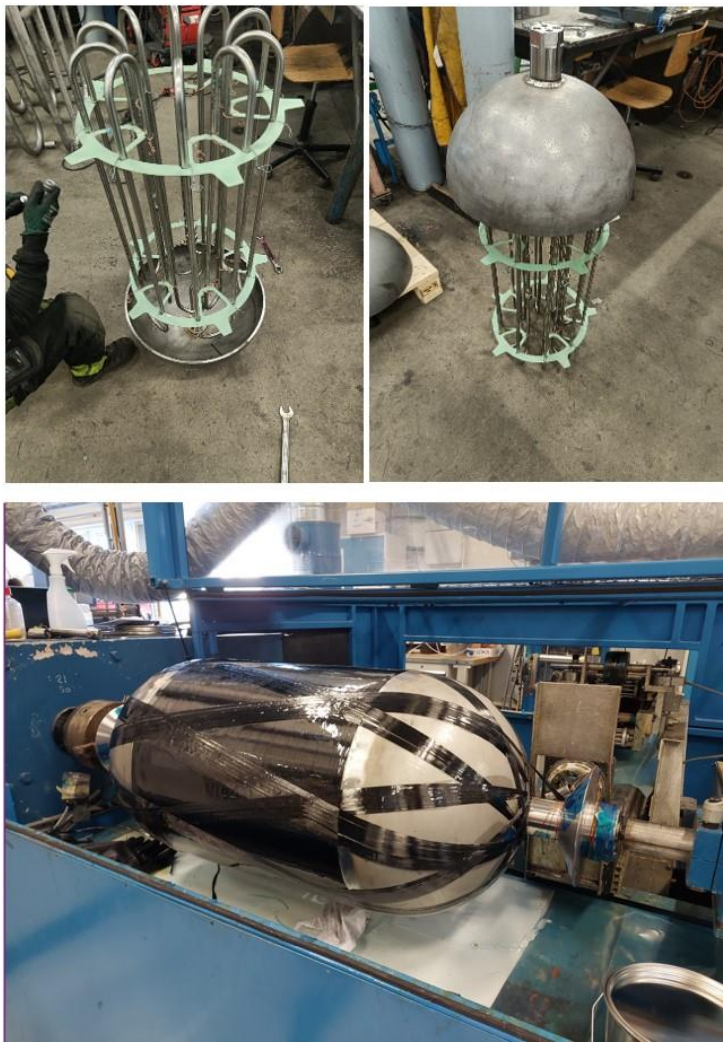
SÄKERHET OCH TRANSPORT

Säker storskalig vätgasbunkring - Test och validering



Mikael Bergius, David Engberg, Stefan Grönkvist (KTH), Kumail Marnate (KTH), Vasiola Zhaka (UU), Björn Samuelsson (UU) & Jonatan Gehandler

RISE Rapport 2024:100

Säker storskalig vätgasbunkring - Test och validering

Mikael Bergius, David Engberg, Stefan Grönkvist (KTH), Kumail Marnate (KTH), Vasiola Zhaka (UU), Björn Samuelsson (UU) & Jonatan Gehandler

KTH=Kungliga Tekniska Högskolan och UU=Uppsala Universitet

Foto framsidan: RISE

This work is licensed under CC BY 4.0

Abstract

Safe large scale hydrogen bunkering - Test and validation

The project investigates the use of green hydrogen as a sustainable fuel for shipping. It focuses on developing and validating a new cylinder design with built-in cooling to handle temperature increases during bunkering. The project aims to validate and analyze this new cylinder design by manufacturing a prototype equipped with heat exchangers and conducting performance tests. The project has been carried out in three stages: prototype development, pressure and safety tests, and performance tests. The prototype tank passed both pressure and performance tests without leaking or visible damage. The cylinder design with built-in heat exchanger was found to be able to limit the temperature rise during hydrogen bunkering, enabling a higher fill rate and safe use. However, there are still open questions regarding a large-scale filling that should be investigated further in future projects to further optimize the process. Among other things, this applies to the influence of a plastic liner or a thinner metal liner, a larger tank volume, larger mass flows and realistic pipe/hose lengths and dimensions between the expansion valve and the tanks on board.

Key words: Compressed hydrogen, bunkering, maritime, cooling

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2024:100
ISBN: 978-91-89971-67-7
Borås 2024

This work is licensed under CC BY 4.0

Innehåll

Abstract **1**
Innehåll **2**
Förord **3**
Sammanfattning **4**
1 Inledning **5**
1.1 Bakgrund 5
1.2 Syfte 6
1.3 Mål 6
1.4 Metod 6
1.4.1 Prototyputveckling i Piteå 6
1.4.2 Tryck- och säkerhetsprovning i Borås 7
1.4.3 Testning och validering med vätgas i Trondheim 7
2 Prototyptanken **8**
2.1 Design 8
2.1.1 Hållfasthets beräkningar 8
2.1.2 Utformning av kylslinga 9
2.1.3 Utformning av genomföring för termoelement 11
2.1.4 Ritning 13
2.2 Tillverkning 13
2.3 Resultat 14
3 Tryck- och säkerhetsprovning **15**
3.1 Flödesmätningen, kylslinga 15
3.2 Provtryckning med vatten, 10 cykler 15
3.3 Statiskt trycktest 16
3.4 Akustisk emissionsmätning 17
4 Prestandatester **18**
4.1 Provuppställning 19
4.2 Genomförda tester 21
5 Analys & Diskussion **23**
5.1 Tester med låga flöden och avvikelser 23
5.2 Termodynamiska modellering av tanken 25
5.3 Tester med höga flöden 26
5.4 Ett storskaligt system: en diskussion 27
6 Slutsatser **29**
7 Referenser **30**

This work is licensed under CC BY 4.0

Förord

Detta är en slutrapport för ett forskningsprojekt finansierat genom Trafikverkets program för forskning och innovation inom sjöfartsområdet, ärendenummer TRV 2023/33491. Projektet har genomförts av RISE Research Institute of Sweden, RISE Fire Research AS, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) och Uppsala Universitet (UU).

This work is licensed under CC BY 4.0

Sammanfattning

Grön vätgas anses av många vara en avgörande pusselbit i sjöfartens omställning till en hållbar framdrift. Dock innebär vätgasens egenskaper en del utmaningar för att kunna användas som ett effektivt och säkert bränsle. När vätgas bunkras, dvs. överförs från ett trycksatt buffertlager via en pipeline och komprimeras i tankarna ombord, ökar temperaturen inne i lagringstankarna ombord i en utsträckning som hotar att äventyra cylindermaterialet (för komposittankar med plastliner, dvs. typ-IV-tankar, eller tankar i enbart komposit) och orsaka läckage. Dessutom gör den högre temperaturen att en mindre mängd vätgas kan fyllas till ett givet maxtryck. För att komma till rätta med detta har ett koncept utvecklats av KTH i ett tidigare projekt där man kyler med havsvatten i ett värmeväxlande system inuti cylindern/lagringstanken, vilket skulle förhindra temperaturhöjningar över den tillåtna gränsen. Projektet syftar till att validera och analysera denna nya cylinderdesign genom att tillverka en prototyptank utrustad med värmeväxlare och genomföra prestandatester.

Projektet har genomförts i tre steg: prototyputveckling, tryck- och säkerhetstester, och prestandatester. Prototyptanken klarade både tryck- och prestandatesteter utan läckage eller synliga skador. Cylinderdesignen med inbyggd värmeväxlare visade sig reducera temperaturökningen vid fyllning av vätgas, vilket möjliggör en högre fyllnadsgrad och säker användning. Det finns dock fortfarande öppna frågor kring en storskalig fyllning som bör undersökas vidare i framtida projekt. Bland annat gäller det påverkan från en plastliner eller tunnare metalliner, en större tankvolym, större massflöden och grövre rör och slangar.

This work is licensed under CC BY 4.0

1 Inledning

Grön vätgas anses av många vara en avgörande pusselbit i sjöfartens omställning till en hållbar framdrift. Dock innebär vätgasens egenskaper en del utmaningar för att kunna användas som ett effektivt och säkert bränsle. Dess höga energitäthet per viktenhet och låga energitäthet per volymenhet innebär utmaningar för operativ räckvidd, bunkring och lagring ombord. Dessa begränsningar utgör ett problem när det gäller storskaliga maritima tillämpningar. Speciellt sett till bunkringen för större fartyg som både har krav på stora bränslevolymer och snabba fyllningstider (till exempel en passagerarfärja med fast tidtabell). När vätgas bunkras (dvs. överförs från ett trycksatt buffertlager via en pipeline och komprimeras i tankarna ombord) ökar temperaturen inne i lagringstankarna ombord i en utsträckning som hotar att äventyra cylindermaterialet (för typ-IV-tankar med plastliner, eller tankar i enbart komposit) och orsaka läckage. För att komma till rätta med detta har ett koncept utvecklats av KTH i ett tidigare projekt där man med hjälp av kylning med havsvatten i ett värmeväxlande system inuti cylindern/lagringstanken förhindrar temperaturhöjningar över den tillåtna gränsen (Samuelsson et al. 2024). I dagsläget är detta koncept enbart en teoretisk modell men om den visar sig vara genomförbar kan denna cylinderdesign erbjuda en energi-effektiv och snabb bunkring av stora volymer, vilket är en nödvändighet om bränslet ska vara gångbart för Ro-Pax-färjor.

1.1 Bakgrund

I Sverige är världens största vätgasdrivna Ro-Pax-färjor för närvarande under utveckling i projektet Gotland Horizon. Detta projekt skulle utgöra ett viktigt steg för vätgasanvändningen i den maritima domänen i stort och bana väg för ett större användning av väte i industrin. Planerna är långt gångna men ett avgörande hinder kvarstår: Hur bunkrar man stora volymer under en begränsad tid på ett säkert och praktiskt sätt? För den maritima sektorn innebär det att 10-25 ton väte ska fyllas på relativt kort tid. När det gäller Gotlandsfärjorna behöver fyllningen av 16 ton göras på mindre än en timme. För närvarande är nästan all tankning av vätgas relaterad till lastbilar och personbilar där den typiska volymen som ska fyllas är mindre än 50 kg. Såvitt vi vet har den befintliga tankstationen med högsta kapacitet, belägen i Tyskland för att trafikera ett vätgaståg, en kapacitet på 400 kg/h. I Hellesylt, Norge, är en första maritim tankstation under uppbyggnad, med en planerad kapacitet på 1000 kg/h.

När vätgas överförs från ett buffertlager till tankar ombord på ett fartyg, bildas värme på grund av Joule-Thompson effekten när vätgasen expanderar efter expansionsventilen och på grund av termodynamikens första lag när den komprimeras i tanken. Det pågående forskningsprojektet Vätgasbaserad färjeverksamhet (Samuelsson) har identifierat gapet mellan nödvändig och befintlig kapacitet inom vätgasfyllning som en av de stora frågorna i vätgasförsörjningssystemet. Hoecke et al. (2020) kom till samma slutsats. Komplexiteten i storskalig bunkring består av flera delar där det termodynamiska problemet är en av dem. I den nyligen avslutade förstudien Storskalig bunkring av väte (Samuelsson et al. 2024) utvecklades en termodynamisk simuleringsmodell över den planerade vätebunkringen av Gotland Horizon. Resultatet visade att temperaturen skulle stiga över det högsta tillåtna, vilket skulle äventyra säkerheten för kompositcylindrar med plastliner (typ-IV), eller tankar i enbart komposit.

This work is licensed under CC BY 4.0

Standardmetoden för tankstationer för vägfordon är att sänka temperatur till -40 °C innan du fyller vätgasen i fordonet (SAE, 2020). Att använda denna metod med de stora volymer som behövs för sjöfartssektorn skulle kräva mycket energi. I förstudien (Samuelsson et al. 2024) utvecklades en metod där kylningen sker inuti cylindern ombord. Metoden utvärderades med hjälp av den termodynamiska simuleringsmodellen av KTH. Resultatet visade att användning av havsvatten i ett värmeväxlingssystem inuti cylindern skulle förhindra att temperaturen stiger över det högsta tillåtna, och att man därmed också får med sig mer vätgas (lägre temperatur ger ett lägre tryck i tanken så att mer vätgas kan fyllas på).

1.2 Syfte

Projektet syftar till att testa och validera denna nya cylinderdesign genom att tillverka en prototyp utrustad med värmeväxlare och genomföra prestandatester över kyleffekten.

1.3 Mål

Målen med detta projekt är att:

1. Tillverka en prototypcylinder utrustad med värmeväxlare.
2. Validera kyleffekten som skulle möjliggöra säker storskalig bunkring av väte, vilket avancerar det från TRL2 till TRL4.
3. Sprida information om lösningen för bunkring av vätgas till industri- och forskningsaktörer.

1.4 Metod

Detta projekt genomföras i tre steg.

1. Prototyputveckling på RISE lab i Piteå
2. Inledande tryck- och säkerhetstester i RISE lab i Borås
3. Prestandatestning vid bunkring av vätgas vid RISE lab i Trondheim.

1.4.1 Prototyputveckling i Piteå

Konceptet som utvecklats av KTH är för närvarande på en låg teknisk beredskapsnivå (TRL 2) och är i behov av designarbete för att utveckla en design som kan tillverkas med önskad funktionalitet. Detta designarbete kommer att utföras av RISE Composite Technology Piteå i ett tätt samarbete med uppfinnarna av konceptet på KTH. Samarbetet ska säkerställa att ingen funktionalitet går förlorad vid användning av material och designlösningar som har god potential att skalas upp både i storlek och produktionsvolym. Den viktigaste aspekten kommer att vara integrationen av värmeväxlaren som är huvudfunktionen som skiljer tanken i detta projekt mot konventionella vätgastankar. Det förväntas krävas flera iterationer mellan designteamet på RISE och uppfinnarna på KTH för att få en bra, ekonomiskt och miljömässigt hållbar lösning. Vätgastanken kommer att vara av typ III vilket innebär att en metallisk liner kommer att lindas över av ett kompositmaterial. Ett metalliskt foder väljs framför ett termoplastiskt foder eftersom det kommer att möjliggöra en skräddarsydd prototypdesign utan att köpa dyra verktyg för tillverkning av ett termoplastfoder, det

This work is licensed under CC BY 4.0

kommer också att möjliggöra enklare integration av värmeväxlare. Fodret, anslutningspunkterna och den integrerade värmeväxlaren kommer att designas internt på RISE med kommersiella CAD-program. Tillverkningen av liners kommer att köpas från tredje part. Parallellt kommer kompositupplägget att dimensioneras med hjälp av simuleringsverktyg speciellt utvecklade för filamentlindning för att motstå tankens designtryck. Innan linern överlindas kommer den att testas för gastäthet för att säkerställa kvaliteten på svetsar och anslutningspunkter. Kompositmaterialet (kol eller glasfiber) kommer sedan att lindas över de tre fodren enligt den beräknade layouten.

1.4.2 Tryck- och säkerhetsprovning i Borås

För att säkerställa säkerheten under testerna i Trondheim, och för att validera prototypdesignen, kommer cylindern från Piteå ovan att trycktestas med vatten i Borås. Nominellt arbetstryck (NWP) hänvisar till det tryck som kännetecknar typisk drift av system. För behållare för komprimerad vätgas är NWP det fastställda trycket för komprimerad gas i en fulltankad behållare eller lagringssystem vid en enhetlig temperatur på 15 °C. NWP är 250 bar. Tanken designas för 2.25·NWP dvs. ~560 bar. Eftersom bara en prototyptank tillverkades kunde inget förstörande prov genomföras. För att säkerställa kylslingans funktion kopplades kranvatten in på kylslingan och tiden att fylla 10 l mättes upp innan och efter proven. En okulär besiktning av tanken genomfördes också innan och efter prov. Tanken provtrycks upp till 1.25·NWP (312.5 bar) under 10 cykler och ett statiskt test över natt. Samtidigt mäts akustiska emissioner (AE) för att upptäcka eventuella sättningar, försvagningar eller skador när tanken trycksätts.

1.4.3 Testning och validering med vätgas i Trondheim

För att validera simuleringarna utförda av KTH kommer cylindern fyllas med väte med önskad flödeshastighet och samtidigt mäta temperaturen i tanken/gasen på olika positioner samt temperaturen på inkommande och utgående kylvatten. Testuppställningen i Trondheim består av en storskalig vätgastank för att förse prototypen med väte. En luftladdad flödesregulator kommer att användas för att reglera det önskade flödet. Tester kommer utföras med och utan kylning för att validera kylslingans effekt.

This work is licensed under CC BY 4.0

2 Prototyptanken

För kompositavdelningen på RISE innebar projektet att ta fram en demonstrator i form av en cylindrisk prototyptank med inbyggda värmeväxlare samt lösningar för att ha möjligheten att spåra de faktiska temperaturerna inuti tankarna under bunkring för att utvärdera konceptets prestanda.

2.1 Design

Konceptet som valts till tankarna är en inre liner i metall som överlindas med armeringsfibrer (kolfiber) som impregneras med polymer. Anledningen till att tanken är av typ-III, dvs metall med överlindning av komposit, är att denna typ av tank har en känd teknik i industrin och som är relativt enkel att få fullt fungerande med låga risker för läckage. Och typen av tank och utveckling av denna var inte fokus för projektet utan fokus låg på det inbyggda kylsystemets funktion.

2.1.1 Hållfasthets beräkningar

Beräkning av tanken utfördes av Erik Marklund på RISE och nedan text är hans initiala beräkningar och uppskattningar:

Initiala beräkningar för den cylindriska delen:

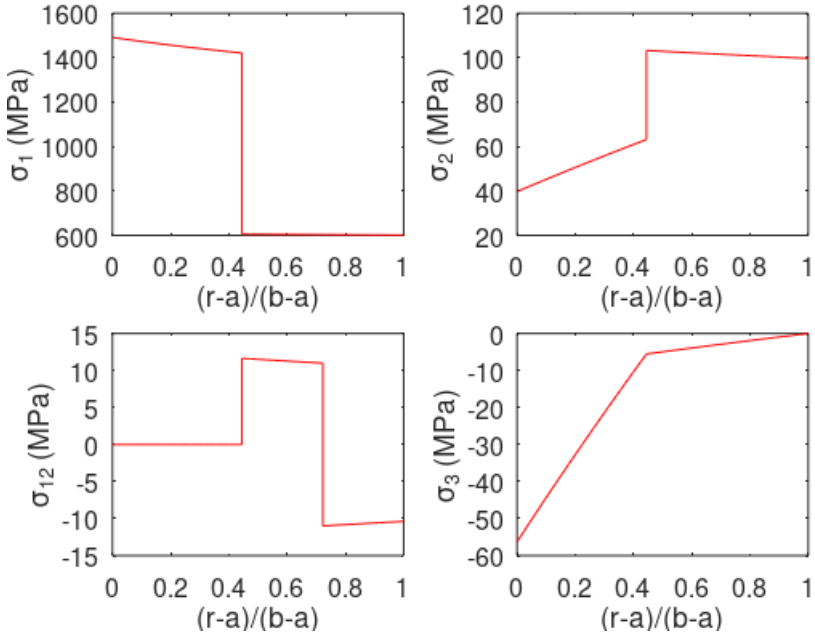
- Material: Liner, 6 mm rostfritt stål 1.4404, overwrap: T700 800 tex / epoxi, antar Vf=55%, och Xt ca 1500 MPa.
- Antar att von Mises flytspänning är 350 MPa för 1.4404 (korrekt?)
- Geometri: Inre diameter 448 mm (yttre diameter på liner 460 mm)
- Burst pressure: 563 bar ”

Det visade sig att detta problem var mer komplext än vad RISE först trodde. Det handlar om ett lastdelningsfall mellan stål-liner och komposit i olika lindningsvinklar. Initialt kommer linern bära stor del av spänningen då den är mycket styvare än kompositen. Flytspänningen i linern uppnås vid relativt låga tryck (om inte kompositen görs galet tjock), dvs det blir inte ett bra utnyttjande av kompositens egenskaper ifall linern inte tillåts plasticera. Vid plasticering kommer spänningen i linern omfördelas till kompositen och ett bättre utnyttjande av kompositens styrka uppnås.

Då vi ännu inte har implementerat en plastisk modell för stålet har vi undersökt 3 olika case:

- Case 1: hur tjock vägg krävs om tanken är helt i stål? Om vi antar att von Mises effektivspänning ej får överstigas, då krävs en väggtjocklek på **40 mm**.
- Case 2: hur tjock vägg krävs om tanken är helt i komposit med optimal lindningsvinkel 55°? Svar **12 mm**.
- Case 3: <u>bortse helt</u> från att linern bär last, linda i ringled och med en bestämd helixvinkel: 90° (14 mm) och ±15° (10 mm), totalt **24 mm**, det ska klara sprängtrycket på 563 bar, se figur med spänningarna nedan.

This work is licensed under CC BY 4.0



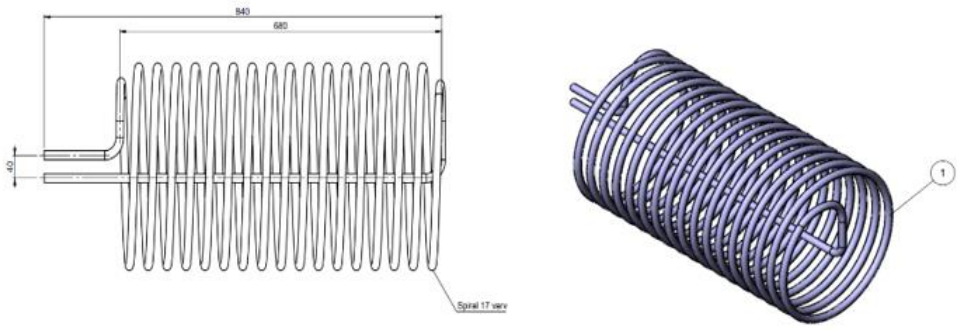
Figur 1 Spänningar i cylindermaterial. X-axeln är normaliserad tjocklek där 0 är insida och 1 utsida. Y-axeln är spänningar (MPa) i lokala koordinater genom rörväggen, σ_1 = i fiberriktningen, σ_2 = tvärs fiberriktning, σ_3 = radiellt genom tjockleken och σ_{12} = skjuvspänning.

Termiska spänningar (restspänningar) från tillverkningen har inte tagits med. Matrissprickor och läckage kommer långt före brott i fibrerna. RISE bedömning är att detta är konservativt för röret, men frågan är hur spänningarna ser ut med liner och hur det blir kring gavlarna. I Slutändan bestämdes överlindningens dimensionering och utformning utifrån beräkningarna ovan samt erfarenhet. Det bestämdes att överlindningen på den cylindriska delen skulle sikta på att uppnå 30 mm tjocklek på manteln. En konsekvens av detta blev då att fiberlindningens tjocklek på gavlarna skulle bli ca 16 mm. Detta uppskattades bli en markant överdimensionering av tanken som i sin tur gav god marginal att kunna hantera det tryck den ska utsättas för.

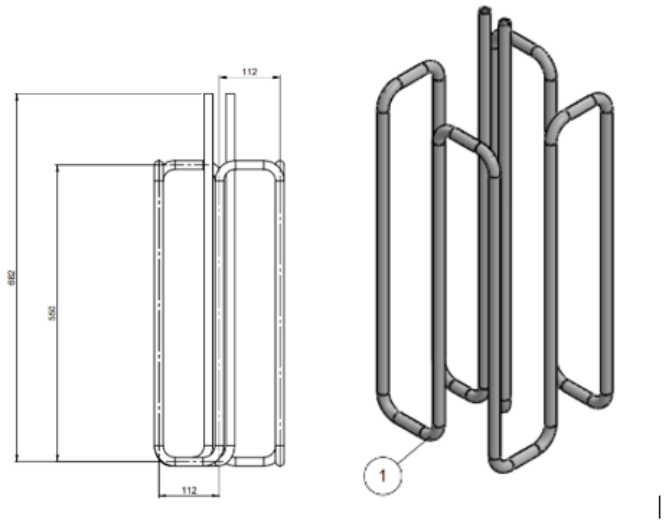
2.1.2 Utformning av kylslinga

Kylslingans utformning diskuterades och ett flertal alternativ övervägdes innan valet till slut blev på ett rörsystem med stödflänsar (Figur 4). Kylslingan designades av RISE och projektgruppen för att på bästa sätt anpassas för projektändamålet, möjliggöra montage och klara de tryck och flöden som krävdes. Man använde även standardkomponenter i största möjliga utsträckning för att hålla hög kvalitet samt låga kostnader.

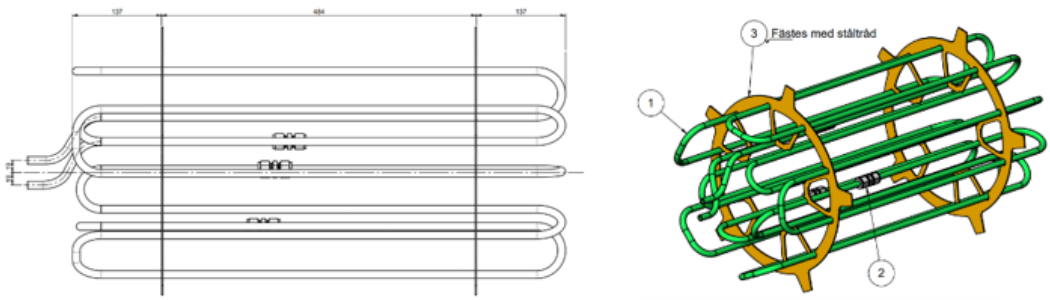
This work is licensed under CC BY 4.0



Figur 2. Konceptskiss nr 1 av kylslinga.



Figur 3. Konceptskiss nr 2 av kylslinga.



Figur 4. Slutligt koncept.

This work is licensed under CC BY 4.0

2.1.3 Utformning av genomföring för termoelement

En utmaning som löstes i projektet var hur genomföringen av stålkablarna till termoelementen skulle lösas och hålla tätt för de temperaturer och framförallt, trycksatt vätgas.

Tätningen består av en nippel ”Swagelock Plug SS-4-P” i stål med en konisk inre öppning där kablarna träs igenom. På andra sidan monteras en täckbricka som är konad för att dras ihop med huset. Denna bricka har fyra små hål för genomföringar av kablarna. När denna bricka monteras så komprimeras tätningen som finns inuti den koniska öppningen så att det sluter tätt. Givarkablarna limmades vid genomföringen med ”Araldite 2012” och kompletterades efter en första provtryckning med ”Sikaflex 111” för att uppnå täthet.

8 termoelement av typen ”Pentronic 20-23101000”, typ K, Ød 1 mm, monterades genom två sådana tätningar i den ena änden av tryckkärlet.

För att säkerställa tätheten av gaveln så provades den genom att gaveln, med termoelementen monterade, monterades i ett speciellt framtaget rör för täthetsprovning. Röret trycksattes med vatten till 80 bars tryck då ett läckage noterades vid givarnas genomföring. Detta åtgärdades genom att man använde ett flexibelt lim ”Sikaflex 111” på genomföringarna. Vid nästa försök uppnåddes 370 bars tryck och man höll det trycket i fem minuter utan att upptäcka spår av läckage och gaveln bedömdes därmed uppfylla kraven.

Figur 5. Genomföringar för de åtta termoelementen.

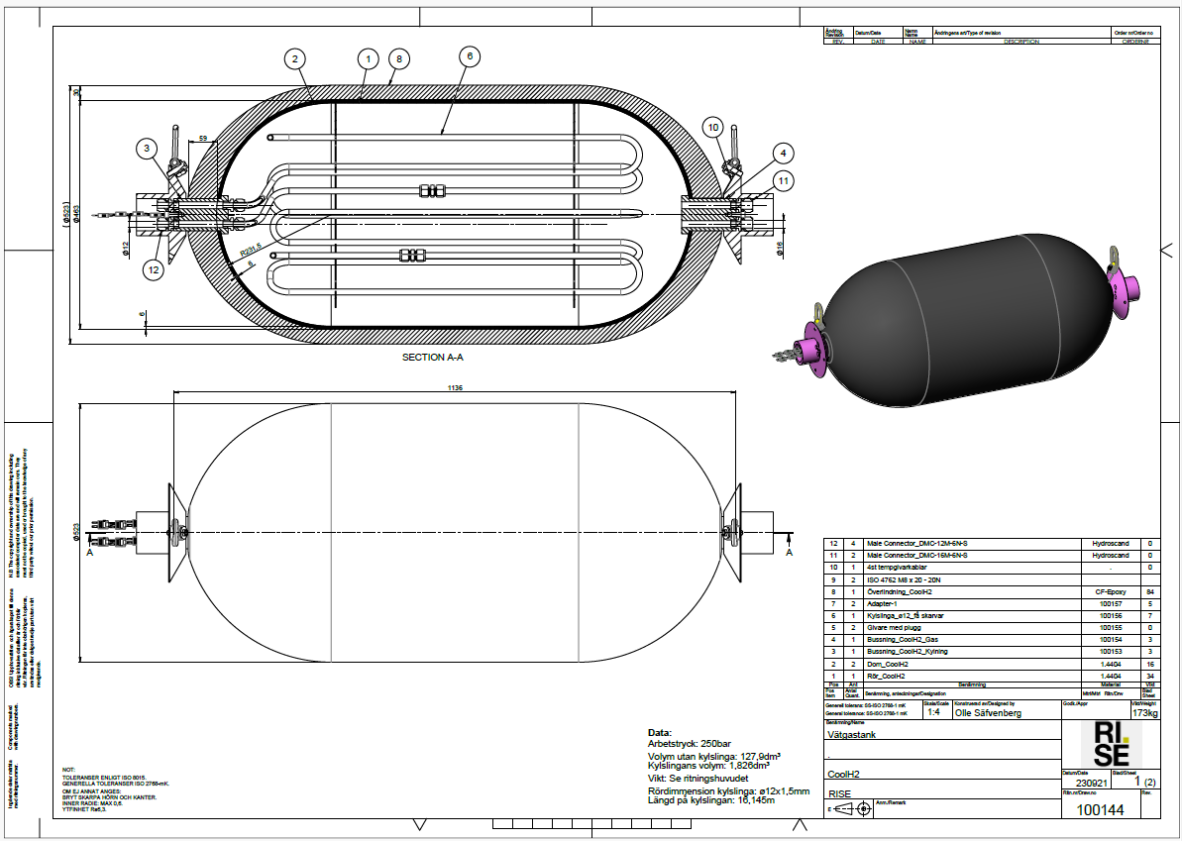
This work is licensed under CC BY 4.0

Figur 6. Genomföring sida 1

Figur 7. Genomföring sida 2

This work is licensed under CC BY 4.0

2.1.4 Ritning



Figur 8. Ritning på komplett tank.

2.2 Tillverkning

Tillverkningen av tanken utfördes av RISE, Buktens stål AB, Nordtool samt IVAB.

Armeringsfiber beställdes från Carbix AB och valet av fiber blev Torays ”T700SC-24K-50C” vilket är en vanligt förekommande fibertyp för tryckkärl i komposit. Valet av polymer blev Araldite LY1564 som kombineras med härdare XB 3403 som beställdes från Biesterfeld AB och är ett hartssystem som RISE har tidigare god erfarenhet från att använda.

Gavlar samt rör designades i materialet rostfritt 1.4404 (ss2348) och beställdes från Buktens stål AB i Kvissleby. Det är ett autentiskt rostfritt, syrafast och lättbearbetat stål. Det är anpassat för skärande bearbetning och har mycket goda korrosionsegenskaper.

Adaptrar beställdes från Nordtool AB och är designade i materialet S355 som är ett lågkolhaltigt konstruktionsstål med god svetsbarhet.

Termoelement beställdes från Pentronic och kopplingar och rör för kylslingan beställdes från Hydroscand.

Ihopsvetsning av gavlar och rör samt montering av kylslingan hanterades av IVAB som har stor vana av certifierad svetsning av tryckkärl och ledningar.

This work is licensed under CC BY 4.0

Figur 9. Överlindning påbörjad.

2.3 Resultat

En prototyptank av typ-III, för lagring av vätgas har tillverkats med interna kylslingor för att under tankning kunna kyla gasen och tanken med vatten för att medge en högre grad av fyllnadsnivå än annars vore möjligt. Både tanken samt kylslingor har trycktestats innan leverans till RISE Borås för vidare provning. Designen av genomföringar har även klarat trycksättningen utan läckage.

Vid projektstart fanns en ambition att tillverka tre prototyper men det reviderades under projektets gång. Det bedömdes ej finnas skäl att prova tanken till brott för att uppnå projektets mål så tillverkning av en prototyp för det ändamålet var ej aktuellt. Det är dock något som eventuellt kommer att utföras för att skapa erfarenhet och kunskap för framtida projekt som arbetar med tryckkärl.

Det bedömdes även att det inte behövdes två separata tankar för att prova utprova prestandan gällande trycksättning och läckage i labskala och att använda en annan tank till de försöken som var kopplade till kylsystemet utan alla dessa funktioner provades på en tank som då fick skickas mellan Piteå, Borås och Trondheim.

Under projektets gång har temperaturkraven på tryckkärl för väte aktualiserats. Hur varma blir dessa vid fyllnad och hur kommer hartsets Tg (glastemperatur, den temperatur då materialet mjuknar vid uppvärmning över denna temperatur) att påverka maximal temperatur? Dessa frågor är öppna frågor som ej till fullo kunnat besvaras inom projektet utan borde vara intressanta områden att studeras för framtida projekt.

This work is licensed under CC BY 4.0

3 Tryck- och säkerhetsprovning

Tryck- och säkerhetsprovning genomfördes av Jure Baric (M.Sc. Mekanik), Andreas Andersson (M.Sc. Materialteknik) och Mathias Flansbjer (Mekanikforskare). Eftersom provtryckningen lika gärna kunde skada den invändiga kylslingan som tankens ytterhölje kontrollerades flödet genom kylslingan innan och efter provtryckningarna.

3.1 Flödesmätningen, kylslinga

I Tabell 1 visas flödesmätningen innan och efter prov. Kylslingan verkar inte ha skadats under tryckprovningen.

Tabell 1 Flödesmätning innan och efter prov.

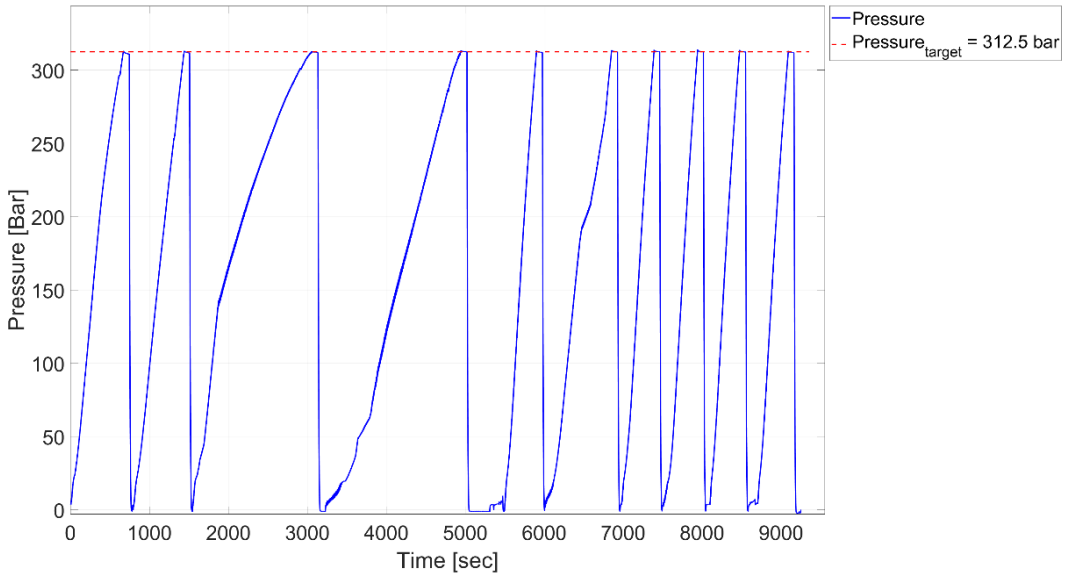
Mätning:	**Tid [s] (före)**	**Time [s] (efter)**
#1	38.1	38.1
#2	38.6	38.5
#3	38.5	38.2
Medel:	**38.4**	**38.3**

3.2 Provtryckning med vatten, 10 cykler

Cyklisk provtryckning (0 - 312,5 bar, manuell styrning) med hålltid > 1 minut vid maximalt tryck (≈312,5 bar) och 10 provcykler genomfördes enligt försöksuppställningen i Figur 10 och med resultat i Figur 11.

Figur 10 Test set up.

This work is licensed under CC BY 4.0

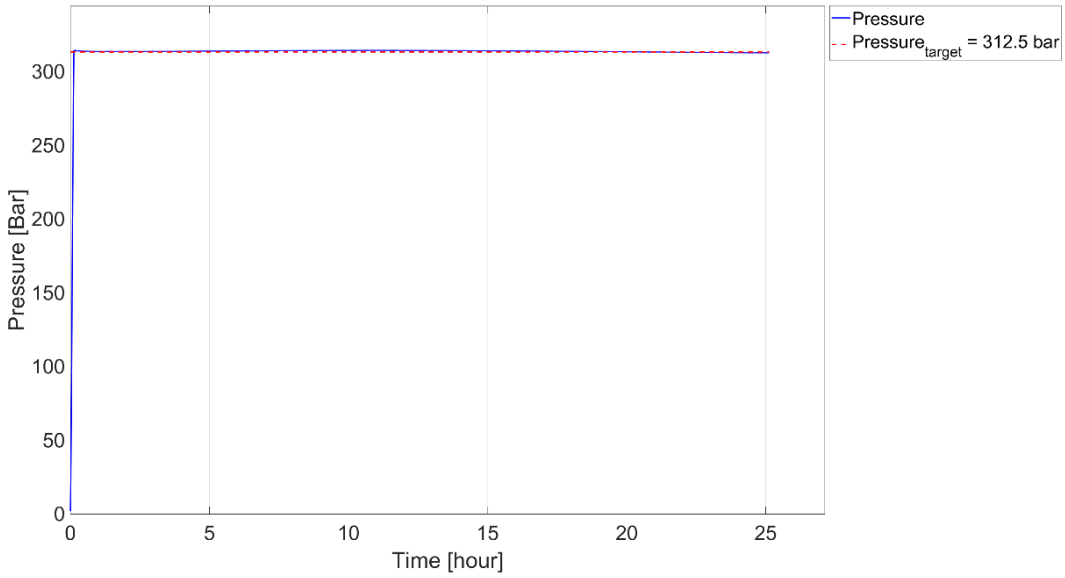


Figur 11 cyklisk provtryckning med vatten.

Anledningen till att grafen vid ca 1500 – 5000 s i Figur 11 avviker beror inte på testobjektet, utan på prestandan hos pumpen som används för att bygga upp trycket. Trycket var stabilt under hålltiden. Inga synliga skador kunde ses visuellt på tanken.

3.3 Statiskt trycktest

Trycket ökades till 312.5 bar och upprätthölls statiskt i 25 timmar. Den statiska tryckkurvan kan ses i Figur 12. Trycket var stabilt under testet. Inget vattenläckage eller med ögat synliga skador kunde detekteras efter provet.

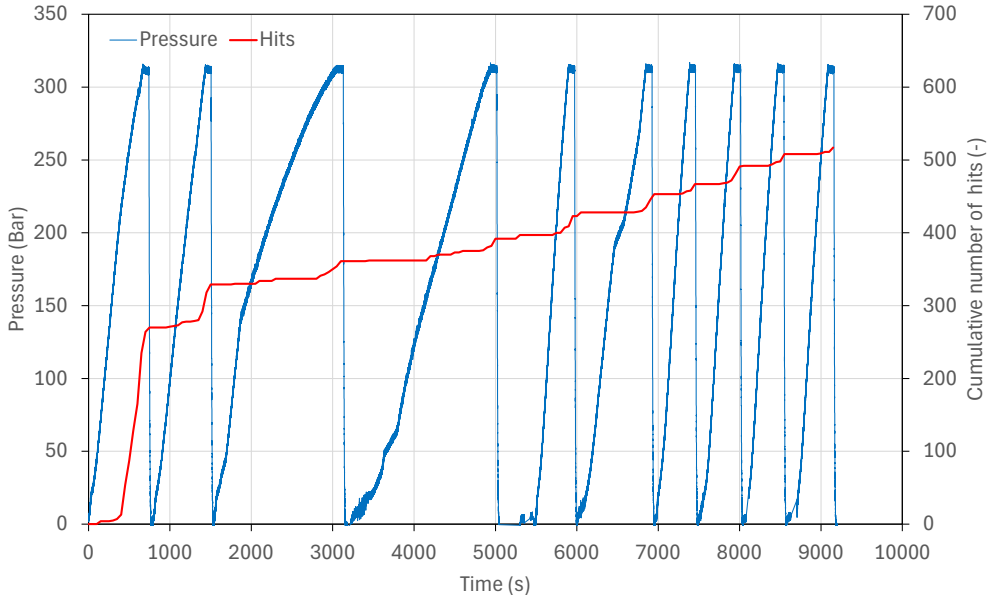


Figur 12 Statisk provtryckning.

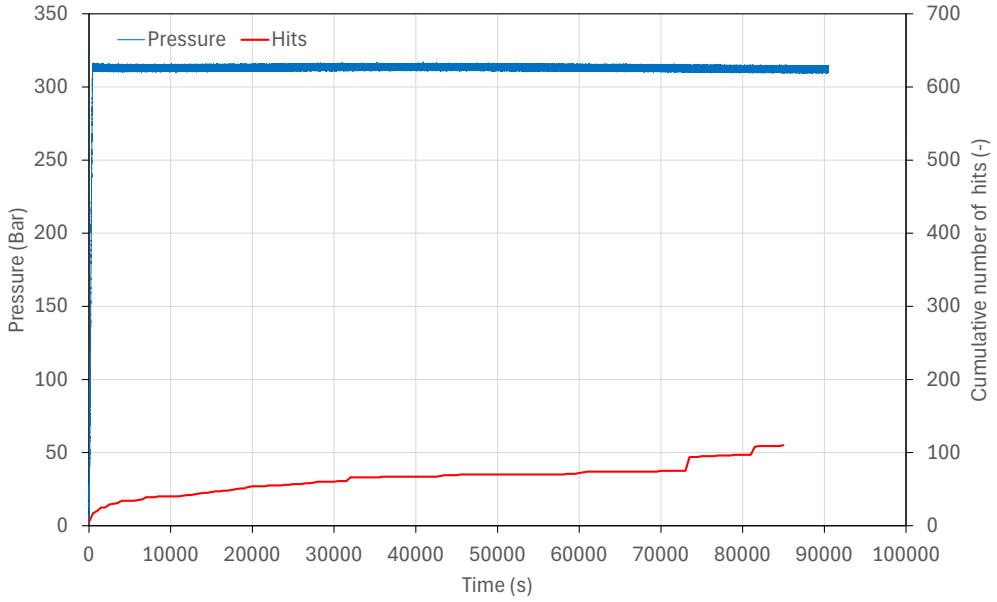
This work is licensed under CC BY 4.0

3.4 Akustisk emissionsmätning

Mätningen av akustiska emissioner (AE) var begränsad till identifiering av AE-träffaktivitet och ingen lokalisering gjordes. Trycket och det kumulativa antalet träffar under den cykliska belastningen visas i Figur 13 och för långtidsbelastningen i Figur 14. Den totala AE-aktiviteten, representerad som antal träffar, är relativt liten under båda laddningsfallen. Mest aktivitet sker under den första laddningscykeln och mindre under de efterföljande cyklerna, vilket indikerar en stabil process.



Figur 13 Trycket och det kumulativa antalet träffar under den cykliska belastningen.



Figur 14 Trycket och det kumulativa antalet träffar under långtidsbelastningen.

This work is licensed under CC BY 4.0

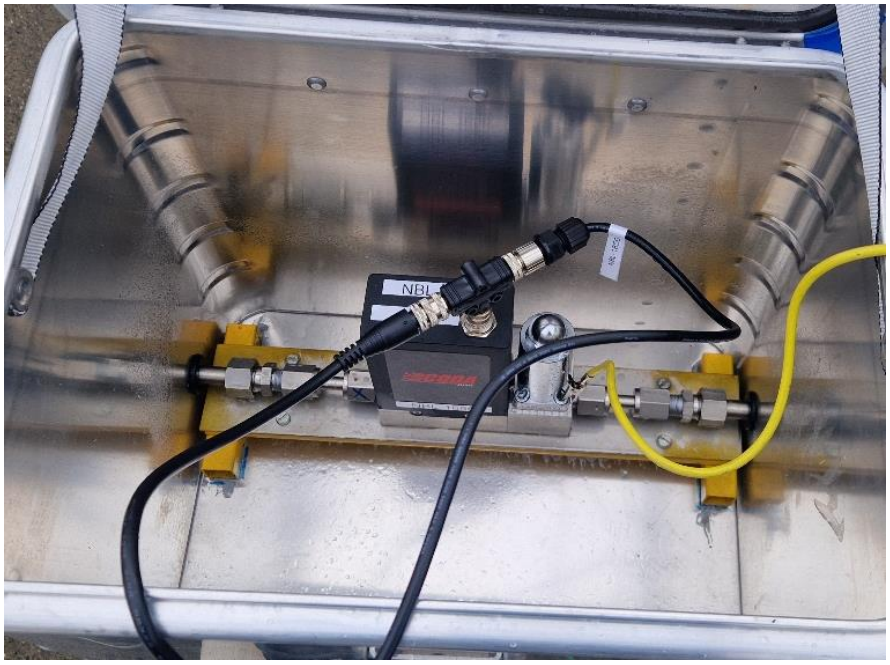
4 Prestandatester

Prestandatesterna genomfördes utomhus på RISE Fire Research område i Trondheim, se Figur 15, Figur 16, Figur 17, och Figur 18.

Figur 15 Bufferttanken (för komprimerad vätgas) vid installationstillfället.

Figur 16 Huvudstyrningsventil, avluftningsventil och tryckregulator, vätgas.

This work is licensed under CC BY 4.0



Figur 17 Massflödesmätare, vätgas.

Figur 18 Testuppställning med tank, vätgasrör, kylvatten och mätkablar.

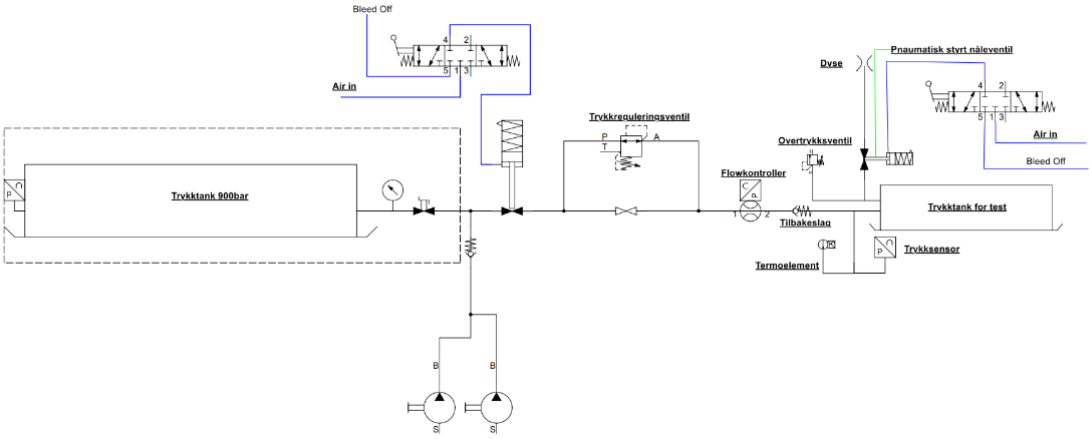
4.1 Provuppställning

Följande utrustning användes, se också Figur 19 nedan,

- Bufferttank. 900 bar
- Tryckregleringsventil, satt på 250 bar
- Flödeskontroll, satt till 0,55 g/s eller 0,83 g/s beroende på test
- Backventil, av säkerhetsskäl
- Termoelement och tryckmätare, precis innan provtank
- Provtank, 250 bar

This work is licensed under CC BY 4.0

- Övertrycksventil, av säkerhetsskäl
- Ventil, för tömning av tank efter test



Figur 19 Schematisk uppställning av testutrustning använt under testserien.

Placeringen av termoelement (syns inte i Figur 19):

- Termoelement (typ K) på kylvatten före och efter provtank
- Termoelement (typ K) för att mäta omgivande temperatur
- Termoelement (typ K) för att mäta gastemperaturen inne i bufferttank

En tryckmätare på kylvatten före provtank.

This work is licensed under CC BY 4.0

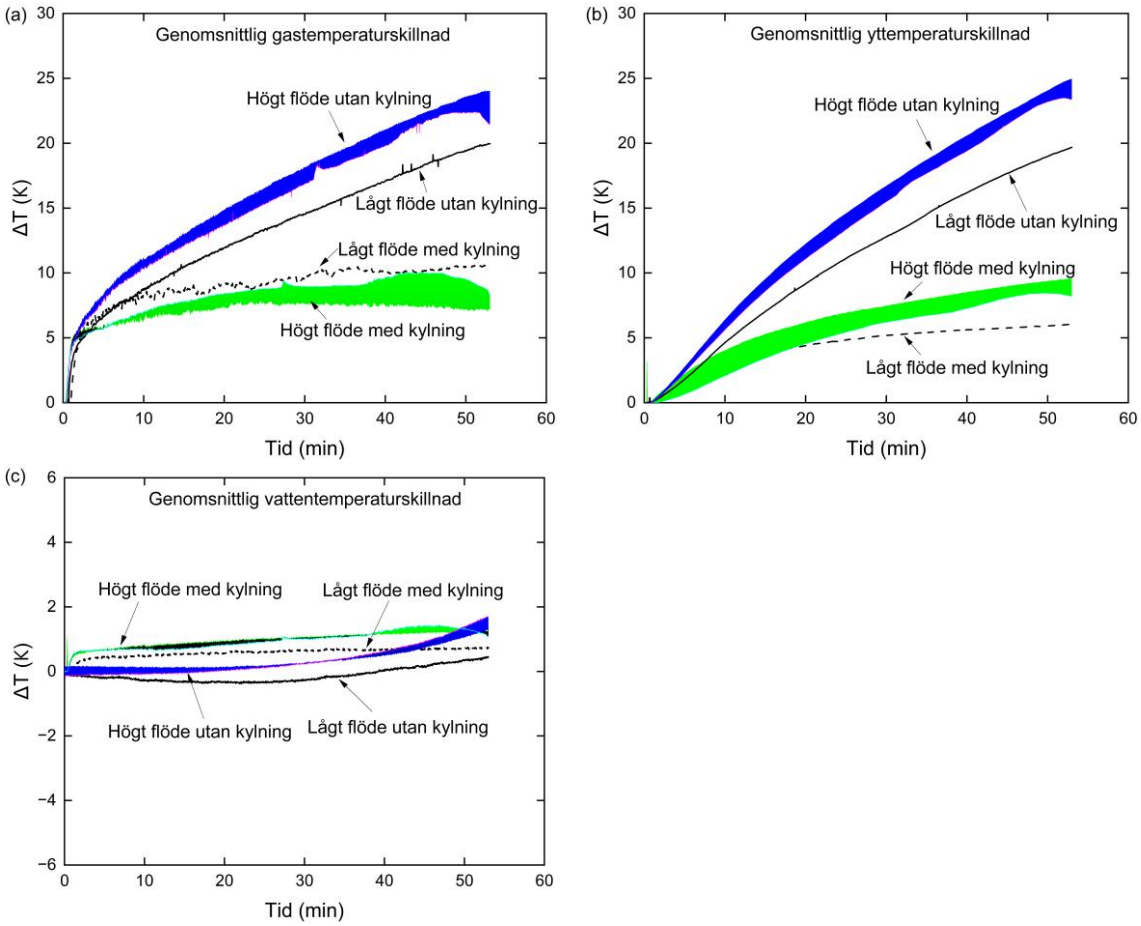
4.2 Genomförda tester

Totalt genomfördes 6 tester där prototyptanken fylldes med vätgas, varav två var upprepningar. Testerna varierades mellan att testa med ett ”lågt” (0,55 g/s) och ”högt” (0,83 g/s) flöde på vätgasen, och med eller utan flöde på kylvattnet, se Tabell 2.

Tabell 2 Sammanställning av genomförda tester

Test-ID	Testbeskrivning	Massflöde (g/s)	Flöde, kylvatten (l/min)	Medeltemperatur på gas i tank vid provstart (°C)	Medeltemperatur i ytan mellan stål och komposit vid provstart (°C)	Omgivningstemperatur vid provstart (°C)
T01	Lågt flöde med kylning	0,55	5-6	8,3	8,2	9,3
T02	Högt flöde med kylning	0,83	5-6	8,3	8,3	8,5
T03	Lågt flöde utan kylning	0,55	0	8,8	10,0	10,1
T04	Högt flöde utan kylning	0,83	0	2,8	3,1	4,0
T05	Högt flöde med kylning (upprepning av T02)	0,83	5-6	4,5	9,3	4,3
T06	Högt flöde utan kylning (upprepning av T04)	0,83	0	5,1	6,0	4,8

This work is licensed under CC BY 4.0



Figur 20 Genomsnittlig temperaturskillnaden i vätgasen inne i provtanken (a), på ytan mellan stål och komposit (b) och i kylvattnet (c) från testerna, vid hög och låg gasflödeshastighet och med/utan vattenkylning.

Figur 20 visar den genomsnittliga temperaturskillnaden i vätgasen inne i provtanken, på gränsytan mellan stål och komposit samt i kylvattnet under testerna, vid både hög och låg gasflödeshastighet och med respektive utan vattenkylning.

För tester med hög gasflödeshastighet upprepades varje test en gång. Resultaten presenteras som områden markerade med blått (utan vattenkylning) och grönt (med vattenkylning). För tester med låg gasflödeshastighet visas resultaten utan vattenkylning med heldragen linje och med vattenkylning med streckad linje.

En tydlig skillnad i temperaturökning observerades mellan tester med och utan vattenkylning. Vid vattenkylning reducerades den genomsnittliga temperaturskillnaden i både gasen och på ytan till under 10 K. Utan vattenkylning kunde däremot temperaturskillnaden nå upp till 25 K, med en större ökning vid hög gasflödeshastighet jämfört med låg, både för gasens och ytans temperatur.

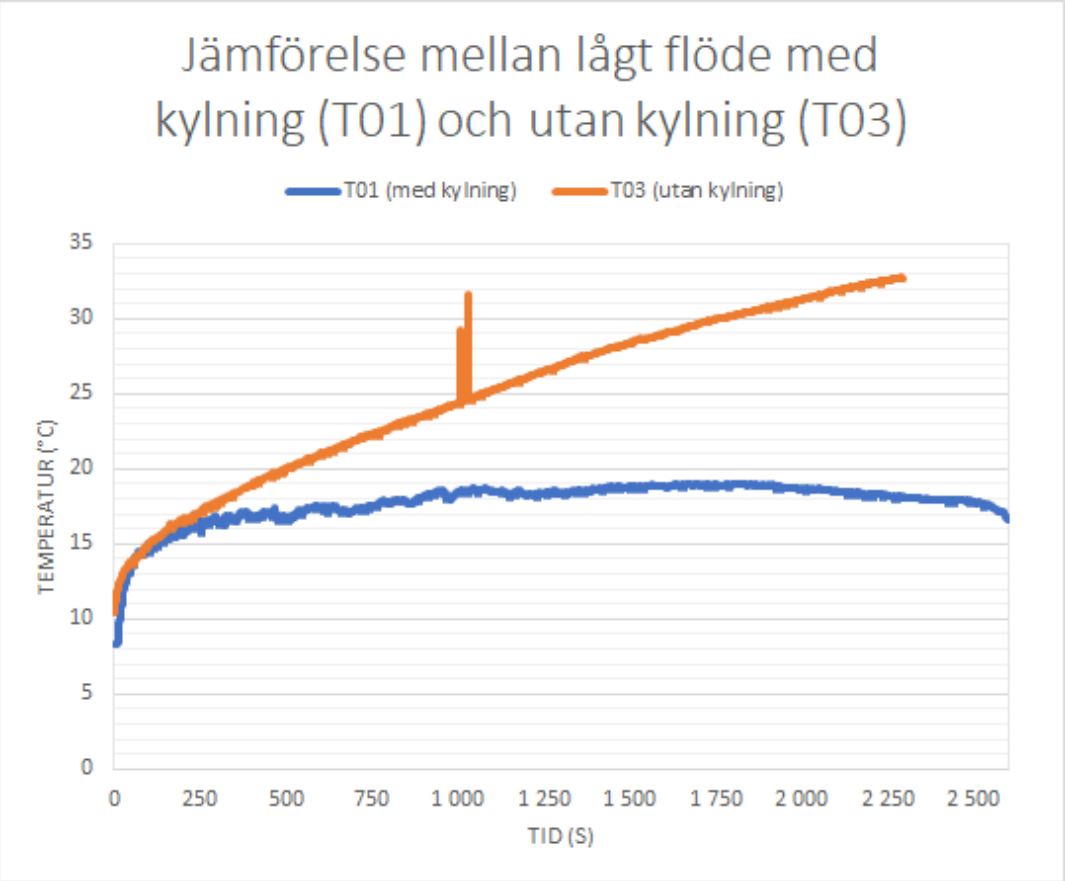
This work is licensed under CC BY 4.0

5 Analys & Diskussion

Som nämnts genomfördes fyra olika tester, där två av de mest kritiska (med höga flöden) upprepades, vilket ger totalt sex tester. Tabell 2 visar test-ID med beskrivningar. Test-ID kommer användas i detta avsnitt för att hänvisa till respektive test.

5.1 Tester med låga flöden och avvikelser

I Figur 21 nedan visas hur kylningen påverkar temperaturutvecklingen i tanken vid fyllning med låga flöden. Den initiala responsen är likadan i båda fallen för T01 och T03, där Joule-Thomson effekten syns genom en kraftig temperaturökning, samtidigt som kylningen är begränsad initialt på grund av de låga temperaturdifferenserna. Denna effekt minskar över tid eftersom tryckskillnaden över ventilen minskar. För T03 ökar temperaturen sedan stadigt när vätgasen fortsätter att fylla tanken. I T01, där kylning används, kontrolleras däremot temperaturen och den slutliga temperaturen är betydligt lägre jämfört med T03. Eftersom testerna utfördes med ett sluttryck på 250 bar, tar fyllningen i T01 något längre tid då den lägre temperaturen håller trycket i tanken något lägre. Detta är en fördel med kylsystemet eftersom mer vätgas då kan fyllas under säkra förhållanden. Notera att det finns två punkter med temperaturspikar i T03, vilket anses vara orsakat av signalfel i termoelementen.

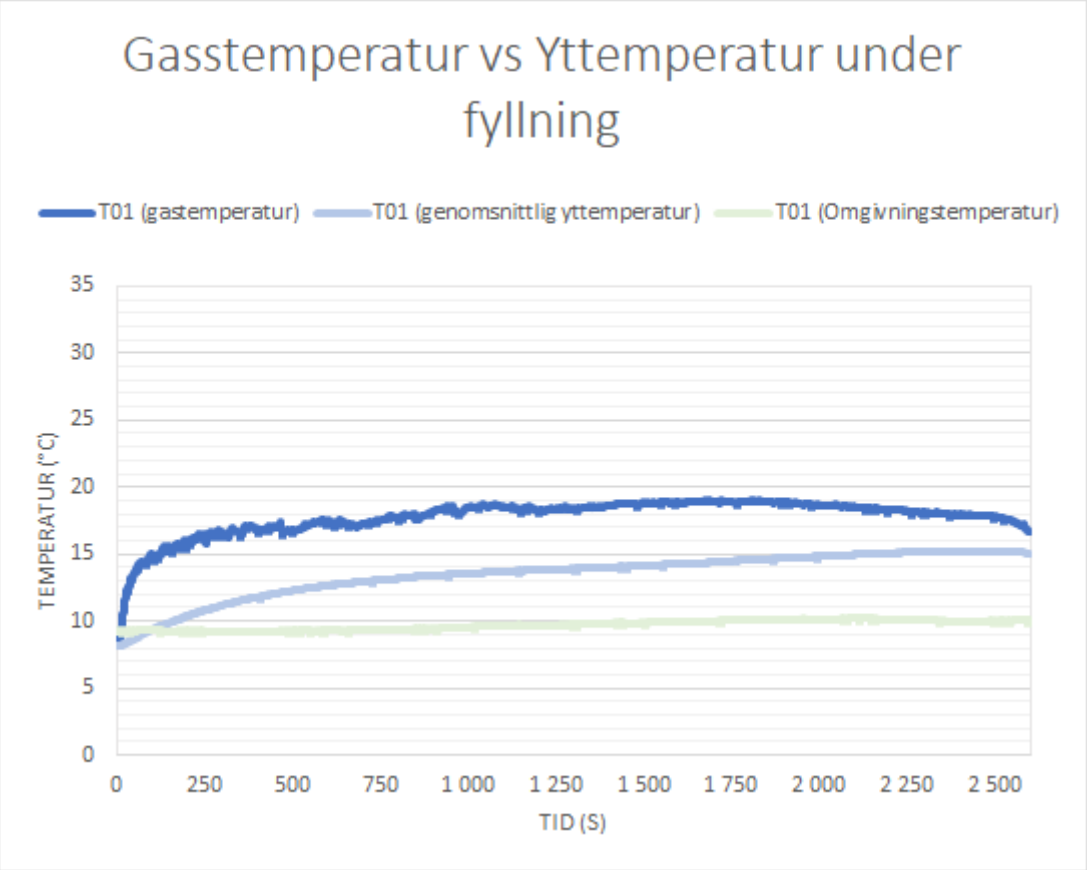


Figur 21 Jämförelse av temperaturökning vid lågt flöde med kylning (T01) och utan kylning (T03) vid fyllning med väte.

This work is licensed under CC BY 4.0

En direkt jämförelse med den termodynamiska modellen utvecklad på KTH av Samuelsson et al. (2024) kan vara missvisande, eftersom modellen omfattar en adiabatisk modell som inte tar hänsyn till: (i) värmeöverföring från tanken till atmosfären, (ii) värme som absorberas i tankmaterialet, och (iii) kylningen av Joule-Thompson värmen i röret efter expansionsventilen innan vätgasen kommer in i tanken. Dessa extra kylningseffekter, särskilt från (ii) och (iii), har varit betydande under alla utförda tester.

De kommersiella typ-III-cylindrarna för vätgas är tillverkade med tunna metalliner som huvudsakligen används som en permeationsbarriär snarare än ett tryckbärande material. I det här fallet gjordes denna unika typ-III-tank betydligt tjockare av säkerhetsskäl. Detta innebär att materialet absorberar mer värme (ii) än vad som skulle ske i de kommersiella typ-III cylindrarna. Det är också något som inte beaktas alls i den adiabatiska modellen i Samuelsson et al. (2024). Detta kan ses i Figur 22 nedan där den genomsnittliga yttemperaturen på stållinerns utsida också ökar under fyllningen, vilket visar att värme absorberas av materialet.



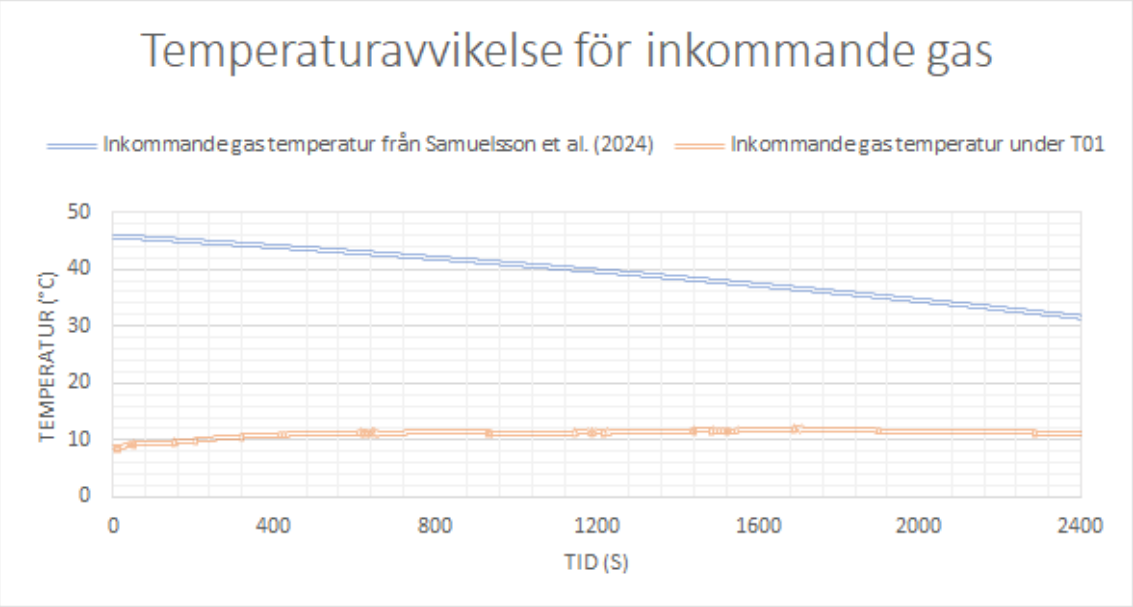
Figur 22 Jämförelse av gastemperatur och yttemperatur på stålets utsida under Fyllningsprocessen.

Dessutom kommer en oönskad kylningseffekt[1] längs röret som leder vätgasen från expansionsventilen till tanken (iii). eftersom testerna sker utomhus under en kall och regnig dag i norra Norge. Figur 23 nedan visar den markanta effekten av kylningen längs röret till tanken. Den adiabatiska modellen i Samuelsson et al. (2024) antar att inkommande temperatur till tanken är samma som den efter den isentalpiska expansionsventilen (dvs. ingen värmeförlust). Värme från Joule-Thompson effekten

[1] Den här kylningseffekten är oönskad i det här fallet, där jämförelsen görs med en adiabatisk modell. I verkligheten kommer denna kylning underlätta fyllningsprocessen.

This work is licensed under CC BY 4.0

minskar över tid när tanken fylls och tryckskillnaden över ventilen minskar. Den adiabatiska modellen antar också att bufferttanken är tillräckligt stor och har samma tryck genom hela processen. I verkligheten kyls dock gasen både av den långa rörledningen mellan ventilen och tanken (som kyls av omgivningen och regnet), och av tryckminskningen i bufferttanken. Dessa effekter är svåra att modellera.

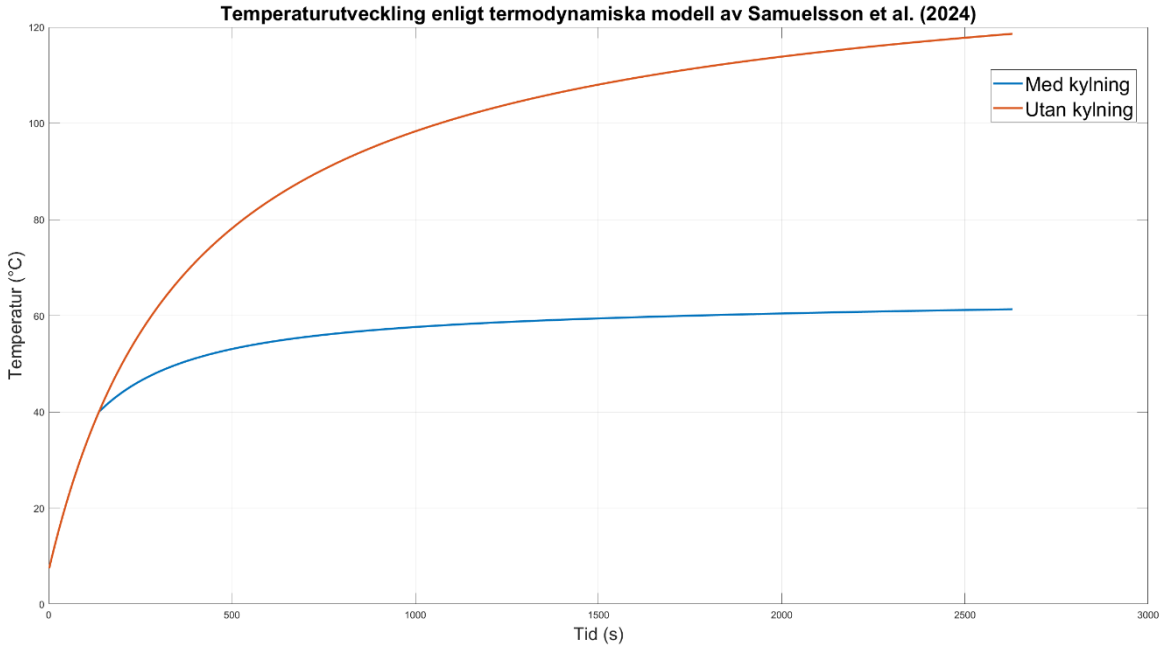


Figur 23 Jämförelse av adiabatisk inkommande gastemperatur och den som erhölls i T01.

5.2 Termodynamiska modellering av tanken

Trots dessa avvikelser modellerades fyllningsprocessen för den tank som designades och tillverkades i detta projekt genom att justera parametrarna i Samuelsson et al. (2024), vilket visas i Figur 24 nedan. Kylslingan i modellen antogs vara ett rör med en längd på 16,145 m, en ytterdiameter på 12 mm och en tjocklek på 1,5 mm. En total värmeöverföringskoefficient på 20 W/m²-K användes för modellering. Andra parametrar, såsom omgivningstemperatur, initialt tryck och reservoartryck, justerades för att reflektera de verkliga förhållandena. Dock modellerades inte de avvikelser som diskuterats tidigare, utan den adiabatiska modellen betraktas.

This work is licensed under CC BY 4.0



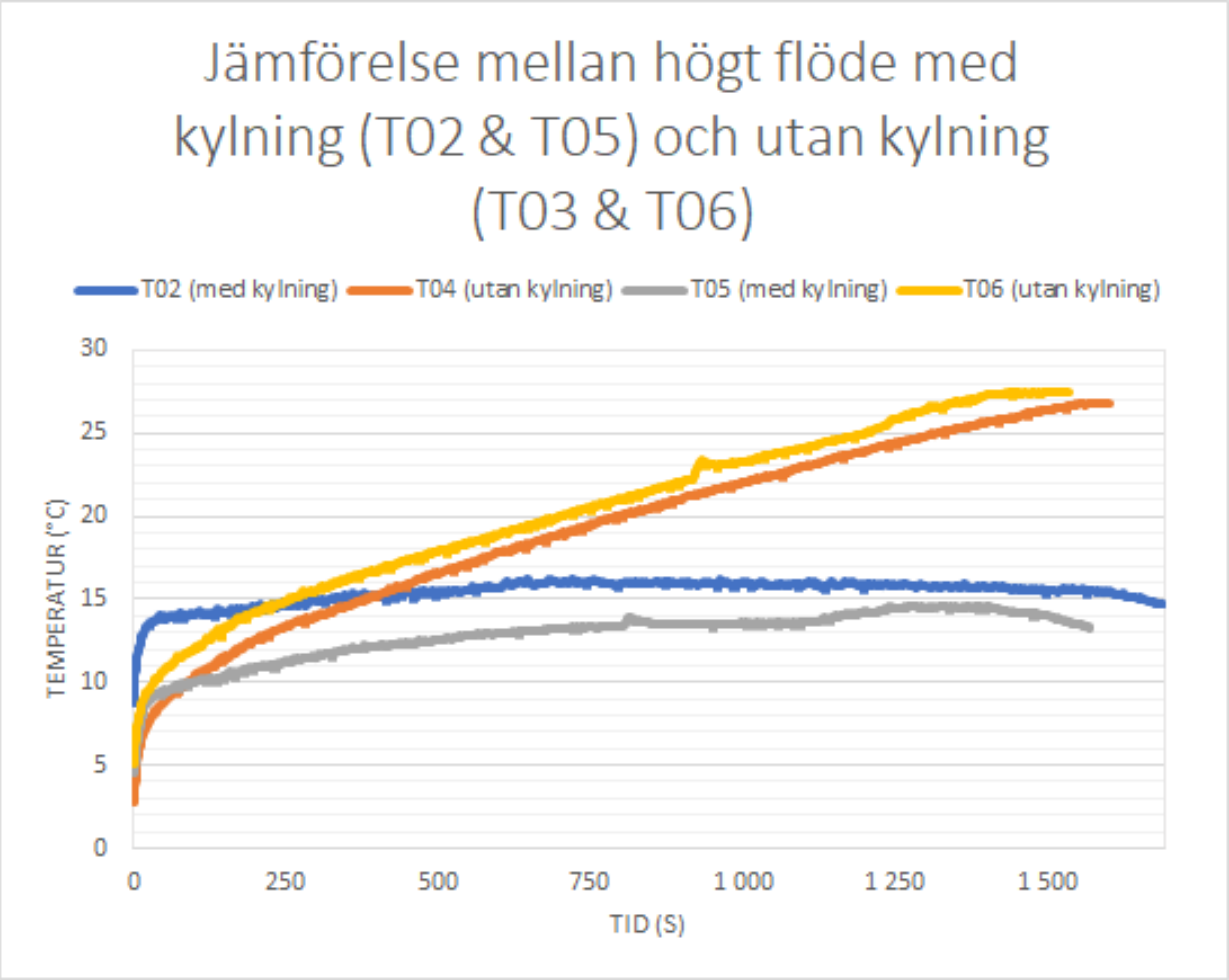
Figur 24 Temperaturutveckling enligt termodynamisk modell av Samuelsson et al. (2024).

Som förväntat ger modellen högre temperaturer jämfört med de genomförda testerna, på grund av de tre effekterna som diskuterats tidigare. Joule-Thomson effekten är mest tydlig i början av fyllningsprocessen, medan de andra effekterna - kylning av vätgasen längs röret till tanken och värmeabsorptionen av tankmaterialet – sker mer gradvis. Effekten av aktiv kylning med sjövatten i kylslingan visar dock ett liknande mönster i både modellen och testerna, vilket indikerar att detta koncept kan vara en effektiv metod för bunkring av vätgas på fartyg. Modellen inkluderar också ett värmeväxlings-ΔT_{min} på 20 °C, vilket innebär att kylningen börjar först när denna temperaturskillnad uppnås. I de genomförda testerna, däremot, börjar kylningen så snart temperaturskillnaden mellan gasen och kylvattnet överstiger 0 °C. Detta är anledningen till att avvikelsen mellan testet med kylning och testet utan kylning uppstår tidigare i testerna än i modellen.

5.3 Tester med höga flöden

På liknande sätt genomfördes fyra tester med höga flöden (0,83 gram/s): två med kylning och två utan kylning. En jämförelse mellan dem gjordes i figuren Z nedan. Ett liknande beteende observerades som vid testerna med låga flöden. Eftersom temperaturerna hölls under kontroll, noterades inga betydande faror under fyllningen.

This work is licensed under CC BY 4.0



Figur 25 Jämförelse mellan högt flöde med kylning (T02 & T05) och utan kylning (T03 & T06)

En sak som också observerades här, och som också var förväntad, är att omgivningstemperaturen kan påverka temperaturutvecklingen. Av de fyra testerna med höga flöden hade T02 en högre omgivningstemperatur (cirka 8,5 °C). Det kan också ses som den initiala temperaturen i början för varje test. Jämförelsevis genomfördes testerna T04, T05, och T06 alla vid kalla omgivningstemperaturer (mellan 4-5 °C). Effekten kan observeras i skillnaden mellan T02 och T05. Dock ligger temperaturerna i samma intervall eftersom kylning används i båda fallen.
Den kallare omgivningstemperaturen för T04 och T06 (utan kylning) bidrar också till att temperaturen i slutet av fyllningen är lägre än för T03 (lågt flöde utan kylning), trots att massflödet är högre. Detta är rimligt och påpekas även i Samuelsson et al. (2024), där det nämns att bunkringsprocessen blir mer utmanade på sommaren när omgivningstemperaturerna är 25–30 °C.

5.4 Ett storskaligt system: en diskussion

Prototyptanken var så stor som den gick att göra i RISE Piteås lindningsmaskin vilket betyder att den hade en volym på 126 l (0,1 m^3). Ett Ro-Pax fartyg kommer ha fler och större tankar, i storleksordningen 5-10 m^3 per tank. För en storskalig tank ombord på fartyget, samt ett storskaligt buffertlager kan vissa skillnader och likheter identifieras med de tester som genomfördes i detta projekt. Denna typ av tank (typ-III) med metalliner på insidan kan behöva utvärderas om den är bäst lämpad för applikationen. En tanklösning helt baserad på kolfiber, alternativt med plastliner (typ-IV), kan vara

This work is licensed under CC BY 4.0

möjlig men montageförfarandet av kylslinga inuti tanken innan den lindas måste lösas. Detta möjliggjordes i detta projekt genom att montera kylslingan i metallinern innan den förslöts och överlindades. Ett storskaligt system (framförallt utan metalliner) skulle som helhet ha mindre värmeförluster till omgivningen. Därmed skulle temperaturen utan kylning närma sig den adiabatiska simuleringen i Figur 24 (röd linje). Kylslingan kan dock skalas på så vis att mer rör skulle läggas in i en större tank så att en liknande kyleffekt skulle kunna uppnås, dvs. återigen enligt samma figur i storleksordningen 50-60 grader vid avslutad bunkring (blå linje). I praktiken skulle dock vissa värmeförluster fortfarande finnas kvar genom tank och rör. Samtidigt skulle man kunna optimera kylningen av Joule-Thompson effekten genom att exempelvis sätta stålflänsar på röret efter expansionsventilen, vilket, skulle kunna dra ner temperaturen med 20-30 grader innan gasen når tankarna ombord på fartyget (se Figur 23). Massflödet skulle dock vara mycket högre än i försöken ovan. Massflödet för ett Ro-Pax fartyg skulle behöva vara i storleksordningen 20 ton/h, eller 5,6 kg/s, vilket skulle vara mer utmanande att kyla ner.

Ytterligare detaljerade studier behövs för att designa och optimera ett storskaligt bunkringssystem för fartyg. Den termodynamiska modellen bör förfinas ytterligare för att inkludera alla komponenter i en storskalig bunkringsstation. Optimeringsinsatser kommer också att vara nödvändiga för att uppnå den bästa tankstationsdesignen, med hänsyn till faktorer som energiförbrukning, säkerhetsöverväganden och specifika begränsningar som är unika för olika hamnar och fartyg, såsom tillgängligt utrymme och driftskrav.

This work is licensed under CC BY 4.0

6 Slutsatser

Bakgrunden till projektet är att det bildas värme när vätgas överförs från ett buffertlager till tankar ombord på ett fartyg. Dels på grund av Joule-Thompson effekten när vätgasen expanderar efter expansionsventilen och dels på grund av termodynamikens första lag när gasen komprimeras i tanken. Slutsatserna är att:

- En prototyptank för komprimerad vätgas har konstruerats med en invändig kylslinga.
- Prototyptanken klarade både tryck- och prestandatesteter utan läckage eller synliga skador, vilket validerar designens hållbarhet och funktionalitet.
- Cylinderdesignen med inbyggd värmeväxlare visade sig reducera temperaturökningen vid fyllning av vätgas, vilket möjliggör en högre fyllnadsgrad och säker användning.
- Det finns fortfarande öppna frågor kring en storskalig bunkring som bör undersökas vidare i framtida projekt för att optimera processen ytterligare:
    - Detaljritning av ett storskaligt bunkringssystem för fartyg bör tas fram.
    - Den termodynamiska modellen bör förfinas för att inkludera alla komponenter i en storskalig bunkringsstation.
    - Hur en effektiv kylning kan uppnås mellan expansionsventil och tankarna ombord vid större massflöden och realistiska rör- och slangdimensioner (för att kyla bort Joule-Thompson effekten).
    - Påverkan från minskade värmeförluster i tanken (t.ex. på grund av en plastliner, tunnare metalliner, eller en tank enbart i komposit, samt en större tankvolym och massflöde) bör undersökas.

This work is licensed under CC BY 4.0

7 Referenser

SAE International Technical Standard, Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles, SAE Standard J2601_202005, Revised May 2020, Issued March 2010, https://doi.org/10.4271/J2601_202005.

Samuelsson, B., Hydrogen based ferry operations, Energimyndigheten 2022, pågående forskningsprojekt

Samuelsson B., Marnate, K., Allansson, J., Grönkvist, S., Friberg, K., Large scale hydrogen filling, Lighthouse study 2024

Van Hoecke, L, Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S., Lenaerts, S., Challenges in the use of hydrogen for maritime applications, Energy Environ. Sci., 2021

This work is licensed under CC BY 4.0

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.

RISE Research Institutes of Sweden AB
Box 857, 501 15 BORÅS
Telefon: 010-516 50 00
E-post: info@ri.se, Internet: www.ri.se

RISE Rapport 2024:100
ISBN: 978-91-89971-67-7

This work is licensed under CC BY 4.0