

HyDelta

WP1E – Invloed van waterstof transport bij hoge gassnelheid op integriteit en geluid

D1E.1 – WP1E Report (NL versie)

Status: Definitief

Dit project is medegefinancierd door TKI Nieuw Gas | Topsector Energie uit de PPS-toeslag onder referentienummer TKI2020-HyDelta.

Documentensamenvatting

Corresponderende auteur

Corresponderende auteur	Néstor González Díez
Verbonden aan	TNO
E-mailadres	nestor.gonzalezdiez@tno.nl

Documenthistorie

Versie	Datum	Auteur	Partij	Overzicht belangrijkste wijzigingen
0.1	14-aug-2021	N. González Díez, L. van Lier, S. Belfroid, I. Meijer.	TNO	(Engelse) versie t.b.v. review door WP1E Expert Assessment Group
0.2	3-nov-2021	(zie vorige versie)	TNO	(Engelse) tweede concept na eerste review door WP1E Expert Assessment Group. Grote aanpassingen doorgevoerd in het rapport
1.0	30-nov-2021	(zie vorige versie)	TNO	Definitief ontwerp ter goedkeuring voorgelegd voor vrijgave en vertaling

Verspreidingsniveau

Verspreidingsniveau		
PU	Publiek	x
R1	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> Partners, met inbegrip van Expert Assessment Group Overige projectdeelnemers, waaronder de klankbordgroep Door het consortium aangewezen externe entiteit (gelieve te specificeren) 	
R2	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> Partners, met inbegrip van Expert Assessment Group Overige projectdeelnemers, waaronder de klankbordgroep 	
R3	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> Partners, met inbegrip van Expert Assessment Group 	

Document review

Versie	Naam reviewer	Verbonden aan
0.1	Stefan Belfroid Sytze Buruma Thijs Duisters Alfons Krom Gilles de Kok Vinay Sewbaran Johannes de Bruin Pascal te Morsche Peter Verstegen HyDelta Supervisory Group	TNO Coteq Enexis Gasunie Stedin Stedin Liander Liander Liander NEC, KIWA, DNV, TNO, NBNL, Stedin, Alliander
0.2	Sytze Buruma Thijs Duisters Tjidsger Kingma Tessa Hillen, Gilles de Kok Peter Verstegen Rick den Hartog HyDelta Supervisory Group	Coteq Enexis Gasunie Stedin Liander Westland Infra NEC, KIWA, DNV, TNO, NBNL, Stedin, Alliander

Samenvatting

Nederland beschikt over een uitgebreide infrastructuur van leidingen voor het transport en de opslag van aardgas. Deze bestaande infrastructuur zou in de toekomst kunnen worden gebruikt voor het transport van waterstof. Momenteel wordt de betrouwbaarheid, veiligheid en impact op het milieu gewaarborgd door middel van ontwerpcodes, standaarden en door systematisch te werk te gaan bij het onderhoud en het oplossen van problemen. De vraag rijst nu of als dezelfde hoeveelheid energie die nu met aardgas wordt getransporteerd in de toekomst met waterstof wordt getransporteerd, een grotere impact heeft op de integriteit van het systeem en het milieu eromheen.

Indien dezelfde energie-inhoud met waterstof zal worden getransporteerd als met aardgas zal de stromingsnelheid of de druk verhoogd moeten worden. Hoge stroomsnelheden gaan gepaard met een grotere drukval en een grotere kans op geluidsemissies, trillingen en erosie. De stroomsnelheid wordt bepaald door de keuze van de systeemcapaciteit, de transport condities zoals de operationele druk, de dimensionering van de apparatuur (leidingen, compressoren) maar ook economische afwegingen. De combinatie van deze factoren die de laagste gemiddelde transportkosten oplevert, bepaalt wat de resulterende stroomsnelheid is op alle punten van het transportsysteem. De stroomsnelheid zelf kan echter een beperking vormen bij deze optimalisatie vanwege de genoemde risico's. Voor aardgas wordt deze limiet gewoonlijk op 20 m/s (72 km/u) gesteld, hoewel dit niet voor elk segment van het netwerk het geval is en op specifieke locaties hogere waarden kunnen worden bereikt. Als dezelfde limiet zou worden toegepast op waterstof, kan dit een onnodig conservatieve beperking vormen voor de capaciteit van nieuwe en hergebruikte systemen om energie te vervoeren omdat per volume-eenheid de energiedichtheid van waterstof minder is dan van aardgas.

In deze studie wordt een overzicht gegeven van stromingsgeïnduceerde risicomechanismen voor intrusieve (ingestoken) elementen zoals bijvoorbeeld instrumentatie, stromingsgeïnduceerde turbulentie, stromingsgeïnduceerde druk pulsaties, akoestisch geïnduceerde vibraties, stromingsgeïnduceerd geluid en tenslotte erosie. Tevens wordt de capaciteit vanuit het oogpunt van drukval gecontroleerd. Deze risicoanalyse wordt gedaan door het Nederlandse hogedrukgastransportsysteem (GTS) via de RNB-systemen (regionale netwerk) te scannen, tot aan het gasontvangstpunt bij de eindgebruiker. Door middel van een benchmark tussen aardgas (G-gas) en waterstof wordt de vraag beantwoord of in de praktijk waterstof drie keer sneller kan stromen dan aardgas. Deze factor drie in snelheid is nodig om bij dezelfde druk, een gelijke energiestroom te transporteren. Het doel van de benchmark is om na te gaan of bij deze aanname een van de geanalyseerde verschijnselen het transport onder dergelijke omstandigheden belemmert. Met andere woorden: Is de toegestane stroomsnelheid voor waterstof groter dan de waarde die traditioneel voor aardgas wordt gebruikt?

Niet alle onderzochte risico's komen even vaak voor in de verschillende delen van het complete transportnetwerk. Normaal gesproken komen risico's in verband met vibratie en storingen meer voor in de GTS-systemen vanwege de hoge druk, terwijl het risico van geluid meer voorkomt bij RNB-systemen. Dit betekent natuurlijk niet dat RNB ongevoelig is voor vermoeiingsbreuken of GTS voor geluidsgelateerde risico's. De tabel brengt de genoemde risico's in kaart per segment van het Nederlandse gasnet waarop ze van toepassing zijn.

Tabel Fundamentele aspecten in verband met stromen bij hoge snelheid en aansluiting op de verschillende segmenten van het gastransport- en -distributiesysteem (aangegeven met een "x"-symbool). Ter verduidelijking, zie par. 1.4.

Segment van het gassysteem	Drukval	FIV intrusieve apparatuur	Stromingsgeïnduceerde	Stromingsgeïnduceerde	Akoestisch geïnduceerde	Stromingsgeïnduceerd geluid	Erosie
HTL - pijpleiding	x						x
HTL - compressorstation	x	x	x	x	x	x	x
HTL - opslagstation	x	x	x	x	x	x	x
HTL - M&R-station	x	x	x	x	x	x	x
HTL - GOS	x	x	x	x	x	x	x
RTL - pijpleidingen	x						x
RTL - GOS	x	x	x	x	x	x	x
RNB - HD-pijpleidingen	x	x				x	x
RNB - LD-pijpleidingen	x	x				x	x
RNB - gasdistributiestations	x	x	x		x	x	x
RNB - gasdistrictstations	x	x	x		x	x	x
RNB tot aan gasmeter huishouden	x		x			x	x

Het belangrijkste resultaat van dit onderzoek is, dat wanneer waterstof stroomt met dezelfde energieflex als aardgas (G-gas), de risiconiveaus die als gevolg van deze fundamentele aspecten hetzelfde zijn als nu. Met andere woorden: als bij aardgastransport 20 m/s als vuistregel wordt gehanteerd voor de maximale stroomsnelheid in het netwerk, kan 60 m/s de vuistregel zijn voor waterstof, met enkele kanttekeningen zoals hieronder beschreven. De pijpleidingen zijn geschikt vanuit het oogpunt van drukval geschikt voor een bedrijf met 60 m/s. Dit betekent dat in verkennende studies voor de ontwikkeling van waterstofnetwerken voor de pijpleidingen kan worden uitgegaan van een capaciteit om waterstof te vervoeren met hogere stroomsnelheden dan momenteel het geval is. Uitgaan van 20 m/s - zoals voor aardgas - kan derhalve als conservatief worden beschouwd.

Voor het GTS en het RNB-deel worden de verschillende mechanismen individueel kort besproken in onderstaande tabel. Een prioriteitsnummer tussen 1 en 3 toegekend is toegekend aan elk criterium: "1" wordt gegeven aan punten waarvoor onzekerheden bestaan en verder onderzoek vereist is; "2" betekent dat het waargenomen risico voor waterstof vergelijkbaar is (soms groter, soms kleiner) met dat voor aardgas en dat de bestaande technische praktijken geldig zijn en moeten worden gebruikt bij de inspectie van apparatuur voor hergebruik met waterstof; "3" betekent dat het waargenomen risico voor waterstof lager is dan voor aardgas (of voor zowel waterstof als aardgas verwaarloosbaar is), dat de bestaande technische praktijken geldig zijn en moeten worden gebruikt bij de inspectie van apparatuur voor hergebruik met waterstof.

Voor het GTS-systeem (HTL, RTL):

Mechanisme	Conclusies van de benchmark tussen G-gas en H ₂	Prioriteit
Drukval	Vergelijkbare drukval. D.w.z. dat pijpleidingen voldoende capaciteit hebben om dezelfde hoeveelheid energie te transporteren bij vergelijkbare drukken.	3
FIV intrusieve instrumenten	Bestaande intrusieve (ingestoken) meetinstrumentatie loopt gevaar indien de snelheden te hoog worden. In de geanalyseerde voorbeelden moeten daarom sommige meetinstrumenten (thermowells) bij snelheden boven 38 m/s worden vervangen. Wanneer hergebruik met waterstof wordt beoogd moeten de thermowells worden geïnspecteerd. Bestaande maatregelen ten behoeve van risicokwantificering en -beperking blijven geldig. Verder onderzoek is niet vereist.	2
Stromingsgeïnduceerde turbulentie	Verwacht wordt dat vibratie-excitatie door stromingsgeïnduceerde turbulentie gunstiger zal zijn bij waterstof, zelfs bij hoge stroomsnelheden. De bestaande leidingsteunen (pipe supports) zijn voldoende om hoge trillingsniveau te voorkomen.	3
Stromingsgeïnduceerde pulsaties	Stromingsgeïnduceerde pulsaties zullen naar verwachting een risico blijven vormen. Echter het risicoprofiel is gelijk aan dat van G-gas. Hoewel de pulsatieniveaus naar verwachting zullen afnemen, zal de pulsatiefrequentie toenemen. Hierdoor wordt de kans groter dat de aanstoot frequentie samenvalt met een mechanische resonatiefrequentie. Analyses zoals die nu voor aardgas worden uitgevoerd, blijven ook bij waterstof de norm. Bestaande maatregelen ten behoeve van risicokwantificering en -beperking blijven geldig. Verder onderzoek is niet vereist.	2
Akoestisch geïnduceerde vibratie	In geval van waterstof zullen akoestisch geïnduceerde vibraties (Acoustic-Induced Vibration, AIV) als gevolg van drukverlies of drukverlaging in gasregelstraten of recyclekleppen heftiger zijn. Dit is duidelijker merkbaar naarmate de druk hoger is en de diameter van het ontluchtingssysteem groter, bijvoorbeeld bij drukontlasting aan de uitlaat van compressoren. Het is echter onwaarschijnlijk dat deze energetische bron zich effectief vertaalt in een hoger risico op falen, vanwege de grotere afstand tussen akoestische en mechanische resonatiefrequenties van de pijpleiding. Installaties met plotselinge drukverlagingen bestemd voor hergebruik met waterstof moeten worden onderzocht op AIV-risico. Bestaande maatregelen ten behoeve van risicokwantificering en -beperking blijven geldig. Verder onderzoek is niet vereist.	2
Stromingsgeïnduceerd geluid	De geluidsniveaus <i>binnen in</i> de pijpleiding zijn naar verwachting groter voor waterstof dan voor aardgas. De afstraling naar de omgeving zal echter lager zijn in het geval van waterstof dan voor leidingen met G-gas (groter impedantie verschil in geval van waterstof). Daarnaast zal de frequentie inhoud van het geluid in de leiding toenemen in geval van waterstof. Het is niet mogelijk te concluderen dat het netto-effect op de <i>externe</i> geluidsemisies in alle gevallen gunstig is voor waterstof. Aanbevolen wordt het onderzoek voort te zetten door aanvullend experimenteel bewijsmateriaal te verzamelen over geluidsemisies	2

	op basis van stromingsproeven en van proefopstellingen in het veld.	
Erosie	<p>Als gevolg van de hoge stroomsnelheden neemt het erosiepotentieel dramatisch toe. Er worden echter maatregelen genomen om de aanwezigheid van vaste deeltjes te voorkomen. Indien de hoeveelheid vaste deeltjes dicht bij de huidige wettelijk aanvaardbare grenswaarde ligt, moeten beperkingen van de stroomsnelheid worden toegepast. De aanwezigheid van vaste deeltjes kan niet altijd worden uitgesloten.</p> <p>Bestaande maatregelen ten behoeve van risicokwantificering en -beperking blijven geldig.</p> <p>Aanbevolen wordt het onderzoek op het gebied van erosie te continueren (zie tevens de onderstaande notities over aanbevolen vervolgonderzoek).</p>	1

Voor de RNB-systemen (zowel HD- als LD-segmenten):

Mechanisme	Conclusies van de benchmark tussen G-gas en H ₂	Prioriteit
Drukval	Vergelijkbare drukval. Pijpleidingen hebben voldoende capaciteit om dezelfde hoeveelheid energie te transporteren bij vergelijkbare drukprofielen. Er worden slechts kleine verschillen waargenomen afhankelijk van de pijpleidinggrootte of de kwaliteit van het (binnen)oppervlak na jaren van gebruik.	3
FIV intrusieve (ingestoken) instrumenten	Bestaande intrusieve (ingestoken) meetinstrumenten lopen gevaar indien de snelheden te hoog worden opgevoerd. In de geanalyseerde voorbeelden moeten daarom sommige meetinstrumenten (thermowells) bij snelheden boven 38 m/s worden vervangen. Wanneer hergebruik met waterstof wordt beoogd moeten de thermowells worden geïnspecteerd.	2
Stromingsgeïnduceerde turbulentie	Verwacht wordt dat vibratie-excitatie door stromingsgeïnduceerde turbulentie gunstiger zal zijn bij waterstof, zelfs bij hoge stroomsnelheden. De bestaande leidingsteunen (pipe supports) zijn voldoende om hoge trillingsniveau te voorkomen.	3
Akoestisch geïnduceerde vibratie	In geval van waterstof zullen akoestisch geïnduceerde vibraties (Acoustic-Induced Vibration, AIV) als gevolg van drukverlies of drukverlaging in gasregelstraten of recyclekleppen heftiger zijn. Dit is duidelijker merkbaar naarmate de druk hoger is en de diameter van het ontluchtingssysteem groter, bijvoorbeeld bij afblazen aan de uitlaat van compressoren. Het is echter onwaarschijnlijk dat deze energetische bron zich effectief vertaalt in een hoger risico op falen, vanwege de grotere afstand tussen akoestische en mechanische resonantiefrequenties van de leiding. Installaties met plotselinge drukverlagingen bestemd voor hergebruik	3

	<p>met waterstof moeten worden onderzocht op AIV-risico. Bestaande maatregelen ten behoeve van risicokwantificering en -beperking blijven geldig. Verder onderzoek is niet vereist.</p>	
Stromingsgeïnduceerd geluid	<p>De geluidsniveaus <i>binnen in</i> de pijpleiding zijn naar verwachting groter voor waterstof dan voor aardgas. De afstraling naar de omgeving zal echter lager zijn in het geval van waterstof dan voor leidingen met G-gas (groter impedantie verschil in geval van waterstof). Daarnaast zal de frequentie inhoud van het geluid in de leiding toenemen in geval van waterstof.</p> <p>Het is niet mogelijk te concluderen dat het netto-effect op de <i>externe</i> geluidsemissies in alle gevallen gunstig is voor waterstof. Aanbevolen wordt het onderzoek voort te zetten door aanvullend experimenteel bewijsmateriaal te verzamelen over geluidsemissies op basis van stromingsproeven en van proefopstellingen in het veld ook op het niveau van huishoudens.</p>	2
Erosie	<p>Als gevolg van de hoge stroomsnelheden neemt het erosiepotentieel dramatisch toe. Er worden echter maatregelen genomen om de aanwezigheid van vaste deeltjes te voorkomen. Indien de hoeveelheid vaste deeltjes dicht bij de huidige wettelijk aanvaardbare grenswaarde ligt, moeten beperkingen van de stroomsnelheid worden toegepast. De aanwezigheid van vaste deeltjes kan niet altijd worden uitgesloten.</p> <p>Bestaande maatregelen ten behoeve van risicokwantificering en -beperking blijven geldig. Aanbevolen wordt het onderzoek op het gebied van erosie te continueren (zie tevens de onderstaande notities over aanbevolen vervolgonderzoek).</p>	1

Wat het vervolgonderzoek betreft, worden de volgende punten aanbevolen:

- Erosie lijkt het meest onzekere mechanisme te zijn dat het realiseren van de gewenste stroomsnelheid in de weg kan staan. In het algemeen zou stromende waterstof bij hoge snelheid (~60 m/s) zich vertalen in een erosiepotentieel dat een orde van grootte groter is dan bij stromend aardgas (bij 20 m/s). Een belangrijke parameter is het verontreinigingsniveau met vaste deeltjes in de gasstroom, dat onzeker is. Hoewel er filters worden geplaatst om deze verontreiniging te voorkomen, zou uitgaan van wettelijk aanvaardbare grenzen reeds onaanvaardbare erosieniveaus opleveren. Voor RNB-systemen is het gebruik van het (algemeen aanvaarde) erosiemodel niet mogelijk vanwege de lage dichtheid van het gas. Ook de kenmerken van de pijpleidingmaterialen, zoals PVC, zijn onzeker. Aanbevolen wordt dit aspect als volgt te onderzoeken:
 - Onderzoek de prestaties van filters in GTS- en RNB-systemen bij een hoge waterstofstroomsnelheid. Dit moet een beter onderbouwde keuze met betrekking tot de vaste deeltjesbelasting in de gasstroom mogelijk maken.
 - Voer specifieke stromingssimulaties uit om de worst-case erosiesnelheden in de RNB-systemen te karakteriseren, in combinatie met geschikte materiaalconstanten voor PVC-leidingen, waarvoor eventueel tests moeten worden uitgevoerd.
- Hoogfrequente dynamische verschijnselen zoals AIV en de daaruit voortvloeiende geluidsafstraling zijn complexe onderwerpen die momenteel zelfs op fundamenteel niveau worden onderzocht. Risico's zullen voldoende worden beperkt indien de bestaande normen worden toegepast op systemen zoals veiligheidskleppen, regelkleppen en compressor recycle-kleppen. Het wordt aanbevolen om resultaten te verzamelen van testen voor waterstof die in het kader van HyDelta en/of haar partners zijn uitgevoerd.
- Het is van belang dat eventuele meetfouten in flowmeters ten gevolge van onstabiele stromingen (pulsaties, turbulentie) beter worden begrepen. Dit is in de huidige scope van HyDelta niet aan de orde gekomen. Aanbevolen wordt om deze verschijnselen te onderzoeken als integraal onderdeel van de onderzoeken die worden uitgevoerd om de aan flowmeetapparatuur voor waterstof gestelde eisen vast te stellen.

Inhoudsopgave

Documentsamenvatting.....	2
Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave	9
Nomenclatuur.....	11
Afkortingen.....	11
Latijnse tekens.....	11
Griekse tekens	12
Subscripts en superscripts.....	12
1 Inleiding	12
1.1 Relevantie.....	12
1.2 Scope van de werkzaamheden.....	13
1.3 Eerder en parallel onderzoek	14
1.4 Gastransportsysteem	14
1.5 Beschrijving van het rapport	17
2 Waterstoftransport	18
2.1 Energietransportcapaciteit.....	18
2.2 Stroomsnelheidsratio	20
2.3 Drukval.....	21
2.3.1 Waterstof t.o.v. G-gas	21
3 Intrusieve apparatuur.....	25
3.1 Intrusieve apparatuur in aardgastransportsystemen	25
3.2 Beoordeling van stromingsgeïnduceerde vibraties voor thermowells	25
3.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof.....	26
3.4 Voorbeelden.....	26
3.5 Conclusie	26
4 Stromingsgeïnduceerde turbulentie	28
4.1 Stromingsgeïnduceerde turbulentie in aardgastransportsystemen	28
4.2 Beoordeling van stromingsgeïnduceerde turbulentie	28
4.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof.....	28
4.4 Voorbeelden.....	29
4.5 Conclusie	29
5 Stromingsgeïnduceerde pulsaties	30
5.1 Stromingsgeïnduceerde pulsaties in aardgastransportsystemen	30
5.2 Beoordeling van stromingsgeïnduceerde pulsaties	30

5.3	Benchmark tussen aardgas en waterstof	31
5.3.1	Pulsatieresonanties	31
5.3.2	Pulsatieamplitudes	33
5.4	Voorbeelden	33
5.4.1	Casus met aardgas	33
5.4.2	Casus met waterstof	35
5.5	Conclusie	35
6	Akoestisch geïnduceerde vibratie	37
6.1	Akoestisch geïnduceerde vibratie in aardgastransportsystemen	37
6.2	Beoordeling van akoestisch geïnduceerde vibratie	37
6.3	Benchmark tussen aardgas en waterstof	38
6.4	Voorbeelden	39
6.5	Conclusie	41
7	Stromingsgeïnduceerd geluid	42
7.1	Stromingsgeïnduceerd geluid in aardgastransportsystemen	42
7.2	Beoordeling van stromingsgeïnduceerd geluid	43
7.2.1	Bron: drukreducerinstallaties	43
7.2.2	Bron: leidingen en leidingonderdelen	44
7.2.3	Afstraling	44
7.3	Benchmark tussen aardgas en waterstof	46
7.3.1	Bron: drukreducerinrichtingen	46
7.3.2	Bron: leidingen en leidingonderdelen	52
7.3.3	Geluidsafstraling	52
7.4	Conclusie	54
8	Erosie	55
8.1	Erosie in aardgastransportsystemen	55
8.2	Beoordeling van erosie	55
8.3	Benchmark tussen aardgas en waterstof	56
8.4	Voorbeelden	57
8.5	Conclusie	59
9	Perspectieven en slotopmerkingen	60
10	Lijst van referenties	62

Nomenclatuur

Afkortingen

AIV	Acoustics Induced Vibration (akoestisch geïnduceerde vibratie)
AVIFF	Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure (voorkomen van door vibratie geïnduceerde vermoeiingsbreuken)
FIP	Flow Induced Pulsations (stromingsgeïnduceerde pulsaties)
FIT	Flow Induced Turbulence (stromingsgeïnduceerde turbulentie)
Fv	Flow-Induced Vibration Factor (stromingsgeïnduceerde vibratiefactor)
FVF	Fluid Viscosity Factor (vloeistofviscositeitsfactor)
GOS	Gasontvangstation
GTS	Gastransportsysteem
HDPE	High density polyethylene (polyethyleen met hoge dichtheid)
HHV	High Heating Value [Mj/kg] (hoge verwarmingswaarde)
HTL	Hoofdtransportleidingnet
HP	High Pressure (hoge druk)
LHV	Low Heating Value [Mj/kg] (lage verwarmingswaarde)
LP	Low Pressure (lage druk)
LoF	Likelihood of Failure (waarschijnlijkheid van falen)
M&R	Meet- en regelstation
PVC	Polyvinylchloride
PWL	Power level (geluidsvermogensniveau) [dB]
RNB	Regionale netbeheerders
RTL	Regionale transportleidingnet
SFF	Sonic Flow Factor (sonische stromingsfactor)
WP	Werkpakket

Latijnse tekens

A	Frequentieafhankelijke dempingsfunctie [dB]
C_D	Uitlaatcoëfficiënt
c	Geluidssnelheid [m/s]
d	Diameter [m]
E	Erosiesnelheid [kg/s]
f_D	Darcy-wrijvingsfactor [-]
f	Frequentie [Hz]
F	Dimensieloze bronsterkte [-]
F	Kracht [N]
L	Lengte [-]
M	Machgetal [-]
m	Massa [kg]
\dot{m}	Massastroom [kg/s]
M_w	Moleculair gewicht [g/mol]
P	Druk [bar]
p'	Drukpulsatie [Pa]
Pr	Prandtl-getal [-]
\dot{q}	Energieflux [MJ/s]
R	Specifieke gasconstante [J/kg K]
\bar{R}	Universele gasconstante [J/mol K]

Re	Reynolds-getal [-]
St	Strouhal-getal [-]
T	Temperatuur [K]
U	Stroomsnelheid [m/s]
x	Axiale locatie in een pijpleiding [m]
z	Samendrukbaarheidsfactor [-]

Griekse tekens

α	Akoestische demping [1/m] Impacthoek [graden]
γ	Specifieke verwarmingsratio [-]
γ^*	Isentropische exponent [-]
Δ	Differentieel [-]
∂	Deels differentieel [-]
μ	Dynamische viscositeit [kg/m s]
ρ	Dichtheid [kg/m ³]
Φ_P	Dimensieloze spectrale vermogensdichtheid [Pa ² /Hz]
ϕ_P	Spectrale vermogensdichtheid [Pa ² /Hz]

Subscripts en superscripts

0	In rust
1	Gas "1" (waterstof)
2	Gas "2" (aardgas)
a	absoluut
g	gauge
I	intern
n	teller
p	deeltje
Sb	Side-branch (zijtak)
R	Materiaal
r	Ring
res	In resonantie
th	thermowell
*	In kritische stromingscondities.

1 Inleiding

1.1 Relevantie

Nederland beschikt over een uitgebreide leidinginfrastructuur voor het transport en de opslag van aardgas. Om redenen van persoonlijke en (externe) milieuveiligheid en om een betrouwbare energievoorziening te waarborgen, wordt de infrastructuur gebouwd volgens normen en standaarden die van belang zijn voor de integriteit en veiligheid van pijpleidingen. Momenteel wordt de betrouwbaarheid gewaarborgd door middel van ontwerpcodes [1] [2] [3] [4] en door deze toe te passen bij het onderhoud en het oplossen van problemen en storingen [5] [6].

Een van de belangrijkste vragen met het oog op waterstoftransport betreft de maximaal toelaatbare stroomsnelheid waarbij risico's met betrekking tot de integriteit van installaties en pijpleidingen beheersbaar en aanvaardbaar zijn. Zoals meer in detail zal worden uitgelegd in hoofdstuk 2 neemt de

transportcapaciteit toe naarmate de druk en stroomsnelheden toenemen. Om aan de geselecteerde transportvoorwaarden te voldoen worden compressoren en pijpleidingen zodanig gekozen dat deze in de laagste genivelleerde transportkosten resulteren. Als regel wordt in de aardgastransportsector een traditionele limiet van 20 m/s voor de stroomsnelheid gehanteerd (hoewel ook afwijkingen hiervan mogelijk zijn: sommige RNB-exploitanten gebruiken bijvoorbeeld 30 m/s als de druk ten minste 3 bar(g) bedraagt). Deze limiet zorgt ervoor dat integriteitsrisico's als gevolg van stromingsgeïnduceerde vibratie tot een minimum worden beperkt. Met behulp van technische oplossingen worden de risico's beperkt tot beheersbare niveaus blijven. In speciale gevallen kan de stroomsnelheid in de procesleidingen groter zijn. In grote transmissiepijpleidingen is deze gewoonlijk lager. Desondanks wordt de grens van 20 m/s aangehouden als een redelijke waarde die niet mag worden overschreden.

Indien voor het transport van waterstof dezelfde limiet zou gelden als voor aardgas, zou dit de capaciteit van bestaande pijpleidingen om energie in de vorm van deze energiedrager te vervoeren, ernstig beperken. Aangezien waterstof ongeveer drie keer minder energie per volume-eenheid bevat, zou waterstof ongeveer drie keer zo snel moeten stromen om aan dezelfde energievraag te voldoen. Hoewel te verwachten valt dat de waterstofvolumes in de nabije toekomst nog niet zodanig zullen zijn dat deze capaciteit daadwerkelijk nodig is, is het belangrijk om inzicht te krijgen in de risico's van waterstoftransport met hoge snelheden. Zelfs indien niet dezelfde capaciteit als bij aardgas nodig zou zijn, kunnen pijpleidingen door het toestaan van hogere waterstofstroomsnelheden bij lagere druk opereren, hetgeen weer resulteert in lagere eisen aan de compressorapparatuur en het vereiste vermogen. Met andere woorden: kan het transport van waterstof met een bijna drie keer hogere stroomsnelheid worden gerealiseerd met een beheersbare impact op het netwerk?

In HyDelta WP1E wordt de impact van waterstofstromen met hoge snelheid onderzocht. Het onderzoek omvat de structurele integriteit van pijpleidingen en pijpleidingsystemen, maar ook andere aspecten zoals geluidsafstraling. Geluidsafstraling is niet alleen belangrijk vanwege Arbo-omstandigheden, maar ook vanwege het comfort voor bedrijven en huishoudens. Het doel is het maken van een vergelijking tussen de huidige bedrijfscondities met aardgas en de toekomstige bedrijfscondities met waterstof.

Als laatste inleidende opmerking wellicht het volgende: vaak houden de waargenomen verschillen tussen waterstof en aardgas niet rechtstreeks verband met waterstof als alternatief gas, maar veeleer met het feit dat ervan wordt uitgegaan van het transport *met hoge snelheid*. Waar dit informatief is, zal expliciet worden vermeld of de getrokken conclusies verband houden met het transport van waterstof, het transport bij hoge snelheid, of beide.

1.2 Scope van de werkzaamheden

Het doel van dit werkpakket is inzicht te krijgen in de effecten van een verhoogde stroomsnelheid van H₂ op de verschillende onderdelen van de bestaande infrastructuur voor gastransport en - distributie. Met name de volgende effecten vallen binnen de scope:

- intrusieve apparatuur zoals thermowells
- stromingsgeïnduceerde turbulentie
- stromingsgeïnduceerde pulsaties
- geluidsproductie in pijpleidingen en drukreducerstations
- Erosie

Zoals uit het hele rapport zal blijken, zullen voor diverse aspecten benchmarks tussen aardgas en waterstof worden beschreven. Tenzij anders aangegeven, is in dit rapport slechts één aardgassamenstelling gebruikt: dat is Gronings (G-)gas, aangezien dit in het gehele Nederlandse

gastransport- en -distributiesysteem wordt gebruikt. Hoewel in de meeste gevallen de conclusies overeind blijven wanneer de vergelijking wordt gemaakt met hoogcalorisch (H-)gas, is dit niet altijd het geval. In gevallen waarin het verschil enigszins gunstig of ongunstig is voor waterstof, kan dit bij een vergelijking met H-gas wel degelijk andersom zijn. Dit geldt echter alleen bij die gevallen waarin de verschillen toch al klein zijn.

De reeks faalmechanismen die verband houdt met de compatibiliteit van materialen met waterstof wordt uitgebreid bestudeerd in andere (vroegere en huidige) studies en valt uitdrukkelijk buiten de scope van dit werkpakket.

Ten slotte wordt ook het transport van waterstof bij lagere snelheden dan die welke vereist zijn voor het transport van dezelfde hoeveelheid energie, niet in detail geanalyseerd. Deze vooronderstelling wordt momenteel als conservatief beschouwd voor sommige segmenten van het gastransportsysteem (met name het HTL-systeem) en als realistisch voor andere zoals de RNB's. Stromingen bij lagere snelheden zijn uiteraard eveneens van belang, maar voor de toepassingen die in dit rapport worden geanalyseerd, zullen lagere stroomsnelheden in alle gevallen gunstigere resultaten te zien geven.

1.3 Eerder en parallel onderzoek

Voor proces- en transportsystemen die met (bijna) zuivere waterstof werken, gelden algemeen gebruikte technische normen zoals ASME B31.12 "Hydrogen Piping and Pipelines" [7]. De typische faalmechanismen die in een dergelijk document worden behandeld, hebben te maken met de materiaalcompatibiliteit van de pijpleidingen en componenten met waterstof, bijvoorbeeld door waterstof geïnduceerde scheurvorming of waterstofbroosheid. Daarnaast wordt momenteel in verschillende projecten reeds onderzoek gedaan naar de compatibiliteit van bestaande gastransportsystemen en -apparatuur met waterstof of mengsels van aardgas en waterstof. Het North Sea Energy Program [8] of het HIGGS-project [9] zijn voorbeelden daarvan.

Wat de maximale stroomsnelheid voor waterstof betreft, zijn onlangs twee referenties gepubliceerd terwijl HyDelta nog liep. De eerste is afkomstig van het H21-initiatief [10], waar wordt gesteld dat vanwege erosieproblemen de huidige ontwerplimiet voor aardgas 40 m/s bedraagt. Dit wordt verder beperkt tot 20 m/s voor "bekende stoffige aardgaspijpleidingen". In dit rapport wordt gesteld dat meer onderzoek wordt verricht om beter te begrijpen hoe dit zal veranderen met waterstof, maar dat waterstof - door zijn lagere dichtheid en viscositeit - wellicht minder vaste deeltjes kan oppikken. In Duitsland wijst Steiner [11] terecht op bezorgdheid over drukval, erosie, geluidsemisatie en vibraties en bespreekt waarom de huidige vuistregel van 20 m/s wordt gehanteerd bij aardgas. De auteur formuleert ook vragen in dit HyDelta WP over wat te verwachten valt zodra de stroomsnelheid moet worden verhoogd om de energiesnelheden bij zuivere waterstof te handhaven, maar geeft geen specifieke antwoorden. In Nederland wordt de limiet van 20 m/s van oudsher in verband gebracht met pulsaties en vibraties. GTS- en RNB-exploitanten beschikken niet over aanwijzingen dat erosie een probleem is. Dit is te danken aan de getroffen preventieve maatregelen, maar toch zijn de grenswaarden in verband met erosie relevant vanwege de incidentele of residuele aanwezigheid van vaste stoffen in de pijpleidingen.

1.4 Gastransportsysteem

Om de voor de benchmark relevante voorwaarden en parameters beter te kunnen begrijpen, wordt eerst een inventarisatie gemaakt van typische onderdelen en componenten die in het systeem aanwezig zijn. Aan het eind van dit gedeelte worden de verschillende onderwerpen van dit onderzoek gekoppeld aan de verschillende segmenten van het gastransport- en -distributiesysteem.

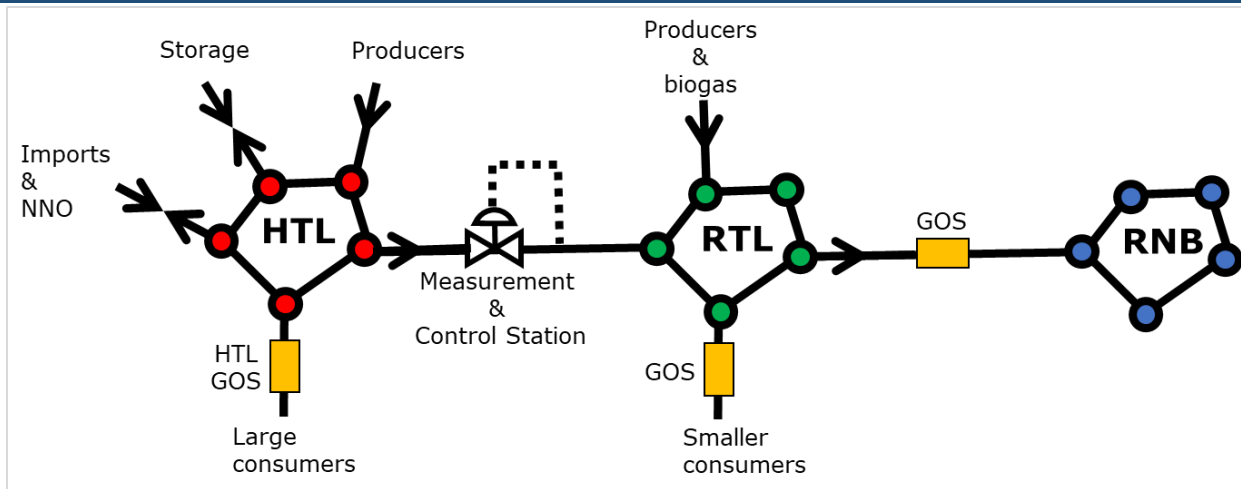
Het Nederlandse gastransportsysteem ontvangt zijn gas van verschillende bronnen en is grofweg onderverdeeld in vier segmenten op basis van druk: het *Hoofd Transport Leidingsysteem* (HTL) en het *Regionaal Transport Leidingsysteem* (RTL), die worden beheerd door GTS; en de *Regionale Netbeheerders* (RNB)-systemen. Dit wordt geïllustreerd in Afbelding 1-1. Het HTL wordt van het RTL gescheiden door *Meet & Regel stations* (M&R's), waar de druk wordt teruggebracht tot standaard 40 bar(g). Verder stroomafwaarts in het systeem wordt het gas geleverd aan de lokale distributienetten, waar de druk wordt verlaagd tot standaard 8 bar(g) in *Gas Ontvangst Stations* (GOS). Stroomafwaarts van de Gas Ontvangst Stations wordt het gas verder gedistribueerd door lokale gasnetbeheerders (RNB's). Dit gebeurt via een net van districtstations, die de druk verlagen van standaard 8 bar(g) tot 30/100 mbar(g), van waaruit de uiteindelijke gaslevering plaatsvindt aan kleine verbruikers (huishoudens) of grotere industriële verbruikers. In het lagedruknet kunnen delen worden geëxploiteerd met een druk van 4 bar(g) of 1 bar(g). In dergelijke gevallen wordt de druk verlaagd van 8 bar(g) in (gas)overslagstations. Voor meer bijzonderheden over de ontwerpprincipes van de gasinfrastructuur zie [1] en [5].

Veel installaties op de knooppunten en interfaces van deze systemen bevatten onderdelen die wordt blootgesteld aan hoge stroomsnelheden, met name:

- HTL-systeem
 - o transportleidingen
 - o compressorstations
 - o opslagstations
 - o M&R-stations
- RTL-systeem
 - o transportleidingen
 - o GOS-stations
- RNB-systemen
 - o Leidingsystemen (HD, LD)
 - o Gasoverslagstations
 - o Districtstations

Leidingonderdelen die gewoonlijk in contact komt met het gas zijn:

- pijpleidingen (van verschillende materialen)
- fittingen zoals flenzen, lasverbindingen, vernauwingen, etc.
- restrictieplaten
- filters, cyclonen
- kleppen (alle types, inclusief veiligheidskleppen)
- compressoren (centrifugaal en zuigertypes)
- pulsatedempingselementen (dempers, geluiddempers)
- warmtewisselaars (heaters, koelers, bijv. bij gasopslaglocaties)
- instrumentatie zoals flowmeters, drukmeters en thermometers/thermowells
- droogapparatuur.



Afbeelding 1-1 Overzicht van het Nederlandse gastransport- en -distributiesysteem.

In dit werkpakket zijn koppelingen buiten beschouwing gelaten, aangezien hun relevantie meer verband houdt met materiaalcompatibiliteit en lekdichtheid, waarbij de stroming zelf geen relevante rol speelt. Het effect van de stroming op gaswassers/filters wordt onderzocht in WP1B. Kleppen worden in andere studies onderzocht vanuit het oogpunt van materiaalcompatibiliteit, maar dit WP heeft wel betrekking op de kans dat kleppen geluid en turbulentie veroorzaken (met name regelkleppen die grote drukval veroorzaken). Compressieapparatuur wordt uitgesloten, aangezien waterstofcompressie en strategieën ter beperking van daaruit voortvloeiende pulsaties, zoals demperontwerp, als volwassen technologie worden beschouwd [12]. De invloed van de stroomsnelheid op de flowmeting maakt deel uit van de onderzoeken die bij WP1D zijn uitgevoerd, en is dus ook niet meegenomen.

Tabel 1-1 toont het verband tussen de stromingsgerelateerde verschijnselen die onderwerp zijn van dit onderzoek (zoals opgesomd in par. 1.2) op basis van de verschillende segmenten van het Nederlandse gastransport- en distributiesysteem. Drukval speelt bij alle segmenten een belangrijke rol vanwege het verband met de pijpleidingcapaciteit. Bij installaties waarbij het drukverlies voornamelijk wordt veroorzaakt door een drukverlagende voorziening, zoals een M&R-station van een gasdistrictstation, speelt dit een minder belangrijke rol. Vermoeiingsbreuken in intrusieve apparatuur zijn doorgaans alleen relevant op knooppunten van het netwerk waar metingen worden verricht, maar niet voor de pijpleidingen zelf. Hetzelfde geldt voor stromingsgeïnduceerde turbulentie en door geluid geïnduceerde vibratie. Stromingsgeïnduceerde pulsaties zijn alleen relevant in het HTL- en RTL-gedeelte van het systeem (d.w.z. bij GTS en niet RNB's). Stromingsgeïnduceerd geluid is ook alleen relevant voor knooppunten van het netwerk in verband met Arbo-omstandigheden, maar niet voor de transportpijpleidingen. Gezien de nabijheid van afnemers is het van belang inzicht te krijgen in stromingsgeïnduceerd geluid voor pijpleidingen in RNB-systemen. Erosie is een onderwerp dat overal van toepassing is waar vaste deeltjes aanwezig kunnen zijn. Om verschillende redenen, meer in het bijzonder de preventieve maatregelen die zijn genomen, speelt dit momenteel niet bij aardgas. De effecten ervan zouden echter bij alle segmenten van het netwerk een rol spelen daarom worden in de analyse de typische omstandigheden voor alle segmenten bestudeerd.

Tabel 1-1. Fundamentele aspecten in verband met gasstromen bij hoge snelheid en aansluiting op de verschillende segmenten van het gastransport- en -distributiesysteem. Zie voor toelichting de begeleidende voetnoten in de tekst zelf.

Segment van het gassysteem	Drukval	FIV intrusieve apparatuur	Stromingsgeïnduceerde	Stromingsgeïnduceerde	Akoestisch geïnduceerde	Stromingsgeïnduceerd geluid	Erosie
HTL - pijpleiding	x						x
HTL - compressorstation	x	x	x	x	x	x	x
HTL - opslagstation	x	x	x	x	x	x	x
HTL - M&R-station	x	x	x	x	x	x	x
HTL - GOS	x	x	x	x	x	x	x
RTL - pijpleidingen	x						x
RTL - GOS	x	x	x	x	x	x	x
RNB - HD-pijpleidingen	x	x				x	x
RNB - LD-pijpleidingen	x	x				x	x
RNB - gasdistributiestationen	x	x	x		x	x	x
RNB - gasdistrictstationen	x	x	x		x	x	x
RNB tot aan gasmeter huishouden	x		x			x	x

1.5 Beschrijving van het rapport

In het eerste hoofdstuk na deze inleiding, hoofdstuk 2, wordt de basisinformatie over het transport van waterstof en de vergelijking ervan met aardgas (G-gas) behandeld. Daarna lopen de hoofdstukken parallel met elk van de vragen die in de Scope van de werkzaamheden zijn geïntroduceerd. Hoofdstuk 3 is gewijd aan het effect van waterstofstromen met hoge snelheid op intrusieve apparatuur, met name (al dan niet ommantelde) thermometers en thermowells. Het onderwerp stromingsgeïnduceerde turbulentie wordt geïntroduceerd in hoofdstuk 4. Stromingsgeïnduceerde pulsaties voor waterstof worden onderzocht in hoofdstuk 5. Stromingsgeïnduceerd geluid en de mogelijke gevolgen daarvan voor de integriteit worden beschreven in hoofdstuk 6, terwijl de afstraling van dergelijk geluid wordt behandeld in hoofdstuk 7. Erosie ten slotte, wordt behandeld in hoofdstuk 8. Hoofdstuk 9 sluit af met een algemene samenvatting en een aantal slotopmerkingen.

De opzet van de hoofdstukken 3-8 is steeds gelijk. Aangezien de onderzochte onderwerpen ook relevant zijn voor het huidige netbeheer bij aardgas, is in het algemeen het eerste gedeelte van het hoofdstuk gewijd aan het beschrijven van de bestaande situatie met betrekking tot dat onderwerp. Bijvoorbeeld: hoe wordt nu omgegaan met stromingsgeïnduceerde pulsaties, resp. welke problemen kunnen zij veroorzaken. Daarna volgt een gedeelte waarin wordt beschreven hoe dergelijke risico's momenteel worden gekwantificeerd, gevolgd door een generieke benchmark tussen aardgas en waterstof op basis van de kwantificeringsmethoden die in het gedeelte ervoor zijn beschreven. Op basis van de benchmark worden algemene conclusies getrokken. Ter afsluiting van elk hoofdstuk worden toepassingsvoorbeelden gegeven voor typische onderdelen of leidingconfiguraties die in het Nederlandse gastransport- en distributiesysteem voorkomen.

2 Waterstoftransport

2.1 Energietransportcapaciteit

Energie kan worden opgeslagen in waterstof (H_2). Als energiedrager heeft waterstof een zeer hoge specifieke energie (d.w.z. per massa-eenheid), terwijl het een zeer lage energiedichtheid (d.w.z. per volume-eenheid) heeft. Zie Figuur 2-1 voor een vergelijking van waterstof met andere stoffen of technologieën.

Volume - en daarmee druk - zijn zeer belangrijke parameters in verband met de transport- en opslagcapaciteit van een eventueel op waterstof gebaseerd energiesysteem. Deze parameters bepalen ook de uiteindelijke kosten van de onderdelen die de energie-infrastructuur vormt. Zonder rekening te houden met een aantal tweede orde-effecten: als dezelfde hoeveelheid energie moet worden getransporteerd met waterstof en aardgas bij vergelijkbare druk, moet het volume van waterstof drie keer zo snel stromen.

De vergelijking voor energietransport \dot{q} [MJ/s] hangt af van de massastroom \dot{m} [kg/s] en de energie-inhoud per massa-eenheid van de stof, bijvoorbeeld uitgedrukt door de hogere verbrandingswaarde HHV [MJ/kg]. In plaats daarvan kan ook de lagere verbrandingswaarde worden gebruikt.

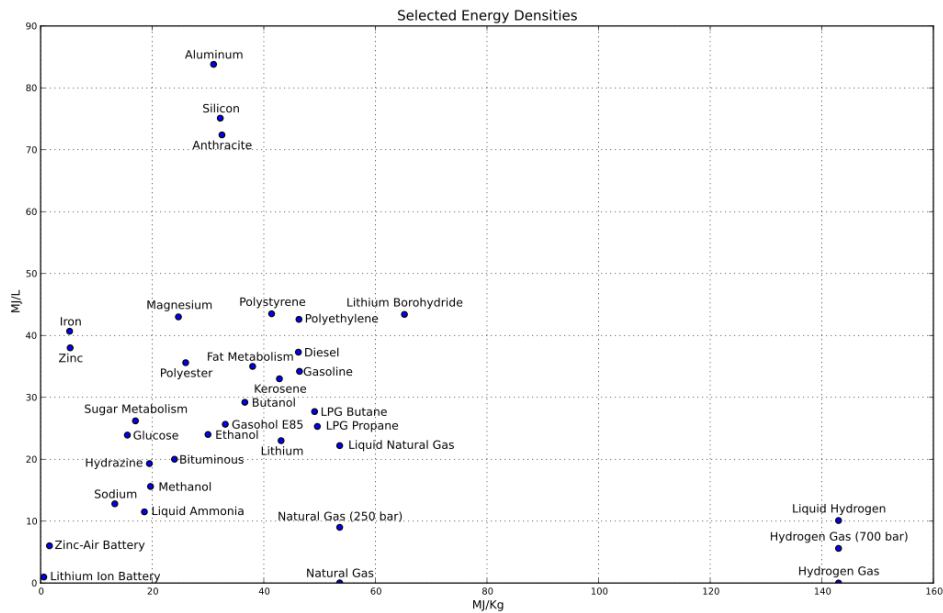
$$\dot{q} = \dot{m} HHV \quad (\text{vergelijking 1})$$

Om het effect van de druk op een bepaalde referentielocatie expliciet te maken, kan dit worden herschreven als:

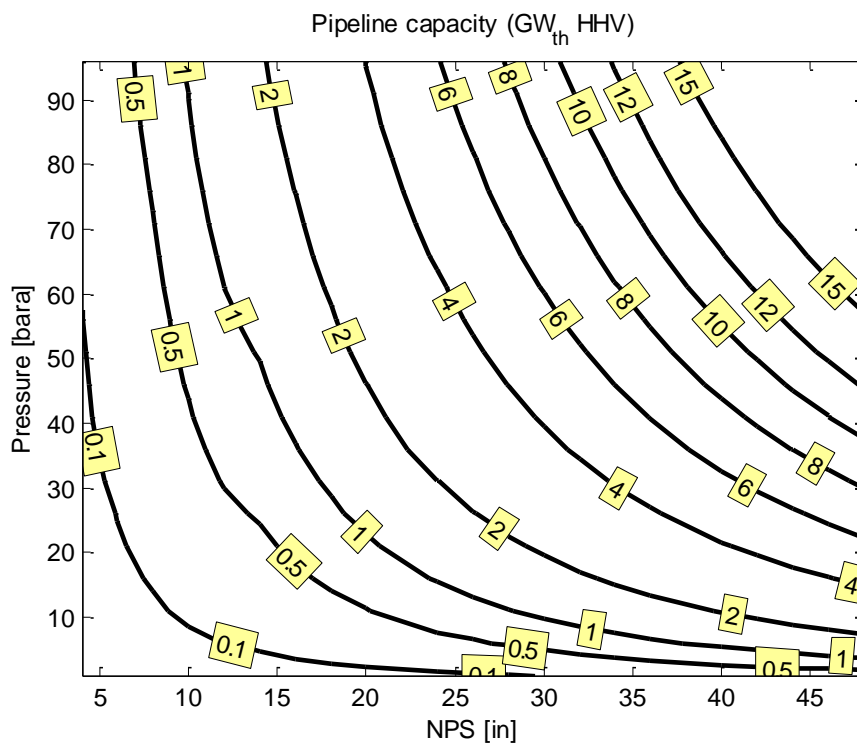
$$\dot{q} = \frac{P}{z R T} U \frac{\pi (ID)^2}{4} HHV \quad (\text{vergelijking 2})$$

waarbij P de absolute druk [Pa(a)] is, z de samendrukbaarheidsfactor [-] is, R de specifieke gasconstante [J/kg K] is, T de absolute temperatuur [K] is, U de stroomsnelheid [m/s], en ID de binnendiameter van de pijpleiding [m] is. Voor pijpleidingtransport zijn de fysische ontwerpvariabelen dan: de druk, de nominale afmeting en wanddikte van de pijpleiding en, tenslotte, de stroomsnelheid. Deze zijn allemaal met elkaar verbonden. Een hogere druk vereist bijvoorbeeld dikkere wanden, maar de gekozen pijpleidingdiameter kan kleiner zijn; een grotere pijpleidingdiameter vermindert echter de drukval, waardoor de belasting van de compressoren afneemt en het totale systeemrendement toeneemt. Uiteindelijk moet de keuze voor een pijpleiding worden gemaakt op basis van een optimalisatie die de laagste genivelleerde transportkosten oplevert, waarbij het gehele transportsysteem in aanmerking moet worden genomen en niet alleen de leiding zelf.

De capaciteit van een pijpleiding om energie te transporteren als functie van de diameter is bijvoorbeeld weergegeven in Figuur 2-2. Hoe groter de pijpleidingdiameter of hoe hoger de druk, des te meer waterstof er kan worden getransporteerd. Als voorbeeld: een 42 inch (DN1050) pijpleiding kan bij 60 bar(a) 12 GW (th, HHV) transporteren bij stroomsnelheden van 20 m/s. Een 10 inch pijpleiding (DN250) bij 8 bar(g) kan daarentegen ongeveer 90 MW(th, HHV) transporteren bij dezelfde stroomsnelheid.



Figuur 2-1. Energiedichtheid (x-as) versus specifieke energie (y-as) voor een aantal geselecteerde items. Waterstof bevindt zich in de rechter benedenhoek van deze plot. Ontleend aan ref. [13].



Figuur 2-2. Energietransportcapaciteit met H₂ uitgedrukt in GW (thermisch, gebaseerd op HHV) van verschillende nominale pijpleidingdiameters (schema XS) bij verschillende druken. Bij de referentieomstandigheden is uitgegaan van een temperatuur van 10 °C en een stroomsnelheid van 20 m/s.

2.2 Stroomsnelheidsratio

In het voorgaande is besproken dat de energietransportcapaciteit van een pijpleiding afhankelijk is van:

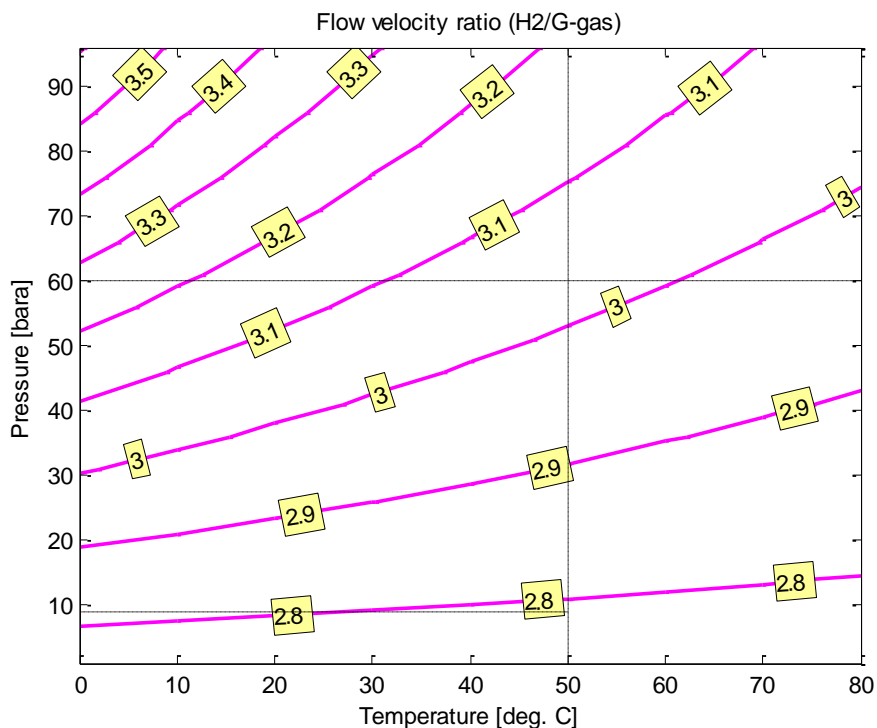
- De diameter van de pijpleiding
- de bedrijfsdruk
- de energiedrager (aardgas, waterstof, mengsels daarvan, etc.)

Het verschil in stroomsnelheid voor twee energiedragers om dezelfde hoeveelheid energie te transporteren kan worden verkregen uit (vergelijking 1), resulterend in:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{HHV_2}{HHV_1} \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (\text{vergelijking 3})$$

Waarbij ρ de dichtheid is van het gas [kg/m^3] bij een gegeven toestand die wordt bepaald door de druk en de temperatuur.

De stroomsnelheidsratio die nodig is om G-gas door waterstof te vervangen en nog steeds dezelfde hoeveelheid energie te transporteren, wordt gegeven in Figuur 2-3. Hoewel de vaak genoemde ratio van 3 een goede nominale vuistregel is, kan deze waarde ten gevolge van reële gaseffecten (de samendrukbaarheidsfactor z gegeven in (vergelijking 2)), variëren tussen $\sim 3,4$ voor hogedrukomstandigheden en 2,7-2,8 voor de RNB-systemen.



Figuur 2-3. Stroomsnelheidsratio tussen waterstof en G-gas om dezelfde hoeveelheid energietransportcapaciteit te verkrijgen (gebaseerd op HHV). De zwarte horizontale/verticale lijnen scheiden de verschillende gebieden van het energietransportsysteem: hoge druk en hoge temperatuur staan voor de compressor-uitlaattoestand; hoge druk en lage temperatuur geven de transportleiding-inlaattoestand weer; de middendrukken geven het regionale transportsysteem (RTL) weer, en de drukken lager dan 8 bar(g) geven de RNB-systemen weer.

2.3 Drukval

De stroming door een pijpleiding wordt tegengewerkt door wrijvingskrachten bij de wanden. De energie die nodig is om deze weerstand te overwinnen resulteert in drukverliezen. Voor de drukgradiënt $\partial P/\partial x$ op een bepaalde axiale locatie x van een (horizontale) pijpleiding geldt:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = f \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{1}{ID} \quad (\text{vergelijking 4})$$

Hierin is f de wrijvingsfactor [-], die een functie is van het Reynolds-getal en de zandkorrel-ruwheid (een maat voor de gladheid van het binnenoppervlak), d.w.z. $f = f\left(Re, \frac{\epsilon}{ID}\right)$. Bij afwezigheid van warmteoverdracht door de pijpleidingwanden neemt de vloeistofdichtheid af, waardoor de stroomsnelheid toeneemt en een grotere drukgradiënt ontstaat. Daarom zijn de drukverliezen niet over de gehele lengte van de pijpleiding constant. Hoewel er exacte oplossingen bestaan in geval van vereenvoudigende aannames, moeten deze uiteindelijk numeriek worden opgelost (met behulp van rekenprogramma's). Momenteel is de gemakkelijkste manier om alle betrokken fysica weer te geven het gebruik van één-dimensionale hydraulische simulaties.

In het eenvoudigste scenario van verwaarloosbare drukval ten opzichte van de bedrijfsdruk van de pijpleiding, geen warmteoverdracht, en een voldoende hoog Reynolds-getal, kan (vergelijking 4) worden herschreven om de drukverliezen ΔP [Pa] te berekenen op basis van:

$$\Delta P = f \frac{1}{2} \rho U^2 \frac{\Delta x}{ID} \quad (\text{vergelijking 5})$$

Waarbij f de wrijvingsfactor [-] is en Δx de lengte van de pijpleiding [m].

2.3.1 Waterstof t.o.v. G-gas

Wanneer (zuivere) waterstof alleen qua drukverlies met aardgas wordt vergeleken, kunnen de volgende transportparameters worden vastgesteld om de vergelijking vast te stellen:

- vergelijkbare druk en temperatuur (P, T)
- vergelijkbare pijpleiding- en oppervlaktekwaliteit/-conditie (ID, ϵ)
- dezelfde energietransportsnelheid (\dot{q})

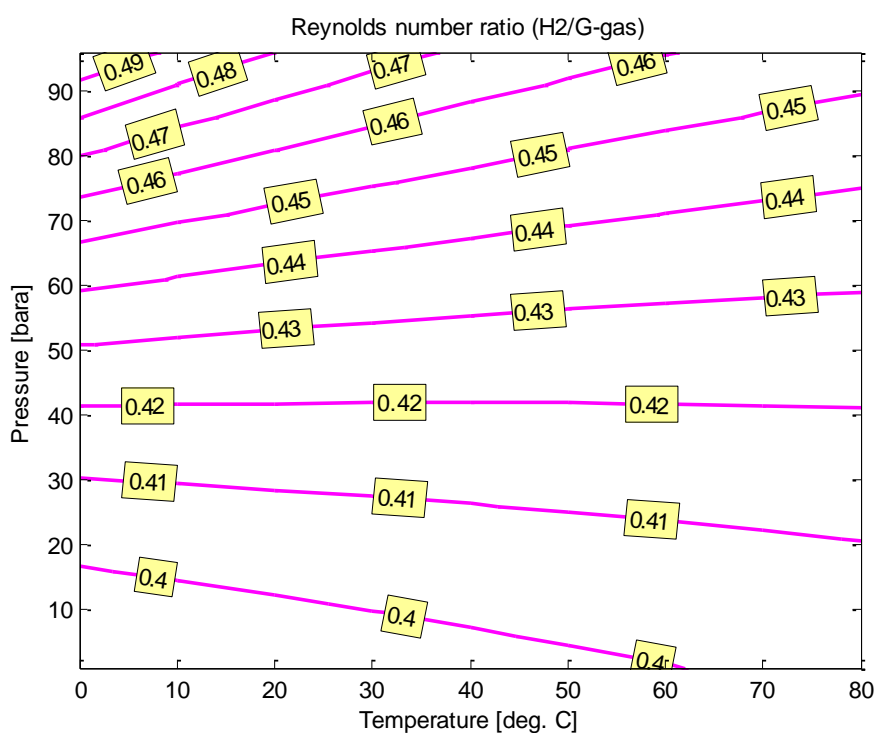
In dit scenario is het verschil in drukval tussen waterstof en aardgas (G-gas) afhankelijk van het verschil in Reynolds-getal en dynamische druk ($\frac{1}{2} \rho U^2$). Op basis van (vergelijking 3) wordt voor twee vloeistoffen/gassen die worden gebruikt om energie te transporteren op basis van de hierboven vermelde aannames de ratio van het Reynolds-getal berekend volgens:

$$\frac{Re_1}{Re_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \frac{HHV_2}{HHV_1} \quad (\text{vergelijking 6})$$

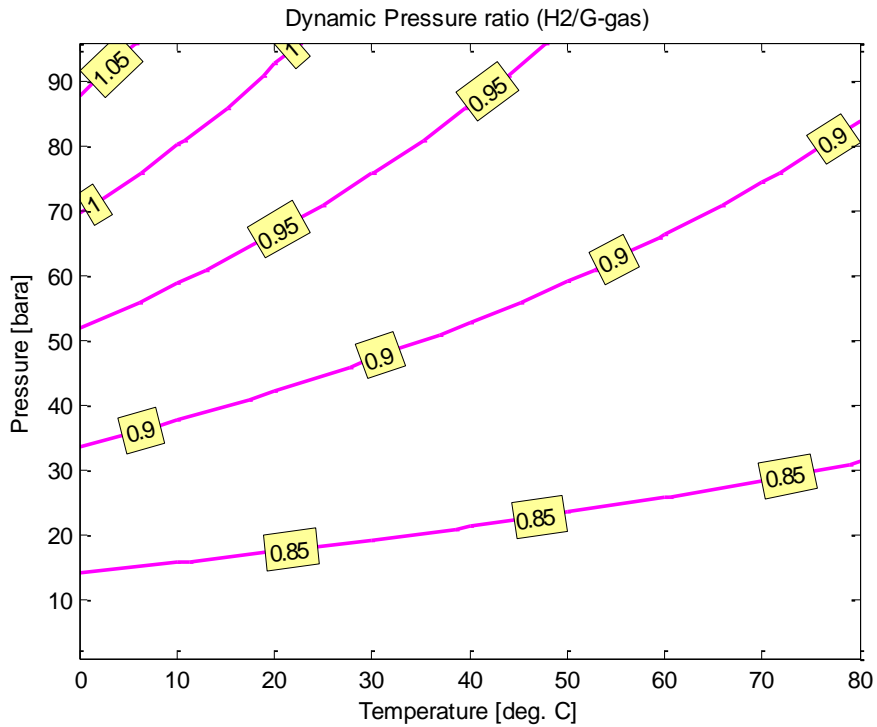
waarbij μ de dynamische viscositeit [kg/m s] is. De ratio voor de dynamische druk volgt uit:

$$\frac{\frac{1}{2} \rho_1 U_1^2}{\frac{1}{2} \rho_2 U_2^2} = \left(\frac{HHV_2}{HHV_1}\right)^2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right) \quad (\text{vergelijking 7})$$

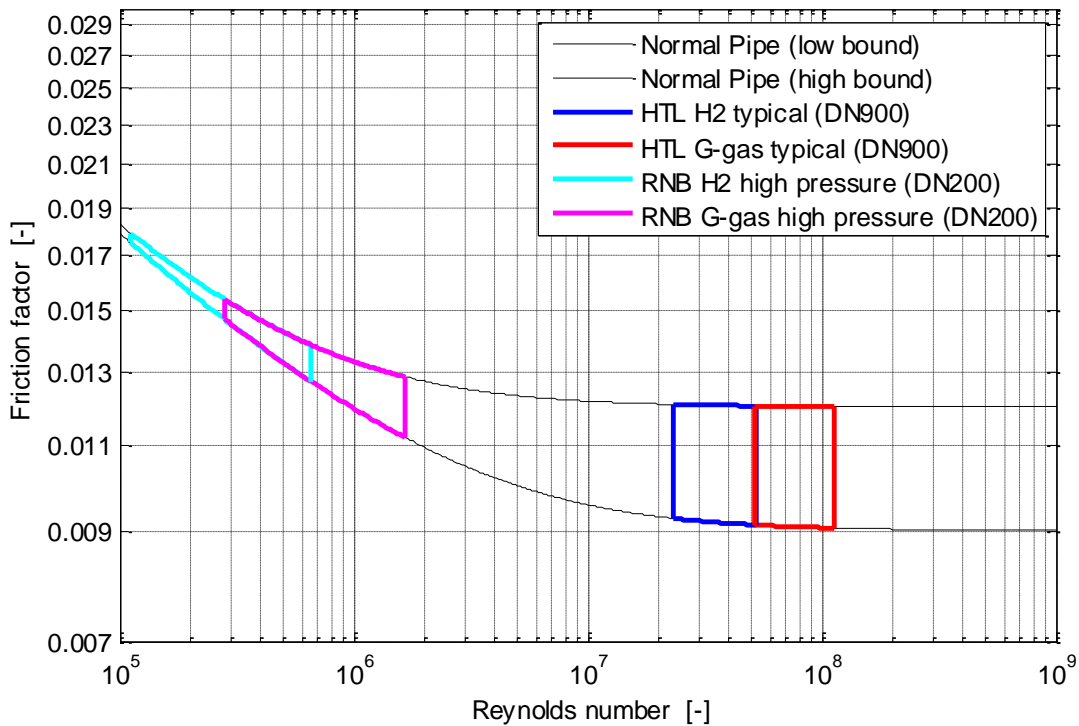
De resultaten voor beide ratio's zijn gegeven in Figuur 2-4 en Figuur 2-5. Hieruit blijkt dat het Reynolds-getal dat bereikt wordt in de waterstofstroom 40-50% bedraagt van dat van G-gas onder de hierboven gegeven omstandigheden, terwijl de dynamische druk ongeveer gelijk is. Dit betekent dat bij de limiet waarbij het Reynolds-getal hoog genoeg is om er niet toe te doen (constante wrijvingsfactor), de drukval die in de verschillende scenario's wordt ervaren, ongeveer gelijk is. Dat deze limiet van toepassing is, is waarschijnlijker in het HTL-gedeelte van het gastransportsysteem vanwege de hogere druk (zie Figuur 2-6). Het bereik van het Reynolds-getal voor typische HTL-condities is hoog genoeg, zodat de wrijvingsfactor niet verandert wanneer wordt overgeschakeld op waterstof (bij stroomsnelheden die overeenstemmen met het transporteren van dezelfde hoeveelheid energie). Dit geldt echter niet voor het RNB-systeem. Op grond van de ratio van het Reynolds-getal (ook weergegeven in Figuur 2-4) wordt een feitelijke toename van de wrijvingsfactor verwacht. Dat zou betekenen dat bij deze lage Reynolds-getallen de drukval kan toenemen. Een uitzondering hierop zou ook nog mogelijk zijn indien de pijpleidingen over de gehele lengte van het systeem stof en zand bevatten. In dat geval is er bij een lager Reynolds-getal sprake van een gebied waarin de wrijvingsfactor wordt gedomineerd door de oppervlaktekwaliteit. Deze uitzondering wordt niet verwacht.



Figuur 2-4. Ratio Reynolds-getal tussen waterstof en aardgas bij gelijke bedrijfsomstandigheden.



Figuur 2-5. Ratio dynamische druk tussen waterstof en aardgas bij gelijke bedrijfsomstandigheden.



Figuur 2-6. Wrijvingsfactor als functie van het Reynolds-getal voor aardgas en waterstof voor HTL (> 40 bar(g), DN900) en RNB standaardomstandigheden (<8 bar(g), DN200).

2.3.1.1 Voorbeelden

Om de discussie hierboven beter te begrijpen voor praktijksituaties, wordt in Tabel 2-1 een aantal voorbeelden gegeven. De voorbeelden komen overeen met een transportleiding van het HTL-systeem, het HD-segment van een RNB-systeem en het LD-segment van een RNB-systeem in de nabijheid van huishoudelijke gebruikers. Een vierde casus voor de configuratie in de nabijheid van huishoudelijke gebruikers is toegevoegd om het effect te begrijpen van pijpleidingen met meer verontreiniging door stofdeeltjes of materialen met slechtere oppervlaktekwaliteit. In deze voorbeelden is het algemene beeld dat de drukverliezen zeer vergelijkbaar zijn wanneer aardgas en waterstof met vergelijkbare energiesnelheden worden vergeleken, zoals werd verwacht op grond van het onderzoek van Figuur 2-5. In het algemeen is drukval met H₂ in het voordeel wanneer de snelheidsratio <3 wordt. In het geval van schone pijpleidingen waarvan de wrijvingsfactor niet wordt gedomineerd door de oppervlaktekwaliteit (voorbeeld 3), geeft waterstof iets grotere verliezen. Dit is te wijten aan het lagere Reynolds-getal in vergelijking met G-gas, waardoor de wrijvingsfactor toeneemt. Dit bevestigt de eerdere bevindingen in de referenties [8] [14].

Gezien vanuit het oogpunt van de capaciteit van de pijpleiding, en in dit stadium andere potentieel beperkende factoren buiten beschouwing latend (zoals besproken in verdere hoofdstukken van dit rapport), kan met waterstof dezelfde energieflex worden getransporteerd als momenteel met aardgas (G-gas).

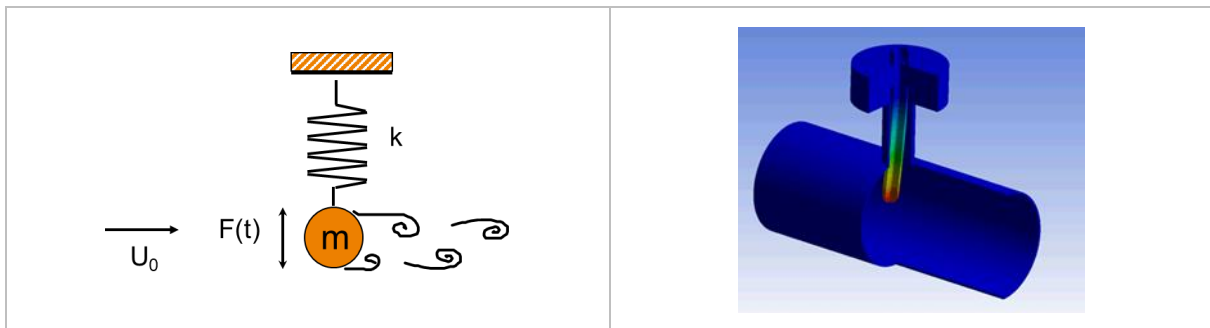
Tabel 2-1. Drukvalgradiënten voor verschillende configuraties met G-gas en waterstof. De stroomsnelheid voor waterstof wordt berekend op basis van de waarden die zijn weergegeven in Figuur 2-3.

Parameter	G-gas	H ₂	G-gas	H ₂	G-gas	H ₂	G-gas	H ₂
Binnendiameter [mm]	1200	1200	200	200	25	25	25	25
Oppervlakteruwheid [µm]	50	50	20	20	20	20	100	100
Druk [bar(g)]	80	80	8	8	0,1	0,1	0,1	0,1
Temperatuur [°C]	10	10	10	10	10	10	10	10
Stroomsnelheid [m/s]	10	34	10	28	10	27,5	10	27,5
Dichtheid [kg/m ³]	75,0	6,6	7,2	0,768	0,793	0,0856	0,793	0,0856
Viscositeit [kg/m s]	1,36E-05	8,70E-06	1,15E-05	8,60E-06	1,13E-05	8,60E-06	1,13E-05	8,60E-06
Reynolds # [-]	6,62E+07	3,10E+07	1,25E+06	5,00E+05	1,75E+04	6,84E+03	1,75E+04	6,84E+03
Darcy-wrijvingsfactor [-]	0,0103	0,0103	0,0131	0,0143	0,0280	0,0352	0,0333	0,0388
Drukval [bar/km]	0,321	0,329	0,236	0,215	0,444	0,456	0,528	0,503

3 Intrusieve apparatuur

3.1 Intrusieve apparatuur in aardgastransportsystemen

In procesapparatuur en gastransportsystemen moet bepaalde instrumentatie in direct contact staan met het procesmedium, en dringt daardoor tot ver in de pijpleidingen door. Voorbeelden van dergelijke instrumenten zijn temperatuurmeters (thermowells), erosiesondes zoals gebruikt in de upstream olie- en gasindustrie, of V-cone flowmeters. Bij gastransportsystemen zijn thermowells het meest voorkomende instrument dat tot in de stroming doordringt. Er bestaat een potentieel risico op vermoeiingsbreuken als gevolg van de coïncidentie van de mechanische resonantiefrequentie van de apparatuur en de vortex-afschudfrequentie van de stroming rond de apparatuur. Vibraties in een dergelijke toestand kunnen grote cyclische spanningen veroorzaken in de buurt van de voet van de thermowell. Wanneer een thermowell faalt (vermoeiingsbreuk), kan deze uiteindelijk losraken van zijn voet en zich stroomafwaarts door de pijpleiding verplaatsen. De schade die daardoor kan ontstaan, kan dus ernstig zijn. Het basismechanisme is vergelijkbaar met de grote harmonische oscillaties die bij harde wind bij lichtmasten kan worden waargenomen.



Figuur 3-1. Links: basismechanisme voor stromingsgeïnduceerde vibraties; rechts: illustratie van een thermowell die onderhevig is aan harmonische oscillaties (de kleur geeft de verplaatsing ten opzichte van de evenwichtspositie aan) als gevolg van de coïncidentie van de vortex-afschudding rond de buis van het instrument en zijn mechanische resonantie frequentie.

3.2 Beoordeling van stromingsgeïnduceerde vibraties voor thermowells

Het risico van dit bekende faalmechanisme kan worden beoordeeld aan de hand van twee elkaar overlappende normen: de AVIFF-richtlijnen [15] en ASME PTC 19.3 TW-2016 [16]. Bij sommige thermowell-ontwerpen wordt dit risico ondervangen door vortexbrekers in te bouwen, waardoor de coherentie van het vortex-afschudmechanisme teniet wordt gedaan en het risico dus verdwijnt. De meeste bestaande apparaten in het gasnet hebben echter een standaardontwerp (recht, getrap of conisch).

In de basisaanpak voor de evaluatie van het risico van stromingsgeïnduceerde vibraties worden de vortex-afschudfrequentie van de stroming rond de thermowell en de mechanische natuurlijke frequentie ervan berekend. De thermowell wordt daarbij beschouwd als een flexibele staaf. De aerodynamische krachten werken dwars op de as van de thermowell: een fluctuerende trekkracht staat evenwijdig aan de stroming, terwijl een fluctuerende liftkracht loodrecht op de stroming staat. Trekkrachten worden uitgeoefend met een tweemaal zo hoge frequentie als liftkrachten, maar zij kunnen een orde van grootte zwakker zijn. Er bestaat een groot risico wanneer de vortex-afschuifrequentie bij de maximaal mogelijke stroomsnelheid hoger is dan de mechanische resonantie frequenties van het apparaat, omdat dit betekent dat tijdens bedrijf resonanties kunnen worden aangestoten.

Zie ook ASME PTC 19.3 TW-2016 [16] voor een volledige beschrijving van de betreffende vergelijkingen. Hier wordt alleen de belangrijkste vergelijking toegelicht die nodig is om de

benchmark tussen aardgas en waterstof te onderbouwen. De vortex-afschudfrequentie f_s [Hz] kan als volgt worden berekend op basis van het dimensieloze Strouhal-getal Sr_s [-]:

$$Sr_s = \frac{f_s d_{th}}{U} \quad (\text{vergelijking 8})$$

waarbij d_{th} de tip-buitendiameter van de thermowell [m] en U de gemiddelde stroomsnelheid in de hoofdleiding [m/s] is. Voor alle toepassingen met een hoog Reynolds-getal van meer dan 5×10^5 is het Strouhal-getal 0,22.

Bij de benchmark tussen aardgas en waterstof worden alleen het procesmedium en de beoogde snelheid ervan in aanmerking genomen. Er wordt van uitgegaan dat het ontwerp van de thermowell constant blijft (de aanname is hergebruik) en dus ook alle mechanische eigenschappen ervan (zowel aardgas als waterstof hebben geen toegevoegde massa-invloed bij gastransportcondities). Daarom is alleen (vergelijking 8) noodzakelijk.

3.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof

Voor een gegeven thermowell is de vortex-afschudfrequentie van waterstof in vergelijking met die van aardgas gelijk aan de stroomsnelheidsratio, zoals reeds gegeven door (vergelijking 3) en Figuur 2-3. Indien het mechanische ontwerp van de thermowell correct is gedimensioneerd voor mechanische resonantie frequenties die ruim boven de maximaal mogelijke vortex-afschudfrequentie met aardgas liggen, moet de marge meer dan ~ 3 bedragen om nog steeds conform te zijn voor gebruik met waterstof (bij vergelijkbare energietransportsnelheden).

3.4 Voorbeelden

Netbeheer Nederland heeft het HyDelta-consortium gefaciliteerd met de afmetingen van veel voorkomende ontwerpen in zowel het hogedrukgastransportsysteem (GTS) als de distributienetten (RNB):

- Korte (100 mm) en lange (160 mm) bescherming voor een thermometer geschikt voor gebruik bij maximaal 80 bar(g), rechte uitvoering. Labels A1 en A2.
- Korte (90 mm) en lange (140 mm) bescherming voor een temperatuursensor geschikt voor gebruik bij maximaal 80 bar(g), taps toelopend ontwerp. Labels B1 en B2.
- Korte (95 mm) en lange (120 mm) thermowells voor een bedrijfstemperatuur van maximaal 20 bar(g), rechte uitvoering. Labels C1 en C2.

De belangrijkste afmetingen van deze thermowells en de resultaten van de berekeningen zijn samengevat in Tabel 3-1. De belangrijkste constatering is dat korte en taps toelopende ontwerpen, zoals verwacht, een lager risico vertonen in vergelijking met lange, rechte uitvoeringen. In deze voorbeelden kunnen A1, B1 en B2 een waterstofstroom aan die gelijkwaardig is aan die van aardgas; A2 en C1 kunnen dat mogelijk ook, afhankelijk van de feitelijke locatie; C2 moet mogelijk worden vervangen, tenzij het zich op een locatie in het distributienet bevindt waar de stroomsnelheden gematigd zijn.

3.5 Conclusie

Omdat de stroomsnelheid bij waterstof zal toenemen, is het risico op resonanties groter vanwege de proportionele toename van de vortex-afschuifrequentie. Of dit risico inderdaad bestaat, moet van geval tot geval worden beoordeeld. In de geanalyseerde voorbeelden is vervanging van de thermowells vereist bij snelheden hoger dan 28 m/s voor RNB's en hoger dan 38 m/s voor GTS.

Tabel 3-1. Voor een overzicht van de afmetingen van de thermowell en de daaruit voortvloeiende maximaal toelaatbare stroomsnelheden zie ref. [16].

Label	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Systeem	GTS	GTS	GTS	GTS	RNB	RNB
Vorm	recht	recht	taps	taps	recht	recht
Nominale lengte [mm]	100	160	90	140	95	120
Ontwerpdruk [bar(g)]	80	80	80	80	20	20
TW tipdiameter [mm]	13	13	9,7	13	8	8
Strouhal-getal	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Eerste mechanische natuurlijke frequentie [Hz]	5025	1644	3351	1907	3153	1971
Maximaal toelaatbare stroomsnelheid [m/s]	118,8	38,9	91,4	69,4	45,9	28,7

4 Stromingsgeïnduceerde turbulentie

4.1 Stromingsgeïnduceerde turbulentie in aardgastransportsystemen

De stroming van aardgas is in de meeste delen van het netwerk van nature turbulent. Wanneer de snelheid van een vloeistofstroom toeneemt, zal de amplitude van de stochastische fluctuaties die met de turbulentie gepaard gaan, toenemen. Afhankelijk van de constructie van de pijpleidingen waar het gas doorheen stroomt, kunnen deze fluctuaties uiteindelijk tot vibraties leiden. Vooral op plaatsen waar de stromingsrichting verandert, zoals bij de bocht- en T-stukken, zullen de turbulente structuren zich vaker organiseren in bepaalde lengteschalen en energieverder worden, waardoor het risico van stromingsgeïnduceerde vibraties toeneemt. Het is gebruikelijk om drukval op te vatten als een maat voor de turbulente fluctuaties die in de stroming optreden: hoe groter de drukval, des te meer fluctuaties er optreden.

Omdat stromingsgeïnduceerde turbulentie sterk afhankelijk is van de kinetische energie van de stroming, is de kans groter dat zich problemen voordoen in het hogedruksysteem. Zo zou voor G-gas bij 0,1 bar(g), een typische druk voor het einde van het distributienetwerk, bijvoorbeeld de stroming meer dan 75 m/s moeten bedragen om zelfs maar een kleine kans te hebben om vibraties op te wekken. Bij 60 bar(g) daalt deze waarde tot ongeveer 9 m/s, hetgeen ruim binnen het realistische bedrijf van hogedruk-installaties valt. In het algemeen zijn door turbulentie veroorzaakte stromingsgeïnduceerde vibraties echter geen probleem in gastransportsystemen, aangezien de ondersteunende pijpleidingconfiguraties grotendeels volstaan om de bewegingen die dergelijke stromingsschommelingen kunnen veroorzaken, op te vangen.

4.2 Beoordeling van stromingsgeïnduceerde turbulentie

De 'Guidelines for Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure' van het Energy Institute bieden de meest gebruikelijke methode om het risico van stromingsgeïnduceerde vibraties te beoordelen. Er wordt een score 'Likelihood of Failure, LoF' gedefinieerd om het risico te beoordelen dat wordt veroorzaakt door stromingsgeïnduceerde turbulentie:

$$LoF = FVF \frac{\rho U^2}{F_V} \quad (\text{vergelijking 9})$$

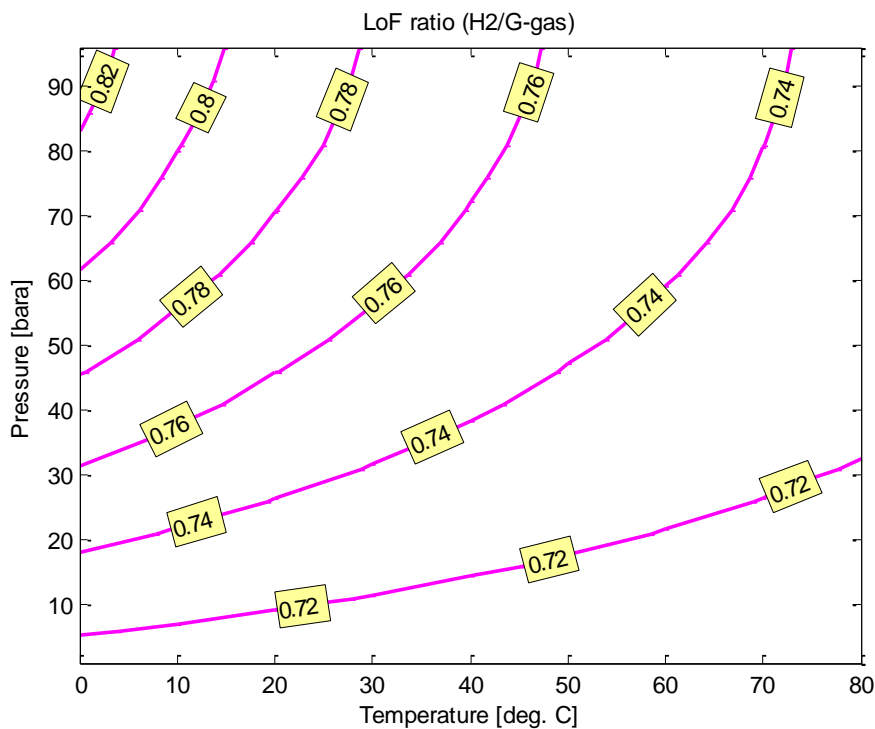
waarbij FVF de vloeistofviscositeitsfactor, ρ de vloeistofdichtheid, U de gemiddelde stroomsnelheid en F_V een mechanische factor afhankelijk van de stijfheid van de leidingen is. De vloeistofviscositeitsfactor hangt alleen af van de gaseigenschappen. De stromingsgeïnduceerde vibratieparameter hangt alleen af van de mechanische constructie van het pijpleidingstelsel.

4.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof

Ervan uitgaande dat de mechanische constructie van de pijpleidingen bij gebruik van waterstof precies hetzelfde of vergelijkbaar zal zijn, en met invoering van de definitie van de FVF , wordt de LoF ratio van twee vloeistoffen als volgt geschaald:

$$\frac{LoF_1}{LoF_2} = \sqrt{\frac{\mu_1 \rho_1 U_1^2}{\mu_2 \rho_2 U_2^2}} \quad (\text{vergelijking 10})$$

Wanneer waterstof en aardgas (G-gas) bij gelijke energiesnelheden en bedrijfsomstandigheden worden vergeleken, worden de in Figuur 4-1 weergegeven resultaten verkregen. Het blijkt dat voor alle omstandigheden die zich in het Nederlandse aardgastransportsysteem voordoen, het risico van stromingsgeïnduceerde vibratie als gevolg van turbulentie bij gebruik van waterstof lager is dan bij gebruik van G-gas.



Figuur 4-1. Ratio van LoF-score wanneer waterstof wordt vergeleken met aardgas bij vergelijkbare energietransportcapaciteiten en bedrijfsomstandigheden.

4.4 Voorbeelden

Ter illustratie van de in dit hoofdstuk getrokken conclusies worden in Tabel 4-1 twee voorbeelden gegeven. De LoF-scores blijken ruim onder de eerste drempelwaarde te liggen die verdere aandacht behoeft (LoF > 0,3).

4.5 Conclusie

Het risico op stromingsgeïnduceerde turbulentie is bij waterstoftransport lager, zelfs bij significant hogere stroomsnelheden die nodig zijn om dezelfde hoeveelheid energie te vervoeren. Aangezien dit mechanisme normaliter geen probleem is in aardgastransportsystemen, zal dit bij waterstoftransportsystemen ook zo zijn.

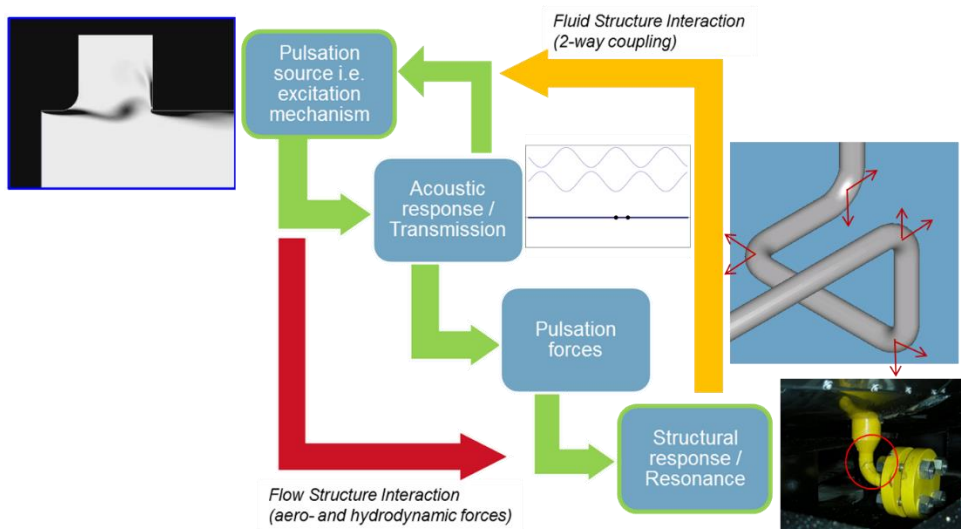
Tabel 4-1. Voorbeelden van de berekening van het risico van stromingsgeïnduceerde turbulentie voor het gastransportsysteem, uitgaande van een gemiddeld stijf pijpleidingontwerp en standaard pijpleidingwanddikten.

	GTS		RNB	
	G-gas	H ₂	G-gas	H ₂
Druk [bar(a)]	60	60	1,1	1,1
Stroomsnelheid [m/s]	20	64	20	55
Leidingdiameter (DN)	900	900	100	100
FVF [-]	0,113	0,093	0,107	0,093
Kinetische energie [kg/ m s²]	21800	20480	316	259
LoF [-]	0,097	0,075	0,004	0,003

5 Stromingsgeïnduceerde pulsaties

5.1 Stromingsgeïnduceerde pulsaties in aardgastransportsystemen

Stromingsgeïnduceerde pulsaties (Flow-Induced Pulsations, FIP) kunnen ontstaan als gevolg van interactie tussen stroming/geluid, meestal wanneer de stroming langs doodlopende zijtakken loopt. De interactie treedt op als de frequentie van de akoestische bron (de zgn. 'shear-layer'-instabiliteit) gelijk is aan de akoestische resonantiefrequenties van de pijpleiding. Ernstige vibraties kunnen ontstaan indien ook mechanische resonantie frequenties van de pijpleiding samenvallen met deze frequentie. Over een langere periode van bedrijf met dergelijke vibraties kunnen vermoeingsbreuken ontstaan. Naast mechanische storingen kunnen door hoge pulsationiveaus ook geluid en fouten in de flowmeting worden veroorzaakt. Integriteitsrisico's als gevolg van stromingsgeïnduceerde pulsaties zijn alleen relevant in GTS-installaties, omdat hoge drukken nodig zijn om krachten met voldoende energie op te wekken om schade te veroorzaken. RNB-systemen worden dus niet getroffen door FIP-risico's.



Figuur 5-1 Een interactie tussen stromingsinstabiliteiten en akoestische resonantie kan leiden tot mechanische vibraties en uiteindelijk tot vermoeingsbreuken.

5.2 Beoordeling van stromingsgeïnduceerde pulsaties

Voor een bepaalde pijpleidinggeometrie hangt de bronfrequentie af van de stroomsnelheid, terwijl de akoestische resonantiefrequenties afhangen van de geluidssnelheid van het medium. Daarom treden voor een bepaalde 'dode-leiding'-geometrie, gekenmerkt door haar lengte L_{sb} en binnendiameter d_{sb} , resonantieverschijnselen op in de buurt van bepaalde Machgetallen waaraan de resonantie-Machgetallen M_{res} kunnen worden toegekend (verhouding tussen de werkelijke stroomsnelheid en de geluidssnelheid). De verschillende akoestische resonanties n van een 'dode' zijtakconfiguratie treden dan op bij:

$$M_n^{res} = \left(\frac{2n - 1}{4} \right) \left(\frac{d_{sb}}{L_{sb}} \right) \left(\frac{1}{Sr} \right) \quad (\text{vergelijking 11})$$

waarbij Sr het Strouhal-getal is van het vortex-afschudmechanisme bij de T-verbindingen, gedefinieerd als:

$$Sr = \frac{f d_{SB}}{U} \quad (\text{vergelijking 12})$$

waarbij f de centrale frequentie van de vortex-afschudding [Hz], en U de gemiddelde stroomsnelheid in de hoofdleiding [m/s] is. Deze vergelijking is dezelfde als (vergelijking 8) maar dan met een andere karakteristieke lengte.

Zodra een resonantieconditie is vastgesteld, wordt de uiteindelijke pulsatie-amplitude bepaald door een energiebalans tussen de hoeveelheid stromingskinetische energie die in akoestische energie wordt omgezet, en de dissipatie van akoestische energie door visco-thermische demping en straling naar de rest van het pijpleidingsysteem. De conversie-efficiëntie van de aero-akoestische bron wordt aangeduid met F , en de akoestische demping met α_0 [1/m]. In dat geval is de uiteindelijke pulsatieamplitude p' [Pa]:

$$p' = \rho U^2 \left(\frac{2 F}{\alpha_0 L_{sb}} \right) \quad (\text{vergelijking 13})$$

Waarbij ρ de dichtheid van het medium [kg/m³] is.

Om stromingsgeïnduceerde pulsaties te kunnen voorspellen, is het essentieel om de juiste keuzes te maken voor het Strouhal-getal en de bronsterkte, waarvan bekend is dat ze afhangen van vele parameters, zoals het Reynolds-getal, de configuratie van het stromingspad/het akoestisch pad, de afronding van de randen, de afstand tot de bochten en zelfs niet-lineaire effecten zoals de uiteindelijke pulsatieamplitude (saturatie).

5.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof

Bij het benchmarken van aardgas en waterstof wordt ervan uitgegaan dat het ontwerp van de pijpleidingen hetzelfde is, hetgeen neerkomt op een hergebruikscenario. In dat geval heeft de vergelijking tussen aardgas en waterstof hoofdzakelijk betrekking op twee vragen:

- Welke akoestische resonanties kunnen zich bij waterstof ontwikkelen?
- Welke pulsatieniveaus vallen te verwachten?

5.3.1 Pulsatieresonanties

Zoals in de vorige paragraaf is uitgelegd, ontstaan resonanties rond bepaalde Machgetallen. De ratio van de Machgetallen tussen waterstof en aardgas bij gelijke bedrijfsomstandigheden en energietransportsnelheden wordt gegeven door:

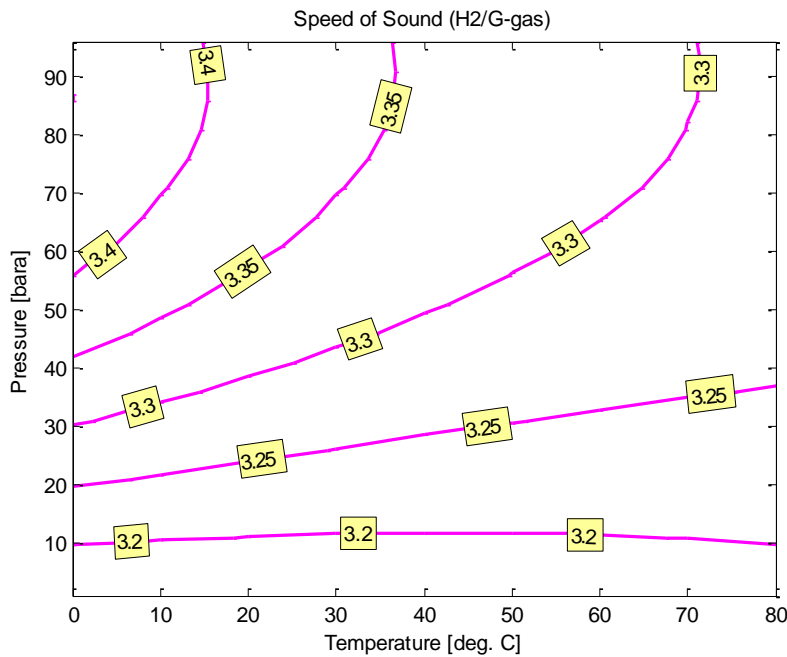
$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{U_1}{U_2} \right) \left(\frac{c_2}{c_1} \right) \quad (\text{vergelijking 14})$$

waarbij c de geluidssnelheid [m/s] is. De stroomsnelheidsratio is weergegeven in Figuur 2-3 (vergelijking 3). De ratio van de geluidssnelheid wordt gegeven in Figuur 5-2. Aangezien de ratio's vrijwel gelijk zijn, wordt hun effect in principe opgeheven: resonanties worden verwacht bij vergelijkbare energiesnelheden.

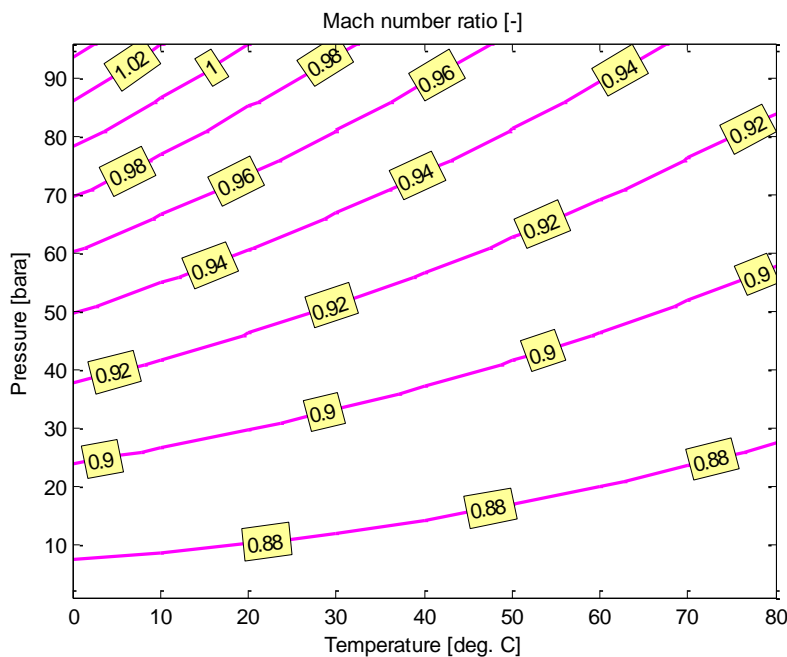
Bij gelijke energieflex en bedrijfsomstandigheden lijkt het Machgetal voor H₂ iets lager te zijn dan voor G-gas (zie Figuur 5-3). Aangezien de aan resonantie verbonden Machgetallen onafhankelijk zijn van de vloeistof, zullen resonantiecondities met H₂ bereikt worden bij iets hogere snelheden dan die van G-gas. Een soortgelijke interpretatie is dat resonantie plaatsvindt bij iets langere 'dode' zijtakken wanneer dezelfde energiestroom wordt getransporteerd.

Ondanks de overeenkomsten is een belangrijk verschil tussen waterstof en aardgas de absolute frequentie waarbij pulsaties zullen ontstaan, die voor waterstof ongeveer driemaal hoger zal zijn. Voor dezelfde pijpgeometrie zouden resonanties die bij aardgas bijvoorbeeld bij ~10 Hz kunnen ontstaan, zich bij waterstof bij ~30 Hz ontwikkelen, waardoor de kans op de coïncidentie met mechanische resonantie frequenties toeneemt.

Conclusie: waterstofbelasting wordt geassocieerd met een vergelijkbaar risico van FIP-resonantie, en de verschillen liggen ruim binnen de standaard onzekerheden die samenhangen met de gemaakte aannames en het 'lock-in'-bereik van stromingsgeïnduceerde pulsaties. Door de frequentieverschuiving is de kans op coïncidentie met mechanische natuurlijke frequenties van de pijpleidingen groter.



Figuur 5-2. Ratio van de geluidssnelheid van waterstof versus G-gas bij gelijke druk en temperatuur.



Figuur 5-3. Ratio van het Machgetal van waterstof en G-gas bij gelijke energietransportsnelheid.

5.3.2 Pulsatieamplitudes

De stromingsgeïnduceerde pulsatie-niveaus die worden verwacht bij resonanties die zich bij waterstof voordoen ten opzichte van die bij aardgas, kunnen worden afgeleid uit (vergelijking 13). De ratio tussen de niveaus wordt dan bepaald door:

$$\frac{p'_1}{p'_2} = \frac{(\rho U^2)_1}{(\rho U^2)_2} \left(\frac{F_1}{F_2} \right) \left(\frac{\alpha_{0,2}}{\alpha_{0,1}} \right) \quad (\text{vergelijking 15})$$

Voor de eerste variabele van (vergelijking 15), d.w.z. de verhouding van kinetische energie of dynamische druk kan (vergelijking 7) worden gehanteerd. Voor de tweede variabele geldt dat wanneer men aanneemt dat de pijpleidingconfiguratie gelijk is en het Reynolds-getal hoog genoeg is, de dimensieloze bronsterkte F voor waterstof en G-gas gelijk is. Ten slotte kan de akoestische dempingsvariabele als volgt worden gevonden:

$$\frac{\alpha_{0,1}}{\alpha_{0,2}} = \left(\frac{K_1}{K_2} \right) \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \left(\frac{Re_2}{Re_1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{vergelijking 16})$$

waarbij K een factor is die verband houdt met viscothermische akoestische verliezen:

$$K = 1 + \frac{\gamma^* - 1}{\sqrt{Pr}} \quad (\text{vergelijking 17})$$

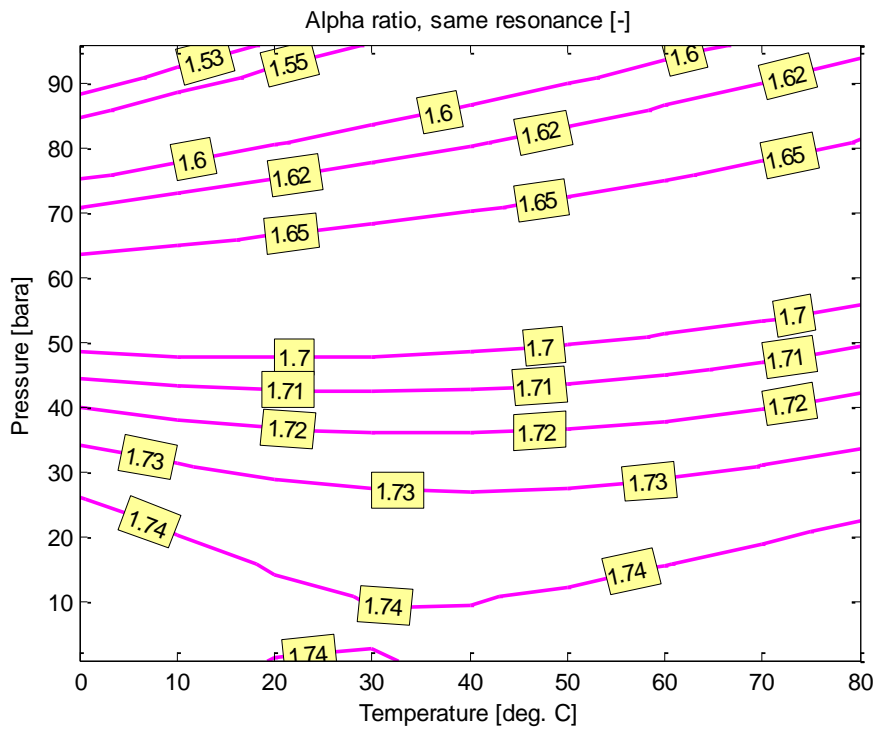
Waarbij Pr het Prandtl-getal en γ^* de isentropische exponent van het procesgas is.

De akoestische dempingsratio tussen waterstof en aardgas wordt weergegeven in Figuur 5-4. In het geval van waterstof wordt meer akoestische demping verwacht. Het voordeel van grotere dempingswaarden bij waterstof wordt ook waargenomen bij de ratio van de uiteindelijke pulsatie-niveaus, weergegeven in Figuur 5-5. Wanneer zich een resonantie ontwikkelt, kunnen pulsatie-niveaus worden verwacht die ongeveer 40% lager zijn dan bij aardgas.

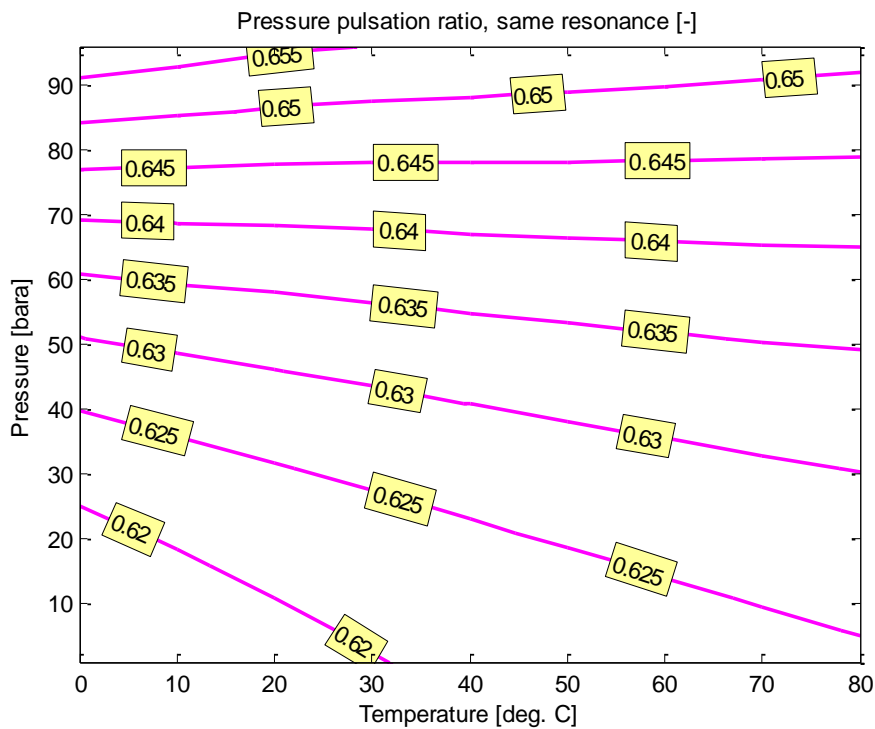
5.4 Voorbeelden

5.4.1 Casus met aardgas

Ter illustratie wordt een voorbeeld gegeven van een stromingsregelstation dat te lijden had van ernstige stromingsgeïnduceerde pulsaties. De geometrie van het verdeelstuk wordt weergegeven in Figuur 5-6. De aardgasstroom kwam met 60 bar(g) de drukreducerstraat binnen vanuit de 20" inlaatleiding. De stroomsnelheid in de 6" straat werd verhoogd ten gevolge van de 6"×4"-vernauwingen die naar de drukregelaar leidden. Op het 4" segment zijn twee dubbele 2" 'dode' zijtakken aangesloten, bedoeld voor ontluchting. De gassnelheid in het 4" segment varieerde tussen géén stroming in het geval dat de regelklep gesloten was, en 56,6 m/s, de maximaal toegestane stroming door de regelklep.



Figuur 5-4. Ratio akoestische demping tussen waterstof en G-gas.



Figuur 5-5. Ratio pulsatieniveaus tussen waterstof en G-gas.

5.4.2 Casus met waterstof

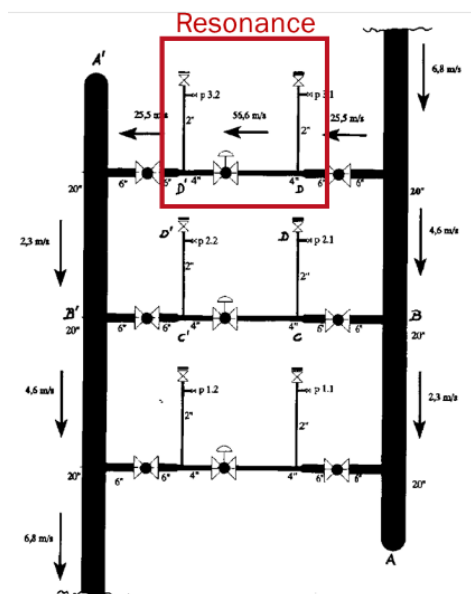
Indien wordt aangenomen dat waterstof door hetzelfde stromingsregelstation kan stromen, zijn de in de vergelijking Tabel 5-1 getoonde meetwaarden te verwachten. In dit voorbeeld is te zien dat dezelfde resonantie die met G-gas is waargenomen, ook met waterstof zou worden waargenomen, maar bij iets grotere energietransportcapaciteiten. In een dergelijk geval zou het verwachte pulsationniveau aanzienlijk lager zijn. De resonantie zou echter een veel hogere frequentie hebben (666 Hz), waardoor de kans op de coïncidentie met een mechanische resonantie groter zou zijn. In dat geval is de algemene conclusie dat het waargenomen risico als gevolg van vibraties groter is. Bij dergelijke hoge frequenties worden de uiteindelijke vibratie-amplitudes echter in hoge mate gedomineerd door de mechanische demping van het samenstel, die bijzonder afhankelijk is van het ontwerp en de staat van de constructie zelf.

5.5 Conclusie

Wanneer waterstof wordt vergeleken met G-gas dat dezelfde energieflex door dezelfde pijpleidingen vervoert onder dezelfde bedrijfsomstandigheden, kan het volgende worden geconcludeerd:

- Akoestische resonanties zullen zich ontwikkelen bij vergelijkbare energiesnelheden
- Akoestische resonanties zullen zich ontwikkelen bij ~ 3 maal hogere frequenties, waardoor de kans om samen te vallen met mechanische natuurlijke frequenties toeneemt
- De resulterende pulsationniveaus zullen lager zijn voor waterstof, ongeveer 40%.

Er treden twee tegengestelde effecten op: enerzijds de verwachting van lagere pulsationniveaus; anderzijds een grotere kans op de coïncidentie van akoestische pulsaties en mechanische natuurlijke frequenties. Het nettoresultaat van deze effecten kan uitsluitend per geval worden beoordeeld, aangezien hoogfrequente vibraties grotendeels afhankelijk zijn van de mechanische demping van het samenstel. Om beter te begrijpen of het risico *in het algemeen lijkt* toe of af te nemen, wordt een 3D eindige-elementenanalyse van een aantal standaard samenstellen aanbevolen, waarbij het gemodelleerde pijpleidingwerk wordt blootgesteld aan hoogfrequente pulsaties, en de cyclische spanningsniveaus worden berekend op kritieke plaatsen die door spanningsintensivering meer vatbaar zijn voor falen.



Figuur 5-6. Drukduceerschema met een dubbele kleine zijtakconfiguratie die ernstige stromingsgeïnduceerde pulsaties vertoonde.

Tabel 5-1. Vergelijking tussen G-gas en waterstof voor een stromingsgeïnduceerde pulsatie.

Eigenschap	G-gas	Waterstof	Opmerkingen
Druk [bar(g)]	60	60	Uitgaande van bedrijf met gelijke druk
Temperatuur [°C]	10	10	Uitgaande van bedrijf met gelijke temperatuur
Gasdichtheid [kg/m ³]	54,5	5,0	Samendrukbaarheidsfactor z voor G-gas ~ 0,88
Geluidssnelheid [m/s]	395	1335	Zie Figuur 5-2
Stroomsnelheid bij resonantie [m/s]	41,0	138,6	Berekend op basis van resonantie-Machgetal
Machgetal bij resonantie [-]	0,10	0,10	Resonanties vinden plaats bij gelijke resonantie-Machgetallen
Resonantiefrequentie [Hz]	197	666	
Pulsatieniveaus [mbar rms]	1200	763	Zie Figuur 5-5.
Energieflux bij resonantie	47,8	49,9	Waterstof heeft een iets grotere energietransportcapaciteit bij dezelfde resonantieomstandigheden

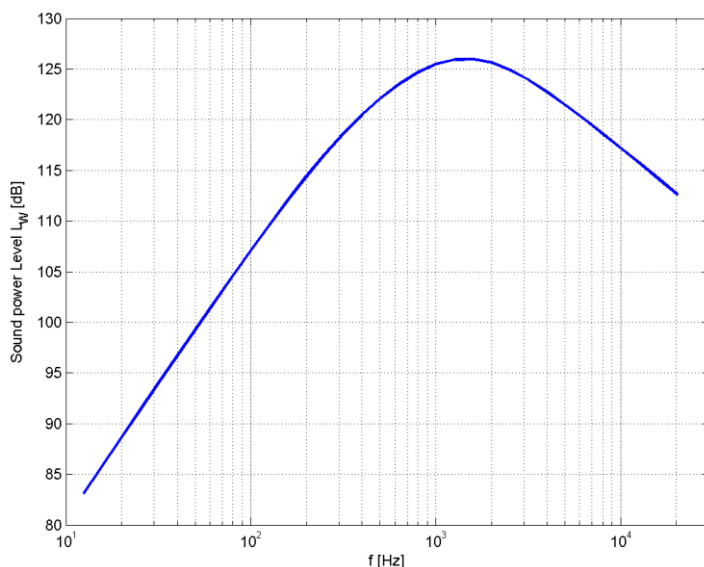
6 Akoestisch geïnduceerde vibratie

6.1 Akoestisch geïnduceerde vibratie in aardgastransportsystemen

Akoestisch geïnduceerde vibratie (Acoustics-Induced Vibration, AIV) is het faalmechanisme waarbij een hoogfrequent breedband-geluidsspectrum snel resulteert in vermoeingsbreuken in een leiding. Typische bronnen van AIV in aardgastransportsystemen zijn elementen waarbij de druk plotseling wordt verlaagd: overdruk- of afblaaskleppen, regelkleppen en restricties. Het gegenereerde akoestische spectrum heeft een typisch breedbandkarakter ("gebrul" in het lagere frequentiebereik, "gegil" in het hogere frequentiebereik). Het geluid wordt gekarakteriseerd door zijn amplitude en door de piekfrequentie (zie Figuur 6-1). Geluid dat wordt veroorzaakt door drukaflaatinrichtingen kan leiden tot integriteitsproblemen. In de literatuur zijn weliswaar incidenten gemeld, maar deze zijn betrekkelijk zeldzaam. Punten met een verhoogd risico zijn:

- Configuraties met hoge geluidsniveaus in de leiding.
- Leidingen met een grote diameter en een kleine wanddikte.
- Configuraties met gelaste discontinuïteiten, zoals kleine aftakkingen van een hoofdleiding, T-stukken en deels gelaste pijp ondersteuning (zgn. aan de leiding gelaste discontinuïteiten). Circulair lassen langs de omtrekring, bijvoorbeeld bij bochten en flenzen, wordt niet beschouwd als een kritische discontinuïteit.

Nast vermoeingsbreuken is ook geluidsafstraling (mogelijk zelfs meetfouten) een gevolg van dit verschijnsel. Dit wordt besproken in hoofdstuk 7.



Figuur 6-1. Typisch frequentiespectrum van geluid door regelkleppen: breedbandspectrum met een brede piek rond de middenfrequentie (~1,5 kHz in dit voorbeeld).

6.2 Beoordeling van akoestisch geïnduceerde vibratie

Een nauwkeurige kwantitatieve voorspelling van amplitude en frequentie van het akoestische bronnspectrum vereist een zeer complexe analyse. Dit is komt door de fysische verschijnselen die zich voordoen bij drukverlaging (gasdynamica met kritische stromingscondities, complexe stromingsprofielen, interactie met de complexe interne layout van de klep, hoogfrequente 3D-voortplanting van het geluid door het pijpleidingsysteem en door de pijpleidingwand, details van de installatie, etc.). Gedetailleerde voorspellingsmethoden zijn nog steeds onderwerp van

wetenschappelijk onderzoek. Om een robuuste risico-evaluatie en doeltreffende engineering mogelijk te maken, zijn er in de afgelopen decennia vereenvoudigde industriële normen ontwikkeld [15], [17], [18].

De eerste norm die werd gebruikt om de mate van drukverlagende voorzieningen te kwantificeren is de "Guidelines for Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure" van het Energy Institute [15]. In deze richtlijnen wordt het door kleppen en restricties veroorzaakte breedbandgeluid aangeduid als "hoogfrequente akoestische excitatie". Het desbetreffende hoofdstuk is technische module T2.7. De voorspellingsmodellen in [15] zijn ontwikkeld op basis van empirisch onderzoek dat in de jaren 70 is uitgevoerd bij falende en niet-falende systemen. Daarom geven deze een mate voor het risico op falen, en moeten deze niet worden geïnterpreteerd als een feitelijke, numerieke voorspelling van de verwachte geluidsniveaus in de pijpleiding. De juiste schalingsparameters zijn echter wel opgenomen. Het bronvermogensniveau wordt gekwantificeerd als:

$$PWL = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{P_0 - P_2}{P_0} \right)^{3.6} \dot{m}^2 \left(\frac{T_0}{M_W} \right)^{1.2} \right] + 126.1 + SFF \quad (\text{vergelijking 18})$$

Het bronvermogensniveau PWL is een functie van het drukverschil $(P_0 - P_2)/P_0$, de massastroom \dot{m} , de inlaattemperatuur T_0 en het molecuulgewicht M_W . De factor SFF is -6 dB in het geval van kritische (gesmoorde) stromingscondities. Deze vergelijking geeft aan dat het drukverschil en de massastroom de dominante parameters zijn; een groter drukverschil en een grotere massastroom leiden tot hogere geluidsniveaus.

6.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof

De basis van de benchmark is dat met waterstof dezelfde energietransportcapaciteit wordt gerealiseerd als met aardgas. Deze schalingsbenadering wordt geschikt geacht voor continue, in-line drukreductievoorzieningen in de leidingen (regelkleppen in M&R-stations, GOS's, districtstations en overslagstations). Voor afzonderlijke drukreductievoorzieningen (afblaasinstallatie) ligt de aanname van een "gelijke energiestroom" minder voor de hand. Echter, uitgaande van een hergebruik van afblaaskleppen en restricties wordt eenzelfde ratio (1:3) voor de massastromen verwacht.

Om te komen tot het incrementele effect van waterstof (subscript 1), vergeleken met aardgas (subscript 2), wordt de volgende relatie gevonden voor de kritische (gesmoorde) stroming. Hiervoor wordt uitgegaan van gelijke drukverhoudingen en dezelfde interne geometrie van de klep, zodat het verschil voornamelijk het gevolg is van de kritische (sonische) massastroomratio:

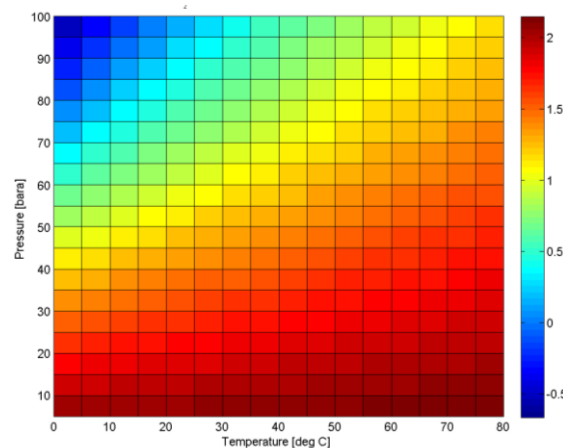
$$PWL_1 - PWL_2 = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \frac{\left(\frac{2}{\gamma_1 + 1} \right)^{\frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_1 - 1}}}{\left(\frac{2}{\gamma_2 + 1} \right)^{\frac{\gamma_2 + 1}{\gamma_2 - 1}}} \left(\frac{M_{W,2}}{M_{W,1}} \right)^{1.2} \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right) \quad (\text{vergelijking 19})$$

waarbij ρ de dichtheid en γ de verhouding van de soortelijke warmte is. Indien er sprake is van niet-kritische (niet-gesmoorde) stromingscondities, wordt de volgende relatie gevonden, die de massastroomratio volgt om dezelfde energietransportsnelheid te behouden, wederom uitgaande van dezelfde sub-kritische druksprong:

$$PWL_1 - PWL_2 = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{HHV_2}{HHV_1} \right)^2 \left(\frac{M_{W,2}}{M_{W,1}} \right)^{1.2} \right) \quad (\text{vergelijking 20})$$

Figuur 6-2 illustreert deze vergelijkingen voor verschillende druk- en temperatuursomstandigheden. De volgende waarnemingen kunnen worden gedaan wanneer waterstof met aardgas wordt vergeleken:

- Voor niet-kritische (niet-gesmoorde) stromingscondities, een toename van 2-3 dB, ongeacht de bedrijfscondities waaronder de benchmark wordt gemaakt.
- Voor kritische (gesmoorde) stromingscondities: een kleine toename van 0-2 dB voor hogedruktoepassingen (40-80 bar)
- Voor kritische (gesmoorde) stromingscondities: een toename van 2 dB voor lagedruktoepassingen (< 8 bar)



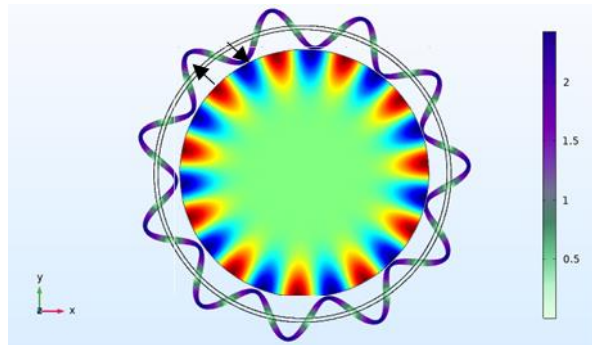
Figuur 6-2. Vergelijking van sterkte geluidsbron (kritische (gesmoorde) stromingsconditie).

6.4 Voorbeelden

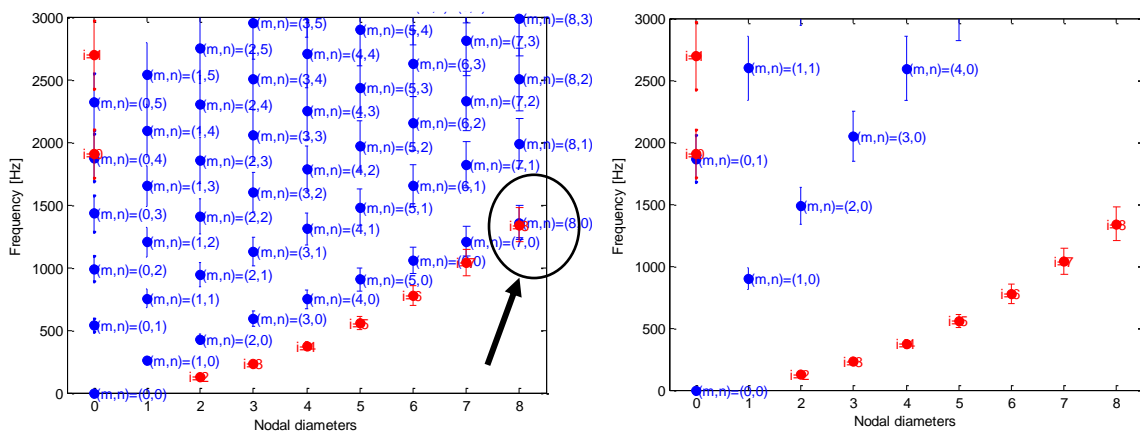
In absolute termen zijn de meest kritische gebieden de hogecapaciteits-afblaasinstallaties in het GTS-net. In de literatuur zijn geen voorbeelden te vinden van vermoeingsbreuken in het RNB-net (voor bedrijf met aardgas). Wanneer een verhoogd faalrisico wordt vastgesteld, wordt normaliter een typische vervolg-analyse uitgevoerd. In deze analyse wordt het risico beoordeeld op het samenvallen van akoestische resonanties met mechanische resonanties van de leidingen. De akoestische resonanties zijn 3D modes in de dwarsdoorsnede van de leiding. De mechanische resonanties zijn modes over de dwarsdoorsnede van de leiding. Een voorbeeld van dit samenvallen (coïncidentie) wordt geïllustreerd in Figuur 6-3, waar een akoestische mode wordt afgebeeld met 11 nodale diameters (d.w.z. 11 golflengten in de omtrek) passend bij een mechanische modeshape van leidingwand met dezelfde vorm.

Voor de vervolganalyse van deze coïncidentie zijn twee voorbeelden gebruikt. Het eerste voorbeeld is een standaard (stalen) 36" (DN900) HD-leiding van het GTS-systeem; het tweede een standaard (stalen) 8" (DN200) pijpleiding van het HD-segment van een RNB-systeem. De analyse is gebaseerd op een vergelijking tussen frequentie en modusvorm (weergegeven door het aantal nodale lijnen en nodale cirkels) van zowel de akoestische resonantiemodus als de structurele shell-modus. De resultaten voor elk voorbeeld worden respectievelijk weergegeven in Figuur 6-4 en Figuur 6-5. Te zien is dat in beide gevallen de scheiding tussen de akoestische transversale resonantiemodi en de structurele modi van de pijpleidingwand toeneemt bij waterstof in vergelijking met aardgas, waardoor de kans op een nadelige coïncidentie afneemt. Dit is het gevolg van de hogere geluidssnelheid in waterstof. N.B.: de akoestische modi verschuiven naar hogere frequenties ten gevolge van de hogere geluidssnelheid in waterstof. De structurele resonantiemodi van de pijpleiding

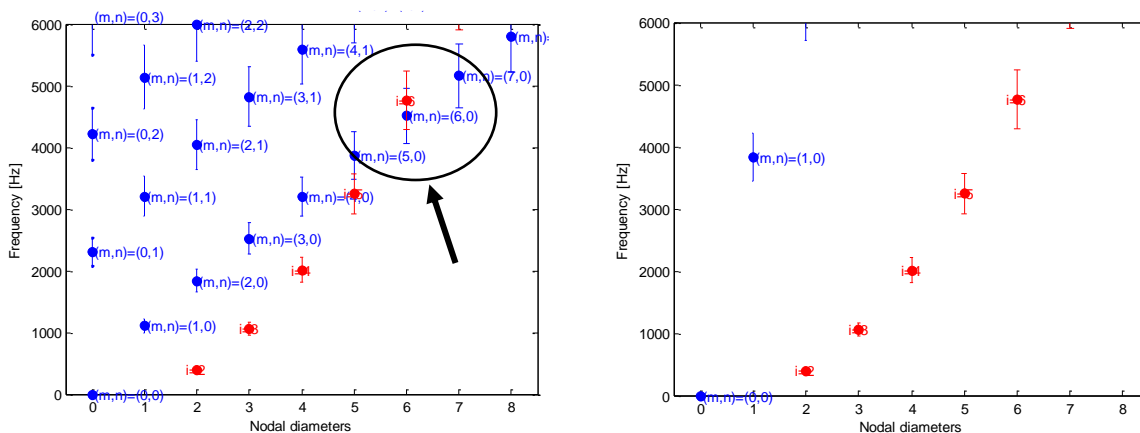
zijn in de eerste plaats een eigenschap van de pijpleidingwand en zullen vergelijkbaar blijven. In het geval van waterstof is de kans kleiner dat akoestische mode shapes de mechanische mode shapes effectief aanstoten en tot integriteitsproblemen bij de aftakkingen leiden.



Figuur 6-3 Voorbeeld van de coincidentie van de akoestische resonantiemodus en de pijpleidingresonantiemodus, met 11 nodale diameters. Akoestische energie kan zeer efficiënt worden overgebracht in de vibratie van de pijpleidingwand.



Figuur 6-4. Typisch interferentiediagram voor een HD-systeem (36" pijpleiding, 80 bar(a)) waarin de frequentie is aangegeven waarbij de verschillende resonantiemodi optreden. Aardgas (links) en waterstof (rechts). Blauwe stippen zijn akoestische modi, rode stippen zijn structurele modi. De risico's van de coincidentie zijn prominenter voor aardgas dan voor waterstof.



Figuur 6-5. Typisch storingsdiagram voor LDP-systeem (8" pijpleiding, 9 bar(a)). Aardgas (links) en waterstof (rechts). Blauwe stippen zijn akoestische modi, rode stippen zijn structurele modi. De risico's van de coincidentie zijn prominenter voor aardgas dan voor waterstof.

6.5 Conclusie

Bij vergelijkbare energietransportsnelheden lijkt waterstof een groter potentieel te hebben voor akoestisch geïnduceerde vibratie (AIV) dan aardgas. Of de verhoogde excitatie-energieniveaus daadwerkelijk leiden tot leidingwandvibratie lijkt echter onwaarschijnlijker, vanwege de beperkte kans op coïncidentie van akoestische resonantiemodi en structurele leidingwandmodi. Vanwege deze tegengestelde effecten kan worden geconcludeerd dat het risico van AIV vergelijkbaar blijft met dat bij aardgas. De bekende praktijken voor het ontwerp en de analyse van het AIV-fenomeen blijven geldig.

In alle delen van het netwerk die onder druk staan en waar veiligheidskleppen aanwezig zijn, wordt aanbevolen een screening uit te voeren (bijv. met behulp van [15]) in het geval van een overschakeling op waterstof. Een dergelijke screening zal gebieden met een potentieel risico aan het licht brengen en een systematische herziening van de herontwerpopties mogelijk maken (beheer van de stroomsnelheden, vervanging van restricties, mechanische aanpassingen).

Aanbevolen wordt om de resultaten van een test die in 2020 op een districtstation ([19]) is uitgevoerd, in detail te analyseren. Op basis van deze analyse kunnen de risico's op vermoeiingsbreuken in het LD-net op een meer generieke manier worden beoordeeld.

7 Stromingsgeïnduceerd geluid

7.1 Stromingsgeïnduceerd geluid in aardgastransportsystemen

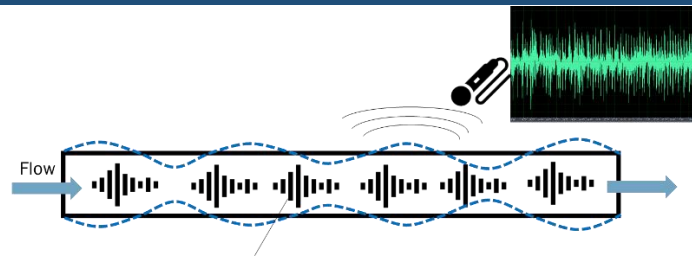
Aardgastransportsystemen moeten gas kunnen leveren zonder te veel geluid af te stralen naar de omgeving. Blootstelling aan geluid voor het werkend personeel en voor de omgeving is een kritisch aspect van de vergunningverlening. Verhoogde geluidsemissies moeten worden vermeden, zelfs als zij het gevolg zijn van incidentele bedrijfshandelingen (bijv. afblazen). De zorgen over geluidsoverlast houden vaak verband met machines (bijv. in de nabijheid van compressorstations), maar ook in tussenliggende installaties, leveringslocaties en woningen moet het geluid worden beperkt. Een tweede belangrijke bron van geluid zijn druk reducties in de leidingen (reducertoestellen), de belangrijkste bronnen stroomafwaarts van het GTS-systeem, in de RTL- en RNB-systemen. Vooral in de nabijheid van huishoudens is ook het in de leidingen geproduceerde geluid van belang, dat ontstaat op plaatsen met geconcentreerd drukverlies, zoals bochten en T-stukken.

Drukreducerende componenten zijn te vinden op verschillende plaatsen in het transportsysteem. Op de overgang van het HTL naar het RTL (de meet- & regelstations, M&R's) bijvoorbeeld wordt de druk verlaagd van 60 bar(g) in het HTL naar een typische 40 bar(g) in het RTL. Op de interface tussen de RTL- en de RNB-systemen (gasontvangststations, GOS) wordt de druk verlaagd naar een typische 8 bar(g). Wanneer RNB-systemen gas verzenden naar consumenten in districtstations, wordt de druk verder verlaagd van 8 bar(g) naar 100 mbar(g). Een ander voorbeeld is bij gasoverslagstations, waar de druk wordt verlaagd van 8 bar(g) naar 4 bar(g) (of zelfs 1 bar(g)).

Enkele specifieke voorbeelden van drukreducerende voorzieningen die geluid produceren:

- Druk- en stromingsregelkleppen, voor continu bedrijf. Deze zijn te vinden in meet- en regelstations (M&R), gasontvangststations (GOS) en districtstations.
- Druk- en stromingsregelkleppen, voor semi-continu bedrijf. Deze regelkleppen zijn te vinden in compressorstations (recycle en anti-surge). Ook kunnen dergelijke kleppen worden aangetroffen bij installaties voor gasafname uit een hogedrukgasopslag.
- Drukreduceervoorzieningen voor incidenteel bedrijf. Deze worden aangetroffen bij het onder druk brengen en het drukloos maken van systemen. Hiertoe behoren afblaaskleppen en restrictieplaten (met één of meerdere gaten). Ook discontinuïteiten in het lagedruk-ontluchtingssysteem kunnen zorgen voor grote drukverlaging en een hoge geluidsproductie (T-stukken, afblaas uitlaat).

Het is essentieel om te begrijpen dat het geluid dat wordt waargenomen door iemand die in de nabijheid van de apparatuur staat, het resultaat is van (i) de omvang van de akoestische bronnen in het gassysteem die geluid produceren *binnenin* de pijpleidingen, en (ii) de hoeveelheid energie die de pijpleidingwanden kunnen afstralen alsof zij het diafragma van een luidspreker zijn geworden. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 7-1. Daarom wordt in dit hoofdstuk de bron van het geluid (en de omvang daarvan) afzonderlijk behandeld van het afstralingsrendement van de pijpleidingwanden.



Figuur 7-1. Schematische weergave van het feit dat het geluid dat door een microfoon naast een pijpleiding wordt geregistreerd, het resultaat is van luchtdrukschommelingen die worden veroorzaakt door de trillingen van de pijpleidingwand, die worden opgewekt door de geluidsniveaus die aanwezig zijn in de gasstroom als gevolg van verschillende aerodynamische bronnen.

De negatieve gevolgen van de geluidsproductie kunnen als volgt worden samengevat:

- Integriteitsproblemen, te wijten aan de akoestische belasting van de mechanische constructie stroomafwaarts. Met name op plaatsen met een "discontinuïteit in de omtrek", zoals kleine aftakkingen, T-stukken en gelaste leidingsteunen, kunnen vermoeingsbreuken optreden. Zie hoofdstuk 6.
- Afgestraald geluid, te wijten aan het 'uitbreken' van het geluid in de leiding via de pijpleidingwand. Afgestraald geluid is afhankelijk van de eigenschappen van de geluidsbronnen en van de eigenschappen van de pijpleidingwand. Bovendien hangt de afstraling ook af van de manier waarop de leiding is geïnstalleerd (bijvoorbeeld een flexibele layout met bochten, of een stijve layout met flenzen).
- Afgestraald geluid door direct geluid van een afblaasmond. In industriële fakkelf- of afblaassystemen kan geluid bij de afvoer tijdens het drukloos maken een kritisch punt zijn voor de omgevingsvergunning.
- Verstoring van apparatuur voor volumestroommeting. Zo kunnen ultrasone flowmeters die dicht stroomafwaarts van een drukreducerinstallatie zijn geplaatst, worden verstoord door (hoogfrequent) geluid vanuit een klep.

7.2 Beoordeling van stromingsgeïnduceerd geluid

7.2.1 Bron: drukreducerinstallaties

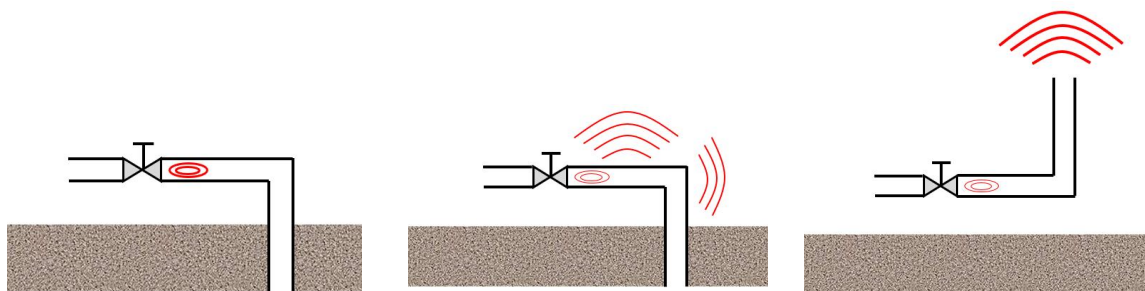
In drukreducerinstallaties wordt de druk abrupt verlaagd. In het algemeen neemt de geluidsamplitude toe bij een toenemende massastroom en bij een toenemend drukverschil. Andere thermodynamische gaseigenschappen hebben in het algemeen een kleiner effect. De piekfrequentie is afhankelijk van de gascondities, maar ook van de afmetingen van de turbulente vernauwing in de stroming. Hoe kleiner de lengteschalen in de drukreducerinrichting, des te hoger het frequentiebereik. De geluidproductie in de leiding in het procesgas is het meest relevant aan de stroomafwaartse zijde van de bron. Met name in kritische (gesmoorde) stromingscondities (wanneer het drukverschil P_{in}/P_{uit} voldoende groot is, standaard ~ 2 voor aardgas) zal het geluid zich niet voortplanten naar de stroomopwaartse zijde van de klep.

In het geval van geluidsafstraling is informatie over het frequentiespectrum van het geluid essentieel. De voorspelling in AVIFF [15] voorziet niet in een frequentie-beoordeling van het geluid. De IEC-norm 60534-8 "Methode voor de voorspelling van aerodynamisch geluid opgewekt door regelkleppen" biedt een gedetailleerde basis voor de schatting van bronsterkten. De fysische achtergrond van deze norm vereist een geavanceerde kennis van gasdynamica en akoestiek. De toepassing van de voorspellingsmethode is echter betrekkelijk eenvoudig. De bedrijfsomstandigheden en gasparameters zijn vereist als invoer, evenals invoer met betrekking tot de geometrie, zoals de afmetingen van de restricties.

7.2.2 Bron: leidingen en leidingonderdelen

Geluid wordt gegenereerd door de convectie van het procesgas in een pijpleiding als gevolg van turbulentie die ontstaat bij de wanden van de pijpleiding en in stromingsonderbrekingen, zoals bochten of T-stukken. De energie die verloren gaat bij turbulentie en geluid is gerelateerd aan de drukval en dus aan de kinetische energie van de stroming. Er heeft al veel onderzoek plaatsgevonden naar dit onderwerp. Een algemeen aanvaarde referentie, waarvan de grondslagen ook in de AVIFF-richtsnoeren zijn opgenomen, is die van Norton & Bull [20]. Deze referentie bevat experimentele metingen van stromingsgeïnduceerd geluid voor een verscheidenheid van obstakels in de stroming (restricties, bochten, T-stukken etc.) en bedrijfscondities, en stelt nuttige schalingswetten voor. Het geeft met name een dimensieloze spectrale vermogensdichtheid ϕ_p van de drukschommelingen (geluidsspectrum) als functie van de dimensieloze frequentie voor verschillende geometrische configuraties en verschillende Machgetallen. Het spectrum voor een bepaald geval Φ_p kan worden verkregen door de dimensieloze functie ϕ_p te schalen met de snelheid U , de gasdichtheid ρ en de binnendiameter d_i .

$$\Phi_P = \frac{\phi_p U}{\left(\frac{1}{2}\rho U^2\right)^2 \frac{d_i}{2}} \quad (\text{vergelijking 21})$$



Figuur 7-2. Geluidsproductie in de leiding, stroomafwaarts van de klep (links), afgestraald geluid door de pijpleidingwand (midden) en directe geluidsafstraling uit de afblaasmond (rechts).

7.2.3 Afstraling

In de wetgeving inzake geluidsoverlast wordt de blootstelling aan geluid gekwantificeerd in A-gewogen geluidsniveaus. De A-weging is een frequentiefiltering van het geluidsspectrum, waarbij rekening wordt gehouden met de gevoeligheid van het menselijk oor. Het menselijk oor is relatief ongevoelig voor lage frequenties (< 500 Hz) en voor zeer hoge frequenties (>8 kHz). De A-weging is een gestandaardiseerde curve, weergegeven in Figuur 7-3. De A-weging is een relevant aspect voor de overschakeling van aardgas op waterstof, aangezien geluidsbronnen in de leiding een opwaartse frequentieverschuiving hebben. Als de bestaande geluidsbron (aardgas) wordt gedomineerd door frequenties rond een paar honderd Hertz, resulteert de opwaartse verschuiving (waterstof) naar geluidsfrequenties in het "gevoelige" gebied van menselijke waarnemers. Dit heeft een ongunstig effect op de geluidsniveaus in dB(A). Deze situatie kan worden verwacht in de hoge-druksystemen met hoge capaciteit. Als de bestaande geluidsbron (aardgas) wordt gedomineerd door frequenties rond enkele kHz, resulteert de opwaartse verschuiving (waterstof) naar geluidsfrequenties in het "ongevoelige" gebied, mogelijk zelfs onhoorbaar. Dit heeft een gunstig effect op de geluidsniveaus in dB(A). Deze situatie kan worden verwacht in de lagedruksystemen met lage capaciteit (bijv. districtstations en huishoudelijke en industriële verbruikers).

De geluidsbronnen in de leiding zullen zich door de leidingwand voortplanten en vanaf de wand worden afgestraald (afgestraald geluid). Deze interactie tussen het in-line geluid, de voortplanting door de leidingwand en de afstraling van de wand is een uiterst complex proces om nauwkeurig te modelleren. Bovendien kunnen de resultaten sterk afhankelijk zijn van de details van de geluidbron, de leidingwand en de wijze waarop de leiding is geïnstalleerd (bochten, flenzen). Net als voor de praktische modelbenadering voor de bronnen, kan ook voor de voortplanting van het geluid informatie worden gevonden in industriële normen. De VDI 3733-norm "Noise at Pipes" [21] geeft een praktische en conservatieve benadering voor de voorspelling van het afgestraald geluid. Een soortgelijke benadering is ook te vinden in IEC 60534-8 [17].

Gezien het breedbandkarakter van de in-line geluidsbron wordt de aanpak in brede frequentiebanden als het meest realistisch beschouwd. Het transmissieverlies door de leidingwand heeft twee afzonderlijke bijdragen (de factor C is constant en hangt af van de installatiedetails):

$$R_R = 10 \log \frac{c_R \rho_R s}{c_F \rho_F d_i} + A(f) + C \quad (\text{vergelijking 22})$$

De eerste variabele rechts hangt alleen af van de "impedantie-mismatch" tussen het gas (subscript "F"), de materiaaleigenschappen van de pijpleiding (subscript "R") en de geometrische eigenschappen van de pijpleiding (wanddikte s en diameter d_i). Voor de overschakeling op waterstof resulteert deze "massa"-term in een gunstiger transmissieverlies: het impedantieverschil tussen waterstof en de pijpleidingwand is groter, en dit zal resulteren in een toename van het transmissieverlies met standaard +5 dB. Dit incrementele effect geldt zowel voor pijpleidingen van staal als kunststof (HDPE of PVC).

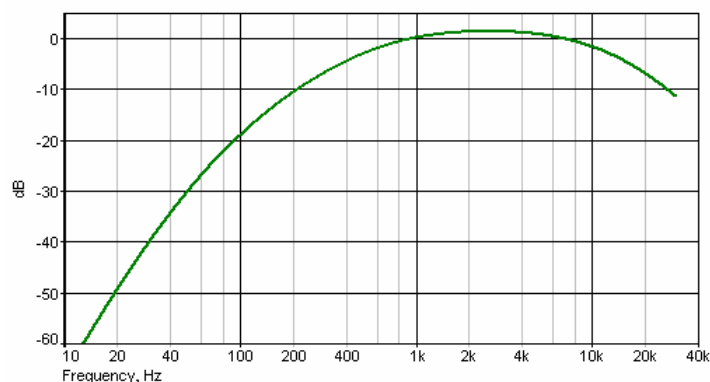
De tweede variabele $A(f)$ is een frequentie-afhankelijke functie die de interactie met de ringfrequentie f_r weergeeft:

$$f_r = \frac{c_R}{\pi d_i} \quad (\text{vergelijking 23})$$

Bij de ringfrequentie past precies één structurele golflengte in de omtrek van de pijpleiding. In deze toestand is de koppeling met de pijpleidingwand optimaal en is het transmissieverlies minimaal. Voor frequenties onder en boven de f_r neemt het transmissieverlies toe, met verschillende hellingshoeken:

$$\text{Voor } f \leq f_r : A(f) = 20 \log \frac{f_r}{f} \quad (\text{vergelijking 24})$$

$$\text{Voor } f > f_r : A(f) = 30 \log \frac{f_r}{f}$$



Figuur 7-3. A-wegingscurve, waarbij de bijdrage aan de lagere (<500Hz) en hogere (>8kHz) frequenties wordt onderdrukt.

7.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof

7.3.1 Bron: drukreducerinrichtingen

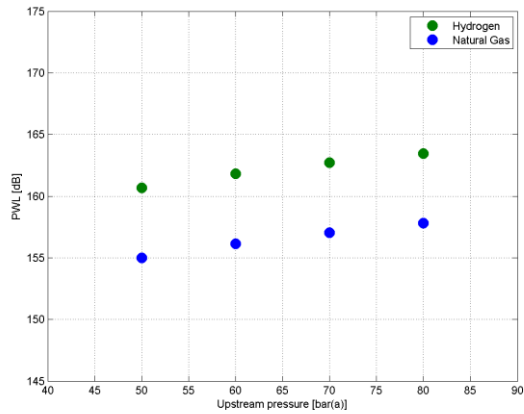
De basis van de benchmark is dezelfde als besproken in punt 6.3, maar dan met gebruikmaking van de IEC-methode die in het vorige hoofdstuk is genoemd. Het is niet mogelijk een generieke analyse van de bronkarakteristieken uit te voeren die alle druk- en temperaturomstandigheden omvat, zoals in andere hoofdstukken van dit rapport. Daarom is de benchmark voor de bron gebaseerd op een aantal voorbeelden. Het verschil in werkelijk geluidsbronniveau en frequentie tussen waterstof en aardgas wordt gekwantificeerd met behulp van de IEC-norm voor verschillende typische configuraties. Ter verduidelijking wordt benadrukt dat dit deel betrekking heeft op de omvang van de geluidsbronnen, d.w.z. de niveaus die *binnenin* de pijpleiding worden ervaren, en niet op het geluid dat door waarnemers wordt waargenomen, d.w.z. dat *buiten* de pijpleiding wordt ervaren. De volgende voorbeeldcasussen zijn bekeken:

- Afblazen van compressorstation
- Meet- en regelstation
- Gasontvangstation
- Gasdistrictstation
- Huishoudens en industriële verbruikers

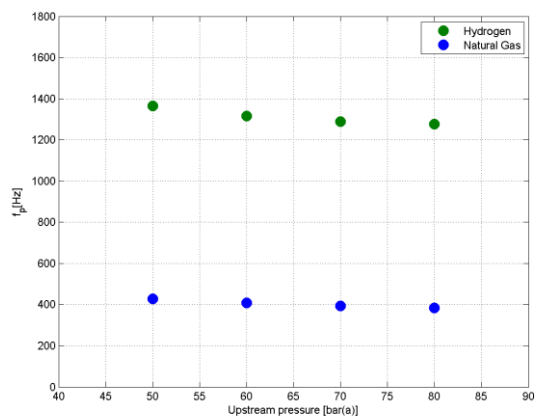
7.3.1.1 Voorbeeldcasus 1: Afblazen van compressorstation

Dit voorbeeld betreft een standaard afblaassysteem met hoge druk en grote capaciteit op een compressorstation (HTL-systeem), met incidenteel bedrijf. De stroomopwaartse druk wordt gevarieerd van 50 bar tot 80 bar(a), met een constante tegendruk van 3 bar(a) stroomafwaarts van de restrictie. De afmetingen van de afblaasopening zijn gebaseerd op een praktijkgeval van een afblaasinstallatie bij een compressorstation. De maximale capaciteit van de afblaasinrichting bedraagt ongeveer 147 kg/s of 637 kNm³/h (waarden voor aardgas). De afmeting van de restrictie is constant gehouden voor aardgas en waterstof.

De resultaten voor het geluidsvermogensniveau van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-4. Het geluidsvermogensniveau voor waterstof is 5-6 dB hoger dan voor aardgas. De offset is constant voor de verschillende drukcondities. De resultaten voor de piekfrequentie van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-5. De piekfrequentie voor waterstof is een factor 3,2-3,3 hoger dan voor aardgas en verschuift naar frequenties waarin mensen gevoeliger zijn voor geluid. De ratio is constant voor de verschillende drukcondities.



Figuur 7-4. Geluidsvermogen van de "blow-down orifice" - geluidsbron in de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

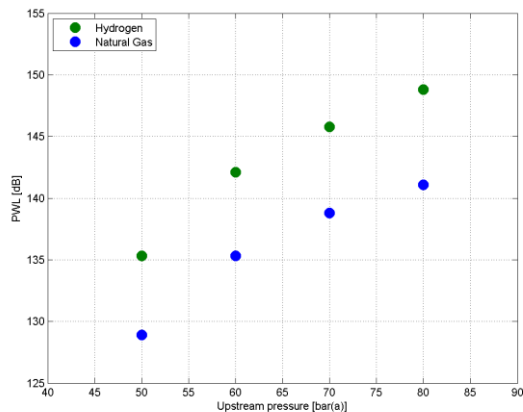


Figuur 7-5. Piekfrequentie van de "blow-down orifice" - geluidsbron in de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

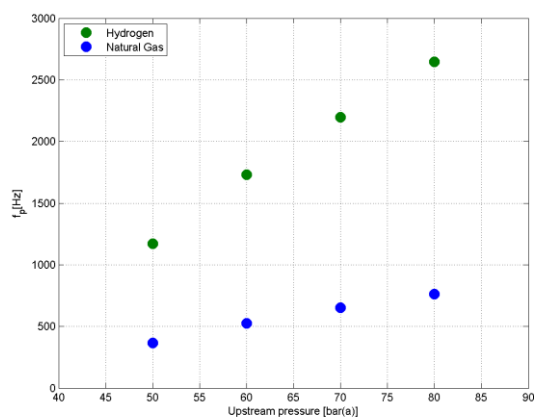
7.3.1.2 Voorbeeldcasus 2: Meet- en regelstations

Dit voorbeeld betreft een standaard hogedrukinstallatie met hoge capaciteit, in continu bedrijf. De inlaatdruk van het station wordt gevarieerd van 80 bar(a) tot 50 bar(a), met een constante uitlaatdruk van 40 bar(a). De afmetingen van de vernauwing in de regelkleppen zijn gebaseerd op een realistische, grote capaciteit van 510 kNm³/h (waarden voor aardgas).

De resultaten voor het geluidsvermogensniveau van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-6. Het geluidsvermogensniveau voor waterstof is 6-8 dB hoger dan voor aardgas. Het verschil is relatief constant voor de verschillende drukcondities. De resultaten voor de piekfrequentie van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-7. De piekfrequentie voor waterstof is een factor 3,2-3,5 hoger dan voor aardgas. De ratio is relatief constant voor de verschillende drukcondities. Zonder rekening te houden met eventuele afstralingseigenschappen van de pijpleiding (toegelicht in de volgende paragraaf) zou de overgang naar waterstof een hogere geluidsniveaus opleveren bij frequenties waarvoor het menselijk oor gevoeliger is. N.B.: het geluidsniveau van de bron is lager dan in casus 1, omdat de lagere drukratio over de klep resulteert in lagere akoestische rendementen. In deze resultaten is geen rekening gehouden met geluidsreductie als gevolg van een mogelijk geluidsarm ontwerp van de regelklep (low-noise trim).



Figuur 7-6. Geluidsvermogen van het regelklepgeluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

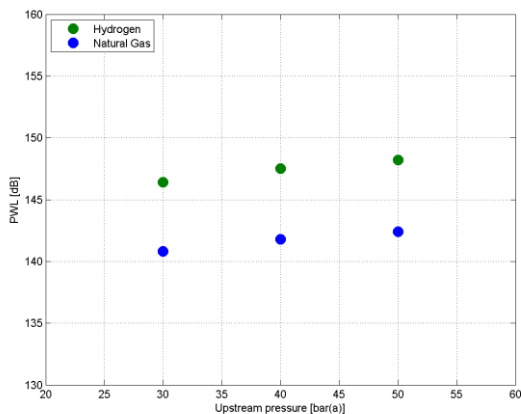


Figuur 7-7. Piekfrequentie van het regelklepgeluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

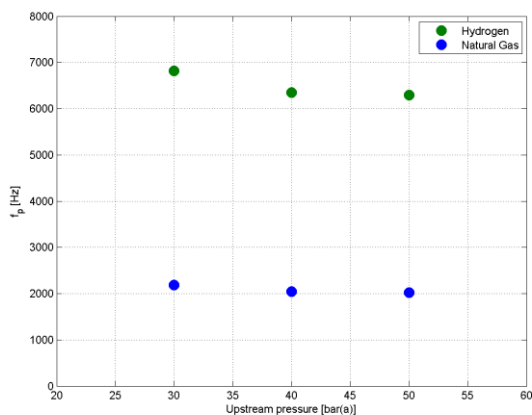
7.3.1.3 Voorbeeldcasus 3: gasontvangststation

Dit voorbeeld betreft een standaard gasontvangststation met gemiddelde capaciteit, in continu bedrijf. De inlaatdruk van het station wordt gevarieerd van 50 bar(a) tot 30 bar(a), met een constante uitlaatdruk van 9 bar(a). De afmetingen van de vernauwing in de regelkleppen zijn gebaseerd op een realistische, grote capaciteit van 42 kNm³/h (waarden voor aardgas).

De resultaten voor het geluidsniveau van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-8. Het geluidsvermogensniveau voor waterstof is 5-6 dB hoger dan voor aardgas. Het verschil is constant voor de verschillende drukcondities. De resultaten voor de piekfrequentie van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-9. De piekfrequentie voor waterstof is een factor 3,1 hoger dan voor aardgas. Voor aardgas ligt de frequentie rond 2 kHz en voor waterstof tussen 6 en 7 kHz. Het menselijk oor is het gevoeligst voor het frequentiespectrum tussen 1-9 kHz. De frequentieverschuiving heeft daarmee geen significante invloed op de gevoeligheid. De ratio is constant voor de verschillende drukcondities. N.B.: het geluidsniveau van de bron is lager dan in casus 1, omdat de lagere drukratio over de klep resulteert in lagere akoestische rendementen. In deze resultaten is geen rekening gehouden met geluidsreductie als gevolg van een mogelijk geluidsarm ontwerp van de regelklep. Ook dient te worden vermeld dat de absolute frequenties veel hoger zijn dan voor casus 1, hetgeen een gevolg is van de kleinere afmetingen van de restrictie van de regelklep (lagere capaciteit).



Figuur 7-8. Geluidsvermogen van het regelklepgeluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

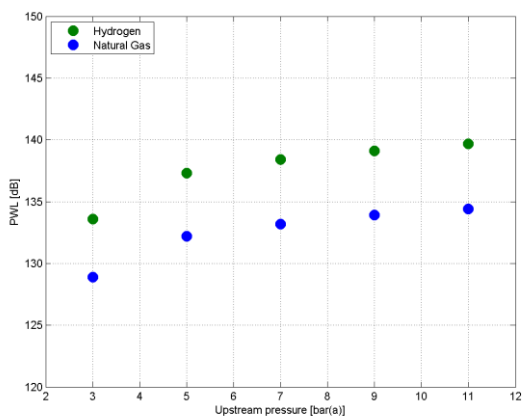


Figuur 7-9. Piekfrequentie van het regelklepgeluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

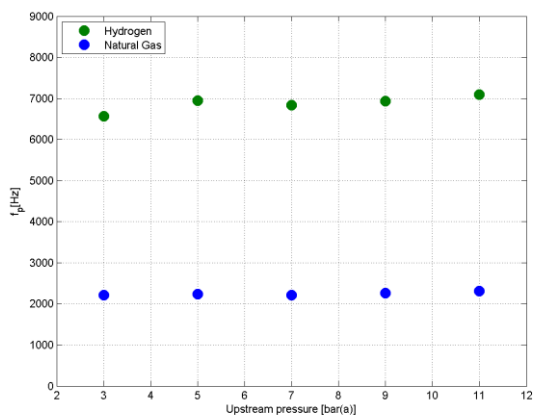
7.3.1.4 Voorbeeldcasus 4: gasdistrictstation

Dit voorbeeld betreft hier een standaard districtstation, in continu bedrijf. De inlaatdruk van het station wordt gevarieerd van 11 bar(a) tot 3 bar(a) (let op: 9 bar(a) is het werkelijke maximum en 2 bar(a) het werkelijke minimum), met een constante uitlaatdruk van 100 mbar(g). De afmetingen van de vernauwing in de regelkleppen zijn gebaseerd op een realistische capaciteit van 4000 Nm³/h (waarden voor aardgas).

De resultaten voor het geluidsniveau van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-10. Het geluidsniveau voor waterstof is 5 dB hoger dan voor aardgas. De offset is constant voor de verschillende drukcondities. De resultaten voor de piekfrequentie van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-11. De piekfrequentie voor waterstof is een factor 3,0-3,1 hoger dan voor aardgas. Voor aardgas ligt de frequentie rond 2 kHz en voor waterstof tussen 6 en 7 kHz. Het menselijk oor is het gevoeligst voor het frequentiespectrum tussen 1-9 kHz. De frequentieverschuiving heeft daarmee geen significante invloed op de gevoeligheid. De ratio is constant voor de verschillende drukcondities. N.B.: het geluidsniveau van de bron is lager dan in casus 1, omdat de lagere drukratio over de klep resulteert in lagere akoestische rendementen. In deze resultaten is geen rekening gehouden met geluidsreductie als gevolg van een mogelijk geluidsarm ontwerp van de regelklep. Ook dient te worden vermeld dat de absolute frequenties veel hoger zijn dan voor casus 1, hetgeen een gevolg is van de kleinere afmetingen van de restrictie van de regelklep (lagere capaciteit).



Figuur 7-10. Geluidsvermogensniveau van het regelklepgeluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

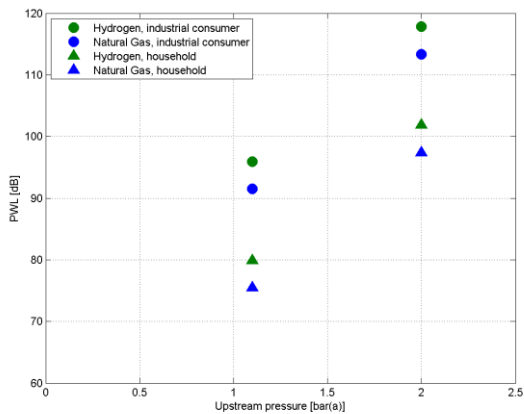


Figuur 7-11. Piekfrequentie van het regelklepgeluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

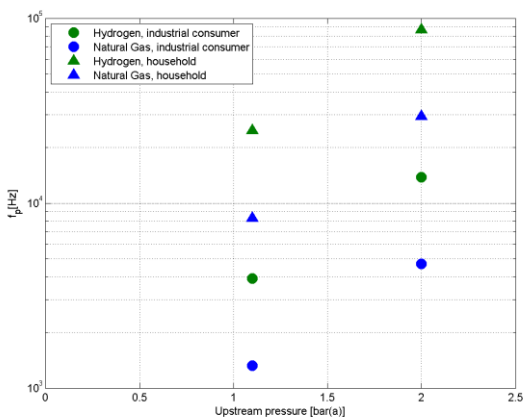
7.3.1.5 Voorbeeldcasus 5: Huishoudens en industriële verbruikers

Bij deze casus betreft het de laatste drukvermindering in de gasvoorzieningsketen. De nominale inlaatdruk is 100 mbar(g), maar kan oplopen tot 1 bar(g), waarbij de uitlaatdruk atmosferisch is. De afmetingen van de restrictie is geschat, uitgaande van een maximale capaciteit van 10 Nm³/h (G6, huishoudens) en 400 Nm³/h (industriële verbruikers). N.B.: het betreft bij deze waarden ‘worst-case’-bovengrenzen. Een realistische schatting voor de nominale (hoge) waarde van een huishouden is maximaal 2 Nm³/h, hetgeen zou resulteren in veel lagere geluidsamplituden.

De resultaten voor het geluidsniveau van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-12. Het geluidsniveau voor waterstof is 4-5 dB hoger dan voor aardgas. De offset is constant voor de verschillende drukcondities. De resultaten voor de piekfrequentie van de bron zijn weergegeven in Figuur 7-13. De piekfrequentie voor waterstof is een factor 3 hoger dan voor aardgas, waardoor deze kan verschuiven naar voor de mens onhoorbare frequenties. De ratio is constant voor de verschillende drukcondities. N.B.: de geluidsvermogensniveaus van de bron zijn veel lager dan in casus 1, omdat de lagere drukratio resulteert in lagere akoestische rendementen. Daarnaast zijn de absolute frequenties veel hoger dan voor casus 1, wat een gevolg is van de kleinere afmetingen van de restrictie (lagere capaciteit).



Figuur 7-12. Geluidsvermogensniveau van het regelklepgekluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.



Figuur 7-13. Piekfrequentie van het regelklepgekluid binnenin de pijpleiding, voor waterstof en aardgas.

7.3.2 Bron: leidingen en leidingonderdelen

In het geval van geluid in leidingen en leidingonderdelen (kleppen, bochten, T-stukken etc.) berust de kwantificering van het verschil tussen waterstof en aardgas op (vergelijking 21). Volgens deze vergelijking hangt de uitkomst af van de stroomsnelheidsratio en de dynamische drukratio (in het kwadraat) voor een bepaalde geometrie. Daarom kan uit de resultaten in Figuur 2-3 en Figuur 2-5 worden geconcludeerd dat waterstof naar verwachting 3 tot 4 maal meer energetische drukschommelingen zal vertonen dan aardgas dat dezelfde hoeveelheid energie transporteert.

Dit wordt verder uitgewerkt met een voorbeeld voor het geluid dat wordt gegenereerd in een rechte pijpleiding. De parameters voor dit voorbeeld zijn niet erg belangrijk, aangezien de stroomsnelheidsratio en de dynamische drukratio niet echt gevoelig zijn voor druk en temperatuur. Figuur 7-14 toont het verschil in spectrale vermogensdichtheid voor zowel waterstof als aardgas. Het diagram toont op log-logschaal het frequentiespectrum voor beide gevallen, waarbij waterstof een concentratie van energie bij hogere frequenties vertoont dan aardgas. Te zien is dat het totale vermogensniveau van dit spectrum voor waterstof ongeveer 3 maal groter is dan voor aardgas (ondanks de algemene aanblik van het diagram als gevolg van de log-schaal).

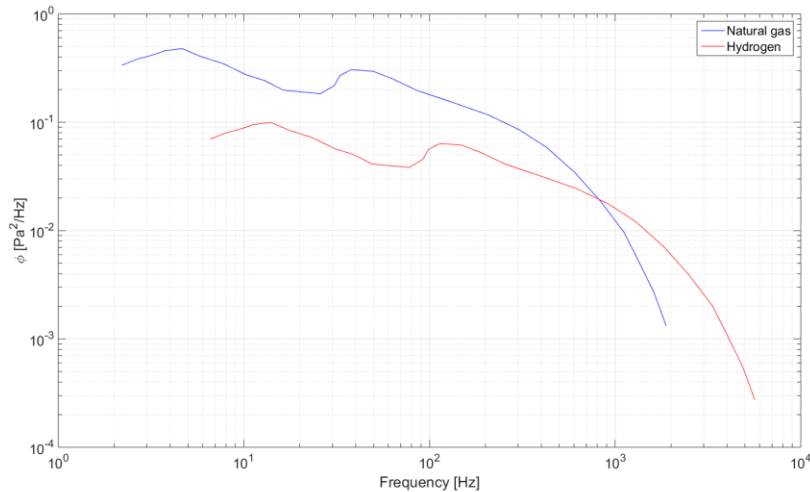
Hoewel de spectra er anders uitzien voor andere geometrische configuraties, zoals bochten met een lange straal en T-stukken, blijven de algemene conclusies van de benchmark tussen waterstof en aardgas gelijk.

7.3.3 Geluidsafstraling

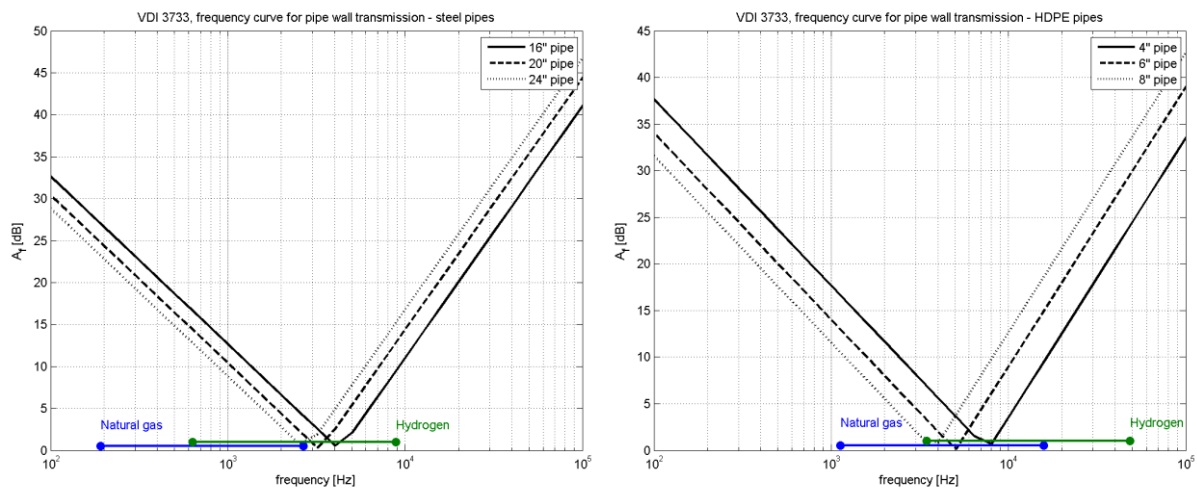
De kwantificering van de geluidsafstraling is onderzocht met behulp van de VDI-methode die is beschreven in 7.2.3. Om de impact van de overschakeling op waterstof op $A(f)$ in (vergelijking 22) te bepalen moet het betreffende frequentiegebied van de bron bekend zijn en vergeleken worden met de ringfrequentie (afhankelijk van leidingmateriaal en diameter). De overschakeling op waterstof resulteert in een opwaartse frequentieverschuiving. Als het gewenste frequentiegebied $< f_r$ is, dan leidt de overschakeling op waterstof tot een ongunstig transmissieverlies. Als het gewenste frequentiegebied $> f_r$ is, dan leidt de overschakeling op waterstof tot een gunstig transmissieverlies. Indien het betreffende frequentiegebied overlapt met f_r , is het niet mogelijk een algemene uitspraak te doen over het effect van de overschakeling op waterstof.

N.B.: voor niet-metalen leidingen die in de LD-distributienetten worden gebruikt (HDPE, PVC) neigt de ringfrequentie naar lagere waarden, terwijl de bronfrequenties in het algemeen hoog zijn (en in het geval van waterstof zelfs naar hoger neigen). Daarom is de verwachting dat in het LD-gedeelte van het net met niet-metalen leidingen het transmissieverlies voor waterstof gunstig zal zijn (gunstig massa-effect en gunstig frequentie-effect).

Enkele van deze kenmerken worden geïllustreerd in Figuur 7-15. De frequentiecurves $A(f)$ zijn uitgezet voor verschillende, standaard pijpleidingafmetingen en vergeleken met het standaard frequentiebereik van de in-line geluidsbron. De opwaartse verschuiving in de bronfrequentie (aardgas \rightarrow waterstof) is duidelijk in beide figuren. Voor de linker figuur (HD-casus 1, met stalen pijpleidingen) verschuiven de bronfrequenties voor waterstof naar het "ongunstige" frequentiegebied rond f_r en hebben daardoor een slecht transmissieverlies. Voor de rechter figuur (LD-casus 4, met HDPE pijpleidingen) verschuiven de bronfrequenties voor waterstof weg van het "ongunstige" frequentiegebied en hebben daardoor een beter/hoger transmissieverlies.



Figuur 7-14. Spectrale vermogensdichtheid van waterstof en aardgas zoals gegenereerd in een rechte pijpleiding onder een gegeven set van omstandigheden. In dit geval, (ID = 150 mm, $U_{NG} = 10$ m/s, $U_{H_2} = 30$ m/s, 80 bar en 10 °C).



Figuur 7-15. Transmissieverlies-frequentiefunctie $A_1(f)$. Links: hogedruk-afblaassysteem met hoge capaciteit (CASUS 1). Rechts: districtstation (CASE 4).

7.3.3.1 Geluidsafstraling door open schoorstenen

Evenals bij het afgestraalde geluid door de pijpleidingwand, zijn ook bij de akoestische straling van een open schoorsteen verschillende fysische mechanismen betrokken. De akoestische demping van het geluid is afhankelijk van de frequentie, en zal in het geval van waterstof gunstig zijn door de opwaartse frequentieverschuiving. Ook valt te verwachten dat in het geval van een uitlaatdemper op de afblaas de prestaties van geluiddempers van het absorberende type gunstiger zijn voor waterstof. Anderzijds kan de geluidsafstraling van de schoorsteenuitlaat sterker zijn voor hogere frequenties.

Voor een kwantitatieve uitspraak is een gedetailleerde beoordeling van geval tot geval nodig.

Vorbereidende testen met het afblazen van een lagedruk-distributienet bevestigen dat in het geval van waterstof geen merkbare toename van het afgestraalde geluid wordt waargenomen.

7.4 Conclusie

Geluid ontstaat als een bijproduct van stroming. Overal waar stromingsenergie verloren gaat (drukval), ontstaan bronnen van geluid. Dit doet zich voor in normale, rechte pijpleidingen ten gevolge van wrijving, en in alle andere leidingonderdelen (bochten, kleppen, T-stukken etc.) bij drukverlies. Dit verschijnsel is veel zichtbaarder in drukreducerende onderdelen, zoals regelkleppen en restricties. Op grond van het bovenstaande valt te verwachten dat geluidsbronnen met waterstof de neiging hebben sterker te worden. Frequenties verschuiven naar hogere waarden, hetgeen gunstig kan zijn. Ook de afstralingseigenschappen van standaard pijpleidingen neigen ernaar gunstig te zijn voor waterstof. De huidige (beperkte) benchmark-ervaring met waterstof bevestigt dat er minder geluid naar de omgeving wordt afgestraald [19]. In dit stadium is het echter nog te vroeg om de conclusie te trekken dat waterstofsysteem minder geluid zullen afstralen dan aardgassystemen.

Op basis van de in dit hoofdstuk gepresenteerde voorbeelden zijn de volgende conclusies getrokken:

- Bij een overschakeling van aardgas op waterstof worden merkbare effecten verwacht op het mechanisme van de productie van geluid veroorzaakt door kleppen. Er wordt aan de hand van uitgebreide voorspellingsmethoden [17] een systematische toename van de geluidsbronsterkte (4-8 dB) voorspeld. Daarbij wordt een systematische opwaartse verschuiving in de frequentie verwacht, van ongeveer een factor 3.
- Geluidafstraling van de leidingwand (afgestraald geluid) bevat verschillende aspecten, zoals het verwachte frequentiebereik van de bron en de mechanische eigenschappen van de pijpleiding. In ieder geval wordt een systematisch gunstig effect van ongeveer 5 dB gevonden voor waterstof, als gevolg van de toegenomen impedantiemismatch tussen procesgas en de leidingwand. Anderzijds is het frequentie-effect van het transmissieverlies van de leidingwand afhankelijk van de afmetingen, het materiaal en het frequentiebereik van de geluidsbron. Dit frequentie-effect kan positief, neutraal of negatief zijn. Aanbevolen wordt dit te beoordelen onder toekomstige, daadwerkelijke bedrijfsomstandigheden met waterstof.
- Ook de kwantitatieve beoordeling van de geluidsafstraling van een open schoorsteen moet per geval worden uitgevoerd.

Om beter te begrijpen welke effecten dominant zijn, is meer experimenteel bewijsmateriaal rond de hierboven besproken onderwerpen vereist. Met name ontbreken er gegevens voor de situatie van zeer hoge druk, die typisch is voor het HTL-systeem. Lopende experimentele onderzoeken met stromend waterstof moeten geschikte omgevingsgeluidsmetingen omvatten, hetzij in de GTS, de RNB's of op het niveau van huishoudens. Deze metingen moeten worden gereproduceerd met behulp van bestaande modelleringstechnieken om zo het gebruik van dergelijke modellen betrouwbaarder te kunnen extrapoleren naar eventuele andere locaties en omstandigheden. Een voorbeeld hiervan is het programma waarover verslag wordt uitgebracht in referentie [19].

Tenslotte wordt opgemerkt dat de nauwkeurigheid van flowmeters in de nabije omgeving stroomafwaarts van de drukreducerinrichtingen kan worden verstoord door het toegenomen geluid. Dit fenomeen valt buiten het bestek van deze HyDelta WP1E en wordt aanbevolen voor verder onderzoek.

8 Erosie

8.1 Erosie in aardgastransportsystemen

Erosie wordt gedefinieerd als het proces waarbij materiaal van het gastransportsysteem wordt weggesleten ten gevolge van de impact van deeltjes die in de stroming worden meegevoerd. Erosie veroorzaakt meestal het dunner worden van leidingen op bepaalde hot spots en een algemene fysieke degradatie van apparatuur.

Erosie is een bekend integriteitsrisico in de olie- en gasindustrie, zodanig dat er in veel stroomopwaartse installaties zelfs erosiesondes worden geplaatst. Erosie kan de beperkende factor zijn voor de maximaal mogelijke stroomsnelheid in de pijpleiding en zo een belangrijke ontwerpbeperking worden. Bij het eroderende materiaal betreft het in de meeste gevallen vast zand dat samen met olie/gas/water wordt geproduceerd. Vloeistofdruppels worden niet beschouwd als potentieel abrasief materiaal bij stroomsnelheden van minder dan 70 - 80 m/s [22], die in gastransportsystemen (inclusief toekomstig gebruik met H₂) niet worden bereikt. Erosie vormt echter, voor zover bekend, geen significant risico voor de integriteit van de huidige aardgastransportsystemen (in Nederland). De reden daarvoor is dat het aardgas vóór injectie in het GTS wordt behandeld en gereinigd. Bovendien zijn in tussenliggende gasontvangststations (GOS) filters ingebouwd om incidenteel binnendringende vaste deeltjes of roestdeeltjes, waar dan ook in het systeem, op te vangen. Het is echter mogelijk dat in incidentele gevallen vaste deeltjes in het net terecht komen, hetgeen uiteindelijk kan leiden tot problemen met de verbranding in huishoudelijke ketels [23].

Volgens Netbeheer Nederland (NBNL) worden wanddiktemetingen uitgevoerd in het HD RNB-systeem (1-8 bar(g)) wanneer bijvoorbeeld zijtakken aan het net moeten worden toegevoegd. Hoewel de leidingen wel 50 jaar oud kunnen zijn, is er geen materiaalverlies geconstateerd. In het LD RNB-systeem (0,1-1 bar(g)) blijkt uit inspecties met camera's dat het systeem meer verontreiniging kan bevatten, zoals takjes, bladeren en andere deeltjes. Er is echter geen documentatie waarin wordt aangetoond dat dit erosieproblemen veroorzaakt, hetgeen deels wordt verklaard door het feit dat de stroomsnelheid lager is. Het kan niet worden uitgesloten dat als de stroomsnelheid in het LD RNB-systeem 20 m/s zou bedragen, er geen erosieproblemen zouden ontstaan.

Het uitgangspunt voor erosie als faalmechanisme is dan ook dat deze momenteel geen integriteitsproblemen oplevert (hetzij door de afwezigheid van vreemde deeltjes, hetzij omdat de snelheden ver onder de grens van 20 m/s liggen). Het is echter van belang om te weten of het gebruik van waterstof met hoge snelheid invloed heeft op het risiconiveau als gevolg van erosie.

8.2 Beoordeling van erosie

In de upstream-sector wordt standaard bij ontwerpen, die in overeenstemming zijn met API RP 14E [24], rekening gehouden met erosie, vaak voor meer-fase stromingen van olie, water en gas. Voor eenfasige gasleidingen is de drukval in feite de belangrijkste factor die het ontwerp beperkt. Er wordt in algemene zin gesteld dat de door API 14E voorgestelde benadering niet integraal is en dat belangrijke interacties tussen erosie en mogelijke corrosie worden gemist [25]. Een ander veel gebruikt document is de door DNV aanbevolen praktijk O501 [26]. Dit document biedt een meer fundamentele benadering voor het karakteriseren van erosiesnelheden. Het werkelijke materiaalverlies E_m [kg/s] kan worden geschat op basis van:

$$E_m = K U_p^n F(\alpha) m_p \quad (\text{vergelijking 25})$$

waarbij K [m/s^{-n}] en n coëfficiënten zijn die afhankelijk zijn van het pijpleidingmateriaal, U_p de impactsnelheid van de deeltjes [m/s] is, en m_p de hoeveelheid vaste deeltjes die door de stroming wordt getransporteerd. De functie $F(\alpha)$ komt overeen met een correctiefactor voor de impacthoek van de deeltjes α en de ductiliteitsklasse van het materiaal.

Om de erosiesnelheid te bepalen, kunnen verschillende methodes worden gevolgd, zoals beschreven in ref. [26], voor verschillende geometrieën, zoals rechte pijpleidingen, bochten, vernauwingen of regelkleppen. Waarden voor verschillende, veel voorkomende materialen zijn in de referentie te vinden. Ongeacht de gevolgde werkwijze zullen de conclusies bij vergelijking van aardgas met waterstof vergelijkbaar zijn, voor verschillende geometrieën. Daarom blijft het toepassingsgebied van dit document beperkt tot de beoordeling van bochten.

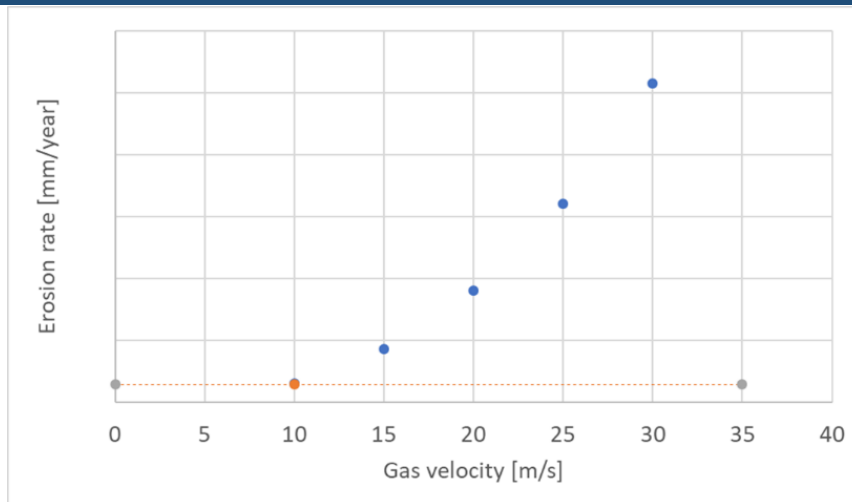
8.3 Benchmark tussen aardgas en waterstof

Bij de vergelijking van de aardgasstroom met de waterstofstroom is uitgegaan van de volgende veronderstellingen:

- Waterstof transporteert dezelfde hoeveelheid energie als aardgas.
- Leidingen van staal, HDPE en PVC.
- Eroderend materiaal: zand.
- Stofdeeltjeslast: maximum volgens Ministeriële Regeling Gaskwaliteit [27].

Als we (vergelijking 25) nader bekijken, blijkt dat de enige parameter die direct verband houdt met de stroomsnelheid de impactsnelheid van de deeltjes is. Bij voldoende hoge stroomsnelheden zullen vaste deeltjes worden opgetild en met de stroming worden meegevoerd (in evenwicht). In deze situatie is de impactsnelheid van de deeltjes gelijk aan de stroomsnelheid van het gas. Voor staal bijvoorbeeld bedraagt de waarde van de parameter n 2,6. De gevoeligheid voor de gassnelheid wordt geïllustreerd in Figuur 8-1. Ervan uitgaande dat alle andere parameters constant zijn, zou dit betekenen dat waterstof, dat ~ 3 maal sneller stroomt dan aardgas, een erosiesnelheid heeft die ruwweg 17 maal hoger is. Er zijn echter nog andere parameters die van de stroming afhangen, zoals de impacthoek voor een gegeven geometrie of het leidingwandoppervlak dat mogelijk aan impacts met deeltjes wordt blootgesteld. Daarom kan deze ratio niet volledig worden veralgemeniseerd.

Een tweede moeilijkheid bij het vaststellen van een generieke benchmark is dat de maximale stofdeeltjeslast die in de Regeling Gaskwaliteit wordt vermeld, $100 \text{ mg}/(n)\text{m}^3$ bedraagt. Omdat de samenstelling van het gas kan verschillen, hetgeen leidt tot verschillende gasdichtheden onder normale omstandigheden, betekent dit dat de werkelijke maximale stofdeeltjeslast zal verschillen wanneer verschillende gassen worden vergeleken. Er moet een keuze worden gemaakt: ofwel wordt de hoeveelheid stofdeeltjes berekend voor aardgas en vastgesteld bij vergelijking met waterstof, ofwel wordt de maximumgrenswaarde overeenkomstig het huidige wettelijke kader gerespecteerd. Dit wordt geïllustreerd in Tabel 8-1. In het eerste geval is de ratio tussen waterstof en aardgas ~ 17 , in het tweede geval bijna ~ 50 . Aangezien er geen bijzondere reden is om aan te nemen dat leidingen met waterstof meer stofdeeltjes zullen bevatten dan die met aardgas, wordt de optie waarbij vergelijkbare percentages stofdeeltjes worden vergeleken, als realistischer beschouwd.



Figuur 8-1. Erosiesnelheid als functie van gassnelheid in een gegeven bochtconfiguratie, op basis van gevoeligheid volgens $U^{2,6}$. De absolute getallen op de y-as zijn verwijderd vanwege materiaalafhankelijkheid.

Tabel 8-1. Generieke benchmark van de erosiesnelheid voor aardgas en waterstof, die illustreert dat er sprake is van een significant verschil tussen de aanname van dezelfde hoeveelheid stofdeeltjes in beide gevallen, of wanneer in beide gevallen de maximale huidige wettelijke grenswaarde wordt gevolgd

	G-gas	Waterstof
Max. stofdeeltjeslast [mg/(n)m ³]	100	100
Dichtheid bij normale condities [kg/(n)m ³]	0,833	0,089
Daadwerkelijke stofdeeltjeslast bij normale omstandigheden [mg/kg]	120	1120
Calorische waarde, LHV [MJ/kg]	38,02	119,96
Calorische waarde, LHV [MJ/(n)m ³]	31,67	10,71
Energie-specifieke stroomsnelheid [n(m ³)/MJ]	0,032	0,093
Energie-specifieke stofdeeltjes [mg/MJ]	3,16	9,34
Stroomsnelheidsratio bij normale condities	n.v.t.	2,96
Stofdeeltjesratio bij normale condities [-]	n.v.t.	2,96
Erosiesnelheidsratio - uitgaande van alleen dezelfde stofdeeltjesratio (staal)	16,8	
Erosiesnelheidsratio - uitgaande van dezelfde originele wettelijke limiet (staal)	49,6	

8.4 Voorbeelden

In deze paragraaf wordt ter illustratie een aantal typische casussen voor het gasnet van Nederland gebruikt. Alle berekeningen zijn gebaseerd op ref. [26] waarin ook de benodigde materiaalconstanten worden vermeld. Alle casussen zijn van toepassing op een pijpleidingbocht. De hoeveelheid stofdeeltjes voor de waterstofcasus is dezelfde als voor de aardgascasus, d.w.z. dat de maximale wettelijke limiet alleen wordt toegepast op de aardgascasus, en dat de verkregen waarde vervolgens ook wordt gebruikt voor de waterstofcasus. In alle gevallen wordt aangenomen dat de hoeveelheid stofdeeltjes constant is. In werkelijkheid zullen eventuele pockets van stofdeeltjes door het netwerk worden getransporteerd en een bepaalde plaats slechts gedurende een beperkte tijd

eroderen. De casussen (1-8) en de bij de berekeningen gebruikte parameters worden gegeven in Tabel 8-2.

Als eerste valt op dat, wanneer 10 m/s wordt aangenomen als een referentie-stroomsnelheid van aardgas, de erosiesnelheden op uurbasis beperkt zijn. Alleen als er voortdurend verontreiniging door stofdeeltjes aanwezig zou zijn, zou dit in de loop der jaren tot zichtbare erosiesnelheden leiden. Dit kan een verklaring zijn voor de huidige stand van zaken waarin erosie niet als een probleem wordt waargenomen, hetgeen gedeeltelijk kan worden verklaard door het gebruik van preventieve maatregelen om verontreiniging door stofdeeltjes te beperken, alsmede door de in de gasnetten gehanteerde maximale stroomsnelheid. Overschakeling op waterstof bij hoge snelheid zou tot veel hogere erosiesnelheden leiden. Hoewel dit in het algemeen de dominante trend is, kan het erosiepotentieel verschillen als gevolg van andere parameters, bijvoorbeeld doordat de deeltjesgrootte boven of onder een drempelwaarde ligt die wordt bepaald door stromingsgerelateerde waarden (Reynoldsgetal, vloeistofdichtheid). Het gebruikte model wordt gekenmerkt door steile, discontinue veranderingen in het gedrag, afhankelijk van de bovengenoemde stromingsgerelateerde parameters. De resultaten kunnen niet worden uitgebreid naar het RNB-systeem omdat de dichtheid van het gas lager is dan 1 kg/m^3 , hetgeen buiten het toepasbaarheidsbereik valt van het model dat in ref. [26] wordt gepresenteerd. Verwacht wordt dat de erosiesnelheden ook hoger zijn, maar dit kan niet met zekerheid worden gesteld op basis van dit model alleen. Vervolgonderzoek voor de voor RNB's typische omstandigheden wordt aanbevolen.

Tabel 8-2. Parameter gebruikt in de berekeningen van absolute erosiesnelheden. De stofdeeltjesbelasting in de waterstofcasus wordt verondersteld constant te zijn gedurende één volledig uur en gelijk te zijn aan die in de aardgascasus (d.w.z. niet gebaseerd op toepassing van de wettelijke limiet op elke casus afzonderlijk).

Casus nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
Druk [bar(a)]	80	40	40	8	8	2	1,1	1,1
Pijpleidingmateriaal (*)	Staal	Staal	Staal	Staal	HDPE	HDPE	HDPE	HDPE
Pijpleidingdiameter [DN]	1200	1200	400	200	200	200	200	100
Materiaalconstante K [10^{-9}m/s^{-n}]	2,0	2,0	2,0	2,0	3,5	3,5	3,5	3,5
Materiaalexponent, n [-]	2,6	2,6	2,6	2,6	2,9	2,9	2,9	2,9
Materiaaldichtheid [kg/m^3]	7800	7800	7800	7800	1150	1150	1150	1380
Zanddichtheid [kg/m^3]	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650	2650
Zandkorrel diameter [μm]	100	100	100	100	100	100	100	100
Stofdeeltjeslast [$\text{mg}/(\text{n})\text{m}^3$]	100	100	100	100	100	100	100	100
Stroomsnelheid (G-gas) [m/s]	10	10	10	10	10	10	10	10
Resultaten								
Verlies wanddikte (G-gas) [$\mu\text{m}/\text{h}$]	0,0024	0,0021	0,005	0,0036	0,08	0,02	0,004	0,0001
Verlies wanddikte (H_2) [$\mu\text{m}/\text{h}$]	0,34	0,24	0,33	**	**	**	**	**
Erosiesnelheidsratio [-]	141	117	60	**	**	**	**	**

(*) Hoewel het mogelijk was informatie te vinden over erosie in PVC-buizen, was het niet mogelijk met betrouwbaarheid de numerieke waarden te bepalen die moeten worden toegekend om in te voeren in het empirische model van ref. [26]. (**) Helaas is de dichtheid van waterstof bij dergelijke drukken lager dan 1 kg/m^3 , hetgeen buiten het toepasbaarheidsbereik van het gebruikte model ligt.

8.5 Conclusie

Erosie wordt momenteel niet gezien als een integriteitsrisico bij gastransportsystemen. Er zijn geen aanwijzingen dat erosie een probleem is, zelfs niet na tientallen jaren van gebruik van het gastransportsysteem in Nederland. Gasreinigingsprocessen en filters op verschillende locaties van de systemen zijn aanwezig om deeltjes in het netwerk te voorkomen. Niettemin zullen incidenteel beperkte hoeveelheden vaste (stof)deeltjes in het netwerk terechtkomen. Wanneer waterstof wordt gebruikt om dezelfde hoeveelheid energie te transporteren als in aardgassystemen, is de verwachting dat het erosiepotentieel van dergelijke deeltjes veel groter is. Dit is vooral te wijten aan het grote effect dat de stroomsnelheid heeft op de erosiesnelheden.

Gezien het bovenstaande en het feit dat andere referenties erosie als een beperkende factor voor de stromingssnelheid aanwijzen, is er voldoende aanleiding voor vervolgonderzoek, en samenwerking met andere initiatieven in Europa op dit punt. Bovendien omvat het toepassingsgebied van de methode die is gekozen om erosiesnelheden te karakteriseren, niet de waterstofstromen bij lage druk die karakteristiek zijn voor de RNB-systemen. Vervolgonderzoek naar erosie zou kunnen bestaan uit:

- Erosietests in het laboratorium om de in de RNB-systemen gebruikte materialen te karakteriseren.
- Verificatie van de prestaties van het aangenomen model in vergelijking met simulaties uitgevoerd met Computational Fluid Dynamics (CFD, numerieke stromingssimulaties) voor typische leidingonderdelen en materialen.
- Bepaling van de ongunstigste stroomsnelheden in de netten en de ongunstigste blootstellingsduur aan verontreiniging door stofdeeltjes door middel van netwerksimulaties.

9 Perspectieven en slotopmerkingen

De stroomsnelheid van een gas in een leidingtransportsysteem wordt beperkt door een aantal aspecten. De stroomsnelheid wordt bepaald door de keuze van de systeemcapaciteit, de bedrijfsomstandigheden, de dimensionering van de onderdelen en apparatuur en andere zaken die niet noodzakelijk technisch van aard zijn. De combinatie van deze factoren die de laagste genivelleerde transportkosten oplevert, bepaalt wat de resulterende stroomsnelheid is op alle punten van het transportsysteem. De stroomsnelheid zelf kan echter een beperking vormen bij deze optimalisatie vanwege de risico's die zijn verbonden aan stromingen met zeer hoge snelheid. Voor aardgas wordt deze limiet gewoonlijk op 20 m/s (72 km/h) gesteld. Indien dezelfde limiet zou worden toegepast op waterstof, kan dit een onnodig conservatieve beperking vormen voor de capaciteit van nieuwe en hergebruikte systemen om energie te transporteren.

In dit rapport zijn de verschijnselen onderzocht die verband houden met integriteitsrisico's in verband met gasstromen met hoge snelheid. Er wordt een generieke benchmark tussen aardgas (G-gas) en waterstof gepresenteerd, waarbij wordt uitgegaan van een gelijke energietransportcapaciteit tussen de beide dragers. Het doel van de benchmark is te evalueren of er bij deze aanname sprake is van belemmeringen die het transport onder dergelijke omstandigheden verhinderen. Met andere woorden, of de toegestane stroomsnelheid voor waterstof groter kan zijn dan de waarde die traditioneel voor aardgas wordt gebruikt, en onder welke condities dat is toegestaan.

In deze studie wordt gebruik gemaakt van bestaande methoden om de risico's in verband met de fysische verschijnselen te kwantificeren. Deze worden op grote schaal gebruikt in de industrie, niet alleen in aardgastransportsystemen, maar ook in de upstream koolwaterstofproductiesector of de petrochemische industrie. De methoden zijn over het algemeen generiek van aard, en waterstof vormt daarop geen uitzondering. Daarbij moet worden meegenomen dat het transport van waterstof wereldwijd reeds met succes plaatsvindt via duizenden kilometers leiding, hoewel dit plaatselijk lokaal veelal gebeurt bij snelheden en condities die minder veeleisend zijn dan nu voor de energietransitie worden nagestreefd. Ten behoeve van de analyse van deze verschijnselen verschilt waterstof niet van aardgas of andere gassen. De richtlijnen van het Energy Institute [15], kunnen zoals gebruikelijk worden gevolgd voor stromingsgeïnduceerde integriteitsrisico's. Compressorapparatuur kan zoals gebruikelijk worden ontworpen aan de hand van de API 618-norm. Erosiebeheersingsrichtlijnen, zoals API RP 14E of DNV RP O501, kunnen eveneens worden gevolgd.

Het belangrijkste resultaat van dit onderzoek is dat de risiconiveaus in verband met deze verschijnselen bij waterstofstromen met dezelfde energiestroom als aardgas (G-gas) vergelijkbaar zijn. Als bij aardgastransport 20 m/s een vuistregel is voor de maximale stroomsnelheid in het net, zou 60 m/s de vuistregel kunnen zijn voor waterstof. Bedrijf met waterstof met eenzelfde stromingssnelheid van 20 m/s zal vanuit elk in dit verslag geanalyseerd aspect een aanzienlijk mildere situatie opleveren. Bedrijf met 40 m/s is even goed mogelijk, hoewel er problemen met ingestoken instrumenten (bijvoorbeeld thermowell temperatuur sensoren) beginnen te ontstaan en het erosiepotentieel ook al aanzienlijk is toegenomen. Teneinde de stroomsnelheid te kunnen bereiken die nodig is voor een tussen waterstof en aardgas vergelijkbare energietransportcapaciteit zijn de volgende twee waarschuwingen op zijn plaats.

De eerste waarschuwing houdt verband met het erosiepotentieel. Pijpleidingen voor gastransport zijn normaal gesproken zeer schoon en vrij van potentieel eroderende stoffen zoals zand. Bij afwezigheid van eroderend materiaal kan er natuurlijk geen sprake zijn van (interne) erosie. Geconcludeerd is echter dat bij het incidenteel binnendringen van zand het eroderend potentieel van hoge snelheid (waterstof)stromen zeer sterk toeneemt. Of filters even goed presteren als bij aardgas,

en of strikter onderhoud noodzakelijk is, is momenteel nog onzeker. Het is belangrijk de prestaties van filters in de GTS- en RNB-systemen met waterstofstromen met hoge snelheid te onderzoeken. Dit moet een betere kwantificering mogelijk maken van het risico van verontreiniging door stofdeeltjes in de gasstroom die verantwoordelijk is voor mogelijke erosie. Een tweede onderzoekslijn kan worden gekoppeld aan specifieke stromingssimulaties om de worst-case erosiesnelheden in de RNB-systemen te karakteriseren, in combinatie met geschikte materiaalconstanten voor PVC-buizen, waarvoor tests nodig kunnen zijn.

Een tweede waarschuwing (van wat minder gewicht) die uit deze onderzoeken voortvloeit, houdt verband met de dynamica bij hoge frequenties. Zelfs in het geval dat waterstof relatief lagere pulsatie- of afgestraalde geluidsamplituden vertoont dan aardgas, zal het dit doen bij driemaal hogere frequenties. De hogere frequenties kunnen leiden tot grotere technische uitdagingen om vibraties te beperken, zelfs voor lagere amplitudes. Hetzelfde geldt voor geluid: terwijl in sommige gevallen hogere frequenties zullen leiden tot een betere afscherming door de leiding of zelfs buiten het (menselijke) hoorbare bereik komt te liggen, kan ook het omgekeerde het geval zijn: dat de leiding 'transparanter' is en meer geluid zal afstralen, en dat bij frequenties waarvoor mensen gevoeliger zijn. Het is helaas niet mogelijk te veralgemeniseren wat de dominante trend zal zijn, zodat elk geval nog steeds afzonderlijk moet worden beoordeeld. Dit is hoe dan ook een standaardpraktijk in de industrie, zelfs bij aardgastransportinstallaties of andere industriële processen, zodat het niet wordt beschouwd als een kritiek aspect dat extra onderzoek en voorzichtigheid vereist. Bestaande risicokwantificerings- en risicobeperkingsmethoden zijn geldig en moeten worden toegepast.

Sommige van de hier gepresenteerde conclusies moeten middels praktijkonderzoek worden gecontroleerd. Zo is in 2020 in samenwerking met dezelfde HyDelta-partners [19] de geluidsproductie en -afstraling bij gasdistrictstations met succes gecontroleerd. Indien mogelijk wordt aanbevolen de in dit rapport beschreven verschijnselen te analyseren door middel van praktijkonderzoek met stromende waterstof. Dat zou het uiteindelijke bewijs leveren om de in dit rapport waargenomen trends en conclusies vast te stellen.

Een laatste opmerking betreft onderwerpen die momenteel buiten de scope van dit rapport vallen. Het is van belang dat eventuele meetfouten in flowmeters ten gevolge van onstabiele stromingen (pulsaties, turbulentie) beter worden begrepen, hetgeen een aspect is dat ook verband houdt met de stroomsnelheid. Aanbevolen wordt om deze verschijnselen te onderzoeken als integraal onderdeel van de onderzoeken die worden uitgevoerd om de aan volumestroom-meetapparatuur voor waterstof gestelde eisen vast te stellen.

10 Lijst van referenties

- [1] Gasunie Transport Services, *Ontwerp Uitgangspunten transportsystemen*, 1 7 2014.
- [2] NEN, 7244 - *Gasvoorzieningsystemen - Leidingen voor maximale bedrijfsdruk tot en met 16 bar*, NEN, 2014.
- [3] NEN, 3650 - *Transportleidingen*, NEN, 2020.
- [4] NEN, 1059 - *Gasvoorzieningsystemen - Gasdrukregel- en meetstations voor transport en distributie*, NEN, 2019.
- [5] Netbeheer Nederland, *Handleiding Nestor Gas, versie 4.0*, 1 1 2018.
- [6] NEN, 3651 - *Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken*, NEN, 2020.
- [7] ASME, *B31.12 Hydrogen Piping and Pipelines*, American Society of Mechanical Engineers, 2020.
- [8] N. González Díez, S. van der Meer, J. Bonetto en A. Herwijn, *Technical assessment of Hydrogen transport, compression, processing offshore*, North Sea Energy, 2020.
- [9] HIGGS project, <https://www.higgsproject.eu/the-project/>, 2021.
- [10] H21 project, *H21 Strategic Modelling Major Urban Centers*, 2021.
- [11] K. Steiner, *20 m/s – über die Strömungsgeschwindigkeiten in der Gasinfrastruktur*, 2021.
- [12] N. Albers, L. van Lier en M. van der Biezen, „Engineering approach for world’s largest hydrogen compression system,” in *11th EFRC Conference*, Madrid, 2018.
- [13] Wikipedia, *Energy Density*, https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density, (Accessed on February 26, 2019).
- [14] KIWA, *Toekomstbestendige gasdistributienetten*, Apeldoorn: KIWA, 2018.
- [15] Energy Institute, *Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework*, 2008.
- [16] ASME PTC 19.3 TW-2016 - *Thermowells*, American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [17] IEC 60534-8, *Industrial process control valves - Part 8-3: Noise considerations - Control valve aerodynamic noise prediction method*, 2011.
- [18] NORSOK, *L-002 Standard - Piping system layout, design and structural analysis, 4th edition*, 2016.
- [19] C. Lock, *Gasdrukregelstation voor waterstof*, Apeldoorn: Kiwa N.V., 2020.

- [20] M. Norton en M. Bull, „Mechanisms of the generation of external acoustic radiation from pipes due to internal flow disturbances,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 1, nr. 94, pp. 105-146, 1984.
- [21] VDI 3733, *Noise at pipes*, 1996.
- [22] N. Barton, *Erosion in Elbows in Hydrocarbon Production Systems: Review Document*, Glasgow: TÜV NEL Ltd for HSE Executive, 2003.
- [23] A. Kooiman, „Stof tot nadenken,” *Gasnet*, vol. 32, nr. 2, June 2018.
- [24] American Petroleum Institute, *API RP 14E : Recommended Practice for Design and Installation of Offshore Production Platform Piping Systems*, 1991.
- [25] F. Sani, S. Nestic, F. Esaklul en S. Huizinga, *Review of the API RP 14E erosional velocity equation: origin, applications, misuses and limitations*, Nashville: NACE, 2019.
- [26] DNV, *DNVGL-RP-O501 Managing sand production and erosion*, Det Norske Veritas, 2011.
- [27] Ministerie van Economische Zaken, *Ministeriële Regeling Gaskwaliteit* <https://wetten.overheid.nl/BWBR0035367/2019-01-01>, Den Haag: Overheid.nl, 2019.
- [28] Netbeheer Nederland, *Affakkelen en afblazen van waterstof (KIWA)*, 2021.