bepaalde mate van stratificatie (lagen van gassen) optreden, waarbij het zwaardere stikstof zich onder de waterstof bevindt. Stratificatie kan over een grote pijpleidinglengte optreden en resulteren in een aanzienlijke hoeveelheid off-spec gas. Stratificatie komt voornamelijk voor bij laminaire stroming en rechte pijpleidingen. Bochten en andere afwijkingen van een rechte lijn bevorderen radiale menging. Een zorgvuldige overweging van de gasstroomsnelheid versus de pijpleidingdiameter wordt gemaakt in sectie 5.1 en berekeningen van het diffusiefront voor waterstof zijn te vinden in sectie 5.2. Wanneer er stratificatieproblemen ontstaan, kan een andere isolatiemethode worden gebruikt om de sectiegrootte te minimaliseren. Afhankelijk van de lengte en diameter van de sectie kan je ofwel spoelen ofwel een verdunning gebaseerde spoeling gebruiken (zie sectie 7).

### Case I: Spoel het volledige gebied tussen afsluiterschema's

Bij het spoelen van de hele sectie tussen twee afsluiterschema's, kan het beter zijn om te beginnen met verplaatsing met stikstof onder een hogere druk om de recompressie van waterstofgas te vergemakkelijken. Bij een hogere druk zal de snelheid van het stikstoffront lager zijn bij dezelfde stikstofinjectiesnelheid.



Figuur 5-1 Schematisch overzicht van case I onderhoudsoperatie met spoelen

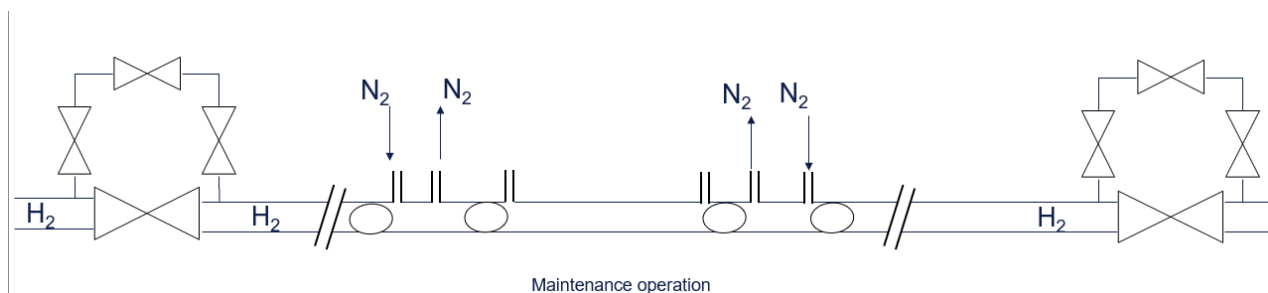
1. Wanneer een sectie tussen twee afsluiterschema's geïsoleerd is, kan het pijpleidingsegment ontlast worden door middel van recompressie.
2. De waterstof kan verplaatst worden met stikstof. Stikstof kan worden geïnjecteerd om meer waterstofrecompressie te vergemakkelijken.
3. Wanneer er geen verdere recompressie meer mogelijk is, faciliteert een fakkel de veilige en gecontroleerde verbranding van overtollig waterstof, waardoor de veiligheid gewaarborgd

wordt. Door een fakkel in deze context te gebruiken, kunnen we het proces effectief beheren en controleren en ontlasten tot atmosferische druk.

4. Het gebruik van balgen in de pijpleiding is een belangrijke maatregel om te voorkomen dat stikstof tijdens deze aanpassingen uit de pijpleiding ontsnapt. De balgen fungeren als een beschermende barrière, sluiten de pijpleiding af en waarborgen de veiligheid na het beëindigen van het ontlastingsproces en voordat het eigenlijke onderhoudswerk wordt gestart. Een extra torr-nippel zal worden geplaatst tussen het afsluiterschema en de balg om een block and bleed-situatie te waarborgen om te voorkomen dat waterstof de locatie bereikt waar het onderhoudswerk wordt uitgevoerd in het geval er lekkage is vanuit het afsluiterschema. De onderhoudswerkzaamheden worden uitgevoerd onder luchtomstandigheden om het risico op verstikking te verminderen.
5. Zodra de wijziging succesvol is voltooid, wordt het pijpleidingsegment dat deze wijziging heeft ondergaan opnieuw gevuld met stikstof om eventuele aanwezige lucht te verwijderen. Hierna worden de balgen, die hun doel van het voorkomen van stikstofuitstroom hebben gediend, zorgvuldig verwijderd.  
De stikstof kan nu worden verplaatst door waterstof, en de hele sectie tussen de twee afsluiterschema's kan opnieuw worden opgevoerd tot zijn operationele niveau met waterstof.

#### Case II: Spoel een gedeeltelijke gebied tussen afsluiterschema's

Wanneer de sectie tussen twee afsluiterschema's niet gemakkelijk kan worden gespoeld, kan een kleinere sectie, die gemakkelijker kan worden gespoeld, met balgen worden geïsoleerd. Daarom is voorgesteld om balgen te plaatsen door Tor-nippels in een drukloze pijpleiding om een kleinere sectie bij het werkgebied te isoleren. Als een extra veiligheidsmaatregel kunnen twee balgen worden gebruikt (per zijde), waarbij de ruimte tussen deze balgen kan worden gespoeld met stikstof om een dubbele afsluiting en ontluchting in de drukloze pijpleidingsectie te verzekeren. Wanneer balgen gebruikt worden om het werkgebied te isoleren, moeten de balgen goed worden bevestigd om te voorkomen dat ze tijdens gebruik scheuren of lekken. De druk (ofwel in- en uitvoer van stikstofvolume) tussen de balgen moet gecontroleerd worden, aangezien drukverschil aan de uiteinden van de balgen mag niet meer dan 200 mbar bedragen.



Figuur 5-2 Schematisch overzicht van case II onderhoudsoperatie met spoelen

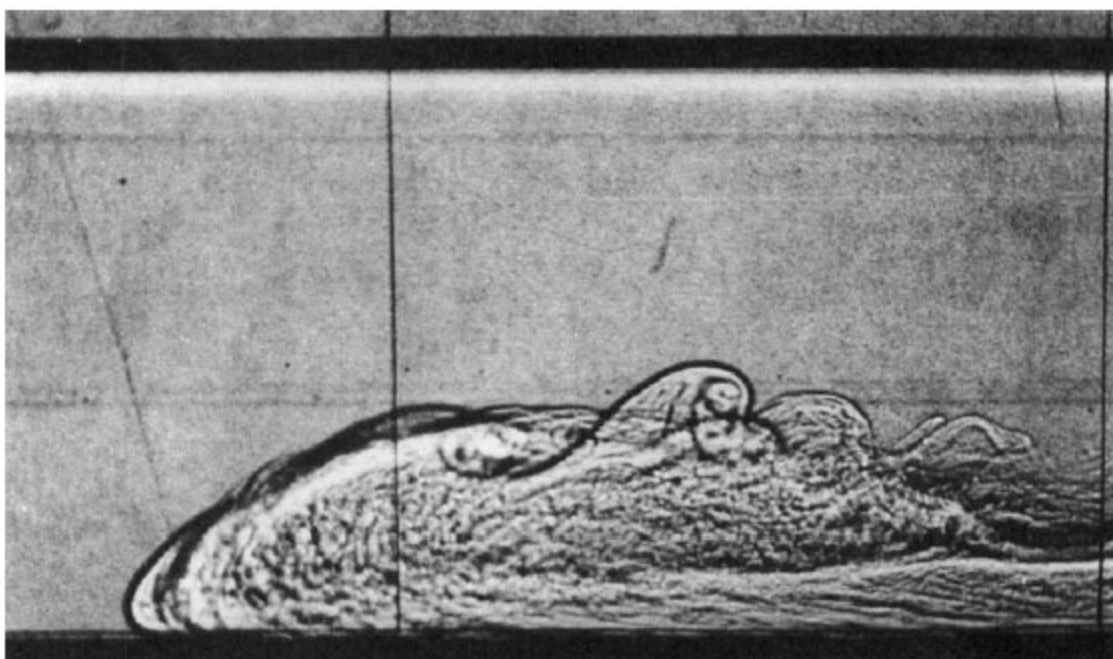
1. De gehele pijpleidingsegment tussen de afsluitschema's moet drukloos gemaakt worden door middel van recompressie en/of flakkering tot atmosferische druk.
2. Aan beide zijden van het onderhoudsgebied wordt een balg geplaatst en het gebied tussen de balg wordt langzaam verdrongen met stikstof. Een fakkel faciliteert de veilige en gecontroleerde verbranding van overtollig waterstof, waardoor de veiligheid wordt gewaarborgd.
3. Om een dubbele afsluiting- en ontluchtingsituatie (double block and bleed) te waarborgen, worden aan elke zijde secundaire balgen geplaatst. Hier wordt aan beide zijden stikstof tussen

de twee balgen gespoeld om te voorkomen dat waterstof ontsnapt van de pijpleiding naar de onderhoudslocatie.

4. Het gebied tussen de binnenbalg moet met lucht worden gespoeld voordat de onderhoudswerkzaamheden worden uitgevoerd. De onderhoudswerkzaamheden worden uitgevoerd onder luchtomstandigheden om het risico van verstikking te beperken.
5. Zodra de onderhoudswerkzaamheden of aanpassingen aan de leiding zijn voltooid, moet het onderhoudsgedeelte (het gedeelte tussen de binnenste balgen) worden gespoeld met stikstof om overtollige lucht te verwijderen. De binnenste balgen kunnen verwijderd worden om vervolgens de stikstof tussen de buitentenste balgen te vervangen door waterstof. Daarna kunnen de buitenbalgen worden verwijderd.
6. Vervolgens kunnen de balgen, die hun doel hebben gediend om stikstofuitstroom te voorkomen, zorgvuldig verwijderd worden en kan het hele gedeelte tussen de twee klepschema's opnieuw onder druk worden gezet met waterstof.

### 5.1 Kritische snelheid

Vanwege de verschillende dichtheden van waterstof en stikstof treedt onvermijdelijk stratificatie ofwel gaslaagvorming op. Hierbij vestigt stikstof, dat een hoge dichtheid heeft, zich onder waterstof en dit kan leiden tot aanzienlijke hoeveelheden gasvolume met onjuiste specificatie. Dit proces is afhankelijk van de gassnelheid. De relatie tussen de gassnelheid en de diameter van de pijpleiding, die zorgvuldig is geanalyseerd in de bijlage, is in dit verband cruciaal.



*Figuur 5-3 Voorbeeld van stratificatie, een door zwaartekracht aangedreven golf.*

In een ideaal scenario kan de snelheid van de (door zwaartekracht aangedreven) golf, die langs de pijpleiding beweegt, worden bepaald. Deze snelheid is evenredig met het Froudegetal, een dimensieloze waarde die de vloeistofdynamica van een systeem beschrijft.

$$v^* = 0.75\sqrt{gD}, \quad (D > D^*). \quad (1)$$

Dus, voor waterstof-stikstof spoelen, moet de snelheid ongeveer 2.2 keer hoger zijn dan voor aardgas-stikstof verdringen bij het overwegen van de stratificatieconditie.

Naast het voldoen aan de Froude-getal voorwaarde, moet de stroming van het aandrijvend gas ook turbulent zijn, wat bekend staat als de Reynolds-getal voorwaarde. Het Reynolds-getal is een dimensieloze waarde die het begin van turbulentie voorspelt op basis van een overgangswaarde ( $Re^*=2300$ ). Voor kleinere diameters overheerst de Reynolds-voorwaarde

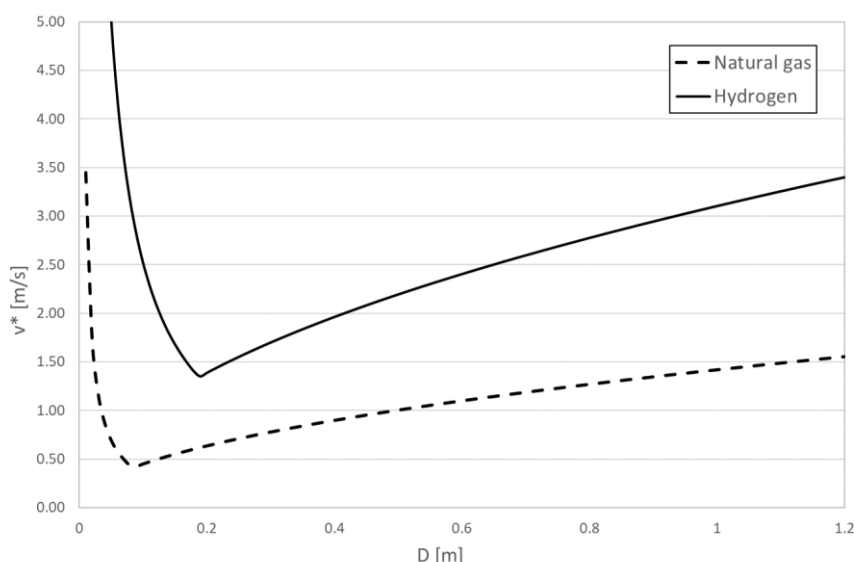
$$v^* = \frac{2300v}{D}, \quad (D \leq D^*). \quad (2)$$

Gezien deze turbulentie of Reynolds-voorwaarde, moet de snelheid ongeveer 7.3 keer hoger zijn voor een waterstof-stikstof verdringing vergeleken met een aardgas-stikstof.

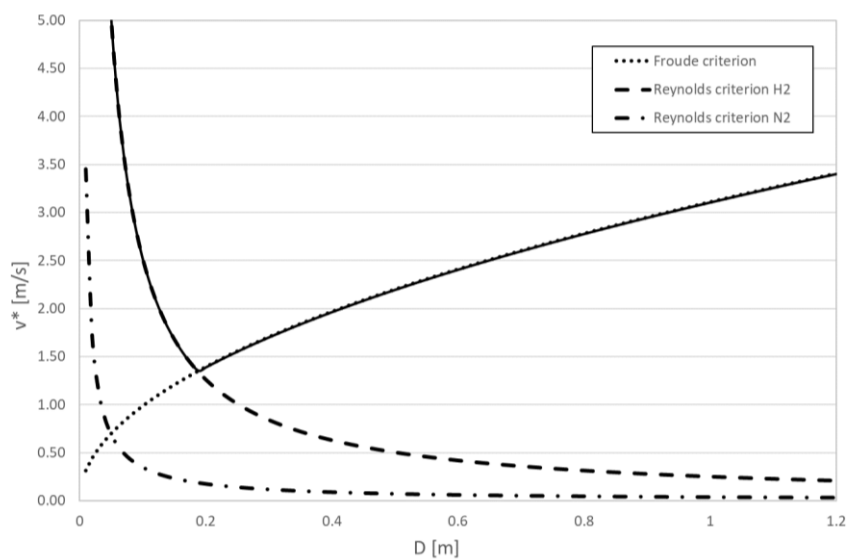
De kritieke diameter voor waterstof/stikstof kan worden gevonden door vergelijkingen ((1)) gelijk te stellen en waterstof als het spoelgas aan te nemen, dit resulteert in:

$$D^* = \left( \frac{2300v}{0.75\sqrt{\tilde{g}}} \right)^{\frac{2}{3}} \approx 0.19, \quad (3)$$

wat aanzienlijk hoger is dan de waarde voor aardgas/stikstof. Wanneer beide voorwaarden in overweging worden genomen, kan de minimale spoelsnelheid worden berekend, zie Figuur 5-4. Deze theoretische resultaten kunnen worden gevalideerd met behulp van de verdringingsexperimenten.



Figuur 5-4: Minimale snelheidsvereiste om stratificatie voor waterstof en aardgas als aandrijvend gas te voorkomen.



Figuur 5 5-5: Minimale snelheidsvereiste om stratificatie voor waterstof en stikstof als aandrijvend gas te voorkomen. De vaste lijn geeft de maximale kritieke snelheid aan voor zowel stratificatie als turbulentie voor waterstof .

## 5.2 Difussiefront

Als de spoelsnelheid hoog genoeg is om stratificatie te voorkomen, zal er nog steeds een diffusiefront ontstaan door turbulente dispersie. Verschillende studies hebben dit axiale turbulente diffusieproces onderzocht, beginnend met het werk van Taylor en vervolgens leidend tot meerdere publicaties die de turbulente dispersiecoëfficiënt modelleren. Over het algemeen wordt aangenomen dat deze coëfficiënt, voor een eendimensionale pijpstroming, alleen afhankelijk is van het Reynolds-getal.

Het proces dat de vermenging van het diffusiefront veroorzaakt, is turbulente dispersie. Andere processen, zoals moleculaire diffusie, hebben vaak een diffusiecoëfficiënt die een orde van grootte lager is. Om inzicht te krijgen in de turbulente dispersie is een literatuurstudie uitgevoerd waarbij theoretische modellen en laboratoriumexperimenten zijn overwogen

Men kan de lengte van het diffusiefront berekenen door de analytische oplossing van de niet-stationaire diffusievergelijking te nemen, zie bijvoorbeeld **Error! Reference source not found..** Wanneer we waarde van de samenstelling van het spoelgas tussen 0.02 en 0.98 nemen (aangezien het front een vloeiende overgang tussen de gassen zal hebben), zal de afstand tussen deze waarden de lengte zijn van het diffusiefront

$$\Delta x = 2.08\sqrt{DL}. \quad (4)$$

Dit betekent dat een pijpleiding met  $D=0.1\text{m}$  en een totale lengte van  $L=1000\text{m}$ , een diffusiefront van  $\Delta x=20.8\text{m}$  heeft. De vergelijking voor het diffusiefront, als gevolg van turbulente dispersie, is niet afhankelijk van de gaseigenschappen en zal vergelijkbaar zijn voor waterstof en aardgas. Het is ook niet afhankelijk van de snelheid.

De resultaten van de Kiwa-experimenten in **Error! Reference source not found.** werden gebruikt om de uitkomst van de vergelijking (4) te controleren. Voor het experiment met 100mm lijkt het diffusiefront sterk op de theoretische voorspelling. Het experiment toont aan dat de lengte van het diffusiefront inderdaad onafhankelijk is van de snelheid en resulteert in ongeveer gelijke volumes van resterende gas-luchtmengsels bij verschillende snelheden. De resultaten voor de 200mm pijp komen niet goed overeen met vergelijking (4) hoewel de lengte van het diffusieve front ook snelheidsonafhankelijk lijkt.

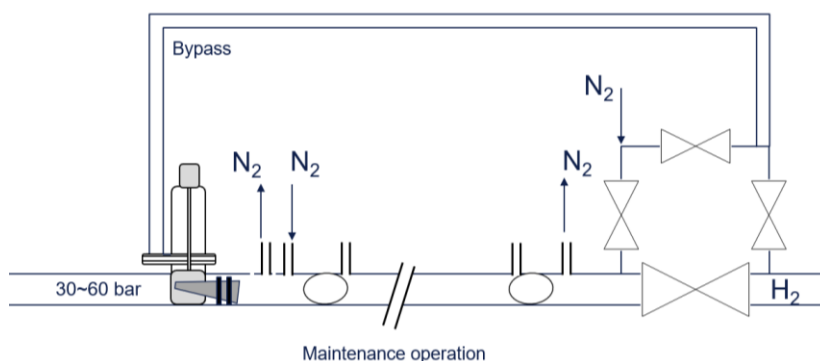


## 6 Onderhoudsoperatie met stoppels

Een stoppel is een soort afdichtingsapparaat of fitting dat wordt gebruikt om tijdelijk een deel van een pijpleiding te isoleren, en kan worden geïnstalleerd zonder de stroom van waterstofgas in de pijp te stoppen. Stoppels zijn vooral voordelig in situaties waar een klein deel van de pijpleiding afgesloten moet worden voor onderhoud of aanpassingen, maar de bestaande kleppen of afsluitmechanismen te ver weg zijn gelegen. De stoppel fungeert als een tijdelijke afdichting in de pijpleiding, en isoleert effectief het deel dat aandacht vereist. Ze bieden de mogelijkheid om korte delen van een hogedrukleiding af te sluiten of te isoleren als alternatief voor een volledige uitschakeling van een deel van de pijpleiding.

Om dit te bereiken, wordt een afdichtingskop in de pijpleiding gebracht via een hot-tap verbinding. Hot tapping is een proces dat het bevestigen en toevoegen van een gespleten T-verbinding met een full bore klep aan een bestaand systeem omvat, zonder de gasstroom te onderbreken en zonder verlies of vrijkomen van gas. Deze uitlaat biedt de mogelijkheid om niet alleen een stoppel voor isolatie te installeren, maar biedt ook de kans om een bypass te installeren. Het isoleren van kleinere delen van de pijpleiding kan een haalbare manier zijn om een bypass te installeren die de stroom van waterstof omleidt terwijl er onderhoud, reparaties of aanpassingen aan de hoofdleiding worden uitgevoerd. Het installeren van een bypass is misschien niet haalbaar als grotere delen van de pijpleiding moeten worden afgesloten.

Wanneer de afdichtingskop op zijn plaats zit, vormt het een afsluiting tegen de binnenwanden van de pijpleiding, meestal door gebruik te maken van het drukverschil binnen de pijpleiding. Wanneer de afdichtingskop van de stoppels wordt ingebracht, zal de druk aan de stroomopwaartse zijde van de afdichting groter zijn dan de druk aan de stroomafwaartse zijde, die drukloos gemaakt wordt om de onderhoudsactiviteiten uit te voeren. Het drukverschil drukt de afdichtingskop tegen het binnenoppervlak van de pijpleiding, wat de stabiliteit en effectiviteit van de afdichting verhoogt. Het gebruik van een stoppel is een bewezen techniek in aardgas; een voorbeeld van een onderhoudsoperatie met stoppels wordt hieronder beschreven en getoond in Figuur 6-1.



Figuur 6-1 Schematisch overzicht van onderhoudswerkzaamheden met een stoprein.

1. Installeer een hot-tap voor een bypass en een stoppel. Zorg ervoor dat de holte waarin de snijapparatuur zich bevindt, wordt gespoeld met stikstof voordat er gesneden wordt, om een mengsel van lucht en waterstof te voorkomen. Een bypass kan geïnstalleerd worden tussen twee stoppel-locaties (hot-taps) of tussen een stoppel-locatie (hot-tap) en klepschema om de waterstofstroom te garanderen.
2. Gebruik de stoppel(s) om het deel van de pijpleiding dat onderhoud nodig heeft af te sluiten.
3. Het afgesloten deel van de pijpleiding kan drukloos gemaakt worden tot atmosferische druk door middel van hercompressie en/of flaring. De waterstof kan worden verplaatst met stikstof.



Stikstof kan worden geïnjecteerd voordat de atmosferische druk bereikt is om waterstofhercompressie te vergemakkelijken.

4. Spoel de resterende waterstof tussen de stoppels met stikstof.
5. Na het drukloos maken en spoelen van de leidingen tussen twee stoppels, dient er een secundaire blokkade te worden geplaatst tussen de stoppel en de gasoperatie. Terwijl een balg kan dienen als secundaire blokkade om eventuele gaslekken van de stoppel op te vangen, zal deze niet geschikt zijn om grote lekkages van de stoppel tegen houden. Een secundaire stoppel of een stoppel-trein is nodig om double block and bleed te garanderen (meer informatie is te vinden in dit hoofdstuk). Spoel de ruimte tussen de stoppel-kop en de balg (of secundaire stoppel) met inert gas voor de double block and bleed, hiervoor is een extra torr-nipple nodig.
6. Zodra de onderhoudsoperatie met succes is voltooid wordt het deel van de pijpleiding, dat de aanpassing of onderhoud onderging, gespoeld met stikstof om binnengedrongen lucht te verwijderen.
7. Zodra de balgen zijn verwijderd, kan het deel tussen de stoppels gespoeld en gevuld worden met waterstof. Wanneer de druk weer is opgevoerd kunnen de stoppels verwijderd worden en de bypass losgekoppeld worden.

Momenteel worden balgen gebruikt in procedures met aardgas, deze werken met een drukverschil tot 200 mbar aan beide zijden. Aangezien tijdens het gebruik van stoppels geen afsluitschema's gebruikt worden, moet er een secundaire isolatiemethode worden geïnstalleerd die bestand is tegen de hogere drukken wanneer de eerste stoppel faalt. Ook mag er tijdens het spoelen van stikstof tussen balgen geen drukopbouw boven de 200mbar zijn, daarom moet de in- en uitstroom van stikstof worden gecontroleerd.

Uit eerdere experimenten met een hogedrukleiding op de veiligheidscampus Enschede (uitgevoerd door Gasunie) blijkt dat lekkage vrijwel altijd optreedt door onvolwaardige afdichting, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van boorspaanders en puin op de bodem van de pijpleiding. Hoewel in Enschede een succesvolle hot tapping-proef werd uitgevoerd met een enkele stoppel en balgafdichting (op 60 bar waterstof), waren de resultaten van een soortgelijke proef met een dubbele stoppel (zonder balgen, een zogenaamde stoppeltrein) minder succesvol.

Het is belangrijk om op te merken dat een stoppel alleen goed werkt als er een drukverschil is aan beide zijden van de afdichtkop. Bij gebruik van een stoppeltrein werkt de binnenste stoppel niet totdat de buitenste stoppel genoeg gas heeft doorgelaten om de ruimte tussen de twee stoppels te vullen. Het vormt een uitdaging om adequaat te controleren of de tweede stoppelkop een goede afdichting heeft. Er zullen twee torr-nipples nodig zijn tussen de twee stoppelkoppen om waterstof adequaat te verwijderen tussen de twee stoppelkoppen en differentiële druk met stikstof aan te brengen tussen de twee stoppelkoppen. De afstand tussen de twee stoppels is ongeveer gelijk aan de diameter van de pijpleiding, deze optie zal nader onderzoek vereisen voordat deze in het veld kan worden gebruikt.

Er zijn echter enkele zorgen over het gebruik van dit type traditionele stoppels voor waterstof. Om problemen met stoppels zoveel mogelijk te vermijden, worden bij voorkeur hydraulisch vergrendelbare stoppels gebruikt. Deze stoppels zorgen voor een veel betere afdichting omdat de klepafdichting met grote kracht tegen de pijpwand kan worden gedrukt zonder afhankelijk te zijn van een differentieële druk. Deze stoppels worden in andere landen breed en met succesvol gebruikt. Momenteel gebruikt Gasunie dergelijke hydraulische stoppels niet voor aardgasnetwork omdat daar een double block and bleed configuratie niet als noodzaak gezien wordt, maar deze stoppels moeten wel overwogen worden om voor het waterstof netwerk.

## 7 Evacueren van complexe systemen, installaties of moeilijk verdringbare pijpleidingen

Hoewel het volledig elimineren van vermenging moeilijk blijft in praktische toepassingen, kan het minimaliseren van verdunning of menging een effectievere spoeling opleveren. In praktijk is dit niet altijd mogelijk in installaties door de aanwezigheid van dode volumes, of gebieden waar de stroom van waterstof beperkt is. In dit geval kan er gekozen worden voor een verdunningsgebaseerde spoeling. Alternatief kan door het wisselen van druk in de ruimtes met beperkte gasuitwisseling ook een adequate verdunningsgebaseerde spoeling worden gefaciliteerd.

Er bestond een vermoeden dat, in gesloten volumes (vaten, T-stukken), waterstofvolumes minder efficiënt zouden mengen met stikstof dan bij het verdringen van aardgas. Theoretische analyses toond aan dat het tegenovergestelde waarschijnlijk waar is. Er is geen experimentele literatuur die het menggedrag van waterstof en stikstof ten opzichte van aardgas en stikstof bevestigt. Daarom heeft DNV een experimentele analyse uitgevoerd om het verschil tussen waterstof-stikstofmenging en methaan-stikstofmenging te bepalen. Gasvolumes worden vermeden door de druk meerdere keren te verhogen en te verlagen om de volumes afwisselend te legen en opnieuw te vullen.

Bij het uitvoeren van een verdunningstechniek wordt het spoelgas aan het volume toegevoegd en verhoogd tot een bepaalde druk. De druk  $p$  door atmosferische druk ( $p_{atm}$ ) daarom zal de concentratie van het te spoelen gas verminderen met ongeveer de verhouding van deze drukken ( $p/p_{atm}$ ). Dit gaat ervan uit dat de gassen goed gemengd zijn en dit hangt af van de injectiesnelheid van het gas, d.w.z. het opwekken van turbulente vermenging. In sommige delen van het te spoelen volume kan het mogelijk zijn dat er geen/lage stroming plaatsvindt, d.w.z. doodlopende einden of grote volumes. In die gevallen hangt de vermenging af van de moleculaire diffusie tussen de twee gassen en de drijfvermogen tussen deze gassen. Deze processen zijn concurrerend, maar moleculaire diffusie is doorgaans een zeer traag proces. Het uiteindelijke resultaat van deze concurrerende processen is moeilijk te kwantificeren, maar men kan de situatie van aardgas-stikstof vergelijken met het geval van waterstof-stikstof om het relatieve effect te schatten.

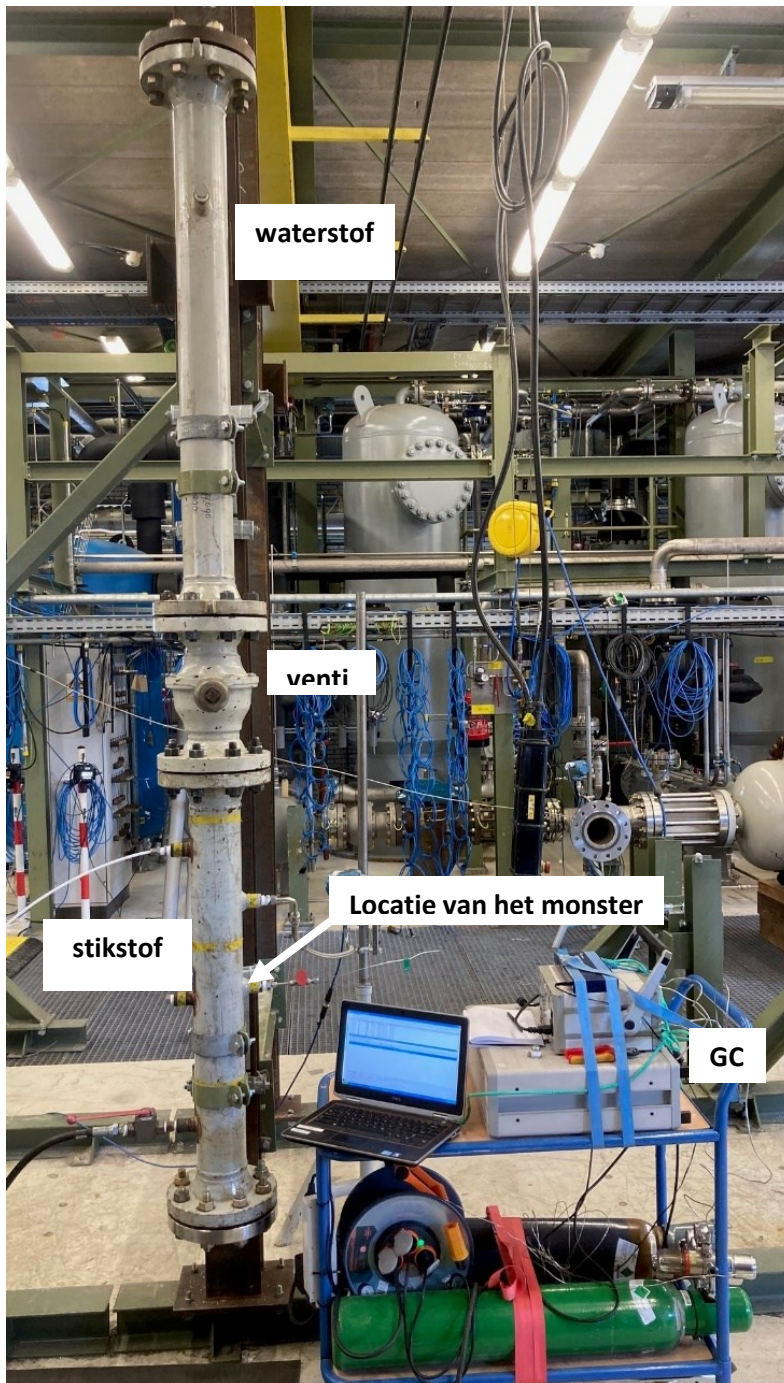
Deze analyse begint met de dimensionele analyse van de twee concurrerende processen, die worden beheerst door het Peclet-getal voor moleculaire diffusie en het Froude-getal. Het nemen van de verhouding van de twee getallen leidt tot een dimensieloos getal dat onafhankelijk is van de snelheid

$$\left(\frac{Pe}{Fr}\right)^2 = \frac{\tilde{g}D^3}{E^2}, \quad (1)$$

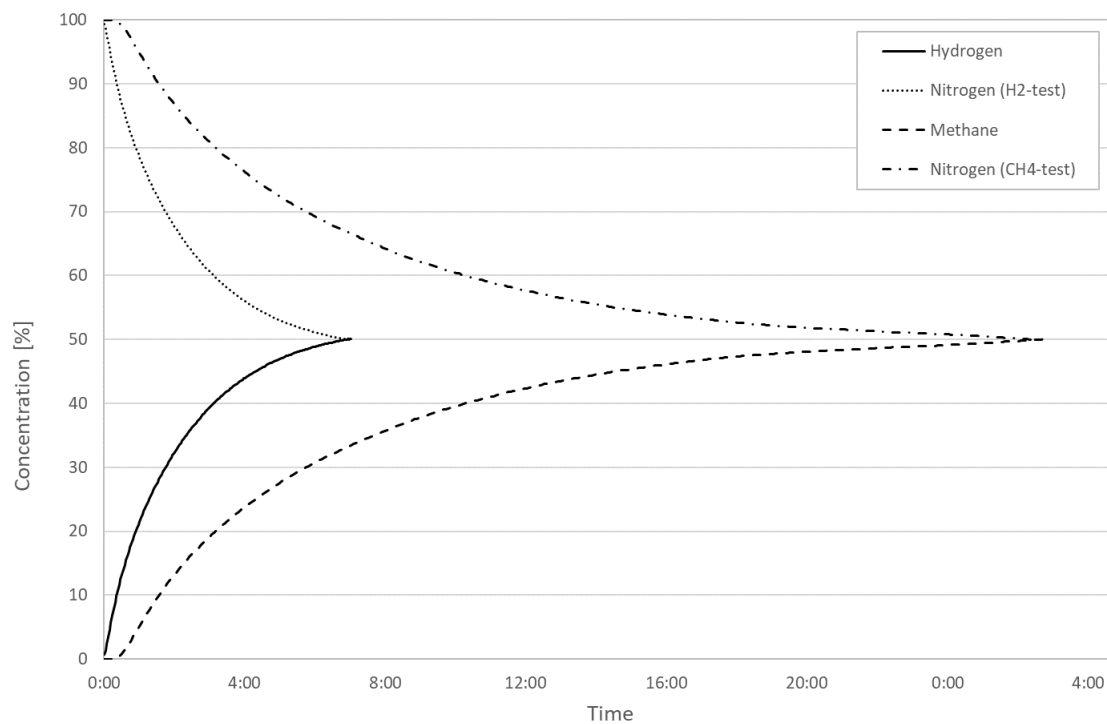
waar  $E$  nu de moleculaire diffusiecoëfficiënt is. Hoe hoger dit dimensieloze getal, hoe meer de gassen gescheiden zullen blijven, hoe lager dit getal, hoe dominanter de moleculaire diffusie is en hoe meer gemengd de twee gassen zullen zijn. Het getal zal toenemen als het dichtheidsverschil toeneemt (verhoging van  $\tilde{g}$ ) of het volume toeneemt (verhoging van  $D^3$ ). Berekeningen van vergelijking (1) tonen aan dat dit getal hoger is voor het aardgas-stikstofsysteem dan voor het waterstof-stikstofsysteem, dus het waterstof-stikstofmengsel zal sneller mengen (ongeveer 3.4 keer zo snel) dan het aardgas-stikstofmengsel. Dit komt voornamelijk door de moleculaire diffusiecoëfficiënt die meer dan 4 keer hoger is voor het waterstof-stikstofmengsel.

Aangezien er geen experimentele gegevens konden worden gevonden in de literatuur, heeft DNV een speciale opstelling ontworpen om het verschil tussen waterstof-stikstof en methaan-stikstofmenging te bepalen, zie Figuur 7-1. Het bovenste gedeelte van de pijpleiding is gevuld met een gas van lage dichtheid (d.w.z. waterstof of methaan), en het onderste gedeelte is gevuld met stikstof. Deze secties

zijn gescheiden door een kogelkraan. Beide, het bovenste en onderste gedeelte, zijn op atmosferische druk. In het onderste stikstofgedeelte (op ongeveer de helft van de sectielengte) is een gaschromatograaf (GC) aangesloten. Aan de onderkant van het gedeelte is een slang verbonden (die werd gebruikt voor het spoelen van stikstof in het onderste gedeelte) die nog steeds stikstof bevat, en deze slang wordt open gelaten zodat de GC geen (gedeeltelijk) vacuüm trekt in de testopstelling. Voor elke test (waterstof en methaan) wordt de klep op  $t=0$  geopend, en de mengsnelheid kan worden bepaald door de waterstof/methaanconcentratie in de tijd te bemonsteren. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 7-2 en bevestigen dat waterstof sneller mengt dan methaan (ongeveer 3,8 keer sneller).



Figuur 7-1 DNV-testopstelling voor het bepalen van de mengsnelheid van gassen



Figuur 7-2: Testresultaten van de mengsnelheid van gassen voor waterstof en methaan

## 8 Monitoring

Tijdens het spoelproces is het essentieel om een multigasbewakings- of detectie-instrument te hebben gekalibreerd voor de betrokken gassen om het gas dat uit de ontluchtingsopening ontsnapt te analyseren. Dit instrument is ook nodig na het spoelen als een brandbare gasindicator, een zuurstofindicator en voor andere behoeften zoals de zuivering vereist. Het is belangrijk op te merken dat verschillende gascomponenten verschillende gevoeligheden hebben voor de aanwezigheid van waterstof in aardgas. Zo zijn er nieuwe gaschromatografen (GC's) nodig om de gassamenstelling van waterstof te meten.

Warmtegeleidende sensoren en katalytische kraalsensoren zijn twee veel voorkomende soorten gassensoren. Zowel thermische geleidbaarheid als katalytische kraalsensoren worden vaak gebruikt voor de bewaking van waterstofpijpleidinggassen. Thermische geleidbaarheidssensoren zijn bijzonder nuttig voor het detecteren van de aanwezigheid van waterstof in een gasmengsel. Deze sensoren werken door het verschil in thermische geleidbaarheid te meten tussen het gasmengsel en een referentiegas, zoals stikstof of lucht. Thermische geleidbaarheidssensoren kunnen real-time informatie geven over de aanwezigheid en concentratie van waterstof in een pijpleiding. Katalytische kraalsensoren werken door veranderingen in de elektrische geleidbaarheid van een verwarmde kraal gecoat te detecteren. Ze zijn bijzonder gevoelig voor de aanwezigheid van brandbare gassen en kunnen nauwkeurige informatie geven over de concentratie van waterstof in een pijpleiding.

Het is noodzakelijk om de eindpunten te bepalen (wanneer is de zuivering met succes voltooid) van de zuivering, zodat er geen waterstof meer in de pijplijn zit wanneer het onderhoud begint. Wanneer het onderhoud begint, zal lucht een potentieel explosief mengsel vormen. Een regelmatige beoordeling van de doeltreffendheid van het zuiveringsproces is essentieel om ervoor te zorgen dat het gewenste veiligheidsniveau wordt bereikt. De beoordeling kan worden uitgevoerd door de concentratie waterstof in het gezuiverde gasmengsel te controleren en ervoor te zorgen dat deze onder de onderste ontvlambaarheidsgrens ligt.



## 9 Aanbevelingen

Dit onderzoek bestudeerde verschillende evacuatiemethoden gebaseerd op verschillende isolatietechnieken van pijpleidingsecties. Niet elke methode is geschikt in elke situatie, maar elke methode heeft zijn eigen set van voordelen, nadelen en omstandigheden waarin deze het meest effectief is.

Hoewel evacuatie met behulp van een scheidingpig gunstig lijkt, omdat het geen stratificatieproblemen oplevert en kleinere diffusiefronten heeft, zijn er nadelen zoals een groot verlies van gasvolume, mogelijke verstoring van leveranciers en naar industriële verbruikers. Het gebruik van afsluitschema's, die dichter bij elkaar zitten (zonder pig-voorzieningen) zal minder volumeverlies hebben, maar een succesvolle spoeloperatie is misschien niet altijd mogelijk als de twee afsluitschema's te ver van elkaar gelegen zijn. Bovendien zal het Waterstofnetwerk Nederland pas in 2030 volledig zijn voltooid, waardoor het problemen kunnen ontstaan dat niet alle pijpleidingen, installaties, leveranciers en industriële verbruikers zijn aangesloten op de ringstructuur en daarom kan een afsluiting van een pijpleidingsectie resulteren in onderbrekingen van stromende condities verderop in de waterstofinfrastructuur.

Om stromende condities te behouden, kan een bypass worden geïnstalleerd, maar deze oplossing vereist de isolatie van slechts een klein gedeelte van de pijpleiding. Dit kan gerealiseerd worden door stoppels te gebruiken. Daarom kan het gebruik van stoppels (met een bypass) een zeer effectieve oplossing zijn om de levering te waarborgen. Deze oplossing vermindert ook het verlies van gasvolume, minimaliseert verspilling en verhoogt de algehele efficiëntie van het systeem.

De implementatie van stoppels in waterstofpijpleidingen is niet zonder uitdagingen. De evacuatiemethoden die momenteel in aardgasinfrastructuur worden gebruikt, zijn niet voldoende voor het waterstof netwerk. Verder onderzoek naar veilige toepassing van alternatieve stoppelmethoden is nodig. Procedures om stoppeltreinen veilig te bedienen met een drukverschil aan beide kanten moeten worden onderzocht. Als alternatief kan er onderzocht worden welke procedures en apparatuur nodig zijn om een hydraulische stoppel veilig te bedienen. Hydraulische stoppels zijn veelzijdigere inzetbaar, aangezien ze geen drukverschil nodig hebben om bediend te worden.

Procedures voor het evacueren van installaties, zoals HyStock voor de opslag van waterstof, zijn vergelijkbaar met de procedures die momenteel worden gebruikt in het aardgas. Vanwege de snellere menging tussen stikstof en waterstof, zou de verdunningsgebaseerde spoeling efficiënter kunnen zijn voor waterstofinstallaties. Het wordt aanbevolen om onderzoek uit te voeren naar complexere infrastructuren om dit te bevestigen.

De keuze voor een bepaalde evacuatiemethode moet worden gemaakt op basis van de specifieke omstandigheden van het pijpleiding- of installatiesegment dat onderhoud nodig heeft. In alle gevallen moet er inspanning worden geleverd om de verstoring van leveranciers en industriële verbruikers te voorkomen en het verlies van gasvolume te minimaliseren om economische en milieuredenen. Een samenvatting van alle voordelen en nadelen van verschillende methoden is te vinden in Tabel 9-1.

Tabel 9-1 Overzicht van de voor- en nadelen van verschillende isolatie- en voorkeursevacuatietechnieken

Afgesloten sectie	Voorkeurs- evacuatietechniek	Voordelen	Nadelen
Afsluitschema's met pig-voorzieningen (50~100 km afstand)	Verdringing met een scheidingpig	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimaliseert de vermenging van waterstof en stikstof</li> <li>- Geen stratificatieproblemen en kleinere diffusiefront</li> <li>- Evacuatiemethode is vergelijkbaar met aardgas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Groot verlies van gasvolume</li> <li>- Mogelijke leveringsonderbreking leveranciers en industriële consumenten</li> <li>- Grotere lekkage langs de pig t.o.v. aardgas</li> </ul>
Afsluitschema's zonder pig-voorzieningen (10~50 km afstand)	Verdringing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geen verstoring van leveranciers en industriële consumenten</li> <li>- Evacuatiemethode is vergelijkbaar met aardgas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mogelijk groot verlies van gasvolume</li> <li>- Stratificatieproblemen zullen eerder voorkomen t.o.v. aardgas</li> </ul>
Tijdelijke afsluiting met installeren van een stoppel	Verdringing	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Beperkt verlies van gasvolume- Mogelijkheid om een tijdelijke bypass te installeren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Huidige evacuatiemethoden gebruikt voor aardgas zullen niet volstaan</li> <li>- Meer onderzoek nodig naar stoppeltreinen en hydraulische stoppels</li> </ul>
Afsluitschema's schemes (installatie, complexe leidingsystemen)	Verdunning	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kan in meeste situaties worden toegepast</li> <li>- Meer effectieve waterstofverdunning t.o.v. aardgas verdunning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Meerdere cycli van stikstof verdringing nodig voordat succesvolle verdringing</li> </ul>

## 10 Appendix

## 11 Appendix

### A Physical Effects on the various hydrogen evacuation techniques

To carry out a successful purging operation with hydrogen and nitrogen, certain factors must be considered. The established theory of purging applies to various gases but has been predominantly utilized in the context of natural gas. The established theories can be used to perform estimating calculations for a better understanding of purging a hydrogen pipeline.

After the pipeline has been isolated and reduced in pressure, the most appropriate evacuation method relies on many factors: e.g. the type of installation/pipeline, pipeline diameter/length, piggability, etc. A flow chart of the different selection criteria is provided in Figure A-1. For each of the decision criteria and the respective effects, a dedicated section has been assigned to describe the difference between hydrogen compared to common natural gas evacuations. The impact of the change from natural gas to hydrogen can then be used to update existing evacuation procedures.

The main divisor in the scheme is the question if the line is piggable. In the current scheme, a gas evacuation should always be done with a pig when possible. This is due to the strong stratification properties between the hydrogen and nitrogen, as will be described in section A.3.1, and the potential operational distortions (e.g. temporary shortage of purge gas) during an evacuation procedure.

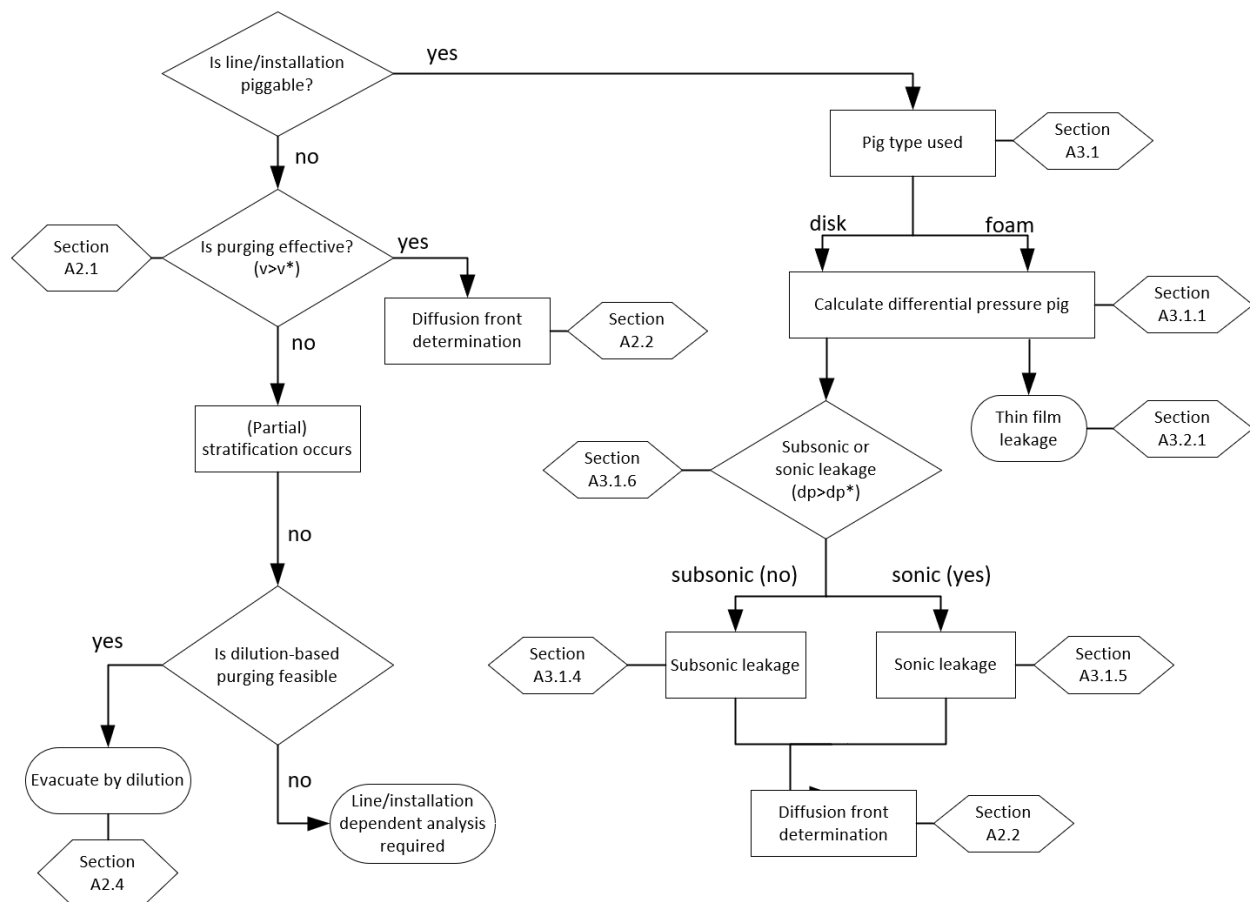


Figure A-1: Decision tree for gas evacuation of pipelines and installations.



## A.1 Physical properties:

Natural gas and hydrogen have different chemical and physical properties and that influences the systems and infrastructure required for their safe and efficient distribution. This chapter will provide an overview of the key differences between natural gas, primarily composed of methane (CH<sub>4</sub>), and hydrogen gas (H<sub>2</sub>) which can play a role in the transportation of these gasses. Fundamental physical and chemical properties of both gases, such as their flammability limits, densities, and viscosities are essential for assessing the current protocols and guidelines for safe operation in the industry. The chapter will focus primarily on the physical and chemical properties of natural gas and hydrogen, their implications for pipeline maintenance procedures, and on their influence on physical processes are explored in greater depth in subsequent chapters.

Table A-1 shows a selection of the physical and chemical combustion properties of methane and hydrogen that influences gas transportation, evacuation and combustion. This table also displays the relevant values for nitrogen, as it is assumed in the report that nitrogen is used as an inert gas during maintenance operations on Hydrogen Network Netherlands .

Table A-1: Physical properties of methane/hydrogen and nitrogen at  $\phi=1$  ( $\lambda=1$ )

	S <sub>L</sub> (cm/s)	Viscosity (10 <sup>-5</sup> Pa s)	Density (kg/m <sup>3</sup> @0 C, 1atm)	LFL		UFL		Min. Ignition energy (millijoule) stoichiometric
				Vol% in air	$\lambda$	Vol% in air	$\lambda$	
Natural Gas	36	1.10	0.09	4.99	2.00	14.7 3	0.61	0.24
Hydrogen	252	0.88	0.72	4.07	9.87	74.2 4	0.15	0.017
Nitrogen	-	1.70	1.25	-	-	-	-	-

<sup>1</sup>calculated for a stoichiometric methane/hydrogen-air mixture after compression

The likelihood that hydrogen is ignited is predominantly reliant upon two fundamental elements. Firstly, the formation of a combustible mixture of air and gas; secondly, the presence of an ignition source possessing sufficient ignition energy.

An air-gas (or nitrogen) mixture is combustible fit the concentrations are within a certain flammability limit. Knowledge of the flammability limits of hydrogen gas in air is a fundamental requirement for a successful purging operation. The lower flammable limit (LFL) of hydrogen is the concentration of hydrogen in the air below which a flame cannot propagate. This concentration is also known as the lower explosive limit (LEL) of hydrogen. As the concentration of hydrogen is progressively increased in air, a point is eventually reached where the concentration is too high to support a flame, which is known as the upper flammable limit (UFL) of hydrogen. The UFL can also be considered the upper explosive limit (UEL) of hydrogen for practical purposes.

Table 1-1 shows that hydrogen's LFL and UFL are approximately 4% and 75% by volume in air, respectively. In contrast, natural gas, primarily composed of methane, has an LFL of approximately 5% and a UFL of approximately 15% by volume in air. This wider flammability range of hydrogen means that it can ignite and burn over a broader concentration range than natural gas, presenting additional safety concerns during pipeline maintenance. Before performing maintenance on hydrogen pipelines,

it is essential to purge the lines with inert gas, such as nitrogen, to minimize the risk of ignition. The flammability end-point diagram shown in Figure A-2 can be used as a useful tool to understand the impact of combustible gas mixtures of nitrogen, air, and hydrogen. The diagram highlights the flammability zone for these mixtures. The axes of the diagram represent the concentrations of the three components. When the concentration of the gas mixture is inside the red triangle, the mixture is within the flammability limit.

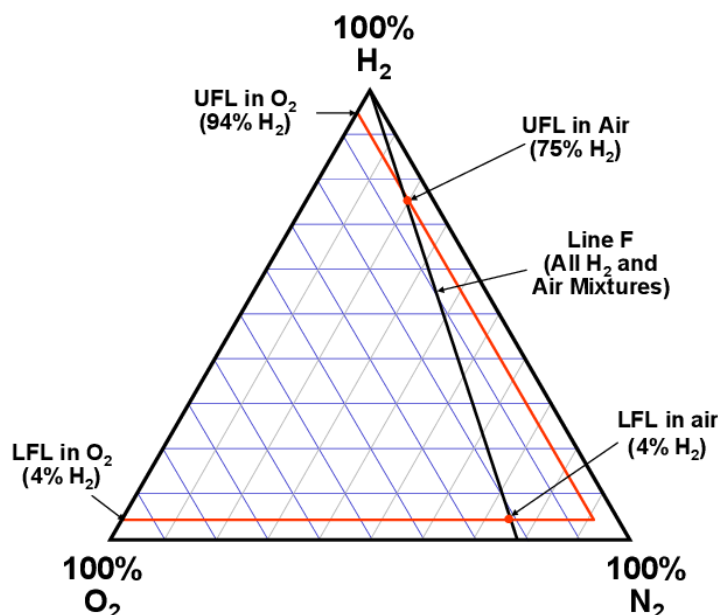


Figure A-2: Flammability Diagram for Hydrogen/Air/Nitrogen at 20 °C and 1 bar [1]

Hydrogen higher flammability limits do not make hydrogen more prone to (unwanted) ignition. When an external energy source interacts with a combustible mixture of gas and air it can ignite. This energy source could include heat, electrical sparks, a chemical reaction, or compression. The external energy catalyses a chain reaction between the gas and the oxygen, leading to the subsequent ignition of the entire combustible composition.

The minimum external energy needed, called the minimum ignition energy, of hydrogen is very low (0.017 mJ) for stoichiometric mixtures. This means that it takes very little energy to ignite a mixture of hydrogen and air, which can be a safety concern in certain situations. The minimum ignition energy is dependent on the ratio of gas and air within a mixture. This correlation is clearly depicted in Figure 1-2, where it can be observed that hydrogen consistently requires lower ignition energy as compared to natural gas, specifically methane. This suggests that the energy threshold to initiate combustion in a hydrogen-air mixture is consistently lower than that of a methane-air mixture.

Besides a broader flammability region and reduced ignition energy, hydrogen also has a higher flame propagation speed, which ranges between 265 and 325 cm/s. Natural gas has a flame propagation between 35 and 45 cm/s, implying that flames fuelled by hydrogen have the capacity to spread significantly faster than those fuelled by methane. which means that hydrogen flames can propagate faster than those of methane.

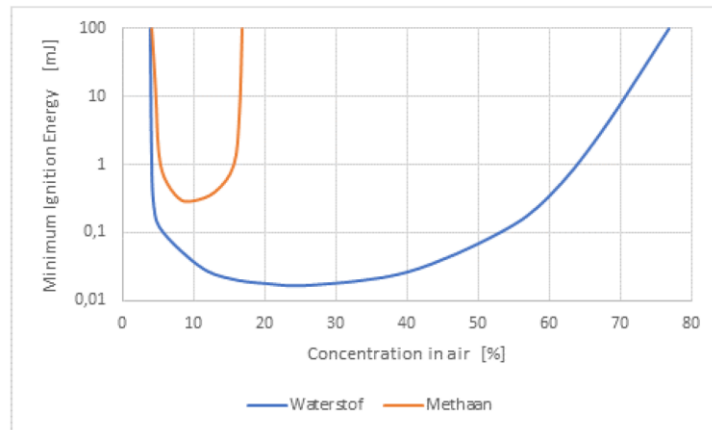


Figure A-3: Minimum ignition energy of hydrogen and methane at various concentrations in air

## A.2 Evacuation by purging

In case the pipeline or the installation is not piggable, purging may be used to evacuate the gas. During a purging operation, two main effects need to be taken into account: stratification of the two gases, and the formation of a diffusion front due to turbulent dispersion. The stratification process will occur when the velocity of the purge gas is too low, i.e. below a certain critical velocity. When the velocity is well above this critical velocity, turbulent dispersion will occur that leads to the formation of a diffusion front. The determination of the length of this front is important to quantify the volume of mixed (off-spec) gas.

### A.2.1 Stratification

The fundamental principle behind stratification is the formation of a so-called gravity-driven wave, which will transverse at the bottom of the pipeline, which has been theoretically assessed by ref **Error! Reference source not found.** for liquid-liquid flows. A visual example of such a wave is depicted Figure A-4. where the lower layer is saline water and the upper layer fresh water (the gravity-driven wave travels from right to left).

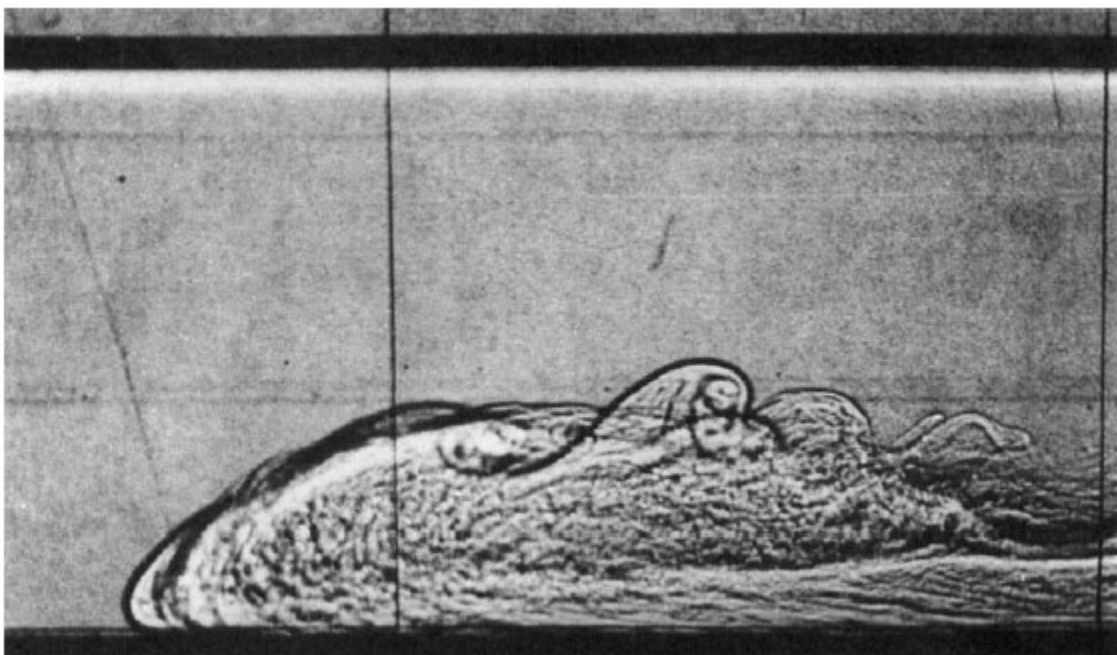


Figure A-4 : Experimental visualization of a gravity driven wave in liquid-liquid flow, taken from ref **Error! Reference source not found.**

The velocity of the gravity driven wave can be calculated assuming certain idealized conditions. The proportionality of the velocity scales with the Froude number and the condition applied in pipeline purging guidelines **Error! Reference source not found.** are

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{\tilde{g}D}} > Fr^*, \text{ so: } v > Fr^* \sqrt{\tilde{g}D}, \quad (1)$$

where  $Fr^*$  is typically between 0.65 and 0.75 **Error! Reference source not found.**, and  $\tilde{g}$  is the buoyancy compensated gravitational acceleration defined as:

$$\tilde{g} = g \frac{\Delta\rho}{\rho}, \quad (2)$$

In literature also the Richardson number, denoted by  $Ri$ , is presented as a critical parameter for stratification, see e.g. **Error! Reference source not found.** and **Error! Reference source not found.** It is noted that the Richardson number is related to the Froude number as:  $Ri = 1/Fr^2$ , and therefore leads to similar expressions for critical stratification values. A summary of critical values from the literature (both  $Ri^*$  and  $Fr^*$ ) can be given in terms of the Froude number:

- $Fr^* = 0.65 - 0.75$ : IPC pipeline purging guideline by Johnson **Error! Reference source not found.**
- $Fr^* = 0.75$ : EN 12327 specification **Error! Reference source not found.**
- $Ri^* = 0.25$ : Kiwa report **Error! Reference source not found.** based on ([https://glossary.ametsoc.org/wiki/Critical\\_richardson\\_number](https://glossary.ametsoc.org/wiki/Critical_richardson_number)) which is equivalent to  $Fr^* = 2$
- $Ri^* = 0.8$ : based on the theoretical study of Leach **Error! Reference source not found.**, which is equivalent to  $Fr^* = 1.1$

Whatever the exact critical value the effect of changing from natural gas to hydrogen can be qualitatively calculated by evaluating equation **Error! Reference source not found.** This leads to the result that for hydrogen the purge velocity should be about 2.2 times higher to prevent stratification.

Next to the Froude number condition, it is also required that the flow of the driving gas is turbulent, which is the common Reynolds number condition, based on the turbulent transition at  $Re^* = 2300$ :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} > Re^*, \text{ so: } v > \frac{Re^* \nu}{D}, \quad (3)$$

where  $\mu$  and  $\nu$  are the dynamic and kinematic viscosity, respectively. As observed from **Error! Reference source not found.**, the experimental data for natural gas/nitrogen show that the Froude number condition in equation **Error! Reference source not found.** is most stringent for larger diameters ( $D > 5''$ ). Below this critical diameter, the Reynolds number condition in **Error! Reference source not found.** is most stringent and the experimental data deviates from the stratification curve. This data is however based on natural gas/nitrogen purging and this critical diameter needs to be re-established for hydrogen/nitrogen purging.

So, for the determination of the critical purging velocity, the  $Fr^* = 0.75$  from the IPC guideline and EN 12327 is used, and the critical velocity becomes

$$v^* = 0.75\sqrt{gD}, \quad (D > D^*). \quad (4)$$

So, for hydrogen-nitrogen purging, the velocity should be approximately 2.2 times higher than for natural gas-nitrogen purging when considering the stratification/Froude condition.

For smaller diameters, the Reynolds condition is the most stringent

$$v^* = \frac{2300v}{D}, \quad (D \leq D^*). \quad (5)$$

So, for hydrogen-nitrogen purging, the velocity should be approximately 7.3 times higher than for natural gas-nitrogen purging when considering the turbulence/Reynolds condition.

The critical diameter for hydrogen/nitrogen can then be found by equalizing equations (1) and (2) and assuming hydrogen as the purge gas, this results in:

$$D^* = \left( \frac{2300v}{0.75\sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} \approx 0.19, \quad (6)$$

which is significantly higher than the value for natural gas/nitrogen. Considering both conditions the minimum purging velocity can be calculated, see Figure A-6

It is noted that the stratification equation in (1) is symmetric (i.e. it does not matter if nitrogen is the driving gas or hydrogen), whereas the turbulent flow condition depends on the driving gas. Therefore, the critical diameter changes when using nitrogen as the purge gas:  $D^* \approx 0.05$ , and the critical velocity is dominated by the stratification condition for most typical diameters, see Figure A-7.

These theoretical results can be validated utilizing the purging experiments as performed in **Error! Reference source not found.** The experiments were performed under several velocities, ranging from 0.2-1 m/s, for a 200mm pipe. Looking at Figure A-5, these velocities are (well) below the critical velocity as estimated by theory and significant effects should have been observed. This is however not the conclusion of the experimental tests in **Error! Reference source not found.** The stratification phenomenon is observed in the first horizontal section of the test setup with a front propagating towards the first observation point at approximately 50 m from the injection. An estimation of the front can be made based on the propagation velocity and the difference between the top and bottom composition measurement and results in a front length of approximately 16m, which does indicate significant stratification. Also, the fact that the front becomes compact in the upward-sloping pipe indicates stratification.

So, the conclusion could be that stratification is occurring, however, it does not necessarily lead to a volume that cannot be purged. One of the phenomena that could be responsible for this is the effect of turbulent dispersion which will be treated in the next section.

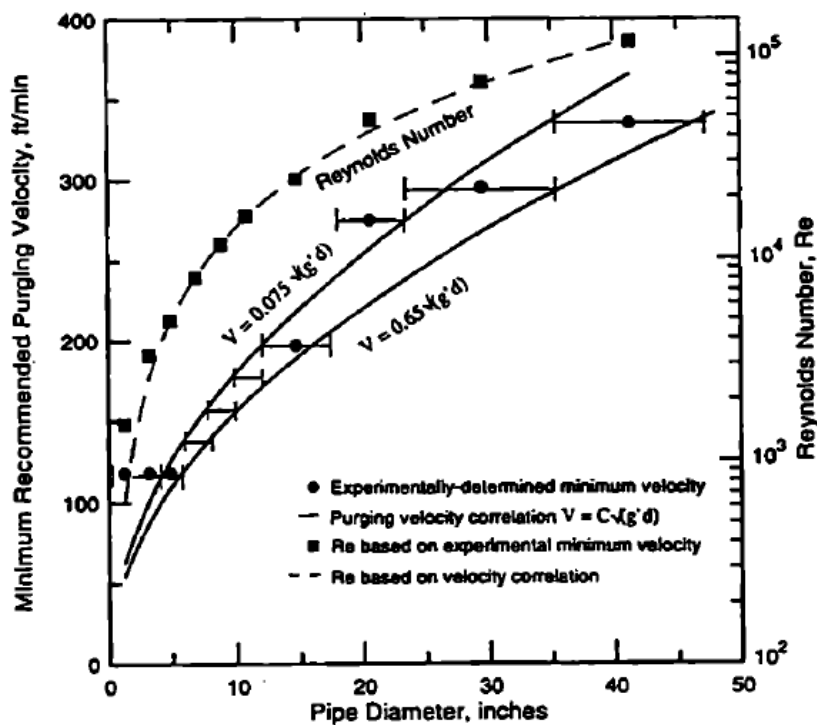


Figure A-5 : Minimum velocity requirement to prevent stratification, taken from ref Error! Reference source not found.. Note: the upper solid line contains a typo, the constant should be 0.75.

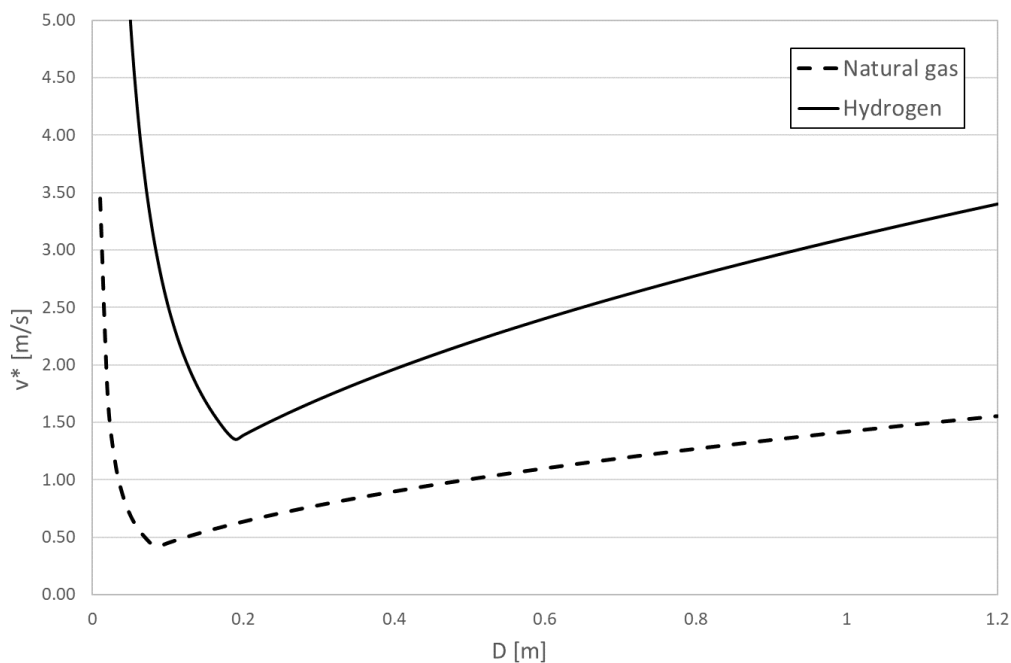


Figure A-6 : Minimum velocity requirement to prevent stratification for hydrogen and natural gas as driving gas.

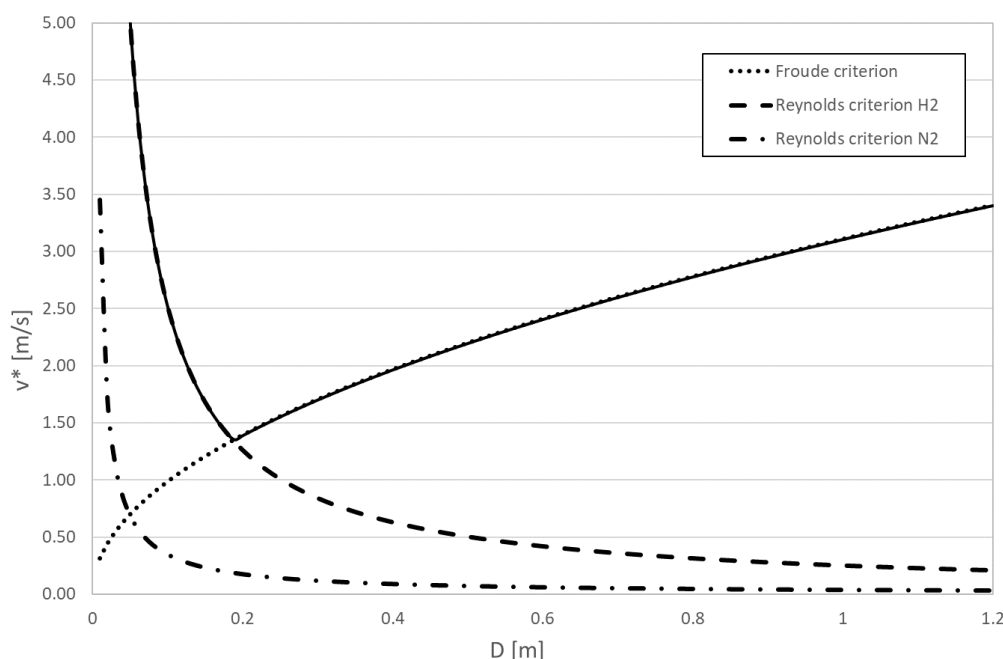


Figure A-7 : Minimum velocity requirement to prevent stratification for hydrogen and nitrogen as driving gas. The solid line indicates the maximum critical velocity for both stratification and turbulence for hydrogen.

### A.2.2 Diffusion Front

When stratification can be prevented by applying a sufficiently high purging velocity, still a diffusion front will appear caused by turbulent dispersion. Several studies have been performed on the process of axial turbulent diffusion starting with the work of Taylor **Error! Reference source not found.** This work led to multiple publications, see e.g. refs **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, **Error! Reference source not found.**, and **Error! Reference source not found.**, on the modelling of the turbulent dispersion coefficient, also referred turbulent diffusion coefficient. For one-dimensional pipe flow, it is generally assumed that this coefficient is a function of the Reynolds number only.

The process that causes the mixing of the diffusion front is turbulent dispersion. Typically, other processes like molecular diffusion are orders of magnitude lower in terms of the diffusion coefficient. To gain insight into the turbulent dispersion a literature study has been performed considering theoretical models, lab experiments, and full-scale experiments. The first model for turbulent dispersion was developed by Taylor **Error! Reference source not found.** and proved that the diffusion coefficient due to turbulent dispersion, denoted by  $E$ , could be written as a function of the pipe Reynolds number when written in the dimensionless form:

$$\frac{E}{vD} = \frac{1}{Pe} = f(Re), \quad (7)$$

The left-hand side of equation **Error! Reference source not found.** is a dimensionless form of the diffusion coefficient, which is the inverse Péclet number. The different theoretical models based on the Péclet-Reynolds domain and lab experiments were presented in **Error! Reference source not found.** and provided in **Error! Reference source not found.** Although there is some scatter in the data, the results for the theoretical models seem to fit well with the lab experiments.



Also, large-scale experiments have been carried out in the past of which one data set is generated by Gasunie, see the series of publications by Hoelen **Error! Reference source not found.**, and can be presented in the same way, see **Error! Reference source not found.**. In this figure, also the results obtained from a test in 2017 at the Pernis mixing station are added. As a reference, the model of Taylor has been plotted in the figure (dashed line) to emphasize the difference between the lab-scale experiments in **Error! Reference source not found.** and the full-scale experiments in **Error! Reference source not found.**. It is anticipated that in these large-scale experiments also effects of stratification may have occurred which leads to larger diffusion fronts than for pure turbulent dispersion. So, for the turbulent dispersion, the high Reynolds number limit of the Taylor model is used:

$$\frac{E}{vD} = 0.2. \quad (8)$$

Although there is a small dependence of the inverse Péclet number on the Reynolds number, the choice of assuming it constant is justified for a large Reynolds range and simplifies the calculation of the diffusion front.

One can calculate the diffusion front length by taking the analytical solution of the instationary diffusion equation, see e.g. **Error! Reference source not found.**. Taking the value of the composition of the purge gas at 0.05 and 0.95, since the front will exhibit a smooth transition between the gases, the distance between these values is a measure of the diffusion front

$$\Delta x = 2.08\sqrt{DL}. \quad (9)$$

This means that for a pipeline with  $D = 0.1m$  and a propagation length of  $L = 1000m$ , the diffusion front becomes  $\Delta x = 20.8m$ . Observe that the equation for the diffusion front due to turbulent dispersion is not gas property dependent and will be similar for hydrogen and natural gas. Also, it does not depend on the velocity.

The results of the Kiwa experiments in **Error! Reference source not found.** were used to check the outcome of the equation (4). For the 100mm experiment, the diffusion front very closely resembles the theoretical prediction. The experiment shows that the diffusion front length is indeed velocity-independent and results in approximately equal volumes of remaining gas-air mixtures for different velocities. The results for the 200mm pipe do not agree well with equation (4) although the diffusive front length also seems velocity independent.

The inverse experiments where hydrogen is used as the purge gas show significantly different results compared to using nitrogen, see **Error! Reference source not found.**. This may be because as explained in Figure A-7, using hydrogen as a purge gas may lead to the driving gas not becoming turbulent. Also, the chosen geometry of the test setup may have contributed to these differences.



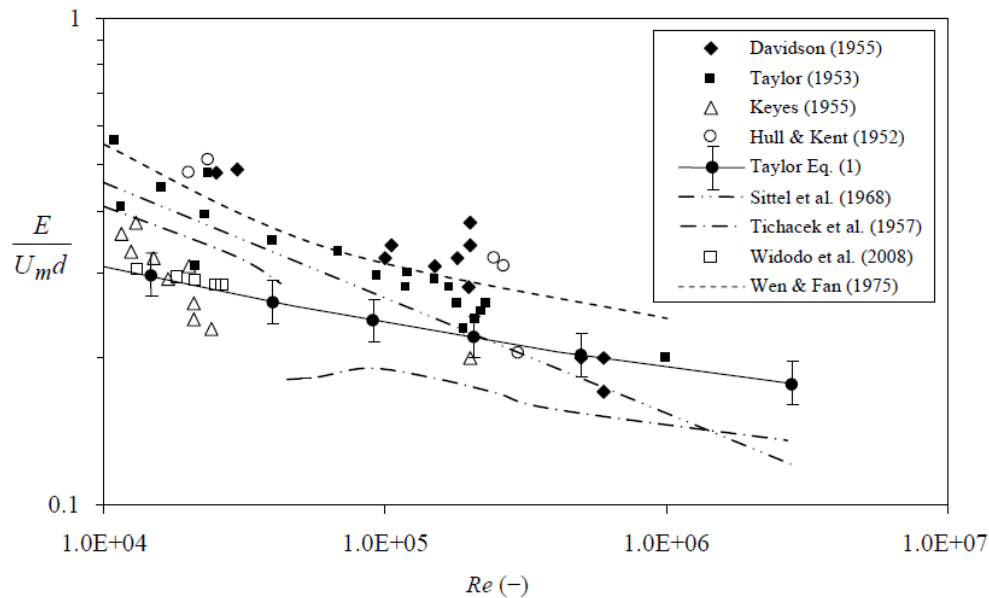


Figure A-8 : Comparison of theoretical turbulent dispersion models and lab experiments, taken from reference **Error! Reference source not found.**;  $U_m$  is the bulk velocity (equivalent to  $v$ ) and  $d$  is the diameter of the pipe (equivalent to  $D$ )

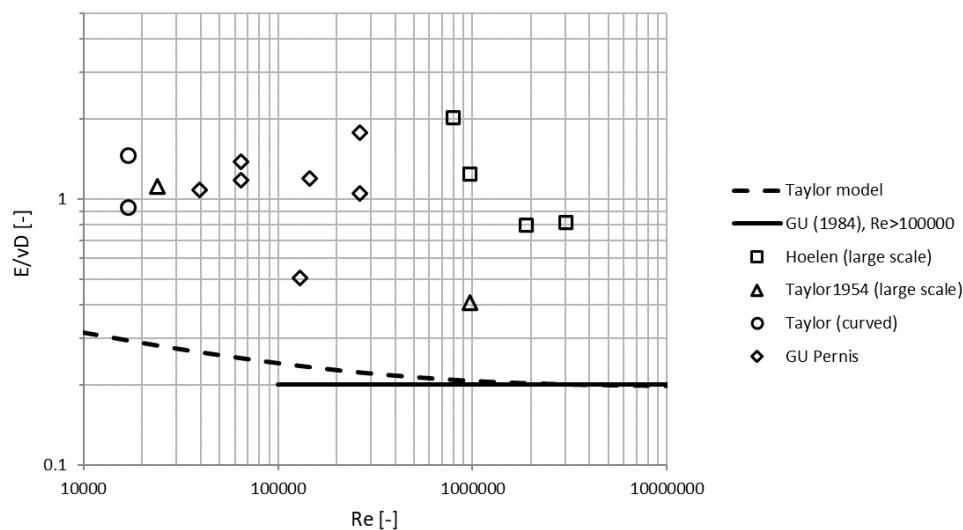


Figure A-9 : Comparison of theoretical turbulent dispersion models and experimental data for large-scale experiments

### A.2.3 Pipeline and installation considerations

In some situations, a pipeline or installation may have a favourable or non-favourable geometry for purging. It is difficult to make a general statement about this since installations can differ in configurations and shape. For an upward-sloping geometry, it is favourable to inject the nitrogen at the lowest point and bleed off the hydrogen at the highest point at the end of the purging volume. When hydrogen is used as the purging gas, the process should be inverted. This is a general statement that also applies to large volumes in e.g. compressors and vessels. Also, in pipelines with vertical T-branches, the light or heavy gas may be captured in upward or downward orientations, respectively.

For complex installations, a detailed analysis should be performed to consider the above-mentioned items. If purging remains a difficult process and dead volumes cannot be prevented, a dilution method can be performed, which will be described in the next section.

#### A.2.4 Dilution

When performing a dilution exercise, the purge gas will be added to the volume and increased to a certain pressure  $p$ . The pressure is relieved to atmospheric pressure ( $p_{atm}$ ) and therefore the concentration of the gas to be purged will reduce with approximately the ratio of these pressures ( $p/p_{atm}$ ). This assumes that the gases are well-mixed and this depends on the injection velocity of the gas, i.e. the generation of turbulent mixing. In some parts of the volume to be purged it may be possible that no/low flow can be enforced, i.e. dead ends or large volumes. In those cases, the mixing depends on molecular diffusion between the two gases and the buoyancy between these gases. These processes are competing, and molecular diffusion is typically a very slow process. The final result of these competing processes is difficult to quantify, but one can compare the situation of natural gas-nitrogen to the case of hydrogen-nitrogen to estimate the relative effect.

This analysis starts with the dimensional analysis of the two competing processes, which are governed by the Peclet number for molecular diffusion and the Froude number. Taking the ratio of the two numbers leads to a dimensionless number that is independent on the velocity

$$\left(\frac{Pe}{Fr}\right)^2 = \frac{\tilde{g}D^3}{E^2}, \quad (10)$$

where  $E$  is now the molecular diffusion coefficient. The higher this dimensionless number the more the gases will remain separated, the lower this number the more dominant the molecular diffusion is and the more mixed the two gases will be. The number will increase when the density difference increases (increasing  $\tilde{g}$ ) or the volume increases (increasing  $D^3$ ). Calculations of equation **Error! Reference source not found.** show that this number is higher for the natural gas-nitrogen system than for the hydrogen-nitrogen system, so the hydrogen-nitrogen mixture will mix faster (approximately 3.4 times as fast) than the natural gas-nitrogen mixture. This is mainly due to the molecular diffusion coefficient which is more than 4 times higher for the hydrogen-nitrogen mixture.

### A.3 Evacuation by PIG usage

If a pipeline or part of an installation is piggable, a separation pig can be used as a barrier between the purge/driving gas and the gas that needs to be evacuated. For the evacuation operations, different pig types may be selected and this choice will influence the potential leakage of the purge gas towards the gas to be evacuated. The leakage depends on the type of pig and the type of purge gas used for driving the pig. This section concludes with an analysis of the different leaking mechanisms and the influence of the gas properties on these leaking mechanisms. Also, some considerations on pig operations are provided.

#### A.3.1 Pig types

Different types of pigs exist, from simple foam pigs to complex inline inspection tools, see **Error! Reference source not found.**A-10. For the evacuation of pipelines, mostly the foam or disk-type pigs without diagnostic electronics are used as separator devices. These pig types are highlighted in the blue box in **Error! Reference source not found.**.

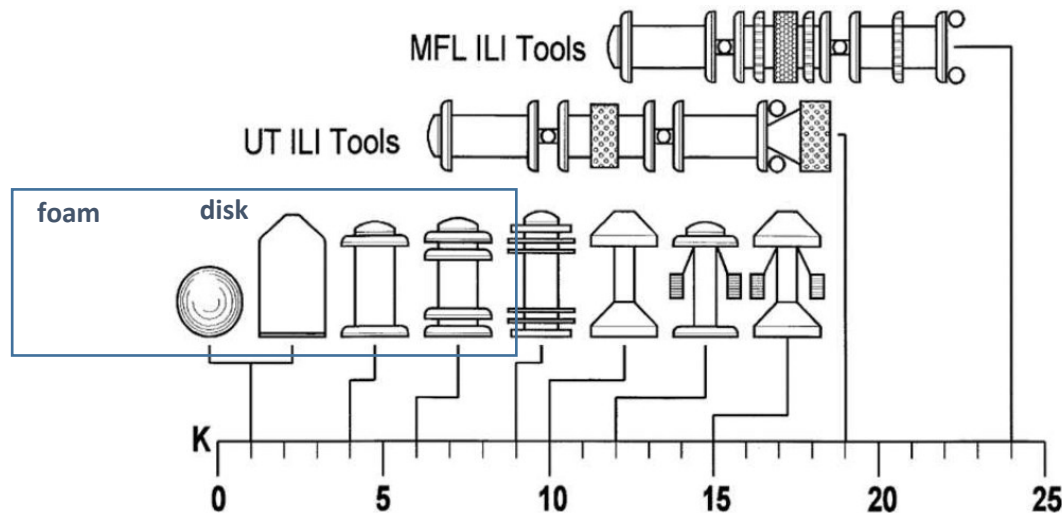


Figure A-10: Different pig types and corresponding resistance coefficients, taken from **Error! Reference source not found.**

#### A.3.1.1 Pig differential pressure and leakage

Depending on the type of pig a certain differential pressure is required to move the pig through the pipeline. The expected differential pressure over the pig can be estimated by the empirical relationship:

$$\Delta p = \frac{K}{D^5} \quad (11)$$

where  $D$  is the internal diameter in inches, the differential pressure in bar, and  $K$ -value depends on the type of pig used, see the horizontal axis in **Error! Reference source not found.** So, for a 6-inch pipe a double disk pig ( $K = 6$ ) produces 1 bar differential pressure. Based on the determined differential pressure and the leakage mechanism, a leakage rate can be determined qualitatively.

The leakage is considered for two different leakage mechanisms: a thin-film annular flow (viscous flow) and leakage due to an opening caused by non-smooth surfaces (non-viscous flow). The latter non-viscous flow regime can be either subsonic (differential pressure-driven orifice flow) or sonic (choked flow). In the next subsections, these fluid dynamical mechanisms are described in more detail and their dependence on the physical properties of the driving gas are explained.

It is noted that the theoretical framework of the different leakage mechanisms can be applied to other leakage phenomena as well, e.g. valves, stopples, and bellows. An assessment is needed for each of these components to determine what type of leakage is expected, i.e. thin film leakage or cavity leakage.

#### A.3.1.2 Thin film leakage

When a pig is used that has a relatively long contact area with the wall (e.g. a foam pig), a potential leakage can occur through the clearance between the pipe wall and the pig. This thin annular clearance has a relatively long length,  $l$ , compared to the clearance width,  $c$ , i.e.  $l \gg c$ . This situation is illustrated in Figure A-11

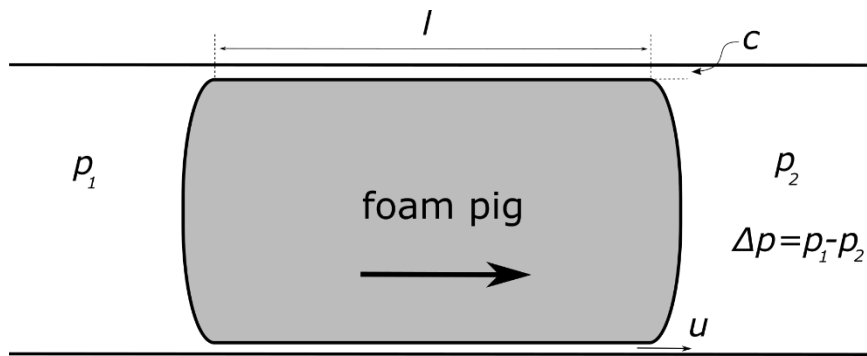


Figure A-11: Geometrical representation of a foam pig and the leakage mechanism

The differential pressure of such an annular clearance can be calculated based on the friction factor,  $f$ , and is given by

$$\Delta p = \frac{f l}{4 c} \rho u^2, \quad (12)$$

where  $\rho$  is the density of the gas and  $u$  is the leakage velocity. For the laminar flow regime and annular flow, the friction factor has the form **Error! Reference source not found.**

$$f = \frac{64}{Re_c} \cdot \phi(\alpha), \quad Re_c = \frac{\rho u 2c}{\mu}. \quad (13)$$

$Re_c$  is the Reynolds number of the flow through the clearance and  $\phi(\alpha)$  is a function describing the shape of the annular clearance. For small clearance compared to the diameter of the pipe, i.e.  $c \ll D$ , this function becomes  $\phi(\alpha) \approx 1.5$  **Error! Reference source not found.**. Now by combining equations REF\_Ref128379355 \h \\* MERGEFORMAT **Error! Reference source not found.** and **Error! Reference source not found.**, the leakage velocity can be determined

$$u = \frac{c^2 \Delta p}{12 \mu l}, \quad (14)$$

This leakage form is expected when a foam pig is used or when the disks of the pigs are pliable (or made of a soft material) causing a small clearance between the pig and the pipe wall over a longer distance.

The equation for the leakage flow does not provide a quantitative value for the leakage flow, since that depends on the exact measures of the clearance, which is typically not known. What it provides is the dependence of this leakage on the physical properties of the used driving gas. The geometrical parameters ( $c, l$ ) do not depend on the gas, also the differential pressure based on equation **Error! Reference source not found.** depends solely on the geometry. Therefore, the leakage is inversely proportional to the dynamic viscosity

$$u \propto \frac{1}{\mu}. \quad (15)$$

This means that when using hydrogen as the driving gas (i.e. when a separation pig is used after maintenance has been completed) the leakage is approximately 20% higher compared to using natural gas. When using a separation pig before the maintenance (i.e. when nitrogen is used as driving gas) no change is expected in the leakage behaviour from the normal natural gas evacuation procedure.

#### A.3.1.3 Flow through cavity

If the leakage is caused by a small cavity between the pipe wall and the pig, i.e. due to imperfections in the pig disk or small ripples on the inner surface of the pipe, the flow through that opening is driven by the differential pressure. This leakage mechanism is visualized in **Error! Reference source not found.** and is expected when the length of the cavity is of the same order as the width, i.e.  $l \approx c$ . The leakage flow is limited by the disk with the smallest cavity. In the example of **Error! Reference source not found.**, the pressure is allowed to equalize between the driving gas and the space between the disks assuming the cavities on the left disk to be larger than the right disk. The flow through this cavity can either be subsonic (section **Error! Reference source not found.**) or sonic (section **Error! Reference source not found.**), depending on the differential pressure (see section **Error! Reference source not found.**).

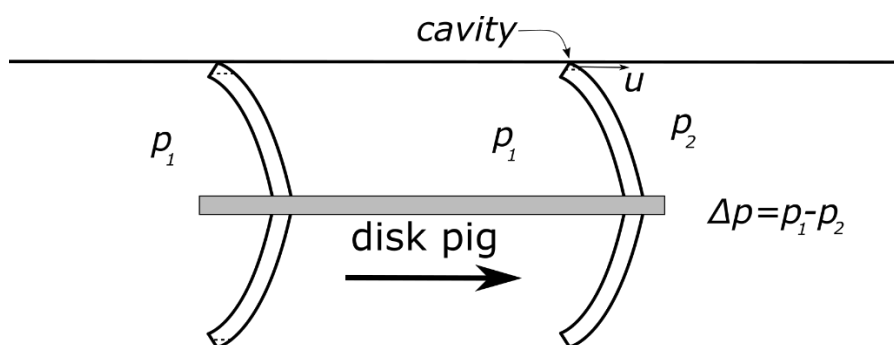


Figure A-12: Geometrical representation of a disk pig and the leakage mechanism

#### A.3.1.4 Subsonic orifice flow

In the case the differential pressure remains below the critical value, see section **Error! Reference source not found.**, the flow through a small cavity can be derived from the Bernoulli equations for an inviscid (a near zero-viscosity flow), incompressible flow and is given by:

$$u = C_d \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (16)$$

where  $C_d$  is typically between 0.4 and 0.8, depending on the shape of the hole. As an example, an orifice plate  $C_d = 0.6$ . The discharge coefficient partly corrects the assumption of an inviscid flow and may depend on the Reynolds number.

Equation **Error! Reference source not found.** shows that the leakage velocity of a subsonic orifice flow depends on the differential pressure and is inversely proportional to the density. As explained in section **Error! Reference source not found.**, the differential pressure is geometry dependent and is expected not to depend on the physical properties of the driving gas. Therefore, the leakage is inversely proportional to the square root of the density:

$$u \propto \sqrt{\frac{1}{\rho}}. \quad (17)$$

This means that when using hydrogen as the driving gas (i.e. when a separation pig is used after maintenance has been completed) the leakage is approximately 30% higher compared to using natural gas. When using a separation pig before the maintenance (i.e. when nitrogen is used as driving gas) no change is expected in the leakage behaviour from the normal natural gas evacuation procedure.

Since hydrogen pipelines are expected to be operated under relatively clean gas conditions, the pipe wall is expected to exhibit fewer imperfections as compared to natural gas pipelines where potential liquids and corrosion products may be present in parts of the pipeline. It is difficult to quantify this effect at this stage.

#### A.3.1.5 Sonic flow

In the case of a differential pressure exceeding the critical value, see section **Error! Reference source not found.**, the flow through the cavity may become sonic. At these choked flow conditions, the leakage velocity is equal to the speed of sound. The speed of sound needs to be taken at the conditions at the minimum area of the cavity, indicated by  $c^*$ . This condition can be converted to the conditions of the driving gas by using isentropic relations **Error! Reference source not found.**, which results in:

$$u = c^* = \sqrt{\kappa Z^* R T^*} = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho} \left[ \frac{2}{\kappa + 1} \right]^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \quad (2)$$

The isentropic coefficient  $\kappa$  is nearly equal for hydrogen and nitrogen, which leaves the effect of pressure and density. Since the differential pressure on the pig is expected to be independent on gas composition, the pressure in the driving gas is expected to be similar for nitrogen and hydrogen. Therefore, the leakage is inversely proportional to the square root of the density:

$$u \propto \sqrt{\frac{1}{\rho}} \quad (3)$$

This means that the same conclusions can be drawn as in section **Error! Reference source not found.**, i.e. the leakage is approximately 30% higher for hydrogen as compared to using natural gas.

#### A.3.1.6 Sonic vs subsonic flow

Based on the equations for the leakage velocities, one can determine the condition at which the flow becomes sonic. Writing equation **Error! Reference source not found.** in terms of Mach number with the help of equation **Error! Reference source not found.** leads to:

$$M = \frac{u}{c} = C_d \sqrt{\frac{2}{\kappa \left[ \frac{2}{\kappa + 1} \right]^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}} \sqrt{\frac{\Delta p}{p}}} \quad (4)$$

In other words, at sonic conditions ( $M = 1$ ), the relative differential pressure should be

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\kappa \left[ \frac{2}{\kappa + 1} \right]^{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1}}}{2 C_d^2} \quad (5)$$

For  $C_d = 0.6$ , which results in  $\frac{\Delta p}{p} \approx 0.65$ . So, when the differential pressure on the pig exceeds 65% of the driving pressure, the flow through the cavity becomes sonic. For the case where the pressure in the gas to be evacuated is atmospheric, this leads to a required differential pressure of 2 bar on the pig, which is very uncommon as explained in section **Error! Reference source not found.**

#### A.3.2 Pig operations

For hydrogen applications, different pig designs are used. These hydrogen pigs typically have a different material for the discs to reduce the risk of electrostatic build-up and resist decomposition,

see **Error! Reference source not found.**. This may influence the friction characteristics of the pig and therefore the pressure drop, however no confirmation in the literature could be found.

One of the concerns of pig operations in hydrogen is the stick-slip behaviour of the pig leading to more unstable pig runs. The moment a pig comes to hold in a pipeline, a water-hammer type pressure wave is generated which increases the pressure at the tail of the pig (and at the same time an expansion wave is generated at the head of the pig). If this pressure increase is large enough the pig will continue its run. This stick-slip effect is typically appointed to the density of the gas, i.e. the higher the density the less the risk of stick-slip behaviour and the more stable the run. Elaborate analyses were performed in **Error! Reference source not found.**, where the full coupled problem of the fluid dynamics of the gas and the mechanical dynamics of the pig were analysed. If we focus on the effect of the sudden stop of the pig and the pressure effect, the differential pressure caused by the sudden decrease of the gas velocity can be described by the Joukowski equation for the water-hammer:

$$\Delta p_J = \rho c \Delta v, \quad (6)$$

where the  $\rho c$  is the acoustic impedance of the medium,  $\Delta p_J$  is the increase in pressure at the tail side of the pig and  $\Delta u$  is the difference in gas velocity (which for a full stop is equal to the driving velocity). So, when using the same gas, the stick-slip behaviour is indeed governed by the density, since the speed of sound will remain approximately the same. However, when the gas is changed, also the speed of sound changes. The difference between the standard natural gas/nitrogen case and hydrogen is a reduction of the acoustic impedance between 3 and 4. So when the pig is stopped with the same driving velocity, the increased pressure at the tail side of the pipe will be approximately 3-4 times lower. This makes the pig more susceptible to stick-slip behaviour under hydrogen conditions. For evacuation purposes the velocity of the pig is less important since no data is collected during the pig run (constant pig velocity is a requirement for proper data acquisition), therefore a solution could be to increase the pig velocity when possible.

Also, the above-mentioned analysis can be performed on the basis of the increase in total pressure when the gas velocity decreases. For an isentropic flow, this leads to the Bernoulli equation for the increase in pressure

$$\Delta p_B = \frac{1}{2} \rho \Delta v^2, \quad (7)$$

Which effect is dominant can be shown by taking the ratio of the two expressions for the differential pressure

$$\frac{\Delta p_J}{\Delta p_B} = \frac{2}{M}, \quad M = \frac{\Delta v}{c} \quad (8)$$

where  $M$  is the Mach number. This means that for low pig velocities, the water hammer effect (Joukowski equation) is dominant.



## B Notulen discussiepanel evacueren en vullen van waterstofleidingen

MoM.nr.: 10365965-5-1

**NOTULEN Aan: Deelnemers aan het overleg over het evacueren en vullen van waterstofleidingen**

**Van:** DNV Energy Systems  
**Datum:** 24-05-2023  
**Opgesteld door:** Robert Mellema

### Verslag van overleg over het evacueren en vullen van waterstofleidingen

**Tijd/Locatie:** 04-04-2023, DNV kantoor Groningen  
**Deelnemers:** Peter van Wesenbeeck, Eddie Schoon, Gert Kruizinga, William Poeste, Martin van Agteren, Cor Coomans, Sieger Koops, Rob de Vries, Edwin Algera, Wil Keesom, Martin Hommes, Henk Top, Dennis van Putten, Pieter Wolffs, Robert Mellema

#### Inleiding

In het kader van het HyDelta 2.0, werkpakket 5 heeft DNV opdracht gekregen een richtlijn samen te stellen met betrekking tot het veilig en effectief drukloos maken en weer vullen van waterstofleidingen. Het gaat hierbij om leidingen die reeds gevuld zijn met waterstof.

In dit verband is een aantal Gasunie deskundigen uitgenodigd om over verschillende aspecten van het drukvrij maken en vullen van waterstofleidingen te overleggen. Het overleg heeft plaatsgevonden aan de hand van een presentatie die door DNV was voorbereid. Dit verslag geeft een samenvatting van hetgeen besproken is, niet per sé in chronologische volgorde.

#### Stoppelen

Bij gasklussen wordt waar nodig gebruik gemaakt van stoppels om het leidingdeel waarin de werkzaamheden moeten worden uitgevoerd af te sluiten van de rest van het gasnet om de werkzaamheden veilig uit te kunnen voeren. Via een (tijdelijke) omloopleiding kan het transport in de onderhavige leiding worden voortgezet. Stoppels zijn tijdelijke afsluiters die via een aanboring in de leiding kunnen worden ingebracht en door uitgekapt/gedraaid te worden een blokkade in de leiding vormen. Dit is bij aardgas een bewezen techniek waarbij tevens een balg wordt ingebracht tussen de stoppel en de gasklus om daartussen een ruimte te creëren die bijvoorbeeld met stikstof gespoeld kan worden om de vorming van een explosief gas/lucht mengsel te voorkomen bij (enig) doorlekken van gas door de stoppel. Bij de tijdens het overleg getoonde afbeelding wordt opgemerkt dat de balg aan de verkeerde zijde van de Tor-nippel is afgebeeld, maar dit zou betekenen dat het afgesloten leidingdeel niet kan worden gespoeld maar alleen drukvrij kan worden gehouden (Bleed). Het spoelen met lage druk stikstof zou juist een veiliger atmosfeer kunnen creëren; hiervoor zou een extra nippel moeten worden toegevoegd.

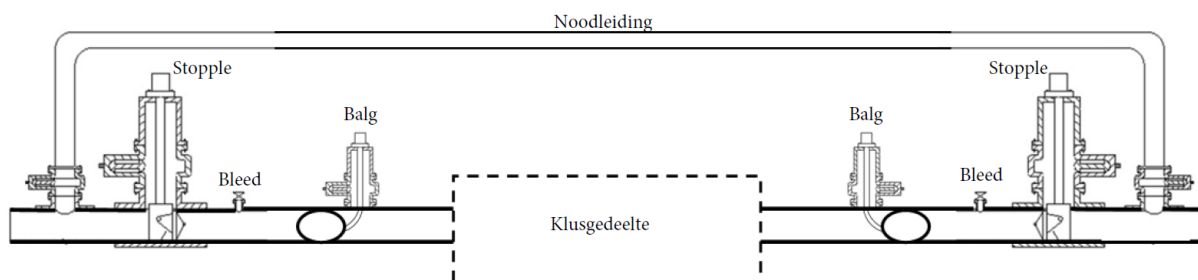


Figure B-1 Voorbeeld-opstelling van klusoperatie met twee stopples

Er worden vraagtekens geplaatst bij het toepassen van stoppels bij waterstof; er treedt bij aardgasklussen vrijwel altijd lekkage op als gevolg van een onvolkomen afsluiting, bijvoorbeeld door de aanwezigheid van boorspanen en -gruis op de bodem van de leiding. Dit is de reden dat stoppelen tot een minimum wordt beperkt. In Enschede is echter een geslaagde proef uitgevoerd met een enkele stoppel en balg afsluiting zoals hierboven getoond met 60 bar waterstof, maar de resultaten van eenzelfde proef met een dubbele stoppel (zonder balg, een zogenoemde stoppeltrein) waren minder goed. Bij de proeven is gebruik gemaakt van een camera om de plaatsing van de stoppels en het wegvegen van het boorgruis met de stoppel te ondersteunen en dit werd als zeer nuttig ervaren.

Er worden ook vraagtekens geplaatst bij de sterkte van balgen en het risico op scheuren/doorlekken; dit wordt echter weersproken. In de praktijk mogen balgen gebruikt worden tot een drukverschil van 200 mbar aan beide zijden, maar balgen zijn voldoende sterk om veel grotere drukverschillen te weerstaan (4 bar werd genoemd). Wel moeten ze afdoende worden beschermd tegen vuur en vonken of mechanische belasting, bijvoorbeeld door het plaatsen van rioolstoppers indien de afstand tussen balg en de gasklus niet groot genoeg is (> 3 m.)

Om problemen met stoppels zoveel mogelijk te vermijden wordt gesuggereerd gebruik te gaan maken van hydraulisch arreterbare stoppels. Deze stoppels geven een veel betere afsluiting doordat de klepzitting met grote kracht tegen de buiswand gedrukt kan worden (smartplug isolation system van TD Williams of TechnoPlug tm of remote techno plug tm., filmpje Hot Tapping & Plugging: leak tight Double Block and Bleed isolation. Bij Gasunie wordt geen gebruik gemaakt van dergelijke hydraulische stoppels maar in het buitenland worden deze al veelvuldig met succes toegepast. Daarvoor is het wel nodig dat speciale apparatuur wordt aangeschaft.

Verder wordt opgemerkt dat de bij Gasunie momenteel in gebruik zijnde stoppels alleen goed werken indien een zeker drukverschil over beide zijden van de stoppel bestaat. Bij gebruik van een stoppeltrein werkt de binnenste stoppel derhalve niet totdat de buitenste stoppel zoveel gas heeft doorgelaten dat de druk in de ruimte tussen beide stoppels voldoende is gevuld om ook de binnenste stoppel goed af te laten sluiten. De afstand tussen beide stoppels komt bij benadering overeen met de leidingdiameter.

*Uit de discussie kan worden geconcludeerd dat er bezwaren bestaan tegen de momenteel bij Gasunie gebruikte stoppels; het gebruik daarvan zou tot een minimum moeten worden beperkt. Voor het gebruik van stoppels in waterstofleidingen zijn aanpassingen aan de gevolgde werkwijzen en gebruikte apparatuur nodig. Ten aanzien van het gebruik van dubbele en/of hydraulische stoppels moet nog ervaring worden opgedaan.*

### **Inblokken tussen afsluiters**

In plaats van lokaal aangebrachte stoppels kan ook worden overwogen gebruik te maken van reeds bestaande afsluiters in het leidingdeel waarin de gasklus uitgevoerd dient te worden. Er wordt dan gebruik gemaakt van dubbele block & bleed afsluiterschema's. Het voordeel is dat geen stoppels geplaatst hoeven te worden; door het gebruik van balgen dichtbij de gasklus kan het volume aan lucht dat in de leidingdelen aan weersijden van de gasklus komt worden beperkt. Voordeel is dat niet de gehele inhoud van de leiding hoeft te worden verdrongen. Als extra veiligheidsmaatregel wordt een tweede balg ingezet waarvan het geïsoleerde leidingdeel wordt gespoeld met stikstof.

### **Verdringing met pigs**

Wanneer leidingen over grotere afstanden drukvrij gemaakt moeten worden waarbij voor het verdringen gebruik wordt gemaakt van een inert gas zoals stikstof dient altijd gebruik te worden gemaakt van scheidingspigs om opmenging van waterstof en stikstof zoveel mogelijk te vermijden.

Ten aanzien van het gebruik van pigs in waterstofleidingen worden de volgende opmerkingen gemaakt:

- Er dienen maatregelen te worden genomen om luchtinsluitingen in pig launchers en receivers te voorkomen, vooral gelet op de ruimere explosiegrenzen van waterstof ten opzichte van aardgas. Er wordt hierbij wel opgemerkt dat het effect van een eventuele ontbranding van de waterstof in een pig-trap mogelijk beperkt zal zijn door de geringe volumes en de lage energie-inhoud van waterstof. Dit zal echter wel nader onderzocht dienen te worden. Vorming van een brandbaar mengsel zal echter altijd voorkomen moeten worden. De pig launcher en receiver zal moeten beschikken over voorzieningen om het te kunnen spoelen en ook evacueren met een vacuümpomp kan worden overwogen.
- Onderzoek van DNV heeft uitgewezen dat het dynamische gedrag van een pig in een waterstofleiding afwijkt van die in een aardgasleiding. Door de geringere dichtheid van waterstof wordt het stick-slip gedrag versterkt waardoor de pig zich minder gelijkmatig door de leiding zal voortbewegen. Dit kan minder gunstig zijn bij het gebruik van inspectiepigs maar hoeft voor scheidingspigs niet direct een probleem op te leveren. Het 'waterslageffect' met waterstof is 3-4 maal kleiner dan met aardgas door de geringe dichtheid van waterstof.
- Verder onderzoek van DNV heeft uitgewezen dat de lekkage van pigs tussen pijpwand en pig met waterstof 20-30% groter zal zijn dan met aardgas. Dit is echter gestoeld op een theoretische beschouwing; experimenteel onderzoek zal nodig zijn om e.e.a. te bevestigen.

### **Verdringing zonder pigs**

Indien het niet mogelijk is om gebruik te maken van pigs dient verdringing plaats te vinden door het injecteren van het verdringende gas (bijvoorbeeld stikstof) rechtstreeks achter het te verdringen gas (bijvoorbeeld waterstof). Door het ontbreken van een fysieke scheiding tussen beide gassoorten zal opmenging plaatsvinden waardoor een deel van het waterstof in de leiding off-spec en dus onbruikbaar zal worden. Ten aanzien hiervan wordt het volgende opgemerkt:

- Er wordt gesteld dat leidingen met een lengte van meer dan 2.5 km altijd piggable zijn zodat scheidingspigs kunnen worden toegepast. Afhankelijk van o.a. eisen ten aanzien van externe veiligheid zouden ook kortere leidingen piggable uitgevoerd moeten worden.
- In bepaalde gevallen, afhankelijk van de geometrie van het systeem is het mogelijk om de met waterstof gevulde leiding herhaaldelijk met stikstof te vullen en het waterstof/stikstof mengsel vervolgens af te blazen; de verdunning met stikstof wordt hierdoor steeds groter.
- Als gevolg van de verschillende dichtheden van waterstof en stikstof zal een zekere mate van stratificatie – laagvorming – optreden waarbij de zwaardere stikstof onder de waterstof geraakt. Stratificatie kan zich over een grote leidinglengte voordoen en resulteren in veel off-spec gas. Stratificatie doet zich vooral voor bij laminaire stroming en in rechte leidingen. Bochten en andere afwijkingen van de rechte lijn zorgen voor menging in radiale richting. Er dient een zorgvuldige afweging van de gassnelheid versus de leidingdiameter te worden gemaakt waarbij de conclusie is dat indien turbulente stroming niet kan worden gegarandeerd er altijd een pig moet worden toegepast.

- Het mengfront bij turbulente stroming is onafhankelijk van de gaseigenschappen en is bij waterstof dus gelijk aan aardgas.
- Er bestond het vermoeden dat bij afgesloten volumes (vaten, T-stukken) pockets van waterstof slechter mengen met stikstof dan in het geval van aardgas verdringing. Nadere analyses hebben echter geleerd dat juist het omgekeerde het geval zal zijn. Dit moet echter nog experimenteel bevestigd worden. In de praktijk worden pockets vermeden door de druk enkele malen te verhogen en te verlagen om de pockets wisselend leeg te laten lopen en weer te vullen.
- Voor het verdringen installatieonderdelen (of leidingdelen) waarbij stratificatieproblemen ontstaan kan er worden gekozen om desbetreffende sectie in te blokken en verticaal te spoelen. Daarbij wordt het zwaardere gas (stikstof) aan de onderkant ingespoten/uitgelaten en het lichtere gas(waterstof) aan de bovenkant uitgelaten/ingespoten. Dit is vooral bij ondergrondse leidingen lastig te realiseren omdat dit zal leiden tot extra ruimte in de werkput vanwege de benodigde apparatuur.

Door DNV is een beslisboom voor het gasvrij maken van waterstofleidingen gemaakt; hierin wordt in hoofdzaak onderscheid gemaakt tussen leidingen die wel of niet piggable zijn. De slides die tijdens de bespreking zijn getoond zullen samen met dit besprekingsverslag onder de deelnemers worden verspreid.

#### **Brandstofcel voor drukloos maken leiding?**

Aangezien er onvoldoende kennis is over het gebruik van compressoren bij waterstof, wordt fakkelen gezien als hoofdmogelijkheden voor het drukloos maken van leiding. Dat kan betekenen dat er grote gasvolumes verloren gaan tijdens het drukloos maken van langere leidingen. Een mobiele brandstofcel zou een mogelijkheid zijn om de waterstof nuttig te besteden. Om een mobiele brandstofcel te gebruiken moet de waterstof voldoende zuiver zijn hetgeen in de praktijk zal betekenen dat zuivering moet plaatsvinden. Bovendien is het onduidelijk wat er met de geproduceerde elektriciteit en warmte moet worden gedaan.

#### **Waterstofklus als aardgasklus?**

Tenslotte wordt opgemerkt dat het wellicht werkbaarder zal zijn om bij klussen aan waterstofleidingen eerst de waterstof te verdringen met aardgas en dan de gasklus uit te voeren als zijnde een 'gewone' aardgasklus. Na beëindiging van de werkzaamheden zou het aardgas weer met waterstof kunnen worden verdrongen. Het voordeel van de voorgestelde werkwijze is dat minder speciale aanpassingen hoeven te worden gemaakt en dat de uitvoering van gasklussen kan worden gedaan volgens een door en door bekende en bewezen werkwijze.

Door een deelnemer aan de vergadering wordt erop gewezen dat in het kader van leveringszekerheid bij het gebruik van de enkel uitgevoerde leidingen in de backbone, hydraulische stoppels in combinatie met een double block & bleed systeem en een (korte) omloopleiding de hoogste leveringszekerheid biedt. Wel zal nader onderzoek naar het gebruik van een dergelijk systeem moeten worden gedaan.

## C Research questions

This report on safe isolation and evacuating of high-pressure hydrogen pipelines and installations for maintenance purposes consisted was subjected to scope changes throughout the project due to the fast-paced hydrogen industry. The latest scope consisted some research question. The Expert Assessment Group (EAG) emphasized that the content should be based on guidelines with a general approach of evacuation without assessing current protocols.

### How can high-pressure hydrogen pipelines & installations be safely evacuated?

This report assesses multiple evacuation methods currently used in the natural gas industry; displacement with a pig, purging, and dilution-based purging. The report discusses guidelines on the different situations in which the evacuation method can be used and their respective advantages and disadvantages. The general guidelines are situated dependent but will generally consists out of the following steps:

1. Identify the sections that need maintenance
2. Isolate the section that needs maintenance, utilizing valve schemes or stopples
3. Depressurize the system
4. Evacuate hydrogen with nitrogen, utilizing pigging, purging, or dilution techniques
5. Ensure secondary isolation and a bleed mechanism is in place
6. Execute maintenance operations
7. Flush the maintenance area with nitrogen before reintroducing hydrogen

Table 9-1 shows a more, in-depth, overview of the advantages and disadvantages for different evacuation guides.

### What consideration should be taken into account?

Besides guidelines some consideration where assessed for hydrogen evacuation:

- The leakage rate along a (separation) pig will be roughly 20 to 30% higher with hydrogen w.r.t. natural gas. In general, thin film driven leakages are 20% higher and cavity driven leakages are 30% higher for hydrogen.
- A (separation) pig will be more susceptible to stick-slip behaviour in a hydrogen pipeline, due to higher acoustic impedance and a pipeline that has dry gas.
- The minimum velocity requirement to prevent stratification is higher form hydrogen than natural gas.
- Diffusion front due to turbulent dispersion is not gas property dependent and will be similar for hydrogen and natural gas, but the minimum velocity requirement turbulence for hydrogen should considered when purging from nitrogen to hydrogen.
- Thin film driven leakages are 20% higher for hydrogen w.r.t. natural gas, cavity driven leakages are 30% higher.
- Hydrogen-nitrogen mixture will mix faster (approximately 3.4 times as fast) than the natural gas-nitrogen mixture, resulting a faster dilution-based purge.

### **What is the best way to convert pipelines from natural gas to hydrogen?**

Converting a pipeline from natural gas to hydrogen is mainly focused on cleaning the pipeline. Can be found in an detailed paper “Conversion of a natural gas pipeline to hydrogen transport and the effects of impurities on the hydrogen quality (Gas Analysis 2022, 11th International Gas Analysis Symposium & Exhibition, DNV Energy Systems, Henk Top)”

The main focus of converting a pipeline from natural gas to hydrogen will be cleaning the pipeline. Behaviour of contaminants found in the mentioned natural gas pipeline during the pipeline’s transition from natural gas to hydrogen and their effect on the hydrogen quality is discussed.

The contaminants found in natural gas pipelines is vast and can be categorized into solids, liquids, and volatile/gaseous components. To mitigate the impacts of such impurities on the hydrogen transported in repurposed pipelines, a detailed cleaning procedure must be considered. This paper outlines the steps undertaken to clean the pipeline prior to the actual transition, demonstrating the effects of these measures by presenting the concentration of various contaminants during and after the pipeline’s conversion from natural gas to hydrogen.

The conversion guide from natural gas to hydrogen consists of five steps:

1. Initial cleaning using cleaning pigs to expel loose dirt and liquids from the pipeline, which remains filled with natural gas.
2. Displacement of natural gas by nitrogen, employing a pig run to isolate the natural gas from the nitrogen, while preserving the pipeline under a low-pressure nitrogen atmosphere.
3. Conduct necessary alterations and/or replacements on the pipeline, and perform essential maintenance during a period when the pipeline is sustained at low pressure and filled with nitrogen.
4. Cleaning pig run under a nitrogen atmosphere, monitoring contaminants in nitrogen to assess whether the criteria for transitioning to hydrogen transmission have been met.
5. Displacement of nitrogen by hydrogen using a pig to isolate the nitrogen from the hydrogen.

Based on the contaminants collected during the pipeline’s cleaning, the paper proposes some preliminary criteria for the cleaning process:

- Liquids/solids/sludge; a maximum of 1 litre of material for pipe diameters up to 12 inches and up to 2 litres of material for pipe diameters larger than 12 inches (irrespective of pipeline length).
- Hydrocarbons limited to 1000 ppm.
- Water dewpoint less than -8 degrees at 70 bar.

Measurements taken during and after the transition indicate that contaminant levels remain extremely low.

### **How can HyStock be safely commissioned and decommissioned?**

Since the report focused is based on guidelines with a general approach of evacuation. The evacuation of HyStock was only mentioned as an example during discussions. More information on current procedures for installations or details on the HyStock were not received. Given that we received few details about the installation itself and the other part, and the nature of the report is about general guidelines, there was no specific assessment of the HyStock installation. The report did focus on the dilution-based purge needed for the HyStock installation with experimental research about dilution-based mixing.

## References

- [1] Asbjornsen O.A. and Amundsen K., *Axial dispersion and heat transfer in turbulent gas flows*. Chem. Eng. Sc. 25: 943-954 (1970)
- [2] Chapman C.J., *High Speed Flow*. Cambridge University Press (2000)
- [3] Ekambara K. and Joshi J.B., *Axial mixing in pipe flows: turbulent and transition regions*. Chem. Eng. Sc. 58: 2715-2724 (2003).
- [4] EN 12327:2012, *Gas Infrastructure: Pressure testing, commissioning and decommissioning procedures*. (2012)
- [5] Gallon N., Sandana D, van Elteren R., and Steinvooorte T., *When both shall meet: managing integrity for H2 and CO2 conversion*. PPSA seminar (2021).
- [6] Goldschmidt V.W. and Householder M.K., *Longitudinal dispersion for turbulent flow in pipes*. I&EC Fund. 8: 172-173 (1969)
- [7] Hendrix M.H.W., *Experiments and modelling for by-pass pigging of pipelines*, PhD thesis TU Delft (2020)
- [8] Hoelen Q., *Mengtraject tijdens het transport van gas*, NV Nederlandse Gasunie Rapport TP/SP 84.R.518 (1984); Hoelen Q., *Snelle afschatting van mengtraject en vereffeningstijden bij offspec gasmengsels*, NV Nederlandse Gasunie Rapport TP/V 84.H.806 (1984); Hoelen Q., *Vereffening van offspec gasmengsel gedurende het transport*, NV Nederlandse Gasunie Rapport TP/V 84.R.541 (1984)
- [9] Johnson, J.E. et al., *Pipeline purging principles and practice*. Int. Pipeline Conf. 2 IPC 1996-1882 (1996)
- [10] Kiwa, *Spoelen van waterstofleidingen*, GT-200289 (2021).
- [11] Leach S.J., *Stratification and mixing of fluids of different densities*, I. Chem. E. Symposium series 25 (1968)
- [12] Levenspiel O. and Smith W.K., *Notes on the diffusion-type model for the longitudinal mixing of fluids in flow*. Chem. Eng. Sc. 6: 227-288 (1957).
- [13] Linden P.F. and Simpson J.E., *Gravity-driven flows in a turbulent fluid*, J. Fluid Mech. 172: 481-497 (1986)
- [14] McGill H.L., *Flow through annuli of fine clearance with decreasing metering length*, MSc Thesis, University of Houston (1967).
- [15] Mirshamsi M., and Rafeeyan M., *Dynamic analysis and simulation of long pig in gas pipeline*, J. Nat. Gas Sc. Eng. 23 294-303 (2015).
- [16] Pinchover Y. and Rubinstein J., *Introduction to Partial Differential Equations*, Cambridge University Press (2005).
- [17] Taylor G., *The Dispersion of Matter in Turbulent Flow through a Pipe*, Proc. R. Soc. Lond. A, 223, 446-468 (1954)



- [18] Widiatmojo A., Sasaki K., Widodo N.P. and Sugai Y., *Discrete Tracer Point Method to Evaluate Turbulent Diffusion in Circular Pipe Flow*. Journal of Flow Control Measurement & Visualization 1, 57-68 (2013)
- [19] HyWay 27: hydrogen transmission using the existing natural gas grid (2021)
- [20] Dwyer Jr, J., Hansel, J. G., & Philips, T., *Temperature influence on the flammability limits of heat treating atmospheres*. 22nd heat treating society conference and the 2nd international surface engineering congress, Indianapolis 22-28, (2003).