

Spoelen van waterstofleidingen

Benodigde spoelsnelheid bij het ontluchten en ontgassen



Trust
Quality
Progress



GT-200289

Maart 2021

Spoelen van waterstofleidingen

Benodigde spoelsnelheid bij het ontluchten en ontgassen

© 2021 Kiwa N.V.
Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag
worden verveelvoudigd,
opgeslagen in een
geautomatiseerd
gegevensbestand, of
openbaar gemaakt, in enige
vorm of op enige wijze, hetzij
elektronisch, mechanisch,
door fotokopieën, opnamen,
of enig andere manier, zonder
voorafgaande schriftelijke
toestemming van de uitgever,
alsmede van de
opdrachtgever.

Kiwa Technology B.V.
Wilmersdorf 50
Postbus 137
7300 AC Apeldoorn

Tel. 088 998 33 93
Fax 088 998 34 94
www.kiwatechnology.nl

Colofon

Titel	Spoelen van waterstofleidingen
Projectnummer	004P001933-01
Projectmanager	C. Lock
Opdrachtgever	Netbeheer Nederland
Kwaliteitsborger(s)	C.J.A. Pulles
Auteur(s)	A.J. Kooiman, C. Lock, C.J.A. Pulles

Dit rapport is tot stand gekomen in opdracht van Netbeheer Nederland. Het is beschikbaar voor Netbeheer Nederland, de bij Netbeheer Nederland aangesloten netbeheerders en de aan deze netbeheerders verbonden bedrijven.



Samenvatting

Bij het in bedrijf stellen van waterstofleidingen worden de leidingen eerst gespoeld met een inert gas – in dit rapport wordt uitgegaan van stikstof – en vervolgens gevuld met waterstof. Bij het buiten bedrijf stellen worden waterstofleidingen gespoeld met stikstof. Het gebruik van stikstof wordt (vooralsnog) om veiligheidstechnische redenen geadviseerd om brandbare mengsels in de leiding te voorkomen. Hierbij is het van belang de minimaal benodigde spoelsnelheid vast te stellen waarbij leidingen voldoende worden gespoeld. Daarom is onderzoek gedaan naar de minimaal benodigde spoelsnelheid.

Het doel van het onderzoek is het bepalen van de minimaal benodigde spoelsnelheid voor het volledig spoelen van waterstofdistributieleidingen. Bij in bedrijf stellen is dit de snelheid voor het verdrijven van lucht door stikstof en voor het vervolgens verdrijven van stikstof door waterstof. Bij het buiten bedrijf stellen is dit snelheid voor het verdrijven waterstof door stikstof.

Voor wat betreft het affakkelen of afblazen van waterstof zie het Kiwa-rapport *Affakkelen en afblazen van waterstof*¹.

Het onderzoek is opgedeeld in de volgende fasen:

1. Er is een theoretische berekening gemaakt uitgaande van een spoelsnelheid van 1,0 m/s.
2. Praktijkmetingen hebben plaatsgevonden aan een PE-leiding DN 200 en een PE-leiding DN 100.

Conclusies

De belangrijkste conclusies zijn:

- Een **spoelsnelheid van minimaal 0,4 m/s** is benodigd voor leidingen tot en met DN 200 om er zeker van te zijn dat een waterstofdistributieleiding volledig wordt gespoeld, zie ook Tabel 1.
Toelichting: bij een lagere spoelsnelheid treedt onvoldoende turbulentie op en kan stikstof – bij in bedrijf stellen – en waterstof – bij buiten bedrijf stellen – in de leiding achterblijven.
- Uit veiligheidsoverwegingen wordt een **spoelsnelheid van 1,0 m/s geadviseerd**.

Toelichting: veiligheidsoverwegingen; de hoeveelheid waterstof-luchtmengsel en duur dat een waterstof-luchtmengsel zich vormt en praktische overwegingen – de tijd die het spoelen in beslag neemt – zijn hierbij bepalende factoren.

Bij het spoelen ontstaat enige vermenging van stikstof met waterstof in de leiding. Bij het afblazen van waterstof en waterstof-stikstofmengsel wordt dit vermengd met de omgevingslucht en vormt zich een brandbaar mengsel. De periode dat een brandbaar mengsel aanwezig is, wordt beperkt door een wat hogere spoelsnelheid te kiezen dan de minimaal benodigde spoelsnelheid. Als later mocht blijken dat in bepaalde omstandigheden bij in bedrijf stellen lucht rechtstreeks kan worden verdreven door waterstof en bij buiten bedrijf stellen waterstof rechtstreeks kan worden verdreven door lucht neemt de hoeveelheid waterstof-luchtmengsel toe, namelijk met de hoeveelheid waterstof-luchtmengsel dat in de leiding ontstaat door vermenging tijdens het spoelen.

¹ Zie het Kiwa-rapport *Affakkelen en afblazen van waterstof, onderzoek naar het veilig en doelmatig in- en uit bedrijf stellen van waterstofleidingen, GT-200096*.



Tabel 1: Benodigde spoelsnelheid per leidingdiameter en benodigd debiet voor het ontluichten (*in bedrijf stellen*) en het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*), zie de toelichting

Leidingdiameter	Minimaal benodigde spoelsnelheid [m/s]	Benodigd debiet bij de minimaal benodigde spoelsnelheid [m ³ _n /h]	Benodigd debiet bij de geadviseerde spoelsnelheid van 1,0 m/s [m ³ _n /h]
DN 32	0,4	2	3
DN 50	0,4	3	8
DN 80	0,4	8	19
DN 100	0,4	12	29
DN 150	0,4	26	64
DN 200	0,4	46	113
DN 250	0,5	89	177
DN 300	0,6	153	255
DN 400	0,8	362	452

Opmerkingen bij Tabel 1:

- De minimaal benodigde spoelsnelheid geldt voor het verdrijven van lucht door stikstof, voor het verdrijven van stikstof door waterstof en eveneens voor het verdrijven van waterstof door stikstof.
- De minimaal benodigde spoelsnelheid snelheid geldt voor alle leidingmaterialen.
- Bij het in bedrijf stellen wordt eerst de lucht uit de leiding verdreven door stikstof en vervolgens wordt de stikstof verdreven door waterstof; dit wordt kortweg omschreven als ontluichten.
- Bij het (tijdelijk) buiten bedrijf stellen wordt waterstof door stikstof uit de leiding verdreven; dit wordt kortweg omschreven als ontgassen.
- Deze benodigde spoelsnelheid van minimaal 0,4 m/s geldt voor leidingen met een diameter kleiner of gelijk aan DN 200. Voor leidingen met een grotere diameter moet de spoelsnelheid evenredig met de diameter groter zijn¹.
- Voor het benodigde debiet is er gerekend met de nominale diameter, dus voor DN 200 is met een binnendiameter gerekend van 200 mm. Voor bijvoorbeeld een PE-leiding DN 200 (inwendige diameter 177 mm) is het benodigde debiet kleiner (36 m³_n/h), voor een stalen leiding DN 200 (inwendige diameter 210 mm) wat groter (50 m³_n/h).
- Daar waar sprake is van verschillende leidingdiameters in het te spoelen tracé moet de benodigde spoelsnelheid van de grootste leidingdiameter worden aangehouden.

¹ Dit volgt uit: $Ri = g/\rho * \Delta\rho * D / \Delta v^2$. Bij gelijkblijvende Ri moet de wortel uit de spoelsnelheid Δv evenredig toenemen met de diameter van de leiding D, zie bijlage I.



Overige conclusies zijn:

- Afgezien van de (iets) hogere minimaal benodigde spoelsnelheid komt het spoelen van waterstofleidingen nagenoeg overeen met het spoelen van aardgasleidingen.
- Niet kan worden uitgesloten dat het vermijden van lucht in de leiding bij het ontluchten (*in bedrijf stellen*) van waterstofleidingen van groter belang is dan dat dit het geval is bij aardgasleidingen. Dit vanwege de mogelijke risico's voor de aangesloten toestellen (brander en brandstofcellen) en binnenleidingen. Dit verhoogt de noodzaak van zorgvuldig en volledig spoelen.
 - Het ontluchten van de leiding door deze eerst te spoelen met stikstof beperkt dit risico. Het ontluchten met stikstof als buffergas verdient om deze reden vooralsnog de voorkeur. Pas als onomstotelijk is vastgesteld dat waterstoftoestellen geen risico vormen voor een beperkte hoeveelheid lucht in het waterstof, kan bij het ontluchten (in bedrijf stellen) de lucht direct met waterstof worden verdreven. Dit heeft dan zelfs een lichte voorkeur: immers elke handeling geeft een kans op het maken van fouten.
- Bij de ombouw van netten van aardgas naar waterstof is rechtstreeks verdringen van het aardgas door waterstof veiliger dan eerst spoelen met stikstof.

Toelichting:

- Als aardgas rechtstreeks wordt verdreven door waterstof kan er geen brandbaar gasmengsel in de leiding ontstaan; geen kans op vlaminslag.
- Stikstof als buffergas toepassen heeft geen toegevoegde waarde in dit geval. Het heeft dan zelfs een (beperkt) nadeel, immers elke handeling geeft een kans op het maken van fouten.
- Het achterblijven van gas (waterstof en aardgas) in (met lucht) gespoelde leidingen kan bij werkzaamheden aan die leiding tot gevaarlijke situaties leiden. Hierop moet men bedacht zijn. Bij aardgasleidingen heeft dit een enkele keer tot een (ernstig) incident geleid. Om deze reden en omdat de gevolgen bij waterstof mogelijk ernstiger kunnen zijn wordt vooralsnog geadviseerd waterstofleidingen te spoelen met stikstof (bij het spoelen met stikstof kan geen explosief waterstof-stikstofmengsel in de leiding ontstaan. Let op: bij handelingen waarbij het waterstof-stikstofmengsel zich kan vermengen met lucht, kan wel een brandbaar mengsel ontstaan).

In Tabel 2, bladzijde 4, worden de resultaten samengevat weergegeven.

Aanbeveling

Op basis van de uitkomsten van dit onderzoek het volgende:

- De Normcommissie Gasdistributieleidingen wordt geadviseerd om in nog nader op te stellen normen voor toepassing van waterstof in gasdistributieleidingen (vergelijkbaar of aansluitend op de norm NEN 7244-7) voor waterstof dezelfde spoelsnelheid aan te houden als voor aardgas, te weten 1,0 m/s.
- De Regionale Netbeheerders wordt geadviseerd om bij het spoelen van waterstofdistributieleidingen, ontluchten (*in bedrijf stellen*) en het ontgassen (*tijdelijk buiten bedrijf stellen*), een spoelsnelheid van 1,0 m/s aan te houden (gelijk aan de spoelsnelheid bij aardgasdistributieleidingen).

Verder wordt de Regionale Netbeheerders het volgende geadviseerd:

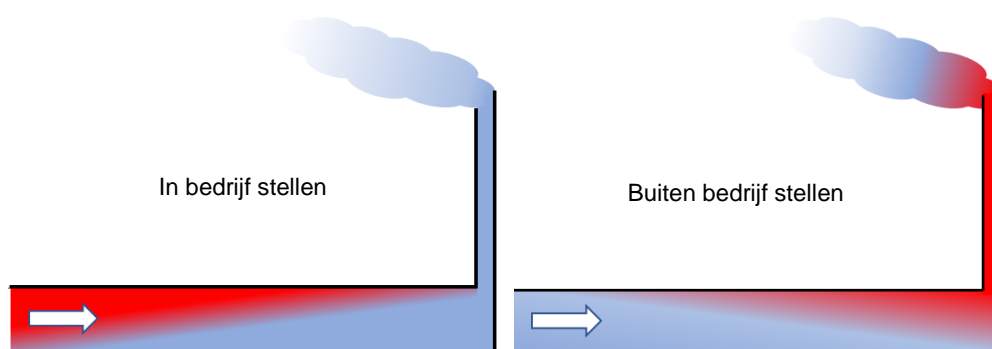
- Nader onderzoek te doen naar de risico's (voor toestellen en leidingen) van (een beperkte hoeveelheid) lucht die na het ontluchten in de waterstofleiding is achtergebleven.



- Nader onderzoek te doen naar de risico's voor waterstof toestellen van (een beperkte hoeveelheid) in het net achtergebleven aardgas na het ombouwen van een aardgasnet naar een waterstofnet.

Tabel 2: Overzicht spoelen van waterstofleidingen

Leiding-diameter	Minimaal benodigde spoelsnelheid [m/s]	Activiteit	Spoel-medium	Opmerking
DN 32 t.e.m. DN 200	0,4	Ontluchten (<i>in bedrijf stellen</i>) van een nieuwe leiding	Stikstof (inert gas) gevolgd door waterstof (vooral nog voorkeur) of direct waterstof	<ul style="list-style-type: none"> • Wees bedacht op achtergebleven lucht <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Nader onderzoek naar risico's van achtergebleven lucht voor waterstof toestellen</i>
DN 250	0,5			
DN 300	0,6			
DN 400	0,8			
DN 32 t.e.m. DN 200	0,4	Ontgassen (<i>tijdelijk buiten bedrijf stellen</i>) van een leiding	Stikstof (inert gas) (vooral nog voorkeur) of lucht	<ul style="list-style-type: none"> • Wees bedacht op achtergebleven waterstof (bij onderhoudswerkzaamheden) • Wees bedacht op achtergebleven stikstof (bij onderhoudswerkzaamheden)
DN 250	0,5			
DN 300	0,6			
DN 400	0,8			
DN 32 t.e.m. DN 200	0,4	Ombouw aardgasnet naar waterstofnet	Waterstof (aardgas rechtstreeks verdringen door waterstof)	<ul style="list-style-type: none"> • Wees bedacht op achtergebleven aardgas <ul style="list-style-type: none"> ◦ <i>Nader onderzoek naar risico's van achtergebleven aardgas voor waterstof toestellen</i>
DN 250	0,5			
DN 300	0,6			
DN 400	0,8			



Figuur 1: Links verbeeld het ontluchten (*in bedrijf stellen*): **stikstof** wordt verdriven door **waterstof**
 Rechts verbeeld het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*): **waterstof** wordt verdriven door **stikstof**
 De praktijk van het spoelen is dat er een zekere mate van gelaagdheid en menging ontstaat, dit is in de figuur verbeeld



Management review

When commissioning hydrogen pipes, the pipes are first purged with an inert gas - this report is based on nitrogen - and then filled with hydrogen. When decommissioning, the hydrogen pipe is purged with nitrogen. The use of nitrogen is (for the time being) recommended for safety-technical reasons in order to avoid flammable mixtures in the pipeline. It is important to determine the minimum required purging speed at which pipes are sufficiently purged. That is why research has been conducted into the minimum required purging speed.

The aim of the study is to determine the minimum required purging speed for the complete purging of hydrogen distribution pipes. During commissioning, this is the rate for expelling air by nitrogen and for subsequently expelling nitrogen with hydrogen. During decommissioning, this is the rate of hydrogen expelling by nitrogen.

For the flaring or venting of hydrogen, see the Kiwa report *Flaring and venting of hydrogen*.¹

The research is divided into the following phases:

1. A theoretical calculation has been made based on a purging speed of 1.0 m/s.
2. Field measurements were taken on a PE pipe DN 200 and a PE pipe DN 100.

Conclusions

The main conclusions are:

- A **purging speed of at least 0.4 m/s** is required for pipes up to and including DN 200 to ensure that a hydrogen distribution pipe is completely purged, see also Table 1.

Explanation: at a lower purging speed, insufficient turbulence occurs and nitrogen - during commissioning - and hydrogen - during decommissioning - can remain in the pipe.

- For safety reasons a **purging speed of 1.0 m/s** is recommended.

Explanation: the amount of hydrogen-air mixture and the time that a hydrogen-air mixture forms and practical considerations - the time it takes for the purging - are determining factors here.

Purging produces some mixing of nitrogen with hydrogen in the line. When blowing off hydrogen and hydrogen-nitrogen mixture, this is mixed with the ambient air and a flammable mixture is formed. The period that a combustible mixture is present is limited by choosing a slightly higher purging speed than the minimum required purging speed.

If it later turns out that in certain conditions during commissioning air can be expelled directly by hydrogen and when shut down, hydrogen can be expelled directly by air, the amount of hydrogen-air mixture increases, namely with the amount of hydrogen-air mixture entering the line arises from mixing during purging.

¹ See the Kiwa report *Affakkelen en afblazen van waterstof, onderzoek naar het veilig en doelmatig in- en uit bedrijf stellen van waterstofleidingen, GT-200096*.



Table 1: Required purging speed per pipe diameter and required flow rate for venting (*commissioning*) and degassing (*decommissioning*), see the explanation

Pipe diameter	Minimum required purging speed [m/s]	Required flow rate at the required purging speed [m ³ _n /h]	Required flow rate at the recommended purging speed of 1,0 m/s [m ³ _n /h]
DN 32	0,4	2	3
DN 50	0,4	3	8
DN 80	0,4	8	19
DN 100	0,4	12	29
DN 150	0,4	26	64
DN 200	0,4	46	113
DN 250	0,5	89	177
DN 300	0,6	153	255
DN 400	0,8	362	452

Notes to Table 1:

- The minimum required purging speed applies to the displacement of air by nitrogen, to the displacement of nitrogen by hydrogen and also to the displacement of hydrogen by nitrogen.
- The minimum required purging speed applies to all pipe materials.
- During commissioning, the air is first expelled from the pipe by nitrogen and then the nitrogen is expelled by hydrogen; this is simply described as venting.
- During (temporarily) decommissioning, the hydrogen is expelled from the pipe by nitrogen; this is simply described as degassing.
- This required purging speed of at least 0.4 m/s applies to pipes with a diameter smaller or equal to DN 200. For pipes with a larger diameter, the purging speed must be greater in proportion to the diameter¹.
- The required flow rate is based on the nominal diameter, so for DN 200 an inner diameter of 200 mm has been used. For example, for a PE pipe DN 200 (internal diameter 177 mm) the required flow rate is smaller (36 m³_n/h), for a steel pipe DN 200 (internal diameter 210 mm) somewhat larger (50 m³_n/h).
- Where there are different pipe diameters in the route to be purged, the required purging speed of the largest pipe diameter must be maintained.

Other conclusions are:

- Apart from the (slightly) higher minimum required purging speed, purging hydrogen pipelines is similar to purging natural gas pipelines.
- It cannot be ruled out that the avoidance of air in the pipe when venting (*commissioning*) of hydrogen pipes is more important than is the case with natural gas pipes, because of the risks for the connected appliances (burner and fuel cells).
 - Venting the pipe first by purging with nitrogen limits this risk. For this reason, venting with nitrogen as buffer gas is still preferred

¹ This follows from: $Ri = g/\rho * \Delta\rho * D / \Delta v^2$. When Ri remains the same, the square root of the purging speed Δv must increase in proportion to the diameter of the pipe D, see Appendix I.



for the time being. Only when it has been conclusively established that hydrogen appliances do not pose a risk for a limited amount of air in the hydrogen, the air can be immediately expelled with hydrogen during venting (*commissioning*). This even has a slight preference: after all every action gives a chance of making mistakes.

- When converting networks from natural gas to hydrogen, direct displacement of natural gas with hydrogen is more safe than first purging with nitrogen.

Explanation:

- After all, if natural gas is expelled directly by hydrogen, no combustible gas mixture can form in the pipeline.
- Using nitrogen as a buffer gas has no added value in this case. It even has a (limited) disadvantage, after all every action gives a chance of making mistakes.
- Remaining gas (hydrogen and natural gas) in pipes purged with air can lead to dangerous situations when working on that pipe. One must be aware of this. For natural gas pipelines, this has occasionally led to a (serious) incident. For this reason and because the consequences for hydrogen may be more serious, it is still recommended to purge hydrogen pipelines with nitrogen (when purging with nitrogen, no explosive hydrogen-nitrogen mixture can form in the pipe. Note: during operations where the hydrogen-nitrogen mixture can mix with air, a flammable mixture can be formed).

In Table 2, page 8, the results are summarized.

Recommendations

Based on the results of this study:

- The Gas Distribution Pipelines Standards Committee is advised to specify standards for the use of hydrogen in gas distribution pipes (comparable or in line with the NEN 7244-7) to maintain the same purging speed for hydrogen as for natural gas, namely 1.0 m/s.
- The Regional Network Operators are advised to maintain a purging speed of 1.0 m/s when purging hydrogen distribution pipes, venting (*commissioning*) and degassing (*(temporarily) decommissioning*) (equal to the purging speed for natural gas distribution pipelines).

Furthermore, the Regional Network Operators are advised the following:

- To conduct further research into the risks (for appliances) of (a limited amount of) air that remains in the hydrogen pipeline after purging.
- To conduct further investigation of the risks for hydrogen appliances of (a limited amount of) natural gas that remains in the hydrogen after conversion from a natural gas network into a hydrogen network.



Table 2: Overview of purging hydrogen pipelines

Pipe diameter	Minimum required purging speed [m/s]	Activity	Purging-medium	Remarks
DN 32 up to DN 200	0,4	Venting <i>(commissioning)</i> of a new pipeline	Hydrogen followed by nitrogen (preferred for the time being) or hydrogen	<ul style="list-style-type: none"> • Be aware of residual air <ul style="list-style-type: none"> ◦ Further research into the risks of residual air for hydrogen devices
DN 250	0,5			
DN 300	0,6			
DN 400	0,8			
DN 32 up to DN 200	0,4	Degassing <i>((temporarily) decommissioning)</i> of a pipeline	Nitrogen (preferred for the time being) or air	<ul style="list-style-type: none"> • Be aware of residual hydrogen (during maintenance) • Be aware of residual nitrogen (during maintenance)
DN 250	0,5			
DN 300	0,6			
DN 400	0,8			
DN 32 up to DN 200	0,4	Conversion of a natural gas network into a hydrogen network	Hydrogen (natural gas directly displaced by hydrogen)	<ul style="list-style-type: none"> • Be aware of residual natural gas <ul style="list-style-type: none"> ◦ Further research into the risks of residual natural gas for hydrogen devices
DN 250	0,5			
DN 300	0,6			
DN 400	0,8			

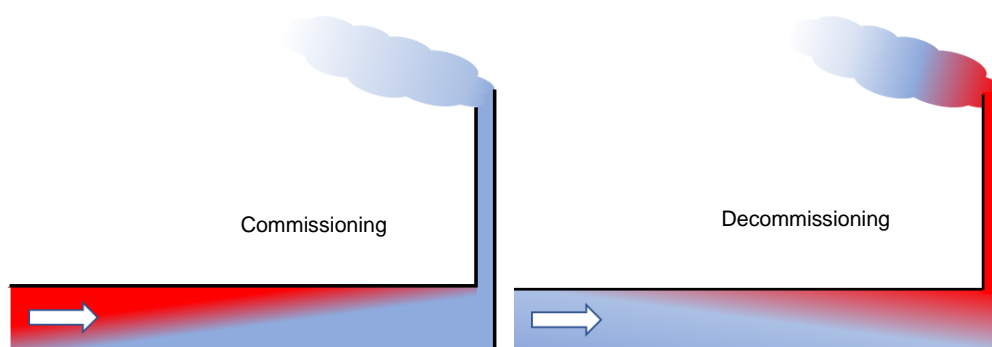


Figure 2: Venting (*commissioning*) can be seen in the left image: **nitrogen** is expelled by **hydrogen**
 Degassing (*decommissioning*) can be seen in the right image: **hydrogen** is expelled by **nitrogen**
 The practice of purging is that a certain degree of layering and mixing is created, this is shown in the figure



Inhoud

	Samenvatting	1
	Management review	5
	Inhoud	9
1	Aanleiding en doel onderzoek	11
1.1	Aanleiding onderzoek	11
1.2	Doel onderzoek	11
1.3	Leeswijzer	12
2	Werkwijze en testopstelling	13
2.1	Werkwijze	13
2.2	Testleiding	13
3	Berekening spoelen waterstofleiding	16
3.1	Veilig ontgassen van leidingen	16
3.2	Een subtiele en tijdrovende numerieke simulatie	16
3.3	Resultaten	17
3.3.1	Video	20
3.3.2	Vermeldingswaardig detail	21
3.4	Conclusie berekening spoelen waterstofleidingen	21
4	Meetresultaten spoelen	22
4.1	Samenvatting van de meetresultaten	23
4.2	Ontluchten leiding DN 100 met circa 0,5 m/s	26
4.3	Ontluchten leiding DN 100 met circa 1,0 m/s	27
4.4	Ontluchten leiding DN 200 met circa 0,2 m/s	27
4.5	Ontluchten leiding DN 200 met circa 0,5 m/s	28
4.6	Ontluchten leiding DN 200 met circa 1,0 m/s	29
4.7	Ontgassen leiding DN 100 met circa 0,3 m/s	29
4.8	Ontgassen leiding DN 100 met circa 0,5 m/s	30
4.9	Ontgassen leiding DN 100 met circa 1,0 m/s	31
4.10	Ontgassen leiding DN 200 met circa 0,2 m/s	31
4.11	Ontgassen leiding DN 200 met circa 0,5 m/s	32
4.12	Ontgassen leiding DN 200 met circa 1,0 m/s	33
4.13	Overzicht ontgassen en ontluchten met verschillende snelheid	33
4.14	Vergelijking minimaal benodigde spoelsnelheid waterstofleidingen en aardgasleidingen	34



4.15	Bevindingen met betrekking tot het spoelen van waterstofleidingen	35
4.16	Vergelijking conclusies bevindingen met Amerikaans onderzoek	36
4.17	Conclusies met betrekking tot het spoelen van waterstofleidingen	36
5	Theorie spoelen, expert opinion	38
5.1	Theoretische achtergronden bij het spoelen van leidingen	38
5.1.1	Achtergrondinformatie met betrekking tot het spoelen	39
5.2	Expert opinion	39
5.2.1	Afhankelijkheid spoelgedrag van de diameter	40
5.2.2	Werkwijze spoelen met waterstof anders dan met aardgas	40
5.2.3	Consequenties als spoelsnelheid niet wordt bereikt	41
5.2.4	Mogelijke risico's bij het spoelen van waterstofleidingen met lucht	41
5.2.4.1	Spoelen met lucht door inbrengen gecompriëerde lucht	42
5.2.4.2	Spoelen met lucht door air-moven	42
5.2.4.3	Risico's op het achterblijven van waterstof-luchtmengsels	42
5.2.5	Alternatieve methoden of alternatieve werkwijzen voor het spoelen van leidingen	43
6	Achtergebleven waterstof	44
6.1	Samenvatting werkwijze bij achtergebleven gas na ontgassen	44
6.2	Oorzaak achterblijven waterstof	45
6.3	Verdeling onbedoeld achtergebleven waterstof-stikstofmengsel na ontgassen	45
6.3.1	Door diffusie	45
6.3.2	Door dichtheidsverschillen	46
6.4	Werkwijze bij onbedoeld achtergebleven waterstof of waterstof-stikstofmengsel na ontgassen	47
7	Spoelen waterstofleidingen versus spoelen aardgasleidingen	49
8	Conclusies	51
9	Aanbevelingen	54
I	Achtergrondinformatie met betrekking tot het spoelen	55
II	Detailtekeningen van de testleiding	57
III	Bevindingen uit AGA rapport spoelen	59
IV	Verbranding, deflagratie, explosie en detonatie van gasmengsels	61
V	Vragen van Netbeheer Nederland	63



1 Aanleiding en doel onderzoek

1.1 Aanleiding onderzoek

Bij het veilig in gebruik stellen en het (tijdelijk) buiten bedrijf stellen van waterstofnetten zoals die nu worden ontwikkeld in pilot projecten is het van belang de vereisten te weten voor het spoelen van leidingen. Immers, voorkomen moet worden dat er gas-luchtmengsels in de leiding achterblijven en dit geldt (in belangrijker mate) ook voor waterstof-luchtmengsels.

De ervaring die door Kiwa is opgedaan tijdens het onderzoek affakkelen en afblazen van waterstof¹ laat zien dat ontbranding door vlaminslag voorkomen dient te worden.

Mede door dit onderzoek moet de benodigde kennis voor het spoelen van gasnetten voor waterstof ontwikkeld worden. Veiligheid staat hierbij voorop.

1.2 Doel onderzoek

Doelstelling van het onderzoek is het bepalen van de minimaal benodigde spoelsnelheid voor waterstofleidingen; hoofd- en aansluitleidingen en meteropstellingen om deze volledig te ontluchten (*in bedrijf stellen*) of te ontgassen (*(tijdelijk) buiten bedrijf stellen*).

Voor het gasnet van Netbeheerders in Nederland gaat het om een grote verscheidenheid diameters van aansluit- en distributieleidingen. Om het technische onderzoek beperkt te houden is de keuze gemaakt voor de volgende diameters:

- Praktijkonderzoek:
 - PE-leiding DN 100 met een lengte van 200 m (hoofdleiding).
 - PE-leiding DN 200 met een lengte van 200 m (hoofdleiding, zoals ingezet bij eerder onderzoek (Project bepalen minimale spoelsnelheid voor aardgasleidingen (GT-200075))).
- Theoretische analyse:
 - PE leiding DN 300 uitsluitend een theoretische analyse om het stromingsgedrag te bepalen (hoofdleiding).
 - PE leiding DN 32 en DN 50 ook uitsluitend een theoretische analyse om het stromingsgedrag te bepalen (aansluitleiding). Hierbij gaat het met name om de vraag met welke mitigerende maatregelen rekening moet worden gehouden bij het in bedrijf stellen van aansluitleidingen.

Opmerking:

De testleidingen DN 200 en DN 100 zijn gekozen omdat circa 96% van de gasdistributieleidingen een diameter hebben kleiner of gelijk aan DN 200. Als het spoelen van de testleidingen mogelijk is met de spoelsnelheid zoals in dit rapport vermeld, dan kan ervan uit worden gegaan dat met diezelfde spoelsnelheid ook de leidingen met een kleinere diameter dan DN 200 kunnen worden gespoeld. Anders gezegd: door het bepalen van de benodigde spoelsnelheid voor de testleidingen, is voor 96%² van de gasdistributieleidingen de benodigde spoelsnelheid bekend.

¹ Zie het Kiwa-rapport *Affakkelen en afblazen van waterstof, onderzoek naar het veilig en doelmatig in- en uit bedrijf stellen van waterstofleidingen, GT-200096*.

² Bron: "Overzicht van de aanwezige leidingmaterialen in het Nederlandse gasdistributienet", GT-080133 (rapport van 2008). Hierbij zij opgemerkt dat de binnendiameter van de SDR 17 PE-leiding DN 200 kleiner is dan van de meeste andere gasdistributieleidingen.



1.3 Leeswijzer

Enkele aanwijzingen die van dienst kunnen zijn bij het lezen van rapport:

- Als er gesproken wordt over spoelen dan heeft dit betrekking op zowel het ontlichten (*in bedrijf stellen*) als ook het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*).
- Ontlichten (*in bedrijf stellen*) is hier het verdrijven van stikstof door waterstof. Zo is het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) het verdrijven van waterstof door stikstof.
- Als expliciet over ontlichten wordt gesproken, heeft het beschrevene alleen betrekking op ontlichten. Hetzelfde geldt voor ontgassen.
- Onder *buiten bedrijf stellen* moet ook het *tijdelijk buiten bedrijf stellen* worden verstaan.
- Waterstof en stikstof zijn voluit geschreven maar ook als H₂ resp. N₂.
- Naast LEL wordt ook wel de term LFL (Lower Flammability Limit) gebruikt. Zie voor een toelichting bijlage IV. In dit rapport wordt uitsluitend LEL gebruikt.



2 Werkwijze en testopstelling

2.1 Werkwijze

Het onderzoek is opgedeeld in de volgende fasen:

1. Een theoretische berekening is gemaakt uitgaande van een leidingdiameter DN 200 en een spoelsnelheid van 1,0 m/s.
2. Praktijkmetingen zijn uitgevoerd aan een PE-leiding 110 mm (DN 100) bij een spoelsnelheid van 0,3 m/s, 0,5 m/s en bij 1,0 m/s.
3. Praktijkmetingen zijn uitgevoerd aan een PE-leiding 200 mm (DN 200) bij een spoelsnelheid van 0,2 m/s, 0,5 m/s en 1,0 m/s,.
4. Op basis van de uitkomsten van de praktijkmetingen is de minimaal benodigde spoelsnelheid voor deze leidingdiameters bepaald.
5. Op basis van de vastgestelde minimaal benodigde spoelsnelheid bij leidingen DN 100 en DN 200 is de minimaal benodigde spoelsnelheid bepaald voor leidingen met andere diameters tot maximaal DN 400.

AD 1: Theoretische berekening

De theoretische berekening gemaakt met CFD¹ programmatuur.

AD 2 en 3: Vaststellen spoelsnelheid

De volgende werkwijze is gevolgd:

1. Leiding is gevuld met 100% N₂ (lucht wordt verdreven, geen meting van de spoelsnelheid).
De leiding is nu gereed voor de test.
2. Leiding is gevuld met H₂ met een spoelsnelheid van 1,0 m/s.
Bij deze meting bleek dat N₂ afdoende is verdreven.
3. Stap 2 is herhaald (bruikbare testen zijn in tweevoud uitgevoerd).
4. Leiding is gevuld met H₂, met een spoelsnelheid van 0,2 m/s en 0,5 m/s.
Mede op basis van deze metingen is de minimaal benodigde spoelsnelheid bepaald.

AD 4 en 5: Minimaal benodigde spoelsnelheid

Op basis van de uitkomsten van de praktijkmetingen is de minimaal benodigde spoelsnelheid voor deze leidingdiameters bepaald. Deze is niet per definitie gelijk aan de minimale spoelsnelheid waarbij de leidingen nog afdoende zijn gespoeld. De reden hiervoor is dat zich in de praktijk situaties kunnen voordoen die het spoelen in negatieve zin beïnvloeden, zoals bijvoorbeeld de aanwezigheid van aftakkingen, meer weerstand door onvoorziene of onbekende vernauwingen in de leiding of bij intrede- en/of uittredeopeningen van het gas. Daarom is voor het vaststellen van de minimaal benodigde spoelsnelheid met een veiligheidsfactor gerekend.

Voor het uitvoeren van dit onderzoek is gebruik gemaakt van een testleiding DN 100 en een testleiding DN 200. Deze leidingen zijn aangelegd op het Kiwa-terrein te Apeldoorn zoals beschreven in de paragraaf 2.2.

2.2 Testleiding

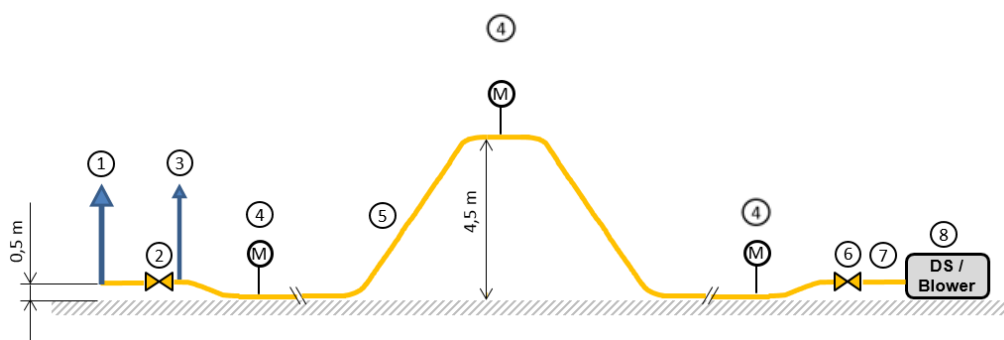
Onderstaande beschrijving geldt voor de leiding DN 200, de leiding DN 100 is op dezelfde wijze aangelegd.

Een overzichtstekening van de testleiding is gegeven in Figuur 3. Zie ook Figuur 4 voor enkele foto's.

¹ Computational Fluid Dynamics.



Details van de testleiding zijn opgenomen in bijlage II.



Figuur 3: Testleiding. Totale lengte ca 200 m

Nr.	Omschrijving	Toelichting
1	Afblaas grote diameter (DN 200)	
2	Afblaasafsluiter DN 200	
3	Afblaas diameter (1 1/2")	
4	Meetpunt gasconcentratie	Meting boven, midden en onder in de buis
5	PE 100 SDR 17 DN 200 (inwendige diameter 177 mm). L 200 m	De leiding is bovengronds aangelegd
6	Voedingsafsluiter stikstof/waterstof DN 200	
7	Foam pig lanceerpunt	
8	Waterstof- / stikstofpunt	P_i max. 100 mbar, P_u ~ atmosferisch

Toelichting:

Door bij de meetpunten op drie verschillende hoogtes in de buis te meten (boven, midden en onder in de buis) wordt een beeld verkregen van de gelaagdheid van het waterstof-stikstofmengsel in de buis. Deze gelaagdheid kan ontstaan door het verschil in soortelijke massa tussen waterstof en stikstof. Afhankelijk van de spoelsnelheid en de turbulentie – mede als gevolg van de spoelsnelheid – zal het mengsel in de buis meer of minder homogeen zijn.

Opmerking:

De DN 100 leiding is een PE 100 SDR 17,6 (inwendige diameter 97,4 mm).



Figuur 4: Enkele foto's van de testleiding
Bovenste rij: het intredepunt en de aanstroomzijde brugleiding
Middelste rij: de 'brugleiding' en de afstroomzijde brugleiding
Onderste rij: (nabij) het uitredepunt en de afblaas DN 200



3 Berekening spoelen waterstofleiding

3.1 Veilig ontgassen van leidingen¹

Bij het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) van een gasleiding (hetzij permanent, hetzij tijdelijk vanwege werkzaamheden aan de leiding), moet het brandbare gas op een veilig manier worden verwijderd. Belangrijk hierbij is er voor te zorgen dat na afloop van de operatie geen brandbaar gas-luchtmengsel in de leiding is achtergebleven.

De gebruikelijke werkwijze is dat allereerst de druk van de leiding wordt verlaagd naar atmosferisch, door het overdruk gas te verbruiken, op te slaan of eventueel af te blazen of af te fakkelen. De leiding wordt vervolgens gespoeld met stikstof, dat aan één zijde wordt ingebracht en het aanwezige gas voor zich uit duwt richting een atmosferische afblaasopening aan de andere zijde. Omdat het gas in de leiding lichter is dan stikstof, heeft de ingebrachte stikstof de neiging om over de bodem van de buis te stromen. Er zal dus een mate van stratificatie kunnen optreden. Om dit te voorkomen moet de stroomsnelheid voldoende hoog zijn, zodat turbulente menging ontstaat die deze stratificatie tegenwerkt. Ook de onderlinge diffusie van gas en stikstof helpt daarbij.

De minimum benodigde spoelsnelheid is afhankelijk van de diameter van de leiding en het verschil in dichtheid tussen de gassen. Indien de leiding niet helemaal horizontaal ligt, of brugleidingen en zinkers bevat dan heeft dat ook invloed. Bijvoorbeeld omdat het lichtere aardgas of waterstof dan bovenin de brugleiding kan blijven hangen.

Voor aardgas geldt dat de spoelsnelheid minimaal 0,3 m/s moet bedragen voor een DN 200 leiding. Met een leidingtracé van 200 m, inclusief een brugleiding van 4.5 m hoogte (zie Figuur 3) is proefondervindelijk vastgesteld dat die snelheid bij aardgas voldoet. De vraag is of deze snelheid ook bij waterstof voldoende is. Om die vraag te beantwoorden is een proef met dezelfde leiding uitgevoerd², maar nu gevuld met waterstof. Parallel aan de proef is een numerieke simulatie (CFD-berekening) gedaan. De berekeningen zijn uitgevoerd door NRG – Petten.

3.2 Een subtiële en tijdrovende numerieke simulatie

De berekening is verricht voor een spoelsnelheid van 0.8 m/s bij een temperatuur van 20 °C. De druk is 1.013 mbar(a). Bij de berekening is uitgegaan van het gebruik van twee pure gassen: waterstof en stikstof. Lucht bestaat voornamelijk uit een mengsel van stikstof en zuurstof, en het verschil in gedrag tussen lucht en stikstof is, voor deze berekening, als verwaarloosbaar ingeschat.

De fysische grootheden bij 20 °C zijn opgezocht in de NIST database.

- Waterstof:
 - Viscositeit = $8.8128 \cdot 10^{-6}$ Pa*s
 - Molecuulmassa = 2.01594 kg/kmol
 - Dichtheid = 0.084 kg/m³
- Stikstof:
 - Viscositeit = $1.758 \cdot 10^{-5}$ Pa*s
 - Molecuulmassa = 28.0134 kg/kmol
 - Dichtheid = 1.17 kg/m³

¹ Dit hoofdstuk is vrijwel letterlijk overgenomen uit een nog te publiceren artikel in de Nieuwsbrief van het Kenniscentrum Gasnetbeheer. De berekening is uitgevoerd in het kader en op kosten van het Kenniscentrum Gasnetbeheer. Er is een rapport van NRG beschikbaar waarin een beperkt aantal extra technische details zijn opgenomen.

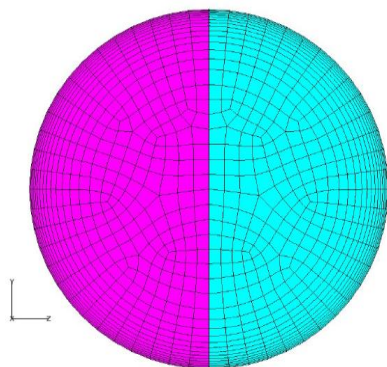
² Praktijkmetingen zijn ook uitgevoerd aan een DN 100 leiding, echter de CFD-berekening is alleen uitgevoerd voor de DN 200 leiding.



Voor de berekening van de dichtheid wordt de ideale gaswet gebruikt.
Voor de viscositeit van het gasmengsel wordt de standaard mengregel van het gebruikte CFD-model ingezet.
De diffusiecoëfficiënt van het waterstof-stikstofmengsel bij 20 °C is $7.63 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Het blijkt dat de stroming van het stikstof bij deze snelheid matig turbulent is ($Re = 10.000$). De stroming van waterstof is nog laminair ($Re = 1.500$). Dit is problematisch voor veel stromingsmodellen. Voor laminaire stroming zijn de Navier-Stokes vergelijkingen voldoende, maar voor een turbulente stroming moet er een zekere mate van middeling over alle wervels worden toegepast. De details van de stroming zijn onmogelijk door te rekenen en uiteindelijk ook niet interessant. Aan de vergelijkingen worden daarom extra vergelijkingen toegevoegd die de turbulente energie en energiedissipatie (damping) beschrijven. Een bekend en veel toegepast model is het k-turbulentie model. Het k-turbulentie model is echter vooral geschikt voor toepassing bij een volledig turbulente stroming. Voor een stroming met een overgang van laminair naar turbulent is het niet erg nauwkeurig. In de literatuur worden diverse turbulentie modellen beschreven die speciaal aangepast zijn voor de overgangsfase, Dit zijn de zogenaamde low-Reynolds turbulentie modellen. In de berekening is gebruik gemaakt van het k-low-Reynolds model van StarCMM+ met een 'Quadratic Constitutive Relation' (QCR). Dit model levert in de gegeven situatie de meest realistische en de numeriek meest stabiele berekening, zoals bleek uit enkele testen met verschillende modellen over een kleinere leidinglengte en korte simulatie tijd.

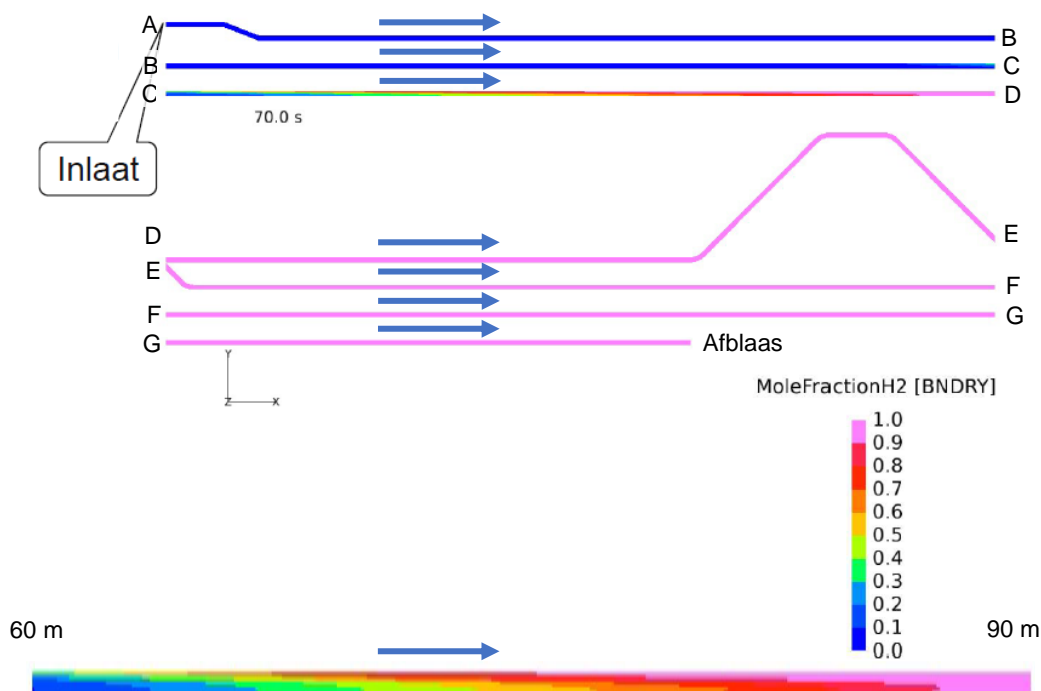
Andere rekenparameters zijn de grootte van de cellen van het rekenrooster en de tijdstap. De cellen van het rekenrooster zijn 30 mm lang en de dikte varieert van 0,5 mm aan de wand tot 8 mm in het midden van de buis. De kleine cellen van 0,5 mm aan de wand zijn nodig om de grenslaag aan de wand met voldoende nauwkeurigheid door te rekenen.



Figuur 5: Rekenrooster

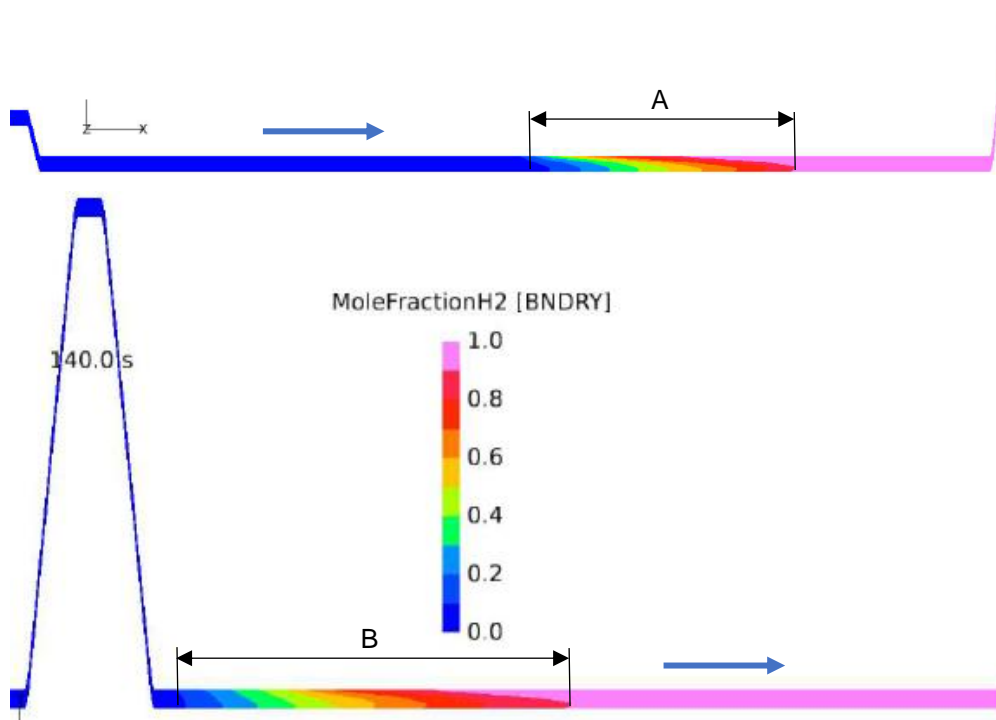
3.3 Resultaten

Vanwege het noodzakelijke fijne rekenrooster en het grote aantal kleine tijdstappen (> 20.000) vergt de simulatie een aanzienlijke rekentijd. De uiteindelijke berekening heeft ongeveer twee weken geveerd op een computer met een groot rekenvermogen. De resultaten tonen dat het waterstof na ongeveer 220 seconden uit de buis verdreven is. Dit is conform de verwachting. Opvallend is dat er geen waterstof in de brugleiding blijft hangen. Er is wel sprake van een zekere gelaagdheid. Het grensvlak tussen stikstof en waterstof staat erg schuin in de buis. Dit is bijvoorbeeld te zien in een afbeelding van de concentratieverdeling, 70 seconden na aanvang van het spoelen zie Figuur 6.



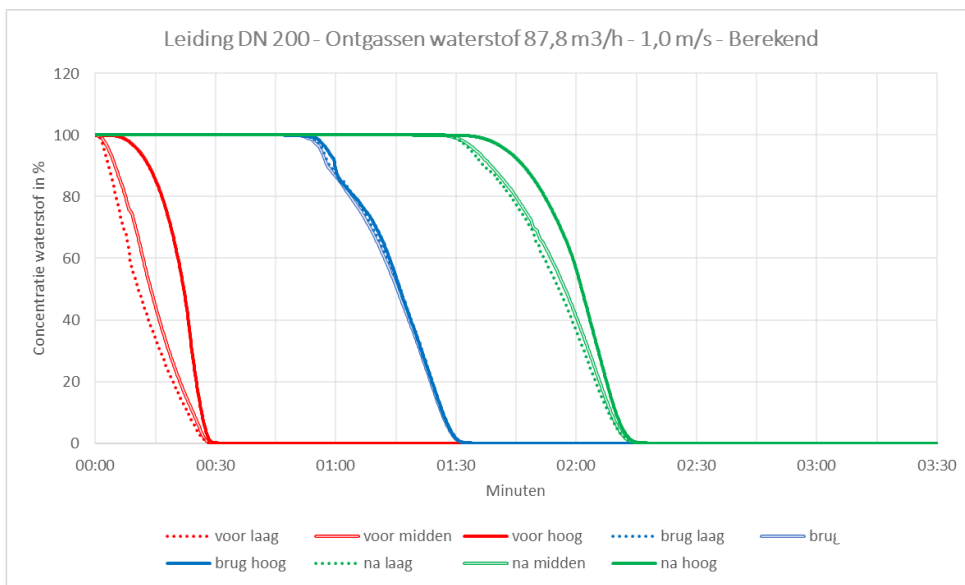
Figuur 6: Gelaagdheid in de leiding DN 200 waarbij H_2 wordt verdreven door N_2 . De leiding is opgeknipt in stukken van 30 meter. Het gedeelte van 60 m tot 90 m is uitvergroot weergegeven. De weergegeven situatie treedt op 70 seconden na aanvang van het spoelen.

Zodra het grensvlak in het stijgende deel van de brugleiding komt, wordt de oriëntatie weer iets steiler, maar de algemene trend is dat het grensvlak met het voortschrijden van de tijd (en afstand) iets vlakker en dikker wordt (en dus de menglengte langer). Dit heeft als gevolg dat de hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel in de loop van de tijd toeneemt (Figuur 7). In de figuur is te zien dat de aanwezige brugleiding tot enige rimpeling leidt in de aanwezige hoeveelheid gasmengsel, maar het effect is klein. Op grond van theoretische overwegingen is te verwachten dat de hoeveelheid mengsel evenredig toeneemt met de wortel uit de tijd. De figuur lijkt een dergelijk patroon te tonen. Als de hoeveelheid mengsel toeneemt met de tijd wordt dus de mengzone groter naarmate de leiding langer is.

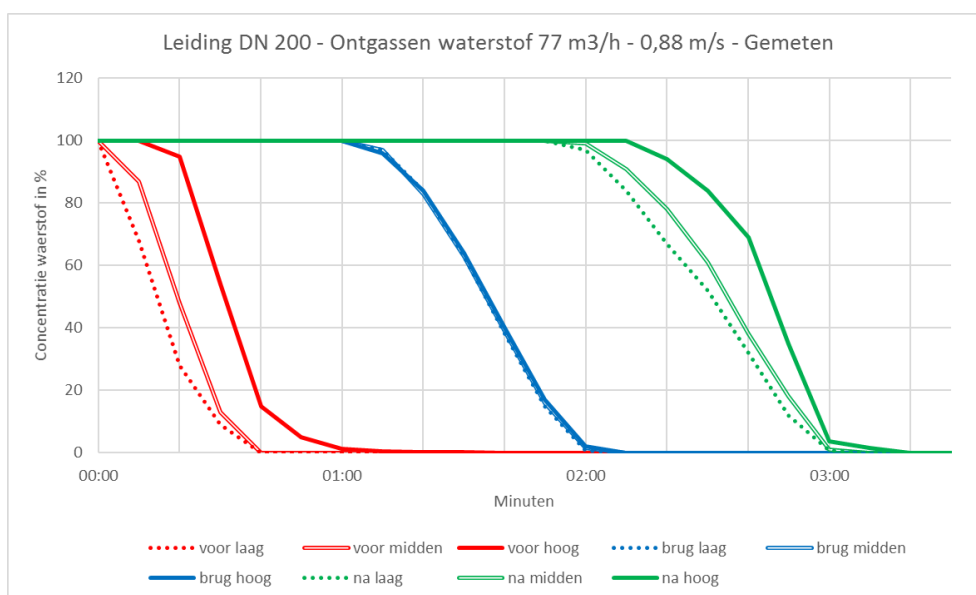


*Figuur 7: Toenemende gelaagdheid met het voortschrijden van tijd en afstand
Vergelijk na 70 sec. spoelen (boven leidingdeel voor de brugleiding)
afstand A en na 140 sec. spoelen (onder leidingdeel na de brugleiding)
afstand B*

In Figuur 8 is het verloop van de waterstofconcentratie weergegeven voor de verschillende posities in de leiding, waarvan ook meetresultaten beschikbaar zijn. De rekenresultaten vertonen qua vorm goede overeenkomst met de metingen (Figuur 9). Zowel de berekening als de metingen tonen dat de tijdsverschuiving in de daling van de concentratie tussen onderin en bovenin de buis, in het brugdeel verdwijnt. Dit wordt veroorzaakt doordat de sterk schuinstaande menglaag tussen waterstof en lucht in het opgaande deel van de brug horizontaler komt te liggen. De vooruit schuivende tong van zwaardere lucht heeft moeite om de helling op te kruipen. Voor het neergaande deel van de brugleiding geldt het omgekeerde effect, waardoor na de brug de situatie met de grotere tijdsverschuiving weer terugkomt. Een en ander is in de video van de simulatie goed zichtbaar (zie 3.3.1).



Figuur 8: De **berekende** gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 1,00 m/s



Figuur 9: De **gemeten** gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 0,88 m/s

3.3.1 Video

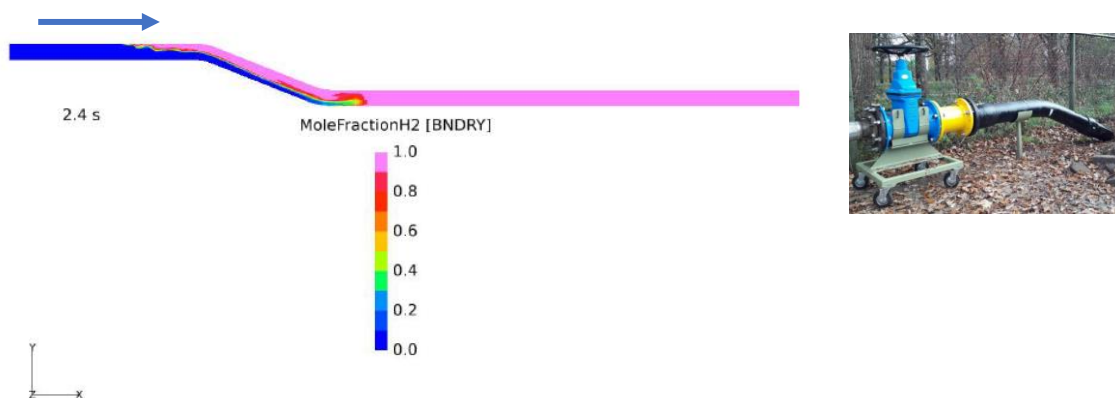
Op de website van het Kenniscentrum Gasnetbeheer zullen de rekenresultaten worden gevisualiseerd door middel van enkele video's. (www.KenniscentrumGasnetbeheer.nl).



3.3.2 Vermeldingswaardig detail

Waar twee gassen (of vloeistoffen) van verschillende dichtheid over elkaar heen stromen is er een scheidingsvlak. Als het snelheidsverschil groot genoeg is, ontstaan er golven in het scheidingsvlak. Een dergelijke instabiliteit staat bekend als de Kelvin-Helmholz instabiliteit en deze draagt uiteindelijk positief bij aan de menging.

De instabiliteit is zichtbaar bij aanvang van het spoelen in het gedeelte van de leiding dat circa 50 cm naar beneden loopt, zie Figuur 10. In het scheidingsvlak is op latere tijden geen oscillatie meer zichtbaar. Het stikstof duwt dan het waterstof voor zich uit met ongeveer dezelfde snelheid als dat het stikstof beweegt. Het snelheidsverschil op het scheidingsvlak is dan blijkbaar te gering om de golven (en menging) op te wekken. Het scheidingsvlak wordt dan alleen maar dikker als gevolg van de combinatie van turbulente en laminaire diffusie. Waarschijnlijk overheerst hierbij de turbulente diffusie, want de gasstroming is turbulent, maar dat is niet in detail nagegaan.



Figuur 10: Kelvin-Helmholz instabiliteit

3.4 Conclusie berekening spoelen waterstofleidingen

De conclusies op basis van de uitgevoerde berekening zijn:

- Voor een met waterstof gevulde leiding van DN 200 is een spoelsnelheid van 1,0 m/s voldoende om waterstof te verdrijven. Dit blijft ook het geval als er lokaal een hoogteverschil van 4.5 m in de leiding aanwezig is.
- Een zekere mate van stratificatie is zichtbaar en leidt tot een extreem schuinstaand scheidingsvlak tussen het waterstof en de stikstof (lucht).
- De aanwezige hoeveelheid brandbaar waterstof-luchtmengsel (als met lucht wordt gespoeld) neemt toe in de tijd (ongeveer evenredig met \sqrt{t}). In de leiding van 200 m lengte is maximaal 0.7 m³ brandbaar mengsel aanwezig. Dit maximum is bereikt op het moment dat het scheidingsvlak bij het einde van de leiding is gekomen ($t = 190$ s).

Opmerking: in Tabel 8 *Ontgassen waterstof* met 1 m/s is vermeld dat er 1,46 m³ waterstof-stikstofmengsel ontstaat. Dat geldt voor een gasconcentratie tussen 0 en 100%. De gemeten hoeveelheid brandbaar mengsel (gasconcentratie tussen 4 en 75%) is 0,9 m³. Dit komt redelijk overeen met de berekening.



4 Meetresultaten spoelen

In dit hoofdstuk zijn de meetresultaten opgenomen van de uitgevoerde metingen. In Tabel 3 zijn de uitgevoerde metingen aangegeven met verwijzing naar de paragraaf waarin de resultaten zijn vermeld.

Toelichting op de tabel:

- Stikstof verdrijven vindt plaats met waterstof.
- Waterstof verdrijven vindt plaats met stikstof.

Tabel 3: Uitgevoerde metingen

Leidingdiameter	Spoelsnelheid [m/s]	Paragraaf
DN 100	Stikstof verdrijven met 0,5 m/s	4.2
DN 100	Stikstof verdrijven met 1,0 m/s	4.3
DN 200	Stikstof verdrijven met 0,2 m/s	4.4
DN 200	Stikstof verdrijven met 0,5 m/s	4.5
DN 200	Stikstof verdrijven met 1,0 m/s	4.6
DN 100	Waterstof verdrijven met 0,3 m/s	4.7
DN 100	Waterstof verdrijven met 0,5 m/s	4.8
DN 100	Waterstof verdrijven met 1,0 m/s	4.9
DN 200	Waterstof verdrijven met 0,2 m/s	4.10
DN 200	Waterstof verdrijven met 0,5 m/s	4.11
DN 200	Waterstof verdrijven met 1,0 m/s	4.12

Alle metingen zijn twee keer uitgevoerd. Daar waar de meetresultaten (nagenoeg) gelijkwaardig zijn, is het resultaat van één meting weergegeven.

Opmerkingen:

1. De grafieken laten soms een wat hakkelend verloop zien, in het bijzonder bij snel veranderende gasconcentraties (hoge spoelsnelheid). Dit wordt veroorzaakt doordat de gasconcentratie per 10 seconden is vastgelegd.
2. Om de grafieken zo goed mogelijk met elkaar te kunnen vergelijken is het startpunt van alle grafieken het moment waarop de gasconcentratie bij het eerste meetpunt begint te stijgen bij het verdrijven van stikstof door waterstof (*in bedrijf stellen*) respectievelijk te dalen bij het verdrijven van waterstof door stikstof (*buiten bedrijf stellen*). De tijdsduur voor het spoelen zoals op te maken uit de grafieken moet worden vermenigvuldigd met een factor 2.
3. Het volume van het waterstof-stikstofmengsel is als volgt bepaald: duur stijging c.q. daling van de gasconcentratie tussen 0 en 100% bij het meetpunt na de brugleiding (onder en boven), vermenigvuldigd met het volumedebiet.



Figuur 11: Bepaling volume waterstof-stikstofmengsel



4.1 Samenvatting van de meetresultaten

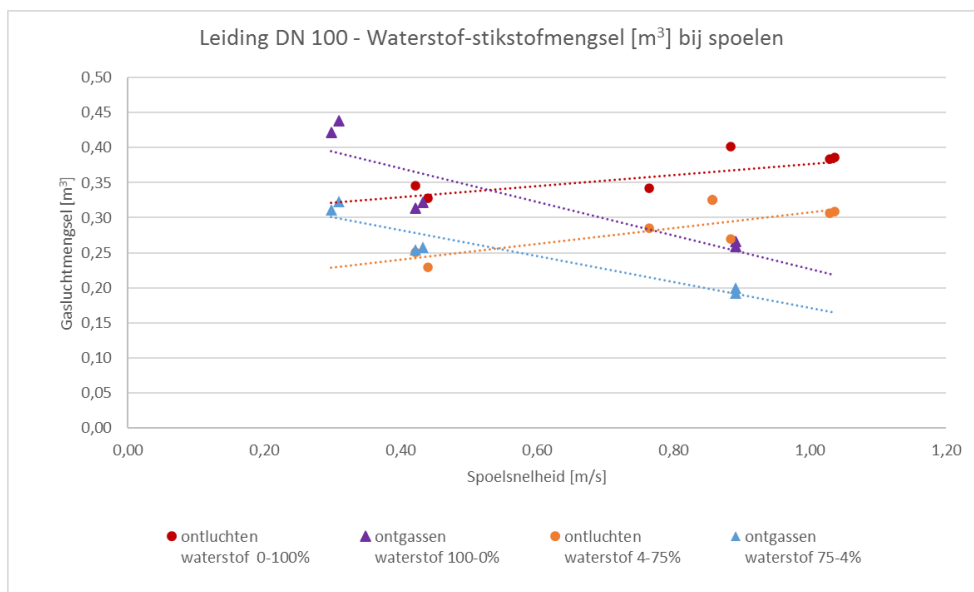
In deze paragraaf zijn de meetresultaten kort samengevat, zie paragraaf 4.14 voor de conclusies.

Tenzij anders vermeld wordt met 100% stikstof een mengsel bedoeld met minder dan 0,4% waterstof (< 10% LEL) en met 100% gas een mengsel met minder dan 0,5% stikstof.

Samenvatting:

- De leiding wordt bij een spoelsnelheid groter of gelijk aan 0,2 m/s volledig ontluicht dan wel ontgast. D.w.z. na verloop van tijd wordt de situatie bereikt dat zowel bovenin als onderin de buis een concentratie van 100% gas, respectievelijk 0% gas wordt gemeten.
- Voor ontgassen geldt dat het volume van het waterstof-stikstofmengsel dat ontstaat, groter is naarmate de spoelsnelheid lager is.
- Voor ontluichten blijkt daarentegen dat de hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel groter wordt naarmate de spoelsnelheid hoger is.
- Bij lage spoelsnelheid (0,2 m/s) van een DN 200 leiding duren ontluichten en ontgassen van waterstof ongeveer even lang. Naarmate de spoelsnelheid hoger is geldt dat het ontluichten langer duurt dan het ontgassen. (Bij 1,0 m/s ontstaat tweemaal zoveel waterstof-stikstofmengsel in de leiding als bij ontgassen).
- De duur dat een waterstof-stikstofmengsel wordt afgefakkeld (afgeblazen) is uiteraard significant langer naarmate de spoelsnelheid lager is.

De hierboven genoemde resultaten zijn grafisch weergegeven in Figuur 12 en Figuur 13.



Figuur 12: Grafische weergave spoelen van DN 100 leiding met waterstof

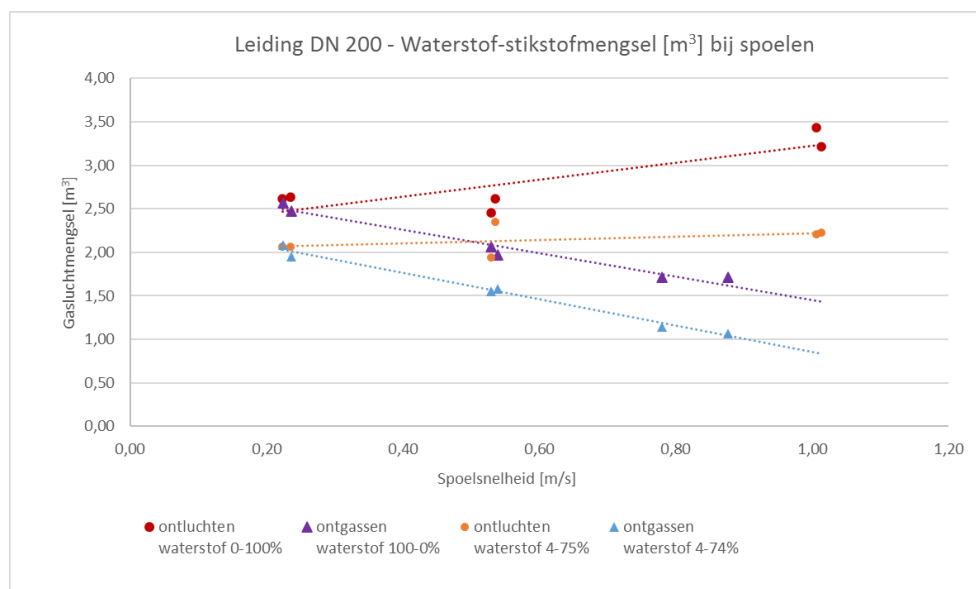
Toelichting:

In Figuur 12 en Figuur 13 zijn de ontstane hoeveelheden waterstof-stikstofmengsel van de metingen geplott, de rondjes geven de hoeveelheden bij het ontluichten en de driehoekjes bij het ontgassen. De gestippelde lijnen zijn de trendlijnen op basis van de ontstane hoeveelheden waterstof-stikstofmengsels.

Een opvallend resultaat is dat de trend van de ontstane hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel bij het ontluichten van waterstof tegengesteld was aan die bij aardgas



(ontstane aardgas-luchtmengsel, zie ook hoofdstuk 7). Deze trend is bepaald vanuit het uitgangspunt dat het ontstane waterstof- stikstofmengsel een concentratie heeft tussen 0 en 100%. Het concentratieverloop nabij 0% en 100% verloopt asymptotisch, wat mogelijk tot onnauwkeurigheden bij de vaststelling van de hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel zou kunnen leiden. Daarom is er met een extra exercitie nagegaan of deze trend kan worden bevestigd. Daarvoor is gekeken naar de hoeveelheid brandbaar waterstof- stikstofmengsel (4 – 75%) om de randverschijnselen te elimineren. De hoeveelheid mengsel tussen 4 – 75% is bij een bepaalde snelheid uiteraard kleiner dan de hoeveelheid mengsel tussen 0 – 100%. In figuur 12 is af te lezen dat bij de DN 100 leiding de trendlijnen bij ontlichten van waterstof bij 0 – 100% en 4 – 75% redelijk parallel lopen. In figuur 13 voor de DN 200 leiding loopt de trendlijn bij 4 – 75% minder steil dan bij 100%, maar loopt nog steeds omhoog, dit in tegenstelling tot de trendlijn bij het ontlichten van aardgas.



Figuur 13: Grafische weergave spoelen van DN 200 leiding met waterstof

In Tabel 4 en Tabel 5 zijn de resultaten samengevat weergegeven. De laatste twee rijen van beide tabellen zijn berekend op basis van de lineaire trendlijn in de grafiek bij resp. 1,0 m/s en 0,2 m/s.

Opmerkingen bij de tabellen:

- Het volume van het waterstof-stikstofmengsel is bepaald op basis van het gemiddelde van de meetresultaten bij de verschillende metingen bij een bepaalde spoelsnelheid.
- De leidinginhoud van de testleiding van DN 200 (PE SDR 17) van 200 m lengte is 4,88 m³. Voor het volledig ontlichten met 1,0 m/s moet behalve deze inhoud van de leiding tevens de hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel (3,22 m³)¹ door de leiding worden gevoerd om deze geheel vrij van stikstof te krijgen. Daarmee moet de inhoud ongeveer $(4,88 + 3,22)/4,88 = 1,7$ maal worden gespoeld (totaal ingebracht volume aan gas > 1,7 x volume van de leiding). Analoog berekend moet voor het volledig ontgassen bij ca. 1,0 m/s

¹ Deze waarde van het gas-luchtmengsel is bepaald op basis van de y-waarde van de lineaire trendlijn in de grafiek bij 1 m/s).



deze leiding $(4,88 + 1,46^1)/4,88 = 1,3$ maal worden gespoeld. Zie kolom 'spoelfactor'.

- Voor de DN 100 (PE SDR 17,6) leiding van 200 m is de inhoud 1,49 m³. De berekeningen voor deze leiding zijn op analoge wijze uitgevoerd als hiervoor aangegeven. Voor volledig ontluichten met 1,0 m/s moet de inhoud van de leiding 1,3 maal worden gespoeld, en voor volledig ontgassen met 1,0 m/s moet dit 1,2 maal gebeuren.
- Bij het ontgassen stroomt er eerst 100% waterstof uit de leiding, gevolgd door een waterstof-stikstofmengsel, gevolgd door 100% stikstof. In de kolom 'duur waterstof-stikstofmengsel tot 100% gas' is de tijd vermeld dat er een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding stroomt.
- De duur van het spoelen is de tijd die nodig is voor het volledig ontluichten resp. ontgassen van de testleiding.

Tabel 4: Meetresultaten ontluichten (*in bedrijf stellen*) van de leiding.

Leiding-diameter [DN]	Spoelsnelheid ontluichten [m/s]	Flow [m ³ _n /h]	Duur waterstof-stikstofmengsel tot 100% gas [min.]	Gas-lucht-mengsel [m ³]	Spoel-factor	Duur spoelen [min.]
100	0,42	11,3	1,8	0,35	1,2	10
100	0,44	11,8	1,7	0,33	1,2	9
100	0,76	20,5	1,0	0,34	1,2	5
100	0,86	23,0	0,9	0,33	1,2	5
100	0,88	23,7	0,9	0,40	1,3	5
100	1,03	27,6	0,8	0,38	1,3	4
100	1,04	27,8	0,8	0,39	1,3	4
200	0,22	19,6	8,0	2,61	1,5	23
200	0,23	20,6	7,7	2,63	1,5	22
200	0,53	46,5	3,2	2,45	1,5	9
200	0,54	47,0	3,3	2,61	1,5	10
200	1,01	88,3	2,2	3,43	1,7	6
200	1,01	89,0	2,2	3,21	1,7	5
200	1,00	88,2 ^{*)}	2,2 ^{*)}	3,22 ^{*)}	1,7 ^{*)}	5,5 ^{*)}
200	0,20	17,5 ^{*)}	8,4 ^{*)}	2,45 ^{*)}	1,5 ^{*)}	25,1 ^{*)}

^{*)} Deze waarde is berekend op basis van de trendlijn.

Tabel 5: Meetresultaten ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) van de leiding.

Leiding-diameter [DN]	Spoelsnelheid ontgassen [m/s]	Flow [m ³ _n /h]	Duur waterstof-stikstofmengsel tot 0% gas [min.]	Gas-lucht-mengsel [m ³]	Spoel-factor	Duur spoelen [min.]
100	0,30	8,0	2,8	0,38	1,3	14
100	0,31	8,3	2,8	0,38	1,3	14
100	0,42	11,3	1,7	0,32	1,2	10

¹ Ook deze waarde van het gas-luchtmengsel is bepaald op basis van de y-waarde van de lineaire trendlijn in de grafiek bij 1 m/s).

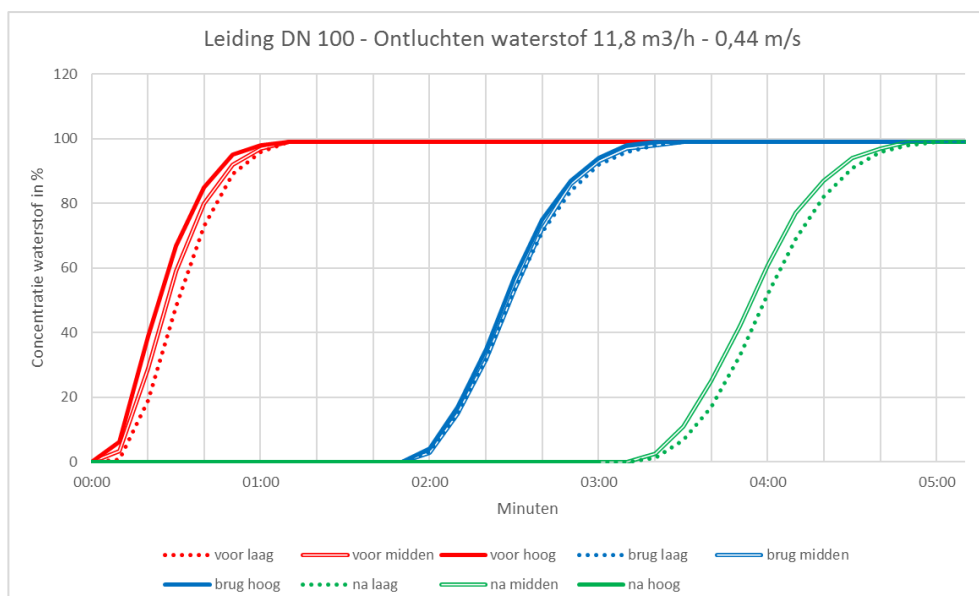


Leiding-diameter [DN]	Spoelsnelheid ontgassen [m/s]	Flow [m ³ ,n/h]	Duur waterstof-stikstofmengsel tot 0% gas [min.]	Gas-lucht-mengsel [m ³]	Spoel-factor	Duur spoelen [min.]
100	0,43	11,6	1,7	0,32	1,2	9
100	0,89	23,9	1,7	0,26	1,2	4
100	0,89	23,9	0,7	0,26	1,2	4
200	0,22	19,7	7,8	2,52	1,5	23
200	0,24	20,7	7,2	2,52	1,5	21
200	0,53	46,5	2,7	2,02	1,4	9
200	0,54	47,3	2,5	2,02	1,4	9
200	0,78	68,5	1,5	1,71	1,4	6
200	0,88	77,0	1,3	1,71	1,4	5
200	1,00	88,2*)	1,0*)	1,46*)	1,3*)	4,3*)
200	0,20	17,5*)	8,7*)	2,53*)	1,5*)	25,4*)

*) Deze waarde is berekend op basis van de trendlijn.

4.2 Ontluchten leiding DN 100 met circa 0,5 m/s

In Figuur 14 zijn de resultaten weergegeven van het ontluchten (*in bedrijf stellen*) met circa 0,5 m/s.



Figuur 14: De gasconcentraties bij het ontluchten, spoelsnelheid = 0,44 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontlucht.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor de brugleiding maximaal circa 20% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Nadat eerst 100% stikstof uit het einde van de leiding komt, stroomt gedurende ruim 1,5 minuut een waterstof-stikstofmengsel door de leiding waarna er sprake is van uitstroming van 100% waterstof en de leiding

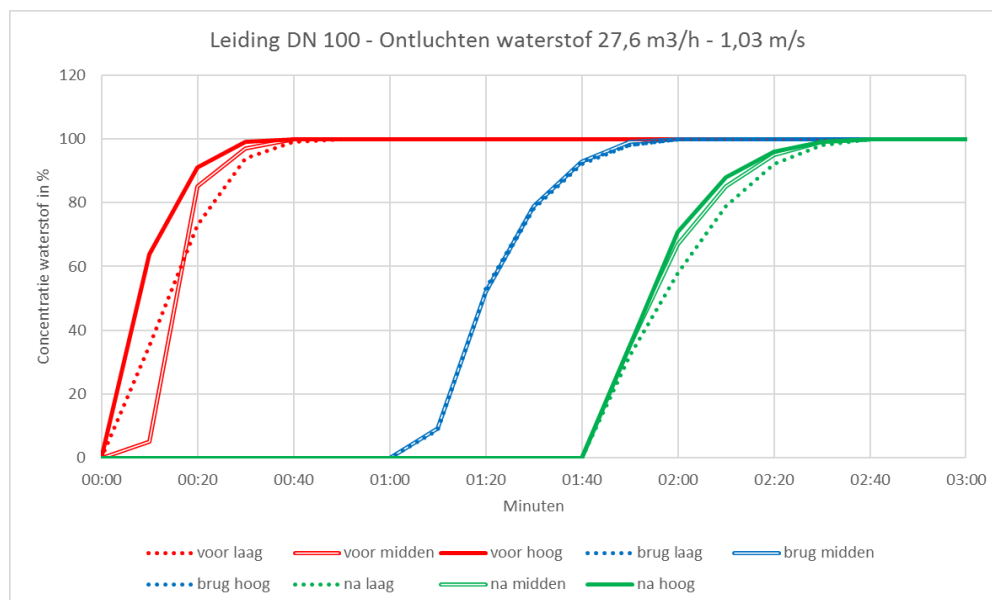


daarmee volledig is ontluicht. Er ontstaat bij het ontluichten een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer $0,33 \text{ m}^3$.

- Het ontluichten duurt ongeveer 9 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.3 Ontluichten leiding DN 100 met circa 1,0 m/s

In Figuur 15 zijn de resultaten weergegeven van het ontluichten (*in bedrijf stellen*) met circa 1,0 m/s.



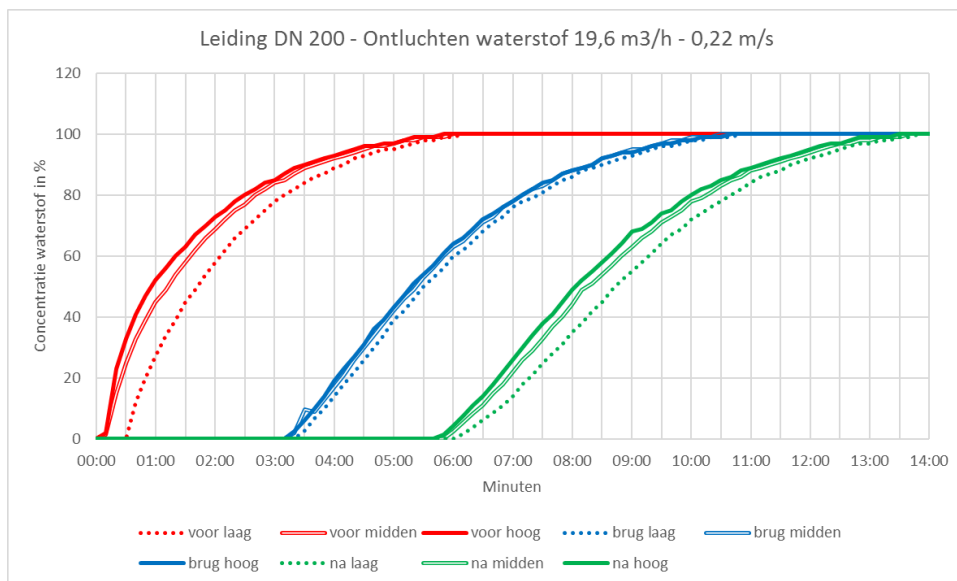
Figuur 15: De gasconcentraties bij het ontluichten, spoelsnelheid = 1,03 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontluicht.
- De gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding wat uit elkaar, op de brugleiding zijn deze steeds (nagenoeg) gelijk.
- Gedurende circa 50 seconden stroomt een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding. Er ontstaat bij het ontluichten een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer $0,38 \text{ m}^3$.
- Het ontluichten duurt ca. 4 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.4 Ontluichten leiding DN 200 met circa 0,2 m/s

In Figuur 16 zijn de resultaten weergegeven van het ontluichten (*in bedrijf stellen*) met circa 0,2 m/s.



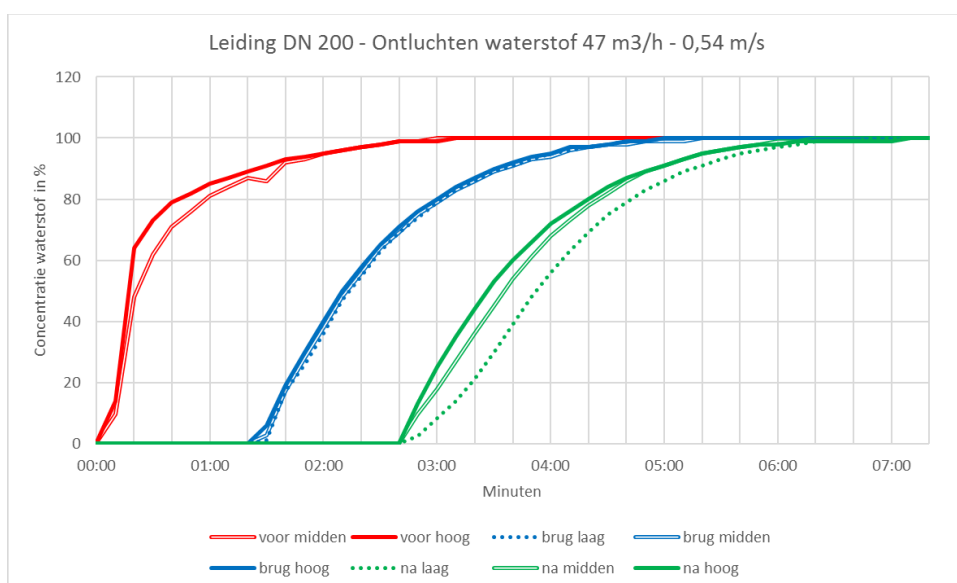
Figuur 16: De gasconcentraties bij het ontlichten, spoelsnelheid = 0,22 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontlicht.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor de brugleiding maximaal circa 40% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk. Na de brugleiding liggen de gasconcentraties maximaal circa 30% uit elkaar.
- Gedurende circa 8 minuten stroomt een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding. Er ontstaat bij het ontlichten een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer 2,61 m³.
- Het ontlichten duurt ca. 23 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.5 Ontlichten leiding DN 200 met circa 0,5 m/s

In Figuur 17 zijn de resultaten weergegeven van het ontlichten (*in bedrijf stellen*) met circa 0,5 m/s.



Figuur 17: De gasconcentraties bij het ontlichten, spoelsnelheid = 0,54 m/s

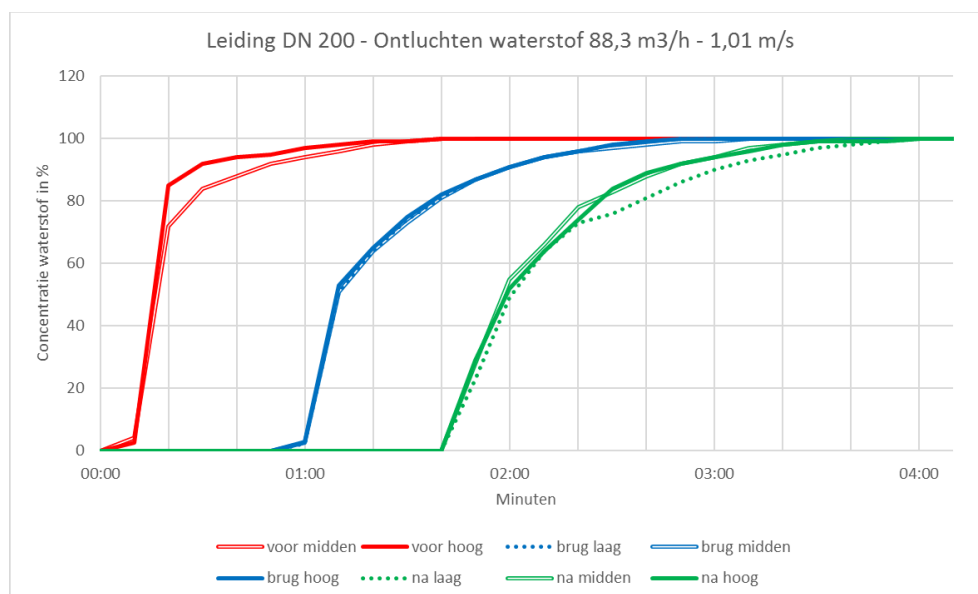


Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontluicht.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 15% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Gedurende ruim 3 minuten stroomt een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding. Er ontstaat bij het ontluichten een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer 2,61 m³.
- Het ontluichten duurt ca. 10 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.6 Ontluichten leiding DN 200 met circa 1,0 m/s

In Figuur 17 zijn de resultaten weergegeven van het ontluichten (*in bedrijf stellen*) met circa 1,0 m/s.



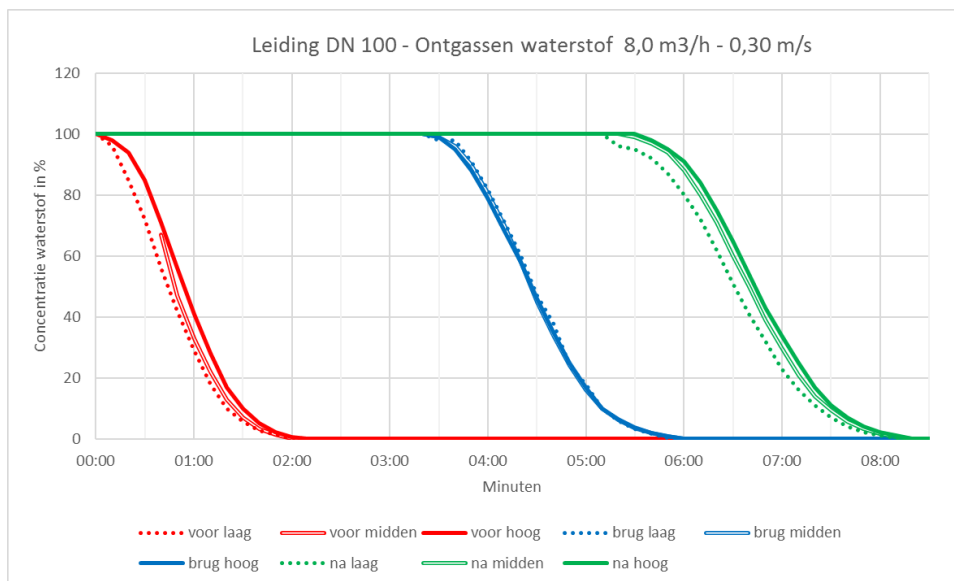
Figuur 18: De gasconcentraties bij het ontluichten, spoelsnelheid = 1,01 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontluicht.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 10% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Gedurende ruim 2 minuten stroomt een waterstof-stikstofmengsel door de leiding. Er ontstaat bij het ontluichten een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer 3,43 m³.
- Het ontluichten duurt ca. 6 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.7 Ontgassen leiding DN 100 met circa 0,3 m/s

In Figuur 19 zijn de resultaten weergegeven van het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) met circa 0,3 m/s.



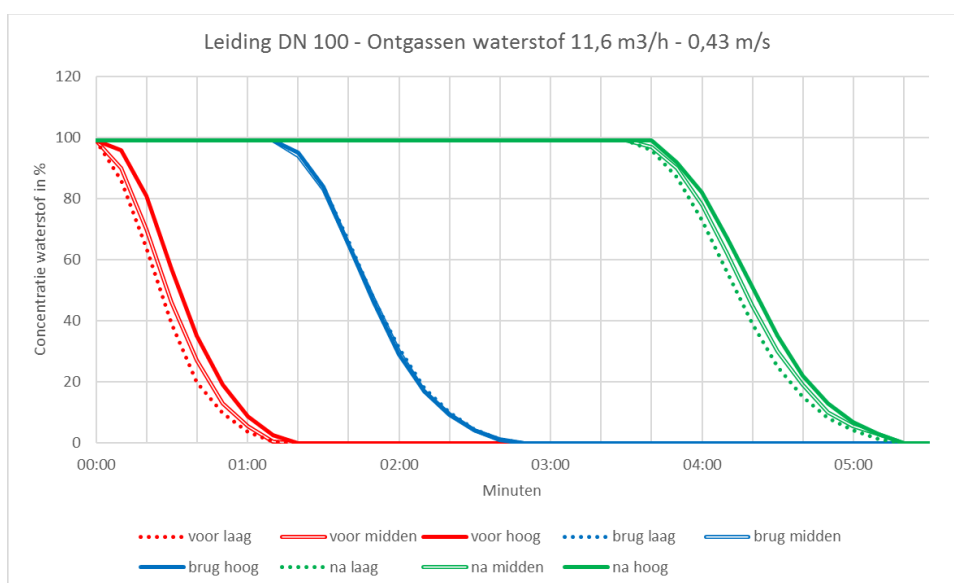
Figuur 19: De gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 0,30 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontgast.
- De gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 15% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Gedurende bijna 3 minuten stroomt een waterstof-stikstofmengsel door de leiding. Er ontstaat bij het ontgassen een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer 0,38 m³.
- Het ontgassen duurt circa 14 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.8 Ontgassen leiding DN 100 met circa 0,5 m/s

In Figuur 20 zijn de resultaten weergegeven van het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) met circa 0,5 m/s.



Figuur 20: De gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 0,43 m/s

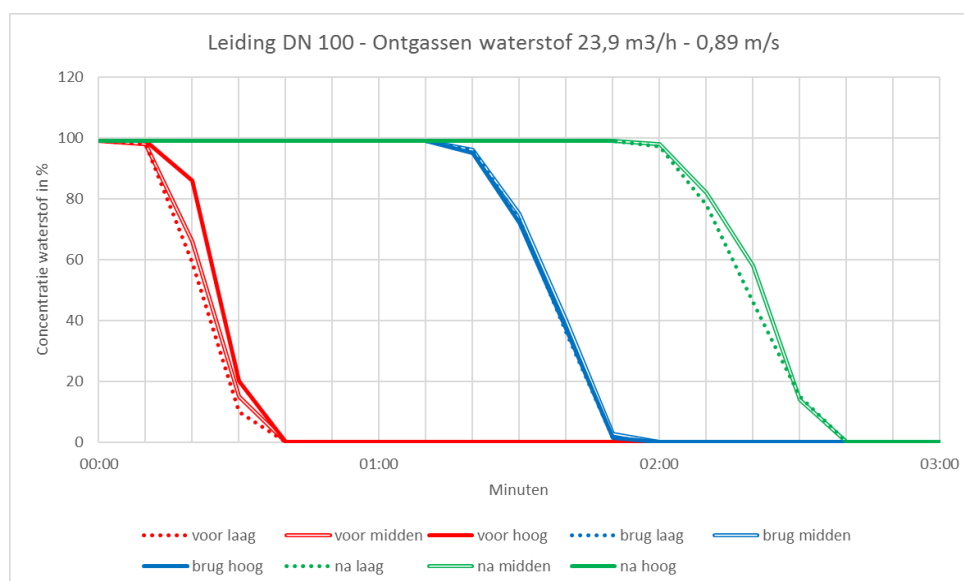


Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontgast.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 20% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Gedurende ruim 1,5 minuut stroomt een waterstof-stikstofmengsel door de leiding. Er ontstaat bij het ontgassen een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer $0,32 \text{ m}^3$.
- Het ontgassen duurt circa 9 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.9 Ontgassen leiding DN 100 met circa 1,0 m/s

In Figuur 21 zijn de resultaten weergegeven van het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) met circa 1,0 m/s.



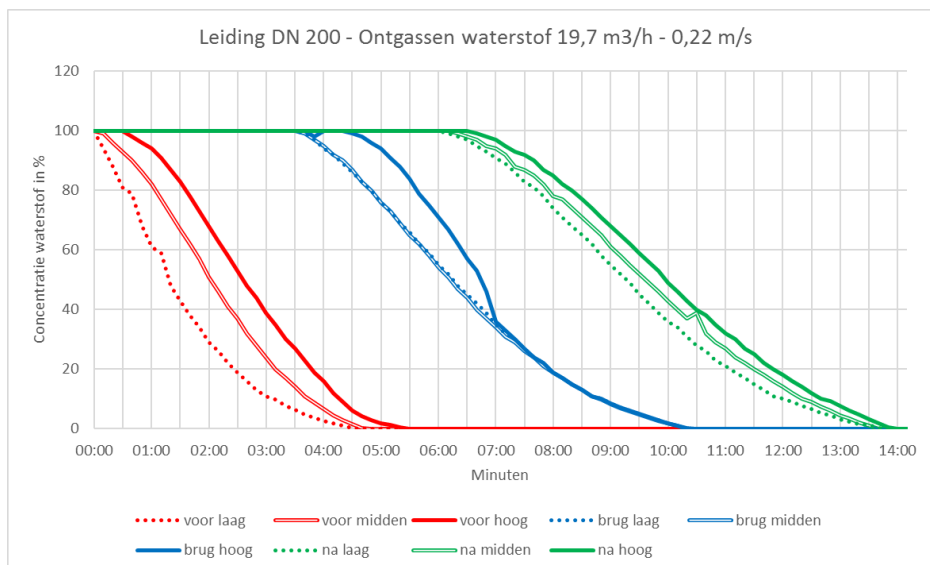
Figuur 21: De gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 0,89 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontgast.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 20% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Gedurende minder dan 1 minuut stroomt een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding. Er ontstaat bij het ontgassen een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer $0,26 \text{ m}^3$.
- Het ontgassen duurt circa 4 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.10 Ontgassen leiding DN 200 met circa 0,2 m/s

In Figuur 22 zijn de resultaten weergegeven van het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) met circa 0,2 m/s.



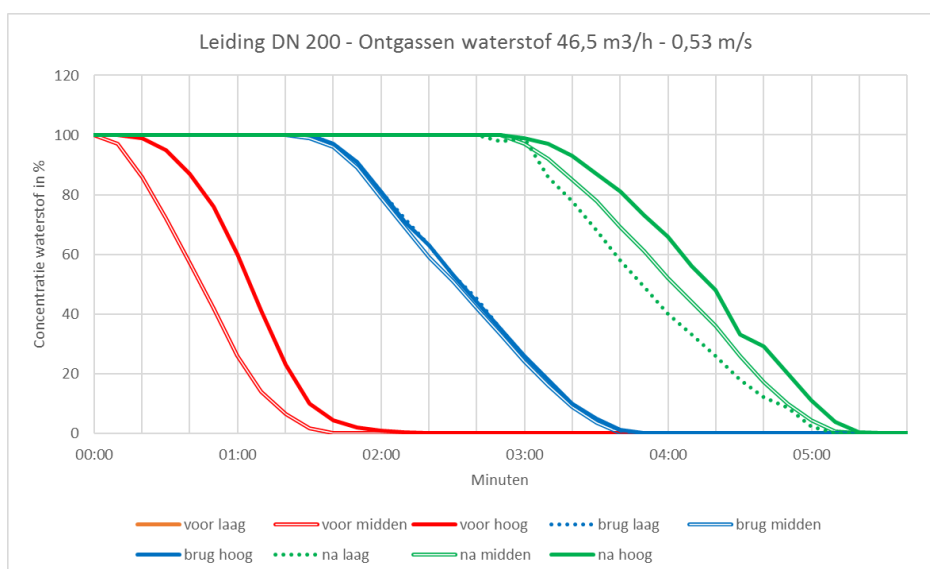
Figuur 22: De gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 0,22 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontgast.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 35% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk; de concentratie bovenin de leiding ligt maximaal 20 % daarboven.
- Gedurende bijna 8 minuten stroomt een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding. Er ontstaat bij het ontgassen een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer 2,52 m³.
- Het ontgassen duurt circa 23 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.11 Ontgassen leiding DN 200 met circa 0,5 m/s

In Figuur 23 zijn de resultaten weergegeven van het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) met circa 0,5 m/s.



Figuur 23: De gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 0,53 m/s

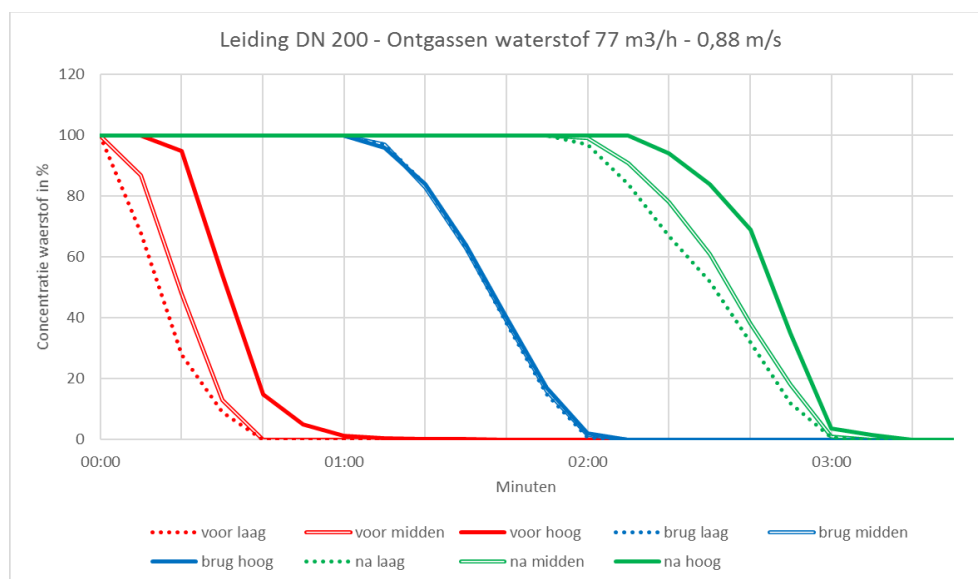


Uit de grafiek blijkt het volgende:

- De leiding wordt volledig ontgast.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 30% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Gedurende ca. 2 minuten stroomt een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding. Er ontstaat bij het ontgassen een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer 2,02 m³.
- Het ontgassen duurt circa 9 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.12 Ontgassen leiding DN 200 met circa 1,0 m/s

In Figuur 24 zijn de resultaten weergegeven van het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) met circa 0,88 m/s.



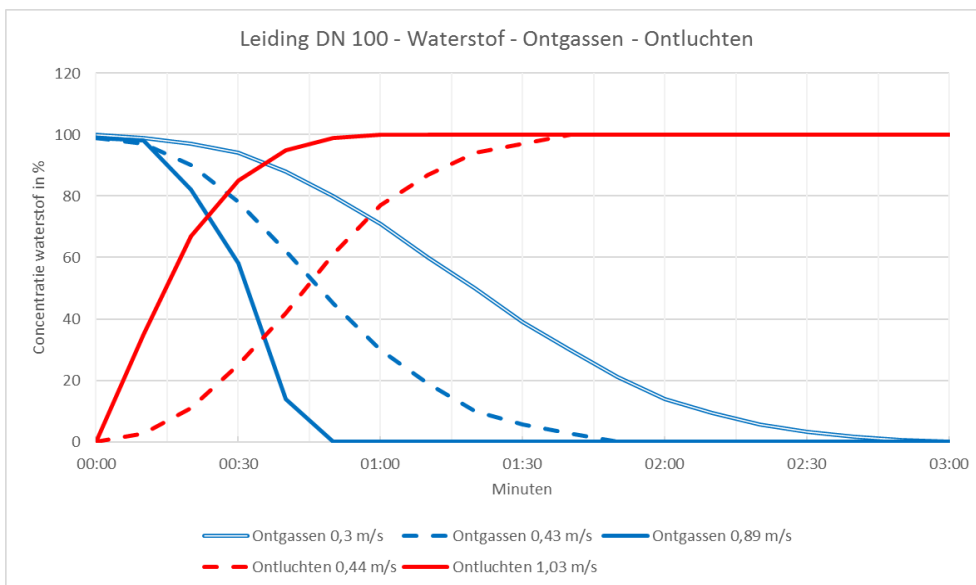
Figuur 24: De gasconcentraties bij het ontgassen, spoelsnelheid = 0,88 m/s

Uit de grafiek blijkt het volgende:

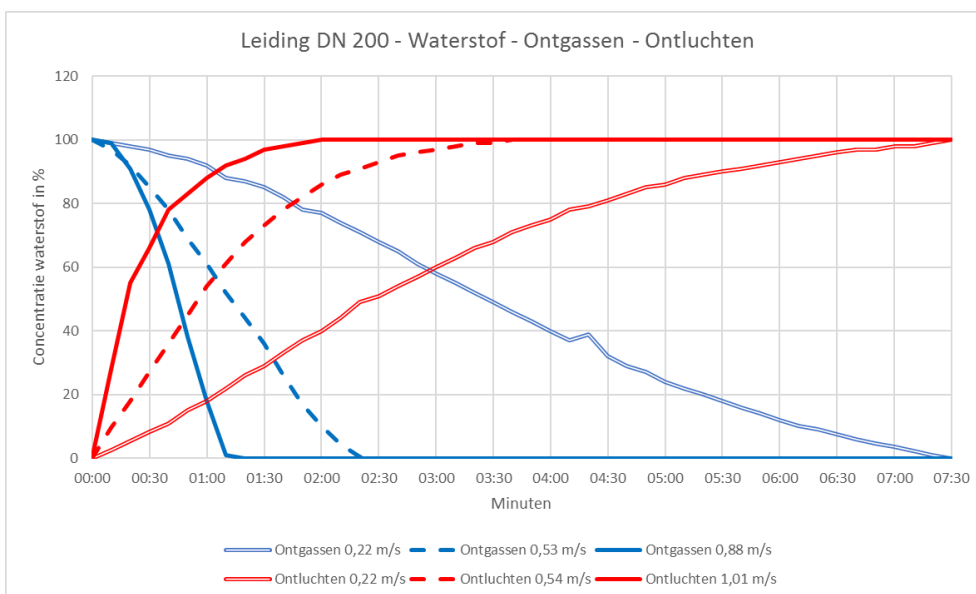
- De leiding wordt volledig ontgast.
- De gasconcentraties boven en onder in de leiding liggen voor en na de brugleiding maximaal circa 40% uit elkaar. Op de brugleiding zijn de gasconcentraties boven, midden en onder in de leiding nagenoeg gelijk.
- Gedurende bijna 1,5 minuut stroomt een waterstof-stikstofmengsel uit de leiding. Er ontstaat bij het ontluchten een waterstof-stikstofmengsel van ongeveer 1,71 m³.
- Het ontluchten duurt circa 5 minuten. (Zie opmerking 2 op blz. 22).

4.13 Overzicht ontgassen en ontluchten met verschillende snelheid

In Figuur 25 en Figuur 26 is de invloed van het ontluchten (*in bedrijf stellen*) en ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) inzichtelijk gemaakt door van één meetpunt (het meetpunt na de brugleiding, midden in de leiding) de concentratie waterstof in één grafiek weer te geven.



Figuur 25: Leiding DN 100 – ontgassen en ontluchten



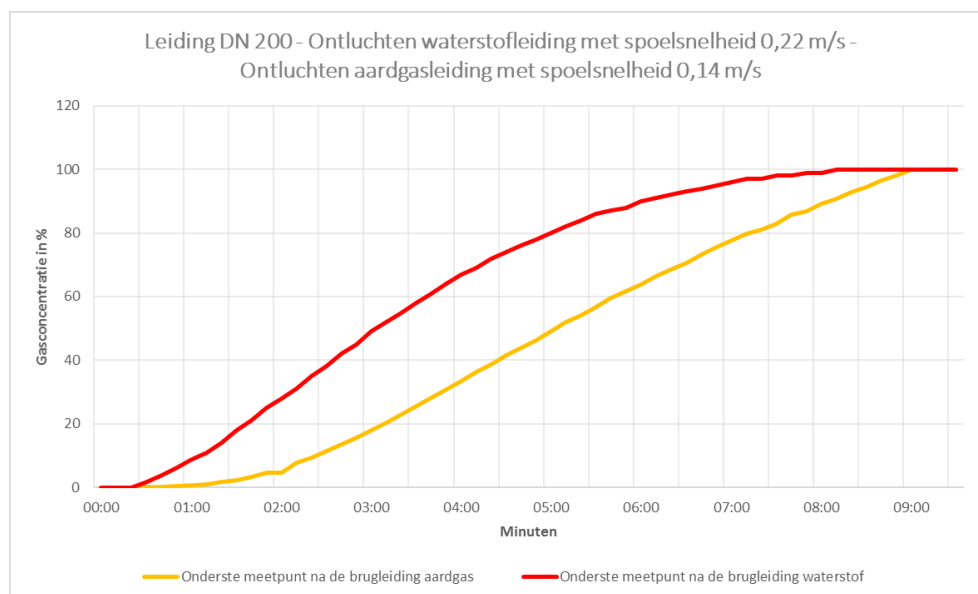
Figuur 26: Leiding DN 200 – ontgassen en ontluchten

4.14 Vergelijking minimaal benodigde spoelsnelheid waterstofleidingen en aardgasleidingen

In onderstaande grafiek, Figuur 27, zijn de meetresultaten bij het ontluchten (*in bedrijf stellen*) van een waterstofleiding met een spoelsnelheid van 0,22 m/s en het spoelen van een aardgasleiding met een spoelsnelheid van 0,14 m/s in één grafiek gezet. Wat hierbij opvalt is dat de duur van het spoelen op één bepaald meetpunt nagenoeg gelijk is – gekozen is het onderste meetpunt na de brugleiding, maar dat geldt ook voor de andere meetpunten. Hieruit blijkt dat een waterstofleiding met een hogere spoelsnelheid moet worden gespoeld dan een aardgasleiding om dezelfde mate van



spoeling te verwezenlijken. Dit wordt onderbouwd door het vermeldde in paragraaf 4.15.



Figuur 27: Leiding DN 200 ontlucht (in bedrijf gesteld) met **waterstof** en **aardgas**

4.15 Bevindingen met betrekking tot het spoelen van waterstofleidingen

Op basis van de meetresultaten zijn de bevindingen:

- Het spoelen van een waterstofleiding met een spoelsnelheid van $\leq 0,2$ m/s neemt veel tijd in beslag. Het spoelen, zowel ontgassen als ontluchten, van de testleiding bij 0,2 m/s duurt minimaal ruim 25 minuten.
- Het spoelen met een spoelsnelheid van 1,0 m/s is praktisch goed uitvoerbaar; het neemt een beperkte tijd in beslag, het benodigde debiet is beperkt – ook voor leidingen met een grote diameter. Het ontgassen van de testleiding bij 1,0 m/s duurt ruim 4 minuten. Het ontluchten vraagt wat meer tijd: ca. 5,5 minuut.

Overige bevindingen zijn:

- Bij het ontluchten (*in bedrijf stellen*) treedt een duidelijke gelaagdheid op (laagvorming, stratificatie). Eerst is een toename van de gasconcentratie te zien boven in de leiding, vervolgens in het midden en tenslotte onder in de leiding.
Kortom: de leiding wordt van boven naar beneden ontlucht.
- Het ontluchten (*in bedrijf stellen*) met een spoelsnelheid $> 1,0$ m/s biedt geen wezenlijke voordelen terwijl het benodigde debiet een nadeel is – zeker bij het spoelen van leidingen met een grote diameter (\geq DN 200).
- Bij het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) met een spoelsnelheid $\leq 0,2$ m/s treedt eveneens een duidelijke gelaagdheid op. Eerst is een afname van de gasconcentratie te zien onder in de leiding, vervolgens in het midden en tenslotte boven in de leiding.
Kortom: de leiding wordt van beneden naar boven ontgast.
- Er treedt vermenging op van het gas met de stikstof. Bij ontgassen neemt het volume waterstof-stikstofmengsel toe naarmate de spoelsnelheid lager is. En omgekeerd: het volume waterstof-stikstofmengsel neemt iets af naarmate de spoelsnelheid hoger is (zie de kolom 'waterstof-stikstofmengsel [m³]' Tabel 4).



- Voor ontluichten blijkt daarentegen dat de hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel groter wordt naarmate de spoelsnelheid hoger is (zie de kolom 'waterstof-stikstofmengsel [m³]' van Tabel 4). Dit effect is gemeten zowel bij de DN 200 leiding als bij de DN 100 leiding.
- Er moet rekening worden gehouden met toenemende weerstand, met name bij het uittredepunt, naarmate de stikstofconcentratie in het gasmengsel toeneemt.
- Bij alle metingen is de leiding volledig ontluicht dan wel ontgast. Dit betekent dat er ook met een lagere spoelsnelheid dan 1,0 m/s kan worden ontluicht en ontgast. (Dit is van belang in die situaties waarbij het praktisch niet goed mogelijk is om de geadviseerde spoelsnelheid van 1,0 m/s te realiseren).

4.16 Vergelijking conclusies bevindingen met Amerikaans onderzoek

In bijlage III staat een grafiek van een Amerikaans onderzoek uit 2001 naar het spoelen van leidingen. Dat onderzoek is niet specifiek op waterstof gericht. De bevindingen vanuit het vorige hoofdstuk zijn gelegd naast een grafiek uit dit onderzoek. Daaruit blijkt dat de spoelsnelheid groter moet zijn naarmate de diameter groter is en naarmate het spoelmedium lichter is; bij waterstof moet met een grotere snelheid worden gespoeld dan bij aardgas.

4.17 Conclusies met betrekking tot het spoelen van waterstofleidingen

Op basis van de meetresultaten blijkt een spoelsnelheid van 0,2 m/s bij DN 200 voldoende om uiteindelijk alle waterstof (of stikstof) uit de leiding te verdrijven. Op basis van de theoretische beschouwing is de benodigde spoelsnelheid eveneens circa 0,2 m/s.

Omdat de praktijkomstandigheden bij het spoelen van leidingen ongunstiger kunnen zijn dan bij het spoelen van de testleidingen wordt een veiligheidsfactor van twee aangehouden om het volledig spoelen in de praktijk zeker te stellen.

Bovenstaande leidt tot de volgende conclusie:

- Een **spoelsnelheid van minimaal 0,4 m/s** is benodigd om er zeker van te zijn dat een waterstofleiding \leq DN 200 volledig wordt gespoeld.

Opmerkingen:

- De minimaal benodigde spoelsnelheid voor waterstofleidingen is groter dan bij aardgasleidingen, voor de onderbouwing zie paragraaf 4.14.
- Deze spoelsnelheid geldt voor leidingen met een diameter \leq DN 200. Voor leidingen met een grotere diameter moet de spoelsnelheid evenredig met de diameter groter moeten. Dit is aangegeven in Tabel 6.
- Daar waar sprake is van verschillende leidingdiameters in het te spoelen tracé moet de benodigde spoelsnelheid van de grootste leidingdiameter worden aangehouden.
- Uit veiligheidsoverwegingen (hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel en duur dat er een waterstof-stikstofmengsel uitstroomt) en praktische overwegingen (duur spoelen) wordt een **spoelsnelheid van 1,0 m/s geadviseerd**.
- Het spoelen met een spoelsnelheid van 1,0 m/s is praktisch goed uitvoerbaar; het neemt een beperkte tijd in beslag, het benodigde debiet is beperkt – ook voor leidingen met een grote diameter, de duur is begrensd even als de grootte van de waterstofwolk of – bij affakkelen – de grootte van de vlam.



Tabel 6: Benodigde spoelsnelheid per leidingdiameter en benodigd debiet

Leiding-diameter	Minimaal benodigde spoelsnelheid [m/s]	Benodigd debiet bij de benodigde spoelsnelheid [m ³ _n /h]	Benodigd debiet bij een spoelsnelheid van 1,0 m/s [m ³ _n /h]
DN 32	0,4	2	3
DN 50	0,4	3	8
DN 80	0,4	8	19
DN 100	0,4	12	29
DN 150	0,4	26	64
DN 200	0,4	46	113
DN 250	0,5	89	177
DN 300	0,6	153	255
DN 400	0,8	362	452



5 Theorie spoelen, expert opinion

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de theoretische achtergrond bij het spoelen van leidingen en wordt een expert opinion gegeven op de verschillende aspecten met betrekking tot het spoelen van waterstofleidingen.

5.1 Theoretische achtergronden bij het spoelen van leidingen

Afhankelijk van snelheid, diameter en medium is de stroming in de leiding turbulent of laminair. Dit is van belang omdat in een turbulente stroming meer menging optreedt dan in een laminaire stroming. Voor een homogeen mengsel (van aardgas en lucht) is de bepalende dimensieloze parameter het getal van Reynolds ($Re = V D / \nu$) het omslagpunt van laminaire stroming naar turbulente stroming goed bekend, maar wel enigszins afhankelijk van de omstandigheden (inlaatprofiel en wandruwheid). Vuistregel is dat de overgang van laminair naar turbulent gebeurt bij $Re \approx 2100$. Als de inlaat netjes gestroomlijnd is, is er ongeveer na 50 D (diameters) een volledig ontwikkelde turbulente stroming aanwezig. Bij een niet gestroomlijnde intrede gebeurt dat sneller (10 D).

Bij niet-homogene mengsels kan er sprake zijn van stratificatie, waarin de lichtere fractie bovenop de zwaardere fractie drijft. Stratificatie werkt de omslag naar turbulentie tegen. Voor de intensiteit van de stratificatie is de verhouding tussen de impuls van een pakketje waterstof-stikstofmengsel versus de opwaarts drijvende kracht door de dichtheidsverschillen van belang. Deze verhouding wordt beschreven door het dimensieloze getal van Richardson ($Ri = g/\rho \Delta\rho D/\Delta V$), hierbij is ρ in onderhavig geval de gemiddelde dichtheid van waterstof en lucht. Als vuistregel geldt dat dichtheidsverschillen geen invloed op de stroming hebben als $Ri < 0,1$ en dat dichtheidsverschillen de stroming bepalen (sterke stratificatie) als $Ri > 10$. Praktisch gesproken betekent dit dat voor effectief spoelen gestreefd moet worden naar $Ri < 2$. De consequentie van de theorie is, dat de minimum benodigde spoelsnelheid evenredig is met de diameter van de leiding. De literatuur en de theorie geven niet aan waar de praktische grens, tussen veel en weinig stratificatie (menging en nog niet menging) precies ligt.

Tabel 7 geeft een overzicht van de kentallen in de experimenten met de PE-leiding DN 200, SDR17.

Tabel 7: Karakteristieke kentallen, Reynolds en Richardson, bij de metingen

V [m/s]	Re (lucht/stikstof)*)	Re (waterstof)	Ri
0,1	1.192	169	30.0
0,2	2.385	337	15.0
0,5	5.992	843	6.0
1,0	11.924	1686	3.0
2,0	23.847	3373	1.5

*) Voor deze tabel mag lucht gelijkgesteld worden aan stikstof.

Toelichting:

De letter V (velocity) in de tabel staat voor de spoelsnelheid.

Uit de getallen blijkt dat de spoelsnelheid hoger moet zijn dan 0,176 m/s om turbulent te zijn (Reynolds getal bepalend) en hoger dan 1 à 2 m/s om de turbulente menging



niet te veel te dempen (Richardson getal bepalend) door dichtheidseffecten (immers Ri moet lager zijn dan 2,0).

We gaan er hierbij vanuit dat de stroming van stikstof (of lucht) bepalend is voor de turbulentie (en niet de stroming van waterstof).

5.1.1 **Achtergrondinformatie met betrekking tot het spoelen**

Voor de volledigheid wordt hier vermeld dat er ook in NEN EN 12327:2012 criteria zijn opgenomen voor het spoelen van leidingen (zie bijlage I). In deze bijlage wordt ook ingegaan op de theorie van Kelvin-Helmholz waarbij het getal van Richardson bepalend is.

5.2 **Expert opinion**

In deze paragraaf wordt door technisch specialisten van Kiwa Technology ingegaan op de diverse aspecten met betrekking tot het spoelen van waterstofleidingen. In genoemde paragrafen worden onderstaande vragen beantwoord:

Paragraaf 5.2.1:

- Komt het spoelgedrag voor de verschillende leidingdiameters (DN 32 tot en met DN 300) met elkaar overeen?

Paragraaf 5.2.2

- Moet voor het spoelen van waterstofleidingen een andere werkwijze worden gevolgd dan bij het spoelen van aardgasleidingen?
- Waar liggen potentiële gevaren als er van de procedure wordt afgeweken?
- Waar moeten netbeheerders in Nederland in de praktijk rekening mee houden bij het spoelen van waterstofleidingen?
- Welke aanvullende beheersmaatregelen/technische handelingen moeten er worden getroffen?
 - Zijn er extra spoelpunten nodig?
 - Zijn er extra meetnippels nodig?
 - Is er specifieke apparatuur nodig?
 - Hoe kan worden geborgd dat de benodigde snelheid wordt behaald?
- Wat is het effect op het spoelgedrag bij leidingappendages zoals T-stukken, bochten, diameter verloop bij waterstoftransport?
- Wat wordt het mengingsbeeld als de wandruwheid gaat toenemen zoals bij staal en nodulair gietijzeren leidingen?
- Zijn er alternatieve werkwijzen voorhanden om spoelwerkzaamheden slimmer uit te voeren, maar nog steeds op een veilige manier? Denk aan het creëren van barrières tussen gassen, vacumeren, et cetera.
- Moet de ontwikkeling van een waterstofinfrastructuur veranderen? In welke situatie is het risico verhoogd? Waar zijn er aanvullende beheersmaatregelen nodig?
- Wat gebeurt er met het risico (kans x effect), als bij de ombouw van netten het aardgas rechtstreeks verdrongen gaat worden door waterstof, zonder tussenkomst van stikstof?
- Hoe kan worden geborgd dat de benodigde snelheid wordt behaald?
 - Is sectioneren een mogelijke oplossing?
- Zijn er vuistregels op te stellen?

Paragraaf 5.2.3:

- Wat zijn de consequenties als de spoelsnelheid niet wordt bereikt?

Paragraaf 5.2.4:

- Wat is het risico als er met lucht gespoeld zou worden in plaats van met stikstof?



5.2.1 **Afhankelijkheid spoelgedrag van de diameter**

De theoretische verwachting is dat zolang de stikstofstroom turbulent is ($Re > 2100$) en de stratificatie-eigenschap voldoende klein ($Ri < ca. 2$), het spoelgedrag kwalitatief hetzelfde blijft. De experimenten geven aan dat het spoelgedrag in essentie hetzelfde blijft. De resultaten zijn vermeld in Tabel 1, Tabel 6 en Tabel 11 (dit zijn precies identieke tabellen).

5.2.2 **Werkwijze spoelen met waterstof anders dan met aardgas**

De werkwijze qua spoelsnelheid hoeft niet te worden aangepast. Voor waterstofleidingen wordt spoelen met stikstof aanbevolen. Wat betreft het verwijderen van alle waterstof respectievelijk lucht uit de leiding blijft de aanbeveling om een spoelsnelheid van 1,0 m/s te hanteren. Bij diameters groter dan DN 250 en snelheden $< 1,0$ m/s is er gevaar van stratificatie en dus onvoldoende spoeling. Indien met lucht wordt gespoeld is de hoeveelheid brandbaar mengsel, volgens theoretische verwachting, evenredig met de wortel uit de lengte van de leiding en evenredig met het kwadraat van de diameter. Als vuistregel geldt dat een hoeveelheid brandbaar mengsel van meer dan 0.1 m^3 of meer dan 10% van het leiding volume gevaarlijk is. Dat wil zeggen dat bij ontsteking in de leiding, de afblaaas of de leiding kunnen worden beschadigd.

Ten aanzien van het werken door netbeheerders met waterstof in de praktijk gelden de volgende zaken:

- De kans op ontsteken van het afgeblazen mengsel door een externe ontstekingsbron is bij waterstof groter dan bij aardgas. Zie verder het Kiwa rapport 'Affakkelen en afblazen van waterstof, Onderzoek naar het veilig en doelmatig in- en uit bedrijf stellen van waterstofleidingen, GT-200096'.
- Er zijn geen extra spoelpunten nodig, maar aanbevolen wordt om het spoelen van lange leidingen (> 1 km) zoveel mogelijk te vermijden.
- In principe zijn er geen extra meetnippels nodig.
- Specifieke apparatuur is niet nodig. De voor aardgas gebruikte apparatuur is voldoende. Uiteraard moet een eventuele methaandetector worden vervangen door een waterstofdetector.
- Het borgen dat de benodigde snelheid wordt behaald is niet anders dan bij het spoelen van aardgasleidingen.
- Het effect op het spoelgedrag bij leidingappendages zoals T-stukken, bochten, diameter verloop bij waterstoftransport is niet wezenlijk anders dan bij aardgas. Deze appendages leiden tot extra menging (ten koste van enig drukverlies) en zijn daarom gunstig voor het tegengaan van stratificatie en verbeteren daarom het spoelproces. Uiteraard geldt dit alleen voor korte blinde T-stukken (max. 3D). Als langere blinde leidingen aanwezig zijn, moet ervan worden uitgegaan dat deze grotendeels niet worden gespoeld.
- Net als bij aardgas, is de wandruwheid, die bij staal en nodulair gietijzeren leidingen groter is dan bij kunststof leidingen, van ondergeschikt belang. Theoretisch wordt al bij iets lagere snelheid en iets kortere afstand de omslag naar turbulente stroming bereikt. Dit effect zal in de praktijk niet merkbaar zijn.
- Het is in dit stadium nog onduidelijk waar de specifieke pijnpunten van een waterstofdistributie infrastructuur zitten. Niet uitgesloten kan worden dat bij het ontluchten (*in bedrijf stellen*) het vermijden van zuurstof (lucht) in de leiding van groter belang is, vanwege de risico's voor de aangesloten toestellen (brander en brandstofcellen). Dit verhoogt de noodzaak van zorgvuldig en volledig ontluchten. Dit geldt ook voor de binneninstallatie. Nader onderzoek naar de risico's van lucht in de leiding (voor toestellen) wordt aanbevolen.
 - Het ontluchten van de leiding door deze eerst te spoelen met stikstof beperkt dit risico.



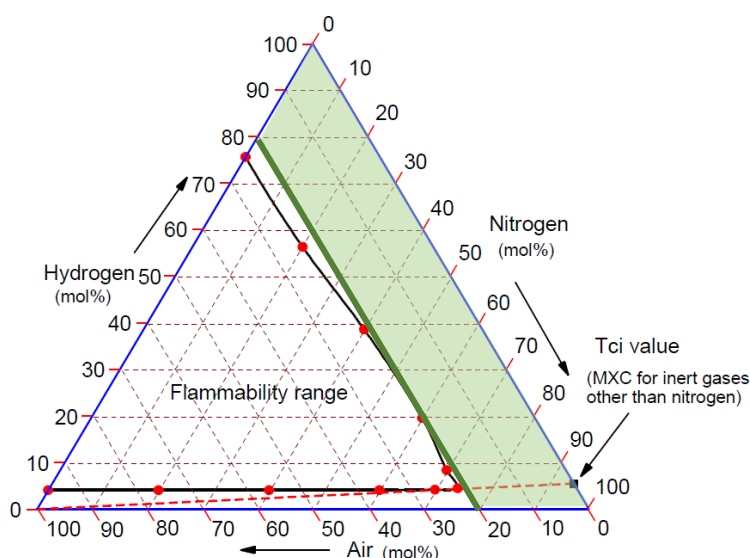
- Bij de ombouw van netten van aardgas naar waterstof is rechtstreeks verdringen van het aardgas door waterstof veiliger dan eerst spoelen met stikstof. Als aardgas rechtstreeks wordt verdreven door waterstof kan er geen brandbaar gasmengsel in de leiding ontstaan. Rechtstreeks verdringen van het aardgas scheelt een handeling met de kans op fouten. In dit geval kan worden afgeakkeld zoals bij aardgas veelal de gevolgde werkwijze is in verband met het beperken van milieuschade.
Opmerking: een toestelfabrikant geeft aan dat aardgas voor een waterstoffoestel niet schadelijk is, maar nader onderzoek wordt aanbevolen om te verifiëren of dit voor alle (relevante) toestellen het geval is.

5.2.3 Consequenties als spoelsnelheid niet wordt bereikt

Als de minimaal benodigde spoelsnelheid, zie Tabel 6, niet wordt bereikt bestaat het risico dat er een waterstof-stikstofmengsel in de leiding achterblijft. Door dichtheidsverschillen en door diffusie zal het achtergebleven waterstof zich vermengen met de stikstof.

Uit Figuur 28 kan worden afgelezen dat stikstof-waterstof-luchtmengsels met minder dan 20% lucht (dus met minder dan 4% zuurstof) niet brandbaar zijn, zie het groene gebied. Dit betekent dat als de concentratie waterstof in stikstof lager is dan 20% is er geen enkel risico is voor het ontstaan van brand of explosie.

De kans dat er meer dan 20% waterstof achterblijft in een met stikstof gespoeld leidinggedeelte wordt nihil geacht. Daarmee zijn de consequenties van het niet (helemaal) bereiken van de spoelsnelheid gering. Temeer omdat uit de praktijkmetingen blijkt dat ook bij lage spoelsnelheden het waterstof (op den duur) volledig wordt verdreven. Uiteraard is hier een ondergrens, maar het moet in de praktijk goed mogelijk zijn boven deze ondergrens te blijven.



Figuur 28: Explosiegrenzen van stikstof-waterstof-luchtmengsels

5.2.4 Mogelijke risico's bij het spoelen van waterstofleidingen met lucht

Het spoelen van waterstofleidingen met lucht heeft in essentie dezelfde soort risico's als het spoelen van aardgasleidingen met lucht. In beide gevallen ontstaat er gedurende beperkte tijd een brandbaar mengsel in een leiding. In de leiding is in beginsel geen ontstekingsbron aanwezig. Bij affakkelen is er het gevaar van vlaminslag,



hetgeen bij leidingen van grotere diameter gevaarlijk is en aanmerkelijke schade kan opleveren. Met waterstof zijn deze risico's groter dan bij aardgas.

Er zijn twee methoden om gasleidingen – en dus ook waterstofleidingen – te spoelen met lucht, deze methoden worden in de volgende paragrafen toegelicht.

5.2.4.1 *Spoelen met lucht door inbrengen gecprimeerde lucht*

Hierbij wordt, nadat de leiding drukloos is gemaakt, bij het intredepunt met behulp van een compressor lucht in de leiding geblazen. Bij het uitredepunt wordt bij aanvang 100% gas afgeblazen, gedurende het spoelen neemt de gasconcentratie af totdat de leiding volledig gasvrij is.

Het uitstromende gas kan worden afgeblazen of afgefakkeld, maar bij het affakkelen van waterstof moet een waterstof-vlamdover worden toegepast omdat er vlaminslag kan optreden op het moment dat een waterstof-luchtmengsel de affakkelinrichting bereikt. Zie voor wat betreft het affakkelen en afblazen van waterstof het Kiwa rapport *Affakkelen en afblazen van waterstof, onderzoek naar het veilig en doelmatig in- en uit bedrijf stellen van waterstofleidingen, GT-200096*.

5.2.4.2 *Spoelen met lucht door air-moven*

Hierbij wordt, nadat de leiding drukloos is gemaakt, bij intredepunt omgevingslucht tot de leiding toegelaten. Bij het uitredepunt wordt met behulp van een venturi het gas uit de leiding gezogen en dit, in de venturi, verdunde gas wordt afgeblazen. De venturi is onderdeel van de afblaasinstallatie.

Bij aardgasleidingen is air-moven een geaccepteerde en veelvuldig toegepaste methode. Bij aardgasleidingen wordt het gas afgeblazen omdat het in de venturi zodanig wordt verdund dat affakkelen niet mogelijk is.



In het Kiwa rapport *Affakkelen en afblazen van waterstof, onderzoek naar het veilig en doelmatig in- en uit bedrijf stellen van waterstofleidingen, GT-200096*, wordt de aanbeveling gedaan om te onderzoeken of air-moven van waterstofleidingen ook veilig kan worden toegepast of zelfs de veiligheid kan verhogen.

Toelichting: indien het waterstof door air-moven zodanig wordt verdund of kan worden verdund dat het af te blazen gas-luchtmengsel onder de LEL is, dan kan deze methode worden toegepast zowel bij het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) alsook bij het ontlichten (*in bedrijf stellen*).



5.2.4.3 *Risico's op het achterblijven van waterstof-luchtmengsels*

Bij het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*) van een gasleiding (waterstofleiding en gasleiding) door spoelen met lucht (air-moven), kan onder meer in de volgende situaties een waterstof-luchtmengsel in het ontgaste distributienet achterblijven:

- Het ontgassen van een leiding heeft plaatsgevonden met een te lage spoelsnelheid waardoor niet al het waterstof is verdreven. De kans hierop wordt, op basis van de resultaten van het onderzoek zoals verwoord in hoofdstuk 4, gering geacht.
- De hoofdleiding is gespoeld maar niet de daarop aangesloten aansluitleiding(en).
- Het gasdistributienet is gespoeld, maar niet de daarop aangesloten 'dode' aftakleidingen. Dit kan zijn veroorzaakt doordat het belang of het bestaan van de aftakleidingen niet is onderkend.

Het achterblijven van gas (waterstof en aardgas) in met lucht gespoelde leidingen kan bij werkzaamheden aan die leiding tot gevaarlijke situaties leiden. Hierop moet men bedacht zijn. Bij aardgasleidingen heeft dit een enkele keer tot een (ernstig) incident geleid, om deze reden en omdat de gevolgen bij waterstof mogelijk ernstiger kunnen



zijn wordt vooralsnog geadviseerd waterstofleidingen te spoelen met stikstof (bij het spoelen met stikstof kan geen explosief waterstof-stikstofmengsel in de leiding ontstaan). Mocht het spoelen met stikstof echter (te) complex zijn kan met lucht worden gespoeld. In hoofdstuk 6 is een werkwijze opgenomen met betrekking tot onbedoeld achtergebleven gas na ontgassen¹.

Let op: bij handelingen waarbij het waterstof-stikstofmengsel zich kan vermengen met lucht, kan wel een brandbaar mengsel ontstaan.

5.2.5 Alternatieve methoden of alternatieve werkwijzen voor het spoelen van leidingen

Nagegaan is of alternatieve methoden of werkwijzen zijn voor het spoelen van leidingen. Hier worden enkele mogelijke alternatieven benoemd en gewogen. Vanuit theoretisch oogpunt bestaan er mogelijkheden om het ontstaan van een brandbaar mengsel te voorkomen. Bijvoorbeeld het gebruiken van een foam pig (schuimplug) die de waterstof scheidt van de lucht, vacuümzuigen, of het toepassen van een buffergas met een inert gas (bijvoorbeeld stikstof). De laatst genoemde methode komt in essentie neer op het gebruik van stikstof in plaats van lucht. Dit wordt dus al toegepast en in industriële omgeving ook aanbevolen. Van de andere twee genoemde methoden, foam pig en vacuümzuigen, zijn geen routinematige toepassingen bekend. Aangezien ze meer gecompliceerd zijn dan het eenvoudige spoelen en dus meer handelingen vergen die fout kunnen gaan en daarmee risico's creëren, zijn deze methoden, naar de mening van de auteurs, niet aanbevelingswaardig.

¹ Zie voor het spoelen van aardgasleidingen het Kiwa-rapport *Spoelen van aardgasleidingen, benodigde spoelsnelheid bij het ontluchten en ontgassen, benodigde apparatuur om de benodigde spoelsnelheid te realiseren en vast te stellen, GT-200075*.



6 Achtergebleven waterstof

In dit hoofdstuk wordt voor het ontgassen met lucht ingegaan op:

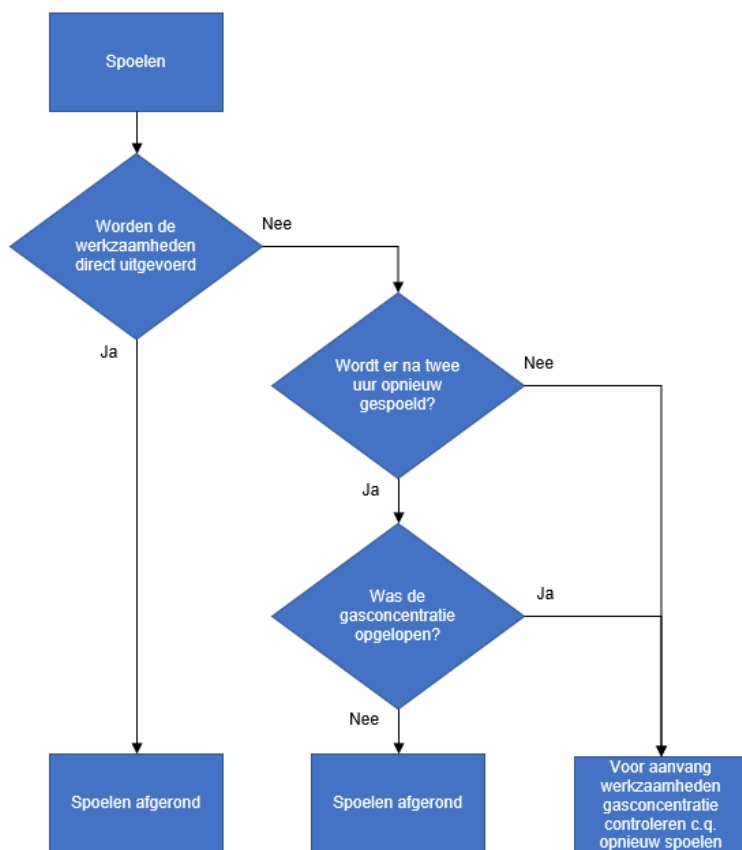
- De invloed van de tijd op de verdeling van een eventueel in het gasdistributienet achtergebleven gas of waterstof-luchtmengsel.
- De eventuele invloed van achtergebleven waterstof of waterstof-stikstofmengsel op de werkmethode.

6.1 Samenvatting werkwijze bij achtergebleven gas na ontgassen

Uitvoerenden moeten erop bedacht te zijn dat er na het ontgassen met lucht als spoelmedium waterstof in de leiding kan zijn achtergebleven.

Het is om deze reden aan te bevelen om – als de werkzaamheden niet direct plaatsvinden – circa twee uur na het (stoppen van) het ontgassen (air-moven), nogmaals de leiding te spoelen. Als hierbij bij aanvang geen hogere gasconcentratie aanwezig is dan na afronding van de eerste keer spoelen, dan is er geen gas in aftakkingen van de leiding achter gebleven; de leiding is gasloos.

Een andere mogelijkheid is om – waar mogelijk – direct voor aanvang van werkzaamheden aan ontgaste leidingen, de gasconcentratie ter plaatse (opnieuw) vast te stellen en indien een concentratie van > 10% LEL wordt aangetroffen het spoelen opnieuw op te starten. Zie Figuur 29 ter toelichting.



Figuur 29: Beslissingsschema spoelen



Voor situaties waarbij het achtergebleven gas een volume heeft van **minder dan 5%** van het totale volume van die leiding, betekent dit in de praktijk het volgende:

- Bij aansluitleidingen die zijn aangesloten **boven** op de hoofdleiding (met opzetstuk) is er geen risico op het ontstaan van een explosief mengsel.
- Bij aansluitleidingen met **zij**-aansluitingen en aftak(hoofd)leidingen moet, afhankelijk van de lengte van de aftakking, bij benadering gedurende twee uur rekening worden gehouden met een explosief mengsel.

Opmerkingen:

- Als het onbedoeld in de leiding achtergebleven gas een volume heeft van **4% of meer** van het totale volume van die leiding, dan zal na lange tijd, als de diffusie voltooid is, in de gehele leiding een explosief waterstof-stikstofmengsel aanwezig zijn.
- Voor situaties waarbij het achtergebleven gas een volume heeft van **minder dan 4%** van het totale volume van die leiding, betekent dit in de praktijk het volgende:
 - Bij aansluitleidingen die zijn aangesloten boven op de hoofdleiding (met opzetstuk) treedt alleen verspreiding van achtergebleven gas op door diffusie.
Hierbij is er geen risico op het ontstaan van een explosief mengsel.
 - Bij aansluitleidingen met zij-aansluitingen en aftak(hoofd)leidingen moet met name rekening worden gehouden met verspreiding van achtergebleven gas door dichtheidsverschillen.
Hierbij moet bij benadering gedurende twee uur rekening worden gehouden met een explosief mengsel.

6.2 Oorzaak achterblijven waterstof

Gas of een waterstof-stikstofmengsel kan onder meer in de volgende situaties in het ontgaste distributienet achterblijven:

- Het ontgassen van een leiding heeft plaatsgevonden met een te lage spoelsnelheid waardoor niet al het gas is verdreven.
De kans hierop wordt, op basis van de resultaten van het onderzoek zoals verwoord in hoofdstuk 4, gering geacht.
- De hoofdleiding is gespoeld maar niet de daarop aangesloten aansluitleiding(en).
- Het gasdistributienet is gespoeld, maar niet de daarop aangesloten 'dode' aftakleidingen. Dit kan zijn veroorzaakt doordat het belang of het bestaan van de aftakleidingen niet is onderkend.

6.3 Verdeling onbedoeld achtergebleven waterstof-stikstofmengsel na ontgassen

6.3.1 Door diffusie

Indien in een deel van de ontgaste leiding gas is achtergebleven, zal dat langzaam diffunderen naar de rest van de leiding. In eerste instantie kan het ook nog mee stromen met luchtwervels in de leiding, waarvan de lucht nog niet tot rust is gekomen en waarin nog geen temperatuurvereffening heeft plaatsgevonden. Deze fase duurt waarschijnlijk relatief kort (minuten). Op langere termijn krijgt de diffusie de overhand (eventuele hoogteverschillen hebben hierbij geen significante invloed). De diffusiecoëfficiënt van waterstof in lucht bedraagt $0.76 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (bij $20 \text{ }^\circ\text{C}$). Een bultvormige ('gaussische') verdeling van verhoogde gasconcentratie zal geleidelijk breder en minder hoog worden. Deze verbreding verloopt steeds langzamer: voor iedere verdubbeling van de lengte is 4x zoveel tijd nodig.



Een rekenvoorbeeld:

Als oorspronkelijk de gasconcentratie een hele smalle piek was, zal deze piek na vijf minuten ongeveer 30 cm breed zijn. Na ruim een uur is de breedte 120 cm en na één dag ongeveer 6 m. Voordat het gas zich heeft verspreid over een lengte van 30 meter vanaf de 'bron' zijn 25 dagen voorbij gegaan¹. Ditzelfde geldt voor de flank van een stapvorming concentratie verdeling. Voor lucht in gas gelden ongeveer dezelfde getallen. De conclusie is dan ook dat als er in een gedeelte van een leiding om wat voor reden dan ook, een pluk gas van meerdere meters lengte is achtergebleven, deze pluk maar heel langzaam door diffusie wordt verdund.

Als het in de leiding achtergebleven gas een volume heeft van 4% of meer van het totale volume van die leiding, dan zal na lange tijd, als de diffusie voltooid is, in de gehele leiding een explosief waterstof-stikstofmengsel aanwezig zijn.

Eerste praktijkvoorbeeld:

Gegeven:

- Hoofdleiding:
 - PVC 110
 - Lengte 100 m
 - Gasconcentratie in lucht 0%
- Op deze hoofdleiding zijn 10 aansluitleidingen aangesloten:
 - PE 32
 - Lengte 10 m
 - Gasconcentratie 100%

Als in dit geval de hoofdleiding volledig wordt ontgast maar niet de daarop aangesloten aansluitleidingen dan ontstaat er, nadat de diffusie is voltooid, een waterstof-stikstofmengsel met 6,4% waterstof in lucht. In de tussentijd kan er rondom de zadels in de hoofdleiding hogere concentraties heersen.

Tweede praktijkvoorbeeld:

Gegeven:

- Van dezelfde hoofdleiding zijn de aansluitleidingen wel ontgast maar de (niet op tekening vermelde) 'dode' aftakleiding DN 110 met een lengte van 5 m is niet ontgast.

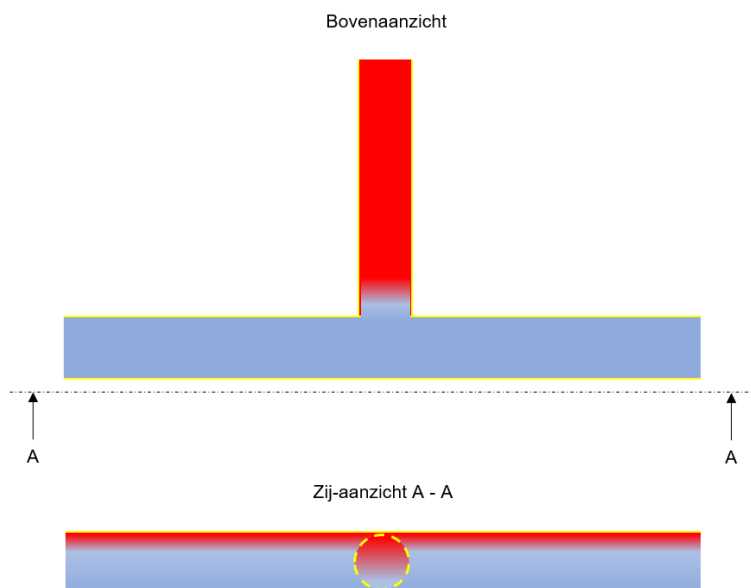
In dit geval ontstaat er, nadat de diffusie voltooid is, een waterstof-stikstofmengsel met 5,3% waterstof in lucht.

De praktijkvoorbeelden tonen (bij aardgasleidingen) aan dat er in de gegeven omstandigheden een explosief gas-luchtmengsel in de gehele leiding kan ontstaan nadat de diffusie geheel is voltooid. Maar nabij de niet-ontgaste leidingdelen kan al eerder een explosief mengsel ontstaan.

6.3.2 Door dichtheidsverschillen

Ook kan het onbedoeld achtergebleven gas door dichtheidsverschillen zich door het ontgaste deel van de leidingsectie gaan verspreiden. Dit zal voornamelijk plaatsvinden in situaties waarbij het niet-ontgaste leidingdeel op gelijke hoogte (of lager) ligt dan het ontgaste leidingdeel. Zie Figuur 30.

¹ De verspreiding gaat evenredig met de wortel uit de tijd. Bij vervienvoudiging van de afstand is dus vijftientig keer zoveel tijd nodig.



Figuur 30: Verspreiding van gas uit het niet-ontgaste leidingdeel naar het ontgaste leidingdeel door dichtheidsverschillen

Bij een aftakking aan de bovenzijde is eventueel achtergebleven gas opgesloten in een min of meer stabiele gasbel. Door diffusie zal het gas geleidelijk ontwijken. De berekening van 7.3.1 is dan toepasbaar. Echter, in geval van een horizontale aftakking is er na het spoelen van de hoofdleiding geen stabiele gasbel in de aftakking. Tijdens het spoelen zal weliswaar het begin van de aftakking schoongespoeld worden, maar verderop in de aftakking zal het gas niet of maar langzaam in beweging komen. Dit proces zal zich voortzetten na het spoelen, in iets langzamere vorm, en geleidelijk stroomt het gas (convectief vanwege het dichtheidsverschil) via de bovenzijde van de aftakking de hoofdleiding in. Hierbij moet worden gerekend op typische stroomsnelheden van 0,1 à 0,2 m/s. De gaslaag bovenin de buis zal zich tegelijkertijd door diffusie mengen met de lucht en verdund worden. Dit betreft diffusie over de hoogte (diameter) van de leiding. Over dit soort afstanden (10 – 20 cm) duurt het 5 tot 20 minuten om een homogene menging te krijgen. Het op deze manier gevormd gasluchtmengsel diffundeert vervolgens verder in de hoofdleiding, zoals beschreven in 6.3.1.

In deze situatie is het tijdsverloop tussen het ontstaan van een explosief mengsel op een locatie in de hoofdleiding en de tijdsduur dat het mengsel aanwezig is, sterk afhankelijk van de lengte en volume van de aftakking. Het gas uit een aftakking met een lengte van 100 m, en van vergelijkbare diameter als de hoofdleiding, zal zich verspreiden met een vertraging van 10 minuten tot op enige afstand (circa 50 m ter weerszijde) van het aftakpunt en naar schatting gedurende één à twee uur gevaarlijk blijven.

6.4 Werkwijze bij onbedoeld achtergebleven waterstof of waterstof-stikstofmengsel na ontgassen

Uitvoerenden moeten erop bedacht te zijn dat er na het ontgassen gas in de leiding kan zijn achtergebleven, mogelijk doordat aansluitleidingen en/of aftakleiding(en) niet zijn ontgast. Het is om deze reden aan te bevelen om – als de werkzaamheden niet direct plaatsvinden – circa twee uur na het (stoppen van) het spoelen, nogmaals de leiding te spoelen. Als hierbij bij aanvang geen hogere gasconcentratie aanwezig is dan na afronding van de eerste keer spoelen dan is er geen gas in aftakkingen van de leiding achter gebleven; de leiding is gasloos. Een andere mogelijkheid is om – waar mogelijk – direct voor aanvang van werkzaamheden aan ontgaste leidingen, de



gasconcentratie ter plaatse (opnieuw) vast te stellen en indien een concentratie van > 10% LEL wordt aangetroffen het spoelen te continueren of opnieuw op te starten.

Opmerkingen:

- Als het onbedoeld in de leiding achtergebleven gas een volume heeft van **4% of meer** van het totale volume van die leiding, dan zal na lange tijd, als de diffusie voltooid is, in de gehele leiding een explosief waterstof-stikstofmengsel aanwezig zijn.
- Voor situaties waarbij het achtergebleven gas een volume heeft van **minder dan 4%** van het totale volume van die leiding, betekent dit in de praktijk het volgende:
 - Bij aansluitleidingen die zijn aangesloten boven op de hoofdleiding (met opzetstuk) treedt alleen verspreiding van achtergebleven gas op door diffusie.
Hierbij is er geen risico op het ontstaan van een explosief mengsel.
 - Bij aansluitleidingen met zij-aansluitingen en aftak(hoofd)leidingen moet met name rekening worden gehouden met verspreiding van achtergebleven gas door dichtheidsverschillen.
Hierbij moet bij benadering gedurende twee uur rekening worden gehouden met een explosief mengsel.

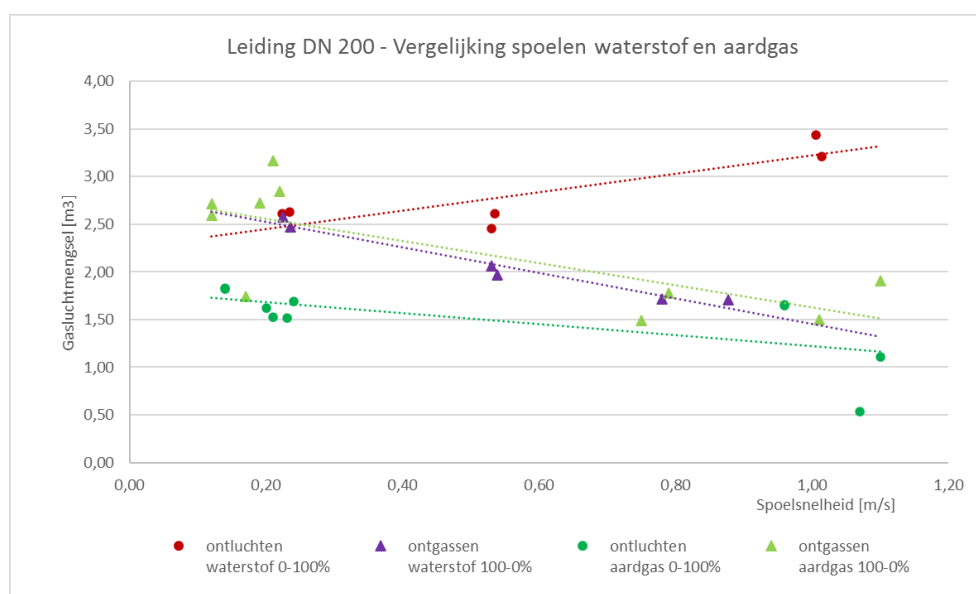


7 Spoelen waterstofleidingen versus spoelen aardgasleidingen

In dit hoofdstuk zijn de bevindingen met het spoelen van de testleiding DN 200 met waterstof, vergeleken met de resultaten van vergelijkbare tests met aardgas op diezelfde testleiding. Die bevindingen staan in het rapport:

Kiwa - Rapport Spoelen van aardgasleidingen - Netbeheer Nederland - GT200075 (uitgebracht september 2020).

Ter vergelijking zijn de resultaten van de hoeveelheden waterstof-stikstofmengsels en gas-luchtmengsels die zijn ontstaan bij de verschillende testen, samengebracht in Figuur 31.



Figuur 31: Grafische weergave spoelen van DN 200 leiding met waterstof en met aardgas

Tabel 8 Volume gas-luchtmengsel voor aardgas en waterstof-stikstofmengsel voor waterstof bij verschillende bedrijfssituaties volgens trendlijnen

Bedrijfssituatie	Formule trendlijn	Snelheid [m/s]	Gas-lucht mengsel [m ³]
Ontluchten aardgas	$y = -0,5794x + 1,799$	0,2	1,68
		1,0	1,22
Ontgassen aardgas	$y = -1,1591x + 2,788$	0,2	2,56
		1,0	1,63
Ontluchten waterstof	$y = 0,9649x + 2,2567$	0,2	2,45
		1,0	3,22
Ontgassen waterstof	$y = -1,3405x + 2,7961$	0,2	2,53
		1,0	1,46



Met behulp van de resultaten uit Tabel 8 kunnen we de verhoudingsgetallen van de volumes van de gas-luchtmengsels cq. waterstof-stikstofmengsels voor de verschillende bedrijfssituaties bepalen. Zie de resultaten daarvan in Tabel 9 en Tabel 10.

Tabel 9 Verhoudingsgetallen volumes gas-luchtmengsels cq. waterstof-stikstofmengsels van de verschillende bedrijfssituaties bij verschillende snelheden.

Snelheid [m/s]	Aardgas: ontgassen/ontluchten	Waterstof: ontgassen/ontluchten	Ontluchten: waterstof/aardgas	Ontgassen: waterstof/aardgas
0,2	1,5	1,0	1,5	1,0
1,0	1,3	0,5	2,6	0,9

Tabel 10 Spoeltijden waterstof en aardgas bij verschillende snelheden

Snelheid [m/s]	Aardgas: ontgassen [min]	Waterstof: ontgassen [min]	Aardgas: ontluchten [min]	Waterstof: ontluchten [min]
0,2	25,5	25,4	22,5	25,1
1,0	4,3	4,3	4,1	5,5

We kunnen bij deze figuur en de tabellen het volgende opmerken:

- Bij ontluchten van aardgas wordt ook, net als bij ontgassen, het volume gas-luchtmengsel kleiner naarmate de snelheid hoger is. Bij ontluchten van waterstof blijkt daarentegen dat de hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel groter wordt naarmate de spoelsnelheid hoger is. Ook ligt over het hele geteste bereik de hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel bij ontluchten van waterstof op een hoger niveau dan bij aardgas.
- De duur dat een gas-luchtmengsel cq. waterstof-stikstofmengsel wordt afgefakkeld (afgeblazen) is uiteraard significant langer naarmate de spoelsnelheid lager is.
- Bij aardgas is de hoeveelheid gas-luchtmengsel die ontstaat bij snelheden tussen 0,2 en 1,0 m/s, bij ontgassen grofweg 1,5 maal groter dan bij ontluchten. Bij waterstof ontstaat bij 1,0 m/s echter tweemaal zoveel waterstof-stikstofmengsel in de leiding als bij ontgassen.
- Bij lage spoelsnelheid (0,2 m/s) duren ontluchten en ontgassen van de testleiding met waterstof ongeveer even lang. Naarmate de spoelsnelheid hoger is geldt dat het ontluchten langer duurt dan het ontgassen.
- Het ontgassen van de testleiding duurt voor aardgas en waterstof ongeveer even lang: bij 1,0 m/s is dit ruim 4 minuten, en bij 0,2 m/s is dit ruim 25 minuten.
- Het ontluchten van de testleiding duurt bij waterstof ruim 25 minuten. Dat is 2,5 minuten langer dan nodig is voor het ontluchten van een leiding gevuld met aardgas. Ontluchten van een waterstofleiding met 1,0 m/s duurt 5,5 minuten, dat duurt ca. 1,5 minuut langer dan bij aardgas.

De algemene conclusie is dat er bij ontgassen nagenoeg geen verschil is te zien tussen waterstof en aardgas, en dat bij ontluchten bij waterstof een groter volume waterstof-stikstofmengsel ontstaat dan bij aardgas, naarmate de snelheid hoger wordt. Dit houdt in dat het ontluchten van waterstof een paar minuten langer duurt dan bij aardgas.



8 Conclusies

De meetresultaten en berekeningen leiden tot de volgende conclusies ten aanzien van de spoelsnelheid bij ontluchten en ontgassen van een waterstofleiding:

- Een **spoelsnelheid van minimaal 0,4 m/s** is benodigd om er zeker van te zijn dat een waterstofleiding volledig wordt gespoeld.
- Uit veiligheidsoverwegingen (hoeveelheid waterstof-stikstofmengsel en duur dat er een waterstof-stikstofmengsel uitstroomt) en praktische overwegingen (duur spoelen) wordt een **spoelsnelheid van 1,0 m/s geadviseerd**.
Daarmee kan voor het spoelen van waterstofleidingen dezelfde richtlijn worden aangehouden als voor het spoelen van aardgasleidingen.

Opmerkingen:

- Deze benodigde spoelsnelheid van minimaal 0,4 m/s geldt voor leidingen met een diameter kleiner of gelijk aan DN 200. Voor leidingen met een grotere diameter dan DN 200 moet de spoelsnelheid evenredig met de diameter groter zijn, zie Tabel 11. Genoemde snelheid geldt voor alle leidingmaterialen.
Toelichting: bij een lagere spoelsnelheid treedt onvoldoende turbulentie op en kan stikstof – bij in bedrijf stellen – en waterstof – bij uit bedrijf stellen – in de leiding achterblijven.
- Ten aanzien van de geadviseerde spoelsnelheid: bij het spoelen ontstaat enige vermenging van stikstof met waterstof in de leiding. Bij het afblazen van waterstof en waterstof-stikstofmengsel wordt dit vermengd met de omgevingslucht en zo vormt zich een brandbaar mengsel. De periode dat een brandbaar mengsel aanwezig is, wordt beperkt door een wat hogere spoelsnelheid te kiezen dan minimaal benodigd.
Als later blijkt dat in bepaalde omstandigheden bij in bedrijf stellen lucht rechtstreeks kan worden verdreven door waterstof en bij buiten bedrijf stellen waterstof rechtstreeks kan worden verdreven door lucht neemt de hoeveelheid waterstof-luchtmengsel toe, namelijk met het waterstof-luchtmengsel dat in de leiding ontstaat door vermenging tijdens het spoelen.
- De in Tabel 11 genoemde spoelsnelheid geldt zowel voor het ontluchten (*in bedrijf stellen*) als ook het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*).
- Daar waar sprake is van verschillende leidingdiameters in het te spoelen tracé moet de benodigde spoelsnelheid van de grootste leidingdiameter worden aangehouden.

Overige opmerkingen:

- De minimaal benodigde spoelsnelheid is significant lager dan op basis van eerdere berekeningen op basis van het getal van Richardson werd verwacht (zie bijlage I, Figuur 33).
- Evenals bij spoelen van aardgas heeft de in de testleiding opgenomen 'brugleiding' geen invloed op de benodigde spoelsnelheid.



Tabel 11: Benodigde spoelsnelheid per leidingdiameter en benodigd debiet voor het ontluchten (*in bedrijf stellen*) en het ontgassen (*buiten bedrijf stellen*)

Leidingdiameter	Minimaal benodigde spoelsnelheid [m/s]	Benodigd debiet bij de benodigde spoelsnelheid [m ³ _n /h]	Benodigd debiet bij de geadviseerde spoelsnelheid van 1,0 m/s [m ³ _n /h]
DN 32	0,4	2	3
DN 50	0,4	3	8
DN 80	0,4	8	19
DN 100	0,4	12	29
DN 150	0,4	26	64
DN 200	0,4	46	113
DN 250	0,5	89	177
DN 300	0,6	153	255
DN 400	0,8	362	452

Opmerkingen bij Tabel 11:

- De minimaal benodigde spoelsnelheid geldt voor het verdrijven van lucht door stikstof, voor het verdrijven van stikstof door waterstof en eveneens voor het verdrijven van waterstof door stikstof.
- Bij het in bedrijf stellen wordt eerst de lucht uit de leiding verdreven door stikstof en vervolgens wordt de stikstof verdreven door waterstof; dit wordt kortweg omschreven als ontluchten.
- Bij het (tijdelijk) buiten bedrijf stellen wordt het waterstof door stikstof uit de leiding verdreven; dit wordt kortweg omschreven als ontgassen.
- Deze benodigde spoelsnelheid van minimaal 0,4 m/s geldt voor leidingen met een diameter kleiner of gelijk aan DN 200. Voor leidingen met een grotere diameter moet de spoelsnelheid evenredig met de diameter groter zijn¹.
- Voor het benodigde debiet is er gerekend met de nominale diameter, dus voor DN 200 is met een binnendiameter gerekend van 200 mm. Voor bijvoorbeeld een PE-leiding DN 200 (inwendige diameter 177 mm) is het benodigde debiet kleiner (36 m³_n/h), voor een stalen leiding DN 200 (inwendige diameter 210 mm) wat groter (50 m³_n/h).
- Daar waar sprake is van verschillende leidingdiameters in het te spoelen tracé moet de benodigde spoelsnelheid van de grootste leidingdiameter worden aangehouden.

Overige conclusies zijn:

- Afgezien van de (iets) hogere minimaal benodigde spoelsnelheid komt het spoelen van waterstofleidingen nagenoeg overeen met het spoelen van aardgasleidingen.
- Niet kan worden uitgesloten dat het vermijden van lucht in de leiding bij ontluchten (*in bedrijf stellen*) van waterstofleidingen van groter belang is dan dat dit het geval is bij aardgasleidingen, vanwege de mogelijke risico's voor

¹ Dit volgt uit: $Ri = g/\rho * \Delta\rho * D / \Delta v^2$. Bij gelijkblijvende Ri moet de wortel uit de spoelsnelheid Δv evenredig toenemen met de diameter van de leiding D, zie bijlage I.



de aangesloten toestellen (brander en brandstofcellen) en binnenleidingen. Dit verhoogt de noodzaak van zorgvuldig en volledig spoelen.

- Het ontluichten van de leiding door deze eerst te spoelen met stikstof beperkt dit risico. Het ontluichten met stikstof als buffergas verdient om deze reden vooralsnog de voorkeur. Pas als onomstotelijk is vastgesteld dat waterstoftoestellen geen risico vormen voor een beperkte hoeveelheid lucht in het waterstof kan bij het ontluichten (in bedrijf stellen) de lucht direct met waterstof worden verdreven. Heeft dan zelfs een lichte voorkeur, immers elke handeling geeft een kans op het maken van fouten.
- Bij de ombouw van netten van aardgas naar waterstof is rechtstreeks verdringen van het aardgas door waterstof veiliger dan eerst spoelen met stikstof.

Toelichting:

- Als aardgas rechtstreeks wordt verdreven door waterstof kan er geen brandbaar gasmengsel in de leiding ontstaan, geen kans op vlaminslag.
- Stikstof als buffergas toepassen heeft geen toegevoegde waarde in dit geval. Het heeft dan zelfs een (beperkt) nadeel, immers elke handeling geeft een kans op het maken van fouten.
- Het achterblijven van gas (waterstof en aardgas) in (met lucht) gespoelde leidingen kan bij werkzaamheden aan die leiding tot gevaarlijke situaties leiden. Hierop moet men bedacht zijn. Bij aardgasleidingen heeft dit een enkele keer tot een (ernstig) incident geleid, om deze reden en omdat de gevolgen bij waterstof mogelijk ernstiger kunnen zijn wordt vooralsnog geadviseerd waterstofleidingen te spoelen met stikstof (bij het spoelen met stikstof kan geen explosief waterstof-stikstofmengsel in de leiding ontstaan. Let op: bij handelingen waarbij het waterstof-stikstofmengsel zich kan vermengen met lucht, kan wel een brandbaar mengsel ontstaan).



9 Aanbevelingen

Op basis van de uitkomsten van dit onderzoek het volgende:

- De Normcommissie Gasdistributieleidingen wordt geadviseerd om in nog nader op te stellen normen voor toepassing van waterstof in gasdistributieleidingen (vergelijkbaar of aansluitend op de norm NEN 7244-7) voor waterstof dezelfde spoelsnelheid aan te houden als voor aardgas, te weten 1,0 m/s.
- De Regionale Netbeheerders wordt geadviseerd om bij het spoelen van waterstofdistributieleidingen, ontluchten (*in bedrijf stellen*) en het ontgassen (*tijdelijk buiten bedrijf stellen*), een spoelsnelheid van 1,0 m/s aan te houden (gelijk aan de spoelsnelheid bij aardgasdistributieleidingen).

Verder wordt de Regionale Netbeheerders het volgende geadviseerd:

- Nader onderzoek te doen naar de risico's (voor toestellen) van (een beperkte hoeveelheid) lucht die na het ontluchten in de waterstofleiding is achtergebleven.
- Nader onderzoek te doen naar de risico's voor waterstoftoestellen van (een beperkte hoeveelheid) in het net achtergebleven aardgas na het ombouwen van een aardgasnet naar een waterstofnet.



I Achtergrondinformatie met betrekking tot het spoelen

De in deze bijlage opgenomen informatie is afkomstig uit de memo *Ontgassen m.b.v. Air Mover*, d.d. 3 oktober 2016 van Kiwa, Jan Stappenbelt, aan Enexis t.a.v. Wim de Rooij.

De minimaal benodigde spoelsnelheid volgens de theorie van Kelvin-Helmholz waarbij het getal van Richardson bepalend is, is weergegeven in Figuur 32. In Figuur 33 is in één grafiek de minimaal benodigde spoelsnelheid volgens EN12327 en volgens het Richardson criterium voor aardgas weergegeven.

Volgens de beschouwingen van Kelvin en Helmholtz kan er menging optreden als de verschillen in impuls tussen twee over elkaar schuivende gas- (of vloeistof) lang en voldoende groot is om het verschil in potentiële energie (ten gevolge van dichtheidsverschil in het zwaartekrachtsveld) te overbruggen. De bepalende dimensieloze parameter is het zogenoemde getal van Richardson (https://en.wikipedia.org/wiki/Richardson_number).

Dit is gedefinieerd als:

$$Ri = \frac{g \partial \rho / \partial z}{\rho (\partial u / \partial z)^2}$$

Waarbij:

- g versnelling van de zwaartekracht
- ρ gemiddelde dichtheid van de gassen
- $d\rho/dz$ dichtheid gradiënt van het mengsel langs de richting van de zwaartekracht
- du/dz snelheid gradiënt van de in de stroming langs de richting van de zwaartekracht

Als Ri groot ($\gg 1$) is overheersen de krachten voor stratificatie. Als Richardson klein is ($\ll 1$) overheersen de krachten voor menging.

De 'discrete' versie van bovenstaande formule is:

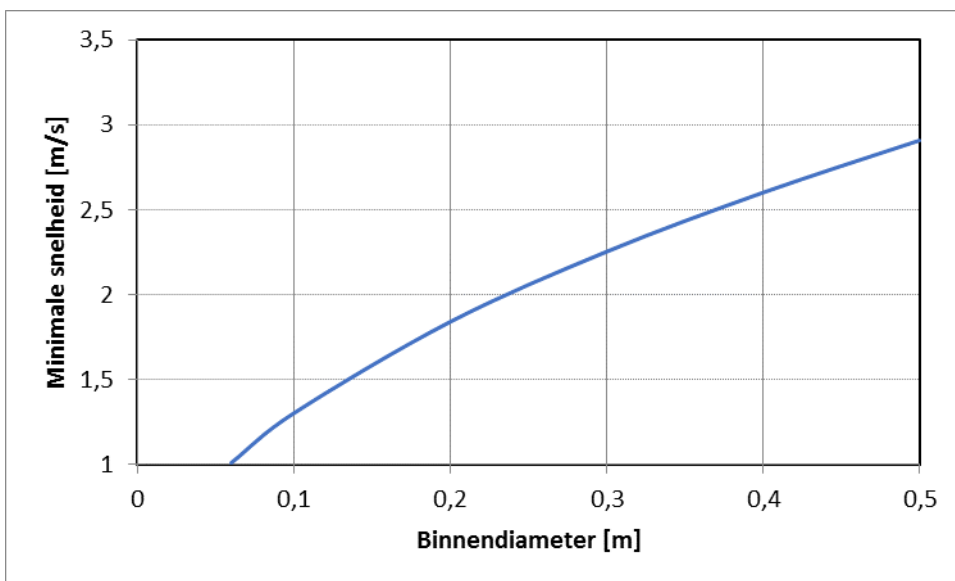
$$Ri = \frac{g \Delta \rho D}{\rho \Delta v^2}$$

Waarbij:

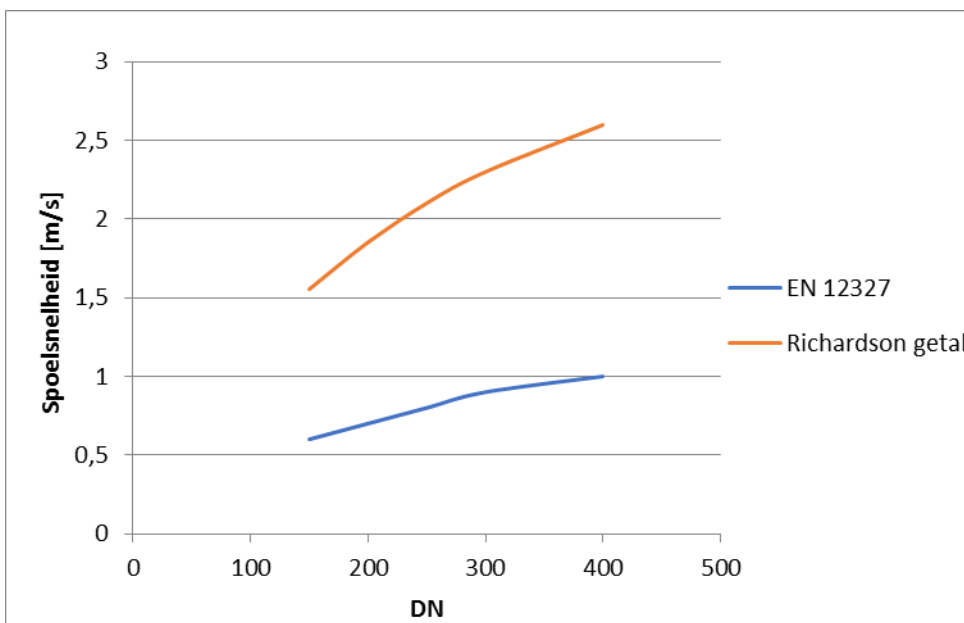
- g versnelling van de zwaartekracht
- ρ gemiddelde dichtheid van de gassen
- D de binnendiameter van de leiding
- $\Delta \rho$ dichtheidsverschil tussen de twee gassen
- Δv snelheidsverschil tussen de twee gasstromen

In dit opzicht is het getal van Richardson qua idee vergelijkbaar met het getal van Reynolds. Echter, de overgang tussen gestratificeerde stroming en gemengde stroming is niet zo scherp en duidelijk als het verschil tussen turbulente en laminaire stroming.

In het overgangsgebied vormen zich golven (oppervlaktegolven), ten gevolge van de zogenoemde Kelvin-Helmholz instabiliteit. Bij nog verder opvoeren van het Richardson-getal (in onze situatie bijvoorbeeld door verhoging van de spoelsnelheid of door verkleining van de buisdiameter) 'breken' de golven uiteindelijk en treedt convectieve menging op. In onderstaande grafiek, Figuur 32, is de grenswaarde op $Ri = 0.25$ gesteld (dit is een standaard grenswaarde gebruikt in de meteorologie, zie bijvoorbeeld http://glossary.ametsoc.org/wiki/Critical_richardson_number).



Figuur 32: Minimumsnelheid voor menging als functie van leidingdiameter volgens het criterium van Richardson ($Ri_{crit} = 0.25$, $\rho_{lucht} = 1.29$, $\rho_{gas} = 0.833 \text{ kg/m}^3$ (aardgas), $g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

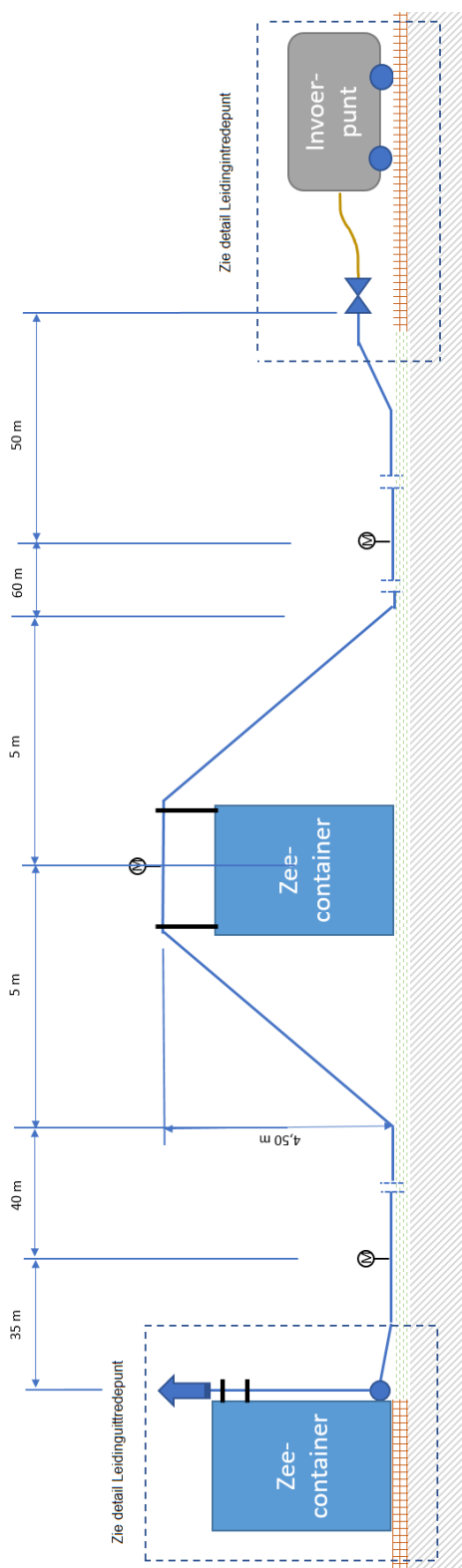


Figuur 33: Spoelsnelheid volgens EN 12327 voor aardgas en volgens Richardson (volgens de theorie van Kelvin-Helmholz)



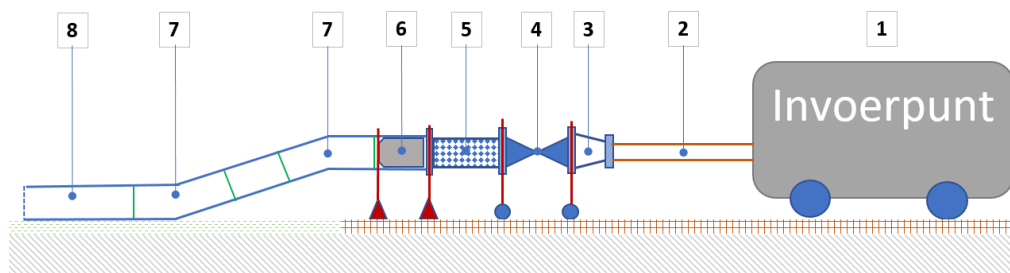
II Detailtekeningen van de testleiding

Overzichtstekening



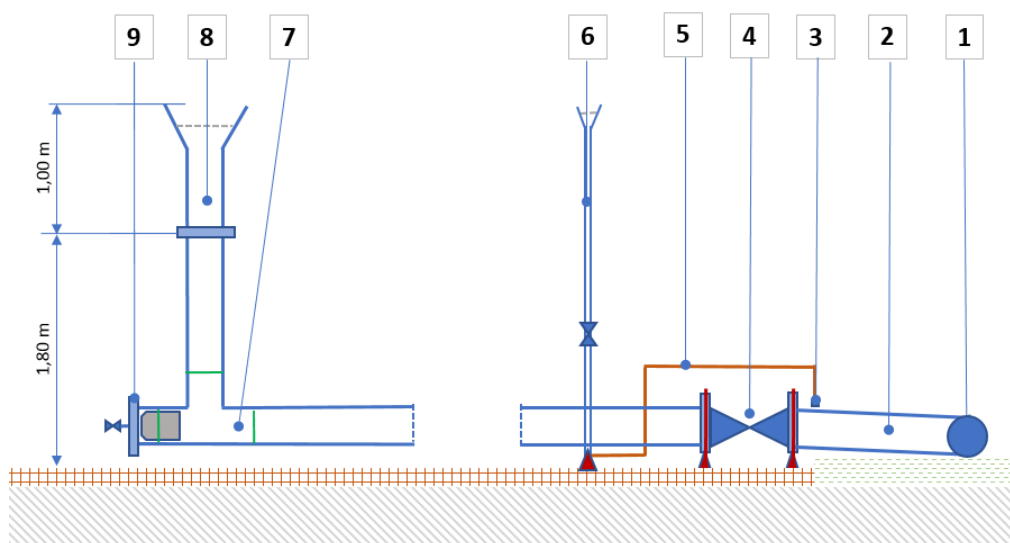


Detail leidingintredepunt



- 1 Mobiel districstation
- 2 Flexibele aansluitslang
- 3 Verloop 4 inch - 8 inch
- 4 Schuifafsluiter DN 200
- 5 Stromingsrichter DN 200
- 6 Foam Pig
- 7 Bocht 22 gr - R 3,5 D
- 8 PE 100 - DN 200 - SDR 17,6

Detail leidinguitredepunt



- 1 Bocht 200 - 90 gr - R 3,5 D
- 2 PE 100 - DN 200 - SDR 17,6
- 3 Zadel GF 200 t.b.v. opzetstuk voor blaas
- 4 Schuifafsluiter DN 200
- 5 Afblaasslang
- 6 Afblaas (klein)
- 7 PE T-stuk 200
- 8 Stalen afblaasdeel DN 200
- 9 Blindflens met 2" kogelkraan

Naast de testleiding van DN 200 die op deze tekening staat, is een testleiding DN 100 aangelegd, met hetzelfde leidingverloop.



III Bevindingen uit AGA rapport spoelen

In het rapport Purging principles and practice (2001) van de American Gas Association is o.a. de volgende grafiek opgenomen:

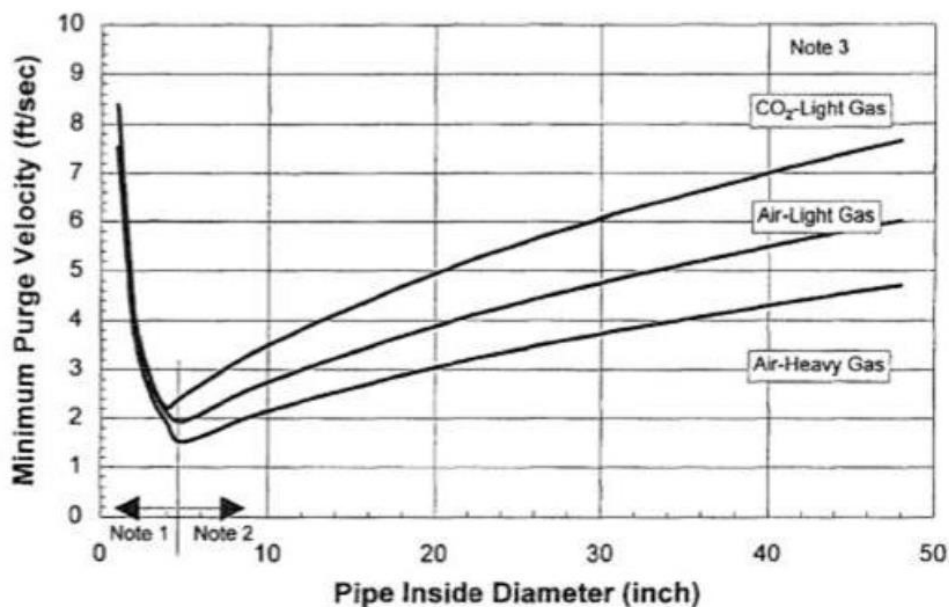


FIGURE 5-1 MINIMUM PURGE VELOCITY TO LIMIT STRATIFICATION AND ENSURE TURBULENT FLOW

Note 1: Minimum velocity for turbulent flow, Reynolds # = 4000.

Note 2: Minimum velocity to limit stratification.

Note 3: The minimum purge velocity depends upon the pipe diameter and the density difference between the purge gases. Gases with larger density differences require higher purge velocities. Light Gas Specific Gravity = 0.55. Heavy Gas Specific Gravity = 0.70.

Uit de grafiek blijkt dat boven een inwendige diameter van 5 inch (ca 125 mm) de minimum spoelsnelheid groter wordt naarmate de diameter van de leiding toeneemt. Dat is het gevolg van een sterkere stratificatie bij een groter hoogteverschil in de leiding.

Met de aanpassing van de verticale schaal in [m/s] en de horizontale schaal in [mm] ziet de grafiek er als volgt uit:

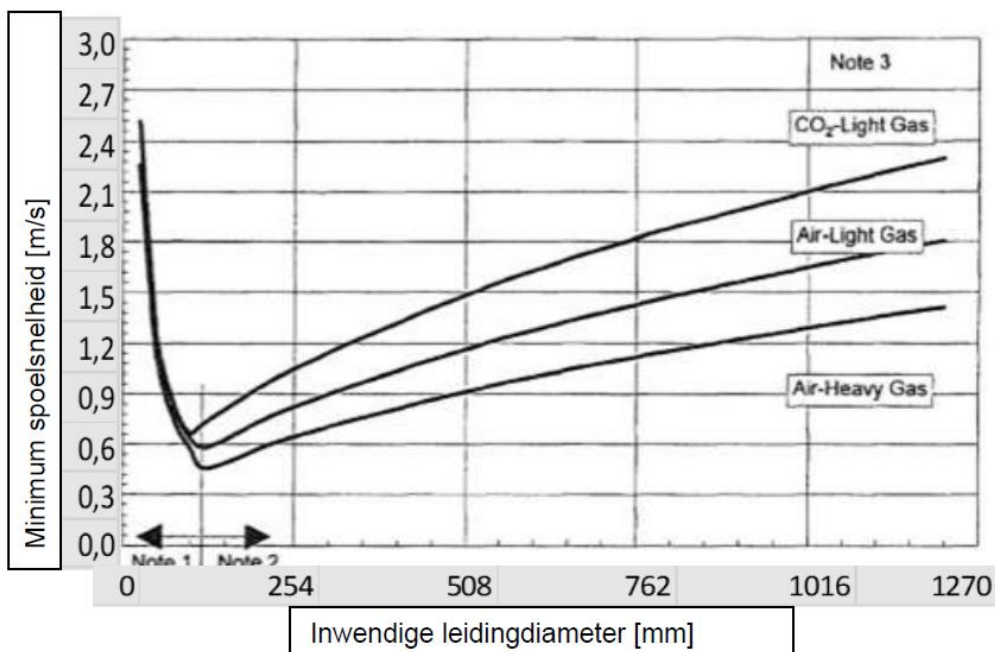


FIGURE 5-1 MINIMUM PURGE VELOCITY TO LIMIT STRATIFICATION AND ENSURE TURBULENT FLOW

Uit deze grafiek blijkt dat voor gassen lichter dan lucht (met een relatieve dichtheid $d=0,55$) bij de DN 200 testleiding met een inwendige diameter van 176,2 mm, een minimum spoelsnelheid van ca 0,7 m/s is vereist om stratificatie te beperken. Voor een DN 200 stalen leiding valt uit de figuur af te leiden dat een minimum spoelsnelheid van ca 0,75 m/s is vereist om stratificatie te beperken. Voor de DN 100 testleiding met een inwendige diameter van 97,4 mm, is de minimum spoelsnelheid ca. 0,6 m/s om er zeker van te zijn dat de stroming turbulent is.

De grafiek met gassen lichter dan lucht (middelste grafiek) is gebaseerd op een relatieve dichtheid van $d = 0,55$.

Voor aardgas geldt echter $d = 0,65$ en voor waterstof geldt $d = 0,07$. De lijn voor aardgas zal daarom ten opzichte van de middelste grafiek iets lager liggen en de lijn voor waterstof zal hoger liggen. Daarmee zullen voor waterstof de minimum snelheden hoger zijn om aan de gestelde voorwaarden te voldoen.



IV Verbranding, deflagratie, explosie en detonatie van gasmengsels

In het normale spraakgebruik wordt wel onderscheid gemaakt tussen verbranding en explosie. Echter, het begrip explosie omvat twee wezenlijk verschillende verschijnselen. Allereerst betreft dit snelle verbranding, ook wel deflagratie genoemd en daarnaast ook is er ook detonatie, schokgolfvorming.

Een mengsel van twee gassen (een brandstof en een oxidator) is alleen binnen een bepaalde mengverhouding in staat om **verbranding** te onderhouden. De onderste en de bovenste grens van die mengverhouding worden aangeduid met Lower Flammability Limit (LFL, 4,1 vol%) en Upper Flammability Limit (UFL, 75 vol%). Hiervoor worden ook wel de termen Lower Explosion Limit (LEL) en Upper Explosion Limit (UEL) gehanteerd.

Daarnaast geldt ook dat alleen binnen een bepaalde mengverhouding een mengsel in staat is om een **schokgolf** in stand te houden. De onderste en de bovenste grens van die mengverhouding worden aangeduid met Lower Detonations Limit (LDT, 18 vol%) en Upper Detonation Limit (UDT, 56 vol%). In de regel liggen de detonatie grenzen binnen de bandbreedte van de explosiegrenzen.

Het belangrijke verschil tussen deflagratie en detonatie is dat de bij het tweede verschijnsel optredende drukken in de praktijk vaak aanzienlijk hoger zijn, en het effect bovendien over een grotere afstand merkbaar (gevaarlijk) is.

Bij aardgas/luchtmengsels en bij waterstof/luchtmengsels onder atmosferische druk en bij omgevingstemperatuur treedt schokgolfvorming niet makkelijk op. Als ontsteking plaatsvindt met een slaghoedje of andere vorm van 'high explosive' dan begint de verbranding direct met een schokgolf en deze kan zich dan snel intensiveren in een geschikt mengsel. In de dagelijkse praktijk van de niet-industriële omgeving zal ontsteking veelal via een vlam of een vonk gebeuren, de ontstekingsbron was al aanwezig en het (lek)gas wordt direct ontstoken. In dat geval vormt zich in eerste instantie een vlamfront. Dit vlamfront kan versnellen onder invloed van turbulentie (die door het vlamfront zelf wordt opgewekt). Als er voldoende ruimte is (voldoende lengte waarover het mengsel brandbaar is) dan kan het turbulente vlamfront zich ontwikkelen tot een schokgolf. Onder atmosferische druk (1 bara) is de benodigde afstand meer dan ca. 5 m. Maar, wanneer er drukopbouw plaatsvindt (bijvoorbeeld in een meer of minder omsloten ruimte), of als er turbulentie genererende obstakels zijn (bijvoorbeeld (straat)meubilair), dan kan deze afstand aanzienlijk korter zijn. Indien in een pand (lek)gas wordt ontstoken, zal het vlamfront dan ook veelal schokvormig verlopen.

Er bestaan specifieke rekenmodellen die rekening houden met de effecten van secundaire detonatie op grotere afstand van de primaire ontsteking (zie o.a. het 'Yellow Book').

Kortom: bij de ontsteking van een gas/luchtmengsel in de buitenlucht zal veelal sprake zijn van een zichzelf snel voortplantend vlamfront waarbij de drukopbouw beperkt is, geen detonatie. De drukopbouw zal geen of nauwelijks schade veroorzaken, maar er kan wel brandschade ontstaan.

Bij de ontsteking van een gas/luchtmengsel in een pand is de kans dat het vlamfront schokvormig verloopt groter. Hierbij ontstaat er een significante drukopbouw, een detonatie, met schade aan het pand en de omgeving tot gevolg.



Het volgende is het belangrijkste uit de bovenstaande beschouwing:

- LEL is hetzelfde als LFL.
- UEL is hetzelfde UFL.
- Het onderscheid tussen LEL en LDL is voor de praktijk niet zinvol. Immers brand is ongewenst en onder bepaalde omstandigheden kan ook in de buitenlucht een detonatie¹ ontstaan.

¹ Een detonatie wordt in het dagelijks gebruik meestal aangeduid met explosie.



V Vragen van Netbeheer Nederland

In deze bijlage zijn de vragen opgenomen waar Netbeheer Nederland antwoorden op wil hebben. De meeste vragen zijn in het rapport beantwoord. Waar dit niet het geval is wordt het antwoord (vooralsnog) hier tussengevoegd.

1. Wat is de vereiste spoelsnelheid voor waterstof ?
 - a. Hiervoor is zowel een theoretische analyse als een praktische test nodig om inzicht te krijgen in het spoelgedrag (H_2 -concentratie mengsel) gedurende de spoeltijd door de leiding heen.

Zie o.a. de samenvatting.
2. Wat is de minimaal vereiste spoelsnelheid voor waterstof?
 - a. Achtergrond: op meerdere pilotprojecten in Nederland wordt waterstof geleverd in Tubetrailers en door elektrolyse. Voor regulier gebruik in de toekomst (het verwarmen van woningen en water) zal het waterstofnet voldoende volumestroom leveren. Echter bij het spoelen van het leidingnet in opgezette pilots zal de aanwezig volume aanbod te beperkt zijn. Hierdoor zal bij grotere diameters de verwachte voorgeschreven snelheid van 1m/s niet worden gehaald. Dit geldt voor transport- en distributieleidingen. Bij aansluitleidingen zullen door de kleinere diameters en aanwezige gasmeter de snelheden waarschijnlijk wel gehaald gaan worden.
 - i. Welke minimale spoelsnelheden in combinatie met tijd, snelheid en volume zijn nodig om voldoende stroming/werveling in de leiding te veroorzaken. Denk naast 1 m/s, aan 0,3 m/s, 0,5 m/s, 0,7 m/s

Zie o.a. de samenvatting.

3. Tijdens het in bedrijf stellen van de leidingen krijgen wij te maken met mengsels van verschillende samenstelling. Vanuit het onderzoeksrapport (GT-190117) kan bij een mengsel van waterstof en lucht met een ontstekingsbron er een ontbranding in de leiding ontstaan met versmelting van kuststof leidingen tot gevolg. Om inzicht te krijgen wat tijdens het spoelen het menggedrag in de leidingen gaat worden, zal er een test plaatsvinden met verschillende mengsels. In de huidige voorgeschreven H2TGV-20/21 VWI's staat dat er gespoeld gaat worden met stikstof.
 - a. Toe te passen spoelmengsels:
 - i. $N_2 - H_2$ (in bedrijf stellen H_2 net, ontluchten)
 - ii. $H_2 - N_2$ (buiten bedrijf stellen H_2 net, ontgassen)
 - b. Optioneel door expert opinion:
 - i. Wat kan op basis van de hiervoor benoemde praktijkproeven (H_2-N_2) gezegd worden over het gebruik van lucht als spoelmedium i.p.v. stikstof?
 - ii. Wat kan op basis van de hiervoor benoemde praktijkproeven (H_2-N_2) gezegd worden over het rechtstreeks verdringen van aardgas door waterstof, zonder tussenkomst van lucht/stikstof.

Zie paragraaf 5.2.2 en 5.2.4.

4. Tijdens het spoelen van de gasleiding zullen er verschillende H_2-N_2 mengsels ontstaan gedurende de tijd. Om over de mogelijke gevolgen meer te kunnen zeggen is onderzoek nodig hoe de mengsels zich gaan



ontwikkelen tijdens de spoeling. Dit geeft ons inzicht in de mogelijke te verwachten risico's die gedurende het spoelproces ontstaan. Met als doel veiligheidsmaatregelen op te stellen die tijdens het in- en uit bedrijf stellen van een waterstofnet uitgevoerd dienen te worden. We willen graag onderzocht hebben:

- a. Gaat waterstof als een "bal" of een gelaagd mengsel door het leidingnet heen. Bestaat er een kans dat in de gehele leiding een stoichiometrisch mengsel gaat ontstaan bij de omschreven snelheden?
Zie hoofdstuk 4.
- b. Hoe is de concentratie verdeling (mengsel lucht en waterstof) bij het spoelen van distributieleidingen. Het gaat om de mengsels in tijd, volume en omvang bij de omschreven lengtes en diameters.
Zie hoofdstuk 4, paragraaf 4.13.
- c. Hoe snel is er 100% waterstof te meten bij het spoelen van de mengsels bij een aansluitleiding. Uitgaande van standaard drukken 30 en 100 mbar. Bij de omschreven lengtes en drukken.
Dit is niet onderzocht en niet specifiek bepaald maar af te leiden uit onder meer Tabel 1: Benodigde spoelsnelheid per leidingdiameter en benodigd debiet voor het ontlichten (**in bedrijf stellen**) en het ontgassen (buiten bedrijf stellen), zie de toelichting .
- d. Zijn er verschillen op te merken vanuit het aardgas onderzoeksrapport GT200075.
Zie hoofdstuk 7.

> 5. Is aan de hand van de onderzoeksresultaten een slimmere werkwijze te bedenken om leidingen te spoelen zodat het leidingnet op een gecontroleerde manier sneller volledig met het gewenste medium gevuld is? Kunnen op basis van een expert opinion aanbevelingen gedaan worden voor nader onderzoek om nieuwe werkwijzen te onderzoeken. Is er kennis en expertise beschikbaar om over te gaan op een andere werkwijze. Zijn hiervoor aanvullende praktijkonderzoeken voor nodig of kan het volstaan met bureau technische onderzoek.

- a. Voorstel gedachtegang, als voorbeeld:
 - i. Kan door b.v. het spoelen in fases uit te voeren, een soort van barrière/buffer/ballon in de leiding te maken om te voorkomen worden dat er een explosief mengsel in de leiding gaat ontstaan. Tijdens de stilstand van de spoelfase zal de aanwezige waterstof zich gaan mengen met lucht of stikstof. Mogelijk dat het spoelproces kan worden versneld, zodat bij de uittreding 100% waterstof gemeten kan worden. Of bestaat er dan juist een ongewenst explosief mengsel en hoe kunnen we dat voorkomen.
Zie paragraaf 5.2.5.
 - ii. Kan door b.v. het aanbrengen van extra spoelnippels/punten het spoelproces versneld worden. Moet er misschien een extra spoelnippel aangebracht worden tussen de hoofdkraan en uitgaande kraan op de meterbeugel.
 1. Hierbij is het van belang via welke punten je dan het beste kunt gaan spoelen. Lucht verdringen door aardgas zoals het nu gebeurt is wat anders



dan tussentijds met een ander medium (zoals stikstof) te gaan spoelen. Misschien moet er wel een extra spoelpunt aangebracht worden in de aansluitleiding en/of binnenleiding. Of wellicht de meetnippels in de aansluitbeugel laten vervangen door spoelpunten.

Zie paragraaf 5.2.2.

- iii. Is er een methode beschikbaar/op te zetten om het spoelen/verdringen via een onderdruk te vacumeren. Of ontstaan er dan risico's die niet beheersbaar of wenselijk zijn?

Op basis van de resultaten van dit onderzoek is er (door Kiwa) geen aanleiding gevonden dit nader uit te werken.

