

HyDelta

WP1B – Gasstations

D1B.4 – Stoftransport met waterstof/ aardgas ten behoeve van gasfilters (Deel 1)

Status: final

Document summary

Corresponderende auteur

Corresponderende auteur	Ir. Sander van Woudenberg Dr. Ir. Nard Vermeltfoort
Verbonden aan	KIWA Technology BV
Email adres	sander.van.woudenberg@kiwa.com nard.vermeltfoort@kiwa.com

Document historie

Versie	Datum	Auteur	Verbonden aan	Samenvatting van de wijzigingen
1	04-Feb-2022	Sander van Woudenberg/ Nard Vermeltfoort	KIWA Technology BV	Eerste versie; concept
2	28-Feb-2022	Sander van Woudenberg/ Nard Vermeltfoort	KIWA Technology BV	Tweede versie; verwerking commentaar
2a	14-Mar-2022	Sander van Woudenberg/ Nard Vermeltfoort	KIWA Technology BV	Derde versie; verwerking commentaar
3	07-Apr-2022	Sander van Woudenberg/ Nard Vermeltfoort	KIWA Technology BV	Vierde versie; verwerking commentaar

Verspreidingsniveau

Verspreidingsniveau		
PU	Public	X
R1	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> Partners inclusief Expert Assessment Group Andere deelnemers aan het project inclusief Sounding Board Externe entiteit gespecificeerd door het consortium (please specify) 	
R2	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> Partners inclusief Expert Assessment Group Andere deelnemers aan het project inclusief Sounding Board 	
R3	Beperkt tot <ul style="list-style-type: none"> Partners inclusief Expert Assessment Group 	

Document beoordeling

Partner	Naam
Kiwa Technology BV	Arie Kooiman
Enexis	Raymond van Hooijdonk/ John Voogt
Rendo	Johan Jonkman
Alliander	Peter Versteegen
Stedin	Ricardo Verhoeve
Gasunie	Steffen Elgersma
NBNL, Gasunie, Kiwa, DNV, TNO, NEC	HyDelta Supervisory Group

Executive summary

In view of the energy transition, there is an ongoing interest to assess whether the existing natural gas infrastructure can be utilized to transport hydrogen. In the HyDelta work package 1B, it is specifically researched if existing gas pressure reducing stations are suitable, or alternatively can be made suitable for this purpose. One of the focus areas in a gas pressure reducing station is the filter element. This filter element is applied to filter the incoming gas and remove dust and protect the active components of the station as well as the downstream grid.

In the past, Kiwa has performed research into the gas transport velocity [1] where it was concluded that in case of hydrogen, a factor 3 will be applicable to be able to transport the same amount of energy. The effect of this increase in gas velocity on the filter is unknown. Therefore the main goal of this research will be to answer the following question:

Is it possible to utilize the currently applied type of filter element without modifications to safely and efficiently filter dust in the natural gas grid when hydrogen would be applied?

An answer on the main question contains many aspects and cannot be answered clearly without understanding the basic physics of dust transport in a hydrogen environment. To understand and answer the basic physics, the following sub-questions have been drafted. Sub-questions 1 to 4 will be answered in this report, questions 5 and 6 will be researched in a follow up;

1. *What is the consequence of switching from natural gas to hydrogen in view of the gas velocity and the effects on dust transport?*
2. *Will the increase in gas velocity lead to an increase of dust in the filters?*
3. *Which characteristics of the dust in the natural gas grid are important to take into account when executing the test program?*
4. *Which variables should be examined in test program to assess the risk involved with respect to the transportation ability of dust when switching from natural gas to hydrogen?*
5. *What is the effect of operational gas grid pressure on dust transport?*
6. *What are the consequences for the filters with respect to dust transport?*

The sub-questions are aimed so to give insights into the transport of dust in natural gas as well as in hydrogen. The main question can be answered by the sub-question if two assumptions are made. Firstly; the change in medium from natural gas to hydrogen has little to no effect on the filtration properties of the filter. Secondly: the impact of the particles that hit the filter is negligible compared to the mass and rigidity of the filter. By doing so, the main question can be simplified by answering a part of the sub-questions.

To answer the sub-questions, a literature study was executed. As a result, several theories were found but none of these include research involving dust transport phenomena with hydrogen. To examine which theory approaches reality, a set of experiments have been performed. The literature study was used as a basis to practically approach the construction of a test setup. With this transparent setup, tests have been performed in 6 steps. In the first set of tests, the reproducibility as well as the dependency of time and mass have been mapped. The tests will support the selections which were made to perform the second set of tests.

The terminal velocity (defined as the tipping point where a dust particle start to move with the gas) in relation to the dust particle size were researched for air, natural gas and hydrogen. From these experiments, it can be concluded that the terminal velocity is between 1,2 and 2,6 times higher for hydrogen in comparison with natural gas. When this is combined with the knowledge that hydrogen needs an increased velocity by a factor of 3, it can be concluded that it is likely that initially more dust will be transported if the grid is transferred to the distribution of hydrogen. This is the most important conclusion from these test. The biggest nuance on this conclusion is that dust transport is dependent on the mean dust particle size as well as the density of the dust.

This research indicates that there seems to be a link between the momentum ($\rho \cdot v^2$) of the gas and the amount of dust which is moved. A recommendation here would be to further examine this momentum theory experimentally as well as theoretically. Understanding this link could be an enabler to understand dust transport phenomena in different gasses as well as dust transport with gasses at

different pressures. Also it is recommended that tests with actual stations, pressures and flows are performed to validate the models and assumptions.

Samenvatting

In het kader van de energietransitie wordt in het HyDelta project onderzocht of de bestaande aardgasdistributie infrastructuur kan worden ingezet voor het transporteren van waterstof. In het werkpakket HyDelta 1B is onderzocht of de bestaande gasstations geschikt zijn, of geschikt te maken zijn, voor de distributie van waterstof. Een van de aandachtspunten hierbij is het filter in het gasstation die het inkomende gas filtert zodat er geen verontreinigingen in de actieve componenten van het station en het achterliggende net komen.

Uit eerder onderzoek van Kiwa [1] is gebleken dat de stromingssnelheid in de leidingen in geval van waterstof een factor 3 hoger zal moeten gaan worden om dezelfde hoeveelheid energie te kunnen transporteren. Het is onbekend wat deze toename in stroomsnelheid voor effect heeft op het gasfilter. Daarom heeft dit onderzoek het doel om de volgende onderzoeksvraag te beantwoorden:

Kan het huidige type stoffilter zonder aanpassingen worden toegepast voor het veilig en efficiënt filteren van deeltjes in het gasdistributienet wanneer er wordt overgestapt op waterstof?

Een antwoord op deze hoofdvraag bevat vele facetten en is niet eenduidig te beantwoorden zonder eerst de basisfysica van stofdeeltjes in waterstof goed te begrijpen. Om deze basisfysica te begrijpen, en daarmee antwoord te kunnen geven op de hoofdvraag, worden de eerste vier deelvragen onderzocht. De laatste twee vragen zullen in een vervolg onderzoek ondergebracht worden:

1. *Wat is het effect van de verandering van aardgas naar waterstof en het verhogen van de gassnelheid op stoftransport?*
2. *Komt er door het verhogen van de gassnelheid meer stof in de filters terecht?*
3. *Wat karakteriseert het stof in het gasnet voor het uitvoeren van een testprogramma?*
4. *Welke variabelen moeten in een testprogramma onderzocht worden om tot een eenduidige conclusie te komen rondom de risico's met stof bij omschakeling van aardgas naar waterstof?*
5. *Wat is het effect van de netdruk op stoftransport?*
6. *Wat zijn de te verwachten effecten voor het filter met betrekking tot stoftransport?*

Bovenstaande deelvragen zijn gericht om inzicht te geven over het stoftransport in aardgas en waterstof. Om de hoofdvraag te beantwoorden worden een tweetal aannames gedaan. De eerste aanname is dat het medium (aardgas of waterstof) dat door het filter stroomt weinig tot geen effect heeft op de filtratie eigenschappen van het filter. Ten tweede wordt aangenomen dat de impact die een stofdeeltje heeft wanneer het tegen het filter wordt geblazen, verwaarloosbaar is ten opzichte van de massa en robuustheid van het filter. Door deze aannames wordt de hoofdvraag vereenvoudigd en kan deze beantwoord worden door een deel van bovenstaande deelvragen te beantwoorden.

Om de deelvragen te beantwoorden is eerst een literatuurstudie uitgevoerd. Hieruit kwamen diverse theorieën naar boven maar bleken experimentele resultaten niet voor handen. Om te onderzoeken welke theorie de praktijk het beste beschrijft, zijn experimenten uitgevoerd. Hierbij is goed gekeken naar het literatuuronderzoek en daarmee is op pragmatische wijze een doeltreffende opstelling opgezet. Met deze opstelling zijn testen gedaan in 6 stappen. In de eerste stappen zijn reproduceerbaarheid, tijds- en massa-afhankelijkheid beproefd. Dit geeft een verdedigbare basis voor de gemaakte keuzes die worden gebruikt bij de vervolgsperimenten.

Zo is voor verschillende korrelgroottes de kritische snelheid (gedefinieerd als het omslagpunt waarbij een deeltje gaat meebewegen met de gasstroom) bepaald in lucht, aardgas en waterstof. Deze kritische snelheid ligt voor waterstof een factor 1,2 tot 2,6 hoger dan bij aardgas. Echter, om dezelfde hoeveelheid energie te transporteren zal de verwachte snelheid voor waterstof een factor 3 hoger liggen. Door dit te combineren kan er dus initieel meer stoftransport worden verwacht wanneer de distributienetten worden overgezet van aardgas naar waterstof. Dit is dan ook de belangrijkste conclusie van het onderzoek. De grootste nuancering hierbij is dat dit afhangt van zowel de gemiddelde korrelgrootte als de dichtheid van het stof.

Uit het onderzoek lijkt naar voren te komen dat er een mogelijke relatie is tussen het momentum (ρv^2) van het gas en de hoeveelheid stoftransport. Het is aan te bevelen deze momentum theorie nog verder theoretisch en experimenteel te onderzoeken. Het begrijpen van deze relatie is van belang om een directe link te kunnen maken tussen gassen onderling en tussen gassen bij verschillende drukken. Daarnaast zijn testen met werkelijke installaties, drukken en debieten aan te bevelen om zeker te zijn dat de aannames en het schaalmodel kloppen.

Table of contents

Document summary	2
Executive summary	3
Samenvatting.....	5
1. Aanleiding.....	8
Doelstelling.....	8
Aanpak.....	9
2. Gasdrukregelstation	10
2.1 Opbouw van het gasdrukregelstation	10
2.2 Gasfilters.....	11
3. Literatuurstudie.....	12
3.1 Interessante literatuur	12
3.2 Definitie van transparante testopstelling.....	13
4. Testopstelling	15
4.1 Transparante testopstelling	15
4.2 Type stof voor experimenten	16
4.3 Testmatrix.....	17
4.4 Beschrijving van het uitvoeren van de testen.	19
5. Meetresultaten.....	20
5.1 Stoftransport in verschillende gassen (stap 1 en 2)	20
5.2 Stoftransport en de invloed van tijd (stap 3)	23
5.3 Stoftransport en reproduceerbaarheid (stap 4).....	24
5.4 Hoeveelheid aanwezig stof en stoftransport (stap 5)	26
5.5 Stoftransport en gassnelheid (stap 6)	27
6. Conclusies en aanbevelingen	31
Conclusies.....	31
Aanbevelingen:.....	32
Referenties	33
I Overzicht van vragen HyDelta WP1B	34
II Overzicht samenstelling begeleidings- en sparringsgroep.....	35
III Begrippenlijst.....	36
IV Samenstelling stof	37
V Berekeningen voor transparante testopstelling	38
VI Foto's van transparante testopstelling	39

1. Aanleiding

In het kader van nationaal onderzoeksprogramma HyDelta is als onderzoeksvraag binnen het werkpakket gasstations gekeken naar de geschiktheid van het huidige aardgasnet om te gebruiken voor waterstofdistributie. Een van de deelvragen is in hoeverre de huidige gasstations geschikt zijn voor waterstof. In stations zitten filters om te voorkomen dat stof in kwetsbare componenten terecht komt. Met waterstof zal een ander medium door het gasstation en het filter getransporteerd worden en dit werpt de vraag op in hoeverre gasfilters zich anders zullen gedragen wanneer er waterstof doorheen stroomt. Heeft een omschakeling naar waterstof invloed op de hoeveelheid vervuiling (vanuit het gasnet) van filters met stof en zo ja, is het aanpassen van het onderhoudsregime gewenst?

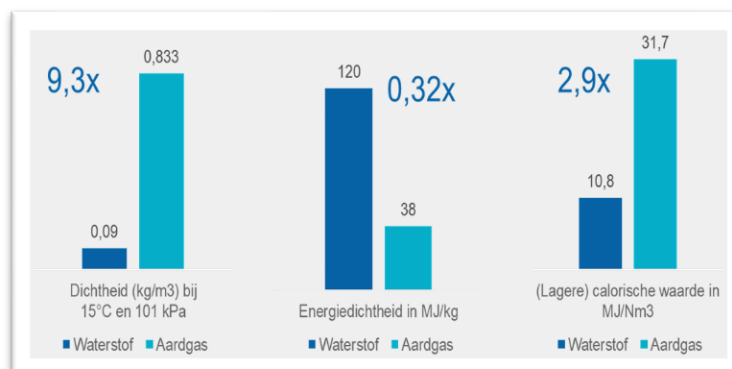
In dit onderzoek is het doel om de volgende onderzoeksvraag te beantwoorden:

Kan het huidige type stoffilter zonder aanpassingen worden toegepast voor het veilig en efficiënt filteren van deeltjes in het gasdistributienet wanneer er wordt overgestapt op waterstof?

De Nederlandse regionale netbeheerders willen van bestaande – of eventueel beperkt aangepaste – gasdrukregelstations voor aardgas en zuiver waterstof (H₂) vaststellen wat de impact gaat zijn op het transport van stof. Dit stof is aanwezig in het distributienetwerk als gevolg van veroudering van netwerken en werkzaamheden uit het verleden aan netwerken.

Toelichting:

Waterstof heeft andere fysische eigenschappen dan aardgas en om dezelfde hoeveelheid energie te leveren als met aardgas moet de gassnelheid van het waterstof ongeveer een factor drie hoger zijn. Dit wordt geïllustreerd aan de hand van de energiedichtheid en de calorische waarde in het figuur aan de rechterkant.



Figuur 1: eigenschappen van aardgas en waterstof

Doelstelling

Om de probleemstelling zoals hierboven gesteld goed te kunnen beantwoorden moet eerst gekeken worden naar de fysische mechanismen die ten grondslag liggen aan vervuiling van het filter. De belangrijkste oorzaak van vervuiling is namelijk het transport van stof voordat dit stof het filter bereikt. Over het transport van stof door middel van waterstof is echter nog maar weinig bekend. Daarom is de hoofddoelstelling van dit onderzoek, om middels praktijkproeven inzicht te krijgen in het transport van stof in leidingen. Hierbij worden zowel lucht, aardgas als waterstof onderzocht als transportmedium. De testen met lucht zijn uitgevoerd omdat deze veilig en met lagere kosten en milieubelasting uitgevoerd kunnen worden in vergelijking met aardgas en waterstof. Het onderzoek is opgezet om aan te tonen of de hoeveelheden getransporteerd stof kunnen gaan leiden tot een aanpassing van het onderhoudsregime aan gasfilters wanneer het gasdistributienetwerk wordt overgezet van aardgas naar waterstof.

Aanpak

Voor het uitvoeren van testen met stof dient allereerst begrepen te worden hoe stof zich gedraagt in een gasstroom. In de basis waren drie stappen voorgesteld om het gedrag te bestuderen. Hierbij is een opstelling bedacht op basis van de variabelen die invloed hebben op stoftransport. Een literatuurstudie is hiervoor uitgevoerd om de opstelling goed te kunnen construeren en de gemaakte keuzes verder te onderbouwen. Tevens kan de theorie die van toepassing is op stoftransport, beter begrepen worden.

De testopstelling is gebruikt om de variabelen beter in kaart te brengen.

Stap 1; Transparante testopstelling voor begrip en visualisatie (atmosferische condities)

Stap 2; Testen met aardgas op hoge druk (8 bar)

Stap 3; Testen met waterstof op hoge druk (8 bar)

De opstelling in de eerste stap werkt onder atmosferische druk, dit terwijl gasfilters in gasstations en het voorgaand leidingsysteem bij RNB's meestal rond de 8 bar bedreven worden. Echter is de eerste stap nodig om de juiste inzichten te krijgen in de belangrijke variabelen en de invloed van deze variabelen. Daarnaast kan in een transparante testopstelling gevisualiseerd worden hoe stoftransport plaatsvindt, en ook heel specifiek onder welke omstandigheden (zie ook bijlage VI). Om deze inzichten op hogere druk te kunnen verwerven, is erg kostbaar. De reden hiervan is dat de complexiteit van de transparante testopstelling (die bestand is tegen hoge drukken) en de risico's (en daarmee ook de kosten) exponentieel stijgen wanneer de druk toeneemt.

Een complicerende stap in het onderzoek is hoe stof gecontroleerd gedoseerd kan worden in een leiding, al dan niet op druk en al dan niet gevuld met een brandbaar gas. Het vinden van een geschikt systeem om dit mogelijk te maken is erg lastig gebleken. Daarnaast bleek dat met het uitvoeren van stap 1 er op diverse fronten meer inzichten werden gekregen op het stoftransport die van groot belang zijn voor het uitvoeren van stap 2 en 3. Om binnen het gereserveerde budget en tijd te blijven, spitst deze rapportage zich specifiek toe op stap 1. De onderzoeksresultaten van deze stap zullen gerelateerd worden aan de doelstelling en een doorkijk zal gegeven worden naar mogelijk vervolgonderzoek.

2. Gasdrukregelstation

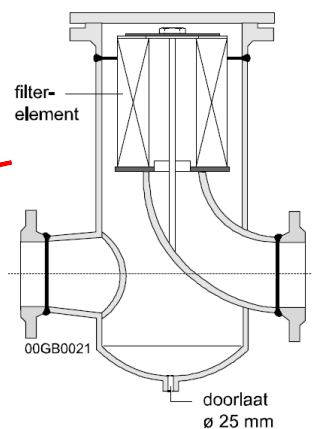
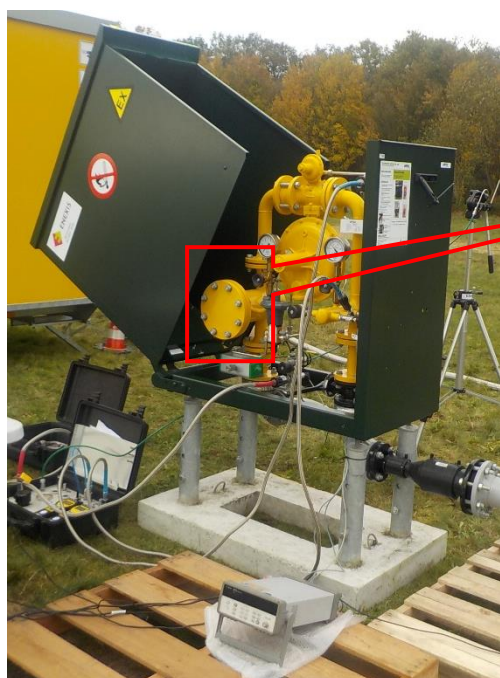
2.1 Opbouw van het gasdrukregelstation

In een gasdrukregelstation wordt de nominale inlaatdruk in de regel verlaagd van 8 bar(g) naar 100 mbar(g) zodat gas in een lagedruknetwerk richting huishoudens getransporteerd kan worden.

Een modern gasdrukregelstation is veelal ondergebracht in een roestvaststalen behuizing en bestaat minimaal uit de volgende componenten:

- Inlaatafsluiter die tevens dienst doet als veiligheidsafsluiter (VA).
- Stoffilter.
- Drukregelaar met aangebouwde veiligheid (veiligheidsafsluitklep (VAK)).
- Uitlaatafsluiter type vlinderklep of kogelkraan.

Figuur 2 toont een geopend gasdrukregelstation. Hierin is het gasfilterhuis omlijnd en aan de rechter kant is dit huis schematisch weergegeven.



Figuur 2: Links een geopend gasdrukregelstation (districtstation). Rechtsboven een gasfilterhuis en rechtsonder een aantal typisch toegepaste G-klasse filters.

2.2 Gasfilters

In een gasdrukregelstation zit een filterhuis met daarin een gasfilter. Dit filter voorkomt dat vervuilingen binnentreden bij kritische componenten zoals de gasdrukregelaar en veiligheidskleppen die in het station zitten. Tevens wordt voorkomen dat vervuilingen in het lagedruknet terechtkomen. In het merendeel van de gevallen bevat het filterhuis een cilindervormige cartridge die vervuilingen opvangt en zo verwijdert. Naarmate het filter verder vervuilt, neemt de drukval over het filter toe, hetgeen een indicatie kan zijn voor vervanging. Testen uit het verleden hebben echter aangetoond dat de drukval geen goede indicator is voor de mate van vervuiling [2]. Hierdoor kan enkel het visueel inspecteren van het gasfilter worden aangewend om vast te stellen dat een gasfilter vervangen dient te worden.

De filters zijn uiterst robuust. Pas als het filter echt overdreven vol zit is doorslag te verwachten [3]. Daarnaast gaan filters niet kapot van het gas dat er doorheen stroomt, maar door de vervuiling en bijbehorende drukval. Pas bij een zeer grote mate van vervuiling kan het drukverschil zo groot worden dat het filter kapot gaat. Op basis van de materialen in een gasfilter wordt niet verwacht dat waterstof het filter of het filtratieprincipe verandert, het momentum van het gas ($\rho \cdot v^2$) blijft immers ongeveer gelijk bij een driemaal hogere snelheid van waterstof ten opzichte van aardgas. Het is dus met name de hoeveelheid stof die het filter beïnvloedt. Vandaar de aanname dat er vooral gekeken moet worden naar stoftransport stroomopwaarts van het filter.

De filters zoals momenteel toegepast in de gasdistributie zijn afkomstig van verschillende fabrikanten. Niet al deze fabrikanten bestaan nog omdat ze opgegaan zijn in andere bedrijven of gestopt zijn met het fabriceren van filters. Voor leveranciers van nieuwe filters zijn M-filters en Votech filters veelgehoorde namen. In beide gevallen leveren deze partijen G-klasse filters die in gasdrukregel- en meetstations worden toegepast.

3. Literatuurstudie

3.1 Interessante literatuur

Voor het fysisch proces waarbij vaste stof getransporteerd wordt door een gas is veel onderzoek gedaan omdat dit vele toepassingen kent in de procestechnologie. Voorbeelden hiervan zijn zeer divers zoals bijvoorbeeld het scheiden van zand uit gas in schaliegas applicaties en fluidized bed reactoren voor nucleaire reactoren.

In het H100 project rapport “Transportation of debris by hydrogen flow inside PE pipelines” [4] wordt een screening gedaan van beschikbare informatie in het publieke domein. Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen verschillende gassen op basis van fysische eigenschappen. Tevens worden verschillende theorieën belicht met betrekking tot transport van stof in aardgas en waterstof. Deze theorieën zijn niet eenduidig als het gaat om de verhouding tussen stoftransport in aardgas en waterstof. Er zijn ook geen experimenten gedaan om deze theorieën verder te substantiëren.

In de paper “Pick-up, critical and wind threshold velocities of particles” [5] wordt een screening gemaakt voor het transport van vaste stof in vloeistoffen. Hierbij wordt een analyse gemaakt van verschillende theorieën die gebruikt worden voor pneumatisch transport. Wat vooral interessant is aan het artikel, is hoe verschillende theorieën/ experimenten een master curve met een gedefinieerde foutmarge volgen. De analyse aan de hand van Reynolds en Archimedes lijkt tevens toepasbaar op gassen. Het idee van een kritische snelheid van het transporterende medium is tevens van toepassing wanneer stof getransporteerd wordt in een gasleiding netwerk.

Bovenstaande paper [4] hangt nauw samen met de paper “On the prediction of pickup and saltation velocities in pneumatic conveying” [6]. Uit het artikel valt op te maken dat vele theorieën beschikbaar zijn voor het pneumatisch transport van vaste stofdeeltjes. In het artikel wordt onderscheid gemaakt tussen fijn stof (0-200 micron) en grof stof (200-4000 micron) waarbij de theorie van Rizk een afhankelijkheid laat zien voor het transport van stof voor verschillende korrelgroottes. Tevens is uit het artikel op te maken dat het transport van vaste stof afhankelijk kan zijn van de hoeveelheid te transporteren vaste stof en zijn verschillende soorten vaste stof transport onderzocht.

In de paper “Motion of entrained particles in gas streams” [7] wordt de relatie tussen het Reynolds getal en de weerstandscoëfficiënt belicht. Hierbij is er specifieke aandacht voor versnelling/ vertraging van het gas en de effecten die dit heeft op stoftransport. Gezien de fluctuatie van de snelheid in een gasnetwerk is dit een interessant onderwerp.

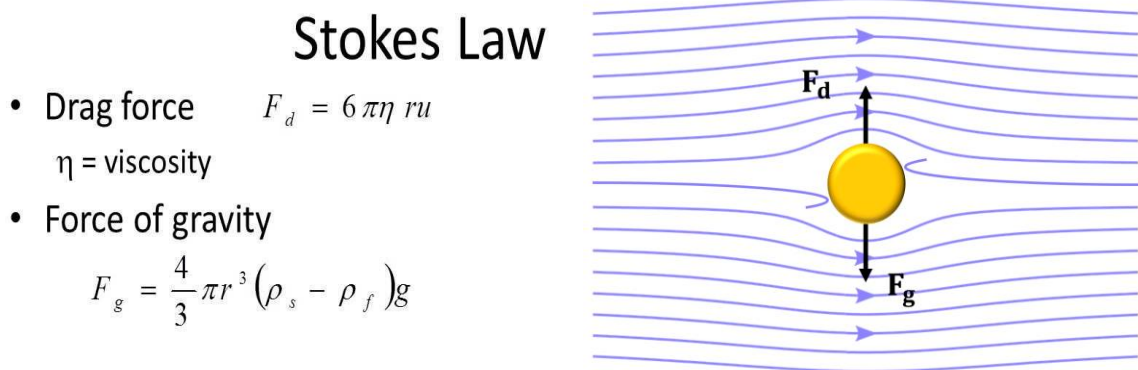
In de paper “Minimum transport velocities of minerals and metallic dusts in exhaust systems” [8] wordt middels experimenten gekeken naar de pick-up snelheid, de terminal velocity en de saltation velocity van verschillende vaste stoffen met verschillende dichtheden. Het gaat hierbij om de snelheid wat bij stofdeeltjes opgepikt worden door een gasstroom, uitvallen uit de gasstroom en wanneer stofdeeltjes zich turbulent door een buis verplaatsen. Hiervoor is een opstelling gebouwd waarbij met lucht is getest. Daarbij zijn voor de verschillende vaste stoffen correlaties opgesteld op basis van de dichtheid en de pick-up snelheid.

In de paper “on the drag of freely falling non-spherical particles” [9] wordt specifiek aandacht besteedt aan de invloed van de vormkarakteristieken van een stofdeeltje wanneer dit getransporteerd wordt in een ander medium. De vorm heeft invloed op de drag coëfficiënt C_D oftewel weerstandscoëfficiënt van een deeltje in een gas en is tevens sterk afhankelijk van het Reynolds getal.

Bovenstaande papers zijn allen gebruikt voor het ontwerpen van de transparante testopstelling.

3.2 Definitie van transparante testopstelling

In scheidingsprocessen wordt gebruikt gemaakt van modellen om een uitspraak te doen over hoe goed de scheiding van twee media kunnen plaatsvinden. Het kan hier gaan om gas-vloeistof, vloeistof-vloeistof, gas-vaste stof of vloeistof-vaste stof scheiding. Het proces waarbij een krachtenbalans bestaat tussen de zwaartekracht enerzijds en het drijfvermogen aan de andere kant. Dit wordt beschreven door de wet van Stokes (Stokes law). De wet is gebaseerd op de laminaire grenslaagtheorie waarbij de grenslaag om het omstroomde deeltje laminair wordt beschouwd. Het gaat hierbij om perfect sferische deeltjes. In de onderstaande figuur staat een korte schets van de situatie. De variabelen in onderstaande schets en verderop in deze paragraaf zijn toegelicht in bijlage III.



Figuur 3 – het krachtenveld volgens Stokes law in een horizontaal snelheidsveld

Wanneer bovenstaande vergelijkingen voor de drag force (luchtweerstand, in dit geval het krachtenveld waarin een deeltje zich beweegt) en de gravitatiekracht worden omgeschreven, kan de terminale snelheid (terminal velocity, TV) bepaald worden volgens de volgende vergelijking.

$$Tv = \sqrt{\frac{3gd_p(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}} \quad (\text{Vergelijking 1})$$

Deze terminale snelheid bepaalt welke deeltjesgrootte een opwaartse of neerwaartse beweging zal ondergaan op basis van het snelheidsveld. In combinatie met de verblijftijd van een deeltje in een gasnet kan op basis van het krachtenveld iteratief bepaald worden welke deeltjesgrootte gescheiden kan worden op basis van de eigenschappen van het deeltje alsook het medium waarin het zich beweegt.

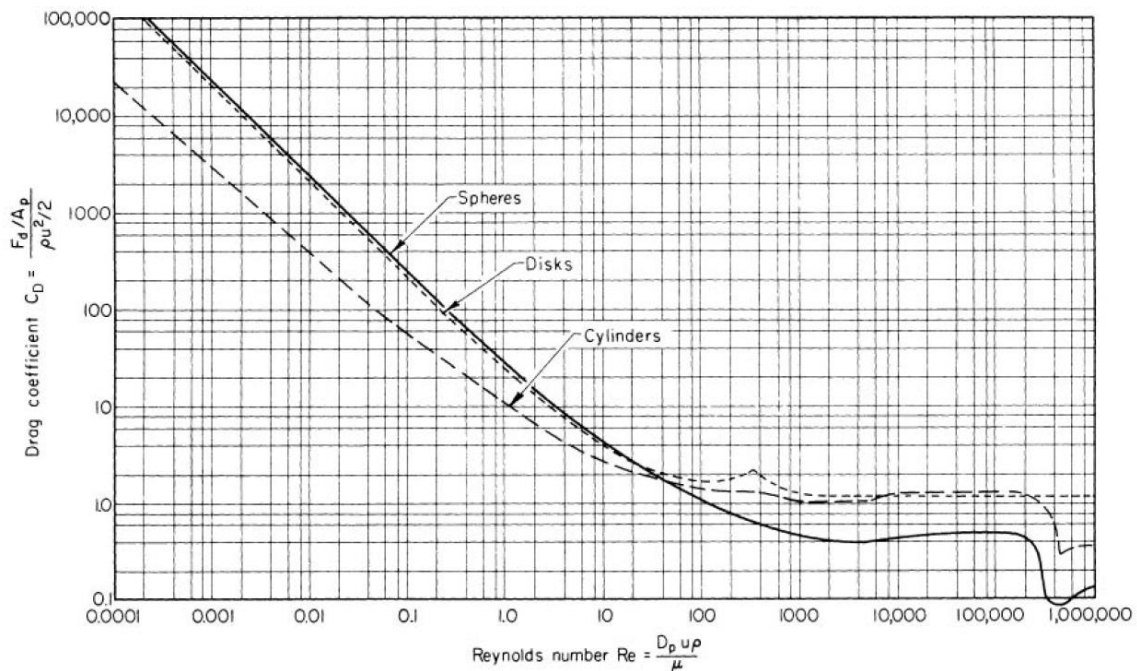
Stof aanwezig in het gasdistributienet wordt gekarakteriseerd worden door fysische grootheden. Afhankelijk van het medium (aardgas/ waterstof) en het stromingsveld kan bepaald worden of een deeltje zich in een laminair of turbulent stromingsveld bevindt.

Voor een perfect sferische deeltjes kan worden omschreven dat;

$$Tv = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3\rho_g C_D}}$$

(Vergelijking 2)

Hierin is de drag coëfficiënt C_D een functie van het Reynolds getal. De gevoeligheid voor turbulentie beschreven kan worden volgens de onderstaande figuur (zie Perry's Chemical Engineers' Handbook 6-51) [10].



Figuur 4 – het krachteveld volgens Stokes law

Aan de hand van bovenstaande grafiek kan, afhankelijk van het Reynolds getal, bepaald worden wat de waarde van drag coëfficiënt C_D gaat zijn bij verschillende gassen en stromingsregimes.

Voor transport van vaste stoffen kunnen verschillende regimes beschreven worden aan de hand van de drag coëfficiënt op basis van het Reynolds getal. Hierbij is, afhankelijk van het Reynolds getal; Stokes law, intermediate law of Newton's law van toepassing. Newton's law komt in hoge mate overeen met vergelijking 2 en ziet er als volgt uit;

$$Tv = 1,73 \sqrt{\frac{gd_p(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}}$$

(Vergelijking 3)

Deze vergelijking is van toepassing op transport van vaste stoffen bij Reynoldsgetallen tussen de 1000 en de 350.000.

Met deze theorie kan aan de hand van de variabelen voor het testprogramma bepaald worden welke lengte de transparante testopstelling moeten hebben (in combinatie met de gassnelheid) om de scheiding van stof te bestuderen. Deze berekening is toegevoegd in bijlage V.

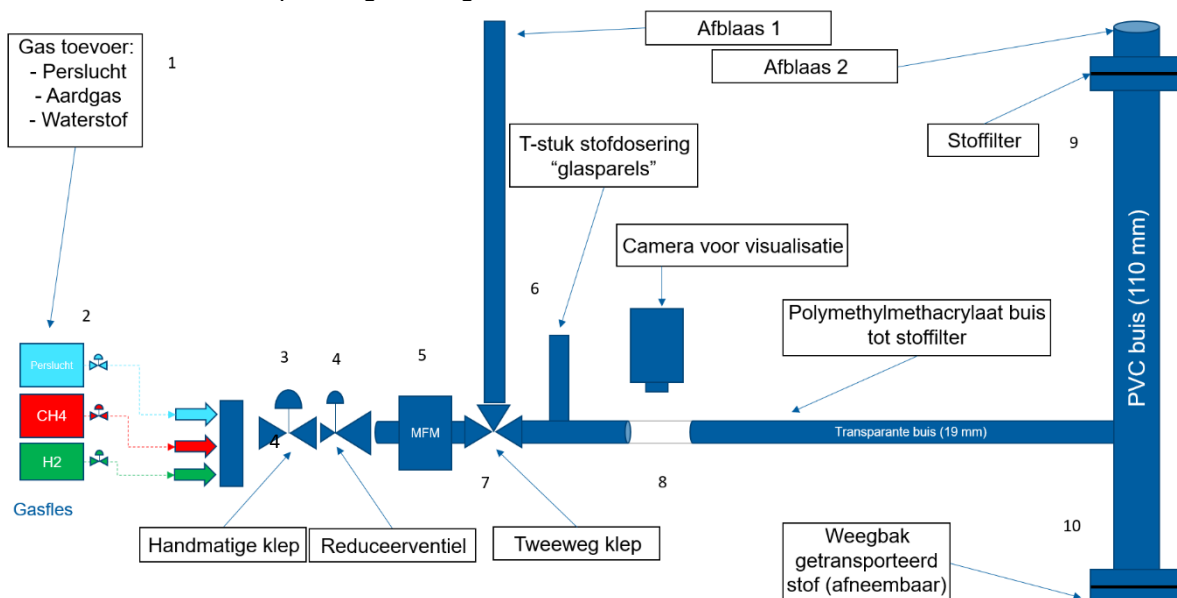
4. Testopstelling

Voor stap 1 in het testprogramma is een mobiele transparante testopstelling ontworpen en geconstrueerd. Op deze manier kan de op-/afbouw van gasflow snel, eenvoudig en veilig plaatsvinden. Met deze opstelling is gekeken in hoeverre de theorie benaderd kan worden met de praktijk. De opstelling zoals hier beschreven is ontworpen in een iteratief proces van testen en experimenten. De basis, het visualiseren van stoftransport, is hierbij vanaf het begin behouden. Dankzij dit intensieve proces zijn in verschillende stappen onderdelen aan de opstelling toegevoegd om de bediening, de reproduceerbaarheid en de effectiviteit te verbeteren. De beschrijving van de opstelling betreft de uiteindelijke versie van de opstelling. Ook de resultaten welke in de volgende hoofdstukken worden besproken, zijn verkregen met de opstelling die hier besproken wordt.

Door een deel van de opstelling te construeren met transparante leidingen, kan visueel worden vastgesteld wanneer stof wordt getransporteerd en hoe stof zich gedraagt in verschillende gassen.

4.1 Transparante testopstelling

Schematisch is de meetopstelling als volgt:



Figuur 5 - Schematische weergave van transparante testopstelling

1. Gastoevoer: aardgas, waterstof of perslucht.
2. Drukregelaar; $P_{in} = 200$ bar, $P_{max} = 8$ bar.
3. Reduceerventiel (BD-gas - IGA); $P_{in} = 8$ bar, $P_{u,max} = 300$ mbar.
4. Handmatig bedienbaar regelventiel
5. Mass flow meter (MFM); perslucht (capaciteit is $60 \text{ m}^3_n/\text{h}$), aardgas, waterstof (capaciteit: $210 \text{ m}^3_n/\text{h}$)
6. T-stuk met dop voor stofdosering
7. Tweewegklep met afblaas 1 voor instellen flow
8. Camera voor optisch inzicht
9. Stoffilter (110 mm diameter); zeer dicht filter, ingeklemd tussen twee PVC flenzen. Tevens afblaas 2 voor afblazen van gas tijdens stoftransport testen.
10. Afneembare weegbak voor neergeslagen getransporteerd stof

Om een indruk te krijgen hoe de opstelling er in de praktijk uitziet wordt verwezen naar bijlage VI.

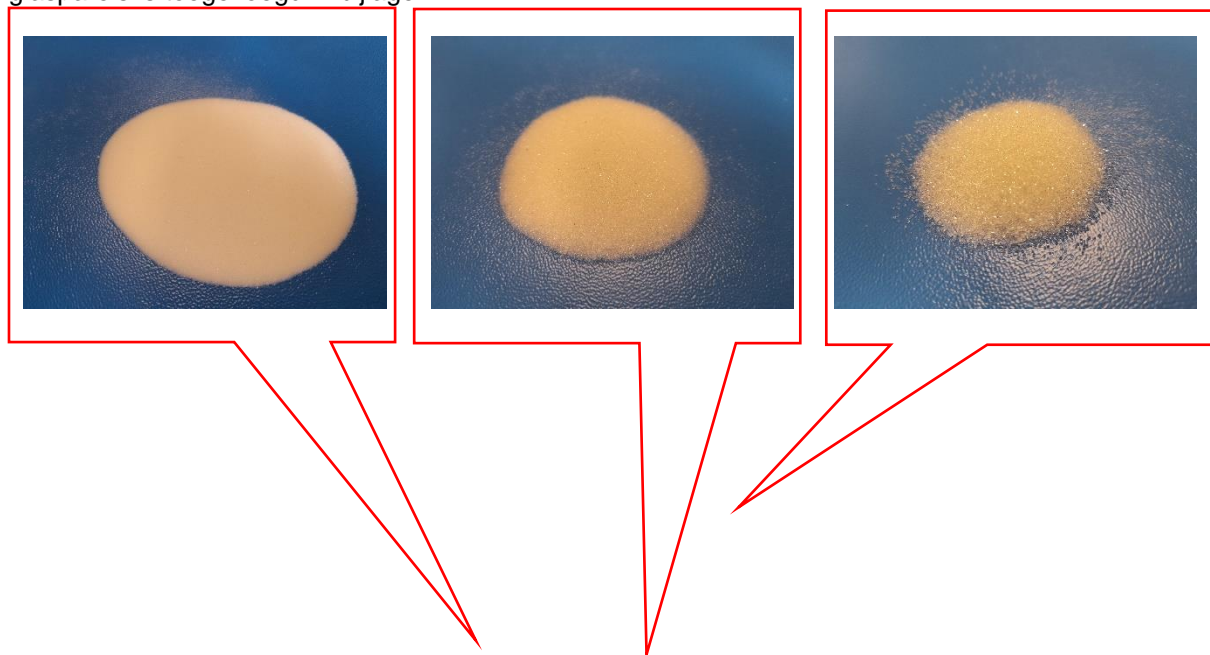
4.2 Type stof voor experimenten

Stof is altijd aanwezig in het distributienetwerk als gevolg van veroudering van netwerken en uitgevoerde werkzaamheden. Waar en in welke hoeveelheid het stof zich precies bevindt, is vaak onduidelijk en dit kan leiden tot onverwachte en onaangename situaties [11]. Met de overschakeling van aardgas naar waterstof wordt verwacht dat de gassnelheden in het netwerk toe zullen nemen als gevolg van de hoeveelheid energie per kuub gas. Om deze factoren mee te nemen, is er een literatuuronderzoek uitgevoerd naar experimenten uit het verleden met de focus op stoftransport in distributienetwerken. In 1977 is door de gemeentebedrijven Heerlen onderzoek gedaan naar het aanwezige stof in een gasdistributienet [12]. Hierbij was de voornaamste zorg dat zowel de kwantiteit als de kwaliteit van de gaslevering gewaarborgd kon worden. Het VEG-Gasinstituut heeft destijds de aangeleverde monsters met vast stof onderzocht waarbij tevens de korrelgrootte fracties bepaald zijn. Het merendeel van deze korrels zijn kleiner dan 300 micron. In hoofdzaak bleek dit stof uit cokesovengas afkomstig.

In een onderzoek naar het toepassen van elektreetfilters in gasdistributie netwerken is in 1993 gekeken naar de karakteristieken van het stof dat is gefilterd door installaties in het veld [13]. Roest vormde hierin de voornaamste component waarna testen met deze filters zijn uitgevoerd door GASTEC/TNO bij het energiebedrijf Amsterdam.

In beide rapportages komt naar voren dat stof vooral bestaat uit ijzeroxide en zand met karakteristieke maten van +/- 300 micron en kleiner. Hiervoor zijn verschillende leveranciers benaderd om gekarakteriseerd stof te leveren. Op basis van bovenstaande referenties is gekozen voor glasparels ($\text{SiO}_2 > 70\%$) zoals die worden toegepast in straalkasten. Deze glasparels konden geleverd worden in de maten die karakteristiek zijn voor het stof beschreven in bovenstaande literatuur, daarnaast is het een goed gedefinieerd stof en zijn de glasparels homogeen en hebben glasparels een hoge dichtheid zodat het goed overeenkomt met bovenstaande testen. Door een onderverdeling te maken in fijn, medium en grof stof, kan de invloed van het specifieke stof goed bestudeerd worden.

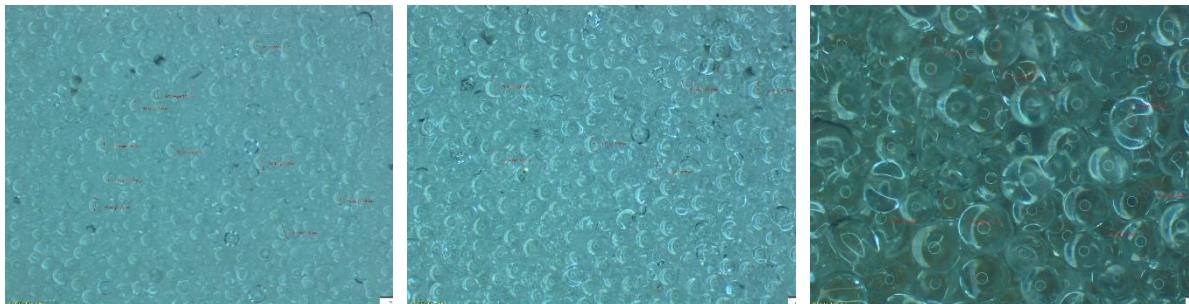
In onderstaande foto's zijn achtereenvolgens van links naar rechts fijn stof (40-70 micron), medium stof (150-250 micron) en grof stof (400-600 micron) weergegeven. De exacte samenstelling van de glasparels is toegevoegd in bijlage V.





Figuur 6 – Boven: Foto's van het gekozen stof (fijn, medium, grof). Onder: een foto met de drie groottes naast elkaar

Wanneer de glaspereels onder een microscoop bekeken worden, kan worden waargenomen dat de deeltjes allen nagenoeg rond zijn. Daarnaast kan worden vastgesteld dat de deeltjesgrootte goed overeenkomt met de opgegeven spreiding per geleverde stofsoort, en het stof als homogeen kan worden beschouwd. Beide conclusies zijn belangrijk voor het onderzoek aangezien veel theorie en literatuur uitgaat van perfect sferische deeltjes voor berekeningen met empirische vergelijkingen.



Figuur 7 – Microscoop opnamen van het gekozen stof (fijn, medium, grof)

4.3 Testmatrix

Met de meetopstelling voor deel 1 is het voornaamste doel om beter te begrijpen hoe stof getransporteerd wordt door een gas. Volgens de literatuur spelen verschillende variabelen een grote rol;

- Het soort gas
- De temperatuur en de druk van het gas
- Het soort stof
- De gemiddelde korrelgrootte en korrelgrootteverdeling
- De snelheid van het gas
- De lengte van de opstelling (punt tussen stofinjectie en stoffilter)

Een aantal van deze variabelen wordt getest in de beschreven opstelling. Om dit gestructureerd te doen, wordt er gebruik gemaakt van een testmatrix. Bij het beschrijven van de matrix gebruiken we het begrip "Terminal Velocity" (TV). Vrij vertaald: eindsnelheid. Dit is de gassnelheid waarbij het stof meegevoerd wordt door het gas. Wanneer de gassnelheid boven de TV zit zal er stoftransport plaatsvinden (het stof beweegt met de gasstroom mee). Onder de TV zal het stof (nagenoeg) blijven liggen.

Hieronder zijn verschillende stappen gedefinieerd waaruit de testmatrix is opgebouwd.

Test	Gas	Snelheid	Stof	Gewicht	Te verkrijgen inzicht
Stap 1	Lucht	0 -> TV	Fijn	~50 gram	Invloed van snelheid
	Lucht	0 -> TV	Medium	~50 gram	
	Lucht	0 -> TV	Grof	~50 gram	
Stap 2	Aardgas	0 -> TV	Fijn	~50 gram	Invloed van medium
	Aardgas	0 -> TV	Medium	~50 gram	
	Aardgas	0 -> TV	Grof	~50 gram	
	Waterstof	0 -> TV	Fijn	~50 gram	
	Waterstof	0 -> TV	Medium	~50 gram	
	Waterstof	0 -> TV	Grof	~50 gram	
Stap 3	Lucht	1,25TV	Medium	~ 50 gram	Invloed van tijd
Stap 4	Lucht	1,25TV	Medium	~50 gram	Reproduceerbaarheid
	Aardgas	1,25TV	Medium	~50 gram	
	Waterstof	1,25TV	Medium	~50 gram	
Stap 5	Lucht	1,25TV	Medium	Variabel	Stof hoeveelheid
	Aardgas	1,25TV	Medium	Variabel	
	Waterstof	1,25TV	Medium	Variabel	
Stap 6a	Lucht	1,25TV -> 3TV	Medium	~50 gram	Invloed van snelheid
	Aardgas	1,25TV -> 3TV	Medium	~50 gram	
	Waterstof	1,25TV -> 3TV	Medium	~50 gram	
Stap 6b	Aardgas	1,25TV -> 3TV	Medium	~50 gram	Momentum ¹
	Waterstof	1,25TV -> 3TV	Medium	~50 gram	

Tabel 1 – Experimenten met transparante testopstelling

In stap 1 wordt gestart met perslucht en wordt voor verschillende korrelgroottes de TV bepaald door het transport in de buis visueel te volgen bij stapsgewijze verhoging van het gasdebiet. Dit geeft een antwoord op de vraag wat voor invloed deeltjesgrootte heeft. (Verwachting: hogere TV bij grotere deeltjes)

In stap 2 wordt de TV bepaald voor zowel aardgas als waterstof zodat de verschillen tussen de gassen zichtbaar worden. Verwachting: TV-lucht is ongeveer TV-aardgas en TV-waterstof is ongeveer 3*TV-aardgas.

In stap 3 wordt de invloed van de tijd nader bekeken en wordt gemeten hoeveel stof er in het filter wordt gescheiden wanneer de snelheid net boven de TV wordt ingesteld. Doel van deze meting is om vast te stellen wat een goed tijdsinterval voor een gewichtsmeting is.

In stap 4 wordt gekeken naar de reproduceerbaarheid van metingen. Hierbij worden identieke testen meermaals uitgevoerd en wordt gemeten in hoeverre de hoeveelheid afgevangen stof bij die testen gelijk is.

In stap 5 wordt gezocht naar de invloed van de beschikbare hoeveelheid stof in verhouding tot de getransporteerde hoeveelheid stof. Als er meer stof in het T-stuk wordt geplaatst, wordt er dan procentueel ook meer getransporteerd? Verwachting: Percentage van stoftransport blijft gelijk.

In stap 6a wordt de invloed van de gassnelheid nader bekeken en wordt gemeten hoeveel stof er getransporteerd wordt wanneer de snelheid verhoogd wordt tot meermaals de TV waarde. Verwachting: met een verhoging van de gassnelheid neemt ook het stoftransport toe, waarbij dit effect bij aardgas sterker zal zijn dan bij waterstof.

In stap 6b wordt gezocht naar de onderbouwing van de momentum stelling. Hierbij wordt onderzocht of een vergelijkbaar momentum ($\rho \cdot v^2$)¹ van aardgas en waterstof zorgt voor een vergelijkbare

¹ Met momentum wordt bedoeld de impuls van de gasstroom, te weten het product van massa en snelheid.

hoeveel getransporteerd stof. Verwachting: Vergelijkbaar momentum zorgt voor een vergelijkbare hoeveelheid getransporteerd stof.

4.4 Beschrijving van het uitvoeren van de testen.

De testen vangen aan door een afgewogen hoeveelheid stof in een buis met een kleine diameter (19mm ID) te brengen. Hierna wordt het debiet van het gekozen gas geregeld met de afsluiter. Hierdoor stroomt het gas met een gedefinieerde snelheid door de buis.

Bij het doorlopen van de testmatrix zijn twee soorten experimenten gedaan waarbij of visualisatie van stoftransport of weging van getransporteerd stof de aandacht had.

Voor een test ten behoeve van de visualisatie van het stoftransport wordt het gasdebiet met behulp van een handbediende klep aan de stroomopwaartse kant van de mass flow meter (MFM) stapsgewijs verhoogd waarbij verschillende regimes in stoftransport te onderscheiden zijn. Afhankelijk van het soort gas, de karakteristieken (dichtheid en korrelgrootteverdeling) van het stof en de snelheid van het gas, zal stof wel of niet door de buis getransporteerd worden.

Omdat stof in één keer (batchgewijs) via het T-stuk in de opstelling wordt gebracht, vindt tijdens de aanvang van het experiment spreiding van het stof over de bodem van de transparante buis plaats. Door deze spreiding ontstaat een uniform snelheidsprofiel boven het verspreide stofbed en kan het gedrag van het stof goed gevolgd worden. Het gedrag van het stof in de gasstroom wordt halverwege tussen het T-stuk en de verticale sectie (met het filter) bestudeerd.

Na de eerste stoftransport-spreiding verdeelt stof zich over de bodem van de transparante pijp. Door het geleidelijk opvoeren van het gasdebiet ontstaan zogenaamde “zandduinen”. Stofdeeltjes worden opgepikt en slaan een stuk verderop weer neer. Dit gedrag is als “lopende zandduinen” getypeerd, Hierbij wordt stof langzaam door de volledige testopstelling naar de weegsectie getransporteerd.

Voor een test met weging van het getransporteerde stof, wordt het gas afgeblazen tot de gassnelheid constant is. Het debiet wordt ingesteld met behulp van een handbediende afsluiter met daarna een mass flow meter (MFM). Achter deze MFM is een tweeweg klep geïnstalleerd. In de eerste positie wordt gas naar een afblaas gestuurd en deze instelling wordt gebruikt om het debiet in te stellen. Vóór het verzetten van de kogelkraan wordt stof gedoseerd via een T-stuk met een deksel aan de bovenkant. Wanneer dit deksel gesloten is en het debiet nauwkeurig is ingesteld, kan de kogelkraan omgezet worden en wordt het gas door de transparante sectie gestuurd.

Gedurende een gemeten tijdsinterval wordt stof getransporteerd door de transparante buis waarna stof wordt opgevangen in de weegbak. Na het afronden van de test wordt de hoeveelheid opgevangen stof gewogen. De opwaartse gassnelheid in de sectie met het filter is zo laag dat stof het filter niet zal bereiken (zie bijlage V). Ondertussen wordt de transparante testopstelling schoongemaakt door er met hoge snelheid gas er doorheen te laten stromen waardoor het achtergebleven stof verwijderd wordt. De weegbak wordt weer teruggeplaatst en de testopstelling wordt weer gevuld met gas waarna het experiment herhaald kan worden.

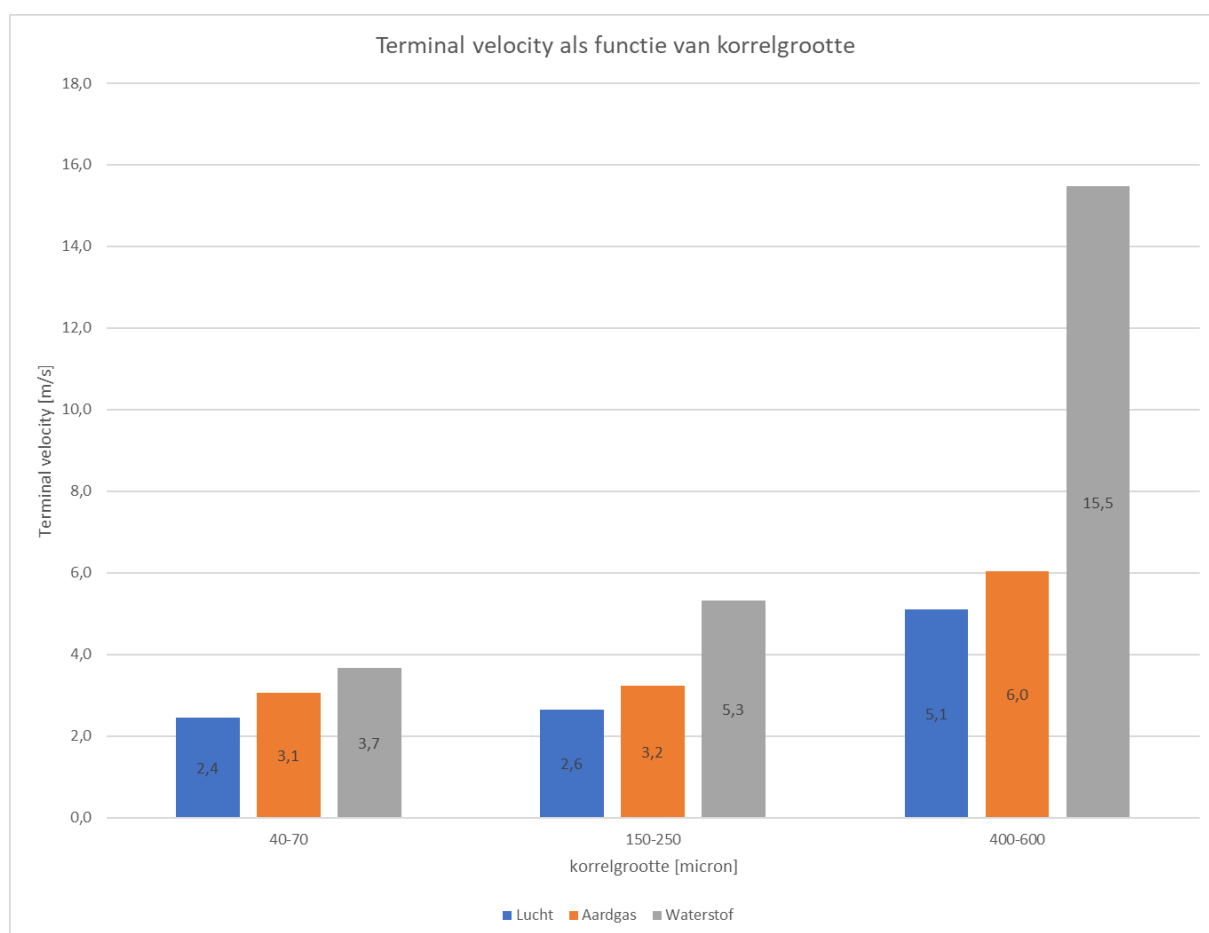
5. Meetresultaten

Voor elke stap in de testmatrix beschreven in hoofdstuk 4 zullen in dit hoofdstuk de resultaten gegeven en besproken worden. Hierbij wordt aangegeven of een visuele inspectie van bijvoorbeeld de TV gedaan is of dat een gewichtsbepaling is uitgevoerd.

5.1 Stoftransport in verschillende gassen (stap 1 en 2)

In stap 1 van de testmatrix wordt gestart met experimenten van stoftransport in lucht. Deze experimenten zijn uitgevoerd om visueel te bepalen wanneer stof getransporteerd wordt. De experimenten zijn in tweevoud uitgevoerd. Voor aanvang van elk experiment wordt stof afgewogen met een gewicht van ongeveer 50 gram. Voor de verschillende stofsoorten (fijn, medium en grof stof) is op deze manier de terminal velocity (TV) bepaald. De resultaten staan in Figuur 8 als blauwe balken in de grafiek.

In stap 2 is bovenstaand experiment herhaald voor zowel aardgas als waterstof zodat de verschillen tussen de gassen inzichtelijk worden gemaakt. Hierbij is de verwachting dat de TV van lucht ongeveer gelijk is aan de TV van aardgas. Ook wordt verwacht dat de TV van waterstof ongeveer driemaal de TV van aardgas zal zijn. Deze veronderstelling geldt zowel voor fijn, medium als grof stof. De resultaten van de meting zijn te zien in Figuur 8 alsmede in Tabel 2.



Figuur 8 – De terminal velocity (TV) voor fijn, medium en grof stof bij perslucht, aardgas en waterstof

In onderstaande tabel is een overzicht getoond van de TV voor aardgas en waterstof bij verschillende stofsoorten (fijn, medium en grof). Tevens is in deze tabel de ratio tussen het aardgas en

waterstofdebiet uitgerekend. Hieruit valt op te maken dat deze ratio niet altijd hetzelfde is en afhangt van het soort stof.

	Fijn stof	Medium stof	Grof stof
Aardgas			
Terminal velocity (TV) [m/s]	3,1	3,2	6,0
Reynolds getal	4539	4778	8958
Laminair/ turbulent	Turbulent	Turbulent	Turbulent
Waterstof			
Terminal velocity (TV) [m/s]	3,7	5,4	15,8
Reynolds getal	745	1079	3138
Laminair/ turbulent	Laminair	Laminair	Turbulent
Ratio $TV_{\text{aardgas}} / TV_{\text{waterstof}}$	1,2	1,7	2,6

Tabel 2 – Vergelijk van aardgas met waterstof

Dat de snelheidsratio niet gelijk blijft bij verschillende deeltjesgrootte is een effect dat niet verwacht was. Voor zowel fijn stof als medium stof is op te maken dat de verhouding tussen de gassnelheid waarbij continu stoftransport plaatsvindt, veel lager ligt dan een factor 3. Zoals gebleken in Hoofdstuk 3 zijn fijn stof en medium stof een goede representatie van het stof dat in het gasdistributienetwerk aanwezig is. Op basis van bovenstaande resultaten kan geconcludeerd worden dat er met waterstof, bij een driemaal hogere gassnelheid dan met aardgas, nodig voor een gelijkblijvende hoeveelheid energietransport, meer stof getransporteerd zal gaan worden dan bij aardgas.

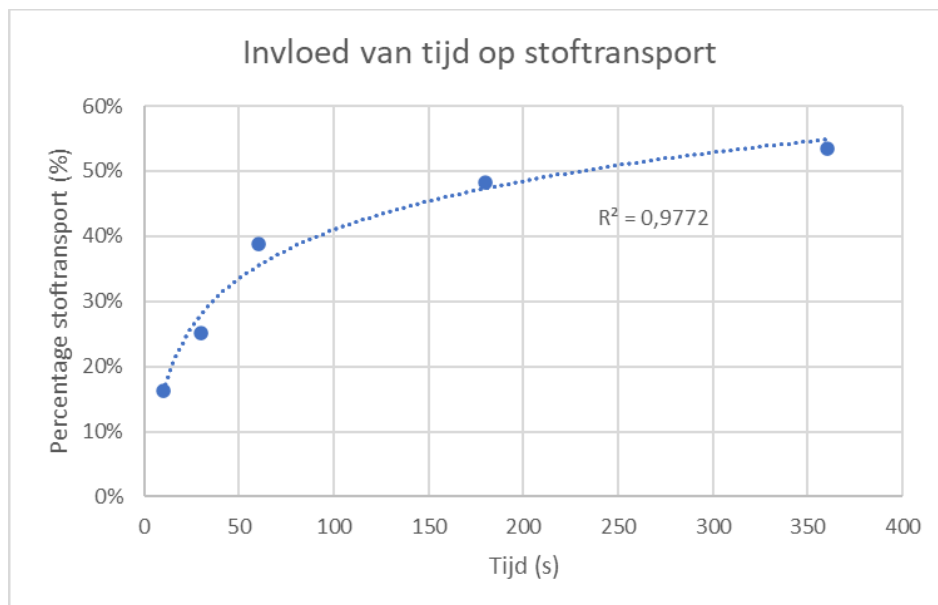
5.2 Stoftransport en de invloed van tijd (stap 3)

In stap 3 wordt de invloed van tijd nader bekeken en wordt gemeten hoeveel stof er wordt gescheiden wanneer de snelheid net boven de terminal velocity wordt ingesteld. Doel van deze meting is om vast te stellen wat een goed tijdsinterval voor een gewichtsmeting is.

Verwachting: hoeveelheid afgevangen stof zal afhankelijk zijn van snelheid, tijd en deeltjesgrootte.

Voor bestudering van de invloed van tijd, is een vijftal testen gedaan. Voor elke test is 50 gram medium stof afgewogen. Uit stap 2 is geleerd wat de TV waarde voor verschillende gassen en stofsoorten is. Voor dit experiment wordt gekozen voor 1,25 x TV lucht, wat neerkomt op een gassnelheid van 3,25 m/s.

Er is gekozen om de experimenten uit te voeren met een tijdsduur van 10, 30, 60, 180 en 360 seconden.



Figuur 9 – percentage afgevangen medium stof als functie van tijd (bij perslucht)

Bovenstaande grafiek kan worden geconstrueerd wanneer het percentage getransporteerd stof wordt uitgezet tegen de tijd. Op basis van de metingen kan een goed passende trendlijn (met een hoge R^2 -waarde (= determinatiecoëfficiënt)) getrokken worden. Hieruit blijkt een behoorlijke afvlakking bij hogere tijdsintervallen. Zo is het procentuele verschil tussen 180 seconden en 360 seconden minder dan 5%.

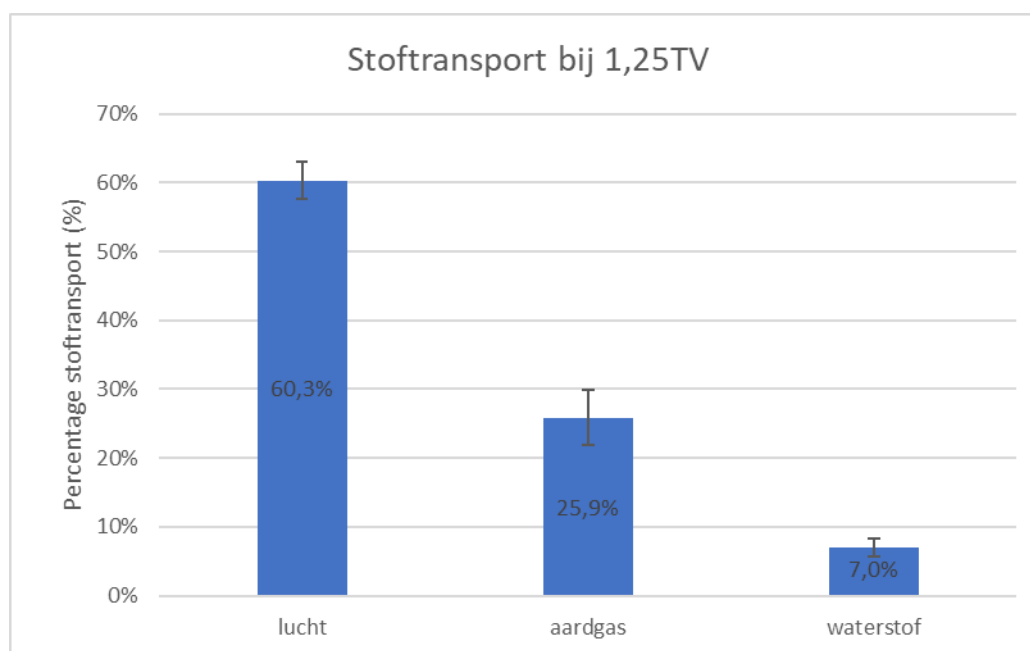
Met in het achterhoofd de hoeveelheid experimenten die gedaan zullen worden, is gekozen voor een tijdsinterval van 180 seconden wanneer stoftransport middels weging wordt gedaan.

5.3 Stoftransport en reproduceerbaarheid (stap 4)

In stap 4 wordt gekeken naar de reproduceerbaarheid van metingen. Hierbij wordt meermaals hetzelfde experiment uitgevoerd met identieke instellingen op verschillende dagen. Voor elke test is 50 gram medium stof afgewogen. Uit de eerdere experimenten is geleerd wat de TV-waarde is voor verschillende gassen en stofgroottes. Voor alle experimenten is gekozen voor een gassnelheid van 1,25 x TV voor lucht, aardgas en waterstof waarbij gedurende 180 seconden stof wordt getransporteerd. De resultaten staan in onderstaande tabel en in Figuur 10 weergegeven.

	Lucht	Aardgas	Waterstof
1,25TV	3,25 m/s	4,0 m/s	6,7 m/s
Test 1	62,8%	30,9%	8,0%
Test 2	62,6%	24,2%	4,8%
Test 3	56,1%	20,3%	7,8%
Test 4	59,8%	28,2%	7,6%
Standaard deviatie	2,7%	4,0%	1,3%

Tabel 3 –Reproduceerbaarheid van stoftransport met lucht, aardgas met waterstof. De testresultaten zijn gegeven als percentage van de oorspronkelijke stofhoeveelheid dat is getransporteerd



Figuur 10 – percentage afgevangen medium stof voor verschillende gassen bij 1,25TV

Er kan middels de standaard deviatie (de zwarte balkjes in Figuur 10) een maat bepaald worden voor de spreiding op de reproduceerbaarheid. De meeste metingen liggen goed rond het gemiddelde waardoor de standaard deviatie laag blijft. Uit deze metingen kan geconcludeerd worden dat de experimenten met een goede reproduceerbaarheid zijn uitgevoerd.

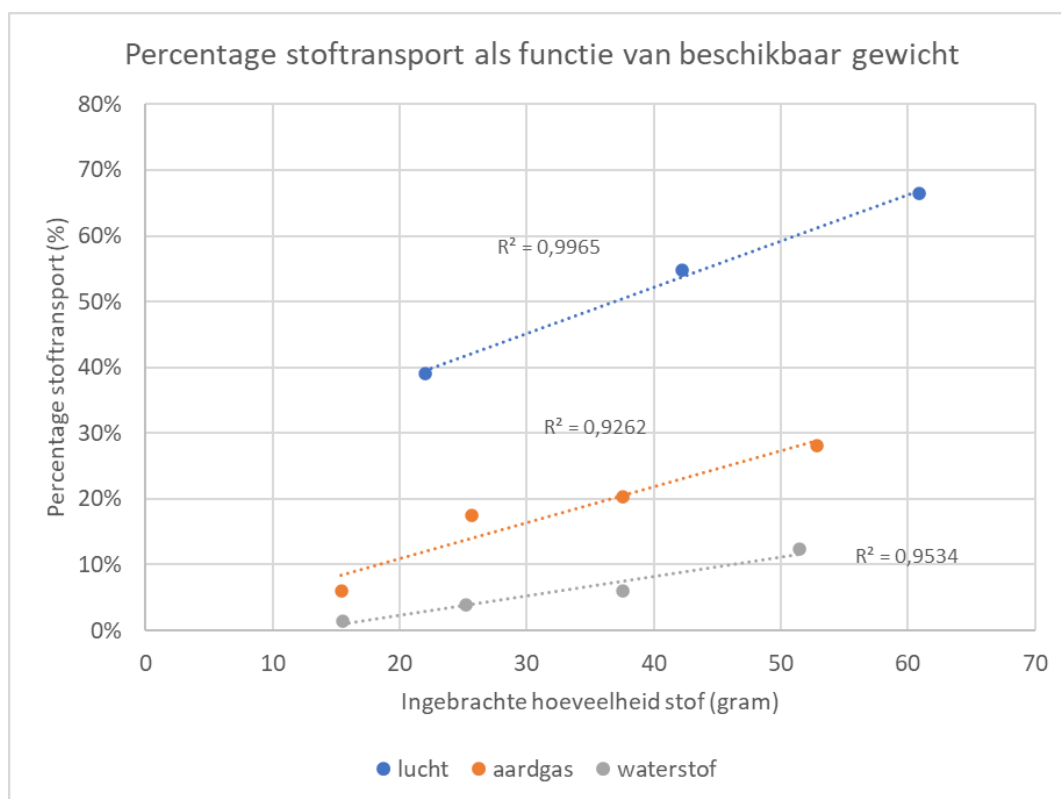
Tevens kan aan de hand van deze experimenten inzichtelijk gemaakt worden in hoeverre verschillende gassen (met een verschillende dichtheid) stof transporteren bij een gassnelheid van de 1,25 keer de TV-waarde. Bij een afnemende gasdichtheid wordt minder stof getransporteerd. Dit geeft een vermoeden van een relatie tussen impuls en hoeveelheid getransporteerd stof. Dit zal in een later stadium nader onderzocht worden.

5.4 Hoeveelheid aanwezig stof en stoftransport (stap 5)

In stap 5 wordt gezocht naar een relatie tussen de hoeveelheid aanwezig stof in het T-stuk en de mate van stoftransport. Is de hoeveelheid aanwezig stof van invloed op het percentage getransporteerd stof?

Hierbij wordt voor elke test een hoeveelheid medium stof afgewogen. Deze hoeveelheid varieert per experiment. Voor lucht zijn door omstandigheden slechts drie gewichten genomen van ongeveer 20 gram, 40 gram en 60 gram. Dit medium is als eerste beproefd waarbij dosering van 60 gram onhandig bleek vanwege de afmeting van het t-stuk. Met deze reden is de maximum dosering verlaagd naar 50 gram. Voor aardgas en waterstof is gekozen voor gewichten van 15 gram, 25 gram, 38 gram en 50 gram. Door herverdeling van de meetpunten (4 in plaats van 3) is de lineaire relatie gecheckt. Voor deze experimenten is 1,25 keer de TV-waarde gebruikt.

Dit experiment is uitgevoerd voor lucht, aardgas en waterstof. Na 180 seconden wordt de gasstroom gestopt en wordt de hoeveelheid opgevangen stof gewogen. De resultaten staan in Figuur 11 weergegeven.



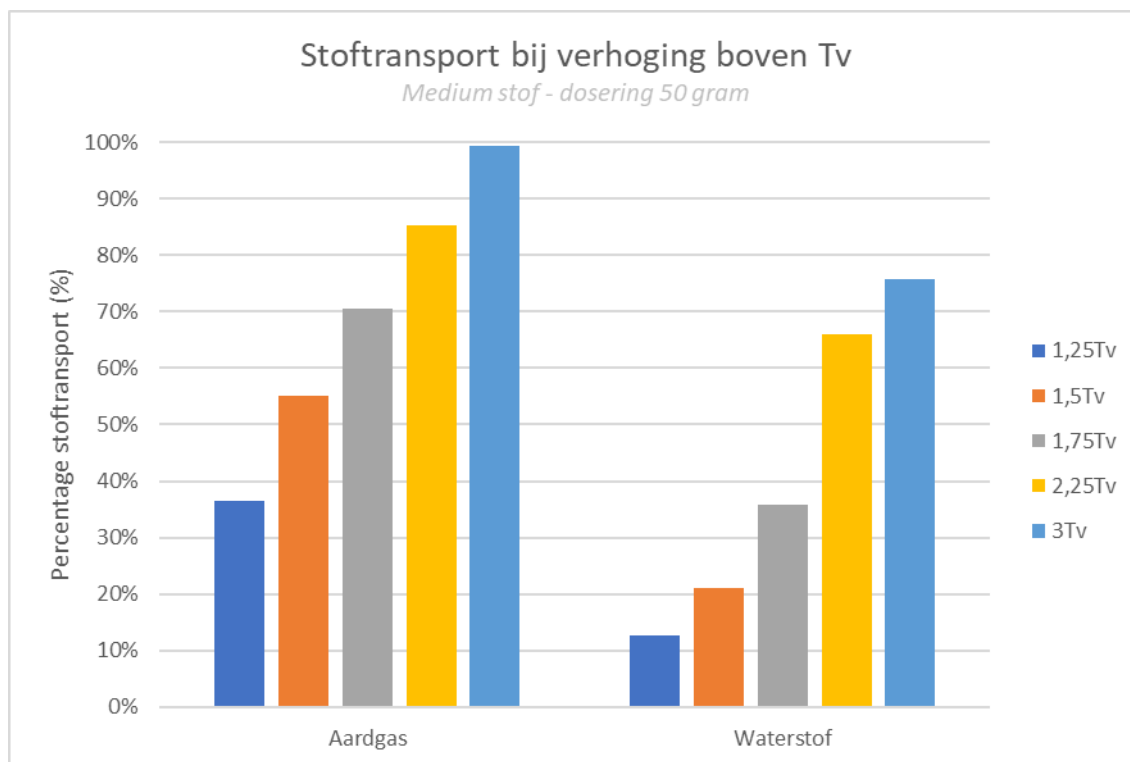
Figuur 11 – percentage afgevangen stof als functie van beschikbaar gewicht bij 1,25TV

Zoals verwacht wordt met lucht de grootste hoeveelheid stof getransporteerd, op ruime afstand van zowel aardgas als waterstof. Hetzelfde beeld kwam naar voren uit de experimenten voor het aantonen van de reproduceerbaarheid. Tevens is te concluderen dat de hoeveelheid getransporteerd stof afhankelijk is van de hoeveelheid aanwezig stof in een leiding. Als er meer aanwezig is, wordt ook meer getransporteerd. Echter is de maximale hoeveelheid stof die ingebracht kan worden gelimiteerd. Het maximum waarmee in deze stap is gemeten (60 gram), was in de praktijk niet goed werkbaar omdat het te lang duurde om het stof, zonder te verspillen, in te brengen. Er is daarom gekozen voor de maximale hoeveelheid die praktisch was (50 gram), om zo voldoende differentiatie te krijgen, in combinatie met een werkbare meetmethode.

Kanttekening hierbij is dat door de werkwijze bij start van het experiment in één keer de tweewegklep wordt omgezet. Het gas met 1,25TV zorgt voor spreiding van het aanwezige stof vanuit het T-stuk, hetgeen anders verloopt bij 20 gram in vergelijking met 50 gram.

5.5 Stoftransport en gassnelheid (stap 6)

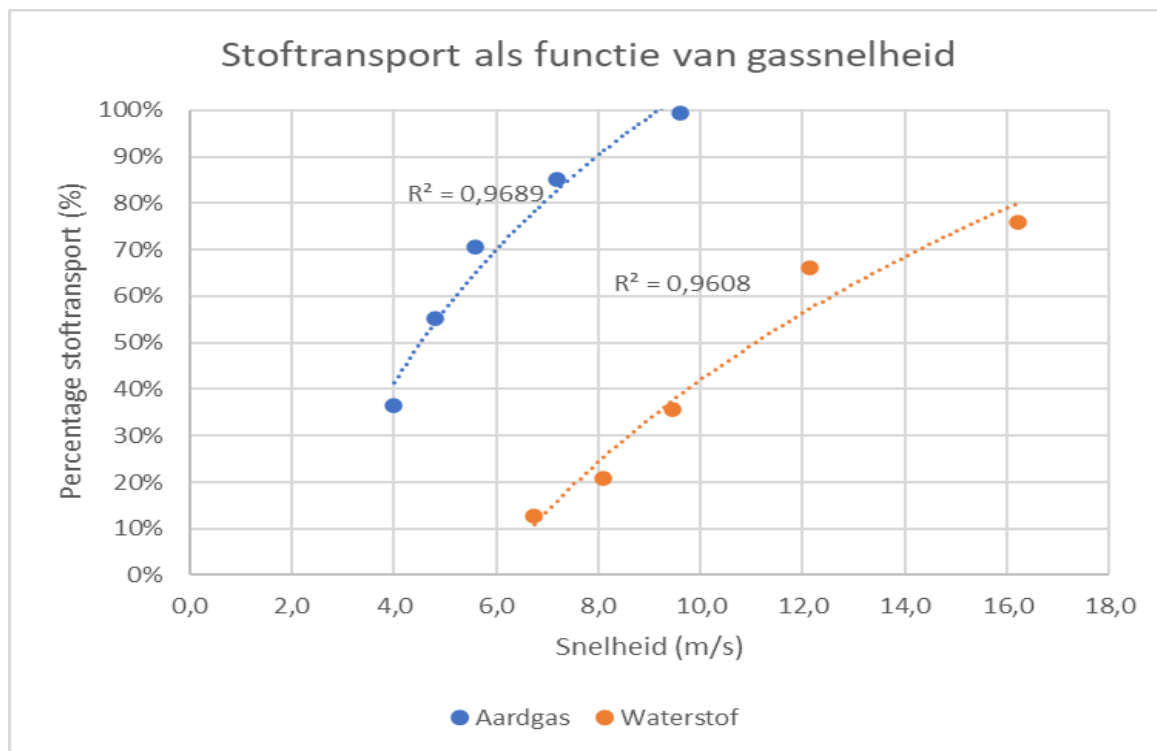
In stap 6 is gezocht naar een relatie tussen gassnelheid en stoftransport. Hierbij wordt voor elke test 50 gram medium stof afgewogen. Uit de eerdere experimenten is geleerd wat de TV waarde voor verschillende gassen en stofsoorten is. Voor dit experiment wordt voor zowel aardgas als waterstof de snelheid boven de TV-waarde stapsgewijs verhoogd, waarbij gedurende 180 seconden stof wordt getransporteerd. De resultaten staan in onderstaande grafiek weergegeven.



Figuur 12 – percentage afgevangen stof voor aardgas en waterstof bij snelheden boven de TV

Uit deze set experimenten valt op te maken dat, wanneer de snelheid verder wordt verhoogd boven de TV-waarde (voor zowel aardgas als waterstof), het stoftransport geleidelijk toeneemt. Echter, deze toename is voor waterstof veel geleidelijker dan voor aardgas. Het percentage getransporteerd stof bij driemaal de TV-waarde is voor waterstof beduidend lager dan bij aardgas.

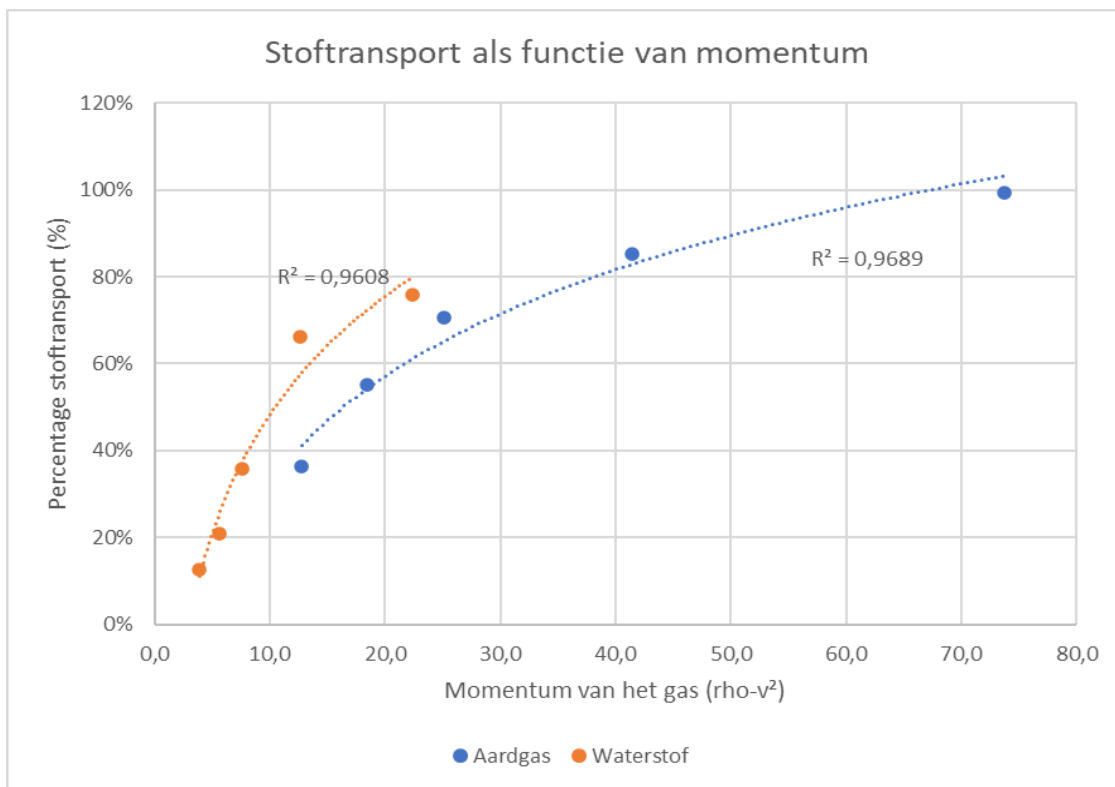
Wanneer bovenstaande plot anders wordt uitgewerkt, ontstaat Figuur 13. Op basis van extrapolatie kan geïnterpreteerd worden dat volledig stoftransport met waterstof (in de gestelde tijd) wordt bereikt bij ongeveer viermaal de TV-waarde. Dit komt overeen met een snelheid van 21,6 m/s. Impuls speelt een belangrijke rol in het transport van stof maar kan op basis van onderstaande grafiek niet inzichtelijk gemaakt worden.



Figuur 13 – percentage afgevangen stof voor aardgas en waterstof bij snelheden boven de TV

Wanneer de gassnelheden voor aardgas en waterstof worden omgeschreven naar momentum (gasdichtheid vermenigvuldigd met de kwadratische gassnelheid), dan kan een nieuwe grafiek geconstrueerd worden waarmee meer inzicht verkregen kan worden voor de relatie tussen stoftransport en impuls.

Het momentum van een gas is een criterium wat veel toegepast wordt in de scheidingstechnologie en transport van gassen en vloeistoffen. Het momentum is hierin een maat voor de kracht per oppervlakte eenheid en wordt gebruikt als een maat voor materie die door een gas wordt getransporteerd of krachten die acteren op een structuur in de stroming.



Figuur 14 – percentage afgevangen stof voor aardgas en waterstof als functie van momentum (ρv^2)

Op basis van bovenstaande grafiek wordt inzichtelijk gemaakt dat het percentage stoftransport een relatie kan hebben met het momentum van het gas. Met wat verbeelding kan er een trendlijn door alle gemeten waarden van zowel aardgas als waterstof (blauw en oranje) getrokken worden. Dit zou kunnen duiden op een verband tussen de impuls op een deeltje en het percentage van stoftransport, onafhankelijk van het soort gas. Wanneer dit inderdaad zo zou zijn, zou dat waardevolle informatie geven voor een inschatting van stoftransport bij bijvoorbeeld andere drukken.

Zowel de impuls van het gas, acterend op het stofdeeltje, als het snelheid spelen een rol in stoftransport. In verschillende theorieën uit het literatuuronderzoek wordt de weerstandscoefficiënt C_D gerelateerd aan het Reynolds getal. Het kan hier zowel gaan om het Reynoldsgetal in een buis als het Reynoldsgetal van de stroming rond een vallend stofdeeltje in een gas.

Wanneer voor Figuur 14 per meetpunt het Reynoldsgetal van het gas in de buis wordt berekend, ontstaat de volgende tabel;

TV	Reynolds Aardgas	Regime	Reynolds Waterstof	Regime
1,25	5441	Turbulent	1285	Laminair
1,5	6529	Turbulent	1542	Laminair
1,75	7619	Turbulent	1799	Laminair
2,25	9793	Turbulent	2313	Overgang
3	13058	Turbulent	3084	Turbulent

Tabel 4 – Reynolds getal bij verschillende terminal velocities (TV) voor aardgas met waterstof

Hierbij wordt voor aardgas een dichtheid van $0,833 \text{ kg/m}^3$ en een viscositeit van $0,0114 \text{ cP}$ aangenomen. Voor waterstof wordt een dichtheid van $0,09 \text{ kg/m}^3$ en een viscositeit van $0,0088 \text{ cP}$.

Op basis van bovenstaande gegevens is goed te zien dat het meeste stoftransport voor waterstof, ook boven de TV in een laminair regime plaatsvindt. Pas bij metingen boven $2,25 \times TV$ is het flowregime voor waterstof in overgang naar een turbulent regime.

Bovenstaande analyse laat zien dat een directe vergelijking tussen aardgas en waterstof niet eenvoudig te maken is. Dit komt mede doordat stoftransport in een laminair of in een turbulent regime zal plaatsvinden, waarbij resultaten uit deze regimes niet te vergelijken zijn met elkaar. Er kan dan ook niet zonder meer gesteld worden dat het hetzelfde momentum van het gas, acterend op een stofdeeltje, leidt tot dezelfde hoeveelheid stoftransport.

Echter om dit goed te kunnen bewijzen, zijn meer meetdata nodig. Mocht er een aanleiding zijn tot verdere uitwerking van deze theorie, dan is sterk aan te bevelen om meer experimenten te verrichten bij hogere snelheden met waterstof en aardgas.

Bij alle resultaten voor de bepaling van de terminal velocity (TV) dient rekening gehouden te worden met het feit dat deze bepaald zijn bij atmosferische condities. Bij verandering van druk en/ of temperatuur zal de dichtheid van het gas veranderen, hetgeen een effect zal hebben op het volumetrisch debiet en dus ook de gassnelheid.

6. Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

De hoofdvraag in dit rapport luidt: *“Kan het huidige type stoffilter zonder aanpassingen worden toegepast voor het veilig en efficiënt filteren van deeltjes in het gasdistributienet wanneer er wordt overgestapt op waterstof?”*. Om deze vraag te beantwoorden wordt beargumenteerd dat de gasfilters zich niet anders zullen gedragen doordat het gas dat er doorstroomt verandert van aardgas naar waterstof. Beide gassen zijn niet viskeus waardoor ze zonder veel weerstand door het filter heen gaan. Of een filter gaat doorslaan, ligt dus met name aan de hoeveelheid stof die accumuleert op het filter. De hoeveelheid stof die het filter moet afvangen, hangt af van het voorliggende leidingnet. Een eventuele verandering van het filtergedrag in gasstations hangt dus met name af van de stofverplaatsing in het voorliggende net.

In het ontwerpen van gasnetten wordt vanwege geluidsproductie en mogelijke trillingen een snelheidscriterium in de hoofdleidingen gehanteerd van 30 m/s. In de praktijk zal dit niet snel gehaald worden door bestaande overcapaciteit en toegelaten drukverlies. Snelheden van 20 m/s zijn uitzonderlijk maar mogelijk in korte leidingsecties bij extreme koude. In een berekening met Irene PRO op een bestaand net bij -12°C is gebleken dat in de lagedruknetten de snelheden in slechts 10% van het net boven de 5 m/s uitkomen (voor aardgas). In de hogedruknetten zal dit percentage bij extreme kou richting 50% gaan, waarbij opgemerkt kan worden dat ook hier een aanzienlijk percentage van het leidingnet nooit een hoge stroomsnelheid zal hebben. Gezien de gevonden TV voor aardgas is het dus aannemelijk dat er nog stof ligt in het huidige gasnet.

Dit onderzoek heeft zich daarom gericht op het inzichtelijk maken of er een toename of afname is van het stoftransport in een buis onder invloed van toenemende gassnelheid. Omdat het literatuuronderzoek geen eenduidig antwoord gaf, en experimenteel werk op dit vlak niet gevonden is, is er een transparante testopstelling gebouwd. Dop deze manier was het mogelijk om het stoftransport te visualiseren en te karakteriseren.

Met het literatuuronderzoek en aanvullende experimenten was het mogelijk om diverse variabelen te definiëren. Deze basis is gebruikt om de invloed op stoftransport te onderzoeken. Zo is naar een korrelgrootte en dichtheid voor veelvoorkomend stof in het gasdistributienet gezocht en zijn er drie verschillende korrelgroottes stof gekozen om stof te karakteriseren, fijn stof (40-70 micron), medium stof (150-250 micron) en grof stof (400-600 micron). De reproduceerbaarheid, tijdsafhankelijkheid en massa-afhankelijkheid van stoftransport bij kritische gassnelheden zijn vastgesteld.

Hieruit valt te concluderen dat testen goed reproduceerbaar zijn, dat een tijdsduur van 3 minuten per test voldoende is voor een representatieve stofverplaatsing en dat 50 gram stof een goede dosering is. Op basis van deze testen is voor de verschillende parameters een representatieve “basiswaarde” gekozen, de terminal velocity (TV). Typisch ligt deze waarde hoger voor waterstof dan voor aardgas.

Met deze instellingen zijn vervolgens diverse testen uitgevoerd om inzicht te krijgen in het stoftransport. Uiteindelijk zijn er een aantal interessante conclusies en afhankelijkheden naar voren gekomen.

De belangrijkste conclusie hierbij is dat er ten opzichte van aardgas meer stof getransporteerd zal worden door waterstof wanneer dezelfde hoeveelheid energie door een buis wordt getransporteerd. De belangrijkste nuancering hierbij is dat dit afhangt van zowel de gemiddelde korrelgrootte als de dichtheid van het stof. Dit betekent niet dat direct al het stof in de filters van bijvoorbeeld gasstations aanwezig zal zijn, maar wel dat dit op den duur plaats gaat vinden.

Met waterstof duurt het, in verhouding met aardgas, langer voordat al het stof wordt getransporteerd, maar bij snelheden boven de TV zal uiteindelijk al het stof getransporteerd worden.

Aanbevelingen:

Aanbevelingen voor de praktijk

Bij een omschakeling van het bestaande net zullen hoogstwaarschijnlijk niet alleen de snelheden in het net toenemen. Denkbaar is dat bij het proces van omschakelen (waarbij een deel van het net nog op aardgas wordt bedreven en een ander deel van het net is overgezet op waterstof) de stromingsrichting van zowel het deel dat op waterstof is omgezet, als het deel dat op aardgas is overgezet, gaan veranderen. Hierdoor wordt verwacht dat initieel meer stoftransport zal plaatsvinden met waterstof in vergelijking met aardgas. Afhankelijk van de opbouw van het net en de momentane afname is te verwachten dat dit aanvankelijk een grotere invloed kan hebben op de hoeveelheid stof in een filter dan de veranderende stroomsnelheid. De verwachting hierbij is dat een tijdelijke toename van de hoeveelheid stof door een overschakeling naar waterstof voor een vergelijkbaar effect zou zorgen als wanneer dit gebeurt met aardgas. Dit dient echter wel nader onderzocht te worden.

Het is dan ook aan te raden om een (deel-)net te spoelen met hoge snelheden om zo het aanwezige stof uit het net te verwijderen. Daarnaast is het aan te raden om kort na omschakeling de filters vaker te inspecteren, vooral wanneer er een groot debiet door de leiding gaat, bijvoorbeeld in een koude periode.

Aanbeveling voor de normcommissie NEN 1059

In de NEN1059:2019 wordt gesteld dat de maximum gassnelheid door het filter 0,3 m/s mag bedragen. De maximale aanstroomsnelheid van het filterhuis mag maximaal 30 m/s bedragen. De basis voor deze criteria worden in de norm niet besproken. Het is aan te bevelen om dit soort passages aan te passen zodat ze ook werkbaar blijven voor de waterstofdistributie. Deze aanbeveling zal in zijn algemeenheid ook voor andere normen voor de gasdistributie gelden.

Aanbevelingen voor nader onderzoek.

De resultaten van dit onderzoek zijn een eerste indicatie dat bij het omzetten van een bestaand gasnet van aardgas naar waterstof, mogelijk meer stof in de filters verwacht kan worden. Aangezien deze testen atmosferisch uitgevoerd zijn, is het aan te bevelen om voor een vollediger inzicht deze testen ook met 8 bar uit te voeren. De verwachting hierbij is dat er weinig verschillen gemeten zullen worden in vergelijking met de testen bij atmosferische druk. De hypothese is dat gassnelheden waarbij stoftransport plaats zal vinden, zullen waarschijnlijk lager zijn vanwege een hogere dichtheid van het gas. De hogere dichtheid zorgt ervoor dat de stromingen eerder turbulent zullen zijn en dat de impuls van het gas op een deeltje ook toeneemt. Dit onderzoek zou idealiter worden gedaan met een filter- en filterhuis dat wordt toegepast in de huidige netten. Zo kunnen de effecten bij verhoogde druk voor stoftransport worden vastgesteld en kunnen criteria worden vastgesteld voor de maximum gassnelheden.

Uit het onderzoek komt naar voren dat er een mogelijke relatie is tussen het momentum van het gas en de hoeveelheid stoftransport. Er zijn nog niet voldoende resultaten om dit verband met zekerheid vast te stellen. Het is aan te bevelen deze momentum theorie nog verder theoretisch en experimenteel te onderzoeken. Het begrijpen van deze relatie is van belang om een directe link te kunnen maken tussen gassen onderling en tussen gassen bij verschillende drukken.

Referenties

- [1] Erik Polman, Theo Musselaers, Rene Hermkens, Sjoerd Jansma, Michiel van der Laan, Hans de Laat, Benjamin Pilzer, Kees Pulles, „Toekomstige gasdistributienetten,” KIWA GT-170272, 2018.
- [2] Kramstrup, „Toestandsmeting gas stoffilter,” 2010.
- [3] C. Lock; C.J.A. Pulles, „Gaslevering Yerseke onderbroken - technische oorzaak van de storing,” KIWA Technology, 2013.
- [4] Iain Chirnside, Jon Harris, „Transportation of debris by hydrogen inside PE pipelines,” *H100 report*, 2019.
- [5] Evgeny Rabinovic, Haim Kalman, „Pickup, critical and wind threshold velocities of particles,” *Powder Technology*, vol. 176, pp. 9-17, 2007.
- [6] L.M. Gomes, A.L. Amarante Mesquita, „On the prediction of pickup and saltation velocities in pneumatic conveying,” *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 31, pp. 35-46, 2014.
- [7] R. Clift, W.H. Gauvin, „Motion of Entrained Particles in Gas Streams,” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 49, pp. 439-448, 1971.
- [8] R.E. Povoci, G. Villaflor, J.E. Flores, „Minimum transport velocities of mineral and metallic dusts in exhaust systems,” *Ventilation*, pp. 111-120, 1997.
- [9] Gholamhossein Bagheri, Costanza Donadonna, „On the drag of freely falling non-spherical particles,” *Powder Technology*, vol. 301, pp. 526-544, 2016.
- [10] P. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw Hill, 2007.
- [11] K. Technology, „Onderzoek naar stofplag Wassenaar,” *Gasnet*, 2018.
- [12] J.E.C. Renkens, „Het verwijderen van stof uit het gasnet,” *Gas*, pp. 267-272, 1977.
- [13] P.W.F. Peereboom, H.W.L. Bruckman, G.T. van Heck, „Reinigen van aardgas met elektreetfilters,” *Gas*, pp. 470-473, 1993.

I Overzicht van vragen HyDelta WP1B

In dit werkpakket worden de volgende vragen behandeld

Bestandheid materialen:

- Kunnen de weke delen van de in de aardgasdistributie toegepaste regelaars en veiligheden in vergelijking met waterstof negatief worden beïnvloed als wordt overgegaan naar distributie van waterstofgas? (nr. 207, zie KIWA rapport GT-200237)

Werking station:

- Zijn de huidige stations geschikt voor het veilig reduceren van waterstofgas (station in zijn geheel)? (nr. 206, zie HyDelta rapport – D1B.1 - Gasdrukregelaars op aardgas en waterstof)
- Welke effecten heeft het verhogen van de snelheid op de complete werking van het station? (nr. 213, zie HyDelta rapport – D1B.1 - Gasdrukregelaars op aardgas en waterstof)
- Zijn aanpassingen aan de behuizing noodzakelijk voor een veilig gebruik met H2 en zo ja, welke? (ventilatie & aarding) (nr. 212, zie HyDelta rapport – D1B.3 - ventilatie)

Veilig werken aan en met stations op waterstof:

- Welke beheersmaatregelen (VWI) zijn noodzakelijk om een station in- en uit bedrijf te nemen? (nr. 208, zie HyDelta rapport – D1B.2 – Veiligheid bij werken aan gasstations)
- Kan op een veilige manier de druk vereffend worden indien een veiligheid is gevallen? (nr. 209, onderdeel van 208, zie HyDelta rapport – D1B.2 – Veiligheid bij werken aan gasstations)
- Is er een noodzaak voor intensievere inspectie van filters in gasdrukregelstraten? Dit onderdeel gaat specifiek over filters, de verhoogde gassnelheid kan er toe leiden dat meer vuil wordt meegevoerd en dat kan tot een grotere belasting van de filters leiden (nr. 173 zie HyDelta rapport – D1B.3 – Gasfilters)

II Overzicht samenstelling begeleidings- en sparringsgroep

Tabel 5 – Samenstelling begeleidingsgroep en sparringsgroep

Naam	Werkgever	Begeleidingsgroep	Sparringsgroep
R. van Hooijdonk	Enexis	V	V
J. Jonkman	Rendo	V	V
R. Scholten	Rendo	V	V
P. Verstegen	Alliander	V	V
R. Verhoeve	Stedin		V
J. Voogt	Enexis		V
S.J. Elgersma	Gasunie		V
N. Vermeltoort	Kiwa Technology		V
S. van Woudenberg	Kiwa Technology	V	V

De begeleidingsgroep is een actievere rol toebedacht bij de uitvoering van het deelonderzoek in vergelijking met de sparringsgroep. De sparringsgroep is betrokken bij de opzet van het testprogramma en bij het beoordelen van de concept-rapportages.

III Begrippenlijst

Begrip	Omschrijving / toelichting
L_{gas} (laag calorisch gas)	86 vol% methaan + 14% stikstof
Overdruk	Druk boven de atmosferisch druk (8 bar komt overeen met 9 bar absoluut)
m^3_n	Een m^3 bij 1013.25 mbar(a) en 0 °C
CH_4	Methaan
F_d	De opwaartse kracht wat een deeltje ondervindt in een gasstroom (N)
F_g	De zwaartekracht die op een deeltje werkt (N)
H_2	Waterstof. De testen zijn uitgevoerd met waterstof 5.0 (zuiverheid 99,999%)
TV	Terminal Velocity; snelheid waarbij stofdeeltjes net gaan bewegen met de gasstroom.
P_{in}	Ingaande druk in bar(a)
$P_{\text{u, max}}$	Uitgaande druk in bar(a)
g	Zwaartekracht (9,81 m/s^2)
dp	Korrelgrootte van een stofdeeltje (micron)
ρ_p	Dichtheid van een stofdeeltje (kg/m^3)
ρ_g	Dichtheid van het gas (kg/m^3)
C_D	Drag coëfficiënt (-)
r	straal van een deeltje (m)
u	snelheid van de gasstroom (m/s)

IV Samenstelling stof

ENKELE SPECIFICATIES

De glasparels die Holland Mineraal levert, worden geproduceerd van een eerste klas kwaliteit loodvrij glas met een minimum SiO₂ gehalte van 72%. Ze worden met name gebruikt in straalcabines en straalkasten. De productiewijze van de glasparels geschiedt conform de MIL-G-9954 A specificatie. Dit merkt u direct in de hardheid, korrelvorm, afzeving, verpakking en kwaliteitscontrole. Behalve voor het onbeschadigd reinigen van oppervlakken, zorgen de glasparels ook voor oppervlakte versteviging (Shot Peenen).

Holland Mineraal kent een assortiment glasparels van 40 tot 600 micron. Door onze goed gesitueerde vestigingsplaats kunnen wij uw glasparels snel in binnen- en buitenland leveren. In zakken van 25 kg, maar ook per 1000 kg op pallets met krimpfolie.

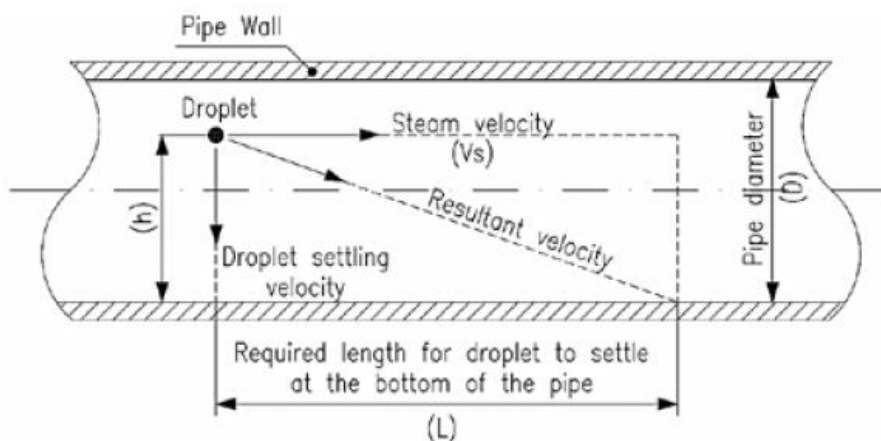
PRODUCTCODE	Hm-Pi-009-10/08	
CHEMISCHE ANALYSE	SiO ₂	72 %
	AL ₂ O ₃	< 2,5 %
	CaO	9 %
	MgO	< 4 %
	Na ₂ O	13,7 %
	K ₂ O	< 1,2 %
	Fe ₂ O ₃	< 0,5 %
	SO ₃	< 0,5 %
KORRELVORM	Rond	
AARD	Inert	
KLEUR	Wit	
HARDHEID	6 mohs	
STORTGEWICHT	1,50 kg/dm ³	
SOORTELIJK GEWICHT	2,46 kg/dm ³	
KORRELGROOTTE	40 - 70 micron	
	65 - 105 micron	
	75 - 125 micron	
	90 - 150 micron	
	100 - 200 micron	
	150 - 250 micron	
	200 - 300 micron	
	300 - 400 micron	
400 - 600 micron		

V Berekeningen voor transparante testopstelling

Voor de bouw van transparante testopstelling is op basis van verschillende variabelen, gekeken hoe slimme keuzes gemaakt konden worden op basis van wat simpele berekeningen.

Zo was de wens om een opstelling te definiëren met de juiste lengte zodat het gedrag van stof goed bestudeerd kon worden. Hiervoor kan de theorie uit paragraaf 3.2 gebruikt worden.

Schematisch zal het transport van een stofdeeltje er als volgt uitzien;



Figuur 15 – settelen van stofdeeltjes in een leiding volgens Stokes law

In het testprogramma is gekozen voor stof met diverse korrelgroottes. Elke stofsoort heeft een minimale en een maximale korrelgrootte. Om te voorkomen dat stofdeeltjes neerslaan in de opstelling, kan een berekening gemaakt worden voor de kritisch snelheid waarbij dit gebeurt aan de hand van vergelijking 3. Wanneer de snelheid van het gas boven deze kritische snelheid uitkomt, zal stoftransport gaan plaatsvinden.

Wanneer met behulp van vergelijking 3 een berekening gemaakt wordt voor berekening van TV op basis van lucht (dichtheid 1,13 kg/m³) en medium stof (dichtheid 2450 kg/m³ en een minimale korrelgrootte van 150 micron), volgt;

$$TV = 1,73 \sqrt{\frac{gd_p(\rho_p - \rho_g)}{\rho_g}} = 1,73 \sqrt{\frac{9,81 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \cdot (2460 - 1,13)}{1,13}} = 3,09 \text{ m/s}$$

Hieruit valt op te maken dat snelheid voor lucht rond deze waarde (of hoger) zal moeten liggen om stof te kunnen transporteren.

Tevens zal de opwaartse snelheid van gas in een verticale buis minimaal deze snelheid moet hebben om continu met het gas meegevoerd te worden. De snelheden in de verticale sectie van de transparante testopstelling is vele malen lager. Hierdoor zal er geen stof naar het filter getransporteerd worden en kan geconcludeerd worden dat al het medium stof in de weegbak terecht zal komen.

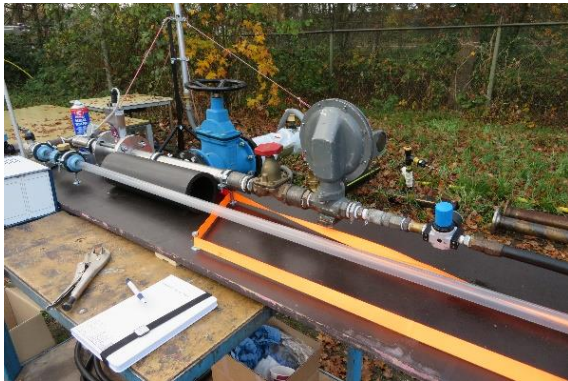
Tevens is een check van de grenslaagtheorie gedaan om te onderzoeken of de grenslaag voldoende klein is en de experimenten niet beïnvloedt. Uit deze berekeningen blijkt dat deze, afhankelijk van het Reynolds getal voldoende zal zijn waarbij het omslagpunt van laminair naar turbulent wel een rol zal spelen.

Deze berekeningen zijn gebruikt om een gefundeerde keuze te maken voor de dimensionering van de transparante sectie en de verticale sectie waarin de weegbak en het filter gemonteerd wordt. Tijdens het uitvoeren van de experimenten is het filter meerdere malen gecontroleerd op vervuiling. Hieruit bleek dat zelfs bij het hoogste debiet waarmee is geëxperimenteerd, geen stof door het filter te zijn

afgevangen. Hieruit blijkt dat bovenstaande berekening heeft geleid tot een goed gedimensioneerd systeem.

VI Foto's van transparante testopstelling

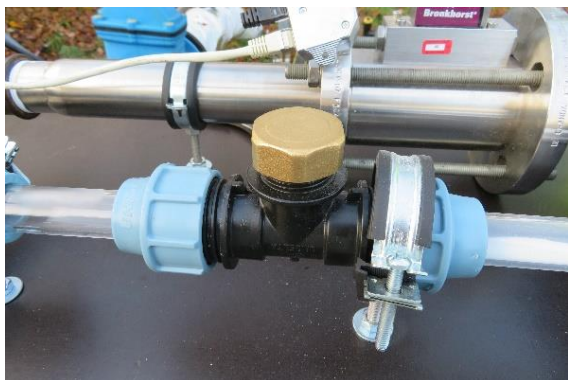
Onderstaand enkele foto's van de testopstelling.



Overzicht met transparante sectie



Regelventiel en reduceerventiel



T-stuk voor stofdosering



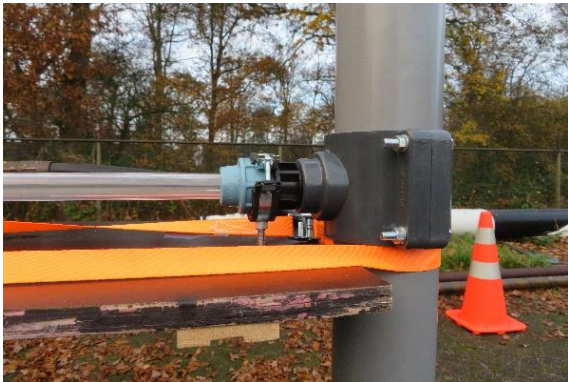
Tweewegklep met afblaas en T-stuk



Gasfilter en afblaas 2



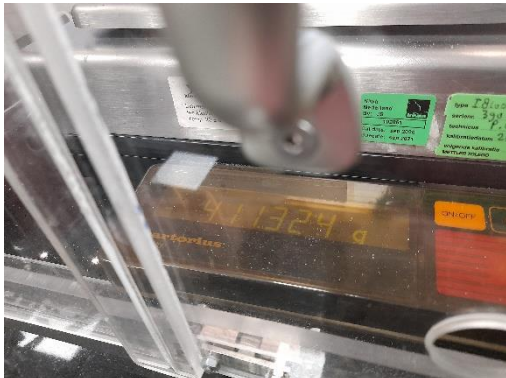
Weegbak



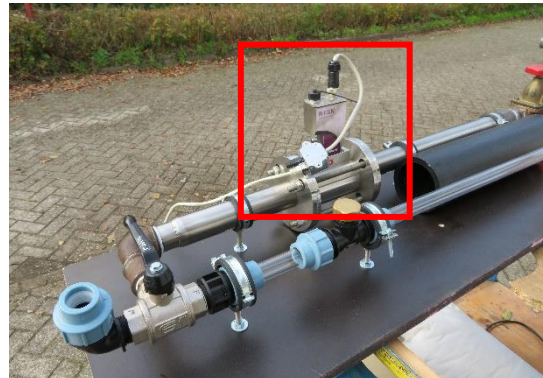
Transparante sectie en lage snelheidsectie



MFM met aansturing



Nauwkeurige weging van stof (inclusief weegbak)



MFM en Tweewegklep