



VSL

Thijsseweg 11
2629 JA Delft
P.O. Box 654
2600 AR Delft
The Netherlands

T +31 (0)15 269 15 00
F +31 (0)15 261 29 71
E info@vsl.nl
I www.vsl.nl

Eindverslag over de uitvoering van de activiteiten en de resultaten ervan TELN115006

*Het project is uitgevoerd met subsidie van het Ministerie van Economische Zaken,
Nationale regelingen EZ-subsidies, Topsector Energie uitgevoerd door Rijksdienst voor
Ondernemend Nederland*

1. Gegevens project

- Projectnummer: TELN115006
- Project-titel: Primary LNG Mass Flow Standard
- Penvoerder en medeaanvragers: VSL, TU Ilmenau, Endress + Hauser
Projectperiode: 01-01-2016 - 30-06-2019

2. Inhoudelijk rapport (01-01-2016 – 30-06-2019)

2.1. Samenvatting

Het doel van het project is het verbeteren van de meetnauwkeurigheid van de volume- en massastroom van vloeibaar aardgas (LNG). In vergelijking met andere brandstoffen is de nauwkeurigheid (of meer specifiek de meetonzekerheid) in dit type meting minder goed. De LNG industrie is daarom op zoek naar methoden om nauwkeuriger meetstandaarden te introduceren in de handel van LNG. In dit project is gewerkt aan het verbeteren van een primaire kalibratiestandaard voor volume- en massastroom van vloeibaar aardgas (LNG). Deze primaire standaard is herleidbaar naar de kilogram (kg) en dient als referentiepunt voor de herleidbaarheid van LNG-stromingsmeters die gebruikt worden in de handel.

Het hoofddoel is om de meetonzekerheid voor de kilogram te verbeteren met een factor twee tot lager dan 0,10% meetonzekerheid. Hiertoe zijn een aantal subdoelen geformuleerd. Deze richten zich op het verbeteren van deelcomponenten in de bestaande primaire standaard. Deze verbeteringen zijn uitgedacht, geïmplementeerd en getest. Er zijn ook aanvullende maatregelen genomen om de meetonzekerheid te verbeteren. De resultaten van al deze maatregelen tezamen geven aan dat de meetonzekerheid verbeterd kan worden tot een niveau kleiner of gelijk aan 0,10% meetonzekerheid*. Dit is nog niet bepaald bij gebruik van LNG waarbij een nieuwe inschatting van de meetonzekerheid gemaakt zal worden. Doordat LNG bij een hogere temperatuur verdampt ten opzichte van stikstof is het eenvoudiger om de vorming van de gasfase te voorkomen tijdens het gebruik van de primaire standaard hetgeen de stabiliteit van de weging direct ten goede komt.

De genoemde verbetering van de primaire standaard is van zeer groot belang voor de gerelateerde TKIG01033 & TEG0214002 projecten waarin een kalibratiefaciliteit voor cryogene (dat wil zeggen zeer koude vloeistoffen zoals LNG) stromingsmeters wordt gerealiseerd op een schaal die interessant is voor de handel en industrie. De primaire standaard borgt de herleidbaarheid van de stromingswaarden die de cryogene meters weergeven en vormt daarmee de ruggengraat voor de handel in LNG.

*Bepaalde onzekerheidsbronnen zoals de gasthermometer, de tijdsonzekerheid, en de herhaalbaarheid dienen hiervoor beter gekarakteriseerd te worden dan thans het geval is. De voorlopig afgegeven meetonzekerheid ligt rond de 0,3% op massadebiet.

2.2. Inleiding

Betrouwbare, nauwkeurige en breed geaccepteerde meetmethoden zijn onmisbaar in de handel. Voor de grootschalige handel in LNG (vloeibaar aardgas) zijn de meetmethoden om hoeveelheid en energie te bepalen momenteel omschreven in een aantal ISO standaarden en in het handboek van de GIIGNL (Internationale groep van LNG importeurs). In vergelijking met andere brandstoffen zoals aardgas en benzine is de nauwkeurigheid (of meer specifiek de meetonzekerheid) in de meting van volume en energie bij levering van LNG minder goed. De LNG industrie

is daarom op zoek naar methoden om nauwkeuriger meetstandaarden te introduceren in de LNG handel.

Bij de groei van zogenaamde small-scale toepassingen voor LNG die het gebruik van LNG als brandstof promoten is het belangrijk een met benzine en diesel vergelijkbaar metrologische onderbouwing te hebben. Dit houdt in dat de meetresultaten herleidbaar zijn naar nationale meetstandaarden en de toelaatbare fouten zijn gedefinieerd. Dit is met name belangrijk omdat, anders dan bij de grootschalige handel waarbij de LNG terminals met elkaar afspraken hebben vastgelegd in een handboek, de gebruikers van LNG als brandstof consumenten zijn en beschermd dienen te worden met juridisch metrologische bepalingen. Het hoofddoel van het project is om de meetonzekerheid voor de kilogram te verbeteren met een factor twee tot lager dan 0,10% meetonzekerheid. Dit doel wordt ook beschreven in het rapport "Strategische visie standaardenbeheer" van de Raad van Deskundigen die het ministerie van Economische Zaken heeft geadviseerd over het metrologieprogramma 2016-2019.

Om bovengenoemde redenen is het ontwikkelen van een LNG kalibratie faciliteit een cruciale en urgente stap. De ontwikkeling van deze kalibratie faciliteit valt uiteen in 2 onderdelen, te weten:

- Het verbeteren van een wereldwijd toonaangevende primaire kalibratie standaard voor stromingsmeters tot 25 m³/uur [dit project]
- Een kalibratie standaard voor flow meters tot 200 m³/uur [gerelateerd project LNG Calibration Facility(TKIG01033 & TEG0214002)]

Door de koppeling van de primaire standaard aan de kalibratie standaard voor stromingsmeters tot 200 m³/uur zijn de stromingsmeters voor cryogene vloeistoffen herleidbaar naar de kilogram bij debieten (volume- of massastroom per tijdseenheid) die interessant zijn voor de handel en industrie.

Binnen het project hebben de volgende partijen samengewerkt:

- VSL: management, coördinatie, onderzoek, ontwikkeling en ontwerp ten behoeve van het verbeteren van de primaire standaard. Voor de constructie van de primaire standaard wordt met toeleveranciers gewerkt
- Endress + Hauser: ontwikkelen en realiseren van een stabiele cryogene Coriolis stromingsmeter
- TU Ilmenau: ontwikkelen en realiseren van een uniek systeem dat zogenaamde parasitaire krachten mitigeert

2.3. Doelstelling

Het hoofddoel is om de meetonzekerheid van de primaire standaard voor LNG massadebiet met een factor twee te verminderen. In kwantitatieve bewoordingen is het doel de Calibration and Measurement Capability voor massadebiet te verbeteren met een factor twee tot lager dan 0,10% meetonzekerheid. Met deze lage onzekerheid kan de beoogde meetnauwkeurigheid van het gerelateerde TKIG01033 & TEG0214002 project van 0,15% relatief tot de primaire standaard bereikt worden.

Ten behoeve van het hoofddoel is een aantal subdoelen geformuleerd:

1. Karakterisatie van de mechanische hysteresis en de stijfheidsmatrix behorende bij het flexibele pijpstuk van de primaire standaard
2. Gebruik makend van de resultaten behorende bij 1 ontwerpen van een systeem dat zogenaamde parasitaire krachten mitigeert
3. Realiseren van een prototype systeem dat de parasitaire krachten mitigeert
4. Installatie, met mogelijke aanpassingen, van het systeem in de primaire standaard
5. Ontwikkelen en realiseren van een stabiele cryogene Coriolis stromingsmeter

6. Reduceren bijdragen tijdsonzekerheid en temperatuuronzekerheid zodat de huidige meetonzekerheid verbeterd wordt met een factor twee
7. Valideren verbeterde meetonzekerheid en onzekerheidsanalyses. Het doel is een reductie met een factor twee

2.4. Werkwijze

De werkwijze is in overeenstemming gebracht met het reduceren van de invloed van dominante onzekerheidsbronnen van de primaire standaard: parasitaire krachten, tijdsonzekerheid en temperatuuronzekerheid (Van der Beek et al., 2014). Het project bestaat uit acht werkpakketten (WP):

- WP1. Karakterisatie mechanische hysteresis en stijfheidsmatrix behorende bij flexibel pijpstuk primaire standaard
- WP2. Volgend op WP1 ontwerpen systeem dat zogenaamde parasitaire krachten mitigeert
- WP3. Realiseren prototype systeem dat zogenaamde parasitaire krachten mitigeert
- WP4. Installatie, met mogelijke aanpassingen, van systeem in de primaire standaard
- WP5. Ontwikkelen en realiseren van stabiele cryogene Coriolis stromingsmeter
- WP6. Reduceren bijdragen tijdsonzekerheid en temperatuuronzekerheid ter verbetering van de huidige meetonzekerheid met een factor twee
- WP7. Valideren verbeterde meetonzekerheid en onzekerheidsanalyses. Het doel is een reductie met een factor twee
- WP8. Project management

- WP10. Integratie van de primaire standaard in de LNG kalibratie loop

WP1. Karakterisatie mechanische hysteresis en stijfheidsmatrix flexibel pijpstuk primaire standaard

Informatieoverdracht heeft plaatsgevonden tussen de TU Ilmenau en VSL via email-verkeer en het bezoek van een student en een medewerker (T. Eienkel en J. Schleichert) van de TU Ilmenau aan VSL. Hierbij is de benodigde informatie voor het ontwerpen van het systeem (zie WP2) uitgewisseld, een aantal vereisten voor het systeem gedefinieerd en zijn de noodzakelijke metingen verricht om de stijfheid van het flexibel pijpstuk en de mechanische hysteresis van de weegschaal met vultank te kwantificeren. De metingen om het draaimoment van het gehele systeem (flexibel pijpstuk, weegschaal met vultank en alle daaraan gekoppelde componenten) te bepalen zijn op een later tijdstip bij VSL uitgevoerd (juli 2017). Zie ook activiteit 1 voortgangsrapport TELN115006.

WP2. Ontwerp parasitaire krachten mitigatiesysteem

Met behulp van de informatieoverdracht en metingen verricht binnen WP1 heeft de TU Ilmenau een systeem ontworpen dat de parasitaire krachten tijdens het vullen van het vat op de weegschaal mitigeert. Tijdens de ontwerpfase is een haalbaarheidsonderzoek uitgevoerd en zijn de kosten van het systeem stevast meegewogen. Het systeem is geschikt gemaakt voor cryogene toepassingen aangezien de explosieveiligheid van het systeem en de individuele componenten is gewaarborgd. Zie ook activiteit 2 voortgangsrapport TELN115006.

WP3. Realisatie prototype parasitaire krachten mitigatiesysteem

Het parasitaire krachten mitigatiesysteem is ontwikkeld door het aanschaffen van componenten die aan de gestelde vereisten voldoen. Om de mechanische hysteresis te reduceren is een aluminium vloerplaat onder de weegschaal aangebracht. Het systeem zelf registreert vastgestelde uitwijkingen van een frame waarop de vultank rust op drie uit elkaar liggende punten. Deze uitwijkingen worden vervolgens gecompenseerd met actuatoren zodat de parasitaire krachten gecompenseerd worden en de referentietoestand van de weegschaal (waarop getarreerd wordt) intact blijft. Door de primaire standaard te belasten met gewichten, zowel met het parasitaire krachten mitigatiesysteem aan als uit, is de correcte werking van het prototype vastgesteld. De elektrische aansturing van het systeem bestaat uit een standaard industrietoepassing (Siemens SIMATIC S7 V14). Zie ook activiteit 3 voortgangsrapport TELN115006.

WP4. Installatie van systeem in de primaire standaard

Een deel van de componenten van het systeem is bij de TU Ilmenau getest en samengevoegd. Een ander deel is bij VSL geleverd of geconstrueerd. Het geheel is samengevoegd in mei en juni 2017. De werking van het gehele systeem zonder aankoppeling van het flexibele pijpstuk is daarbij vastgesteld door de primaire standaard te belasten met kalibratiegewichten, zowel met het parasitaire krachten mitigatiesysteem aan als uit.

Het systeem is vervolgens in juli 2017 verder geoptimaliseerd door de genoemde experimenten te herhalen met het flexibel pijpstuk vastgekoppeld aan het vulvat op de weegschaal. Hierbij zijn parameters zoals de gewenste nauwkeurigheid in de compensatie van de uitwijkingen van het frame aangepast. Daarnaast zijn validatiemetingen verricht die vergeleken kunnen worden met de stijfheidskarakterisatiemetingen van WP1. Zie ook activiteit 4 voortgangsrapport TELN115006.

WP5. Reductie tijdsonzekerheid en temperatuuronzekerheid

Het algoritme voor het bepalen van de tijdsonzekerheid is geanalyseerd. De genoemde opties in het project plan zijn uiteindelijk niet gekozen. Er is afgezien van het installeren van een drieweg afsluiter vanwege operationele redenen. Het ontwikkelen van een speciaal algoritme voor het beïnvloeden van de stroming lijkt vooralsnog niet nodig. Bij het kalibreren van stromingsmeters wordt een correctie uitgevoerd voor het zogenaamde "linepack" effect. Dit effect heeft een significante invloed op de meetnauwkeurigheid (zie van der Beek et al., 2014). VSL heeft nauw samengewerkt met de industrie partner Endress+Hauser om een temperatuursensor te ontwikkelen die voldoet aan de volgende eisen:

- Robust onder cryogene omstandigheden
- Tijdige uitlezing ten behoeve van operationele vereisten
- Weinig tot geen beïnvloeding van het stromingsprofiel in de pijpleidingen
- Minimale warmte-inlek
- Ontkoppelbaar ter kalibratie in het laboratorium
- Nauwkeurigheid beter dan 0,2 °C

Zie ook activiteit 5 voortgangsrapport TELN115006.

WP6. Ontwikkeling en realisatie stabiele cryogene Coriolis stromingsmeter

Het ontwerp voor de interactie tussen de stromingsmeters in de primaire standaard en de stromingsmeters in de LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) is gedurende het project gewijzigd met als resultaat dat niet één, maar vier stabiele, cryogene, Coriolis, stromingsmeters langs twee toevoerleidingen zijn geïnstalleerd. Dit heeft de volgende voordelen:

- De stromingsmeters komen van twee fabrikanten (Endress + Hauser en Emerson) zodat onafhankelijke metingen voor het cryogene massadebiet worden verricht
- De reproduceerbaarheid tussen stromingsmeters kan beter onderzocht worden. De reproduceerbaarheid van de primaire standaard kan onderscheiden worden van de reproduceerbaarheid van stromingsmeters in de LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) door, bijvoorbeeld, Youden plots
- Het bereik van de primaire standaard wordt vergroot van 25 m³/uur tot 50 m³/uur
- Efficiëntere opwerking voor kalibraties van de zogenaamde “Master Meter” stromingsmeters in de LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) tot en met 200 m³/uur
- Het voornoemde punt maakt nauwkeuriger kalibraties voor een breder spectrum van klantvragen mogelijk
- Een vergroot vertrouwen in de kalibratie langs elk van de twee toevoerleidingen naar de weegschaal van de primaire standaard
- Een hoger debiet tot en met 50 m³/uur helpt bij het vinden en reduceren van onzekerheidsorzaken tussen de primaire standaard en de Master Meter stromingsmeters in de LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002)

WP7. Valideren verbeterde meetonzekerheid en onzekerheidsanalyses

Deze fase bestaat uit:

- Het oppakken van het onzekerheidsbudget waarin dominante onzekerheidsbronnen (parasitaire krachten, tijdsonzekerheid en temperatuuronzekerheid) kwantitatief zijn uitgewerkt volgens Guide to the expression of Measurement Uncertainty (GUM)
- Het vaststellen van de mate van verbetering in de meetnauwkeurigheid per onzekerheidsbron in het onzekerheidsbudget
- Het uitwerken van een nieuw onzekerheidsbudget volgens de
WP8. Project management

Het project loopt parallel aan de ontwikkeling en validatie van de LNG mid-scale kalibratie faciliteit (TKIG01033 and TEG0214002). Dezelfde management methode en verantwoordelijkheden worden aangehouden waardoor de uitvoering zo efficiënt mogelijk kan plaatsvinden.

De activiteiten bestaan uit:

Project planning en monitoring
Project voortgangs overleggen
Project voortgangsrapportages opstellen

WP10. Integratie van de primaire standaard in de LNG kalibratie loop

De primaire standaard is oorspronkelijk gebouwd als stand-alone unit met een eigen opslagtank en pomp. De transfer van de herleidbaarheid van de primaire standaard naar de kalibratieloop kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. De master meters in de kalibratieloop kunnen ingebouwd worden in de primaire standaard en na kalibratie teruggeplaatst in de loop. Het in en uitbouwen van flowmeters gaat echter gepaard met installatie-effecten die de meetonzekerheid negatief beïnvloeden. Om de meetonzekerheid te minimaliseren is daarom gekozen om een vaste koppeling te maken tussen de primaire standaard en de kalibratieloop. In dit werkpakket is een herontwerp van de primaire standaard uitgevoerd, inclusief een veiligheidsstudie en de implementatie van de ontwerpaanpassingen. Speciale aandacht is geschonken aan het feit dat de ontwerpdruk van de primaire standaard en de kalibratieloop niet hetzelfde was.

2.5. Resultaten

WP1. Karakterisatie mechanische hysteresis en stijfheidsmatrix flexibel pijpstuk primaire standaard

De karakterisatie van de mechanische hysteresis is vastgelegd in de afstudeerscriptie van T. Eienkel (2017). De karakterisatieresultaten voor het gehele systeem zijn vastgelegd in Schakel et al. (2019). Hiertoe zijn de benodigde metingen in juli 2017 verricht.

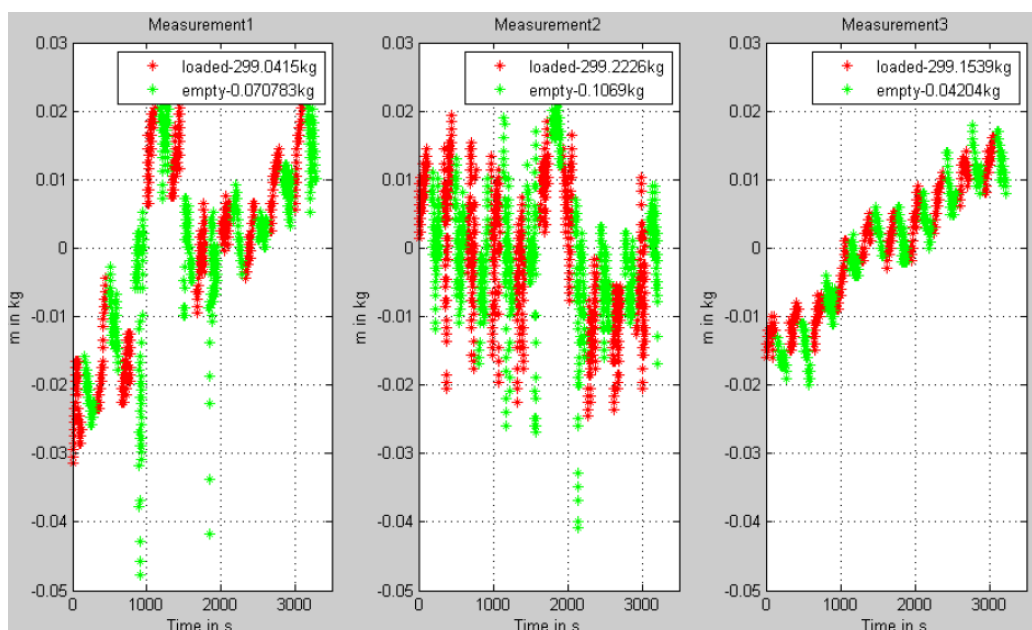
De vereisten voor het parasitaire krachten mitigatiesysteem zijn vastgelegd in de afstudeerscriptie van T. Eienkel (2017).

WP2. Ontwerp parasitaire krachten mitigatiesysteem

Het ontwerp van het parasitaire krachten mitigatiesysteem met bijbehorende tekeningen en overwegingen ten aanzien van de kosten, explosieveiligheid en individuele componenten is vastgelegd in de afstudeerscriptie van T. Eienkel (2017).

WP3. Realisatie prototype parasitaire krachten mitigatiesysteem

De resultaten van het reduceren van de mechanische hysteresis door middel van de aluminium vloerplaat (zie figuur) is vastgelegd in de afstudeerscriptie van T. Eienkel (2017). De redenen voor het selecteren en construeren van de componenten, gegeven de vereisten volgend uit WP1 en WP2, zijn daarin ook vastgelegd. Verder wordt in deze scriptie het elektrisch aanstuuringsmechanisme (Siemens SIMATIC S7 V14) beschreven. Het prototype is uiteindelijk gerealiseerd door het samenvoegen van de individuele componenten in mei en juni 2017.



[Uit Einkenkel (2017)] Voor het installeren van de aluminium vloerplaat vertoonde de weegschaal mechanische hysteresis in de (getarreerde) uitlezing (links) met 300 kg extra belasting (rood) en zonder de extra belasting (groen). Met de vloerplaat werd aanvankelijk nog steeds aanzienlijke mechanische hysteresis waargenomen (midden), welke sterk werd gereduceerd na het fixeren van de vloerplaat (rechts).

WP4. Installatie van systeem in de primaire standaard

De succesvolle installatie van het systeem in de primaire standaard heeft in mei en juni 2017 plaatsgevonden voorafgaand aan de integratie van de primaire standaard in de LNG faciliteit. Vervolgens zijn in juli 2017 de werkprocedures voor het systeem vastgelegd. Als onderdeel hiervan zijn de besturingsparameters geoptimaliseerd.

Als het parasitaire krachten mitigatiesysteem actief is liggen de metingen van de belaste weegschaal (met gewichten tot 300 kg) dichterbij die van de referentiegewichten dan wanneer het systeem niet actief is. Dit is een sterke indicatie dat de beoogde doelen van de ontwikkeling van dit systeem behaald zijn. De stijfheid van de aangekoppelde componenten op het vulvat kan berekend worden uit de testresultaten en deze bleek grofweg in overeenstemming met de onafhankelijke meting van de stijfheid van het flexibel pijpstuk in het kader van WP1. Dit geeft aan dat het flexibel pijpstuk inderdaad een dominante component is in het uitoefenen van parasitaire krachten en dat het plan van aanpak de juiste is gebleken. Deze resultaten bevestigen niet dat dit systeem een significante bijdrage levert aan de verbetering van de meetonzekerheid voor massadebiet. Resultaten zijn vastgelegd in Schakel et al. (2019).

In 2019 is het systeem in gebruik genomen op de site van de LNG kalibratiefaciliteit. Hierbij werden een aantal problemen geconstateerd met betrekking tot de ondersteuning van a) de containervloer ten opzichte van de buitenwereld (Stelcon platen), b) de ondersteuning van de balans ten opzichte van het hierboven ontwikkelde systeem. Hierop is besloten om de ondersteuning van de weegschaal te verbeteren op de volgende manier:

- Directe ondersteuning van de balans op metalen balken die buiten de container zijn afgestempeld op de betonnen Stelconplaten
- Het ertussenuit halen van het bovengenoemde systeem ter compensatie van de inzinking van de balans bij belasting

- Om parasitaire krachten in de vulleiding ten gevolge inzakking weegschaal + tank te voorkomen zijn de door de leverancier aanbevolen rubberen blokken tussen de schaal en krachtopnemers vervangen door aluminium blokken.

De laatste twee stappen zijn niet onherroepelijk maar zijn doorgevoerd om te onderzoeken wat het effect hiervan op de stabiliteit is. De metingen en de bijbehorende onzekerheidsbepaling waarover in WP7 gerapporteerd wordt zijn wel uitgevoerd in deze aangepaste opstelling.

WP5. Reductie tijdsonzekerheid en temperatuuronzekerheid

In de tussentijdse voortgangsrapportage is als alternatief ter reducering van de tijdsonzekerheid het vervangen van de weegtank door een grotere weegtank genoemd. Van deze optie is afgezien om budgettaire redenen. Het is vrijwel zeker dat het implementeren van deze optie tot een significante verbetering van de meetnauwkeurigheid zou leiden.

De timing en het cross-over point van de twee snelle schakelkleppen die het start en stoppunt van de kalibratie bepalen is verbeterd door optimaliseren van de tijdsvertragingen in het stuursysteem. Hierdoor is de meetonzekerheid ten gevolge van de timing marginaal verbeterd. De activiteiten ten gevolge van het bepalen van de tijdsonzekerheid hebben tot de conclusie geleid dat verdere analyse nodig is om deze onzekerheidsbron met voldoende data te kwantificeren. Deze data zal vergaard worden als LNG haar intrede doet in de faciliteit.

In nauwe samenwerking met de industrie partner Endress+Hauser heeft VSL een temperatuursensor ontwikkeld die voldoet aan de volgende eisen:

- Robust onder cryogene omstandigheden
- Tijdige uitlezing ten behoeve van operationele vereisten
- Weinig tot geen beïnvloeding van het stromingsprofiel in de pijpleidingen
- Minimale warmte-inlek
- Ontkoppelbaar ter kalibratie in het laboratorium
- Nauwkeurigheid beter dan 0,2 °C

De temperatuurmeting is door de inzet van deze sensoren op kritische posities in de primaire standaard én de meetstraat van de cryogene mid-scale flowloop aanmerkelijk verbeterd hetgeen meer vertrouwen geeft in de bepaling van correcties ten gevolge van het opwarmen en uitzetten van de cryogene vloeistof tijdens de kalibratie. Op basis van on-site kalibraties van de temperatuursensor is de beoogde nauwkeurigheid van de (gecorrigeerde) meetwaarden behaald met een voorlopige meetonzekerheid die kleiner dan 0,2 °C is.

WP6. Ontwikkeling en realisatie stabiele, cryogene, Coriolis stromingsmeter

De LNG primaire standaard is verbeterd door deugdelijke installatie van vier stabiele cryogene coriolis stromingsmeters langs twee toevoerleidingen. De meters zijn geleverd door twee gerenommeerde industriële partijen op het gebied van cryogene flow bemeting. De deugdelijke werking van de vier Coriolis meters is als volgt vastgesteld:

- Door het vergelijken van twee meters van hetzelfde type langs één meetlijn en het vaststellen dat de relatieve verschillen in de meetwaarden binnen de verwachting liggen voor het gewenste flow debiet.

- Initiële SI-herleidbare kalibraties van de Coriolis meters met vloeibare stikstof tegen de weegschaal in de primaire standaard.

De vier cryogene Coriolis stromingsmeters zijn gebruikt om de werkstandaarden van de Mid-Scale Loop (MSL) te kalibreren, zodat SI-herleidbaarheid voor vloeibare stikstof flow is gerealiseerd voor klantkalibraties. De voorlopige meetonzekerheid van de MSL is ingeschat op 0,30% op massadebiet, zie Schakel, M.D. "Liquid nitrogen calibrations".

WP7. Valideren meetonzekerheid en onzekerheidsanalyses

De totale meetonzekerheid is opgebouwd uit verschillende componenten:

1. stabiliteit indicatie balans vlak voor en vlak na het vullen van de weegtank.

Deze meetonzekerheid is verslechterd ten opzichte van LNG vanwege de beperkte mogelijkheden om vloeibaar stikstof af te koelen tot onder het kookpunt. Bij gebruik van LNG zal deze meetonzekerheid naar verwachting kleiner worden doordat vloeibaar stikstof gebruikt kan worden om de LNG (ruim) onder zijn kookpunt te houden.

2. De onzekerheid in de kalibratiecurve van de balans.

Deze meetonzekerheid is verbeterd door gebruik van een nieuw balans kalibratiesysteem. Dit komt erop neer dat de kalibratie van de balans met behulp van massastukken nu beter vergelijkbaar is met de gelijkmatige verdeling van de vloeistof in de weegtank tijdens het normale kalibratieproces.

De kalibratiecurve van de balans zelf en de hysteresis zijn vergelijkbaar met de resultaten in 2013.

3. De onzekerheid ten gevolge van verplaatst gasvolume tijdens het vullen van de weegtank

In de berekening van de totale meetonzekerheid is ervan uitgegaan dat deze onzekerheidscomponent niet significant is veranderd omdat de gasthermometer ongewijzigd is. De herkalibratie van de gasthermometer heeft echter een significant verschil met het resultaat uit 2013 laten zien dat nog onbegrepen is.

4. Onzekerheid ten gevolge van de bepaling van de start en stoptijd

Deze meetonzekerheid is verbeterd door betere timing van de schakelkleppen.

De activiteiten ten gevolge van het bepalen van de tijdsonzekerheid hebben tot de conclusie geleid dat verdere analyse nodig is om deze onzekerheidsbron met voldoende data te kwantificeren. Deze data zal vergaard worden als LNG haar intrede doet in de faciliteit.

Doordat de dichtheid van vloeibaar stikstof hoger is dan dat van LNG is de bijdrage van de meetonzekerheids-componenten 1 t/m 3 aan de totale meetonzekerheid gereduceerd aangezien een grotere massa geaccumuleerd wordt in hetzelfde volume. De meetonzekerheidscomponent 4 is op een soortgelijke manier verbeterd

door het verlengen van het kalibratieinterval met 10% – 20% voor een gegeven flow rate.

De resultaten van al deze maatregelen tezamen geven aan dat de meetonzekerheid verbeterd kan worden tot een niveau kleiner of gelijk aan 0,10% meetonzekerheid. Bepaalde onzekerheidsbronnen zoals de gasthermometer, de tijdsonzekerheid, en de herhaalbaarheid dienen hiervoor beter gekarakteriseerd te worden door middel van het vergaren van meer data die deze onzekerheidsbronnen kwantificeert. Deze data zal vergaard worden als LNG haar intrede doet in de faciliteit. De voorlopige meetonzekerheid van de MSL is ingeschat op 0,30% op massadebiet, zie Schakel, M.D. "Liquid nitrogen calibrations".

WP8. Project management

Het project heeft deels parallel gelopen aan de ontwikkeling en validatie van de LNG mid-scale kalibratie faciliteit (TKIG01033 and TEG0214002). De afronding en dus ook het managen van het project heeft plaatsgevonden na afronding van bovengenoemde projecten.

WP10. Integratie van de Primaire Standaard in de LNG kalibratieloop

Dit werkpakket was oorspronkelijk niet begroot onder de aanname dat het koppelen van de primaire standaard aan de kalibratieloop geen grote wijzigingen in het ontwerp van de primaire standaard zou vergen. In de ontwerpfase is echter besloten dat het metrologisch gunstiger is om het opwerken van de flowrates al deels in de primaire standaard onder te brengen. Hiertoe is het ontwerp aangepast om ruimte te maken voor extra flowmeters in de primaire standaard. Door de koppeling van de primaire standaard aan de flowloop zijn er ook veiligheidstechnisch extra maatregelen genomen omdat de ontwerpdruk van de twee systemen niet gelijk zijn.

2.6. Discussie

Een groot gedeelte – WP1 t/m WP4 – van het project is naar verwachting afgerond en gedocumenteerd. De doelstellingen zijn overeenkomstig bereikt. Bij WP5 is meer werk verricht dan aanvankelijk beoogd. De vertraging van WP5 (en WP7) is ontstaan doordat aanpassingen in het ontwerp voor het gerelateerde project LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) hebben geleid tot een meer uitgebreid ontwerp van de primaire standaard. Hierbij zijn wel metrologische voordelen gewonnen. WP6 is volledig uitgevoerd. Tijdens de uitvoering van de validatie activiteiten (WP7) zijn nog problemen geobserveerd met betrekking tot de ondersteuning. Deze problemen zijn opgelost.

2.7. Conclusie en aanbevelingen

De resultaten van al deze maatregelen tezamen geven aan dat de meetonzekerheid verbeterd kan worden tot een niveau kleiner of gelijk aan 0,10% meetonzekerheid. Bepaalde onzekerheidsbronnen zoals de gasthermometer, de tijdsonzekerheid, en de herhaalbaarheid dienen hiervoor beter gekarakteriseerd te worden door middel van het vergaren van meer data die deze onzekerheidsbronnen kwantificeert. Deze data zal vergaard worden als LNG haar intrede doet in de faciliteit. De voorlopige

meetonzekerheid van de MSL is ingeschat op 0,30% op massadebiet, zie Schakel, M.D. "Liquid nitrogen calibrations".

Bij gebruik van LNG zal deze meetonzekerheid naar verwachting verbeteren.

De volgende aanbevelingen gelden:

1. Certificering uitvoeren van de weegtank op een hogere dan de actuele werkdruk zodat afkoken van de vloeibare stikstof in de weegtank voorkomen kan worden en de bijbehorende meetonzekerheid kleiner wordt.
2. Aanpassingen aan de weegtank vulleiding opdat de dry break koppeling gebruikt kan worden. Hierdoor kan het effect van parasitaire krachten en de resulterende hysteresis in de balans kalibratie curve mogelijk nog verkleind worden.
3. Verbeteren isolatie van de vulleiding ten behoeve van een constantere temperatuur en dichtheid van de massa die zich tussen de flowmeters en de weegtank bevindt. De hiermee corresponderende correctie en onzekerheid kan hierdoor mogelijk verkleind worden.

3. Uitvoering van het project

- 3.1. De problemen (technisch en organisatorisch) die zich tijdens het project hebben voorgedaan en de wijze waarop deze problemen zijn opgelost

De uitvoering van de projectonderdelen is zoals in de voortgangsrapportage aangegeven vertraagd. In meer detail is de vertraging opgetreden door de volgende oorzaken:

- De eisen die binnen het oorspronkelijke projectvoorstel Primary LNG Mass Flow Standard (dit project) werden gesteld zijn gedurende het project uitgebreid door aanpassingen in het ontwerp voor de installatie van het gerelateerde LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) project en in het ontwerp voor de interactie tussen de twee installaties. Dit heeft extra tijd geleverd voor het aanpassen van het ontwerp van de vernieuwde primaire standaard
- De voornoemde reden moest plaatsvinden binnen een gelimiteerd budget
- Dit project is gemanaged binnen het gerelateerde LNG Calibration Facility project. Dit is een gecompliceerd project door de hoeveelheid betrokken partijen, leveranciers, sponsors, medewerkers en activiteiten. Zie "EINDVERSLAG TKIG01033" voor verdere informatie
- Het vinden van voldoende additionele financieringsbronnen voor het gerelateerde LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) project heeft een vertraagde opstart veroorzaakt waardoor de test- en validatiefase van de primaire standaard moest worden uitgesteld.

Doordat de eisen gesteld binnen het project ten opzichte van het oorspronkelijke voorstel zijn uitgebreid zijn verlengingen aangevraagd en gehonoreerd tot 30-06-2019.

- 3.2. Toelichting op wijzigingen ten opzichte van het aangepaste projectplan

Er is geen sprake van vertraging ten opzichte van het aangepaste projectplan. Door de succesvolle afronding is een primaire standaard opgeleverd die de installatie

beschreven in het LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) project in staat stelt herleidbaar kalibraties van cryogene meters uit te voeren voor klanten vanuit de industrie en op een schaal die interessant is voor de industrie. Zie Schakel, M.D. "Liquid nitrogen calibrations".

3.3. Toelichting op de verschillen tussen de aangepaste begroting en de werkelijk gemaakte kosten

Op totaalniveau zijn er 10% (30 k eur) meer loonkosten gemaakt ten opzichte van de aangepaste begroting. In werkpakket 4 zijn meer uren gemaakt in verband met aanpassingen voor het extra ondersteunen van de balans. In werkpakket 5 zijn fors meer uren gerealiseerd in 2018 doordat vooruitlopend op de uitvoering van de testen met vloeibaar aardgas of stikstof er al een groot aantal testen ter validatie van de standaard zijn uitgevoerd. In werkpakket 7 zijn minder uren gerealiseerd doordat er al voorbereidend werk is geleverd in werkpakket 5. In werkpakket 8 zijn minder uren gerealiseerd doordat het projectmanagement vanaf 2017 op de parallel lopende projecten is gerealiseerd.

Het veranderen van het ontwerp gedurende het project ten behoeve van het verbeteren van de primaire standaard en ter verhoging van de efficiëntie van de interactie tussen de primaire standaard en de LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) heeft extra VSL-uren gevraagd hetgeen verantwoord is in een apart werkpakket 10. Een overzicht van de gerealiseerde uren en kosten per werkpakket wordt gegeven in de financiële rapportage.

3.4. Toelichting wijze van kennisverspreiding

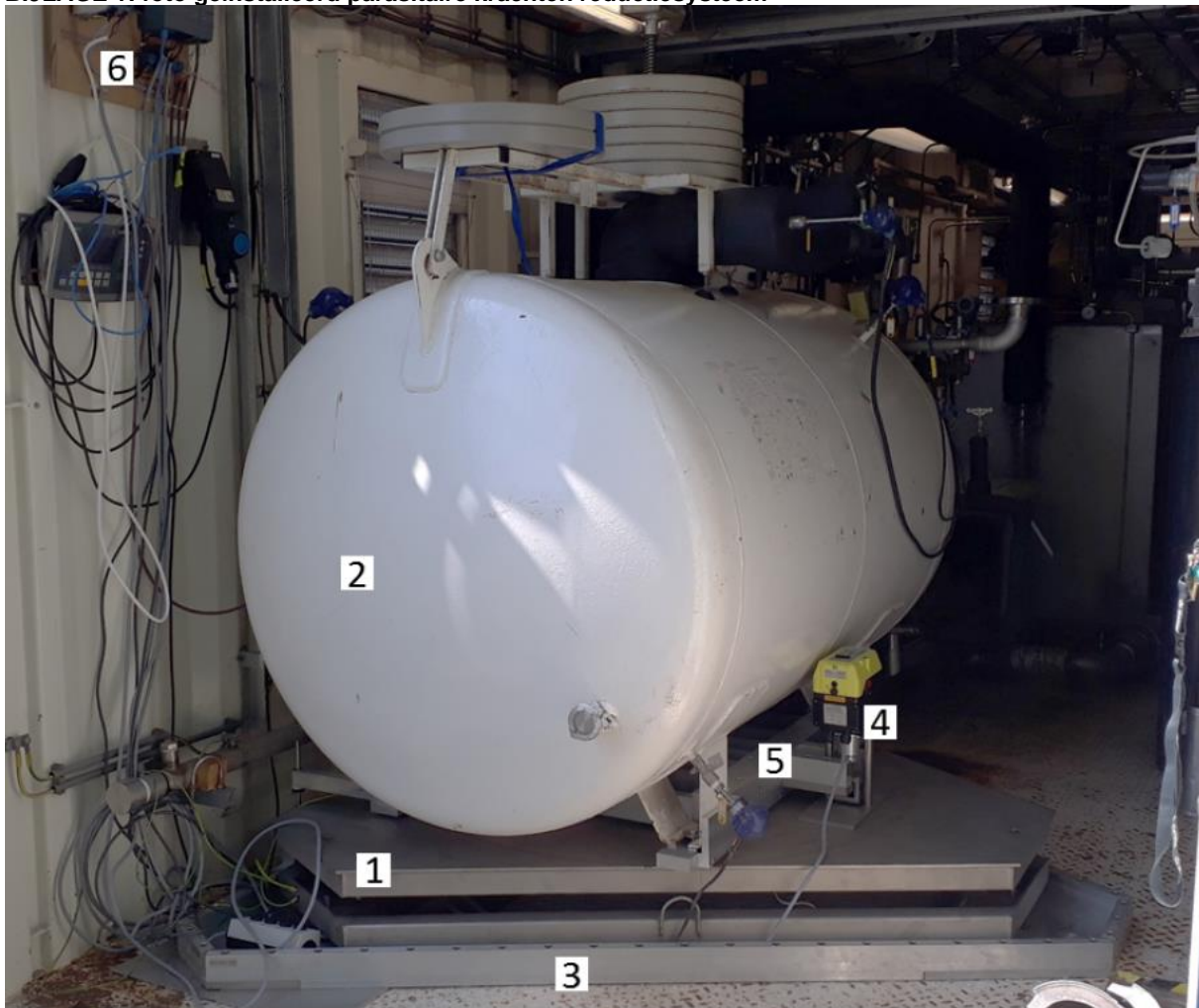
De kennis is middels twee publicaties (T. Einenkel, 2017, Schakel et al. 2019) verspreid. Daarnaast zijn aspecten van het Primary LNG Mass Flow Standard project gepresenteerd tijdens presentaties van het gerelateerde LNG Calibration Facility (TKIG01033 & TEG0214002) project:

| Titel presentatie | Presentatie door | datum | conferentie | plaats |
|---|-------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| LNG test & calibration facility | O. Kerkhof (VSL) | 1-5 juni 2015 | 26th World Gas Conference | Parijs, Frankrijk |
| LNG Calibration Unit | M. Safonova (IMS) | 20-23 oktober 2015 | North Sea flow measurement workshop | Tonsberg, Noorwegen |
| World's first LNG research and calibration facility | P. Lucas (VSL) | 26-29 september 2016 | FLOMEKO | Sydney, Australië |
| State of affairs on world's first LNG test and calibration facility | N. Pelevic (VSL) | 16 juni 2016 | LNG workshop | Teddington, UK |
| LNG Mass flow Standard | D. Parkhi (VSL) | 15 maart 2016 | Nationaal LNG platform | |
| The VSL LNG research and | M. vd Beek (VSL) | 4-5 april 2017 | European Flow Measurement | Noordwijk, Nederland |

| | | | | |
|---|------------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| calibration facility | | | Workshop EFMWS 2017 | |
| Improvements to the primary LNG mass flow standard, | M. Schakel (VSL) | 26-28 June 2019 | Flomeko 2019, P1010. | Lissabon, Portugal |

Overzicht van presentaties waarin aspecten van het het Primary LNG Mass Flow Standard project zijn gepresenteerd

BIJLAGE 1: foto geïnstalleerd parasitaire krachten reductiesysteem



[Uit Rahneberg et al. (voorlopige versie)] Foto van geïnstalleerd parasitaire krachten reductiesysteem rond de primaire standaard. 1: weegschaal, 2: vultank, 3: vloerplaat, 4: actuator, 5: frame waarop de vultank rust, 6: elektrisch aansturingssysteem

Referenties

- Eienkel, T., 2017, *Gravimetric compensation system for LNG calibration*, MSc thesis, Technische Universität Ilmenau.
- ISO/WD 21903 "Refrigerated Hydrocarbon Fluids —Dynamic Measurement — Guidance for the calibration, installation and use of flow meters for LNG and other refrigerated hydrocarbon fluids"
- Schakel, M.D., "Liquid nitrogen calibrations of industry-standard LNG flow meters used in LNG custody transfer," VSL B.V., December 2019. [Online]. Available: https://www.vsl.nl/sites/default/files/rtf/Liquid%20nitrogen%20calibrations%20of%20industry-standard%20LNG%20flow%20meters%20used%20in%20LNG%20custody%20transfer_public.pdf.
- Schakel, M., van der Beek, M.P., Rahneberg, I., Schleichert, J., Eienkel, T., Rogge, N., Fröhlich, T., 2019, Improvements to the primary LNG mass flow standard, Flomeko 2019, P1010. 27 juni 2019
- Van der Beek, M., Lucas, P., Kerkhof, O., Mirzaei, M., Blom, G., 2014, *Results of the evaluation and preliminary validation of a primary LNG mass flow standard*, Metrologia **51**(5), IOP publishing Bureau International des Poids et Mesures, 539-551, doi: 10.1088/0026-1394/51/5/539
- JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, First edition September 2008