

«NORTH – Stommel eksperimentet» EKSPERIMENT OPPSETT og MANUAL

En laboratorieversjon av Stommel's teoretiske modell (1961) for termo-halin drevet sirkulasjon i hav

Beskrivelse av system, komponenter og initielle eksperimenter

Forfattet av:

Tor David Østvold og Einar Marvik (Forskningsassistenter, UiS)

og

Rune W. Time (Professor)

Veiledet av

Rune W. Time og A.H. Rabenjafimanantsoa, Institutt for Energi og Petroleum, UiS

INNHOLD

- **Sammendrag**
- **Figurer og tabeller**

- **Kapittel 1 Rørsystemet**
- **Kapittel 2: Sirkulasjonssystemet**
- **Kapittel 3: Temperaturregulering**

- **Kapittel 4: Fordampingsystemet**
- **Kapittel 5: Saltregulering**
- **Kapittel 6: Måle og instrumenteringssystemet**

- **Kapittel 7: Programvareinnstillinger**
- **Kapittel 8: Håndtering av testvæske**

- **Referanser**

FIGURER OG TABELLER

(use Alt + left arrow to return from a hyperlink)

Figur **Tekst**

- 1 [Skisse av sløyfa.](#)
- 2 [Koplingene i sløyfa.](#)
- 3 [Aluminiumsrammer og rør i sløyfa](#)
- 4 [Korrelasjon pumperate strømningsrate med Sensirion flowmeter](#)
- 5 [Den interne sirkulasjonsretningen for termisk stabilisering av hvert «hav»](#)
- 6 [Fordampingsystemet for «Atlanterhavet».](#)
- 7 [Kompenseringsystemet for fordampet vann fra Atlanterhavet.](#)
- 8 [PASCO målesensorene og deres posisjoner i sløyfa.](#)
- 9 [Temperaturutvikling første time etter påtrykt temperatursenkning i Polhav](#)
- 10 [Tidsutvikling av salinitet i Polhav og Atlanterhav ved ferskvannsdriiv](#)
- 11 [Måling av «overturning» med Sensirion flowmeter](#)
- 12 [Måling av «ferskvannsflyks» med «Øvre» Sensirion flowmeter](#)
- 13 [Overturning som funksjon av tid](#)
- 14 [Ferskvannsdriiv som funksjon av tid](#)
- 15 [Mal for oppsett av PASCO målinger](#)
- 16 [Kommunikasjonsvindu i «Capstone» for tilkopling av PASCO sensorer](#)
- 17 [«Capstone» tilkopling av trådløse PASCO temperatur sensorer](#)
- 18 [«Capstone» kalibrerings av korrelasjon Mettler Toledo \(ref\) vs Pasco målere](#)
- 19 [Oppsett for kommunikasjon med Sensirion flowmetere](#)
- 20 [Valg av COM porter for Sensirion flowmetere](#)
- 21 [Sensirion programmet etter etablert kontakt med sensoren](#)
- 22 [Mettler Toledo kalibrering av konduktivitet som funksjon av temperatur](#)

Tabell **Tekst**

- 1 [Sløyfekomponenter](#)
- 2 [Sirkulasjonskomponenter i sløyfa](#)
- 3 [Tabellverdier for Figur 4](#)

SAMMENDRAG

Denne rapporten beskriver oppbyggingen av «Stommel sløyfa» - et laboratorieprosjekt ved UiS som del av [NORTH prosjektet \(1\)](#) under ledelse av Bjerknes senteret ved Universitetet i Bergen. Denne strømningsløyfa er en videreutvikling av tidligere eksperimentelle versjoner av Stommel's opprinnelige [boksmodell \(1961\) \(6\)](#).

Det spesielle med denne strømningsløyfa sammenlignet med andre publiserte versjoner er stor høyde (4.5 meter) slik at hydrostatisk trykkforskjell mellom bunn og topp blir høyere enn i tidligere modeller som ofte bare er 0.5 meter. Dermed gir den en større horisontal trykkdifferanse mellom de to vertikale rørene («hav»). I tillegg er løyfa godt instrumentert med 4 termometer i hver vertikal seksjon, samt utstyrt med salinitetsmålere. Endelig måles også både «overturning» og ferskvannsdriv med separate målere. Alle størrelser måles og logges kontinuerlig via egne logge enheter knyttet til et PC-system.

Fordamping fra det ene «havet» («Atlanterhavet» i denne valgte sammenhengen) skjer via en egen fordampingskolbe, mens tapt fordampert vann forsynes via en selvregulerende mekanisme tilbake til det andre «havet» («Polhavet») som ferskvannsdriv. Egne pumpe-system og termostatbad holder temperaturen i hvert hav mest mulig konstant og uniform.

Sløyfa er resultat av ulike forsøk over tid med å optimalisere hver enkelt enhet. In-line salinitetsmåling var lenge en utfordring, men mange av de måletekniske utfordringene fant gode løsninger med introduksjon av PASCOS sensorer. Disse fungerer både kablet og trådløst (Bluetooth).

Fordamping og ferskvannsdriv ble til å begynne med forsøkt gjennomført som en integrert operasjon, men viste seg å være for ustabil driftsmessig og var vanskelig å monitorere. Det nåværende systemet, med separat fordamping og selvregulerende tilbakeføring av de-ionisert vann, fungerer utmerket.

En stor utfordring har også vært termisk og salin homogenisering av vannmassene i hvert hav. I den nåværende konstruksjonen gjøres dette ved vertikal indre strømming mellom bunn og topp. Indre strømming introduserer imidlertid en dynamisk komponent i vannmassene, uansett om den er ganske liten. Det er montert peristaltiske pumper for denne sirkulasjonen. Disse kan justeres ganske lavt, men vil til gjengjeld føre til (små) strømningspulser som influerer på målingen av «overturning». Utviklingsarbeid med studentprosjekter er i gang med å finne metoder for pulsdemping.

En del initiale eksperimenter er gjort både med rent termisk driv og med termo-halint. Termisk driv fungerer bra og følger forventet teoretisk oppførsel. Termo-halint driv indikerer via salinitetsmålerne at salt tapes i løpet av eksperimentet. Det arbeides med å identifisere tapskildene. En antatt grunn er akkumulering av salt i koke enheten. Væskevolumet der er imidlertid så lite at det vanskelig kan forklare hele tapet.

Kapittel 1: Rørsystemet

Rørsystemet i modellen består av tre hoveddeler:

- Vertikale og horisontale aluminiumprofiler
- Transparente akrylrør i diverse lengder
- Bends, koblinger, og ventiler, i PVC plastikk

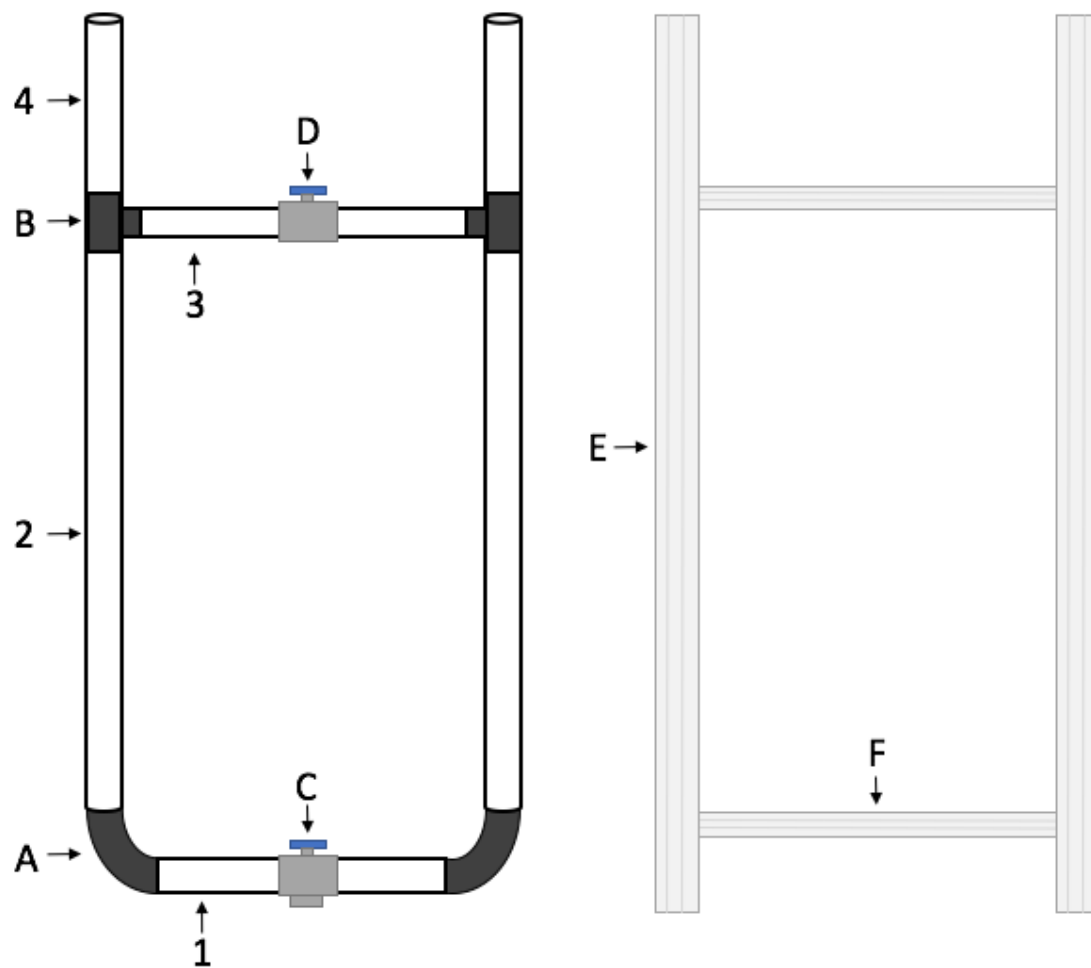
Akrylrørene og PVC overgangene er festet sammen ved hjelp av silikon fugemasse. Ventilene er festet til sine respektive horisontale akrylrør i PVC overganger med skruløkk. Rørsystemet er festet med klemmer i aluminiumprofilene.

PVC-ventilene i rørsystemet representerer skillet mellom to væskesystem som innehar ulike egenskaper. I følgende eksperimentelt oppsett representerer væskesystemene Atlanterhavet og Polhavet.

Se tabell og figurer under for nærmere detaljer om delkomponentene.

Komponent ID	Beskrivelse	Ytre mål (mm)	Indre mål (mm)	Lengde (mm)
1	Akrylrør	50	40	155
2	Akrylrør	50	40	3940
3	Akrylrør	50	40	260
4	Akrylrør	50	40	970
A	90° PVC bend	-	50/40	150x165 (bxh)
B	PVC T-kobling	-	50/40	85x115 (bxh)
C	PVC 3-veis kuleventil	-	50/40	225 (b)
D	PVC 2-veis kuleventil	-	50/40	140 (b)
E	Aluminiumprofil	90x90	-	5365
F	Aluminiumprofil	45x45	-	1020 (b)

Tabell 1: Sløyfekomponenter (b: bredde, h: høyde, mm: millimeter, - : Ikke relevant)



Figur 1: Skisse av sløyfa. Venstre: rørsystemet, høyre: aluminiumsramme for innfesting.



Figur 2: Koplingene i sløyfa. (A- 90° avrundet bend, B- treveis kopling, C - Treveis ventil, D- enkel toveis kuleventil)



Figur 3: Aluminiumsrammer og rør i sløyfa. (jfr. Tabell 1: E - 90x90 mm, F- 45x45mm, rørene 1 - 4: 50/40 mm ytre/indre)

Kapittel 2: Sirkulasjonssystemet

Sirkulasjonssystemet i modellen består av tre hoveddeler:

- Rørsystemet
- To VWR peristaltiske pumper
- Transparente kapillærrør i diverse lengder med elastiske røroverganger

Med utgangspunkt i rørsystemet beskrevet i Kapittel 1, er det boret 8,5mm hull i hver av de fire PVC-koblingene. Hullene er gjenget opp til M10, og tilsvarende nipler er installert. Gjengetape er brukt for å forhindre lekkasje.

Kompresjonskoblinger i passende størrelser er satt på kapillærrør, og koblet sammen med sine respektive nipler på rørsystemet. Se tabell 2 under for oversikt av sentrale komponenter i systemet.

ID	Beskrivelse	Funksjon	Dimensjoner, ID/OD (mm)
A	VWR pumper	Skape og regulere væskestrøm	
B	Kapillærrør	Vannleder	
C	Elastiske rør	Kobling mellom akrylrør	
D	Nippel	Kobling mellom akrylrør og rørsystem	
E	Bor	Punktere rørsystem for å installere nippel	85
F	Gjengetapp	M10. Gjenge opp hull for niplene.	

Tabell 2: Sirkulasjonskomponenter i sløyfa

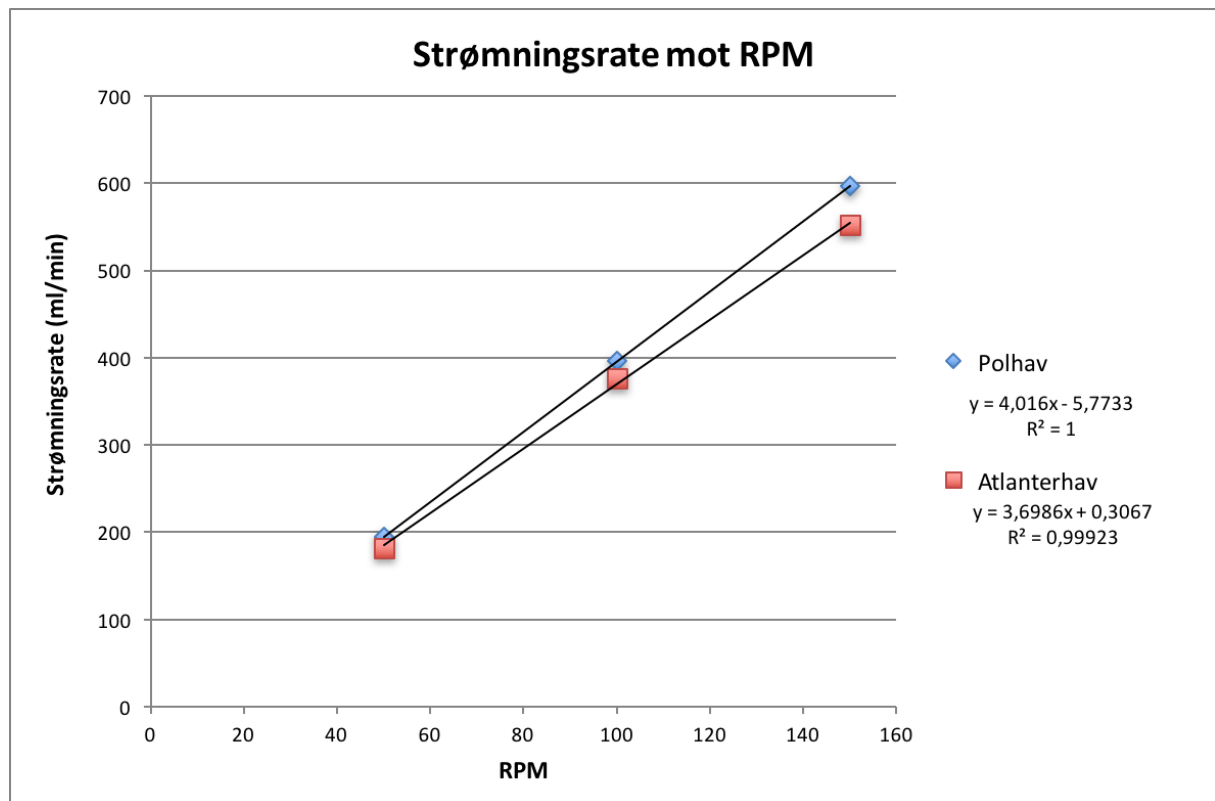
Videre er det skapt kommunikasjon mellom topp og bunn i hvert hav ved hjelp av ytterligere lengder kapillærrør og elastiske røroverganger av gummi. Pumpene i kapillærsystemet skaper og regulerer væskestrøm og strømretninger.

Dette utgjør til sammen sirkulasjonssystemet til modellen.

VWR peristaltisk pumpe

Pumpen i modellen er en type fortregningspumpe (peristaltisk) fra VWR, modell PP 3300. Pumpeprinsippet er en rotor med tre ruller som trykker mot det fleksible røret i pumpehuset, og skyver på den måten væsken gjennom røret. Rotasjonshastigheten på rotoren kan justeres mellom 4-400 runder per minutt (RPM). Strømningsretningen kan enkelt endres på pumpene ved å reversere rotasjonsretningen på rotoren. Det er etablert en korrelasjon mellom RPM og væskestrøm, se tabell og figur under. Korrelasjonen er

basert på gjennomsnittlige verdier av 3 volumtester per RPM måling på 50, 100, og 150 RPM.



Figur 4: Korrelasjon mellom pumperate (rpm omdreiningstall) og målt strømningsrate med Sensirion flowmeter.

Gjennomsnitt strømningsrate (ml/min)		
RPM	Polhav	Atlanterhav
50	195,0	182,3
100	395,9	376,1
150	596,6	552,1

Tabell 3: Tabellverdier for Figur 4

Det kan være flere årsaker til at det er et forskjellig sammenheng mellom RPM og væskestrøm på de to sidene av rørsystemet. Pumpene pumper hver sin retning, det er ulik total lengde på kapillærrør, og det er ulikt antall spiraler på varmevekslerne. Det er en klar sammenheng mellom RPM og væskestrøm på tross av forskjellene.

For øvrig informasjon om pumpene vedrørende bruk og vedlikehold, jfr. "Operating Manual" fra leverandør VWR.

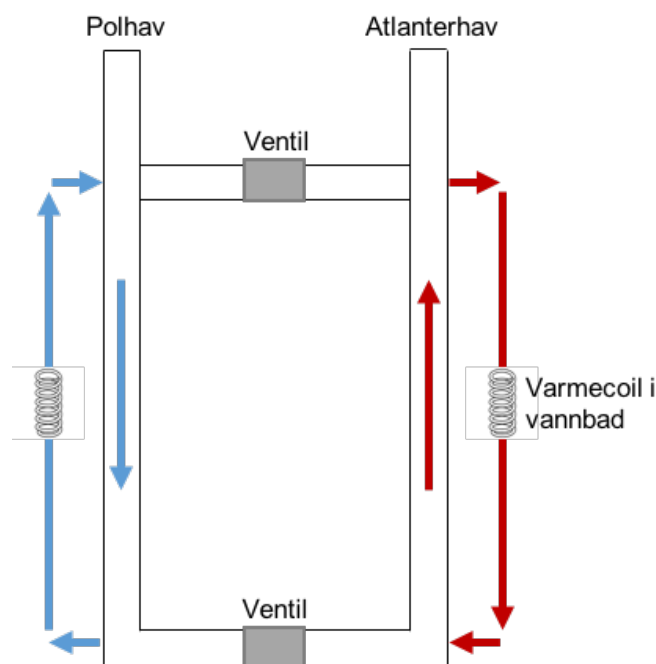
Kapittel 3: Temperaturregulering

Temperaturregulering i modellen består av tre hoveddeler:

- Sirkulasjonssystemet
- To Julabo temperaturregulatorer
- To varmecoiler

Temperaturkontrollen i modellen er en videreføring av sirkulasjonssystemet beskrevet i [Kapittel 2](#). Hvert hav har hver sin temperaturregulator som er stilt inn på ønsket temperatur. Væsken strømmer fra innløp via kapillærrørene i sirkulasjonssystemet, gjennom en varmecoil som ligger i et temperert vannbad inni regulatoren, og videre til utløp i rørsystemet. Ny temperatur i hvert hav vil etter hvert etablere seg. Dette kommer tydelig frem i [Figur 9](#) under Kapittel 6: "[Målingssystemet](#)".

Figuren under viser sirkulasjonsretningen i hvert hav. Rødt symboliserer varmt vann i Atlanterhavet relativt til blått, kaldere vann i Polhavet. Lokale tetthetsforskjeller oppstår i en transient temperaturfase fordi ny temperert væske erstatter eksisterende væske i rørene. Problemet er størst i Atlanterhavet hvor varm væske erstatter kald væske, i motsetning til Polhavet hvor kald erstatter varm. Derfor er pumperetningen i Atlanterhavet reversert.



Figur 5: Den interne sirkulasjonsretningen for termisk stabilisering av hvert «hav».

Figuren representerer en ideell situasjon uten kryss-strømning over tverrliggerne. Effektiv temperatur i hvert hav er ulik innstilt temperatur på regulator grunnet varmetap til omgivelser.

Kapittel 4: Fordampningssystemet

Fordampningsprosessen i modellen består av tre hoveddeler:

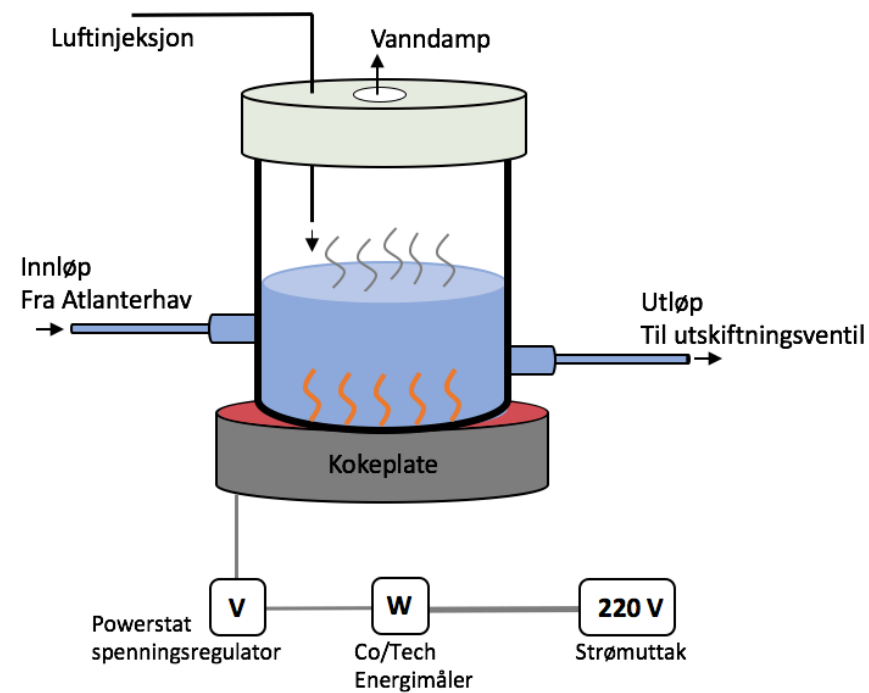
- En 2000W Wilfa kokeplate med elektrisk styring bestående av
 - En Powerstat 0-280V spenningsregulator
 - En Co/Tech effektmåler
- En spesiallaget sylindrisk glasskolbe i Pyrex bestående av
 - Ett innløp og ett utløp
 - Et POM-plast lokk med et sirkulært utløp for vanndamp, og et innløp for luftinjeksjon
- Vanntilførsel til glasskolbe via kapillærrør fra Atlanterhavssiden i rørsystemet

Fordampningssystemet står på øvre hylle på et flyttbart hyllesystem laget i aluminium. Et ekstra 8,5mm hull er boret i øvre PVC-kobling på Atlanterhavssiden for å tilføre væske til fordampningssystemet. Kapillærrør er lagt opp fra hullet i PVC-koblingen til innløpet på kokekolben på samme vis som beskrevet i Kapittel 3.

Den mekaniske styringsmekanismen til kokeplaten er koblet ut. Istedenfor går strømmen direkte til varmeelementet via en ekstern spenningsregulator. Spenningsregulatoren struper strømtilførselen til kokeplaten. Regulatoren er tilkoblet en energimåler for å kartlegge hvor mye effekt (Watt) som går inn til kokekolben ved ønsket spenningsnivå. På denne måten korreleres fordampningsraten mot tilført effekt.

Damptrykket i kolben er like stort som lufttrykket i omgivelsene når væsken i glasskolben koker. Uten effektiv transport av vanndampen vil damptrykket nå metningstrykket, og resultere i begrenset fordampningsrate. Av den grunn er det laget et injeksjonspunkt for luft i plastlokket på glasskolben. Luftinjeksjon i denne sammenheng er et to-egget sverd; både for lite og for mye luft vil begrense fordampningsraten. Et gass-flowmeter bør bli installert for å få kvantifisert injeksjonsmengden.

Se figuren under for en oversikt over hovedkomponentene i fordampningssystemet.



Figur 6: Fordampingsystemet for «Atlantehavet». Vanndampen som forsvinner ut av systemet erstattes med tilsvarende mengde deionisert vann fra nivåkontrollsystemet. Luftinjeksjonen bidrar til økt fjerning av vanndamp fra glass kokekolben.

Kapittel 5: Saltregulering

Saltregulering i modellen består av fire hoveddeler:

- Fordampningssystemet
- En liten Nupro kuleventil
- Temperaturreguleringssystemet, og pumper fra sirkulasjonssystemet
- Buffersystemet bestående av
 - To stykk 4.6L kvadratiske vannbeholdere i plastikk
 - En Biltema Inline-pumpe mellom beholderne
 - En Manson DC spenningsregulator

I utgangspunktet har vi lik væske i begge hav – samme salinitet og temperatur. Formålet med fordamping er å skape en salinitetsforskjell mellom havene, samtidig som total saltbalanse ivaretas. Dette gjøres ved å fordampe saltvannsvæske på Atlanterhavssiden, tilbakefører saltere vann til Atlanterhavet, samtidig som fordampet væske blir tilført Polhavet i form av ferskvann.

Ved koking av saltvann vil salt av fordampet væske akkumulere i glasskolben hvilket fører til økt salinitet. For å flytte dette saltet fra glasskolben tilbake til Atlanterhavet, er det lagt opp kapillærrør fra utløpet på glasskolben og inn på innløpet til en liten 20x20mm kvadratisk Nupro kuleventil. Kuleventilen representerer skillet mellom fordampningssystemet på innløpssiden, og temperaturreguleringen til Atlanterhavet på utløpssiden. Ventilen omtales videre som "utskiftningsventilen". Etersom drivkraften i temperaturreguleringen er de peristaltiske pumpene, kan samme kraft utnyttes for å transportere saltere væske fra glasskolben tilbake til Atlanterhavet. Denne kraften kan justeres ved å regulere åpningen på kuleventilen. Den varme væsken temperes også gjennom varmecoilen.

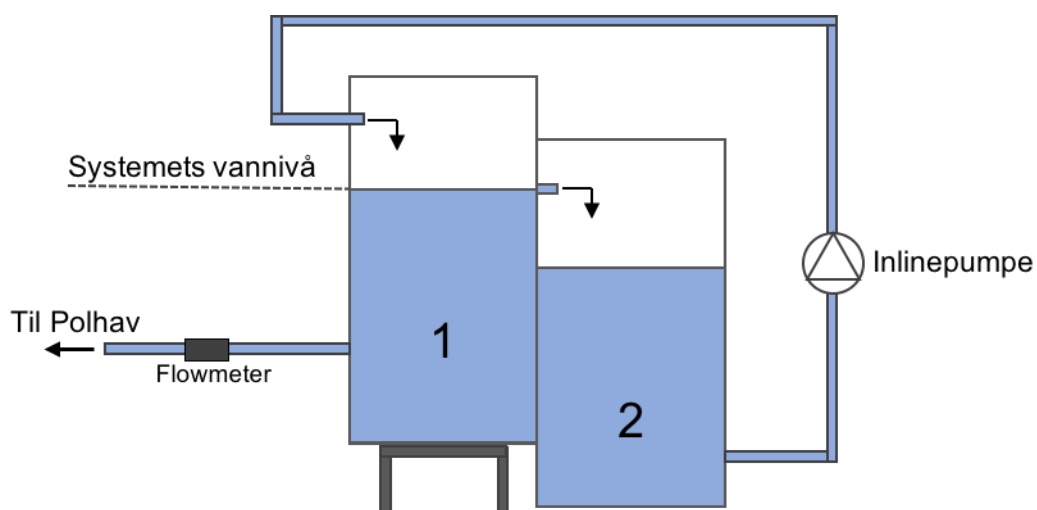
Følgende problemer kan oppstå ved for store ventilåpninger:

- Vannivået i glasskolben synker
 - Dette gir kunstig høye målinger av fordampningsrate jmf. buffersystemet
- Fordampningsraten synker
 - Tilført energi fra kokeplaten er ikke tilstrekkelig til å varme tilført væske til glasskolben fort nok

Ved for små ventilåpninger vil væsken i glasskolben bli saltere og saltere. Dette medfører at salinitetsforskjellen mellom havene kun forårsakes av ferskvannstilførselen til Polhavet, mens effekten av saltvannstilførselen til Atlanterhavet kan bli kraftig redusert. Dermed er det ikke massebalanse av salt i rørsystemet.

Fordampet væske kompenseres til Polhavet via buffersystemet. Se figur under. Vannivået i beholder 1 tilsvarer vannivået i resten av systemet før koking. Det vil si at vannivået i Polhav, i Atlanterhav, og i kokekolben, flukter på dette nivået. Nivået i kokekolben avtar ved koking – dette skaper en prosess:

1. Ved koking skilles saltet fra vannet i glasskolben. Vannet går over til damp, og ut til atmosfæren. Saltet akkumuleres i kolben.
2. Saltvann driver fra Atlanterhavet inn mot kokekolben for å balansere vannivået
3. Saltvann driver fra Polhavet til Atlanterhavet
4. Ferskvann driver fra beholder 1 i buffersystemet til Polhavet



Figur 7: Kompenseringssystemet for fordampet vann fra Atlanterhavet. «Systemets vannivå» er det påtrykte gjennomsnittlige havnivået. Designet gjør at systemet er «analogt» selvregulerende. Underskudd av deionisert vann fylles kontinuerlig via inlinepumpa. Eventuelt overskudd renner ut fra 1 til buffertank 2. Ledningen til Polhav sørger for kontinuerlig kontakt og innstrømning.

Beholder 2 og Inlinepumpen sørger for at vannivået i beholder 1 holdes konstant under eksperimentene. På den måten ivaretas prosessen som koking har igangsatt. Ved å

plassere et flowmeter i utløpet til Polhavet, får vi et indirekte mål på hvor mye vann som fordampes i kokekolben. I tillegg kan reduksjonen i vannmengden i beholder 2 bekrefte fordampningsraten i løpet av eksperimentene. Mer informasjon vedrørende målinger og flowmeter er gitt i neste kapittel om " [Måle og instrumenteringssystemet](#) ".

Kapittel 6: Måle og instrumenteringssystemet

I modellen blir det målt tre ulike fysiske parametere. Temperatur (T), salinitet (S) - ved hjelp av konduktivitetmålinger, og væskerater. Disse blir målt av forskjellige instrumenter og programvare:

- PASCO sensorer måler både temperatur og konduktivitet (salinitet)
- To Sensirion flowmetere : måler væskerate for a) «overturning» og b) ferskvanns fluks.
- Mettler Toledo brukes til å kalibrere PASCO målere, og gi nyttig informasjon på saltholdighet av væske før og etter test

Totalt består målingssystemet av følgende komponenter:

- PASCO 850 Universal Interface, videre omtalt som PASCO-hub. Enheten samler følgende sensorer til seg:
 - 4 stykk kablet temperatursensorer
 - 2 stykk trådløse temperatursensorer
 - 2 stykk kablet PS-2195 konduktivitetssensorer med temperaturmåling
- To Sensirion flowmetre
 - SLQ-QT500 Liquid Flow Sensor (Nedre flowmeter” : A-P «overturning»)
 - SLS-1500 Liquid Flow Sensor («Øvre flowmeter» : ferskvanns fluks)
- En Mettler Toledo konduktivitetmåler bestående av:
 - SevenCompact™ Conductivity S230 Interface
 - InLab® 731 ISM Conductivity Probe

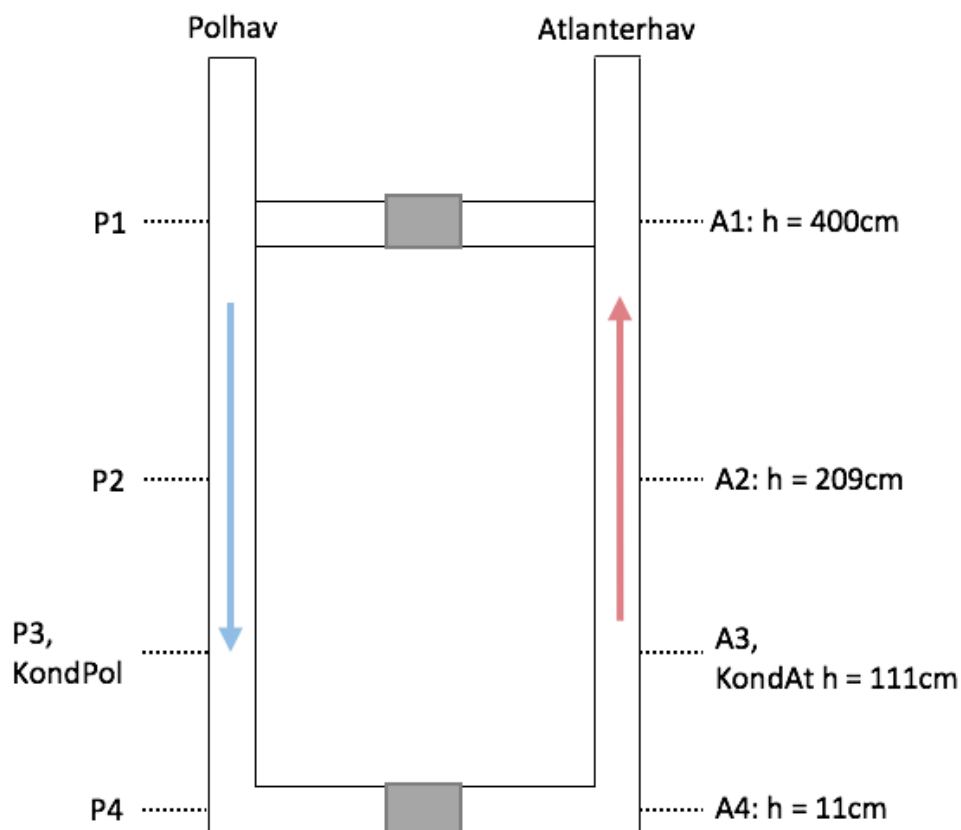
Påfølgende delkapitler beskriver målingssystemet mer utfyllende, og data er hentet ut fra en fullskalatest i termo-haline forhold gjennomført 28 April 2017. Eksperimentelle innstillinger og input for testen er gitt under:

- 22C romtemperatur
- 15 og 20C temperatur på varmevekslere, hhv Polhav og Atlanterhav
- 500ml/min sirkulasjonsrate på pumper
- Salinitet av saltvann: 35 ppt, tilsvarer 33.03 g NaCl/l.
- Tilført effekt på kokeplate: 700W
- Ingen åpning på utskiftningsventilen

PASCO

Beskrivelse

PASCO-målingsystemet består av totalt 8 sensorer; 6 er rene temperatursensorer, og 2 er kombinerte konduktivitet-temperatursensorer. Disse er vertikalt plassert langs Atlanterhavet og Polhavet. Se [figur 10](#) under. A representerer sensorer tilknyttet Atlanterhavet, mens P representerer sensorer tilknyttet Polhavet. Tallgivingen er tilfeldig valgt, men rekkefølgen har praktisk betydning for malen som brukes i styreprogrammet «Capstone». 1 er topp, og 4 er bunn. Sensorer A og P 1, 3, og 4 er koblet til PASCO-hub via kabel, mens sensorer A2 og P2 er trådløst koblet til en desktop via en Bluetooth dongle. PASCO-huben er tilkoblet samme desktop. PASCO Capstone programvare brukes til å innhente data fra sensorene, og visualisere data i real-time. Innstillinger og bruk av programvaren er beskrevet i detalj i kapittel 7 om [Programvareinnstillinger](#).



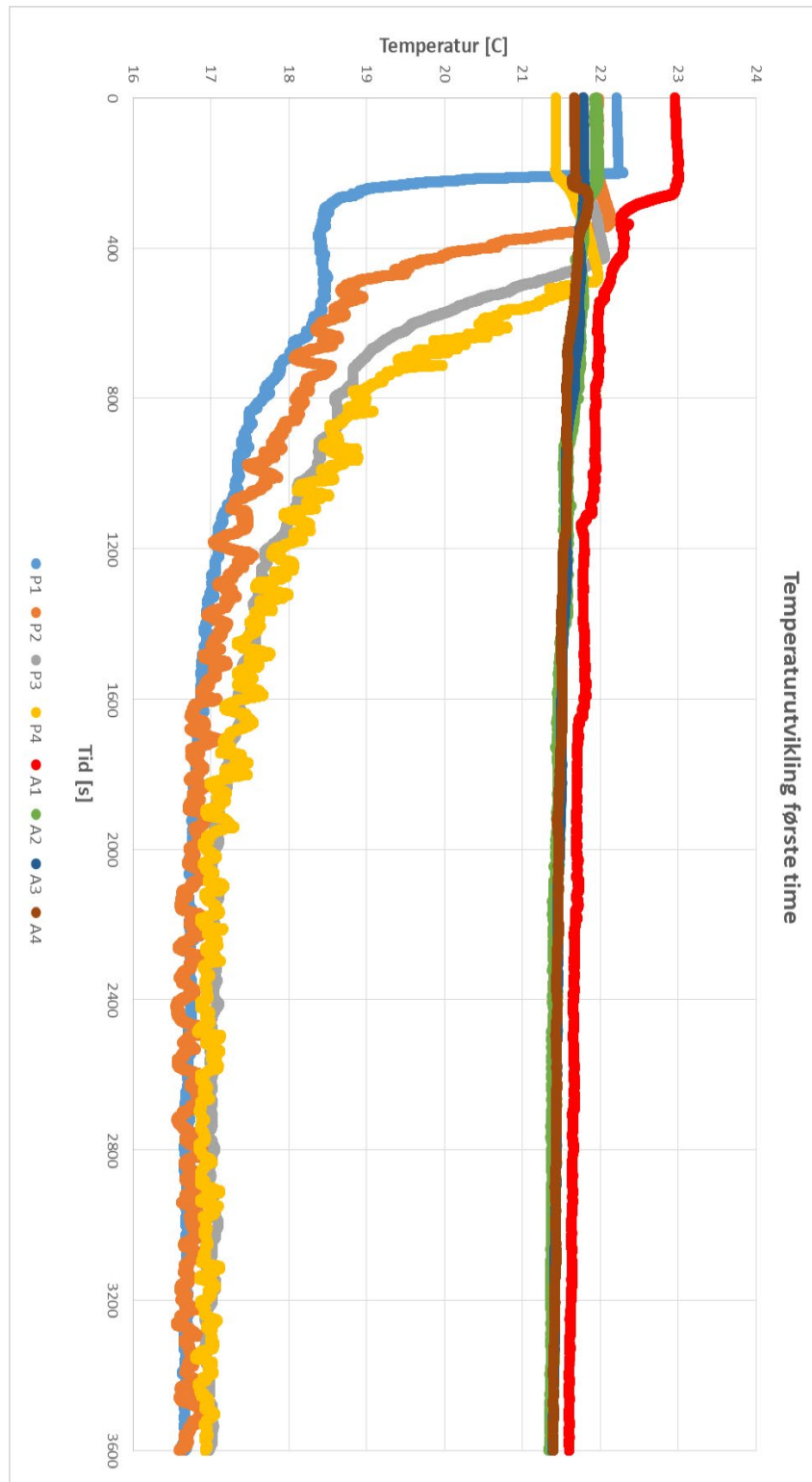
Figur 8: PASCO målesensorene og deres posisjoner i sløyfa. A angir Atlanterhav, P angir Polhav. P1,2,4 og A1,2,4 er temperatursensorer, P2 og A2 er trådløse via Bluetooth. P3KondPol og A3KondAt er konduktivitetsmålere. Blå og rød pilene angir intern strømningsretning i hvert hav uavhengig av retning for «Overturning».

Temperatur

Figuren på neste side viser hvordan temperaturmålingene utvikler seg i rørsystemet den første timen etter oppstart av et eksperiment som ble gjort. Følgende kan tolkes ut i fra figuren:

- Temperaturen faller først i P1, etterfulgt av P2, P3, og P4. Dette er et resultat av plasseringen til sensorene, og strømningsretningen (definert i figur 10).
- Initiell temperatur på Atlanterhavssiden er veldig lik innstillingen på varmeveksleren, og har derfor en veldig kort transient periode sammenlignet med Polhavssiden.
- Sensorene når omtrent like temperaturer i Polhavet cirka 2400s etter oppstart, dvs. 40 minutt.

Det presiseres at figuren er ment til å illustrere forventet temperaturoppførsel ved gitte innstillinger. Endrede innstillinger kan påvirke varigheten på transient periode.



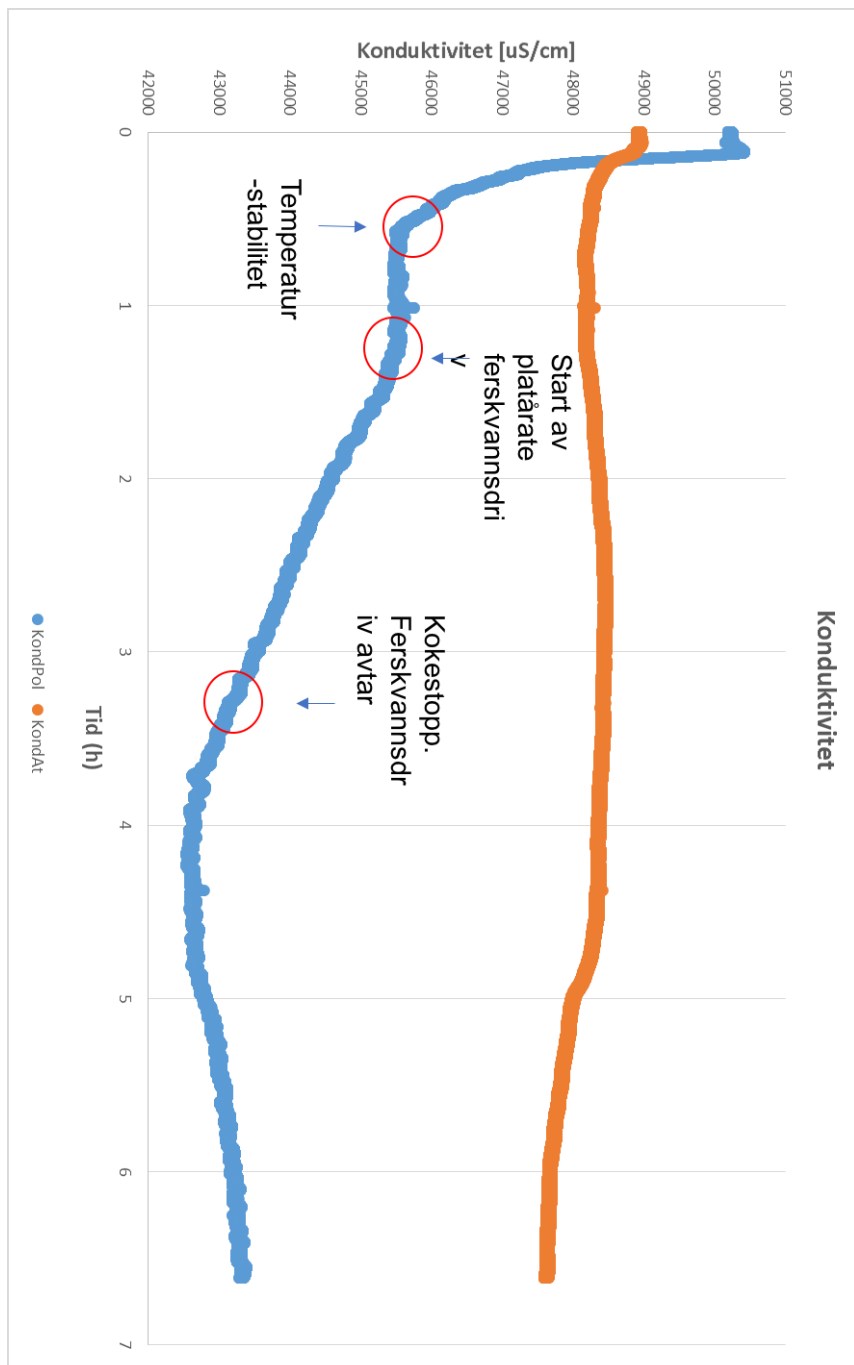
Figur 9: Temperaturutvikling i sløyfa den første timen etter en påtrykt temperatursenkning i Polhavet. Temperaturen faller først i P1, videre nedover via P2, P3, til P4. Rekkefølgen følger den interne utjevnings strømmingen vist i figur 10. Temperatursensor P3 er innbygd i konduktivitetsensoren .

Salinitet

Figuren på neste side viser hvordan konduktivitetsmålingene utviklet seg etter oppstart av et termo-halint eksperiment. Følgende kan tolkes ut i fra figuren:

- Fallet i konduktivitet i Polhavet fra cirka 0-40 minutt er et direkte resultat av reduksjon i temperatur. Målt konduktivitet etter dette tidspunktet kommer av endringer i saltforholdet i rørsystemet.
- Konduktivitetsmålingene faller på Polhavssiden etter koking når sitt maksimum etter 80 minutt. Saltvann i kokekolben fordampes, ferskvann strømmer inn i Polhavet fra buffersystemet, samtidig som saltvann strømmer inn i Atlanterhavet fra Polhavet. Konduktiviteten i Polhavet faller fordi saltkonstruksjonen avtar.
- Fallet i konduktiviteten avtar gradvis etter hvert som kokingen avtar. Koking stoppes 200 minutter inn i eksperiment.
- Saltvann strømmer tilbake til Polhav fra Atlanterhav for å utligne trykkforskjeller som følge av salinitetsforskjeller.
- Konduktiviteten i Atlanterhavet forblir konstant i løpet av hele testen. Dette er et tegn på at saltmengden i havene ikke bevares i rørsystemet.

Salinitetsmålinger av saltvannet i kokekolben etter test viser meget høye konduktivitetsverdier. Dette tyder på at salt akkumuleres i kokekolben. Dette er å forvente i en test hvor utskiftningsventilen er stengt, men er ikke ønskelig for prosjektets formål. Det som er ønskelig er at hver endring i Polhavets konduktivitetsmålinger, har en motsatt rettet endring i Atlanterhavet. Da er saltbalansen i systemet ivaretatt. Det er her utskiftningsventilen spiller en stor rolle.



Figur 10: Tidsutvikling av salinitet i Polhav og Atlanterhav ved ferskvannsdri

Sensirion

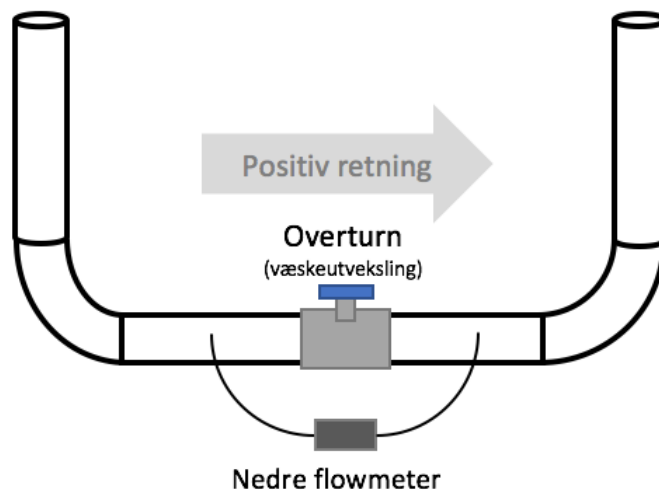
Beskrivelse

Sensirion-målingssystemet består av 2 forskjellige Sensirion væske flowmetre:

- SLQ-QT500 med måleintervall fra - 2500 $\mu\text{l/s}$ til + 2500 $\mu\text{l/s}$ (μ =mikro)
 - 2500 $\mu\text{l/s}$ tilsvarer 150 ml/min
 - Denne omtales videre som "nedre flowmeter"
- SLS-1500 med måleintervall fra - 65 ml/min til + 65 ml/min
 - Denne omtales videre som "øvre flowmeter"

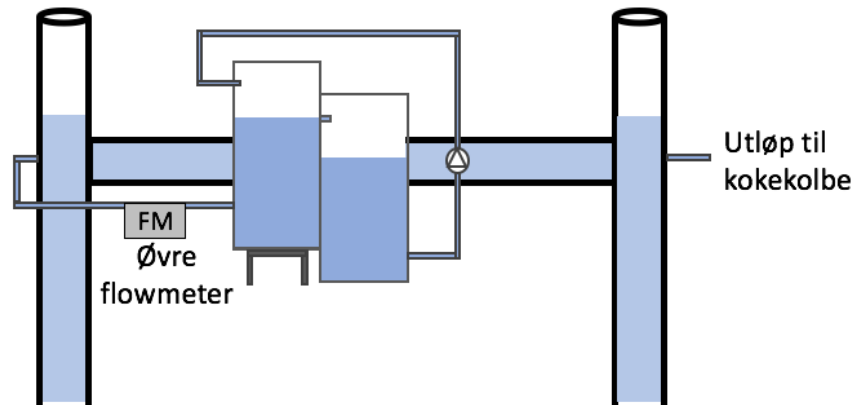
Slik som navnet antyder, er disse målerne plassert i øvre og nedre del av rørsystemet. Det er hensiktsmessig å bruke to forskjellige målere for å generere mer fleksibilitet under eksperimenter. Dette underbygges i påfølgende avsnitt.

Nedre flowmeter er installert som en "bypass" over 3-veisventilen i nedre tverrligger. Under test holdes 3-veisventilen stengt slik at all væsken passerer gjennom måleren. Se figur under. Den måler hvor mye væske som utveksles mellom havene ("overturn"), og i hvilken retning utvekslingen skjer. Måleren kommuniserer med en stasjonær PC via kabel.



Figur 11: Måling av «overturning» med Sensirion flowmeter ved stenging av hovedventil.

Øvre flowmeter er installert i overgangen mellom buffersystemet og øvre del av Polhavet. Se figur under. Den måler mengden ferskvann som tilføres Polhavet fra buffersystemet. Det presiseres at dette ferskvannsdrivet tilsvarer mengden væske som fordampes i kokekolben. Måleren kommuniserer med en bærbar PC via kabel.



Figur 12: Måling av «ferskvannsfluks» med «Øvre» Sensirion flowmeter.

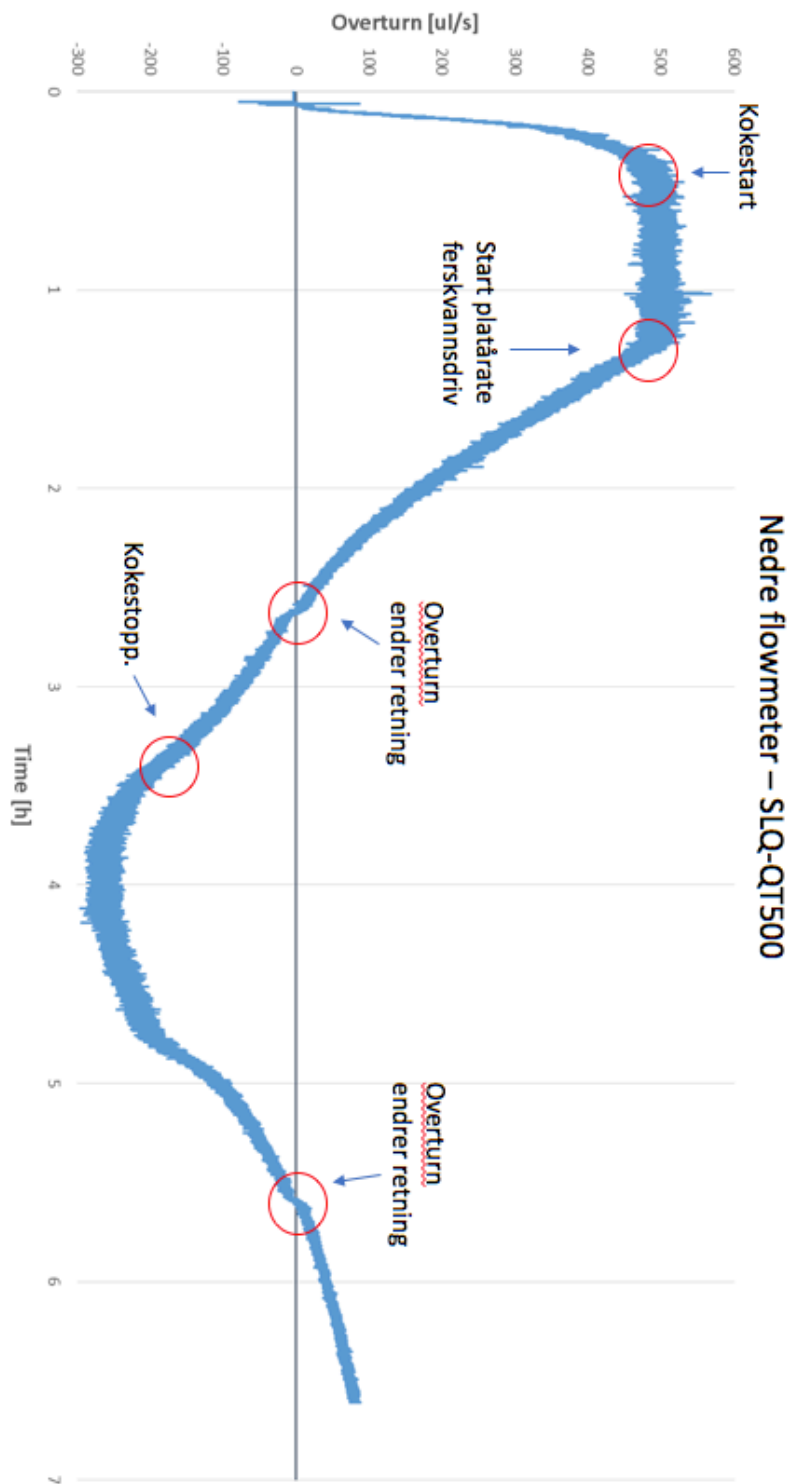
Data fra disse målerne blir behandlet og visualisert i real-time i tilhørende programvare (Sensirion) på deres respektive PCer.

Overturn – nedre flowmeter

Figuren på neste side viser hvordan overturnmålingene forventes å utvikle seg etter oppstart av eksperiment. Positive verdier på overturn indikerer at væskeutveksling skjer fra Polhav mot Atlanterhav, mens negative verdier indikerer væskeutveksling i motsatt retning. Følgende kan tolkes ut i fra figuren:

- Økningen i overturn fra cirka 0-40 minutt er et direkte resultat av økning av væsketetthet i Polhavet som følge av reduksjon i væsketemperatur. Væskeutvekslingen skjer fra Polhav mot Atlanterhav. Temperaturforskjellen dominerer og skaper overturn. Temperaturforskjellen er nå konstant. Alle endringer etter dette tidspunktet kommer av endringer i saltforholdet i rørsystemet.
- Overturmålingene avtar etter at koking, og ferskvannsdriiv fra buffersystem til Polhav, når sitt maksimum etter 80 minutt. Tetthetsforskjellen mellom Polhav og Atlanterhav reduseres som fører til at væskeutvekslingen mellom havene avtar. Det oppstår et maktskifte mellom hvordan temperatur og salinitet påvirker overturn.
- Overturn snur retning etter cirka 150minutt. Væskeutvekslingen skjer nå fra Atlanterhav mot Polhav. Salinitetsforskjellen dominerer og skaper overturn.
- Fra 150 til 200 minutt øker overturn i negativ retning. Koking stoppes 200 minutter inn i eksperimentet. Ferskvannsdriivet avtar gradvis, i takt med at overturn begynner å snu retning igjen.
- Saltvann strømmer tilbake til Polhav fra Atlanterhav for å utligne trykkforskjeller som følge av salinitetsforskjeller. Det oppstår et nytt «maktskifte» mellom hvordan temperatur og salinitet påvirker overturn.
- «Overturn» snur retning igjen etter cirka 340 minutt. Væskeutvekslingen skjer fra Polhav mot Atlanterhav. Temperaturforskjellen dominerer og skaper overturn.

Hovedproblemet med testen er at salt akkumuleres i kokekolben (se kapittel 5: ["Saltregulering"](#)). Dersom det oppnås effektiv forflytting av dette saltet til Atlanterhavet, vil en forvente at «overturn» kurven blir brattere og endrer retning tidligere. Da får en både saltøkning i Atlanterhavet (tetthet går opp), og utvanning i Polhavet (tetthet går ned). Drivkraften i denne testen er kun temperaturforskjeller mellom havene, og utvanning av Polhavet.



Figur 13: Overturning som funksjon av tid.

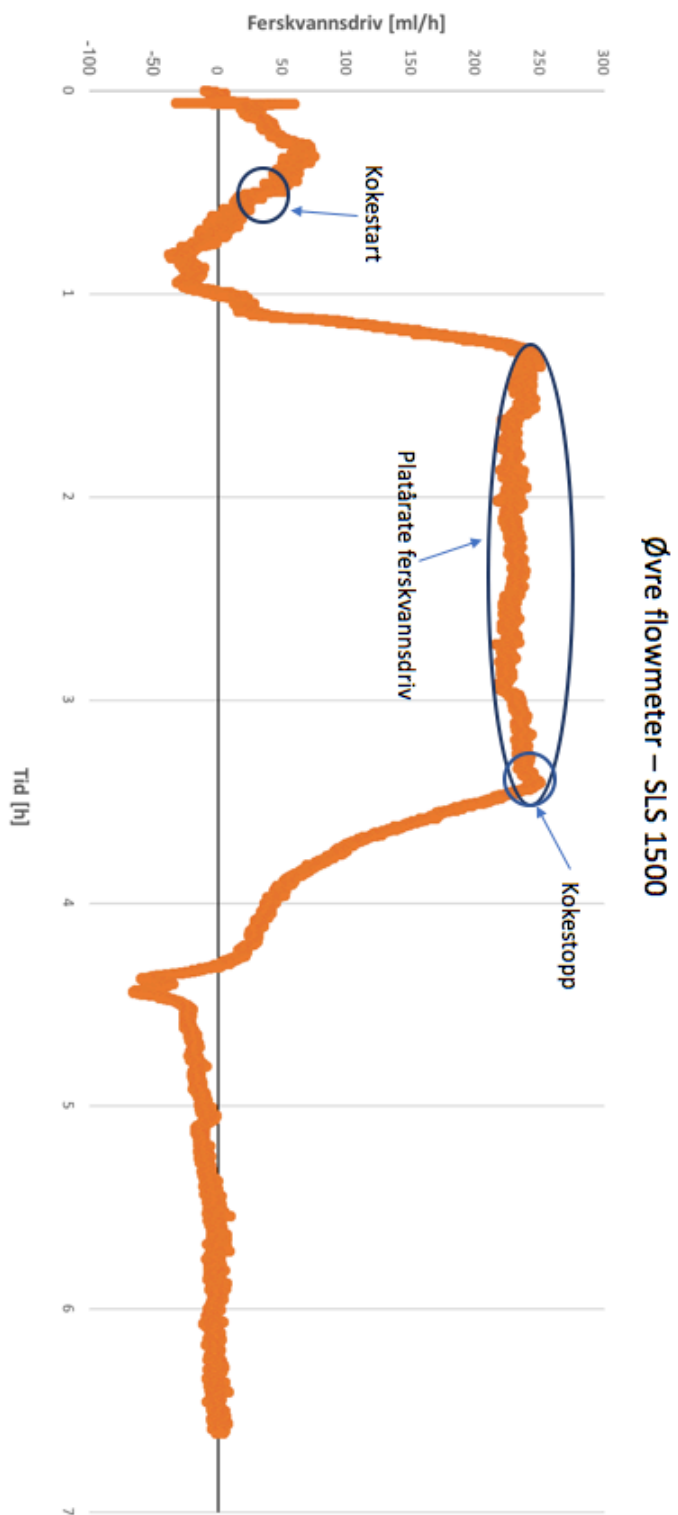
Ferskvannsdriiv – øvre flowmeter

Figuren på neste side viser hvordan ferskvannsdriivet forventes å utvikle seg etter oppstart av eksperiment. Positive verdier på ferskvannsdriiv indikerer at væskeutveksling skjer fra buffersystemet mot Polhavet, mens negative verdier indikerer væskeutveksling i motsatt retning. Følgende kan tolkes ut i fra figuren:

- For at denne målemetoden skal fungerer er det særlig viktig at vannivåene i de forskjellige væskesystemene flukter. Av den grunn forventes det en periode med balansering av væskeniivå når pumpene i systemet settes i gang. Det bemerkes at denne perioden strekker seg til før logging starter, og vil variere fra test til test. I testen strekker den seg fra 0-30minutt, hvor koking igangsettes 30 minutter inn i eksperimentet.
- Volumøkning i kokekolben som følge av oppvarming fører til at ferskvannsdriivet blir negativt i en kort periode etter kokestart. Det vil si at det driver inn saltvann fra Polhavet og inn i buffersystemet. Denne innstrømningen anses som neglisjerbar da ferskvannsdriivet reverseres i løpet av kort tid, og underbygges med konduktivitetmålinger av buffersystem etter test.
- Cirka 80 minutter inn registreres det at ferskvannsdriivet når sitt maksimum mellom 225 – 240 ml/time. Denne raten opprettholdes frem til koking stoppes, cirka 200 minutter inn. Den nesten konstante raten som oppnås i dette intervallet kalles for "platåraten" ved en gitt effekt tilførsel (700W i dette tilfellet).
- I tiden etter kokestopp avtar ferskvannsdriivet som forventet. Ingen koking, ingen ferskvannsdriiv. Kurvens oppførsel etter kokestopp kommer som en følge av balansering av væskeniivå i de forskjellige systemene.

Ved omgjøring av måleenhetene på figuren, er det tydelig at måleintervallet for ferskvannsdriivet er smalt. Mellom -1 og 4 ml/min. Ved høyere effektnivå forventes det at målområdet for ferskvannsdriivet økes noe, men ikke betraktelig. Dette må underbygges med flere tester. Det er allikevel godt innenfor flowmeterets spesifikasjoner. Til sammenligning ligger væskeratene for nedre flowmeter i denne testen mellom -15 og 30 ml/min. Måleområdet til overturnen er avhengig av både temperatur- og salinitetsforskjeller mellom havene.

I fremtidige tester med bedre saltregulering og andre temperaturinnstillinger, er nedre flowmeter bedre egnet til å takle større spenn i målte verdier på overturn.



Figur 14: Ferskvannsdriiv som funksjon av tid.

Mettler Toledo konduktivitetsmåler

Mettler Toledo konduktivitetsmåleren består av et grensesnitt og en konduktivitetssensor. Systemet blir brukt til å måle konduktivitet i de forskjellige væskesystemene i modellen før og etter et eksperiment. Denne prosedyren ble etablert for alle væskesystem i ettertid av den første fullskalatesten 28 April 2017.

Kort tid etter avsluttet test blir væskesystemene isolert, og tilsvarende prøver blir samlet i små plastikkbeholdere merket med navn. Deretter lagres prøvene i romtemperatur for å oppnå sammenlignbare målinger. De aktuelle væskesystemene er:

- Polhavet
- Atlanterhavet
- Buffersystemet
- Destillasjonssystemet (kokekolbe)

Polhavet og Atlanterhavet blir målt for å kontrollere målingene til de fastmonterte PASCO konduktivitetsmålerne. Disse målerne kalibreres mot Mettler Toledo før hver test. Mettler Toledo blir i sin tur kalibrert mot standardiserte kontrollvæsker.

Buffersystemet blir målt for å avdekke eventuelle væskestrømninger av saltvann fra Polhavet i form av økt konduktivitet. Da buffersystemet er fylt med ferskvann, er konduktivitet før test omtrent lik null.

Konduktivitet i Polhavet, Atlanterhavet, og Destillasjonssystemet, er den samme for alle før test. Utgangspunktet er 35 ppt (33.03g NaCl/L) saltvann som ifølge Mettler Toledo måler 48.4 mS/cm ved romtemperatur (22C). Konduktiviteten i væsken fra kokekolben var det eneste som ble målt etter testen 28 April 2017. Den ble målt til 93.4 mS/cm ved 22.8C. Som forventet øker saltholdigheten betraktelig i kokekolben når utskiftningsventilen holdes stengt.

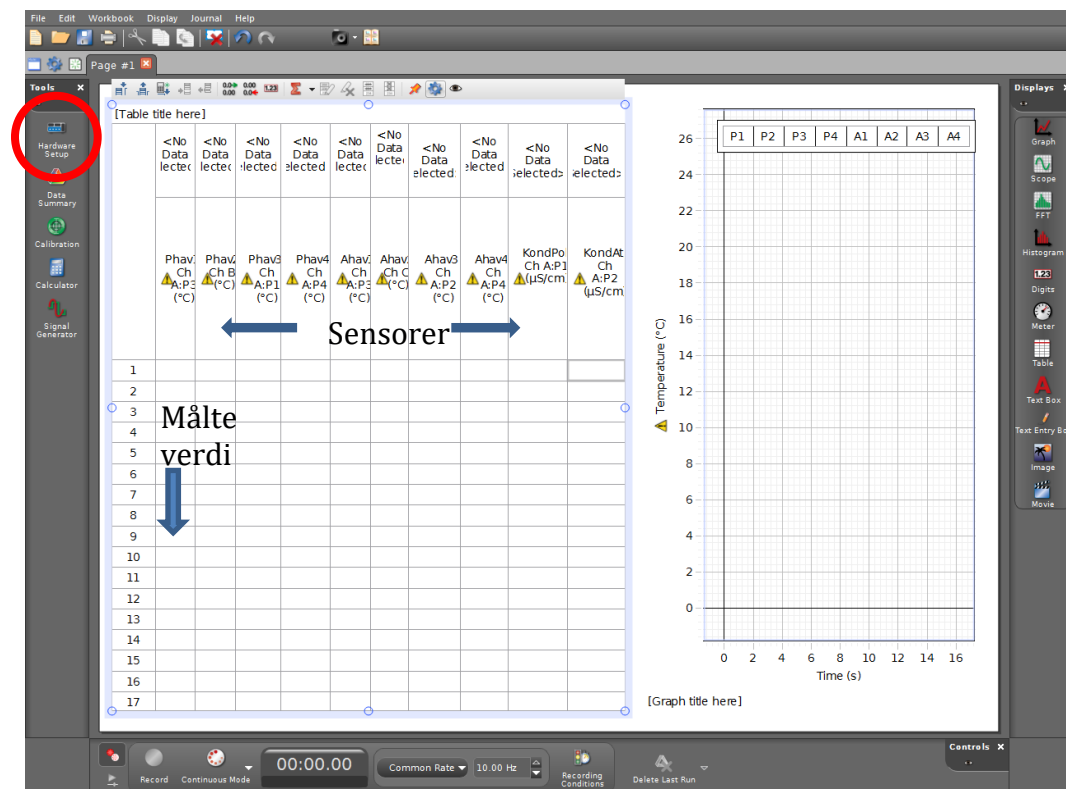
Kapittel 7: Programvareinnstillinger

Følgende kapittel er en videreføring av foregående kapittel om målingssystemet. Kapittelet brukes også som et supplement til prosedyrene som er utviklet for alle fasene i et eksperiment. Det vil si; forberedelse, gjennomføring, og avslutning.

I avsnittene under legges det ved skjermdump av programvareinnstillinger for PASCO og Sensirion, med tilhørende forklaringer. Kort forklaring om Mettler Toledos innstillinger er også inkludert.

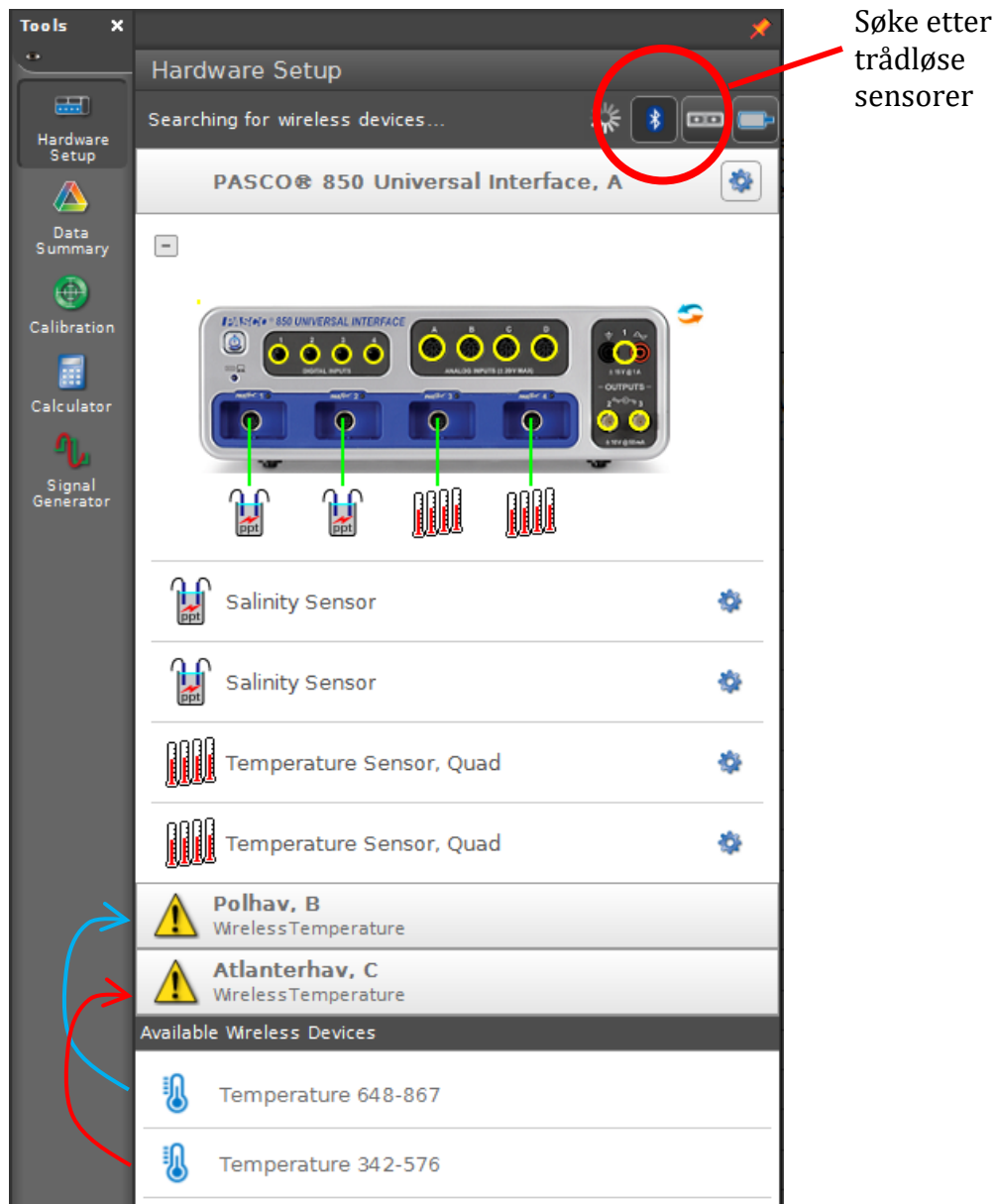
Oppsett av PASCO

Det er laget en mal i Capstone-filformat for PASCO-målerne for å gjøre tilkoblingen av målerne enklere. Åpne "Fullskalatest_mal". Bildet under viser det første vinduet etter oppstart av filen. Her vises et rutenettverk hvor kolonnene representerer sensorene, og radene viser tilhørende målte verdier. Når testen kjøres visualiseres dataene i sanntid i grafen til høyre for matrisen. Gul varseltrekant betyr at tilhørende sensor ikke er tilkoblet.



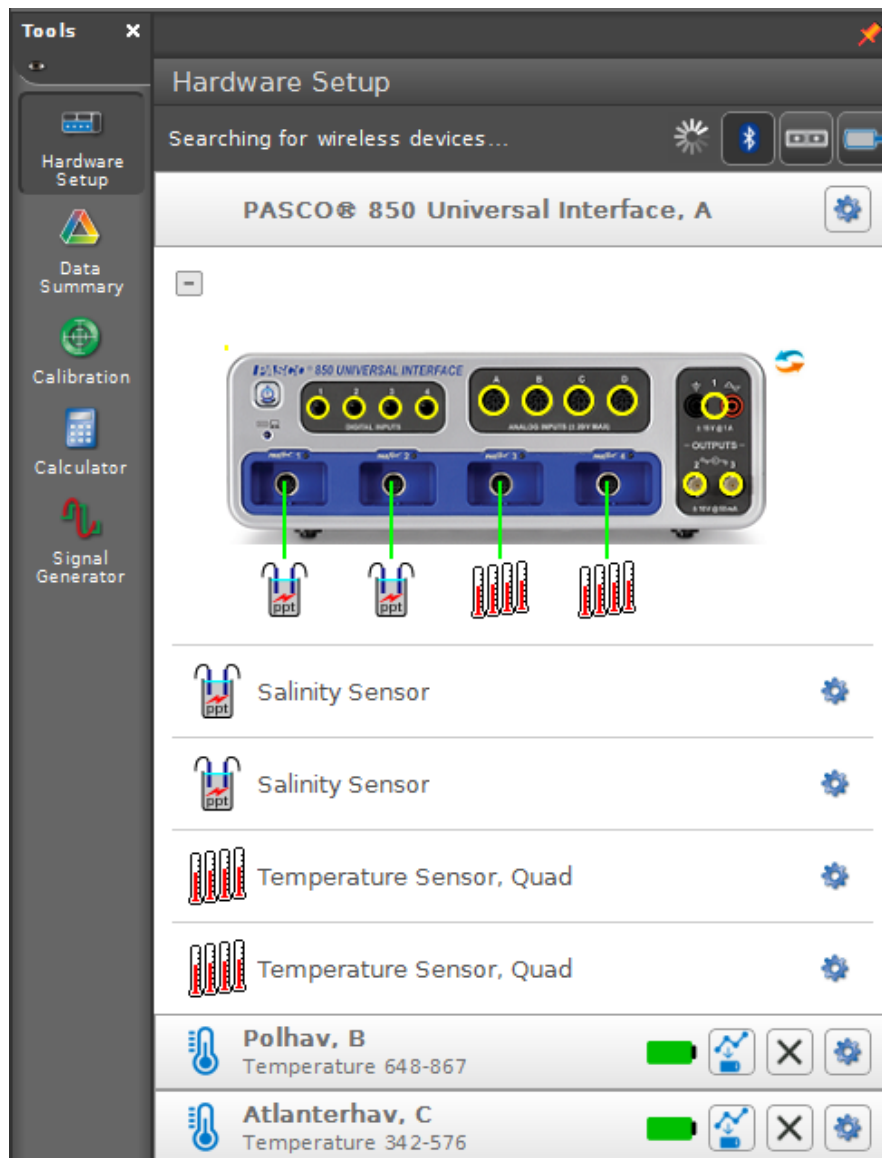
Figur 15: Mal for oppsett av PASCO målinger

Skru på PASCO-huben og de trådløse temperatursensorene. Neste steg er å koble sensorene til programvaren. Dette gjøres ved å trykke på "Hardware Setup" øverste til venstre i startvinduet (se rød sirkel). Her kommer det opp et vindu som gir en oversikt over alle sensorene. Se bilde under.



Figur 16: Kommunikasjonsvindu i «Capstone» for tilkøpling av PASCO sensorer

Alle de kablete sensorene tilkoblet PASCO-huben kommer automatisk opp i oversikten. For å søke etter de trådløse sensorene må Bluetooth-ikonet, merket i rød sirkel, aktiviseres. Polhav, B og Atlanterhav, C kommer opp med gule varselrekanter og må manuelt tilkobles. Her er det viktig å først velge "Temperature 648-867", deretter "Temperature 342-576". På den måten kobles riktig navn og riktig sensor i sammen. Se nytt bilde under. Alle sensorene er tilkoblet.



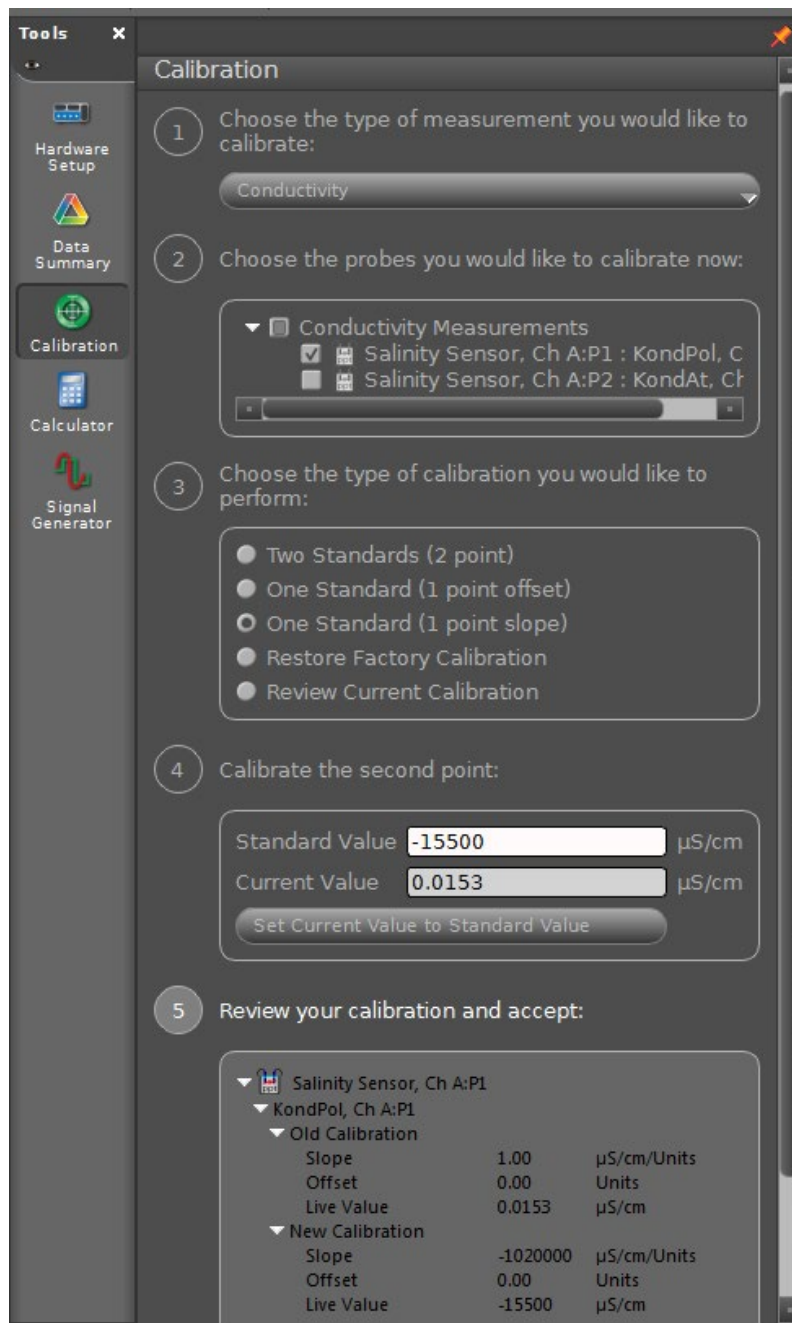
Figur 17: Kommunikasjonsvindu i «Capstone» for tilkøpling av trådløse PASCO temperatur sensorer

Før logging kan igangsettes må konduktivitetsmålerne kalibreres mot Mettler Toledo. Se avsnittet for hvordan [korrelasjonen](#) er utarbeidet. Først steg er å trykke "Record" i hovedvinduet. Dette må gjøres for å hente ut kalibreringsdata. Deretter velges det grønne

ikonet "Calibration" i venstre hjørne i Capstone. Merk at begge målerne må kalibreres. Les av temperaturverdien for den aktuelle måleren. Denne settes så inn i følgende formel:

$$y = 1016.1 * x + 26468$$

y er output konduktivitet i uS/cm (mikrosiemens). x er avmålt temperaturverdi i Celsius. y settes inn i boksen "Standard Value". Prosedyren er beskrevet videre i bildet under.



Velg "conductivity"

Velg en av sensorene

Velg "One Standard (1 point slope)"

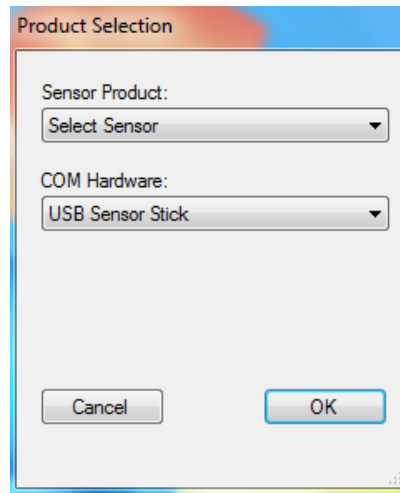
Sett beregnet verdi fra formel gitt over inn som "Standard Value". Klikk deretter "Set Current Value to Standard Value"

Klikk "Finish" i bunn av vinduet. Repeter stegene ovenfor for sensor

Figur 18: Kommunikasjonsvindu i «Capstone» for å bestemme kalibreringskorrelasjon mellom Mettler Toledo (referanse) og Pasco målere.

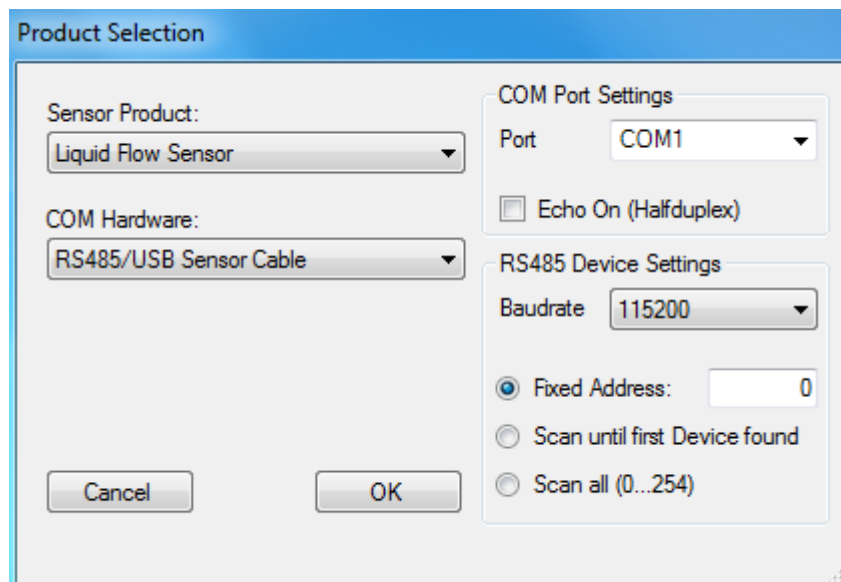
Oppsett av Sensirion

Koble Sensirion flowmetre til sine respektive PC-er. Åpne programmet "USB RS485 Sensor Viewer". Du vil bli møtt med vinduet "Product Selection".



Figur 19: Oppsett for kommunikasjon med Sensirion flowmetere.

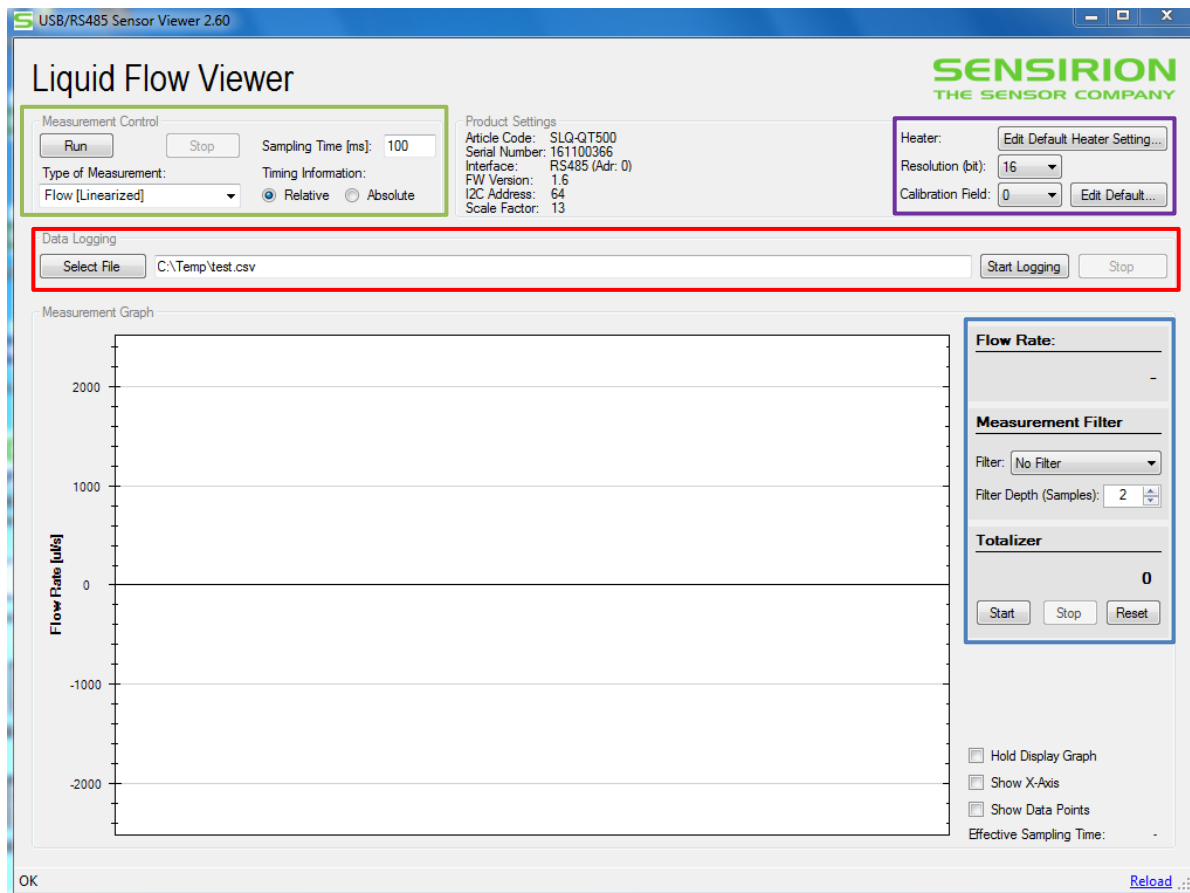
Velg "Liquid Flow Sensor" under nedtrekksmenyen under "Sensor Product". Velg "485/USB Sensor Cable" under "COM Hardware". Deretter blir du møtt med et utvidet vindu av "Product Selection". Se bilde under.



Figur 20: Valg av COM porter for Sensirion flowmetere.

I nedtrekksmenyen under "COM Port Settings" må du velge porten som samsvarer med tilkoblet sensor. Klikk "OK". Feilmeldingen "Sensor cable not found" betyr at valgt port er

feil. Velg en COM port som til slutt tar deg til neste vindu, "Liquid Flow Viewer". Når tilkoplingen er etablert starter kommunikasjonsprogrammet som vist i figur 23, under.



Figur 21: Sensirion kommunikasjonsprogrammet etter at kontakt med sensoren er etablert. Det kan velges fil for lagring, samt loggeparametere. Loggerparametere inkluderer oppløsning (bit), kalibreringsdata - væsketype, instantan strømningsrate og kumulativ volumstrøm kan velges, samt filtre for midling.

Følgende innstillinger brukes (grønn og lilla firkant):

- Sampling Time (ms): 100
 - Dette tilsvarer en målefrekvens på 10Hz, eller 10 målinger per sekund.
- Timing Information: Relative
- Type of Measurement: Flow [Linearized]
- Heater: Default
- Resolution (bit): 16
- Calibration Field: 0 (Default)

NB! Det er viktig å spesifisere logge-fil ved å klikke på "Select File" i rød firkant. Velg ønsket plassering av datafil.

Klikk på "Run" i grønn firkant. Da er måleren i gang. Klikk på "Start Logging" i rød firkant for å registrere og lagre målte verdier i ønsket logge-fil.

Kjekt å vite (blå firkant):

- "Flow Rate" viser målte verdier i real-time i $\mu\text{l/s}$.
- "Measurement Filter" aktiverer glidende gjennomsnitt filter.
- "Totalizer" viser real-time akkumulert væskegjennomstrømning etter denne funksjonen startes.
 - NB! Denne verdien registreres ikke i logge-filen.

Bruk av Mettler Toledo konduktivitetmåler

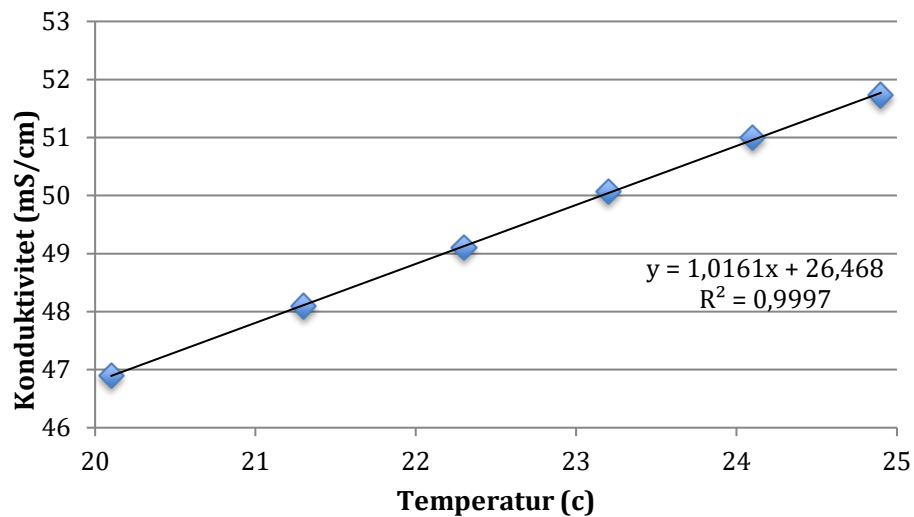
Denne er noe lettere å sette i gang. Den krever ikke tilkobling til PC da den er et eget måleinstrument med innebygd grensesnitt mot måleproben. For å bruke måleren må strøm og aktuell måleprobe kobles til. Deretter kalibreres proben mot en standard referansevæske, for eksempel 12.88 mS/cm (ved 25C) til Mettler Toledo. Referansevæsken helles opp i et lite reagensrør som proben passer oppi. Proben føres ned i væsken, og kalibreringen igangsettes ved å trykke på "Cal" (blå/lilla knapp). Påse at korrekt referansevæske er valgt i grensesnittet. Maskinen tar hensyn til væsketemperaturen og regner seg frem til målt verdi ved 25C. Eventuelle avvik her kompenseres med en cellekonstant.

For å kontrollere at proben må kalibreres, kjøres en "Read"-måling av kalibreringsvæsken ved gitt temperatur. Det er printet en egen tabell på posen til referansevæsken som viser forholdet mellom konduktivitet og temperatur. Dersom målt verdi er innenfor 2% av referansevæskens konduktivitet ved samme temperatur, er kalibrering ikke nødvendig.

Proben må renses i destillert vann før og etter alle målinger.

Korrelasjon mellom Mettler Toledo konduktivitetsmåler og testvæske

Ettersom PASCO konduktivitetsmålerne må kalibreres før hver test inni rørsystemet, er det laget en korrelasjon på testvæsken (35 ppt ved 25C) mot Mettler Toledo. Konduktiviteten i testvæsken er målt av Mettler Toledo ved flere temperaturer i intervallet 20 til 25C. Konduktiviteten ved hvert temperatursteg er basert på gjennomsnittet av tre målinger. Følgende graf og sammenheng er vist under.



Figur 22: Mettler Toledo kalibrering av konduktivitet som funksjon av temperatur

Kapittel 8: Håndtering av testvæske

Blanding av saltvann

Følgende prosedyre blir brukt for å få ønsket salinitet på 15L med testvæske:

- En 5L kolbe blir fylt opp tre ganger for å få ønsket mengde testvæske
- Mål opp 33,03 g bordsalt per liter springvann. Dette tilsvarer 165,15g per 5L kolbe.
- Tilsett saltet gjennom trakt + rør i 5L kolben
- Fyll springvann til cirka halvveis i kolben
- Rist og bland innholdet i kolben
- Fyll opp resten av kolben
- Topp av siste rest kontrollert med et lite begerglass
- Repeter tre ganger
- Væsken lagres i en 10L bøtte og en 5L kolbe frem til det overføres til rørsystemet

Påfylling av saltvann

Ferdigblandet saltvann føres manuelt over til rørsystemet ved hjelp av et 500ml begerglass. En fremtidig løsning kan være å installere en pumpe. For å unngå fanget luft i nedre tverrligger og flowmeter, er det viktig å følge prosedyrene for fullskalatester når saltvannet fylles på rørsystemet.

Tømming og rens

En stor vannslange kobles til 3-veis ventilen og føres ned i sluk. Ventilen åpnes slik at vanninnholdet i rørsystemet renner ut gjennom vannslangen, og ned i sluk. Ventilen stenges, og rørsystemet fylles opp med ferskvann fra en egen vannslange. Ventilen åpnes på nytt når rørsystemet er fylt opp med ferskvann, og vannet renner ut i sluk. Dette gjentas 2-3 ganger, eller mer ved behov.

Med jevne mellomrom renses karene i Julabo varmevekslerne med nytt ferskvann.

REFERANSER

(Ikke komplett)

- 1) NORTH projektet: <https://bjerknes.uib.no/om/fakta-partnere-og-deltakere>
- 2) Stommel model notes (Eli):
<https://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/EPS281r/Sources/Thermohaline-circulation/2-THC-Stommel-model-notes.pdf>
- 3) Climate Dynamics (lecture 10):
https://courses.seas.harvard.edu/climate/eli/Courses/EPS281r/Sources/Thermohaline-circulation/more/www.phys.uu.nl_nydeden-lecture10ClimDyn2006-Stommel-slides.pdf
- 4) Lambert E, Eldevik T, Haugan PM. How northern freshwater input can stabilise thermohaline circulation. Tellus. Series A, Dynamic meteorology and oceanography. 2016;68(1):31051 – <http://bora.uib.no/handle/1956/16217>
- 5) Modeling the Thermohaline Circulation:
<http://www3.geosc.psu.edu/~dmb53/DaveSTELLA/THC%20model.pdf>
- 6) Henry Stommel (1961): “Thermohaline Convection with Two Stable Regimes of Flow”, Tellus, 13:2, 224-230, DOI: 10.3402/tellusa.v13i2.9491. To link to this article: <https://doi.org/10.3402/tellusa.v13i>
- 7) Rahmstorf: “Simple Theoretical Model May Explain Apparent Climate Instability”, 1999 American Meteorological Society http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Journals/rahmstorf_ganopolski_jclim99.pdf
- 8) Lecture 22. Conceptual models for the thermohaline circulation
<http://www.whoi.edu/science/po/people/rhuang/Lecture/22ThcC.pdf>