

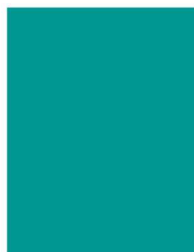


# OPENBAAR RAPPORT

## ONTWIKKELING VAN EEN PROTYPE H2 VULSYSTEEM MET VORTEX KOELER

Gerard Westendorp

HYG-VTX-RP.007



## Table of Content

|      |                                                                                             |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1    | Voorwoord .....                                                                             | 3  |
| 2    | De rol van het Vortex Koeler project binnen de regeling Duurzame<br>Energiehuishouding..... | 4  |
| 3    | Inleiding .....                                                                             | 5  |
| 4    | Temperatuur effecten tijdens het vullen van een waterstof tank.....                         | 6  |
| 5    | Het idee van de toepassing van een vortex koeler bij het tanken.....                        | 8  |
| 6    | De Lavalstraalpijp .....                                                                    | 12 |
| 6.1  | Wrijvingsverliezen .....                                                                    | 13 |
| 6.2  | Het gebruik van een Lavalstraalpijp als koeler .....                                        | 15 |
| 7    | Experimenten en CFD berekeningen met Lavalstraalpijpen.....                                 | 16 |
| 7.1  | Conclusies Lavalstraalpijp metingen .....                                                   | 18 |
| 8    | Experimenten en CFD berekeningen met vortex buizen .....                                    | 19 |
| 8.1  | Conclusies vortex buis metingen .....                                                       | 21 |
| 9    | CFD berekening van een vortex buis .....                                                    | 22 |
| 10   | Ontwerp van een prototype vulstation .....                                                  | 23 |
| 10.1 | Hoge druk vortex buis .....                                                                 | 23 |
| 10.2 | P&ID van het prototype vulstation .....                                                     | 23 |
| 10.3 | Problemen .....                                                                             | 24 |
| 11   | Testen van het vulstation.....                                                              | 25 |
| 11.1 | Discussie metingen .....                                                                    | 28 |
| 12   | Conclusies .....                                                                            | 31 |

## 1 Voorwoord

Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Nationale regelingen EZK- en LNV-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor Ondernemend Nederland.

Dit project is uitgevoerd in samenwerking met Rijngas B.V. te Dinxperlo.

Dit project is uitgevoerd binnen HyGear door de volgende personen:

- Gerard Westendorp email: [Gerard.westendorp@hygear.com](mailto:Gerard.westendorp@hygear.com)
- Mark Beerstra email: [Mark.Beerstra@hygear.com](mailto:Mark.Beerstra@hygear.com)

Voor verdere informatie of kopieën van het rapport kunt U contact opnemen met deze personen, of met [info@hygear.com](mailto:info@hygear.com).

Er zijn geen andere openbare documenten van HyGear over dit project dan dit document.

## **2 De rol van het Vortex Koeler project binnen de regeling Duurzame Energiehuishouding**

Een belangrijk element van Duurzame Energiehuishouding is het vervoer over de weg: personenauto's en vrachtwagens. In plaats van fossiele brandstof moeten we naar batterijen of waterstof als energiedrager voor vervoersmiddelen.

Waterstof vervoer is in vergelijking met vervoer met batterij technologie nog wat minder ver ontwikkeld. Er zijn weliswaar waterstof auto's met brandstofcellen op de markt. Vrachtagens of personenauto's kunnen ook op waterstof rijden met een conventionele verbrandingsmotor in plaats van een brandstofcel. Deze technologie is iets minder efficiënt, maar is minder afhankelijk van zeldzame grondstoffen zoals Platina. Maar vooral de mogelijkheid om waterstof te tanken is nog beperkt.

Eén van de technische problemen van een waterstof tanken is dat de waterstof gekoeld moet worden, om oververhitting van de tank te voorkomen. Deze koeling kost geld en energie. Het idee van dit Vortex Koeler project is om de koeling op een eenvoudige en goedkope manier te realiseren, door gebruik te maken van het koelend potentieel van het expanderen van de waterstof. Immers, in de tank wordt waterstof samengeperst, waardoor de tank warm wordt, maar aan de andere kant van het vulproces treedt juist expansie op: van de hoge druk opslag naar de lagere druk van de tank van het voertuig.

Het koelend potentieel van de bovengenoemde expansie wordt meestal niet benut, de expansie treedt op in een gesmoord ventiel, waarbij het koelend potentieel door wrijving teniet wordt gedaan. Met de Vortex koeler willen we dus het koelend potentieel van de bovengenoemde expansie juist wel benutten.

### **2.1 Spin off**

Naast de ontwikkeling van een vulstation, is het project om andere redenen interessant.

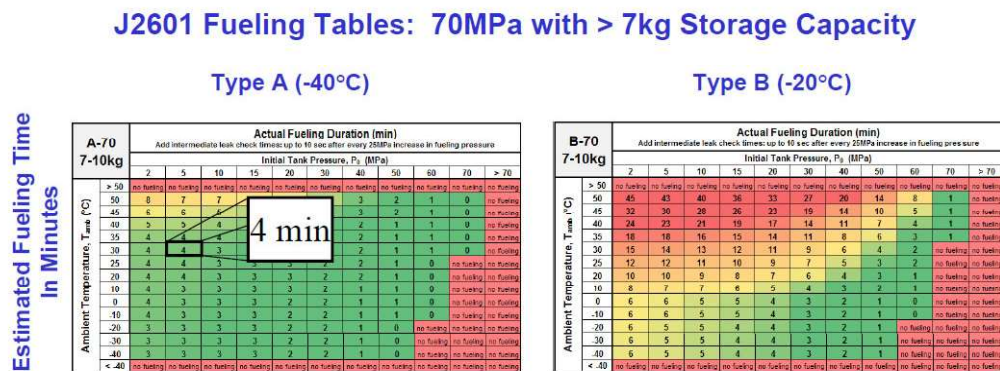
De temperatuur effecten bij compressie en expansie worden vaak verkeerd begrepen. Het Joule-kelvin effect wordt bijvoorbeeld vaak verward met temperatuurverandering door adiabatische expansie. Dit laatste effect is vele malen groter. Niet alleen bij het tanken van voertuigen, maar ook bij het vullen van gas cilinders en voorraad vaten komen we deze effecten tegen. Problemen als oververhitting en maar ook juist bevroering kunnen optreden.

De Ranque Hilsch buis (Vortex buis) is een fascinerende uitvinding, die al sinds 1931 het onderwerp van vele wetenschappelijke onderzoeken is geweest. Aan de TU Eindhoven zijn bijvoorbeeld een aantal recente promotieonderzoeken gedaan met de vortex buis als onderwerp.

### 3 Inleiding

In het Vortex Koeler project willen we een waterstof vulstation demonstreren waarin een zogenaamde vortex koeler gebruikt wordt om de waterstof te koelen. Bij het vullen van een waterstof tank is het vaak nodig de waterstof te koelen, omdat het gas in de tank opwarmt vanwege adiabatische compressie. Vooral bij de Kevlar tanks in waterstof auto's is dit een probleem, deze hebben een maximum veilige temperatuur van ca. 60°C.

Figuur 1.1 toont "SAE safety norm J2601", voor het vullen van waterstof tanks tot 7 kg.



Figuur 1.1: SAE Norm J2601 schrijft een minimum vultijd voor tanks tot 7kg. Class A is met -40C verkoeling, class B is met -20C verkoeling.

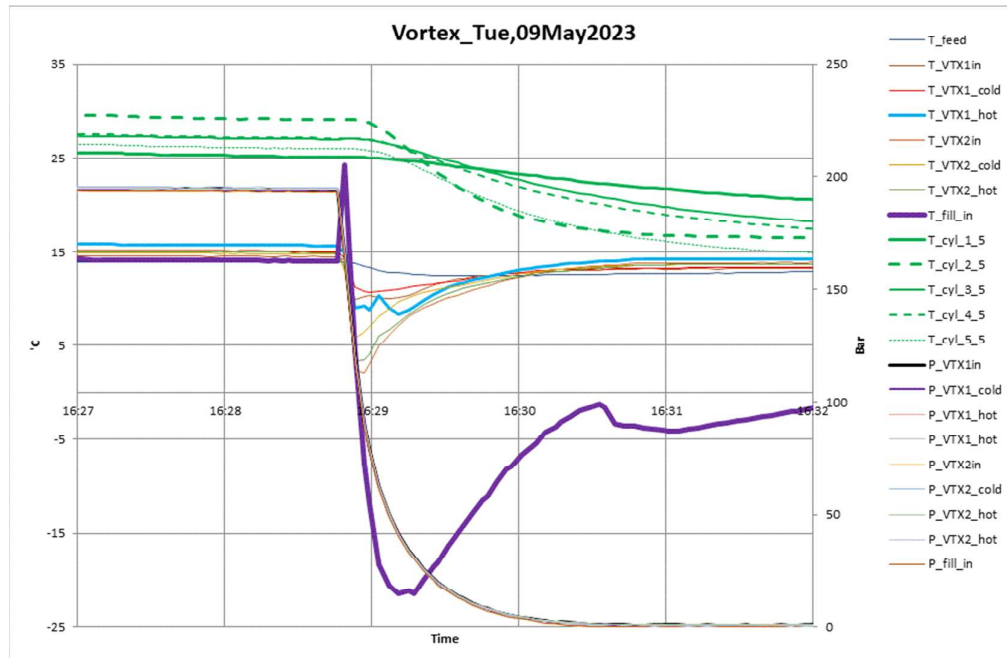
Zoals te zien in figuur 1.1, hoe dieper de brandstof gekoeld wordt, hoe sneller de tank gevuld mag worden. Er is dus een economisch drijfveer om de brandstof te koelen. Bestaande vulstations hebben meestal een koelinstallatie, bijvoorbeeld een aluminium blok waardoor de waterstof pijp is heengeleid, en die gekoeld wordt tot -40°C. Dit kost uiteraard energie, temeer omdat het blok, om gebruiksklaar te blijven, constant op -40°C wordt gehouden.

Het idee achter het Vortex Koeler project is dat hoewel het gas in de tank wordt samengedrukt, en daardoor warm wordt, het gas dat geleverd wordt uit de hogedruk opslag wordt juist in druk verlaagd, en zou bij adiabatische decompressie koud moeten worden. Netto is er sprake van decompressie. Kunnen we een vulstation ontwerpen dat gebruik maakt van dit netto koelpotentieel, en daarmee het gebruik van actieve koeling vermijden?

Dit rapport beschrijft het werk dat Hygear verricht heeft om het prototype te ontwikkelen en testen.

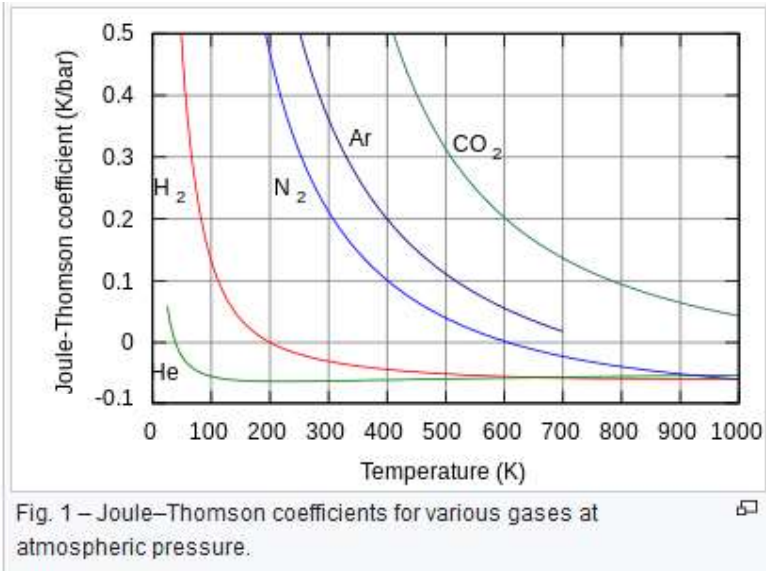
## 4 Temperatuur effecten tijdens het vullen van een waterstof tank.

Het belangrijkste temperatureffect is adiabatische expansie en compressie. Dit kan aanzienlijke temperatuurveranderingen teweeg brengen. In figuur 2.1 zien we bijvoorbeeld het effect in actie tijdens het afblazen van de tank.



*Figuur 2.1: Adiabatische expansie koeling in actie tijdens één van onze eigen metingen. Als de tank wordt afgeblazen, zien we de temperatuur in een leiding naar de vent pijp dalen tot -23°C.*

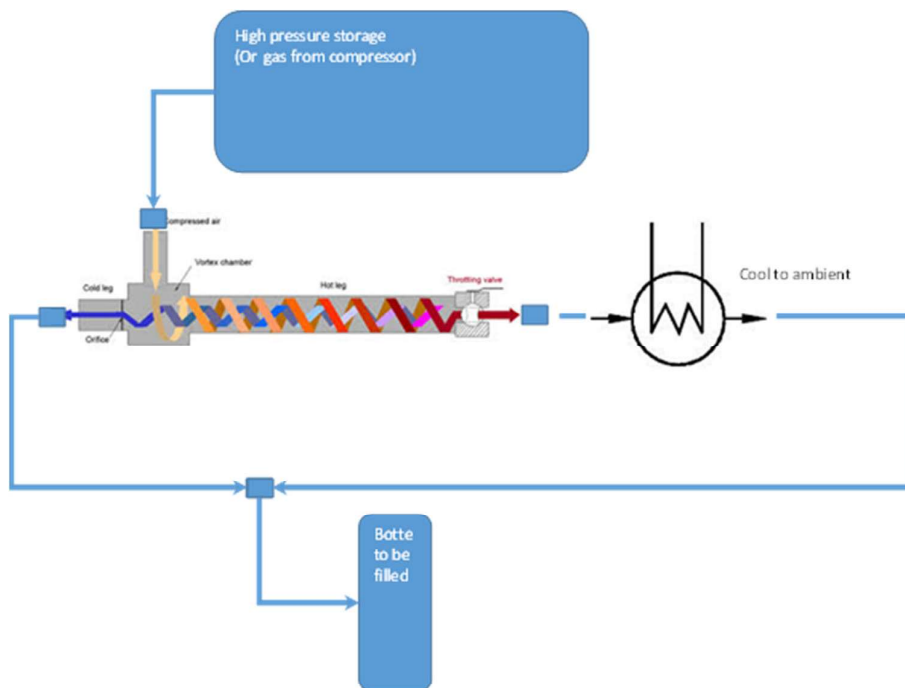
Bij adiabatische expansie wordt thermische energie van de gas moleculen omgezet in een andere vorm van energie, waardoor het gas kouder wordt. Dit effect moet niet worden verward met het Joule Thomson effect (of Joule Kelvin effect.) Hier wordt het gas ook geëxpandeerd, maar de (geordende) kinetische energie die vrijkomt wordt door wrijving in een smoorventiel omgezet in warmte, die teruggebracht wordt in het gas tijdens en na de expansie. Het Joule Thomson effect is veel kleiner dan adiabatische expansie: Voor ideale gassen is het exact nul, voor diverse gassen is het een klein getal, zoals geïllustreerd in figuur 2.2. Het gas is alleen koud als het een hoge kinetische energie heeft. Zodra de snelheid weg is, is het koelende effect ook weg.



*Figuur 2.2: Joule Thomson effect.*

*De Joule Thomson coëfficiënt is de verhouding tussen de temperatuur verandering en de drukverandering tijdens een gesmoorde expansie. Bijvoorbeeld, 1 bar1 bar drukverlaging in N2 bij 300 K geeft een koeling van 0.2Km H2 zou 0.02K in temperatuur stijgen.*

## 5 Het idee van de toepassing van een vortex koeler bij het tanken



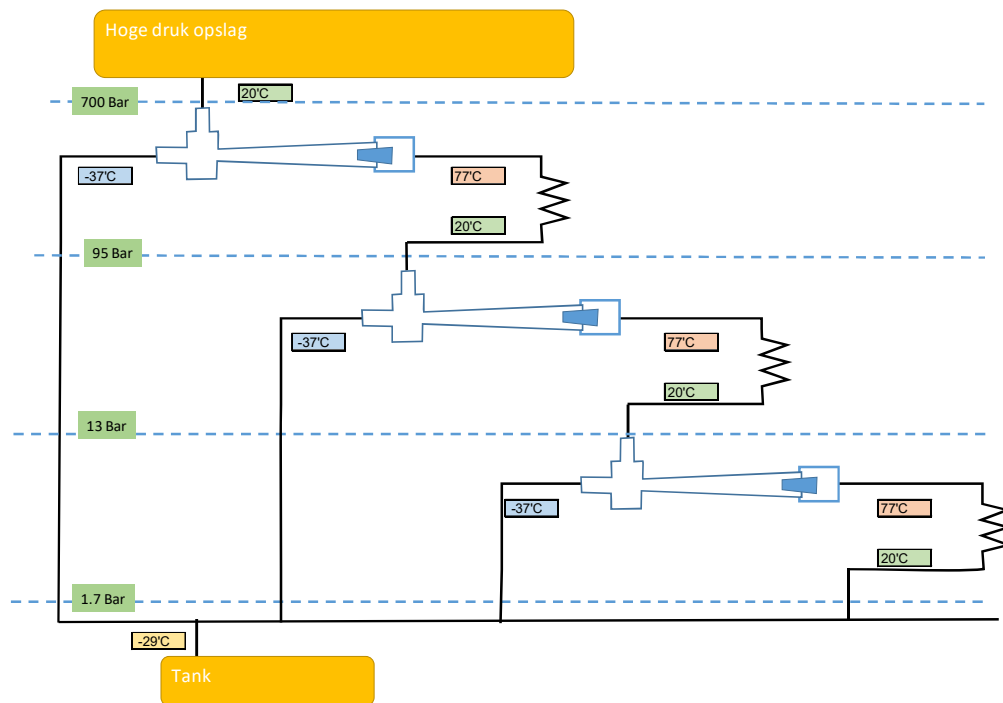
*Figuur 3.1: Basis idee van het gebruik van een vortex koeler bij het tanken.*

Het basis idee is het gebruik van het koelend potentieel van expansie van het toevoer gas voordat het de tank binnengaat. De vortex koeler, of Ranque Hilsch buis, werd in 1931 uitgevonden door G.J. Ranque. (Later schreef de Duitse hoogleraar Hilsch hierover een artikel, waardoor de uitvinding meer bekendheid kreeg). Een hogedruk straal wordt tangentieel geïnjecteerd in een buis, waardoor een hoge snelheid vortex ontstaat, die door adiabatische expansie koud zal zijn. Een deel van het gas gaat naar de “koude kant”, door een klein gat in het centrum van de buis. Dit gat is in de axiale richting dichtbij de inlaat. De rest van het gas gaat naar de “warme kant”, waar een smoorventiel (“throttling valve”) er voor zorgt dat de warme en koude stroom in een gewenste verhouding staan, ongeveer 1:1. De werking van de Ranque Hilsch buis lijkt verassend. Er zijn geen bewegende delen. Met een paar bar drukverschil kan de temperatuur aan de koude kant al onder de nul graden worden. Een praktische toepassing van de vortex buis is het koelen van het werkstuk bij boren en frezen. De koude straal wordt op de verspaning gericht.

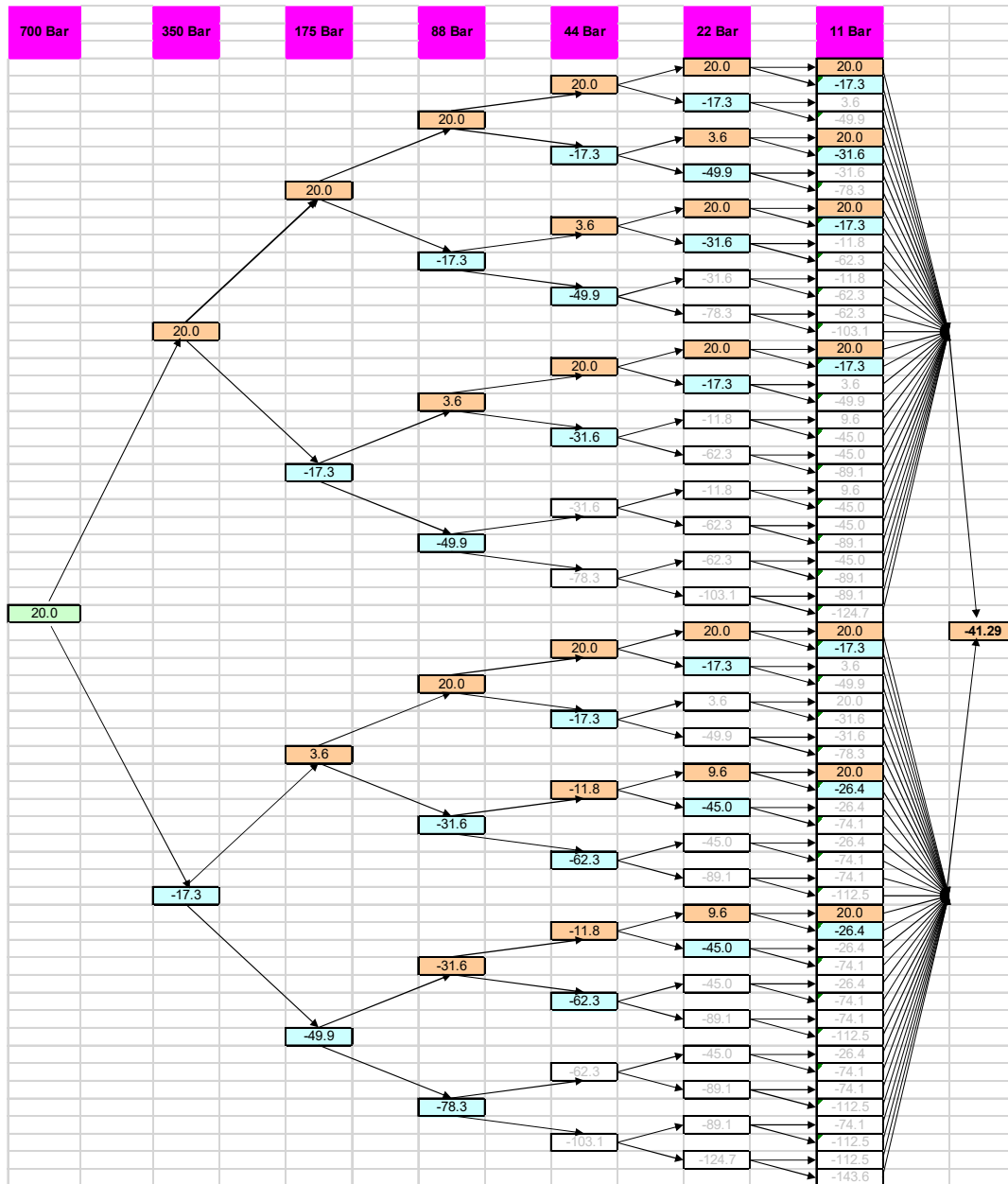
Eén manier om de vortex koeler toe te passen bij tanken, is alleen de koude gasstroom te gebruiken. De warme kant wordt in een tank opgeslagen, waar dan het weer wordt gecomprimeerd richting de opslag. Dit idee is reeds gepatenteerd in een Amerikaans patent. Het idee dat in dit project wordt gebruikt, dat mogelijk nieuw is, is om de warmte kant naar omgeving te koelen, en dan bij te mengen met de koude kant. Hiermee ontstaat een netto koeling.

Dit idee kan worden uitgebreid naar een meertraps versie. Het meertrappen-idee is geïllustreerd in figuren 3.2 en 3.3.

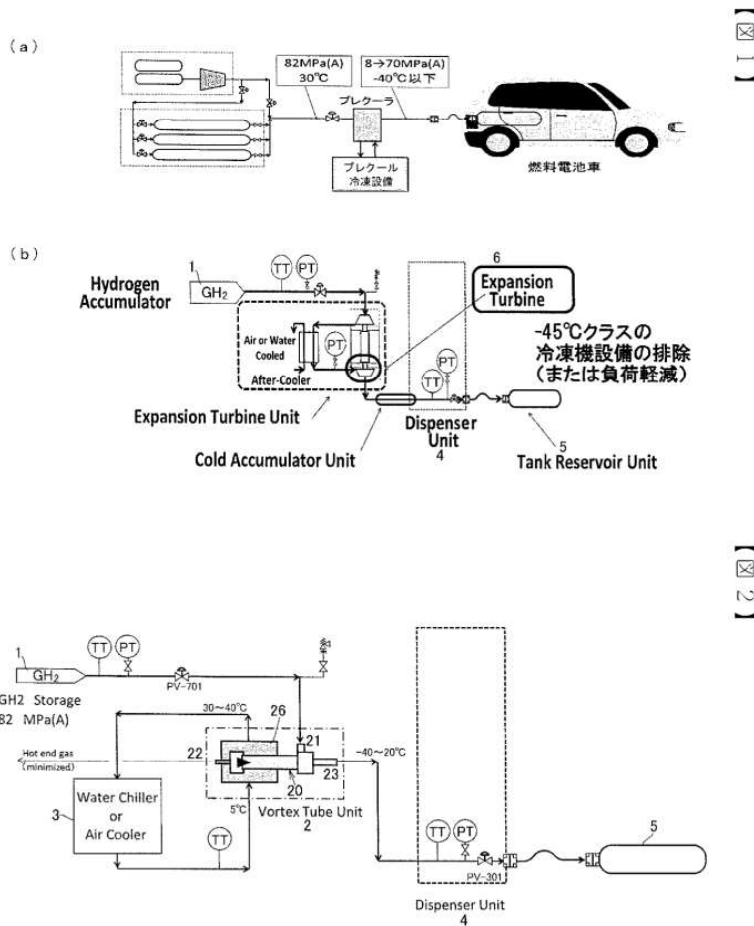




*Figuur 3.2: Gebruik van meerdere vortex buizen in serie.*



*Figuur 3.3: Nog meer trappen in serie. De koude taken worden nu ook doorgestuurd naar volgende trappen. Zodra een warmte tak boven de omgevingstemperatuur uit komt, kan er koeling naar de omgeving plaats vinden. We nemen in de berekening aan dat dan de warme kant 20°C wordt in plaats van de berekende temperatuur van de vortex buis. De takken waarbij zowel de warmte als de koude kant onder de omgevingstemperatuur blijven, zijn grijs gekleurd. Deze takken kunnen worden weggelaten.*



Figuur 3.4: Recent zijn een aantal nieuwe patenten gepubliceerd, bijvoorbeeld JP2021156419A, die soortgelijke, maar iets andere ideeën gebruiken als in dit project.

Voorlopig zullen we het relatief simpel houden: We gaan 2 trappen gebruiken.

## 6 De Lavalstraalpijp.

De koude kant van een vortex buis kan worden gezien als een opgerolde Lavalstraalpijp. De theorie van de Lavalstraalpijp is uitgebreid onderzocht: het wordt gebruikt in raketten en straalmotoren. Het loont daarom de moeite om hier enige aandacht aan te besteden.

Bij een “conventionele” venturi is het een redelijke benadering dat de dichtheid van het gas constant is. Gegeven de massastroom kunnen we dan de lokale snelheid en kinetische energiedichtheid uit de lokale diameter berekenen. Volgens Bernoulli is, als er geen energie verliezen zijn, de som van de kinetische energiedichtheid en de druk constant. Hierdoor ontstaat onderdruk in het smalle deel van de venturi. Hier zal het gas kouder zijn, volgens adiabatische expansie:

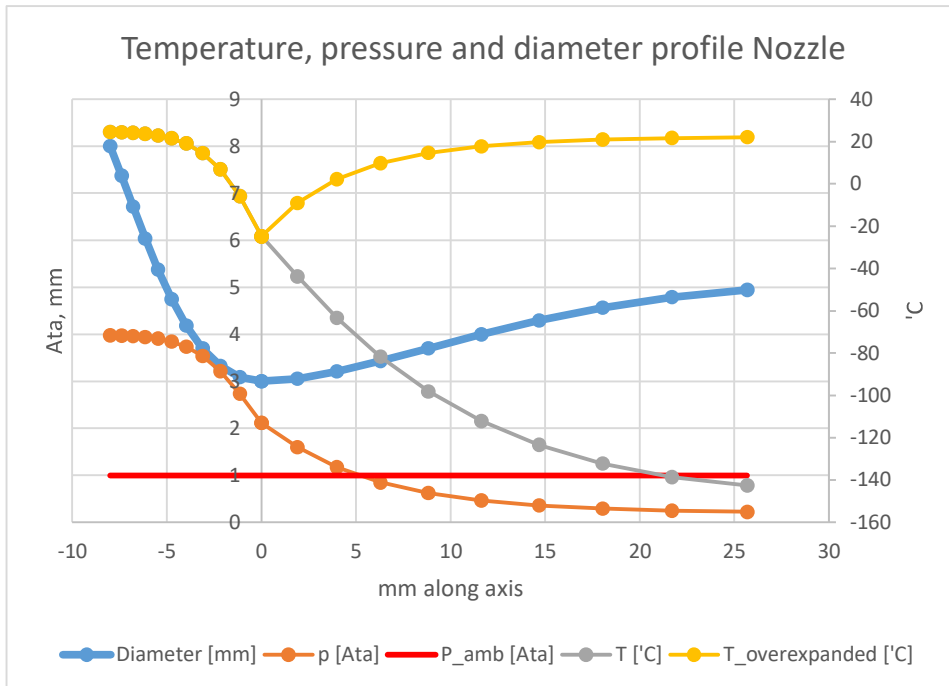
$$\frac{T_e}{T_0} = \left(\frac{p_e}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Echter, als de drukverhouding groot is, is de aanname van constante dichtheid niet meer geldig, en wordt de wiskunde wat ingewikkelder. Maar de vergelijkingen kunnen worden opgelost, we hebben hier een spreadsheet voor gemaakt. Het blijkt dat voor een gegeven massastroom en inlaat druk er voor elke diameter 0, 1 of 2 oplossingen zijn voor de {snelheid, druk, temperatuur, dichtheid}. Er is een keeldiameter, genaamd de kritische diameter, waaronder er geen oplossingen zijn. Als we de diameter verder zouden verkleinen, moet het gas sneller stromen om de massastroom in stand te houden, maar de dichtheid neemt ondertussen ook af. Bij de kritische diameter compenseert de afname in dichtheid de toename in snelheid: de massastroom kan niet meer toenemen door de snelheid te verhogen. Dus als de diameter kleiner is dan de kritische diameter, kan de gewenste stroom niet door de keel; er zijn geen oplossingen. Als de diameter gelijk is aan de kritische diameter, is er één oplossing: We hebben daar de kritische druk, de kritische temperatuur, en de kritische dichtheid. Als de diameter groter is dan de kritische diameter, zijn er 2 oplossingen. In de Lavalstraalpijp hebben we beiden: Eén stroomopwaarts van de keel, met hoge dichtheid en lage snelheid en hoge temperatuur, en één stroomafwaarts van de keel, met lage dichtheid, lage druk, lage temperatuur en hoge (supersonische) snelheid

Als de stroom beperkt is door een kritische diameter, de keel, wordt dit een gesmoorde stroom (“choked flow”) genoemd. Dit treedt op als de drukverhouding groter is dan een kritische verhouding, die ongeveer 1.9 is voor H<sub>2</sub> en lucht.

Een Lavalstraalpijp kent ook het fenomeen “overexpansie”. Hierbij “implodeert” de hogesnelheid oplossing, en gaat via een schokgolf over in de lage snelheid oplossing. Overexpansie treedt op als de diameter te snel toeneemt.

Figuur 4.1 toont de situatie voor één van de Lavalstraalbuizen die we hebben getest.

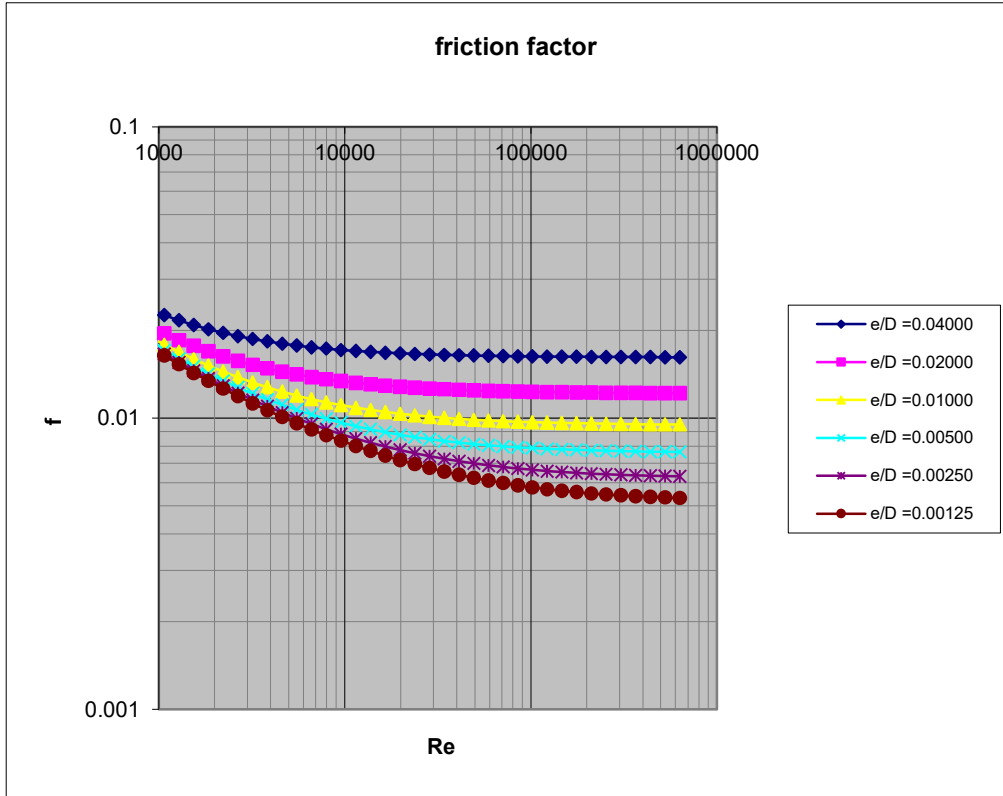


Figuur 4.1: Drukken en temperaturen voor een Lavalstraalpijp met 3mm keel, en een inlaatdruk van 4 Ata. De choked flow is 311 slm. “T\_over-expanded” is de temperatuur van de 2e oplossing die we zouden krijgen als de hoge snelheid straal volledig zou “imploderen”.

Volgens figuur 4.1, zou expansie vanuit 4 bar het gas kunnen koelen tot -60 °C!

## 6.1 Wrijvingsverliezen

Voor een ruwe schatting kunnen we gebruik maken van het “Moody diagram”, zoals afgebeeld in figuur 4.2. Wij hebben supersonische stroming, dus de geldigheid van het diagram gaat wellicht niet helemaal op, maar het kan wel een eerste idee geven.



Figuur 4.2: Moody diagram: The wrijvingsgetal van Fanning ( $f$ ) as a functie van het Reynolds getal.

Door het Reynolds getal te berekenen, kunnen we uit het Moody diagram het wrijvingsgetal van Fanning ( $f$ ) bepalen. Hieruit is dan de drukval te berekenen:

$$\Delta P = \chi \frac{1}{2} \rho v^2$$

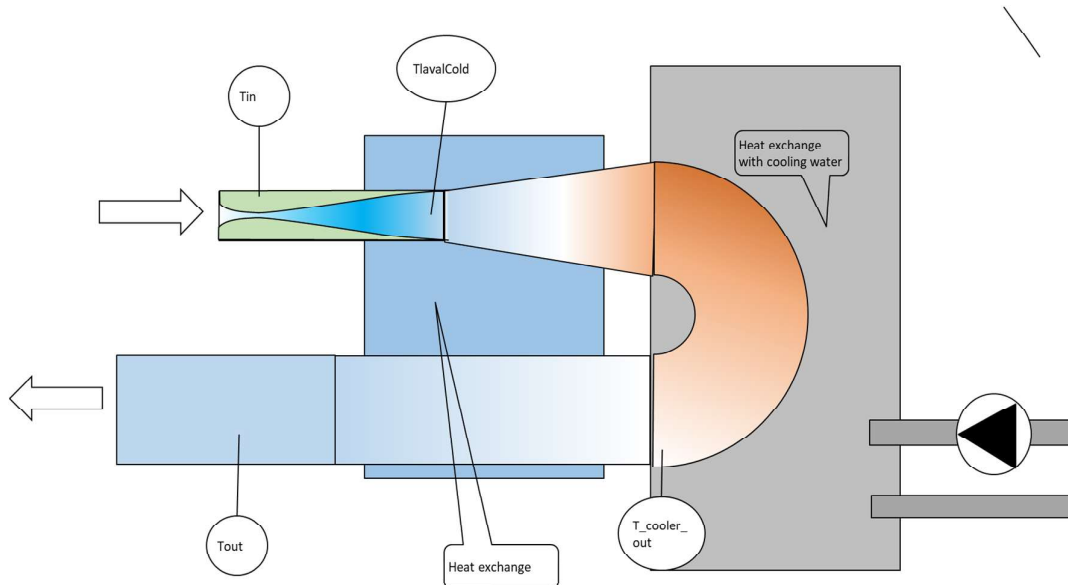
$$\chi = 4f \frac{L}{D} \sim 0.04 \frac{L}{D}$$

Wij hebben turbulente stroming,  $f \sim 0.01$ , of  $f \sim 0.02$  voor ruwere oppervlakken.

De kinetisch energie is ongeveer gedissipeerd als  $\chi \sim 1$ , dus als  $L/D \sim 1/0.04 = 25$ .

Als we voor  $D$  de keel diameter nemen, dan zou de straal zijn kinetische energie en daarmee ook de lage temperatuur kwijt zijn bij ongeveer 20 diameters. Dit zou nog erger kunnen zijn door de supersonische effecten. In ons geval hebben we een keel van 2 tot 3 mm, dus na enkele centimeters zal veel van de lage temperaturen verdwenen zijn. Dit lijkt de meest waarschijnlijke verklaring voor waarom we de voorspelde lage temperaturen niet zien in de meetresultaten.

## 6.2 Het gebruik van een Lavalstraalpijp als koeler



*Figuur 4.3: Een koelsysteem met een Lavalstraalpijp, een recuperatieve warmtewisselaar en een koeler.*

Een probleem bij het toepassen van een Lavalstraalpijp is dat de lage temperatuur verdwijnt als de hoge snelheid afgeremd is. Figuur 4.3 toont een oplossingsrichting die we voor dit probleem hebben bedacht. Als het gas nog een hoge snelheid heft en koud is, wordt het door een warmtewisselaar geleid. Het gas warmt daardoor op. Als het vervolgens zijn kinetische energie kwijt raakt, zal het niet meer naar omgevingstemperatuur gaan, zoals zonder de warmtewisselaar, maar zal eindigen als opgewarmd gas. Dit opgewarmde gas kan vervolgens gekoeld worden naar omgevingstemperatuur, waardoor er netto warmte uit het systeem onttrokken wordt. Vervolgens gaat het gas door de andere kant van de eerstgenoemde warmtewisselaar. Hier wordt het gekoeld door het hoge snelheid gas. Het uittredende gas heeft nu echter geen hoge snelheid meer, en blijft koud als het uit het systeem stroomt.

Het probleem met dit concept is dat de afmetingen van de Lavalstraalpijp klein moeten zijn, terwijl de warmtewisselaar al snel wat groter moet zijn. We besloten verder te gaan met vortex buizen, en het concept met Lavalstraalpijp voorlopig niet verder uit te werken.

## 7 Experimenten en CFD berekeningen met Lavalstraalpijpen

De werkzaamheden die beschreven zijn binnen dit hoofdstuk hebben betrekking tot werkpakket 2: bouw en testen van componenten. Binnen het project hebben we diverse Lavalstraalpijpen getest met perslucht. De maximale luchtstroom was 500 slm. De maximum inlaatdruk was ongeveer 6 bar(g).



*Figuur 5.1: Een aantal van de Lavalstraalpijpen die zijn getest.*

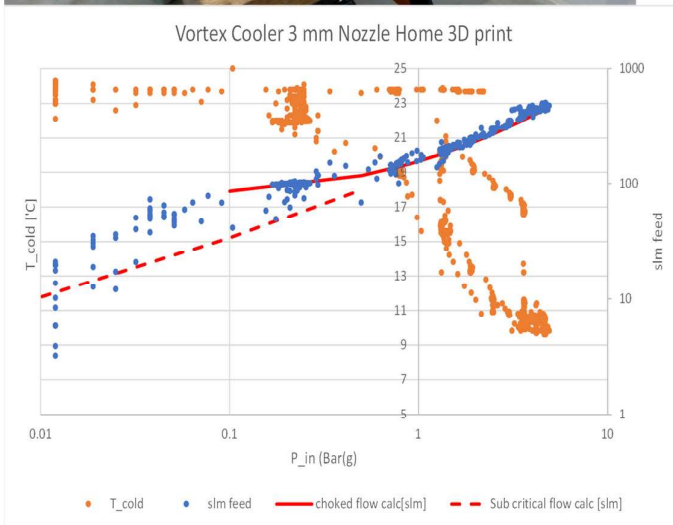
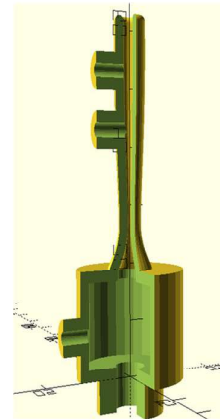
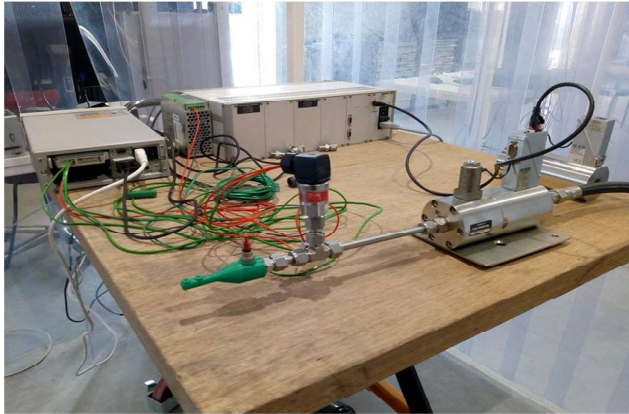
Er waren twee type Lavalstraalpijpen. Het eerste type is een conventionele Lavalstraalpijp. De ander is een zogenaamde "plug nozzle". Hierbij heeft het expansiegedeelte de vorm van een annulus rondom een plug. Het idee, dat gebruikt wordt in sommige straaljagers, is dat dit type Lavalstraalpijp minder gevoelig is voor overexpansie; De stroming plakt langs de plugwand door het Coanda effect.

De Lavalstraalpijpen hebben we zelf ge3Dprint, en een aantal hebben we laten printen bij het bedrijf Shapeways. Dit bedrijf heeft printer die een hogere resolutie kan halen, met meer keuze uit materialen. Helaas hadden de Shapeways prints per ongeluk een keel diameter van slechts 1 mm, waardoor ze weinig koeling gaven.

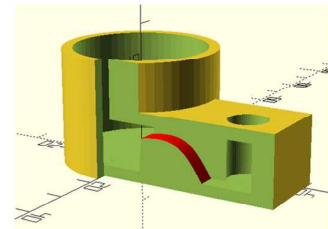
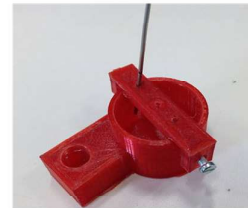
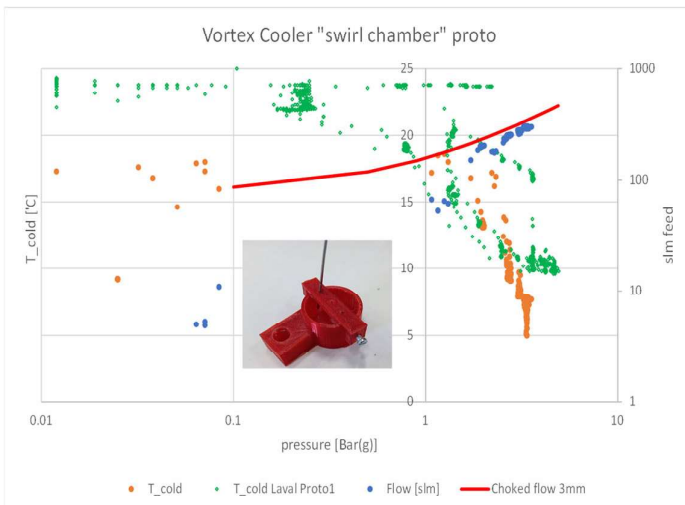
Figuur 5.2 toont resultaten voor een 3 mm keel. De grafiek is een spreidingsdiagram met op de x-as de ingangsdruk en op de y-as de koude temperatuur en de flow. Het koelend effect begint op gang te komen van ongeveer 1.5 bar(g). De flow versus druk klopt met de verwachte "choked flow". De koeltemperatuur haalde 10°C.

Figuur 5.3 toont resultaten voor een geometrie die al een beetje lijkt op de inlaat van een vortex buis. Interessant was dat dit ook de beste Lavalstraalpijp was, een temperatuur van 5°C werd gehaald. Mogelijk helpt het plakken tegen de buitenwand tegen overexpansie.

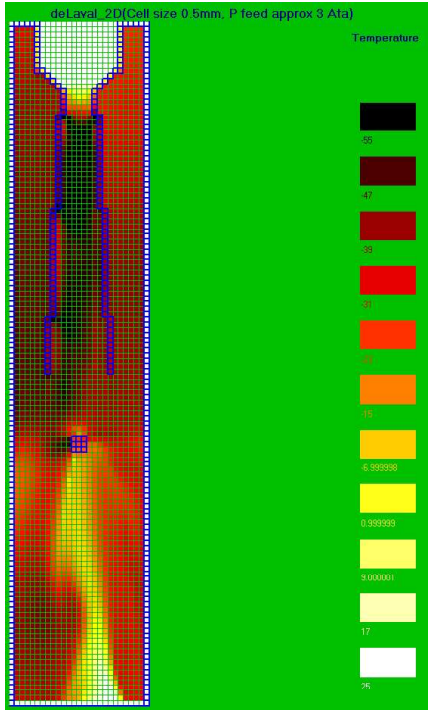




**Figuur 5.2: Resultaten voor de conventionele Lavalstraalpijp, keeldiameter 3mm. De figuur is een spreidingsdiagram van flow en uitgaande temperatuur versus de inlaat druk.**



**Figuur 5.3: Resultaten voor een Lavalstraalpijp die al enigszins lijkt op een vortexbuis inlaat. Deze geometrie had de beste prestaties van de Lavalstraalpijp metingen.**



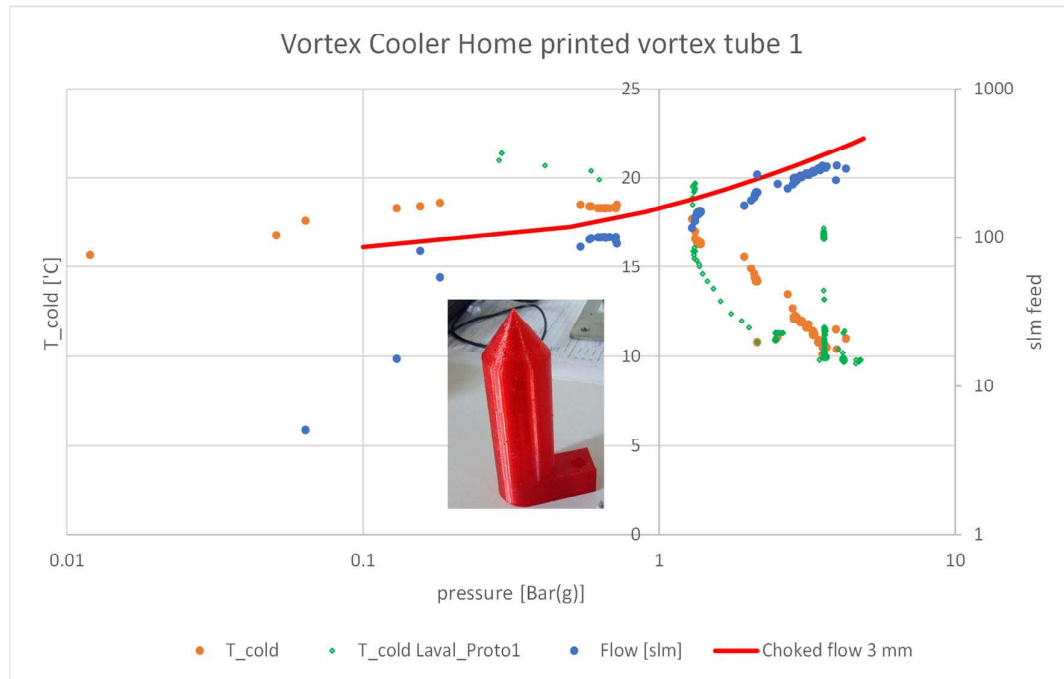
*Figuur 5.4: CFD berekening van een Lavalstraalpijp. In de CFD uitkomst zijn temperaturen aanwezig van -55C, maar het meegesimuleerde thermokoppel verstoort de stroming ,en meet een veel hogere temperatuur.*

## 7.1 Conclusies Lavalstraalpijp metingen

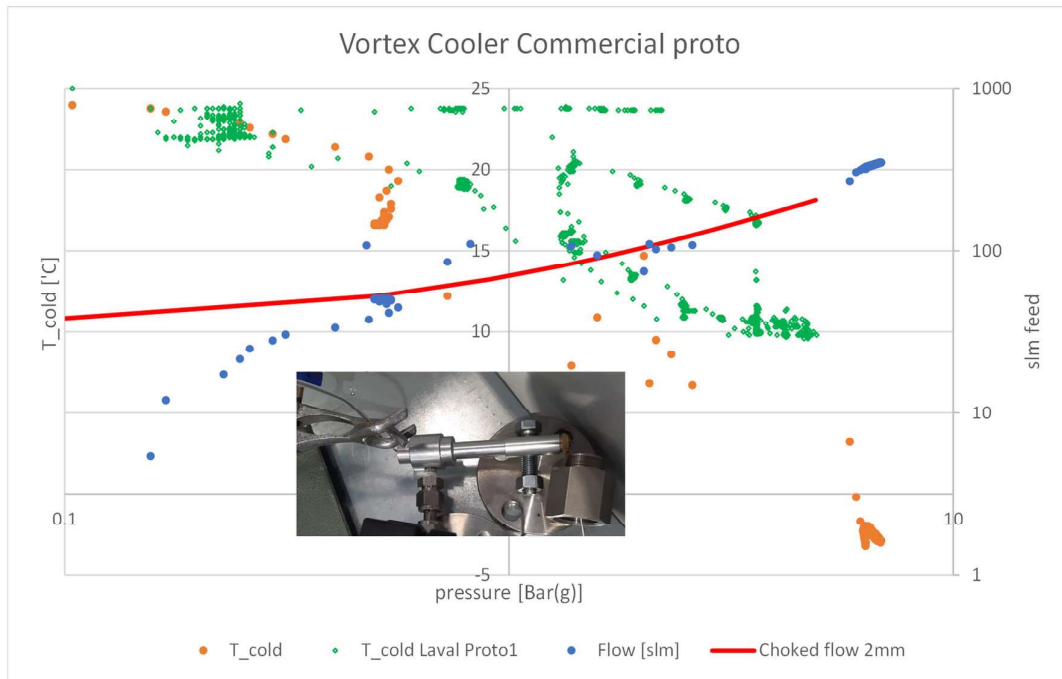
De gemeten koude temperatuur waren een stuk hoger dan de ideale waardes van de Lavalstraalpijp. Dit was deels verwacht, het ideale model heeft geen wrijving. Ook een CFD berekening, waar op zich wel wrijving in wordt meegenomen, voorspelde nog lagere temperaturen dan gemeten. Vermoedelijk wordt in de CFD berekening de (supersonische) turbulentie onderschat.

## 8 Experimenten en CFD berekeningen met vortex buizen

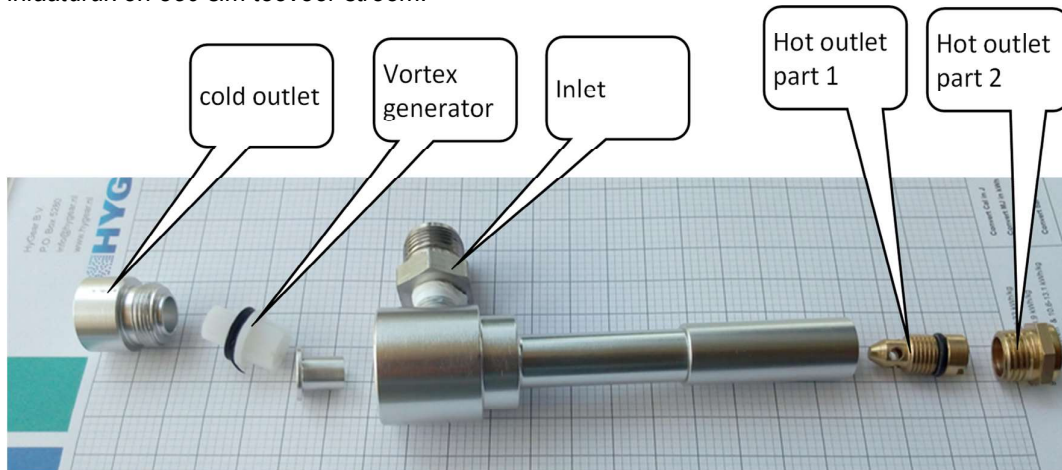
Er is een aantal tests gedaan met zelf geprinte vortexbuizen, en met een commercieel verkrijgbare vortex buis. Deze laatste werd bij Amazon gekocht, de oorspronkelijke leverancier is niet bekend.



*Figuur 6.1: Resultaten met "Home printed Vortex Tube". Deze geeft vergelijkbare prestaties als de Lavalstraalpijp, maar we hebben nog niet het de diameter van het gaatje voor de warme kant geoptimaliseerd.*



Figuur 6.2: Resultaten "Commercial Vortex Tube". Hiermee werd  $-3^{\circ}\text{C}$  gehaald bij 6.9 Bar(g) inlaatdruk en 350 slm toevoer stroom.



Figuur 6.3: "Commercial Vortex tube 1" gedemonteerd in onderdelen.



*Figuur 6.4: Het hoge snelheid gedeelte van de “Commercial Vortex tube 1”. Het heeft 5 tangentele openingen van ca  $1 \text{ mm}^2$ . Dit komt overeen met een keelopening met een diameter van 2 tot 3 mm.*

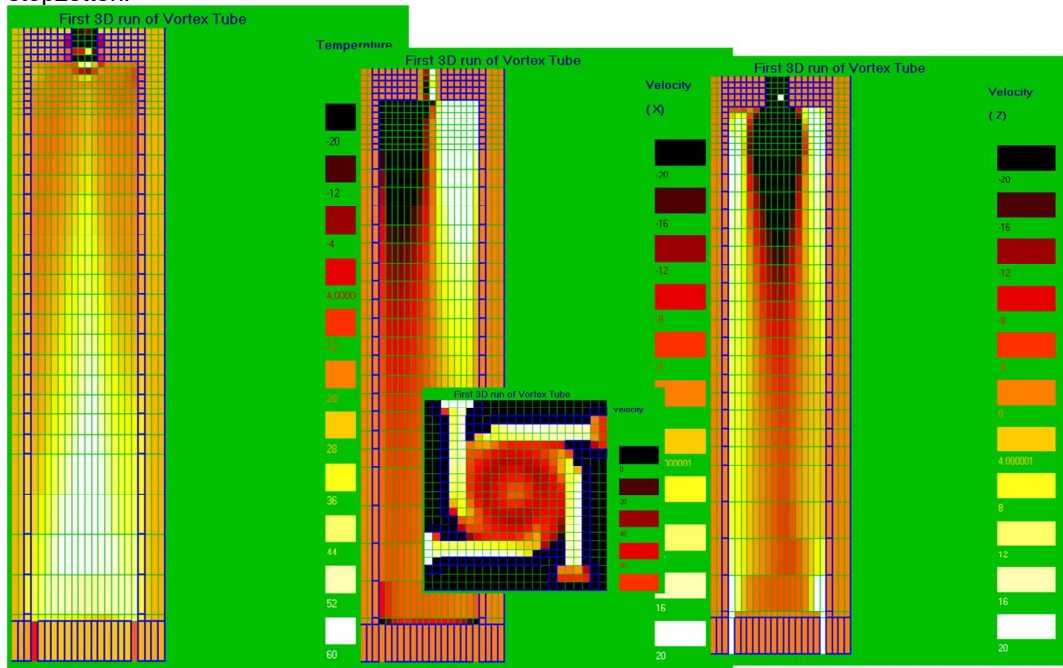
## **8.1 Conclusies vortex buis metingen.**

De “commerciele” vortex buis was beter dan de zelfgemaakte buis (+5°C versus -3°C). Hij was ook beter dan de Lavalstraalpijpen. De zelfgemaakte buis had nog geen geoptimaliseerde flow verhouding aan de warmte en de koude kant.

## 9 CFD berekening van een vortex buis

De CFD berekening van de Lavalstraalpijp in figuur 5.4 was 2-dimensionaal. Om een vortex buis te begrijpen, moeten we naar 3 dimensies. De eerste resultaten leken een plausibel beeld te geven, maar een aantal details kloppen nog niet. (zie figuur 7.1) De vier inlaat kelen zouden een symmetrisch beeld moeten geven, maar er is iets dat de symmetrie verbreekt.

Helaas was de beschikbare tijd op, we moesten het werk aan de 3 dimensionale CFD stopzetten.



*Figuur 7.1: We hebben enige tijd gewerkt aan een 3-dimensionale CFD berekening van de vortex koeler. Helaas raakte de beschikbare tijd op. De resultaten lijken op de goede weg om het gedrag van de vortexkoeler te verklaren, maar er zijn nog wel wat onopgehelderde details.*

## 10 Ontwerp van een prototype vulstation

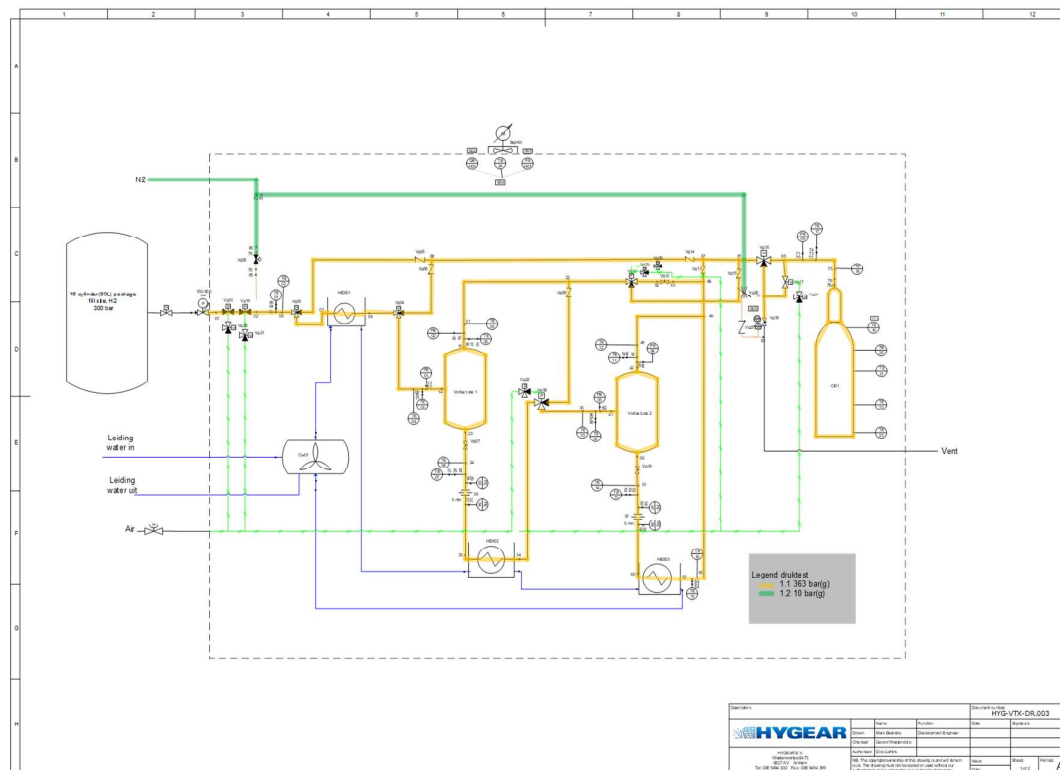
### 10.1 Hoge druk vortex buis

Hygear feedt een vortex buis ontwikkeld die op bestand is tegen een druk van 300 bar. Het ontwerp is vertrouwelijke informatie, en is daarom weggelaten uit dit openbare rapport.

### 10.2 P&ID van het prototype vulstation

Om een brandstoftank te simuleren hebben we een standaard 50 liter gascilinder gebruikt. Om 5 posities op de cilinder zijn thermokoppels geplaatst. De waterstof om mee te vullen was een cilinderpakket van de vul site van Hygear.

Zoals eerder genoemd, het systeem heeft een tweetraps vortex koeler. Door kleppen te schakelen is het mogelijk de tweede trap te omzeilen. Het is ook mogelijk beide trappen te omzeilen.



Figuur 8.5: P&ID van het systeem.

Om naar de omgeving te kunnen koelen, hebben we 3 koelers ontworpen en gemaakt. Deze bestaan uit een stalen spiraal in een “emmer” met water, die doorstroomd kunnen worden met water.

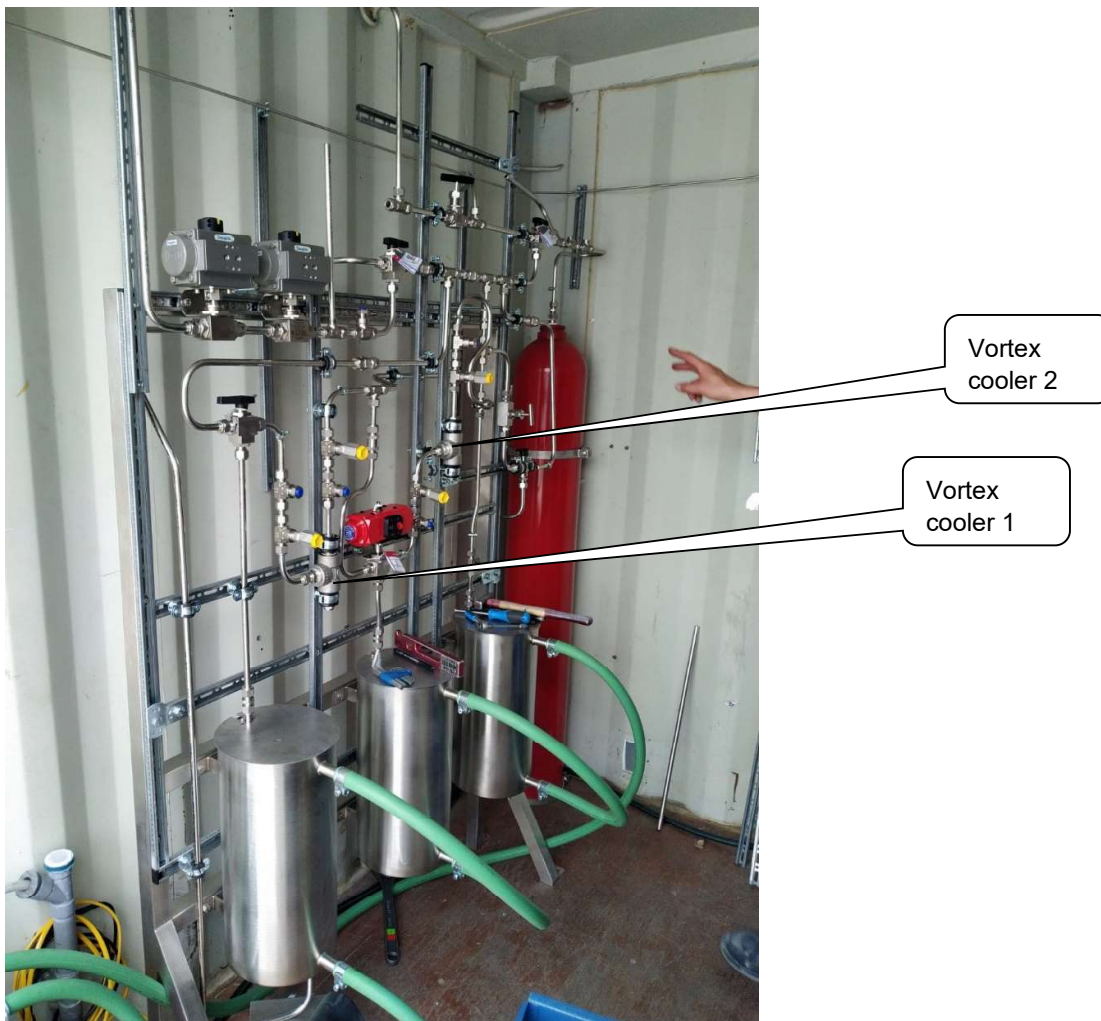
De cilinder bundel is verbonden met een drukreducerventiel, dat de vuldruk bepaalt. (Zoals we zullen zien, was dit geen goed idee)



### 10.3 Problemen

De meetopstelling lijkt vrij eenvoudig, maar in de praktijk heeft het veel tijd gekost om te bouwen. Een aantal componenten, met name kleppen, waren lastig te krijgen, en hadden lange levertijden onder andere door de COVID-19 pandemie. Er waren een aantal kleine lekken, die lastig op te lossen waren. Eén van de lekken was bijvoorbeeld een klein krasje op de plek waar een knelkoppeling moet worden geplaatst. Dit onderdeel moest worden gepolijst bij een gespecialiseerd bedrijf. Mensen werden ondertussen op andere projecten gezet. De eerste set metingen zijn verloren gegaan omdat de logfiles zijn gewist door een software bug.

Maar uiteindelijk werkte de opstelling. Tegen die tijd was de looptijd van het project echter verstreken. Uiteindelijk hebben we maar een paar metingen kunnen doen.



*Figure 8.6: De binnenkant van de container met de meetopstelling. De rode cylinder is de "tank" die gevuld wordt. De toevoer H2 is een cilinderpakket buiten de container. Op de foto zijn onder andere de vortexbuizen te zien.*



## 11 Testen van het vulstation

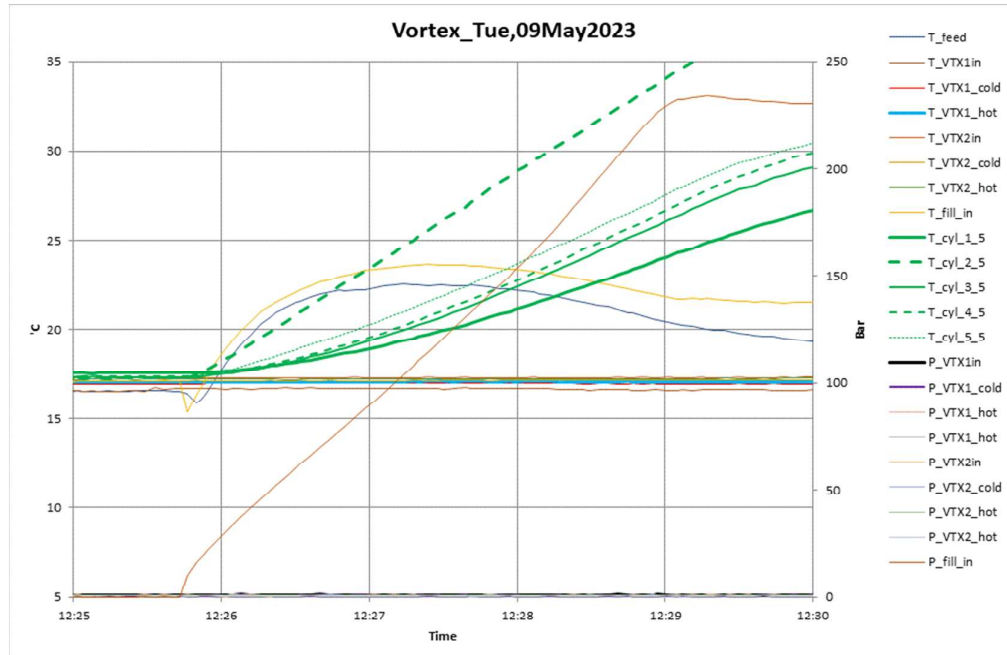
De resultaten uit dit hoofdstuk hebben betrekking tot werkpakketten 4: Prototype testen en 5: Analyse en lessons learned.

Er zijn 6 vul proeven gedaan, die geïllustreerd zijn in figuren 9.1 tot 9.6.

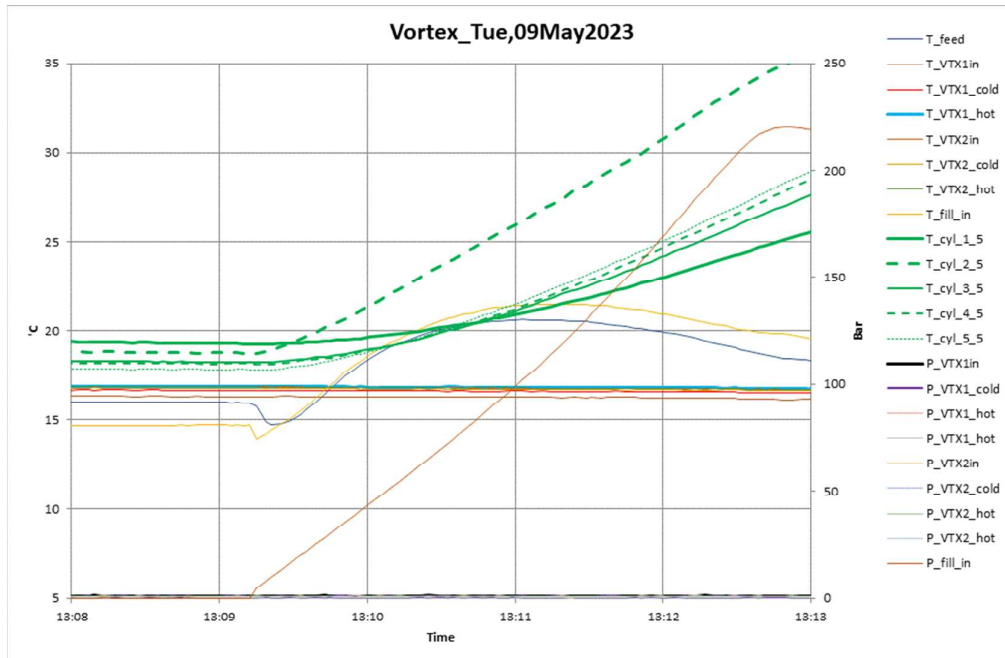
Metingen 1 en 2 waren referentie metingen met geen vortex koelers.

Metingen 3 en 4 waren met vortex koeler 1.

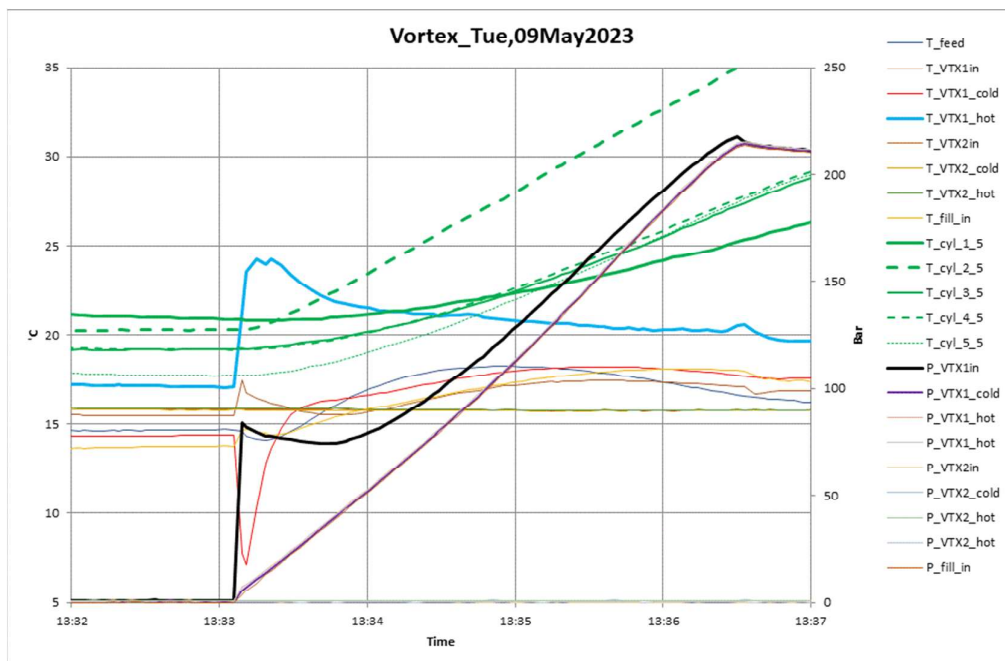
Metingen 5 en 6 waren met vortex koeler 1 en de tweede trap vortex koeler 2.



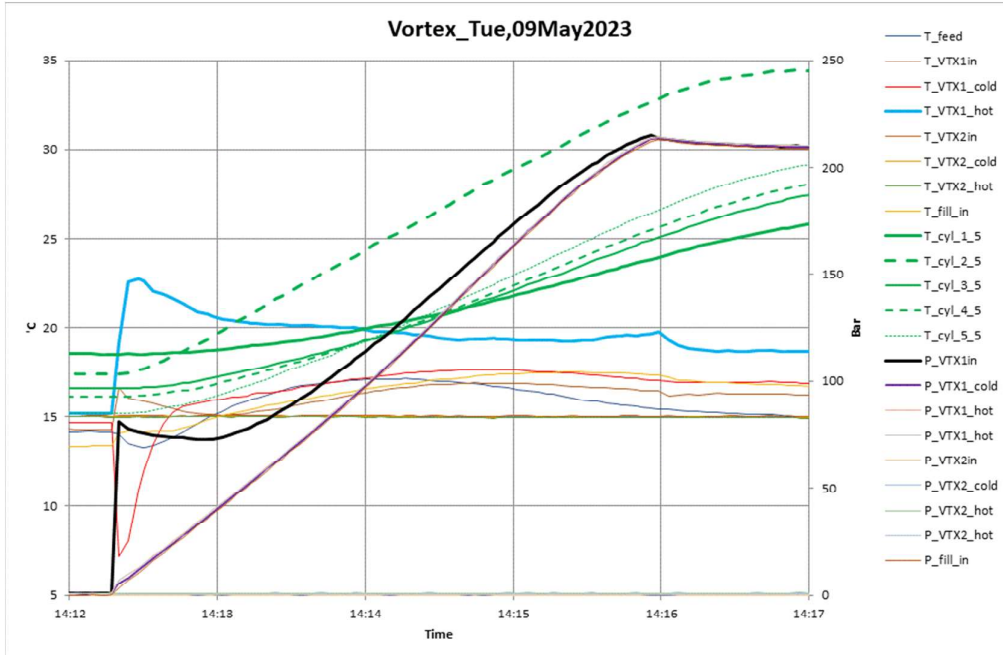
Figuur 9.1: Meting 1, geen vortex koelers.



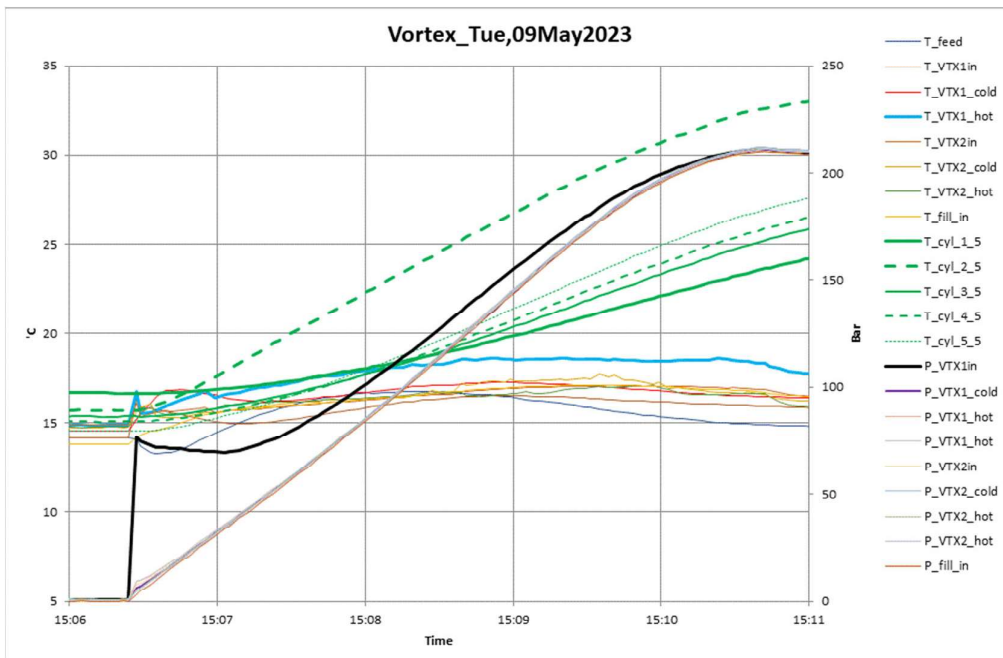
Figuur 9.2: Meting 2, geen vortex koelers.



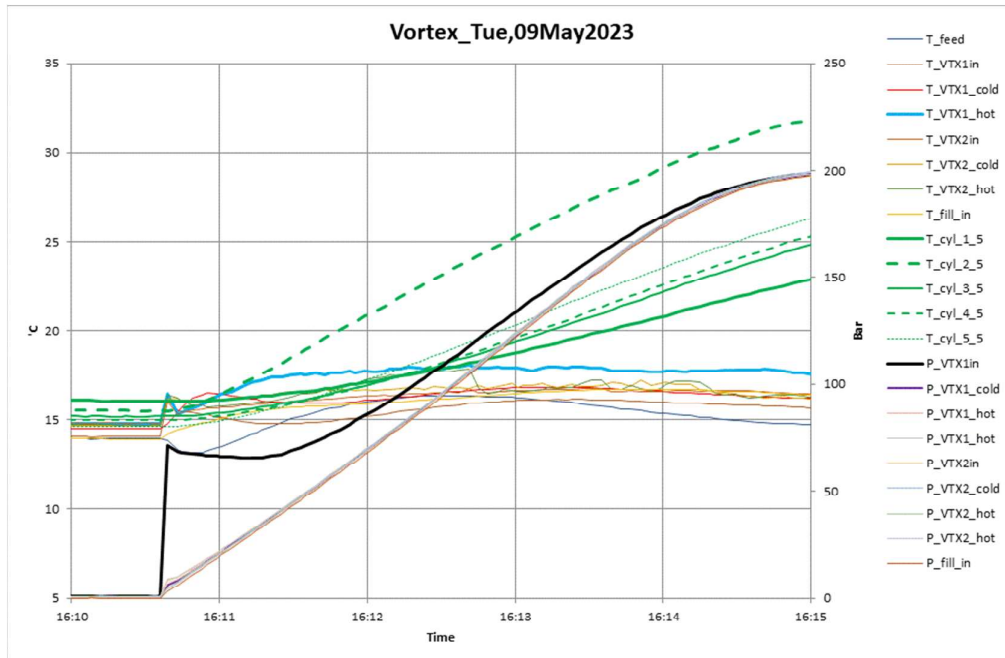
Figuur 9.3: Meting 3, vortex koeler 1 aan.



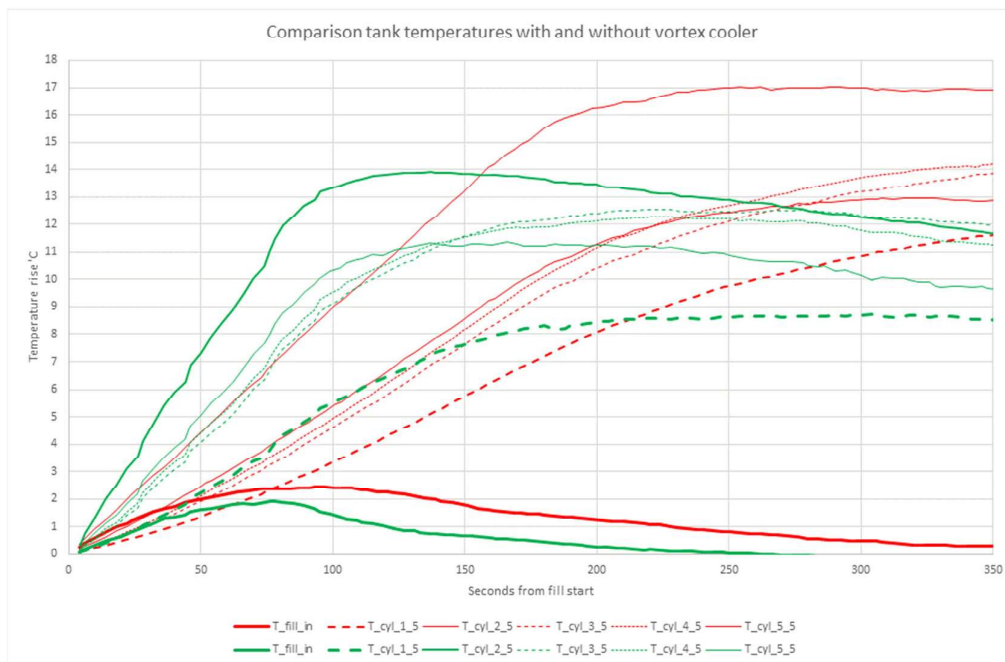
*Figuur 9.4: Meting 4, vortex koeler 1 aan.*



*Figuur 9.5: Meting 5, vortex koeler 1 en 2 aan. (Zoals besproken wordt, doen beide koelers op dit moment weinig)*



Figuur 9.6: Meting 6, vortex koeler 1 en 2 aan. (Zoals besproken wordt, doen beide koelers op dit moment weinig)



Figuur 9.7: Vergelijking van de relatieve temperatuurstijging van metingen 1 en 3.

## 11.1 Discussie metingen

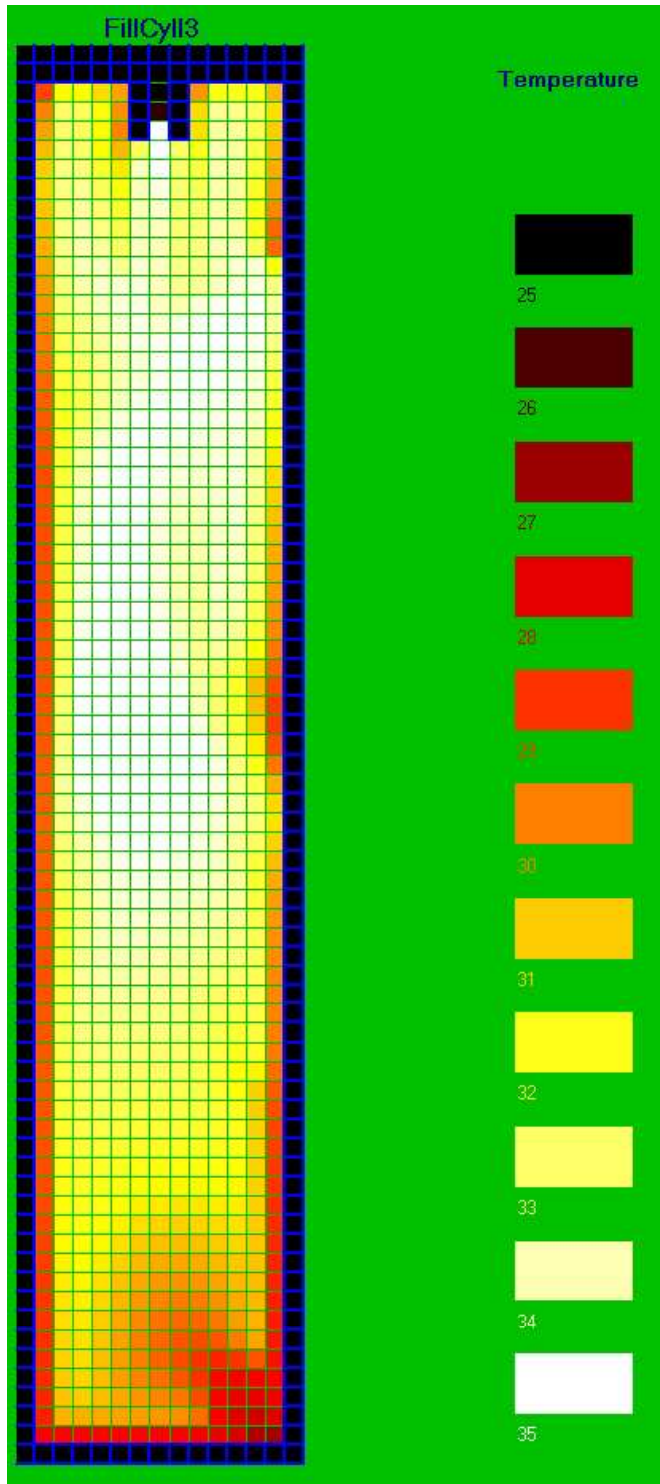
Het druk reduceerventiel staat te traag afgesteld. Het is de vraag of we wel een reduceerventiel hadden moeten gebruiken. Zoals te zien in figuur 9.3, is er bij aanvang van het vullen slechts 60

bar op de inlaat van vortex koeler 1. Deze is ontworpen voor 250 bar, met daarom de 0.5 mm keeldiameter. Bij 60 bar voordruk zal hij minder goed werken. Hij koelde kortstondig naar 7 graden, en begon toen minder te koelen, omdat de drukverhouding afnam: De voordruk bleef gelijk, maar de stroomafwaartse druk nam toe.

Toen ook de tweede trap werd aangeschakeld, stopte de koeling helemaal. Dit is waarschijnlijk doordat de stromingsverhouding van de warme en koude kant niet goed staat. De kraan Vg12 is bedoeld om deze verhouding in te stellen, maar dat was nog niet gedaan. Daarvoor moeten meerder metingen gedaan worden met steeds een iets andere stand van de kraan.

Figuur 9.7 toont de relatieve temperatuurstijging van metingen 1 en 3. Zoals te zien, is er een bescheiden koeleffect: De hoogste temperatuur is 3 graden lager. Het vullen is ook sneller. Dit is waarschijnlijk de reactie van het reduceerventiel op de weerstand van vortex koeler 1. De druk schiet omhoog naar 60 bar, en loopt dan via een transitie op naar 200 bar. Zonder vortex koeler loopt de druk min of meer lineair op.

Figuur 9.8 toont een CFD berekening van een cilinder die gevuld wordt. Net als in de metingen is hier de warmste cilinderwand bij ongeveer  $2/5^e$  vanaf de top van de cilinder. Er is een sterke natuurlijk convectie in de cilinder. Gas stroomt omlaag langs de koude wanden, stijgt op in het midden, waar het de ingaande stroming tegenkomt, en afbuigt richting de wand.



*Figuur 9.8: CFD berekening van het vullen van een cilinder. Door convectiestromen is het heetste deel van de wand bij ongeveer 2/5<sup>e</sup> van de top, wat overeenkomt met wat gemeten is.*

## 12 Conclusies

Het vulstation werkt, maar tot nu toe is het effect van de Vortex koelers nogal bescheiden (3 graden). Er zijn echter een aantal redenen waardoor we betere prestaties kunnen verwachten als we het koelsysteem verder zouden gaan ontwikkelen.

1. De voordrukregelaar moet niet traag afgesteld worden, want de Vortex koeler is juist ontworpen op een hoog drukverschil (200 bar). Bij de metingen werd de voordruk pas na enkele minuten hoog, maar toen was de druk in de tank ook al hoger. De koeler moet een hoge drukverhouding hebben.
2. De stromingsweerstand van klep Vg12 moet worden afgesteld zodat de warme en koude kant van VTX1 ongeveer hetzelfde stromingsdebiet hebben.
3. Het inlegdeel van de Vortex koeler moet meer gepolijst zijn. Dit zou kunnen door het op de kopt te laten printen, of door een andere productietechniek te gebruiken.
4. De Vortex buis geometrie kan verder geoptimaliseerd worden. De “commercial vortex tube” bleek beter te zijn dan onze eigen prototypes, dus er zijn nog suboptimale parameters in het ontwerp.