

**Institutt for bygg- og energiteknikk — Energi og miljø i bygg**

Postadresse: Postboks 4 St. Olavs plass, 0130 Oslo

Besøksadresse: Pilestredet 35, Oslo

Webside: [www.oslomet.no](http://www.oslomet.no)**MASTEROPPGAVE**

OPPGAVENS TITTEL: <b>Oppsett for kalibrering med en vindtunnel på benk</b>	DATO: 25.05.2023
	ANTALL SIDER OG VEDLEGG: 60/7
FORFATTERE: Artin Amjadi	VEILEDER: Peter Schild

UTFØRT I SAMARBEID MED: OsloMet	KONTAKTPERSON: Peter Schild
------------------------------------	--------------------------------

KORT SAMMENDRAG: Denne masteroppgaven diskuterer den metodiske prosessen for å kalibrere en vindtunnel på benk for kalibreringsformål. Studien undersøker de ulike faktorene involvert for drift av en vindtunnel som funksjonalitet, parametere og nødvendige måleinstrumenter. Forskningen fordyper seg også i feilsøking og vedlikeholds praksis ved å integrere standarder. Til slutt er det en analyse av resultatene, og diskusjon av potensielle bruksområder og eventuelle forbedringer av vindtunnelen.
NØKKEWORD (en per linje): Vindtunnel Kalibrering Måleinstrumenter Vindmåler

# Oppgavetekst

Fiks ferdig oppgavetekst: Vindtunnel for kalibrering av hastighetsfølere, lage et oppsett for kalibrering til instituttet. Oppsettet skal bestå av:

- Et dokument som beskriver trinn-for-trinn hvordan man gjennomfører en kalibrering, samt drift/vedlikehold av vindtunnelen
- Et tilhørende regneark som kan brukes til kalibrering, med formler for å beregne korrekt lufthastighet som funksjon av målt trykk, og evt. korreksjon for luftens densitet
- Lage/bygge en stativ for å holde hastighetsfølere fast til riggen.

## Nøkkelinformasjon

**Tittel:** Oppsett for kalibrering med en vindtunnel på benk

**English title:** Set up for calibration with a bench top wind tunnel

**Hovedveileder:** Peter Schild

**Samarbeid/biveileder:** OsloMet

## Bakgrunn

OsloMet eier en vindtunnel på benk for kalibrering av hastighetsfølere som aldri har benyttet, og det ønskes at det skal dannes et oppsett for dette måleinstrumentet som instituttet kan ta i bruk.

## Mål

- Hvordan kan ulike ytelses parametere for vindtunnelen, som for eksempel strømningshastighet, temperatur og atmosfærisk trykk bli målt så nøyaktig som mulig?
- Hva er de viktigste trinnene og metodene i utviklingen av en systematisk kalibreringsprosedyre for vindtunnel på benk?
- Hvordan kan kalibreringsprosessen, inkludert detaljerte metoder, eksperimentelle resultater og analyse, dokumenteres for å gjøre vedlikehold og fremtidige kalibreringer enkle?
- Hvordan sammenligner måleresultater fra kalibreringen i forhold til etablerte standarder og retningslinjer?
- Hvilke endringer er eventuelt nødvendige for å forbedre vindtunnelens ytelse, og hvordan kan effektiviteten verifiseres med ytterligere kalibreringseksperimenter?

## Metode / Arbeidsoppgaver

- Lag en oversikt over hvilke modeller av hastighetsfølere vi ønsker å kalibrere
- Skal trykk og temp korrigeres i Swema 3000?
- Hva slags hastighet er det Swema 3000 viser? Standard- eller sann hastighet?
- Må vi ta hensyn til Swema innstillinger når vi kalibrerer?
- Stativ for hastighetsfølere og prandtlrør
- Hvor ofte skal utstyr kalibreres?
- Kartlegg dokumentasjon for alle instrumentene
- Finnes det noen standarder som vi må følge?
- Regneark, output ligning for korrigering, og standard/korrigert kurve

## Forord

Dette er en avsluttende masteroppgave i masterstudiet «Energi og miljø i bygg» våren 2023 som markerer slutten på utdanningen. Det har vært lærerike år i dette studiet og det var veldig gøy å kunne avslutte med et veldig spennende prosjekt.

Jeg måtte bytte oppgave i slutten av februar, og fikk da muligheten til å skrive denne oppgaven for instituttet. Dette var en veldig interessant oppgave, der jeg fikk jobbe med ulike utstyr og instrumenter som jeg aldri har vært borti før. Jeg håper denne oppgaven gir et bedre innblikk over hvordan man kan sette opp et kalibreringsoppsett med en vindtunnel på benk.

Gjennom denne oppgaven så har jeg lært mye nytt, og fått muligheten til å benytte et veldig unikt måleinstrument, som jeg håper OsloMet får god bruk for.

Jeg ønsker å takke veileder Peter Schild for all veiledning og støtte, videre ønsker jeg å takke Nils Ledermann og Ernst Erik Hempel for all deres hjelp og tilgang de ga meg til blant annet måleinstrumenter, utstyr og lab. Til slutt vil jeg også takke de ansatte hos OsloMet MakerSpace for hjelp som de bisto med.

Artin Amjadi

Oslo, 25. mai 2023

# Sammendrag

Denne masteroppgaven diskuterer den metodiske prosessen med å etablere en TSI 8390 vindtunnel på benk for kalibreringsformål. Studien fokuserer på å sette opp vindtunnelsystemet og undersøke de ulike faktorene som er involvert, inkludert funksjonalitet, kalibreringskrav, nødvendige måleinstrumenter og parametere.

Oppgaven starter med å skissere den grunnleggende teoretiske bakgrunnen knyttet til drift og kalibrering av vindtunnelen. Den fortsetter med å forklare betydningen av kalibrering i sammenheng med luftstrømstudier, spesielt for å sikre nøyaktig og pålitelig generering av eksperimentelle data.

Hoveddelen av forskningen består av en utforskning av trinn-for-trinn prosessen med å sette opp vindtunnelen for kalibrering. Forskeren bruker en rekke måleinstrumenter, inkludert Hitachi SJ200, MKD 220DD, TSI 8495, Q-Trak 7565, VelociCalc 9555-P, Swema 3000md, prandtlrør og vindmålerne TSI 964 og SWA 31. Deretter fremheves funksjonene til disse måleinstrumentene, og spesifiserer hvordan de bidrar til oppsetts- og kalibreringsprosessen. Integreringen av disse instrumentene i kalibreringsprosessen sikrer at vindtunnelens ytelse er nøyaktig og repeterbar, og gir en stabil plattform for fremtidig studie og forskning.

Spesifikke kalibreringsprosedyrer er beskrevet i detalj, og viser hvordan disse verktøyene måler strømningshastighet, temperatur, og atmosfærisk trykk. Bruken av Q-Trak, VelociCalc og Swema 3000md for å måle atmosfærisk trykk, TSI 964 og SWA 31 for å måle hastighet og temperatur, prandtlrør for hastighetsmåling, MKD 220DD og TSI 8495 for måling av differensialtrykk er alle diskutert.

I tillegg fordyper forskningen seg i feilsøking og vedlikeholds praksis ved å blant annet integrere bruk av standarder. Dette inkluderer de nødvendige forholdsreglene som må tas, vanlige problemer som kan oppstå ved bruk av vindtunnelen, og foreslåtte løsninger for å løse problemene. En hel del er dedikert til analyse og tolkning av kalibreringsresultatene.

De avsluttende delene av oppgaven fokuserer på potensielle bruksområder og fremtidige forbedringer av vindtunnelen. Studien understreker de brede anvendelsene av kalibrerte vindtunneler, og hvordan kunnskapen oppnådd fra denne forskningen kan være til nytte for disse feltene. Denne oppgaven bidrar ikke kun til en dypere forståelse av oppsett og kalibrering av vindtunnel på benk, men legger også et grunnlag for videre forskning på dette området. Den systematiske tilnærmingen til kalibrering gir en referanse for fremtidig oppsett, og fremmer nøyaktighet og repeterbarhet i eksperimentelle prosesser.

# English Summary

This master's thesis discusses the methodological process of establishing a TSI 8390 wind tunnel on a bench for calibration purposes. The study focuses on setting up the wind tunnel system and investigating the several factors involved, including functionality, calibration requirements, required measuring instruments and parameters.

The assignment starts by outlining the basic theoretical background related to operation and calibration of the wind tunnel. It goes on to explain the importance of calibration in the context of airflow studies, particularly to ensure accurate and reliable generation of experimental data.

The main part of the research consists of an exploration of the step-by-step process of setting up the wind tunnel for calibration. The researcher uses a variety of measuring instruments, including the Hitachi SJ200, MKD 220DD, TSI 8495, Q-Trak 7565, VelociCalc 9555-P, Swema 3000md, prandtl tubes, and the anemometers TSI 964 and SWA 31. The functions of these measuring instruments are then highlighted, specifying how they contribute to the setup and calibration process. The integration of these instruments into the calibration process ensures that the wind tunnel's performance is accurate and repeatable and provides a stable platform for future study and research.

Specific calibration procedures are described in detail, showing how these tools measure flow rate, temperature, and atmospheric pressure. The use of Q-Trak, VelociCalc and Swema 3000md to measure atmospheric pressure, TSI 964 and SWA 31 to measure velocity and temperature, prandtl tube for velocity measurement, MKD 220DD and TSI 8495 for measuring differential pressure are all discussed.

In addition, the research delves into troubleshooting and maintenance practices by, among other things, integrating the use of standards. This includes the necessary precautions that must be taken, common problems that may arise when using the wind tunnel, and suggested solutions to solve the problems. A whole section is dedicated to the analysis and interpretation of the calibration results.

The final parts of the thesis focus on potential areas of use and future improvements of the wind tunnel. The study emphasizes the broad applications of calibrated wind tunnels, and how the knowledge gained from this research can benefit these fields. This thesis not only contributes to a deeper understanding of the set-up and calibration of wind tunnels on a bench, but also lays a foundation for further research in this area. The systematic approach to calibration provides a reference for future setup and promotes accuracy and repeatability in experimental processes.

# Innhold

Oppgavetekst .....	ii
Nøkkelinformasjon .....	ii
Bakgrunn .....	ii
Mål .....	ii
Metode / Arbeidsoppgaver .....	iii
Forord .....	iv
Sammendrag .....	v
English Summary .....	vi
Innhold .....	vii
1 Introduksjon .....	1
1.1 Formål .....	1
1.2 Problemstilling .....	1
1.3 Rapportens oppbygning .....	2
2 Vindtunnel på benk .....	3
3 Bakgrunn og teori .....	5
3.1 Litteratursøk på lignende løsninger .....	5
3.2 Relevante standarder .....	6
3.3 Viktige parametere .....	8
3.4 Instrumenter og utstyr .....	12
3.5 Måleusikkerhet .....	23
3.6 Hvor ofte skal de ulike instrumentene og utstyrene kalibreres? .....	25
4 Metoder og materialer .....	27
4.1 Drift og oppsett av kalibreringsriggen .....	27
4.2 Feilsøking av vindtunnelen .....	31
4.3 Rutine for gjennomføring av en enkelt kalibrering .....	32
4.4 Ytelses verifisering av vindtunnelen .....	35
4.5 Datainnsamling og analyse .....	39
4.6 Begrensninger og avgrensninger .....	40
5 Resultater og diskusjon .....	41
5.1 Presentasjon av resultater .....	41
5.2 Diskusjon av resultater .....	56
6 Konklusjoner .....	60
6.1 Hovedfunn .....	60
6.2 Videre forskning .....	60
Referanser .....	61
VEDLEGG .....	63
Vedlegg A – TSI dokumentasjoner .....	63
Vedlegg B – Swema dokumentasjoner .....	73
Vedlegg C – Almemo dokumentasjoner .....	75
Vedlegg D – Hitachi SJ200 .....	77
Vedlegg E – MKS 220DD .....	78
Vedlegg F – Pitotrør .....	80

Vedlegg G – Excel ark..... 81



# 1 Introduksjon

## 1.1 Formål

Formålet med denne masteroppgaven er å lage et kalibrerings oppsett med en TSI 8390 vindtunnel på benk som kan bli tatt til bruk i OsloMet. Dette er et høypresisjonsinstrument for måling av turbulens og væskehastighet. Kalibreringsprosessen, inkludert detaljerte metoder, resultater og analyser, skal dokumenteres for å gjøre det lettere å vedlikeholde vindtunnelen og eventuelt gjøre fremtidige kalibreringer. Den valgte vindtunnelen skal brukes av blant annet studenter og ingeniører på OsloMet til ulike eksperimentelle forskningsprosjekter, som for eksempel ventilasjonsforsøk eller kalibrering av hastighetsfølere. Den vellykkede kalibreringen av denne vindtunnelen skal sikre at OsloMet sin forskningsinnsats er basert på nøyaktig og pålitelige data, noe som til slutt fører til utvikling av nye og effektive løsninger for energi- og miljøutfordringer. Vindtunnelen skal kalibreres med trykk og hastigheter fra 0,15 meter per sekund (m/s) opptil 20 m/s. Vindtunnelen yter opp til 45 m/s, men etter diskusjon med veileder, så er det viktigste at den fungerer optimalt opptil 20 m/s. Den ble likevel testet opptil 45 m/s med prandtl rør.

Kalibreringsprosessen involver justering og validering av vindtunnelens ytelse når det kommer til strømningsuniformitet, strømningshastighet og turbulensintensitet. Ved hjelp av forskjellige måleinstrumenter skal ulike parameterne måles med høy nøyaktighet og presisjon. Videre skal de ulike resultatene av målingene sammenlignes med etablerte standarder og retningslinjer for å forsikre at vindtunnelen fungerer innenfor et akseptabelt usikkerhetsområde.

## 1.2 Problemstilling

Oppgaven har følgende problemstillinger som vi ønsker å finne svar på:

- Hvordan kan ulike ytelses parametere for vindtunnelen, som for eksempel strømningshastighet, temperatur og atmosfærisk trykk bli målt så nøyaktig som mulig?
- Hva er de viktigste trinnene og metodene i utviklingen av en systematisk kalibreringsprosedyre for vindtunnel på benk?
- Hvordan kan kalibreringsprosessen, inkludert detaljerte metoder, eksperimentelle resultater og analyse, dokumenteres for å gjøre vedlikehold og fremtidige kalibreringer enkle?
- Hvordan sammenligner måleresultater fra kalibreringen i forhold til etablerte standarder og retningslinjer?
- Hvilke endringer er eventuelt nødvendige for å forbedre vindtunnelens ytelse, og hvordan kan effektiviteten verifiseres med ytterligere kalibreringseksperimenter?

### 1.3 Rapportens oppbygning

I kapitlet «*Vindtunnel på benk*» så er det skrevet litt om hva en vindtunnel på benk er, og i hvilke felt dette instrumentet eventuelt blir brukt i. Dette kapitlet skal gi personen som leser oppgaven et klarere bilde på hva dette måleinstrumentet egentlig er.

I «*Bakgrunn og teori*» kapitlet så er det antatt at leseren har ingen forkunnskaper om de ulike måleinstrumentene og parameterne som blir benyttet ved bruk av en vindtunnel på benk. Her blir de ulike måleinstrumentene beskrevet, også fås det informasjon om de fundamentale parameterne som blir brukt. Det er også skrevet om relevante standarder som gir innsikt i viktige faktorer som måleusikkerhet, vedlikehold, målinger og kalibrering.

I kapitlet «*Metode og materialer*» blir det skrevet trinn-for-trinn om hvordan det utvikles en systematisk kalibreringsprosedyre for vindtunnel på benk, slik at resultatet kan reproduseres av andre. Det er også skrevet om drift og vedlikehold av vindtunnelen, samt begrensinger og avgrensinger i denne oppgaven.

Kapitlet «*Resultater og diskusjon*» er delt opp i 2, der den første delen presenterer resultatene i eksperimentet med grafer og tabeller, og den andre delen diskuterer resultatene kritisk.

Til slutt kommer «*Konklusjon*» som kort beskriver hovedfunn i denne oppgaven og forbedringspotensiale ved videre forskning.

## 2 Vindtunnel på benk

Den økende etterspørsel etter energieffektive og bærekraftige løsninger innen energi og miljø har ført til et økende behov for presis eksperimentell forskning. Et av de viktigste forskningsverktøyene på dette området er vindtunnelen, som lar forskere studere oppførselen til væskestrømmer i ulike applikasjoner som aerodynamikk, ventilasjonssystemer og vindenergi. Ved hjelp av en godt kalibrert vindtunnel sikres det pålitelighet og repeterbarhet til eksperimentelle resultater, og gir et solid grunnlag for fremtidig forskning og utvikling.

En vindtunnel på benk er et nedskalert apparat i laboratoriestørrelse som er designet for å simulere og analysere væskestrømmer i et kontrollert miljø. Ved bruk av en vindtunnel så får ingeniører og forskere muligheten til å studere oppførselen til væskestrømmer og deres interaksjoner med ulike objekter eller systemer. Dette gir verdifull innsikt i de aerodynamiske energi- og miljøegenskapene til forskjellige design og prosesser. Hensikten ved vindtunneler på benk er å kunne produsere nøyaktige og pålitelige data, som videre kan benyttes til å optimalisere prosesser, avgrense design og validere teoretiske simuleringer eller modeller (Omega Engineering, 2006).

I en vindtunnel på benk er det flere nøkkelkomponenter. Det inkluderer testseksjonen, hvor objektet av interesse blir plassert, så er det en vifte som enten suger til seg, eller blåser luft, og dette skaper luftstrømmen i vindtunnelen. Deretter er det en serie med enheter som f.eks. skjermer og platedyser som jevner og stabiliserer strømningssegenskaper. Vindtunnelen er vanligvis utstyrt med ulike sensorer og måleinstrumenter, dette kan være alt fra vindmålere til trykktransdusere som skal forsikre at all data tatt ut fra vindtunnelen er så nøyaktig og detaljert som mulig.

Vindtunneler på benk gir et godt fundament når eksperimenter skal utføres under kontrollerte og repeterbare forhold, og er viktig verktøy som hjelper forskere å validere og avgrense sine teoretiske modeller eller beregningssimuleringer. Generelt så er det ikke mange forsknings artikler som handler om vindtunneler, men to relevante artikler viser de ulike bruksområdene som vindtunneler blant annet kan bli brukt til.

I den første artikkelen er det benyttet en modifisert TSI 8390 vindtunnel for å eksperimentere med resuspensjon av støv i en idealisert setting, slik at de kan forstå og studere prosessene som er involvert. Her ble konsentrasjonene av omgivelses- og resuspendert støv målt over tid ved å bruke et fotometer kombinert med vindtunnelen (Loosmore & Hunt, 2000).

I den andre artikkelen brukes det også en modifisert TSI 8390 vindtunnel på benk av US Air Force til å lage en kalibrerings program som blir benyttet til å regelmessig kalibrere vindmålersonder. Her har de ved hjelp av å lage et selv laget automasjons program, veldig nøyaktige sensorer og laser doppler hastighetsmålere, benyttet vindtunnelen til å kalibrere vindmålersonder ved å lage en oppgradert versjon av vindtunnelen (Hardy et al., 2002a).

Disse to artiklene viser at en vindtunnel på benk kan bli benyttet til forskjellig type forskning. I denne oppgaven skal vindtunnelen kalibreres med ulike måleinstrumenter som f.eks. Swema 3000 og Q-Trak 7565, for å lage et oppsett med vindtunnelen for kalibrering. Deretter dannes det en dokumentasjon over formeller med nødvendige parametere, analyse og steg for steg hvordan kalibreringsprosessen er fra start til slutt. Ved å kalibrere og lage et oppsett med en vindtunnel som kan benyttes av studenter og forskere på OsloMet, kan det bidra med engasjement til forskning, finne nye løsninger ved eksperimentering, eller for å kalibrere ulike typer vindmålere.

## **3 Bakgrunn og teori**

### **3.1 Litteratursøk på lignende løsninger**

I denne oppgaven så blir det benyttet en TSI 8390 vindtunnel, men det er noen få alternativer til en TSI 8390 vindtunnel på benk ute på markedet. Vindtunnelen fra TSI er en relativt eldre vindtunnel fra 90-tallet, og noen av alternativene ute på markedet er blant annet ferdig kalibrert, muligens nyere, og kommer i full pakke klar til bruk. To alternativer til vindtunnelen TSI 8390 er vindtunnelen fra Tecquipment og Omega.

#### **3.1.1 Tecquipment**

Tecquipment er et britisk selskap som har sin egen vindtunnel på benk. Dette produktet er nyere i forhold til TSI 8390 vindtunnelen, men prinsippene er hovedsakelig de samme. Dette produktet er allerede en ferdig kalibrert komplett system som er klar til å brukes for aerodynamisk eksperimentering og ulike typer forskning. Produktet kommer også i en rekke modeller med all nødvendig instrumentering inkludert for å gi nøyaktige resultater (TECQUIPMENT, u.å.).

#### **3.1.2 Omega**

Omega er et amerikansk selskap, som også tilbyr et par ulike vindtunneler på benk. Disse vindtunnelene er også ferdige kalibrerte og er klar til bruk. Vindtunnel modellen WT4401-D er ganske lik vindtunnelen TSI 8390, men det tilbys også vindtunneler i enda mindre skala, eller andre vindtunneler som har andre former og fasonger, som kan bli brukt til andre typer eksperimentell forskning (Omega Engineering, u.å.).

## **3.2 Relevante standarder**

Standarder er dokumenterte avtaler som gir retningslinjer, krav eller spesifisering for prosesser, tjenester eller produkter. Disse blir utviklet av ulike organisasjoner som regjeringer, bransjeorganisasjoner og standardiseringsorganer, og blir benyttet for å sikre konsistens, sikkerhet, kvalitet og effektivitet i mange ulike bransjer og applikasjoner (Hofstad, 2022). I denne oppgaven er det brukt et par standarder som er benyttet ved kalibrering av vindtunnel på benk, og disse har vært viktige standarder for å sikre kvalitet og sikkerhet gjennom kalibreringsprosessen.

### **3.2.1 NS-EN 12599:2012**

Dette dokumentet gir retningslinjer for måling av ytelsen til ventilasjonssystemer, inkludert viktige parametere relevant til denne oppgaven som f.eks. temperatur, fuktighet, trykk, luftstrøms hastigheter og lufthastighet. Den spesifiserer også testutstyret og metodene som skal brukes i måleprosessen (Standard Norge, 2013). Selv om denne standarden spesifikt er for ventilasjon i bygninger, så gir den mye relevant informasjon og veiledning som er nyttig i kalibreringsprosessen av vindtunnelen.

### **3.2.2 NS-EN ISO/IEC 17205:2017**

Standarden NS-EN ISO/IEC 17205:2017 spesifiserer generelle krav til testing og kalibreringslaboratoriets kompetanse. Dette dokumentet beskriver kravene til ledelse av laboratorieoperasjoner, kvalifikasjoner til laboratoriepersonell og teknisk kompetanse til laboratoriet når det gjelder gjennomføring av tester og kalibrering. Standarden spesifiserer generelle krav til teknisk kompetanse i lab, inkludert bruk av passende utstyr, kalibreringsprosedyrer og sporbarhet til anerkjente målestokker (Standard Norge, 2018). I henhold til kalibrering av vindtunnelen, er det viktig å overholde denne standarden for å sikre nødvendig kompetanse og ekspertise for å utføre kalibreringen nøyaktig og pålitelig, samt opprettholde utstyrs vedlikehold. Ved å overholde denne standarden bidrar det til at måleresultater er mer pålitelige for all forskning og testing ved bruk av vindtunnelen og relevante måleinstrumenter.

### **3.2.3 NS-EN 16211:2015**

Denne standarden spesifiserer målemetodene for å bestemme luftstrømninger i bygninger, og gir veiledning på hvordan det er mulig å måle ventilasjonsluftstrømningene innenfor en bygning eller deler av den (Standard Norge, 2015). Dette er relevant for kalibrering av vindtunnel siden den gir veiledning for måling av luftstrømmer, inkludert instrumentering og ulike målemetoder for å få resultater som er nøyaktig og troverdig. Ved hjelp av veiledningen i denne standarden er det mulig å

ta informerte beslutninger om bygningsdesign, ventilasjonssystemets ytelse og energieffektivitet. Standarden kan benyttes som en referanse for å velge passende målemetoder og utstyr, og samtidig kunne evaluere måleresultater og måleusikkerhet i vindtunnelen.

### **3.2.4 NS-EN ISO 7726:2001**

NS-EN ISO 7726:2001 er en standard som gir retningslinjer angående måling av termisk miljø. Standarden gir en metodikk for å måle varmebelastning på mennesker ved hjelp av fysiologiske målinger som f.eks. kroppstemperatur, hjerterefrekvens, svetteproduksjon og blodtrykk (Standard Norge, 2001). Denne standarden er relevant for kalibrering av vindtunnel siden den gir en veiledning for å måle varmebelastningen på mennesker under forskjellige termiske forhold. Ved å benytte denne standarden og forstå hvordan ulike faktorer som lufttemperatur, lufthastighet, luftstrøms hastighet og luftfuktighet påvirker menneskers komfort, kan vindtunnelen benyttes til å teste og optimalisere blant annet ventilasjonssystemer for å forbedre menneskers termiske komfort.

### **3.2.5 NS-EN ISO 7730:2005**

NS-EN ISO 7730 gir retningslinjer for å måle termisk komfort i innendørs ved hjelp av indeksene Predicted Mean Vote (PMV) og Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD). PMV-indeksen er en måling av hvordan en person opplever de termiske omstendighetene basert på faktorer som lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, lufthastighet, fuktighet og klesisolering. PPD-indeksen er en måling av basert på prosentandelen personer som er misfornøyd med det termiske miljøet (Standard Norge, 2006). Denne standarden er viktig med tanke på kalibrering av vindtunnelen siden den gir relevant veiledning for måling av lufthastighet, lufttemperatur og middelstrålingstemperatur, som er viktige parametere ved simulering av innendørsmiljøer i vindtunnelen. Ved å måle disse parameterne nøye, kan vindtunnelen benyttes til å teste ytelsen av ventilasjonssystemet, termisk isolasjonsmateriale og andre bygningskomponenter under ulike termiske forhold

### 3.3 Viktige parametere

#### 3.3.1 Ideell gass

Temperatur og trykk er to viktige parametere som er nødvendig for å kunne gjøre nøyaktige målinger på lufthastighet inni en vind tunnelen. Derfor er det strengt tatt nødvendig for å finne nøyaktige målinger for disse to parameterne for å få korrekt lufthastighet. For å få en dypere forståelse for hvorfor, så er det viktig å forstå fysikken til lufthastighet. I tillegg til energiutvekslinger, så er også mengden momentum overført til luften. Kollisjoner med de ulike flatene i veggene fører til at luft påvirker veggene, og dette er luft trykk. Når temperatur økes så øker hastigheten til molekylene tilsvarende, som igjen fører til flere kollisjoner med veggene. Dette fører til at trykket i veggene økes. Ved hjelp av tilstandsligningen for ideell gass, gis det et overblikk over hvordan trykk og temperatur henger sammen i tillegg til volum og antall molekyler (Swegon, u.å.). Tilstandsligningen for ideell gass er visst i formel 1.

$$PV = nRT$$

*Formel 1: Tilstandsligning for ideell gass*

Der:

**$P = \text{Trykk}$**

**$V = \text{Volum}$**

**$n = \text{antall mol av gassen}$**

**$R = \text{universielle gasskonstanten } 8,314 \frac{J}{\text{mol} \times K}$**

**$T = \text{Temperatur}$**

(Pedersen, 2022).

#### 3.3.2 Temperatur

Temperatur kan beskrives som et mål for hvor kaldt eller varmt det er. Mer nøyaktig er det også en egenskap ved et materiale som sier noe om hvilken retning energi overføres når en gjenstand er i kontakt med en annen gjenstand. Gjenstanden som har høyest temperatur er den som overfører energien. Temperatur blir vanligvis oppgitt i 3 ulike temperaturskalaer. Den mest vanlige er grader Celsius (C), deretter finnes det også fahrenheit (F) og kelvin(K) som er mest vanlig ved vitenskapelig arbeid. Temperaturen kan måles med et termometer (Pedersen, 2020).



### 3.3.3 Atmosfærisk trykk

Lufttrykk eller atmosfærisk trykk beskrives som luftens hydrostatiske trykk på et spesifikt sted i jordens atmosfære. Varmerbevegelse i luftmolekylene er det som skaper dette trykket, og fra et punkt er lufttrykket uniform. Lufttrykket forteller mye om bevegelsene i atmosfæren, vinden og diverse lignende detaljer (Harstveit et al., 2023). Atmosfærisk trykk er nødvendig for å kunne gjøre nøyaktige målinger på hastigheten i vindtunnelen, derfor benyttes det enten en barometer (f.eks. Swema 3000md) for automatisk beregning, eller data fra Metrologisk institutt for å finne dynamisk data på atmosfærisk trykk gitt time for time som oppgis i hPa, for å gjøre en manuell beregning. Værdata for lufttemperatur og lufttrykk på stasjonsnivå blir benyttet til å finne trykket som funksjon av høyde, og dermed brukes *Formel 2: barometrisk formel*.

$$P = P_b \left[ \frac{T_b + (h - h_b)L_b}{T_b} \right]^{-\frac{g_0 M}{R * L_b}}$$

*Formel 2: barometrisk formel*

Der:

***P = trykk som funksjon av høyde***

***T<sub>b</sub> = Referanse temperatur, i dette tilfelle ved stasjonsnivå [K]***

***L<sub>b</sub> = Temperatur lapse rate  $\left[\frac{K}{m}\right]$***

***h = høyden hvor trykk er kalkulert [m]***

***h<sub>b</sub> = høyden på referanse høyde, i dette tilfelle stasjonsnivå [m]***

***R = unversiell gass konstant:  $8,3144598 \frac{J}{(mol * K)}$***

***g<sub>0</sub> = tyngdekraft:  $9,80665 \frac{m}{s^2}$***

***M = molar masse av jordens luft:  $0,0289644 \frac{kg}{mol}$***

(«Barometric formula», 2023).

### 3.3.4 Relativ fuktighet

Relativ fuktighet (RF) kan beskrives som forholdet mellom absolutt luftfuktighet, og luftfuktigheten det må til for å få en metning ved en gitt temperatur. RF blir oppgitt i prosent, der luft som er helt mettet med vanndamp har en RF-verdi på 100% (Samuelson, 2021). I henhold til NS-EN 12599:2012 6.4.6, så gir målingene av luftfuktighet i et rom informasjon om luftfuktings- eller avfuktingsfunksjonen til systemet. Generelt sett, så er det mest vanlig å måle relativ fuktighet, men

det er også mulig å beregne absolutt luftfuktighet. Dersom absolutt fuktighet skal beregnes, er det en nødvendighet å måle lufttemperaturen på samme område. For å måle fuktighet så brukes det instrumenter som hygrometer eller psykrometer. Standarden NS-EN 12599:2012 sier også noe om at det er viktig å sjekke, rengjøre og kalibrere hygrometre regelmessig for nøyaktige målinger (Standard Norge, 2012). I henhold til vindtunnelen i denne oppgaven, så blir relativ fuktighet målt med måleinstrumentet Q-Trak 7565.

### 3.3.5 Korreksjonsfaktor for lufttetthet

Korreksjonsfaktor for lufttetthet er nødvendig når luftfart i en vindtunnel beregnes på grunn av effektene av temperatur, trykk og fuktighet på lufttettheten. Lufttetthet er en nøkkelparameter i fluiddynamikk og spiller en betydelig rolle i luftstrømmens oppførsel. Lufttettheten minker med en økning i temperatur eller en reduksjon i trykk. Luftfuktighet påvirker også lufttettheten. Tørr luft er tettere enn fuktig luft ved samme temperatur og trykk (Samuelsen et al., 2022).

I en vindtunnel brukes det typisk kontinuitetsprinsippet og Bernoullis ligning for å bestemme luftfarten. Begge disse er avhengig av luftens tetthet. Ved endringer i lufttettheten grunnet variasjoner i temperatur, trykk eller fuktighet kan det dermed oppstå unøyaktige beregninger av luftfarten dersom det ikke blir tatt hensyn til.

$$\rho = \text{luft tetthet} = 1,293 \times \frac{B \times 273}{1013 \times (273 + t)}$$

***B = atmosfærisk trykk (standard verdi på 1013 hPa)***

***t = Luft temperatur °C (standard verdi på 20 °C)***

*Formel 3: lufttetthet*

(Swema AB, u.å.).

Korreksjonsfaktoren hjelper med å justere for endringene i lufttetthet. Ved å bruke denne faktoren kan det sikres at den beregnede eller målte lufthastigheten i vindtunnelen gjenspeiler forholdene inni, noe som gir mer troverdige og nøyaktige resultater. Korreksjonsfaktoren som blir benyttet i denne oppgaven ved hastighetsmåling i vindtunnelen, er en korreksjonsfaktor som er oppgitt av leverandøren av vindtunnelen, og er basert på parameterne temperatur og barometrisk trykk. Formelen for korreksjonsfaktor er vist i Formel 4: Korreksjonsfaktor

$$\text{Korreksjonsfaktor} = K = \frac{760}{P} \times \frac{273,15 + t}{294,25}$$

***der t = temperatur [°C] og P = barometrisk trykk [mm of Hg]***

*Formel 4: Korreksjonsfaktor*

(TSI Incorporated, u.å.).

### 3.3.6 Lufthastighet og luftstrømhastighet

Luftmolekyler forflytter seg i ulike retninger med forskjellige hastigheter, og kolliderer mer eller mindre tilfeldig med hverandre. Ved standard trykk og temperaturer er det smart å tenke på luft som molekyler istedenfor et medium eller kontinuum. Når en slik tilnærming gjøres, så må fysiske dimensjoner som trykk, hastighet og temperatur defineres. I den sammenheng, så er lufthastighet definert som den masseveide gjennomsnittshastigheten til molekylene i lufta. I ingeniørfag og fysikk er lufthastighet en viktig parameter som brukes til å beskrive egenskapene til ulike applikasjoner som ventilasjon, oppvarming, klimaanlegg, aerodynamikk og væskedynamikk (Swegon, u.å.).

For denne oppgaven så er målinger av luftstrømhastighet og lufthastighet relevant og viktig. I standarden NS-EN 12599:2012 punkt 6.4.2 og 6.4.4, er det mulig å få informasjon på hvordan disse verdiene blir funnet. For å finne luftstrømhastighet er det mulig å benytte seg av ulike metoder, men vanligvis er det kalkulert med lufthastigheten og tilsvarende tverrsnitt. I dette tilfelle er tverrsnittet det er snakk om inngangssonen og testsonen til vindtunnelen. Lufthastigheten kan måles ved å bruke en vindmåler, Prandtl-rør eller ved å måle et trykkfall over en strupeanordning.

Luftstrømhastighet bør måles ved et passende tverrsnitt av en kanal. Grunnen til det er fordi at lufthastighet sjeldent er en jevn verdi. Derfor er det logisk å måle på et par passende antall områder og deretter beregne det med en gjennomsnittshastighet.

Lufthastighet varierer fra sted til sted i et rom. Disse variasjonene er tilfeldige med hensyn til både størrelse og retning. Dette gjør det komplisert å måle en nøyaktig måling av lufthastigheten. Det er generelt tilstrekkelig å måle gjennomsnittlig lufthastighet ved utvalgte posisjoner. I rom opptil 20 m<sup>2</sup> gulvareal er det nok med en måleposisjon. I større rom bør det gjøres målinger ved okkuperte soner der det kan forventes høyere lufthastigheter (Standard Norge, 2012).

## 3.4 Instrumenter og utstyr

Måleinstrumenter er enheter som blir benyttet til å måle og kvantifisere fysiske størrelser som blant annet lengde, temperatur, trykk, vekt og tid. Disse instrumentene er regelmessig benyttet i vitenskapelig forskning, produksjon og diverse felt for å sikre nøyaktighet og presisjon i målinger. Måleinstrumenter kommer i flere ulike former fra enkle enheter som f.eks. linjal og termometre, til mer komplekse instrumenter som manometer, vindmåler, osv.

Måleinstrumenter finnes i to ulike varianter, analog eller digital. Analoge instrumenter har vanligvis et fysisk display som enten peker på en stripekarts skriver eller en skive, imens digitale instrumenter viser målinger ved numeriske eller alfanumeriske tegn på en digital skjerm. Moderne måleinstrumenter er ofte laget for å være bærbare, brukervennlige og ganske nøyaktige, det er også mulighet for å koble de fleste måleinstrumentene til datasystemer for å få automatisert datalogging, analyse og prosessering. Disse instrumentene spiller en kritisk rolle når det kommer til vitenskapelig forskning, og for å kalibrere en vindtunnel er det nødvendig å benytte flere ulike måleinstrumenter for å sikre nøyaktighet og presisjon («measurement», 2023).

Instrumentene som blir skrevet om i dette kapittelet er instrumenter som OsloMet har tilgjengelig på lager. De fleste måleinstrumentene og utstyrene blir brukt ved kalibreringen av vindtunnelen, imens noen av de er alternativer som også kan bli tatt i bruk.

### 3.4.1 TSI 8390 Bench Top Wind Tunnel

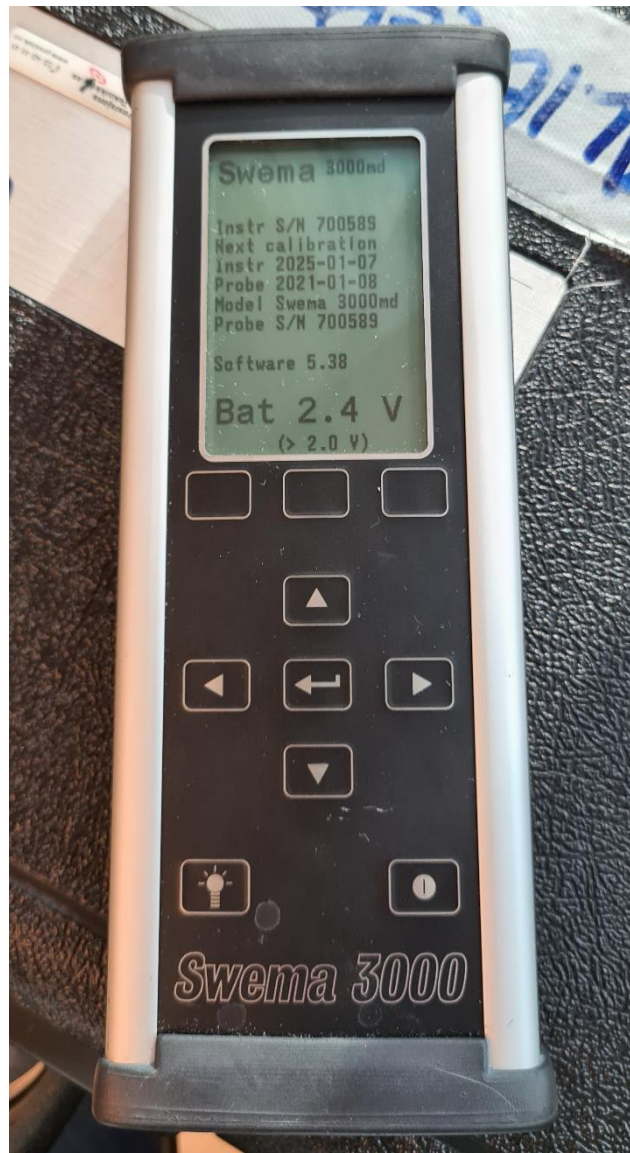
Hovedkomponenten benyttet i denne masteroppgaven, som er en vindtunnel på benk, er en TSI 8390 som er et produkt fra det amerikanske selskapet TSI. OsloMet har dette instrumentet tilgjengelig, og det er også derfor det ønskes at dette produktet skal kalibreres og dokumenteres, slik at det kan bli tatt i bruk. Vindtunnelen er fra 90-tallet og ble avviklet i 1995, men det er fortsatt et bra instrument som kan brukes til ulike typer forskning og kalibrering av vindmålere. Den kommer med en instruksjons manual, 2 ulike dyseplater for regulering av strømningshastighet, trykkrør og et passende sortiment. Den kan måle hastigheter ned fra 0,15 m/s opptil 45 m/s (TSI Incorporated, u.å.).

### 3.4.2 Swema 3000

Swema er et svensk selskap som utvikler, produserer, kalibrerer og gir service på måleinstrumenter og sensorer. For kalibrering av vindtunnel i dette prosjektet er det benyttet en Swema 3000 multifunksjonell instrument, som blant annet også kan bli benyttet til flere ulike arbeidsoppgaver. Dette instrumentet inkluderer en rekke spesifikke måleprogrammer som er i samsvar med standardene EN 16211:2015, EN 12599:2012 og EN ISO 7730:2005.

Swema 3000 logger med eksterne vindmålere, temperatur- og fuktighetssonder. Det finnes 3 varianter som er Swema 3000, 3000md og 3000mdH+. Differansen mellom disse er at modellen 3000md har innebygd barometer, 3000mdH+ har både innebygd barometer og differensialtrykk sonde, og standardmodellen 3000 har verken barometer eller differensialtrykk sonde.

Spesifikt så er den designet til å benyttes til nøyaktig testing og justering av ventilasjon, samt benyttes den i industri eller til forskningsapplikasjoner. Med dette instrumentet så er det mulig å koble til hastighetsføler eller pitotrør for å finne lufthastigheten. Dersom det skulle være nødvendig å måle hastigheter over 30 m/s, så må det benyttes prandtlrør, siden sensoren SWA 31/32 kun måler opptil 30 m/s.



*Bilde 1: Swema 3000md måleinstrument*

Swema 3000 gir muligheten til å koble til ulike sensorer som måler temperatur, lufthastighet, trykk, fuktighet og diverse. De sensorene som er mest relevant for dette prosjektet er sensorene SWA 03 og SWA 31/32.

Sensoren SWA 03 er en trekk sensor. Trekk er basert på kombinasjonen av luftens gjennomsnittlige hastighet, temperatur og turbulens. Denne sensoren kan bli benyttet til å måle hastigheter opp til 3 m/s. Sensoren SWA 31/32 er en vindmåler som måler temperatur, lufthastighet og luftstrøm. Denne sensoren kan måle lufthastigheter fra 0,1 m/s opptil 30 m/s. Denne vindmåleren blir brukt til å ytelsesverifisere vindtunnelen i denne oppgaven.



*Bilde 2: SWA 31/32 vindmåler sensor*

Ved korrigering av standardmodellen til Swema 3000, så må atmosfærisk trykk og temperatur innstilles manuelt. Det er mulig å koble til en termometer sensor for at temperaturen automatisk skal bli korrigert. Ved modellene Swema 3000 md og mdH+ så blir trykk og luftdensitet korrigert automatisk, men det er også mulig å innstille disse parameterne manuelt (Swema AB, u.å.).

### **3.4.3 Q-Trak 7565**

Q-Trak 7565 fra TSI er en type luftkvalitetsmåler som er produsert til å kunne gjøre målinger på ulike parametere i henhold til luftkvalitet. Dette instrumentet er i stand til å gjøre målinger på temperatur, relativ fuktighet, karbondioksid (CO<sub>2</sub>), og barometrisk trykk dersom den har en innebygd barometer. TSI har flere ulike sensorer og vingesonder tilgjengelig til bruk ved dette måleinstrumentet, men i denne oppgaven så blir det benyttet en TSI 964 vindmåler. Denne vindmåleren gjør det mulig å måle lufthastigheter fra 0,1 m/s opptil 50 m/s (TSI Incorporated, u.å.).



*Bilde 3: Q-Trak 7565 måleinstrument*

Det som er positivt med dette instrumentet er at den er bærbar og ganske enkel i bruk for malinger relatert til luftkvalitet i ulike innendørs omstendigheter som f.eks. i kontorer, sykehjem, skoler og hjem. Denne enheten har også et stort, lettlest display som viser sanntidsavlesninger av de ulike parameterne som måles, som blant annet atmosfærisk trykk og temperatur. Q-Trak gir også muligheten til å logge data over en lengre periode, som muliggjør langsiktig overvåking av innendørs luftkvalitetstrender og mønstre.

Selv om dette produktet er et veldig bra måleinstrument når det gjelder målinger av innendørs klima, så må ulempene diskuteres. Ulempene ved dette produktet er at den er sensitiv til endringer i temperatur og fuktighet. Dette kan føre til at større variasjoner i målingene over tid, som igjen fører til at det kan bli nødvendig med ekstra kalibrering og justeringer. Dette produktet koster også ganske mye i forhold til andre måleinstrumenter, og høye kostnader er selvfølgelig et minus. Dessuten er dette produktet også avviklet, som betyr at det er nyere modeller tilgjengelig. Dette er også en form for ulempe selv om TSI skal tilby støtte for produktet dersom det skulle være behov for service (TSI Incorporated, u.å.).



*Bilde 4: TSI Probe 964*

Helhetlig så er det et bra målingsinstrument å benytte og gir alternativer, siden den kan benyttes til målinger av alle nødvendige parametere som lufthastighet, atmosfærisk trykk, temperatur og fuktighet ved kalibrering av vindtunnel. Det er også mulig å bruke produktet til å evaluere luftkvalitet inni vindtunnelen. En 7565 Q-Trak er et godt produkt å benytte ved kalibrering av vindtunnel, og den kan også gi relevant, og viktig informasjon ved overvåking og optimalisering av den generelle ytelsen til vindtunnelen.

#### **3.4.4 VelociCalc 9555-P**

VelociCalc 9555-P er et annet alternativ måleinstrument til Q-Trak fra TSI som også blant annet måler lufthastighet og temperatur. I likhet med Q-Trak 7565, blir det benyttet en TSI 964 vindmåler for både kalibrering og måling av lufthastighet i vindtunnelen. VelociCalc kan også benyttes til å måle lufttemperaturen i grader Celsius eller Fahrenheit. Avhengig av den spesifikke modellen er det også mulig å måle luftstrøm, volumstrøm og fuktighet. Den kan også ha en innebygd barometer som måler atmosfærisk trykk til enhver tid. Mange av modellene skal ha innebygd dataloggingsmuligheter, og dette gir muligheten til forbrukerne å kunne registrere og lagre målinger slik at det eventuelt kan brukes til senere analyse.





*Bilde 5: VelociCalc Plus 9555-P*

Det er flere fordeler ved å benytte en VelociCalc Plus måleinstrument ved kalibrering av en vindtunnel. Blant annet så er produktet allsidig og brukervennlig. Enheten er liten, lett og håndholdt som gjør det ganske enkelt dersom det skulle være av interesse å ta målinger på forskjellige områder i vindtunnelen. Dessuten kan den også benyttes til en rekke andre miljø- og industrielle applikasjoner, som igjen gjør den til et verdifullt verktøy for noen som ønsker flere måleenheter. VelociCalc er generelt pålitelig og nøyaktig, og den kan kalibreres regelmessig for å sikre høyest presisjon ved målinger. Dataloggingsmulighetene som er innebygd i produktet åpner muligheten for lagring og analyse av måledata, som er ekstremt nyttig dersom ytelsen til vindtunnelen over tid blir overvåket (TSI Incorporated, u.å.).

Det er noen potensielle ulemper dersom VelociCalc blir benyttet til å kalibrere en vindtunnel på benk. Nøyaktigheten til dette måleinstrumentet er kanskje ikke like høy som andre måleinstrumenter som er spesialisert til å måle lufthastighet spesialisert for bruk i vindtunneler. Dette kan medføre at feil kan oppstå ved kalibrering dersom målingene ikke er nøyaktige nok for de spesielle kravene til vindtunnelen. Enheten kan også oppleve drift over tid, spesielt i det tilfelle at måleinstrumentet ikke blir kalibrert regelmessig. Dette kan føre til mindre nøyaktige målinger og kalibreringsresultater. VelociCalc kan også være et dyrt alternativ i forhold til andre lufthastighetsmålere, og dette er noe som må vurderes dersom det skulle være av interesse å benytte dette produktet til regelmessig bruk.

### 3.4.5 Almemo 2690-8A

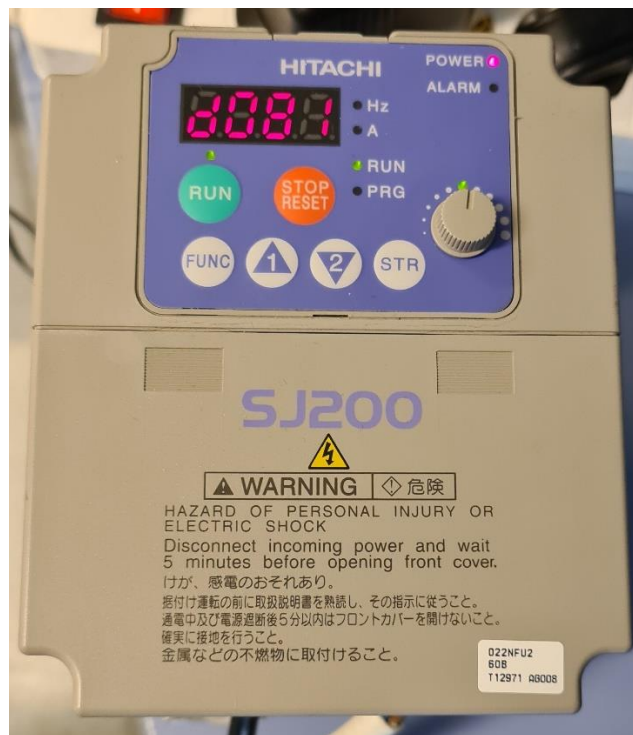
Et annet alternativ til Swema 3000, 7565 Q-Trak og VelociCalc 9555-P er Almemo 2690-8A. Almemo er et produkt fra det tyske selskapet Ahlborn, og er et allsidig datainnsamlingssystem som kan benyttes til ulike måleapplikasjoner. Enheten er kompakt og bærbart som gir muligheten til å måle flere ulike fysiske parametere som temperatur, trykk, fuktighet og luftstrømning. Den har 5 inngangskanaler som kan brukes til å måle flere forskjellige parametere samtidig. Produktet kan kobles til en mobil eller datamaskin ved USB eller Bluetooth, og dette muliggjør muligheten for sanntidsovervåking og dataanalyse.

En av de største fordelene ved å benytte dette måleinstrumentet er at den har veldig høy nøyaktighet og presisjon. Almemo 2690-8A er i stand til å måle parametere med en nøyaktighet opptil 0,1%, noe som er veldig ideelt ved kalibreringsapplikasjoner. Samtidig har den en rask samplingshastighet på opptil 1000 prøver per sekund, og dette sikrer at målingene fanges med høy oppløsning og følsomhet (Ahlborn, u.å.).

Det er derimot noen potensielle ulemper ved å benytte Almemo 2690-8 som et kalibreringsverktøy for å kalibrere en vindtunnel. Blant disse ulempene er kostnad, siden dette produktet kan være relativt dyrt i forhold til andre måleinstrumenter, og det er en faktor som må vurderes ved et stramt budsjett. Produktet er også relativt kompleks, og kan være utfordrende for en ny bruker, derfor må det mulig investeres tid i å lære å bruke systemet, og hvordan data skal tolkes. En annen ulempe kan være kompatibilitet. For å sikre at riktige målinger gjøres, og få høy nøyaktighet, må det sikres at eventuelle sensorer og programvarer er fullstendig compatible med denne enheten, ellers så kan det oppstå feil og tap av data.

### 3.4.6 Hitachi SJ200

Hitachi SJ200 er en vekselstrøm (AC) variabel frekvensomformer som kan brukes til blant annet vindtunneler for å kontrollere hastigheten på tunnelens vifte eller blåser. Ved å benytte en inverter som Hitachi SJ200 fås det presis kontroll over luftstrøms hastigheten, trykk og krefter, som er avgjørende for å få nøyaktige og pålitelige målinger. Ved å kontrollere hastigheten på viften eller blåseren, og måle hastigheten med kalibrerte sensorer, kan vindtunnelens ytelse karakteriseres nøyaktig (Hitachi Ltd, u.å.).

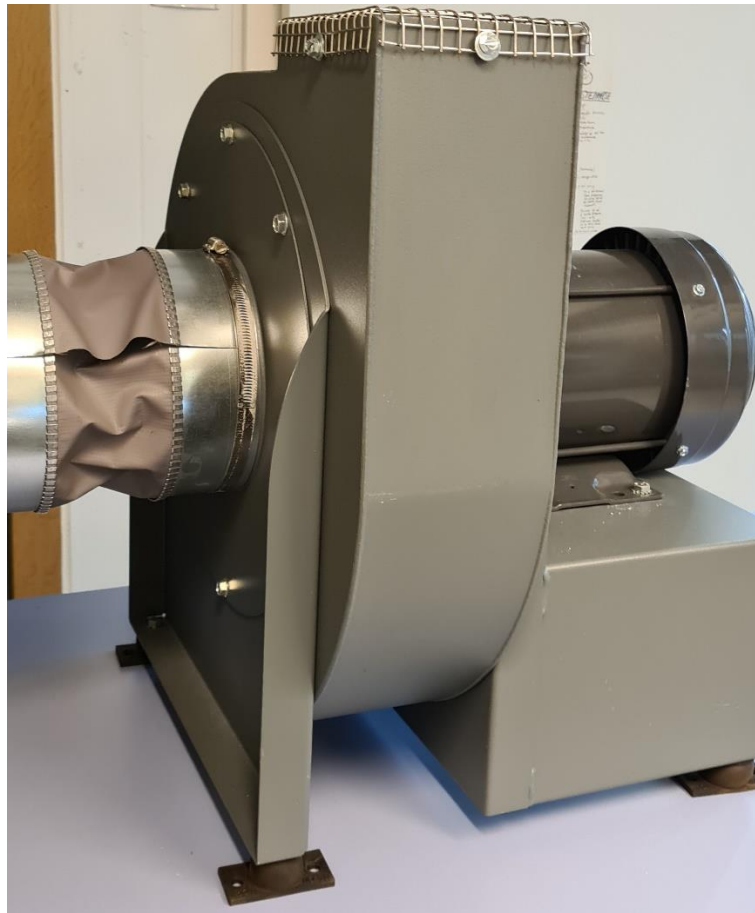


*Bilde 6: SJ200 Inverter*

Generelt så er Hitachi SJ200 et kraftig verktøy som sikrer at målinger blir nøyaktige og presise. Produktet er veldig enkelt å installere og bruke, gir nøyaktig kontroll over luftstrømhastigheten i vindtunnelen og gir muligheten til å karakterisere data fra ytelsen til vindtunnelen. Ulempene ved dette produktet er at det kan være dyrt i forhold til andre frekvensomformere, det kan være litt komplisert å få ønsket trykk pga. knappen som styrer hastighet og trykk, den kan ha behov for periodisk vedlikehold for å sikre ordentlig drift, og at det potensielt ikke kan benyttes til alle typer vindtunneler eller utstyr.

### **3.4.7 Dayton Blower 4C330**

Dayton Blower 4C330 er en sentrifugalvifte som ofte brukes til industrielle formål, inkludert HVAC-systemer og i dette tilfelle kalibrering av en vindtunnel på benk. Produktet er designet for å danne en stor luftstrøm ved relativt lavt trykk. Viften er også typisk benyttet i systemer for å skape konstant tilførsel av luft, og dette er nødvendig når det benyttes en vindtunnel for eksperimentelle forsøk. Det er ulike faktorer som kan påvirke ytelsen til en Dayton Blower 4C330, og blant disse faktorene er viftens hastighet, utforming av testdelen, tilstedeværelse av turbulens og andre strømforstyrrelser (W.W. Grainger Inc., u.å.).



*Bilde 7: Dayton Blower 4C330*

### **3.4.8 TSI Model 8495**

TSI Model 8495 Transducer Display and Monitor er et høyt presisjonsinstrument skapt for å måle og kontrollere luftstrøm og trykk i ulike industrielle applikasjoner. Instrumentet har en trykktransduser som gjør om trykksignaler til elektriske signaler for visning på en brukervennlig monitor. Måleinstrumentet inkluderer avanserte funksjoner som programmerbare alarmer, bruker konfigurerbare utganger og data loggings muligheter. Det som er spesielt viktig ved bruk av denne enheten er at den regelmessig kalibreres for å opprettholde nøyaktigheten og påliteligheten. Kalibrering ved dette instrumentet innebærer å sammenligne utgang med en kjent referansestandard (TSI Incorporated, u.å.).

TSI 8495 blir spesifikt benyttet for å sikre effektivitet og optimal ytelse i vindtunnelen. Presisjonen som enheten tilbyr kombinert med det brukervennlige designet, gjør dette til et bra verktøy å benytte ved oppsett av en vindtunnel. Dette instrumentet viser differensial trykk i enheten mm of Hg, og derfor er det hovedsakelig denne måleenheten som benyttes i denne oppgaven.



*Bilde 8: TSI model 8495*

### 3.4.9 MKS Instruments 220DD

MKS instruments 220DD er et svært avansert vakuum trykk transduser som benyttes til bruk ved industrielle og vitenskapelige omgivelser for å få nøyaktige målinger av differanse trykk. Denne enheten er et ideelt valg ved bruksområder der presisjon er av største betydning. Den har et trykkområde fra 1 til 25000 Torr, og kan gi nøyaktige målinger på trykkendringer ned til 0,01% av full skala (MKS Instruments, u.å.). I henhold til vindtunnelen blir dette instrumentet brukt kombinert med TSI 8495 for å få målingene på differensial trykk i testsonen inni vindtunnelen.

Fordelene ved dette instrumentet er at den tilbyr pålitelighet og nøyaktighet, også er det brukervennlig og relativt enkelt å bruke. Den største ulempen ved dette produktet er prisen, siden den koster relativt mye. Det er også viktig med vedlikehold av dette måleinstrumentet for å sikre drift og nøyaktighet ved målingene, og det er anbefalt å kalibrere en gang i året.

### 3.4.10 Prandtlrør

Prandtlrør eller pitotrør, er en bøyde- eller rett rør enhet som benyttes til å måle hastighet eller trykk til en væske, vanligvis enten luft eller vann, på et bestemt punkt i en væskestrøm. Enheten består av to åpninger, der den ene er en liten rør med åpning kalt en «Pitot port» som vender direkte inn i væskestrømmen, imens den andre åpningen er kalt «statisk port» og er vinkelrett på strømmingen. Differansen mellom disse to portene, som er kjent som «Pitot trykket» er det som benyttes til å bestemme hastigheten på væsken (Helseth, 2023).

Prandtl-rør blir brukt i flere ulike felt, som blant annet aerodynamikk, fluiddynamikk og luftfart. I dette tilfelle blir det benyttet til å måle lufthastighet, og eventuelt luftstrømning inni en TSI 8390 vindtunnelen. Ved formel 5, som blant annet måleinstrumentet Swema 3000 bruker, og som er oppgitt i manualen, er det mulig å finne lufthastigheten.

$$\mathbf{Lufthastighet} = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$$

*Formel 5: Lufthastighet med prandtlrør*

Hvor:

$$\Delta P = \mathbf{Dynamisk trykk} = \mathbf{total trykk} - \mathbf{statisk trykk} \text{ [Pa]}$$

$$\rho = \mathbf{luft tetthet} = 1,293 \times \frac{B \times 273}{1013 \times (273 + t)}$$

$$B = \mathbf{atmosfærisk trykk (standard verdi på 1013 hPa)}$$

$$t = \mathbf{Luft temperatur} \text{ }^\circ\text{C (standard verdi på 20 }^\circ\text{C)}$$

Ved ønske om å finne luftstrømning i vindtunnelen med en prandtlrør, så kan det formel 6 benyttes.

$$\mathbf{Luftstrøm} = \mathbf{lufthastighet} \times k_2 \times \mathbf{areal}$$

*Formel 6: Luftstrøm*

Hvor:

$$\mathbf{Lufthastighet} = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$$

$k_2 = \mathbf{en faktor som ifølge standard EN 16211 reduserer luftstrømning, mulig å slå av og på i innstillingene til Swema 3000.}$

$\mathbf{areal} = \mathbf{areal i aktuelle måleområde i m}^2 \text{ (testsonen = 101,6 mm x 101,6 mm).}$

(Swema AB, u.å.).

### 3.5 Måleusikkerhet

Måleusikkerheten kan beskrives som en fysisk størrelse gitt av resultatet til en måling. Denne størrelsen gir beskriver området der den sanne verdien ligger. Ingen instrumenter gir fullstendig eksakte verdier på målinger, som igjen fører til at det er umulig å finne den sanne verdien. Måleusikkerheten er dermed en faktor oppgitt i tall, som blir tatt i betraktning for å gjøre opp for mangelen på eksakte kunnskapen (Hofstad, 2020).

Standarden NS-EN 12599:2012 gir et rammeverk for å beregne og uttrykke måleusikkerhet. Den oppgir flere formler og metoder for å estimere og kvantifisere ulike kilder til å måle usikkerhet, som blant annet tilfeldige feil, systematiske feil og miljøfaktorer. Det inkluderer bruk av statistiske metoder som standardavvik, repeterbarhet og reproducerbarhet. Det er også inkludert analytiske metoder som kalibrering og modellbasert analyse.

Standarden understreker også viktigheten ved å dokumentere og rapportere usikkerheten knyttet til måleresultater, dette for å sikre klarhet og sammenlignbarhet på tvers av ulike måleprosesser. Samtidig gir den retningslinjer for å uttrykke usikkerhet i form av et måleområde, et konfidensintervall eller en utvidet usikkerhet, dette avhengig av de spesifikke kravene og behovet til måleapplikasjonen (Standard Norge, 2013).

Måling av usikkerhet er et kritisk konsept for å sikre nøyaktighet og pålitelighet til måleresultater, og standarden NS-EN 12599:2012 gir et godt rammeverk for å uttrykke, beregne og dokumentere denne usikkerheten på en standardisert og klar måte. I tabell 1 er det oppgitt måleusikkerheten som er oppgitt i dokumentasjonen for hvert utstyr og måleinstrument.

Måleusikkerhet	Lufthastighet ved 20 grader Celsius	Differensial trykk	Barometer	Temperatur
Swema 3000	<b>SWA 31/32:</b> $\pm 0,03$ m/s ved 0,1-0,4 m/s, $\pm 0,04$ m/s ved 0,4-1,33 m/s, $\pm 3\%$ ved 1,33-30 m/s. <b>SWA 03:</b> 0,04 m/s ved 0,00-1,00 m/s, $\pm 4\%$ ved 1,00-3,00 m/s.	$\pm 3\%$	$\pm 2,5\%$ (mdH eller mdH +)	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
Q-TRAK 7565	TSI 964: $\pm 3\%$	-	$\pm 2\%$	$\pm 0,6^{\circ}\text{C}$
VelociCalc 9555-P	TSI 964: $\pm 3\%$ $\pm 1,5\%$ med pitotrør ved 10,16 m/s	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$
Almemo 2690-8	$\pm 3\%$		$\pm 2,5$ mbar	
Hitachi SJ200	-	-	-	-
Dayton 4C330	-	-	-	-
TSI 8495	-	$\pm 0,25\%$	-	-
MKS 220DD	-	$\pm 0,15\%$	-	-

*Tabell 1: Måleusikkerhet parametere for instrumentene*



### 3.6 Hvor ofte skal de ulike instrumentene og utstyrene kalibreres?

Måleinstrumenter kan være utsatt for ulike feilkilder som påvirker presisjon og nøyaktigheten ved målinger. For å sikre at målinger gir pålitelige og nøyaktige resultater er det viktig å kalibrere måleinstrumenter regelmessig. Kalibrering innebærer å justere instrumentet for å minske feil ved målinger (Halbo & Hofstad, 2019). Det finnes ulike kalibrerings metoder, blant annet manuell-, automatisert- og sporbar kalibrering. Forskjellen mellom disse tre er:

- **Manuell kalibrering** - innebærer å bruke referanse standarder og tilpasse instrumentet til den samsvarer med standarden.
- **Automatisert kalibrering** - innebærer å benytte programvarer og data kontrollerte systemer som gjennomfører kalibreringen automatisk.
- **Sporbar kalibrering** - innebærer å benytte standarder som er kalibrert av et nasjonalt metrologisk institutt for å sikre instrumentets målinger er sporbare i henhold til en anerkjent standard. I Norge kan dette tilbys av Justervesenet.

Regelmessig kalibrering av instrumenter og utstyr gir flere fordeler, i tillegg til presisjon og nøyaktighet av målinger gir det også økt tillit til resultater, samsvar ved forskrifter og redusert risiko for feil og produkttilbakekalling, noe som kan gi økte kostnader. Vanligvis er det mest naturlig å sette kalibreringsintervaller basert på fabrikantens anbefalinger. Standarden NS-EN ISO/IEC 17205:2017 beskriver også krav til kalibreringsintervall.

Justervesenet forteller om viktige faktorer for å bestemme kalibreringsintervall, blant disse faktorene er historikk, type instrument, produsentens anbefaling, miljøforhold og diverse andre faktorer (Justervesenet, u.å.).

I *Tabell 2: Anbefalt kalibreringsintervall for hvert måleinstrument* vises det kalibreringsintervall på de ulike måleinstrumentet basert på produsentens anbefaling.

Måleinstrument	Kalibreringsintervaller
SWEMA 3000	Anbefalt hvert 5. år. Hver 6. måned for sensor SWA 03, og hver 12. måned for SWA 31 og SWA 32
7565 Q-Trak X	Anbefalt hver 12. Måned. Samme gjelder for hastighetssonde TSI 964.
VelociCalc Plus 9555-P	Anbefalt hver 12. måned
Almemo 2690 – 8a	Anbefalt hver 12. måned
Hitachi SJ200	Trenger ikke kalibrering
Dayton 4C330	Trenger ikke kalibrering
TSI 8495	Anbefalt mellom hver 6. til 12. måned
MKS 220DD	Anbefalt hver 12. Måned

**Tabell 2:** *Anbefalt kalibreringsintervall for hvert måleinstrument*

## 4 Metoder og materialer

Dette kapittelet beskriver metodikken som brukes for å sette opp kalibreringsprosessen ved å bruke en vindtunnel på benk. Det innebærer en omfattende diskusjon om de nødvendige trinnene som er tatt, det eksperimentelle oppsettet og datainnsamlings- og analyseteknikkene som brukes. Dette kapittelet vil også presentere begrunnelsen bak de valgte metodene, og dermed legge grunnlaget for troverdigheten og påliteligheten til studiens resultater.

### 4.1 Drift og oppsett av kalibreringsriggen

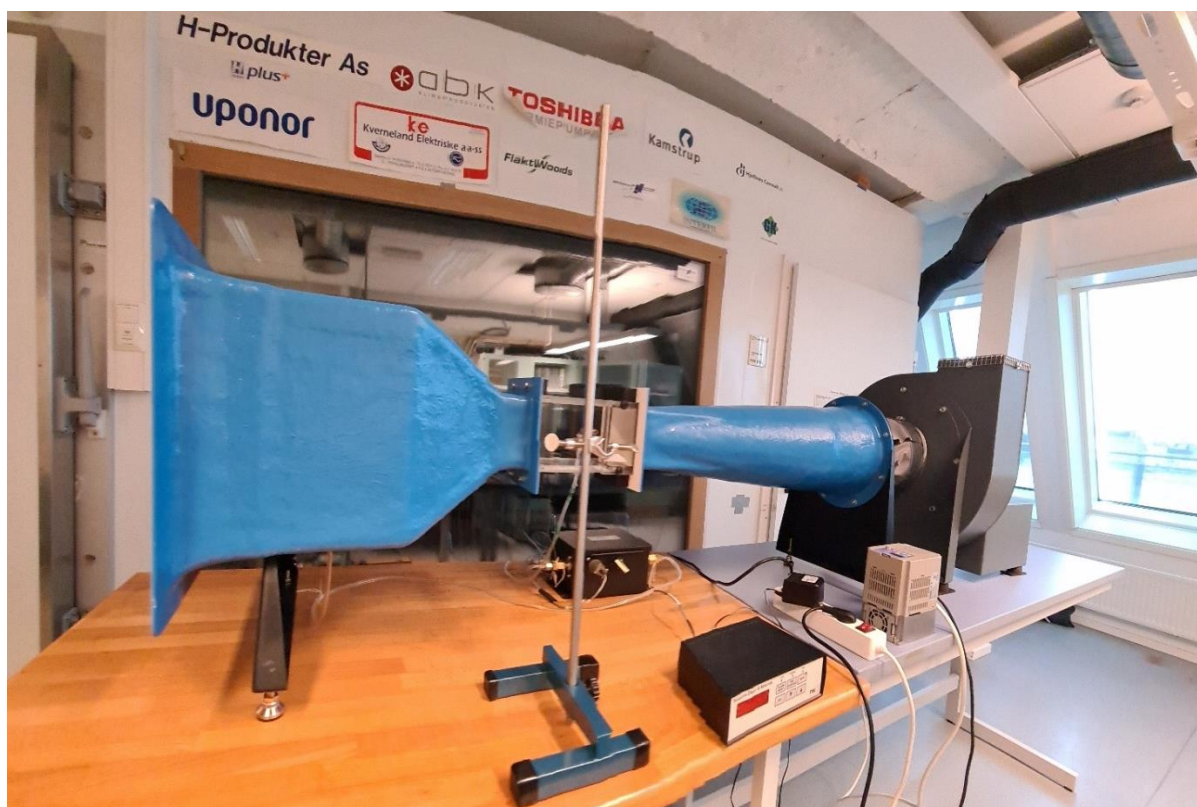


*Figur 1: Drift av kalibreringsrigg*

Kjernen i denne forskningen dreier seg om den eksperimentelle designmetoden og hvordan kalibreringsriggen skal driftes for å etablere det mest effektive kalibreringsoppsettet som gir de mest nøyaktige målingene. Ved drift av kalibreringsriggen er det et par tiltak og steg som må gjøres for å sørge for et godt oppsett av vindtunnelen, og at kalibreringen skal være troverdig og nøyaktig. Tiltakene og stegene ved drift av kalibreringsriggen er som følgende:

1. Første steg er å sørge for at alt av utstyr og måleinstrumenter er på plass, feilsøkt og klar til bruk. Oppsettet av vindtunnelen inkluderer 5 instrumenter som er fundamentale for at oppsettet skal kunne driftes. Derfor må det forsikres at disse 5, som er TSI 8390 vindtunnelen, SJ200 kontrolleren, MKS 220DD manometer, skjermen TSI 8495 og viften 4C330, er koblet

opp korrekt, ikke har eventuelle lekkasje eller feil. Det er nødvendig å sikre at riktige forhold for drift av kalibreringsriggen er tatt hånd om for å sikre kontroll og manipulasjon av variabler i et kontrollert miljø. Oppsettet bør være i et rom som har romvolum over 45,3 m<sup>3</sup>, og vindtunnelen bør ikke være plassert under ventilasjonssjaker, åpne vinduer, eller generelt noe som kan danne store luftstrømmer. Nøyaktighet og repeterbarhet er avhengig av at ekstra luft ikke beveger seg ved inngangssonen til vindtunnelen. Det burde heller ikke være noe, eller noen foran innløpet til vindtunnelen. Vindtunnelen kan produsere luftbevegelse i de fleste rom, og en måte å kunne redusere turbulens på er ved å rette avtrekksluften til vindtunnelen mot det største friluftens rommet. Sollys kan også være en faktor som kan påvirke temperaturen inne. Siden det er en viktig faktor ved målinger av hastighet, er dette noe som burde tas hensyn til ved plasseringen av vindtunnelen (TSI Incorporated, u.å.).



*Bilde 9: Eget oppsett av kalibreringsrigg*

2. Det neste steget er å finne de nødvendige parameterne for å sikre en vellykket kalibrering. De viktigste parameterne som er fullstendig nødvendig er atmosfærisk trykk, lufttemperatur og en korreksjonsfaktor for massetetthet til luft, disse er skrevet om i *kapittel 3.3*.
3. Etter at de nødvendige parameterne er funnet, skal disse innstilles i instrumentene, og noteres i databladet til TSI. Noen av instrumentene krever manuell innstilling av parametere, imens andre måleinstrumenter finner noen av disse automatisk. VelociCalc 9555-P og Q-Trak 7565 har f.eks. en innebygd barometer som finner atmosfærisk trykk automatisk.



*Bilde 10: Endestykker med ulik størrelse*

- Etter steg 1-3 er det nå mulig å benytte oppsettet med vindtunnelen til kalibrering eller forskning. Ved kalibrering av vindmålere og hastighetsfølere må det sørges for lufttetthet når disse skal inn i testsonen, slik at det blir nøyaktige målinger. Dette kan sikres ved å benytte et endestykke som er tilpasset vindmålerens størrelse.



*Bilde 11: Dyseplate 1 (til venstre) og dyseplate 2 (til høyre)*

- Hastighets grenser for vindtunnelen er fra 0,15 m/s opptil 45 m/s. For å måle hastigheter fra 0,15 m/s opptil 1,25 m/s må det benyttes dyseplate nummer 2, som er dyseplaten som har 0,635 cm diameter på hullene. Ved hastigheter fra 1,25 m/s opptil 7,5 m/s må det benyttes dyseplate nummer 1 som har 1,66 cm diameter på hullene. Ved hastigheter over 7,5 m/s brukes det ikke dyseplate. Hitachi SJ200 blir brukt som kontroll for drift av vindtunnelen. Trykk på «Run» for å starte viften, og «Stop» for å stoppe viften. Hastigheten økes ved å vri knappen med klokka, og senkes ved å vri knappen mot klokka.



*Bilde 12: Hitachi SJ200 hastighets kontroll til vindtunnelen*

6. Ytelsen av kalibreringsriggen kan verifiseres ved å bruke prandtlrør koblet til en multimeter, eller ved å bruke en kalibrert vindmåler. Det er anbefalt å gjøre en ytelsesverifisering for vindtunnelen minst en gang i året for å undersøke nøyaktigheten til manometeret MKD 220DD og skjermen TSI 8495, siden disse to måleinstrumentet burde kalibreres en gang i året.
7. Etter at vindtunnelen er ferdig brukt, så må det sørges for at utstyr og instrumenter legges tilbake på plass, og plugge ut stikk kontakten for hvert instrument. Det er viktig å gjøre alle nødvendige tiltak som sikrer vedlikehold av vindtunnelen og utstyrene, derfor burde eventuelt NS-EN ISO/IEC 17205:2017 brukes som referanse.

## 4.2 Feilsøking av vindtunnelen

Feilsøking av vindtunnelen er viktig for å se etter eventuelle feil før drift av kalibreringsriggen. Ved feilsøking så sørges det for at vindtunnelen er i best mulig tilstand før drift, at målinger blir så nøyaktige som mulig, og at ulemper ved bruk ikke oppstår. TSI har oppgitt en egen feilsøkings dokument, som beskriver hvordan det er mulig å feilsøke produktet ved driftsfeil. I *Tabell 3: Feilsøking av vindtunnelen* er det mulig å se tiltak på potensielle driftsfeil ved bruk av vindtunnelen.

Symptom	Løsning
<b>1. Skrapelyder ved viften</b>	Juster på viften
<b>2. Dersom motoren til viften ikke får noe strøm når man skrur SJ200 kontrollen med klokken.</b>	-Bytt sikring i kontrolleren. Se kontrollershåndboken. -Sjekk om strømledningen er koblet til, og at kretsen er slått på.
<b>3. Manglende evne til å oppnå spesifikk hastighet</b>	-Sjekk om minst 115 volt vekselstrøm (eller 220 volt ved en kraftigere modell) er tilført når vindtunnelen kjører maksimal hastighet. -Rengjør strømnings rettere og luftfilteret.
<b>4. Dårlig repeterbarhet</b>	Sjekk etter lekkasjer i tunnelen, og /eller trykkledninger. Tunnelen må ikke benyttes i avgrenset område. Rommet bør ha et volum på minst 45,3 kubikk meter.
<b>5. Dårlig nøyaktighet</b>	Sjekk repeterbarhet (punkt 4). Dersom repeterbarhet er bra, undersøk nøyaktigheten til trykk måleren
<b>6. Ingen lesning, eller feil avlesning av trykkstransduser og avlesning</b>	Se produsentens manualer for trykk transduser og avlesning

*Tabell 3: Feilsøking av vindtunnelen*

(TSI Incorporated, u.å.).

### 4.3 Rutine for gjennomføring av en enkelt kalibrering

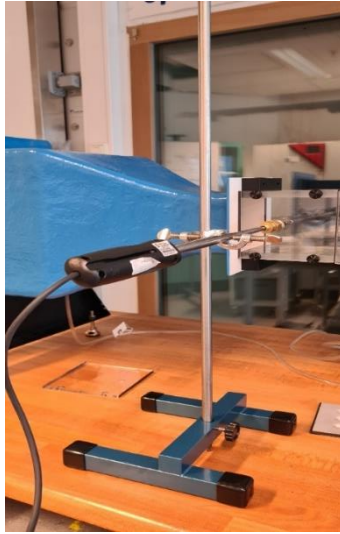
I denne oppgaven er det eksperimentert med både termooanemometeren TSI 964 og Swema SWA 31. Det skulle også eksperimenteres ved Almemo 2690-8A og trekksensor SWA 03, men det ble ikke mulig i dette eksperimentet pga. mangel på ressurser. Rutinen for kalibrering varierer litt fra hver enkelt vindmåler og hastighetsføler, derfor er det lurt å undersøke hvordan prosessen er for hver enkelt hastighetsføler/vindmåler. SWA 31/32 trenger f.eks. programvare for å kalibrere, imens TSI 964 kan enkelt kalibreres ved innstillingene i måleinstrumentene Q-Trak 7565 eller VelociCalc 9555-P. Ved de to sistnevnte kan vindtunnelen direkte brukes til å utføre en kalibrasjon. Selv om gjennomføringen av kalibreringsprosessen er ulik avhengig av vindmåler, så er det mulig å bruke vindtunnelen til å logge nøyaktigheten ved å bruke *Vedlegg 1 – TSI datablad* som en referanse for nøyaktigheten til hastighetsføleren/vindmåleren for å se om den operer innenfor måleusikkerheten som er oppgitt i produktets spesifikasjons. Det finnes to versjoner av databladet til TSI. Den ene benytter hastighetsmålinger i SFPM, og den andre bruker det metriske systemet og bruker hastigheter i m/s. I denne oppgaven ble dannet en litt modifisert versjon av den metriske versjonen av databladet til TSI i Excel.



*Bilde 13: Eksempel på hvordan kalibrering av en hastighetssonde kan gjennomføres med Q-Trak eller VelociCalc*  
Trinnene for å gjennomføre en enkelt kalibrering eller logging som kan bli benyttet til videre manuell kalibrasjon er som følgende:

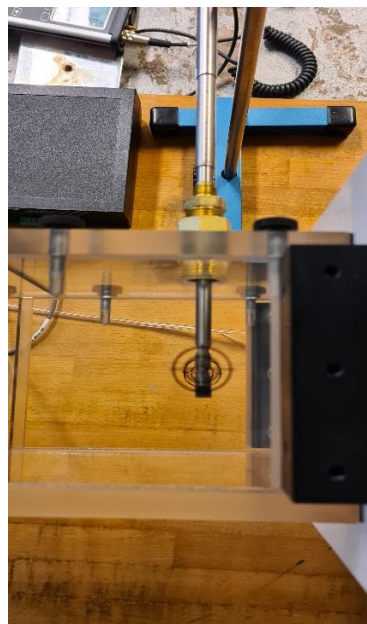


1. Sett inn hastighetsføler inn i vindtunnelens testsonen, og sikre lufttetthet ved å benytte seg av de ulike endestykkene som er tilgjengelig. Deretter brukes stativet for å sikre vindmålerens/hastighetsfølerens stabilitet ved å stramme den til stativet.



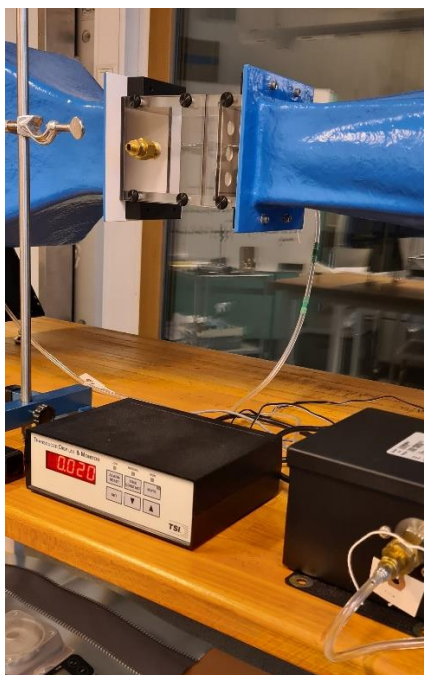
**Bilde 14:** Oppsett med riktig endestykke, justert stativ og vindmåler i testsonen

2. Tilpass hastighetsføleren slik at den er tilpasset strømmingen i vindtunnelen. Pass på at hastighetsføleren ikke har noe retningsfølsomhet, og at den ligger i krysset som er markert på bunnen og toppen av testsonen.



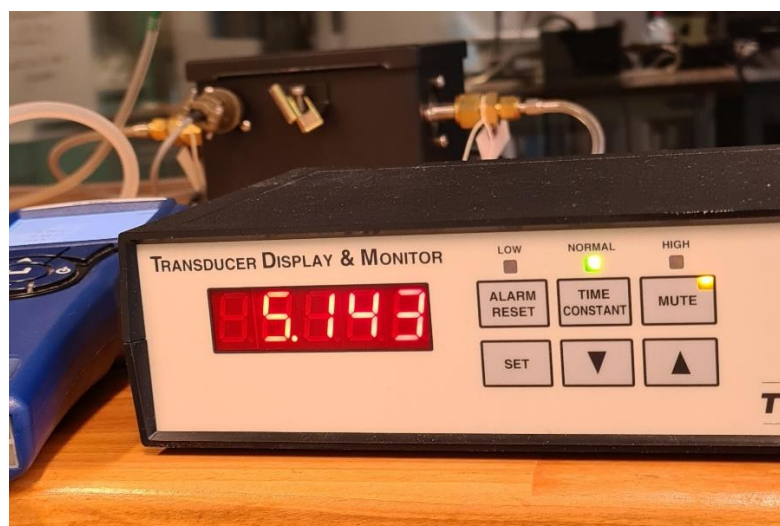
**Bilde 15:** Hastighetssensoren eller evt. prandtlrør, skal alltid ligge innenfor markert kryss og tilpasset strømmingen

3. Sørg for at skjermen TSI 8495 er koblet til manometeret. Sikre at høytrykkssiden av manometeret MKD 220DD er koblet til trykk kranen på innløpet til vindtunnelen, og at lavtrykkssiden er koblet til trykk kranen på testsonen. Forsikre om at det ikke er noe lekkasje på trykkledningene.



*Bilde 16: TSI 8495 skjermen skal være koblet til manometeret, og trykkledningene skal være koblet til innløpet og testsonen i vindtunnelen*

4. Skru på viften Dayton 4C330 ved å trykke «Run» på inverteren Hitachi SJ200, og kontroller hastigheten ved å skru knappen med klokken for å øke hastigheten, og mot klokka for å senke hastigheten. Øk/senk motorens hastighet helt til trykkmålingene lest fra TSI 8495 samsvarer med første rad i ønsket trykk som er skrevet i kolonne 3 på databladet, som er standard trykk i kolonne 2 multiplisert med korreksjonsfaktor i mm of Hg.



*Bilde 17: TSI 8495 som viser trykkmålingen i vindtunnelen under eksperiment*

5. Dokumenter hastighetsmålingene i kolonne 4 på databladet til TSI.
6. Senk motor hastigheten til trykk målingene samsvarer med ønsket trykk P i kolonne 3, neste rad. Dokumenter resultatet fra hastighetsføleren i kolonne 4.
7. Repeter prosessen helt til databladet er utfylt, og hastigheten er målt for alle rader. Bruk dyseplatene dersom lavere hastigheter er ønsket.

Når databladet fra TSI er utfyllt med alle nødvendige målinger, er det mulig å undersøke innsamlet datamaterialet for å undersøke om kalibreringen av hastighetssonden er vellykket eller om det krever ytterligere kalibrering. For dette eksperimentet ble det benyttet 2 forskjellige TSI 964 hastighetssonder, hvor den ene var koblet opp mot en Q-Trak 7565, og den andre en VelociCalc 9555-P.

#### 4.4 Ytelses verifisering av vindtunnelen

I denne oppgaven ble vindtunnelen underlagt en grundig ytelses verifiseringsprosess. Denne prosessen er avgjørende av flere årsaker. Først og fremst er det avgjørende at vindtunnelen fungerer med presisjon. Nøyaktigheten til vindhastigheter, trykk og andre parametere generert av tunnelen, har en direkte påvirkning av gyldigheten til innsamlet data. Eventuelle inkonsistenser eller unøyaktigheter i disse parameterne kan føre til feilaktige tolkninger og konklusjoner, noe som undergraver påliteligheten til forskningen. En ytelsesverifisering ble utført for å sikre at oppsettet med vindtunnelen opererte innenfor akseptable parametere.

En annen grunn for ytelsesverifisering, er for å danne muligheten for at eksperimentelle resultater kan reproduseres, ettersom det er en hjørnestein i enhver vitenskapelig forskning. Ustabil ytelse av vindtunnelen kan føre til variasjoner i resultater som ikke er basert på variabler, men heller til inkonsistenser i vindtunnelens drift. Ved å sikre konsekvent ytelse gjennom verifisering, var ønske å forbedre reproduserbarhet av eksperimentene.

Sikkerhet var en annen årsak til verifisering. Siden eksperimentet innebærer bruk av høyhastighets- eller høytrykksvindtunneler, kan det medbringe eventuelle risikoer. I sammenheng med sikkerhet var det derfor avgjørende å identifisere potensielle problemer som kunne kompromittere sikkerheten under drift. Dette er også en fordel i form av utstyrsvedlikehold. Ved å identifisere driftsproblemer tidlig, forhindres det at større problemer utvikler seg, noe som potensielt forlenger levetiden til vindtunnelen, og reduserer kostnader for eventuelle reparasjoner eller utskiftninger.

I forsøket var det også en hensikt å kunne garantere pålitelighet. Ved ytelsesverifisering sikret det at vindtunnelen fortsatte å operere optimalt, og at den samsvart med aksepterte standarder. Noe som åpnet muligheten for en meningsfull sammenligning av resultatene i denne oppgaven, og resultatene i andre vindtunneler og standarder. Dette var også nødvendig for å møte spesifikke teststandarder eller forskrifter som er relevant til denne oppgaven.

Ved ytelsesverifisering så blir vindtunnelen kalibrert, og dette sørget for at målingene var så nøyaktige og pålitelige som mulig. Det er anbefalt at vindtunnelen ytelses verifiseres minst en gang i året. Ytelsesverifiseringen ble utført ved 2 metoder, der resultatene mellom disse 2 til slutt ble

sammenlignet for å bekrefte at det er mulig å reproducere de samme resultatene, og at vindtunnelen fungerer som den skal. Dersom målingene fra disse to metodene samsvarer med hverandre, legger det et grunnlag for fremtidig sporbar kalibrering. Ved disse to metodene, så blir samme prosess som ved *kapittel 4.3* benyttet. I første metoden ble det brukt prandtlrør koblet til Swema 3000 md, og i den andre metoden ble det brukt en SWA 31 vindmåler koblet til Swema 3000 md.

#### 4.4.1 Verifisering av kalibrasjon med prandtlrør



*Bilde 18: Ytelsesverifisering med Prandtl-rør*

I den første metoden for å ytelses verifisere vindtunnelen, så ble det benyttet et prandtlrør koblet opp mot en Swema 3000md med trykkledninger. Ved å bruke trykkledninger, der den dynamiske porten koblet opp mot pluss siden på Swema 3000, og den statiske porten koblet opp mot minus siden på multimeteret, var det mulig å finne lufthastigheten. Databladet til TSI blir brukt som referanse for standardtrykk og standardhastighet for å verifisere vindtunnelens ytelse.



*Bilde 19: Oppkobling av Prandtl-rør og Swema 3000 med trykkledninger*

Fordelene ved å bruke prandtlrør er at det er en troverdig verktøy som er godt egnet for målinger relatert til vindhastigheter og dynamisk trykk. Dette er et verktøy som har blitt brukt i flere tiår for lignende formål. Ulempen ved prandtlrør er at den ikke måler hastigheter under 0.80 m/s, som igjen gir et mindre sammenligningsgrunnlag mellom de to ulike metodene. Det er en differanse når prandtlrør benyttes i forhold til hastighetssondene SWA 31 og TSI 964. Forskjellen er at det blir brukt en egen sideplate med hull på 5mm i midten, som spesifikt er laget for bruk av prandtlrøret ettersom endestykkene i den andre sideplaten ikke passer prandtlrøret for å gjøre det lufttett i testsonen.



*Bilde 20: Egen laserkuttet sideplate til vindtunnelen laget spesifikt for bruk av prandtlrør*

#### 4.4.2 Verifisering med SWA 31 hastighetssonde



*Bilde 21: SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000md*

I den andre metoden ble det brukt en SWA 31 hastighetssonde for å måle vindhastigheten og samle inn datamaterialet. Det eneste som kreves ved denne metoden er å koble til SWA 31 inn på toppen av måleinstrumentet Swema 3000, og deretter gjøre målingene med samme metode som i *kapittel 4.3*. Ved å holde inn knappen nederst til høyre på Swema 3000, så er det mulig å se på skjermen hvilken sensor modell det er og når den sist var kalibrert. I dette tilfelle så er det en SWA 31 hastighetssonde som sist var kalibrert 6. oktober 2021, og dette kan være en potensiell svakhet ettersom det er anbefalt at det er anbefalt en kalibrasjon hvert år for sensor SWA 31/32.

I likhet med første metoden for ytelses verifisering, så ble databladet fra TSI brukt som referanse for trykk og standardhastighet for å bekrefte vindtunnelens ytelse, og for å dokumentere hastighetsmålingene. Deretter ble resultatene for denne metoden sammenlignet med resultatene fra metode 1.

## 4.5 Datainnsamling og analyse

Denne delen vil beskrive teknikkene som brukes for å samle inn og registrere data, inkludert hyppigheten av datainnsamlingen og verktøyene som brukes. Den vil også dekke de statistiske metodene som brukes for å analysere dataene, og gi begrunnelse for valg av dem.

Parameterne temperatur, atmosfærisk trykk og korreksjonsfaktor for massetetthet er fundamentale for datainnsamlingen ved bruk av en vindtunnelen til kalibrering. Grunnen til det er fordi at disse parameterne direkte påvirker vindhastigheten, og derfor er det nødvendig å finne disse parameterne. Det er mulig å finne disse parameterne som beskrevet i *kapittel 3.3*. I dette eksperimentet ble temperatur og atmosfærisk trykk funnet ved å bruke Q-Trak 7565 siden den har både en termometer og barometer, og fordi den ble nylig kalibrert i 2023. Deretter ble formelen fra *kapittel 3.3.5* brukt for å finne en korreksjonsfaktor.

Deretter kunne målinger i vindtunnelen gjøres som beskrevet i *kapittel 4.3*, og deretter dokumenteres det i databladet fra TSI. Når innsamlet data analyseres kan målte hastigheter sammenlignes med standardhastighet for å se effekten av kalibreringsprosessen. Standardhastighetene er gitt ved en temperatur på 21,1 grader Celsius og atmosfærisk trykk på 1013,2 hPa. Disse forholdene er satt som basislinje, noe som tillater et enhetlig referansepunkt på tvers av ulike eksperimenter eller scenarier. Ved å sammenligne den faktiske hastigheten til en gass med standardhastighet, kan vi gjøre rede for effektene av forskjellig temperatur og trykk. Dette gir mer meningsfull og tolkbar data.

## 4.6 Begrensninger og avgrensninger

Til slutt vil denne delen belyse studiens begrensninger og avgrensninger. Begrensninger er potensielle svakheter eller forhold utenfor forskerens kontroll, mens avgrensninger er grensene forskeren setter for å definere omfanget av studien.

Det er et par begrensninger i dette studiet hvor noen av de omfatter ytelses verifiseringen av vindtunnelen ved *metode 1* og *metode 2*, og noen omfatter måleinstrumentene VelociCalc, MKD 220DD og skjermen TSI 8495.

Når det gjelder ytelses verifiseringen, så er hastighetssonden SWA 31 i metode 1 begrenset til en hastighet på 30 m/s, derfor er det i dette eksperimentet foretatt målinger fra 0,15 m/s til 25 m/s. I metode 2 så er prandtlrøret begrenset i form av at det ikke var mulig å gjøre hastighetsmålinger fra 0,15 m/s opptil 0,80 m/s. Grunnet disse begrensningene, så var det ikke mulig å gjøre sammenligner mellom disse 2 ytelsesverifiseringsmetodene fra 0,15 m/s til 0,80 m/s, og fra 25 m/s til 45 m/s. Det må også nevnes at en avgrensning mellom forsker og veileder ble satt for at vindtunnelen skal fungere fra en hastighet fra 0,15 m/s opptil 20 m/s, derfor er hastighetene over 25 m/s ikke det viktigste, men det ble likevel undersøkt med prandtlrøret for å ytelses verifisere vindtunnelen.

Den andre begrensningen for denne metoden gjelder manometeret MKD 220DD og skjermen TSI 8495. Disse to måleinstrumentene har ikke blitt kalibrert i løpet av det siste året, og dette er en begrensning i form av at fremtidige resultater kan være litt annerledes dersom disse to måleinstrumentene kalibreres. VelociCalc har heller ikke blitt kalibrert siden 2017, og dette kan være en faktor når det gjelder målingene med dette instrumentet.



## 5 Resultater og diskusjon

Dette kapittelet presenterer resultatene oppnådd fra de eksperimentelle studiene utført på kalibreringsoppsettet for vindtunnel på benk. Disse resultatene diskuteres og tolkes i sammenheng med forskningsspørsmålene som er angitt i *kapittel 1*. Dette kapittelet er delt inn i to hoveddeler: presentasjon av resultatene, og deres påfølgende diskusjon.

### 5.1 Presentasjon av resultater

I denne delen skal innsamlet datamaterialet fra eksperimentene beskrives, utføre en kvantitativ analyse og diskutere eventuelle trender eller mønstre som dukker opp. Resultatene skal presenteres i en logisk rekkefølge, etter sekvensen av eksperimentene som ble utført.

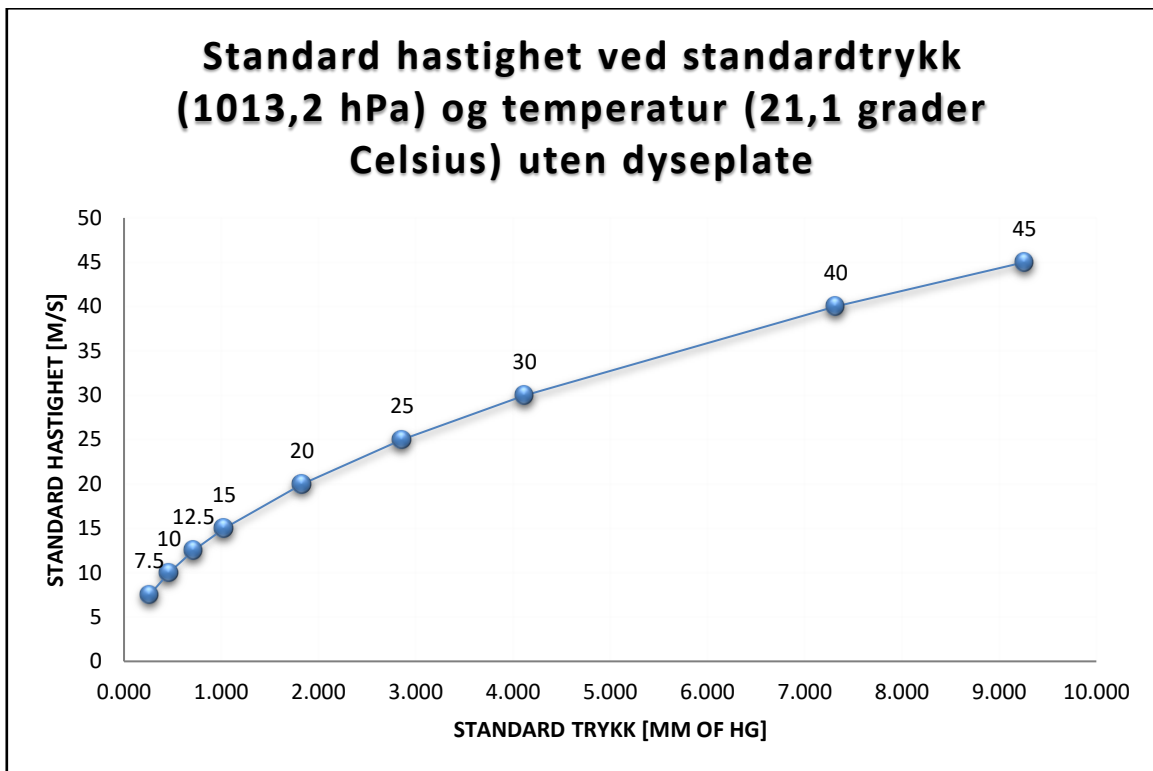
Det eksperimentelle oppsettet innebar bruk av en vindtunnel på benk, som er satt opp og konstruert som beskrevet i kapittel 4. Kalibreringen av vindtunnelen ble utført gjennom noen ulike metoder som ble utført i etapper. Dataene som er samlet inn under disse stadiene er analysert og presenteres her.

Parameter verdiene for atmosfærisk trykk, temperatur og korreksjonsfaktor for lufttetthet var lik i målingene for VelociCalc 9555-P med TSI 964, Q-Trak 7565 med TSI 964, Swema 3000 md koblet til SWA 31 hastighetssonde og Swema 3000 md koblet til prandtlrør. Parameter verdiene var som følgende:

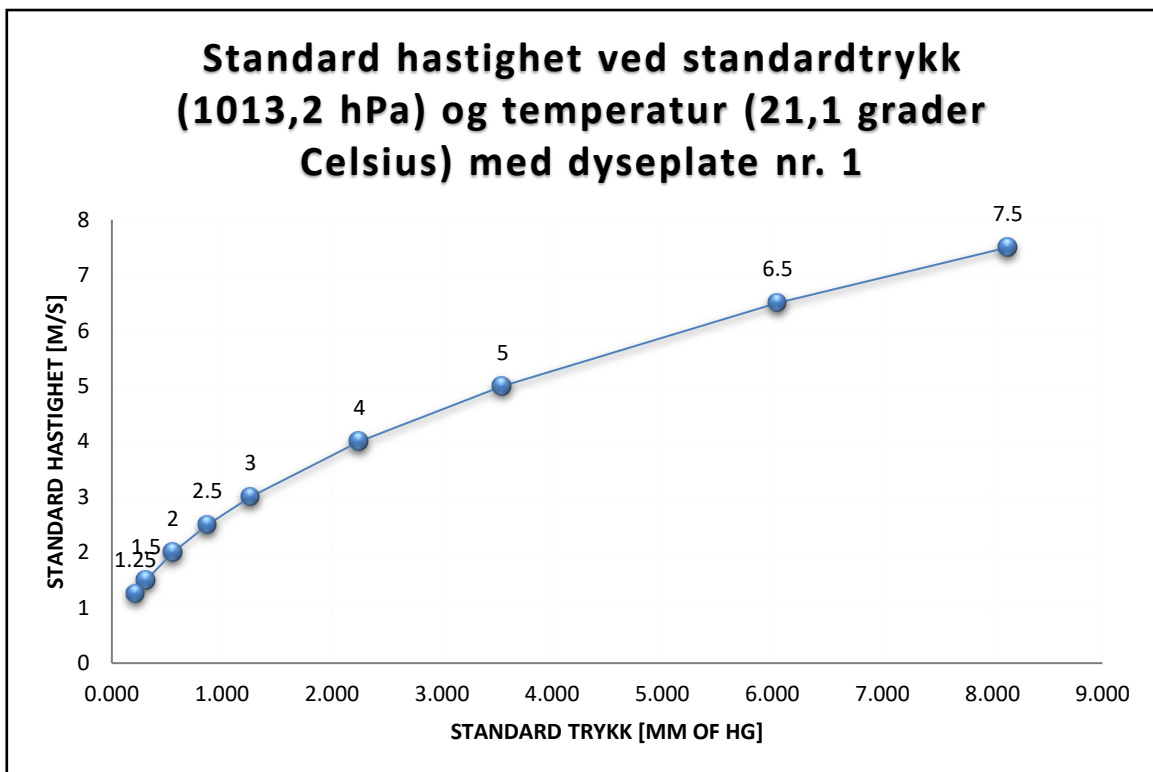
- **Romtemperatur** = 21,5 °C
- **Barometrisk trykk** = 1019,2 hPa = 764,4 mm of Hg
- **Korreksjons faktor**  $K = \frac{760}{764,4 \text{ mm of Hg}} \times \frac{273,15+21,5^{\circ}\text{C}}{294,25} = 0,9955$

#### 5.1.1 Standard- hastighet og trykk

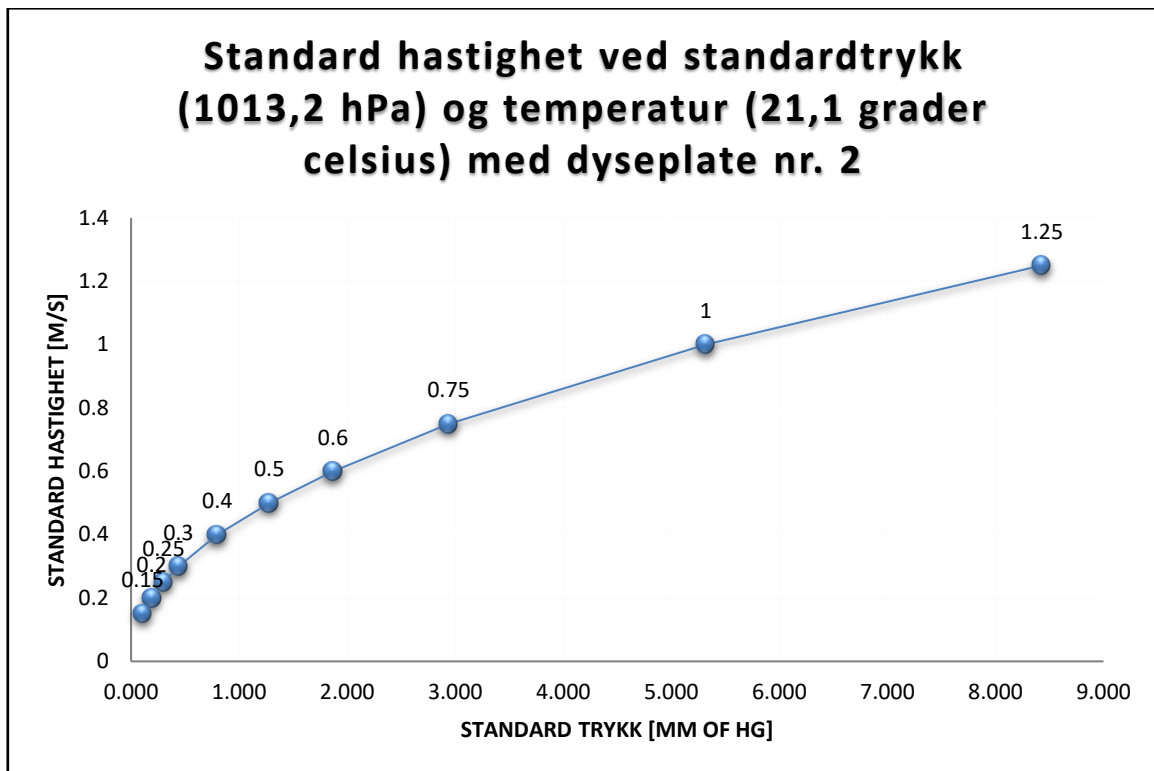
Graf 1,2 og 3 viser standardhastighet ved standardtrykk som er referansen for sammenligning når målthastighet ved ønsket trykk (standardtrykk multiplisert med korreksjonsfaktoren), er funnet. Ved å gjøre en sammenligning mellom standardhastighet og målt hastighet, er det mulig å se måleusikkerheten til hastighetssonden eller andre måleinstrumenter som blir benyttet til å måle hastigheten. Dette viser oss dersom måleinstrumentet er kalibrert eller ikke, og om vindtunnelen fungerer som den skal. Graf 1 viser standard- hastighet og trykk uten dyseplate, graf 2 viser med dyseplate nr. 1 og graf 3 viser med dyseplate nr. 2. Verdiene for standard- hastighet og trykk er nøyaktig lik standardverdiene i databladet til TSI for vindtunnelen.



*Graf 1: Standard- hastighet og trykk uten dyseplate*



*Graf 2: Standard- hastighet og trykk med dyseplate nr. 1*

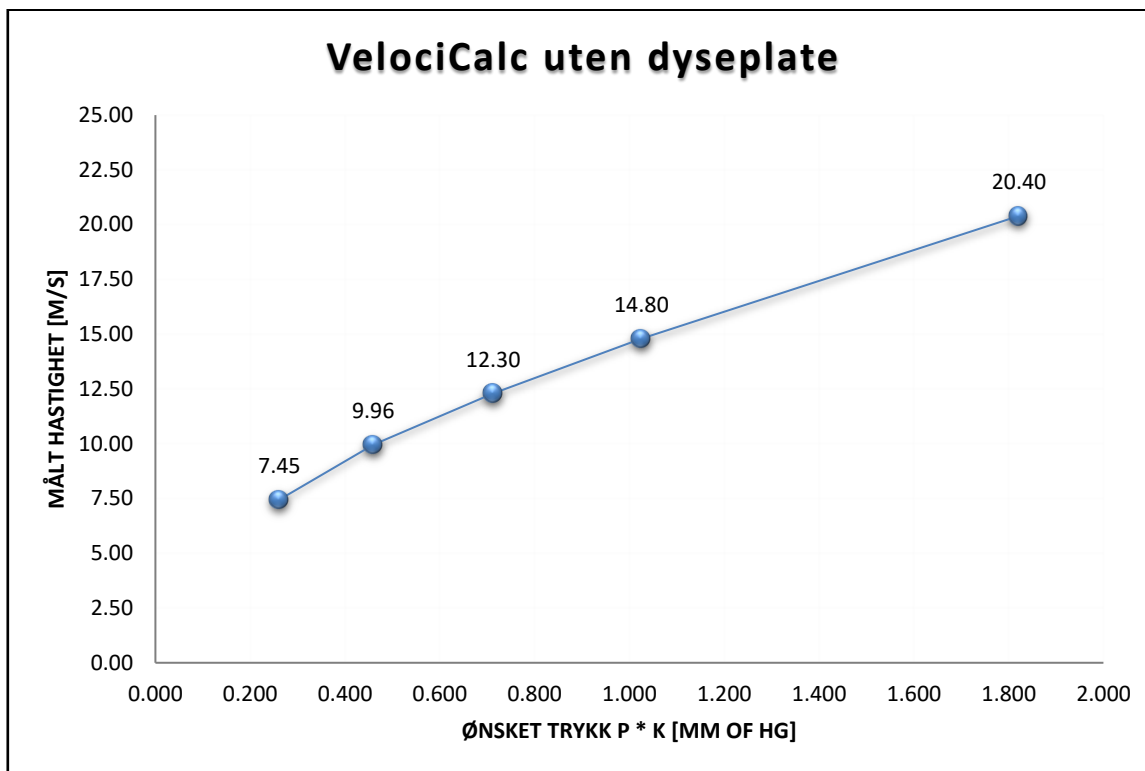


**Graf 3:** Standard- hastighet og trykk med dyseplate nr. 2

## 5.1.2 Resultater med VelociCalc 9555-P

Graf 4, graf 5 og graf 6 sammen med tabell 4, tabell 5 og tabell 6 presenterer målingene med VelociCalc 9555-P koblet til en TSI 964 hastighetssonde etter kalibrasjon, ved å følge metoden i kapittel 4.3.

### 5.1.2.1 VelociCalc uten dyseplate



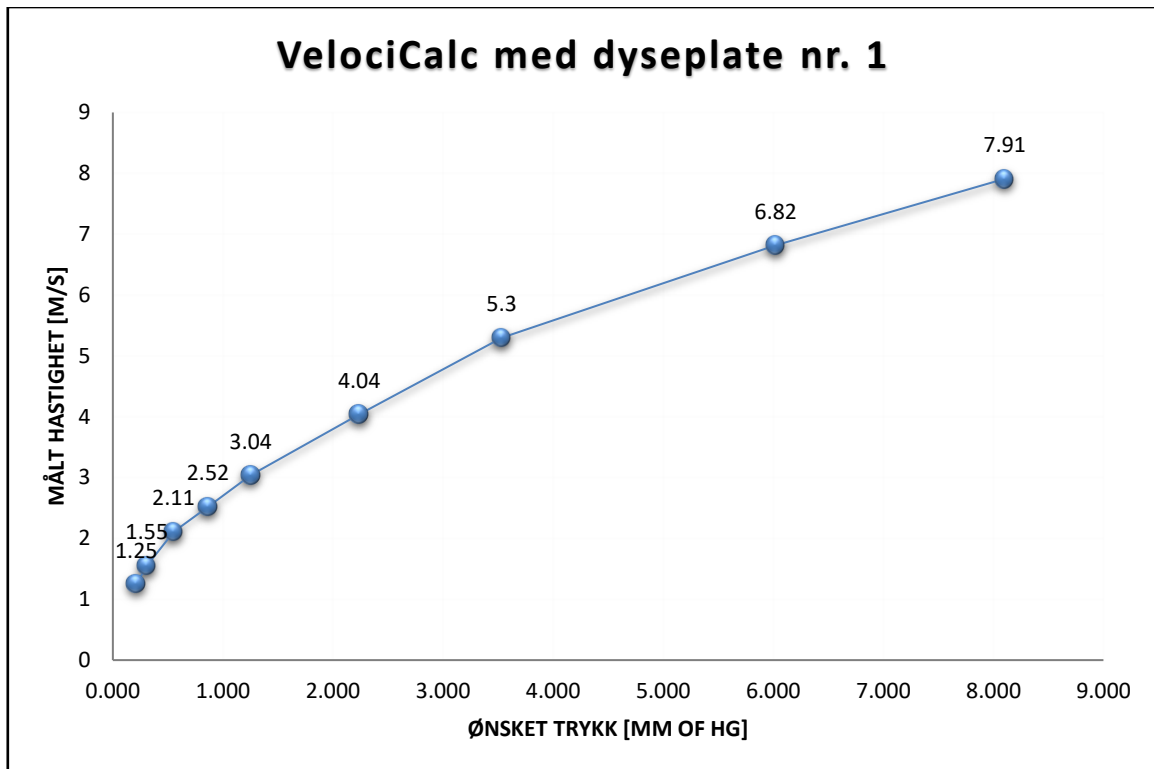
Graf 4: Målte resultater med VelociCalc 9555-P og hastighetssonde TSI 964, uten dyseplate

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
20.00	21.17	±5.52
15.00	15.46	±2.97
12.50	12.94	±3.62
10.00	10.24	±2.34
7.50	7.80	±3.84

Tabell 4: Målte hastigheter og måleusikkerhet med VelociCalc 9555-P med hastighetssonde TSI 964, uten dyseplate

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet uten dyseplate: 3.72 %**

### 5.1.2.2 VelociCalc med dyseplate nr. 1



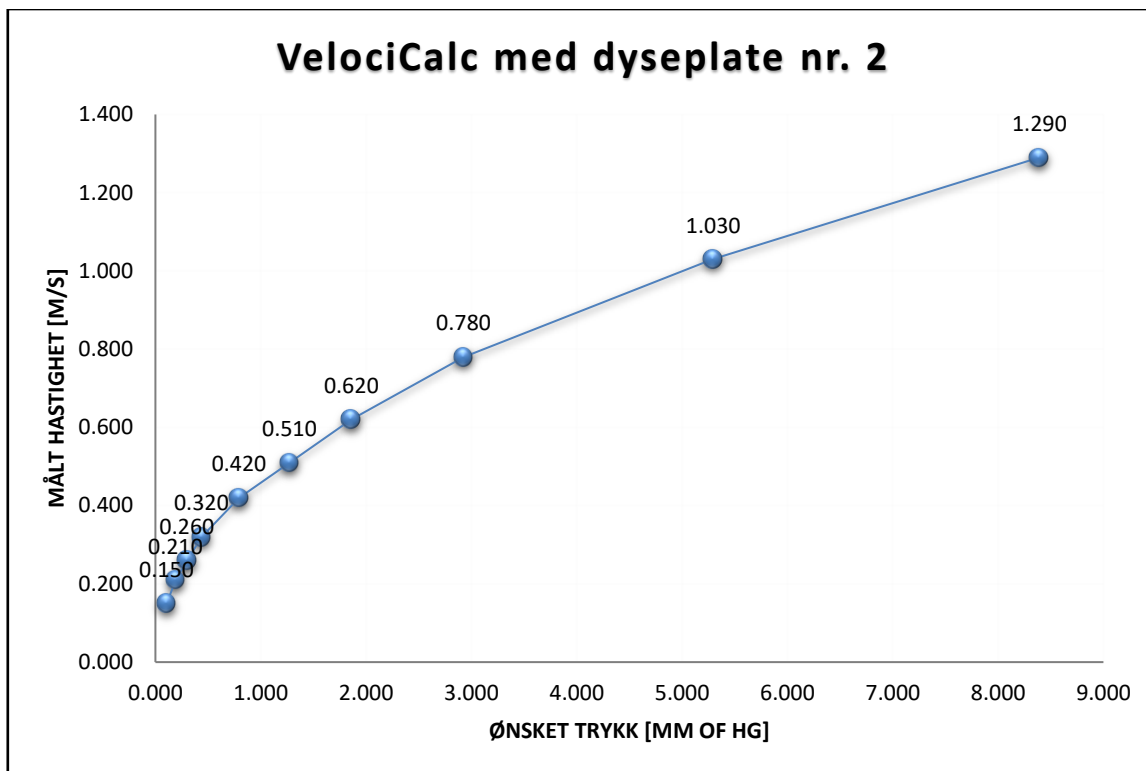
Graf 5: Målte resultater med VelociCalc 9555-P og hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr. 1

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
7.50	7.91	±5.18
6.50	6.82	±4.69
5.00	5.30	±5.66
4.00	4.04	±1.00
3.00	3.04	±1.31
2.50	2.52	±0.79
2.00	2.11	±5.20
1.50	1.55	±3.22
1.25	1.25	±0

Tabell 5: Målte hastigheter og måleusikkerhet med VelociCalc 9555-P med hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr.1

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 1: 3.00%**

### 5.1.2.3 VelociCalc med dyseplate nr. 2



Graf 6: Målte resultater med VelociCalc 9555-P og hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr. 2

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
1.25	1.29	±3.10
1.00	1.03	±2.91
0.75	0.78	±3.84
0.60	0.62	±3.22
0.50	0.51	±1.96
0.40	0.42	±4.76
0.30	0.32	±6.25
0.25	0.26	±3.22
0.20	0.21	±3.84
0.15	0.15	±0

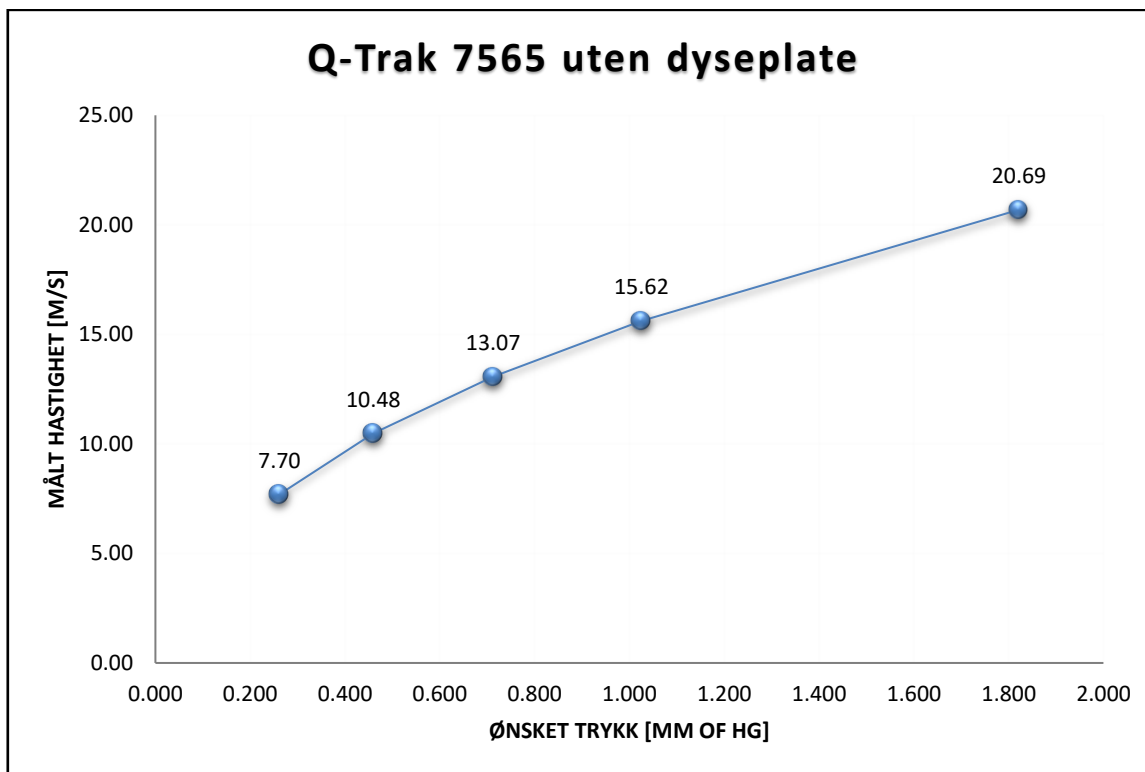
Tabell 6: Målte hastigheter og måleusikkerhet med VelociCalc 9555-P med hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr. 2

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 2: 3.25%**

### 5.1.3 Resultater med Q-Trak 7565

Graf 7, graf 8 og graf 9 sammen med tabell 7, tabell 8 og tabell 9 presenterer målingene med Q-Trak 7565 koblet til en TSI 964 hastighetssonde etter kalibrasjon, ved å følge metoden i *kapittel 4.3*.

#### 5.1.3.1 Q-Trak 7565 uten dyseplate



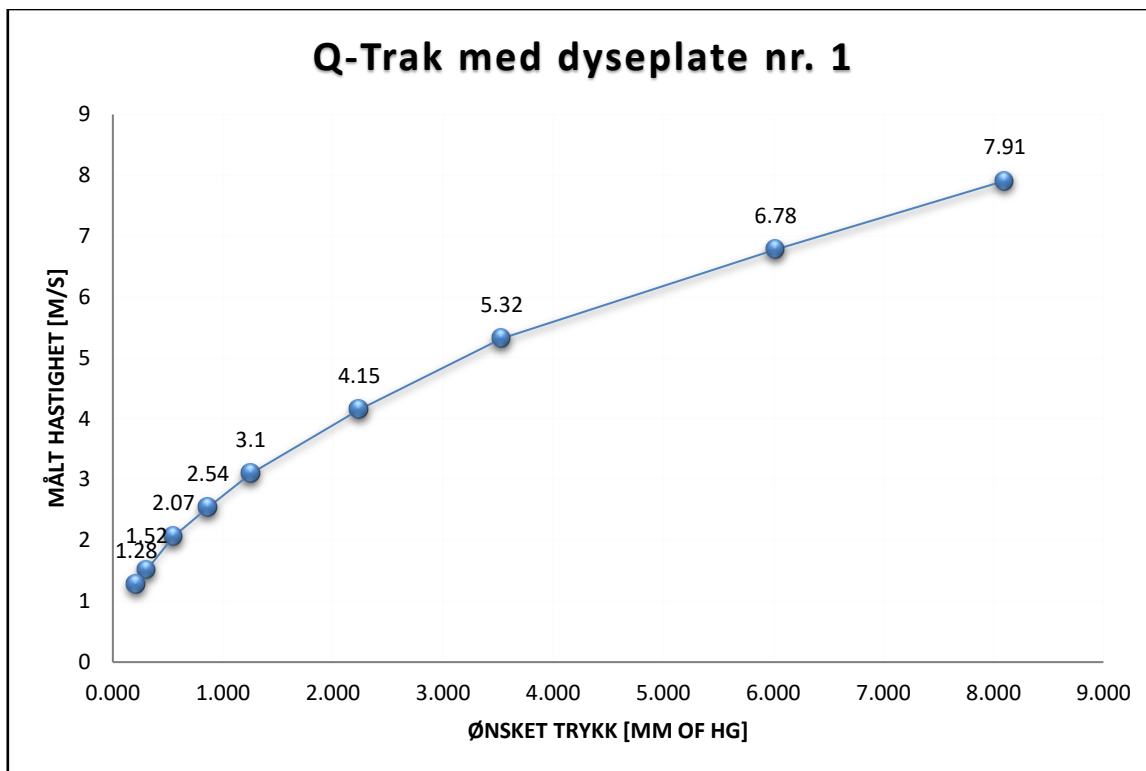
*Graf 7: Målte resultater med Q-Trak 7565 og hastighetssonde TSI 964, uten dyseplate*

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
20.00	20.69	±3.33
15.00	15.62	±3.97
12.50	13.07	±4.36
10.00	10.48	±4.58
7.50	7.70	±2.60

*Tabell 7: Målte hastigheter og måleusikkerhet med Q-Trak 7565 med hastighetssonde TSI 964, uten dyseplate*

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet uten dyseplate: 3.77%**

5.1.3.2 Q-Trak 7565 med dyseplate nr. 1



Graf 8: målte resultater med Q-Trak 7565 og hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr. 1

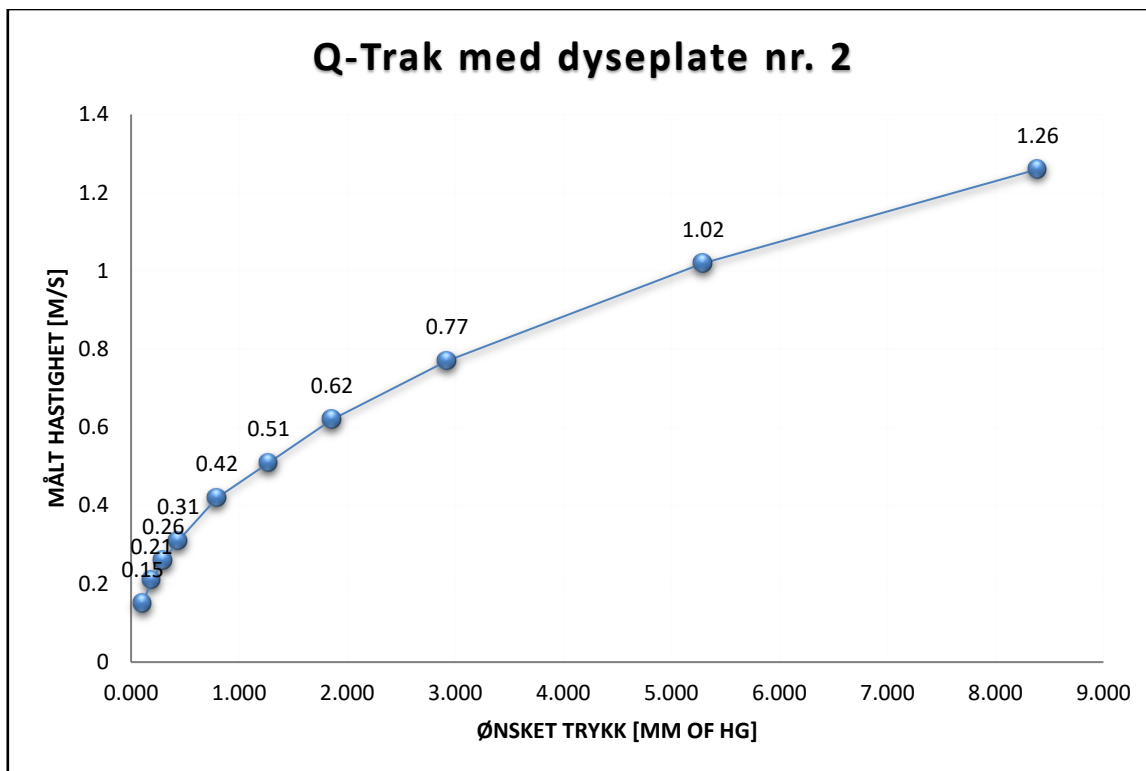
Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
7.50	7.91	±5.18
6.50	6.78	±4.13
5.00	5.32	±6.02
4.00	4.15	±3.61
3.00	3.10	±3.23
2.50	2.54	±1.57
2.00	2.07	±3.38
1.50	1.52	±1.32
1.25	1.28	±2.34

Tabell 8: Målte hastigheter og måleusikkerhet med Q-Trak 7565 med hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr. 1

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 1: 3.42%**



### 5.1.3.3 Q-Trak 7565 med dyseplate nr. 2



Graf 9: målte resultater med Q-Trak 7565 og hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr. 2

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
1.25	1.26	±0.79
1.00	1.02	±1.96
0.75	0.77	±2.60
0.60	0.62	±3.23
0.50	0.51	±1.96
0.40	0.42	±4.76
0.30	0.31	±3.23
0.25	0.26	±3.85
0.20	0.21	±4.76
0.15	0.15	±0

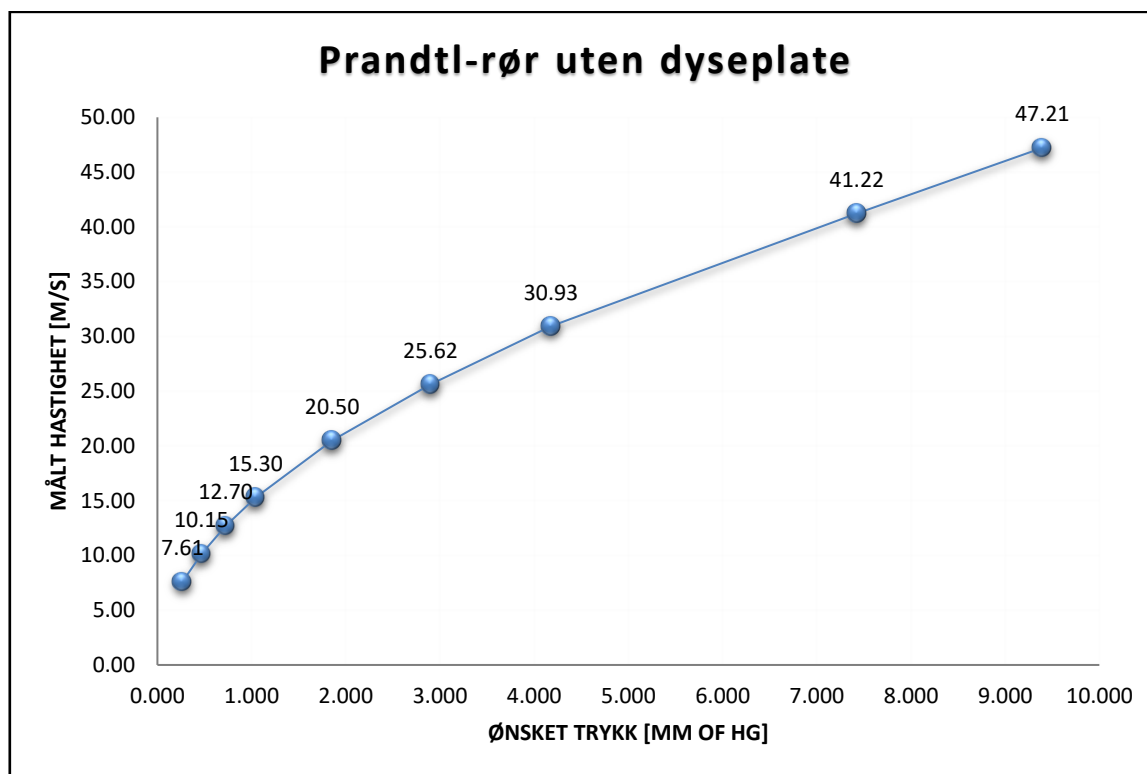
Tabell 9: Målte hastigheter og måleusikkerhet med Q-Trak 7565 med hastighetssonde TSI 964, med dyseplate nr. 2

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 2: 2.71%**

### 5.1.4 Ytelsesverifisering med prandtlrør

Graf 10, graf 11 og graf 12 sammen med tabell 10, tabell 11 og tabell 12 presenterer målingene med prandtlrør koblet til Swema 3000md ved å følge metoden i *kapittel 4.3* og *kapittel 4.4.1*.

#### 5.1.4.1 Prandtlrør uten dyseplate



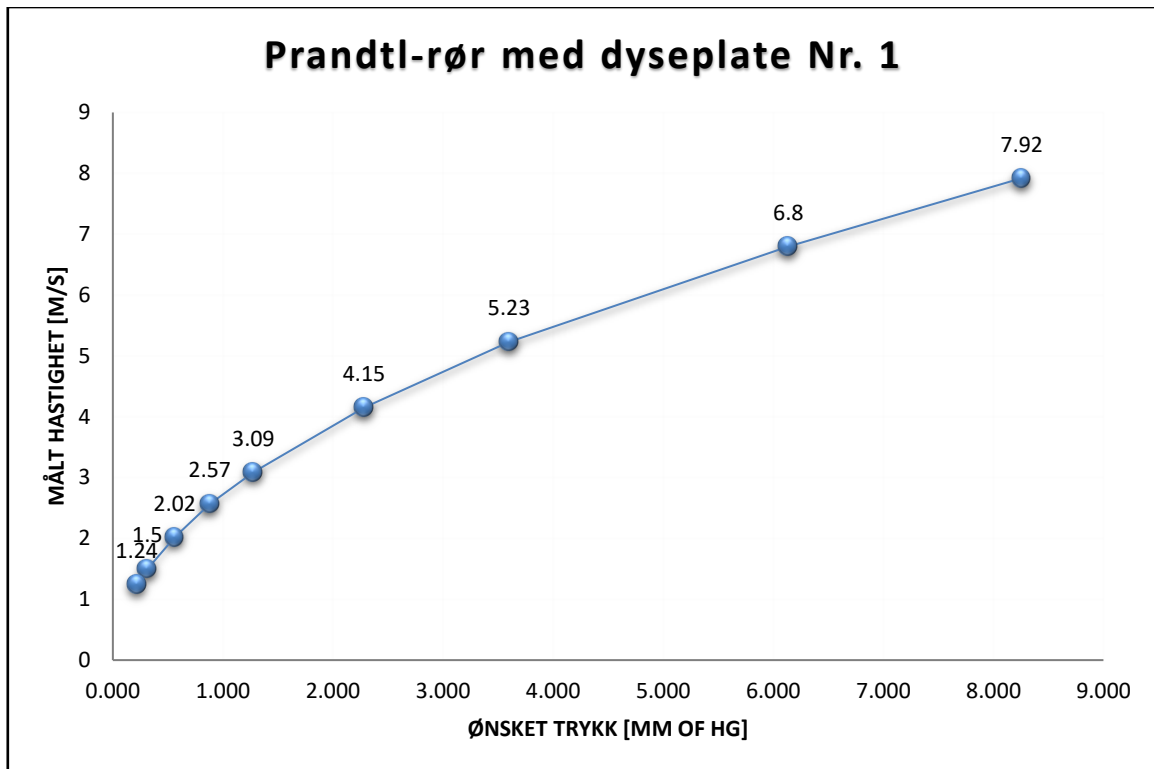
*Graf 10: målte resultater med prandtlrør koblet opp mot Swema 3000, uten dyseplate*

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
45.00	47.21	±4.68
40.00	41.22	±2.96
30.00	30.93	±3.01
25.00	25.62	±2.42
20.00	20.50	±2.44
15.00	15.30	±1.96
12.50	12.70	±1.57
10.00	10.15	±1.48
7.50	7.61	±1.45

*Tabell 10: Målte hastigheter og måleusikkerhet med prandtlrør koblet til Swema 3000, uten dyseplate*

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet uten dyseplate: ±2.44%**

### 5.1.4.2 Prandtlrør med dyseplate nr. 1



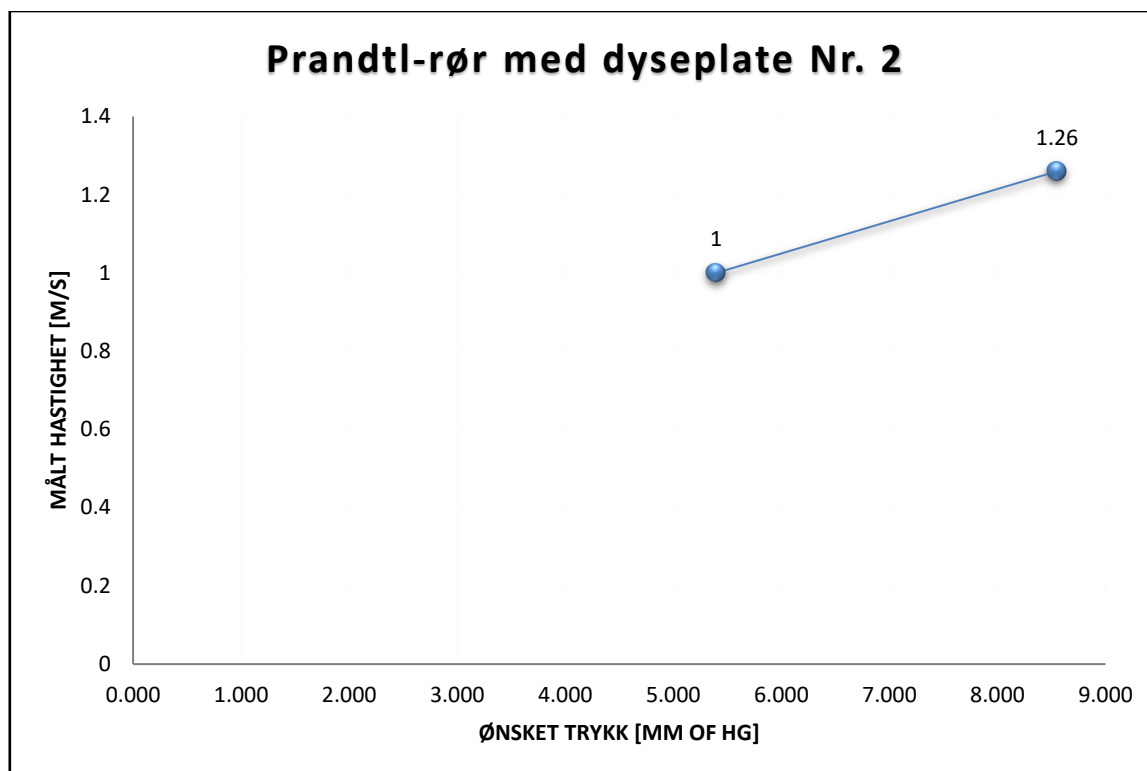
Graf 11: målte resultater med prandtlrør koblet opp mot Swema 3000, med dyseplate nr. 1

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
7.50	7.92	±5.30
6.50	6.80	±4.41
5.00	5.23	±4.40
4.00	4.15	±3.61
3.00	3.09	±2.91
2.50	2.57	±2.72
2.00	2.02	±0.99
1.50	1.50	±0
1.25	1.24	±0.81

Tabell 11: Målte hastigheter og måleusikkerhet med prandtlrør koblet til Swema 3000, med dyseplate nr. 1

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 1: ±2.79%**

### 5.1.4.3 Prandtlrør med dyseplate nr. 2



*Graf 12: målte resultater med prandtlrør koblet opp mot Swema 3000, med dyseplate nr. 2*

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
1.00	1.00	±0
1.25	1.26	±0.79

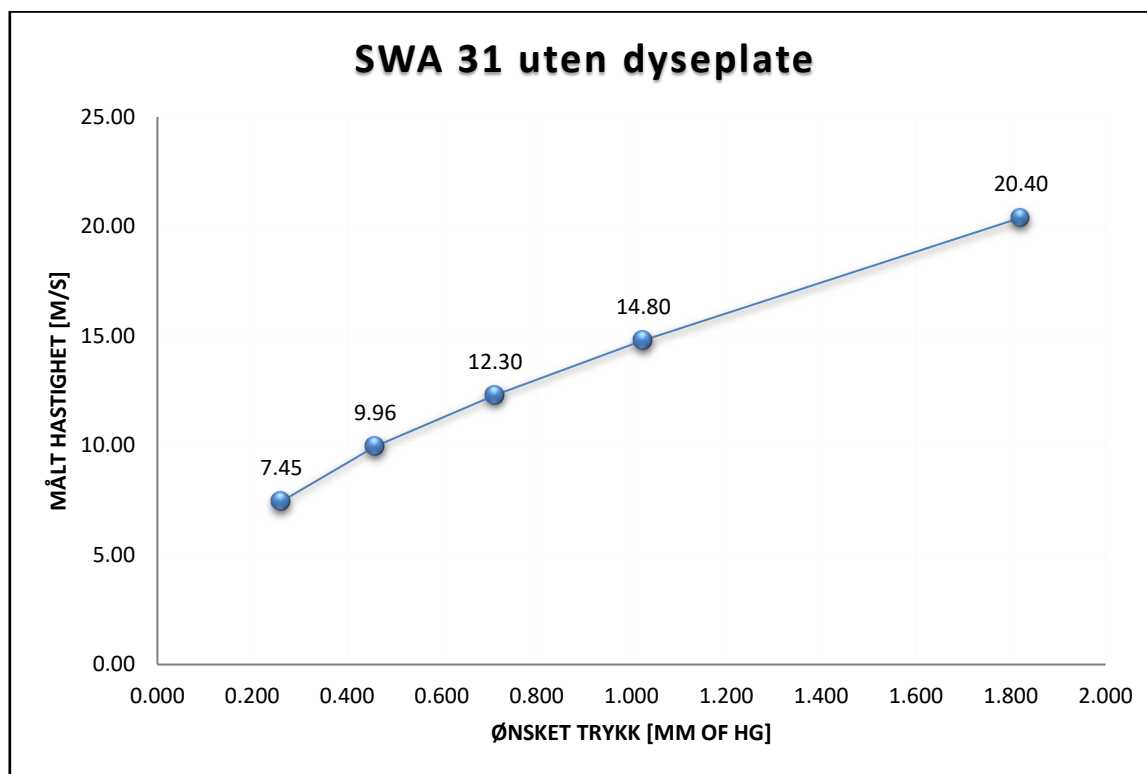
*Tabell 12: Målte hastigheter og måleusikkerhet med prandtlrør koblet til Swema 3000, med dyseplate nr. 2*

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 2: ±0.4%**

### 5.1.5 Ytelsesverifisering med SWA 31 hastighetssonde

Graf 13, graf 14 og graf 15 sammen med tabell 13, tabell 14 og tabell 15 presenterer målingene med en SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000 ved å følge metoden i *kapittel 4.3* og *kapittel 4.4.2*.

#### 5.1.5.1 SWA 31 uten dyseplate



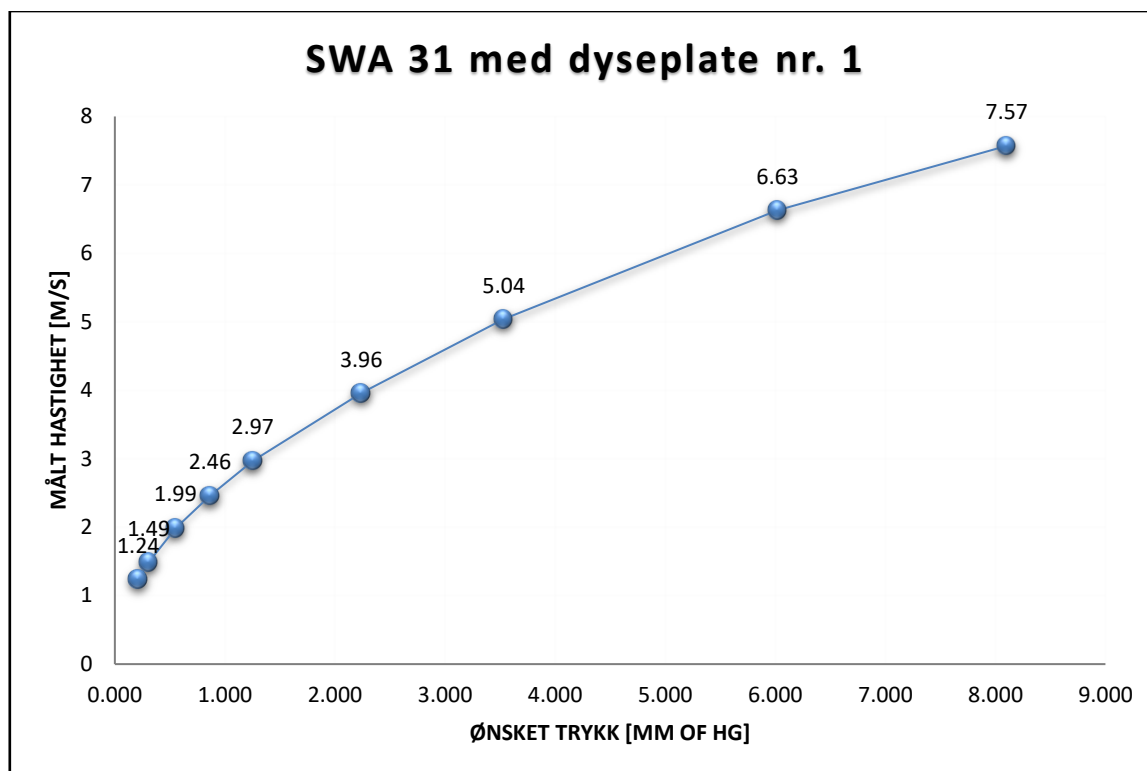
*Graf 13: målte resultater med SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000, uten dyseplate*

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
20.00	20.40	±1.96
15.00	14.80	±1.35
12.50	12.30	±1.63
10.00	9.96	±0.40
7.50	7.45	±0.67

*Tabell 13: Målte hastigheter og måleusikkerhet med SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000, uten dyseplate*

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet uten dyseplate: ±1.20%**

### 5.1.5.2 SWA 31 med dyseplate nr. 1



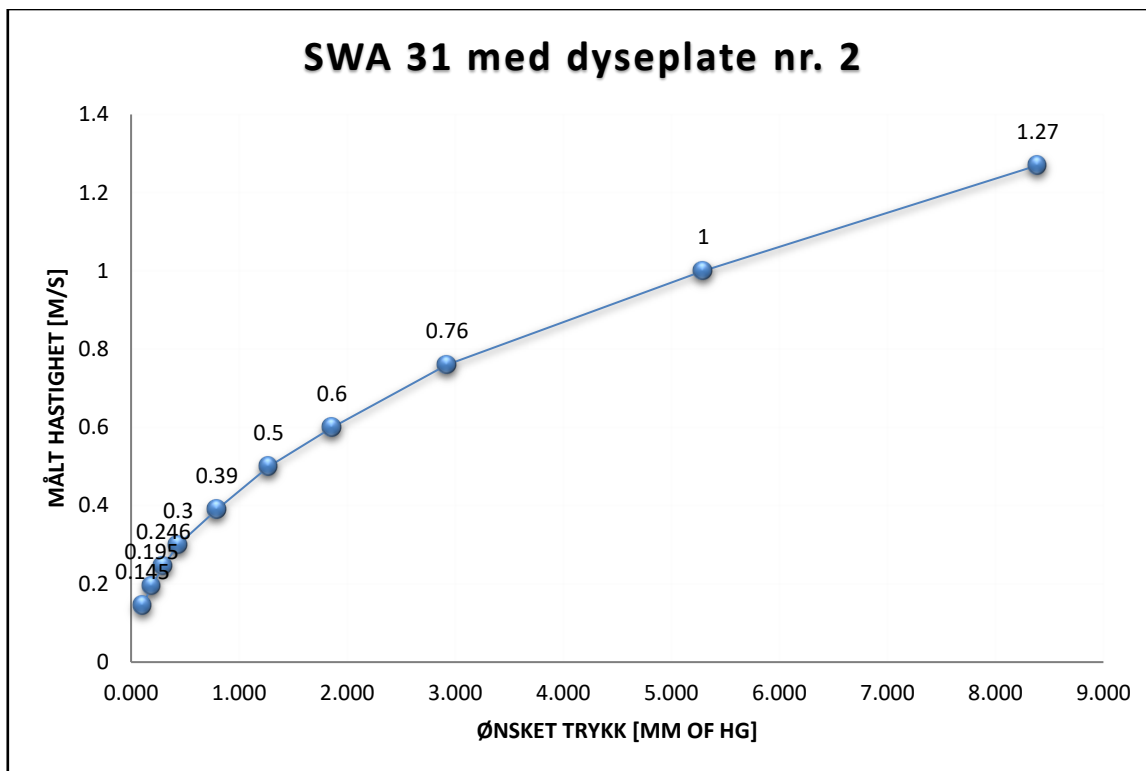
Graf 14: målte resultater med SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000, med dyseplate nr. 1

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
7.50	7.57	±0.98
6.50	6.63	±1.96
5.00	5.04	±0.79
4.00	3.96	±1.01
3.00	2.97	±1.01
2.50	2.46	±1.63
2.00	1.99	±0.50
1.50	1.45	±3.45
1.25	1.18	±5.93

Tabell 14: Målte hastigheter og måleusikkerhet med SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000, med dyseplate nr. 1

**Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 1: ±1.91%.**

### 5.1.5.3 SWA 31 med dyseplate nr. 2



Graf 15: målte resultater med SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000, med dyseplate nr. 2

Standard hastighet [m/s]	Målt hastighet [m/s]	Måleusikkerhet [%]
1.25	1.27	±1.57
1.00	1.00	±0
0.75	0.76	±1.32
0.60	0.60	±0
0.50	0.50	±0
0.40	0.39	±2.56
0.30	0.30	±0
0.25	0.24	±4.17
0.20	0.19	±5.26
0.15	0.14	±7.14

Tabell 15: Målte hastigheter og måleusikkerhet med SWA 31 hastighetssonde koblet til Swema 3000, med dyseplate nr. 2

Gjennomsnittlig måleusikkerhet med dyseplate nr. 2: ±2.20%.

## 5.2 Diskusjon av resultater

I denne delen vil det diskuteres implikasjonene av funnene. Resultatene skal tolkes i lys av våre første forskningsspørsmål og eksisterende litteratur, deretter skal betydningene av funnene forklares i tillegg til eventuelle uventede utfall og potensielle begrensninger.

Kalibreringen av vindtunnelen på benk ga resultater som var både forventet og overraskende. Mens dataene stort sett stemmer overens med gjeldende litteratur om vindtunnelkalibreringsteknikker, var det noen uventede funn som kunne bidra til feltet. Før diskusjon av resultatene, bringes problemstillingene frem igjen for å få en påminnelse, for så å vurdere om resultatene hjelper med å svare på spørsmålene som ble stilt i starten av oppgaven. Problemstillingene i denne oppgaven var:

- Hvordan kan ulike ytelses parametere for vindtunnelen, som for eksempel strømningshastighet, temperatur og atmosfærisk trykk bli målt så nøyaktig som mulig?
- Hva er de viktigste trinnene og metodene i utviklingen av en systematisk kalibreringsprosedyre for vindtunnel på benk?
- Hvordan kan kalibreringsprosessen, inkludert detaljerte metoder, eksperimentelle resultater og analyse, dokumenteres for å gjøre vedlikehold og fremtidige kalibreringer enkle?
- Hvordan sammenligner måleresultater fra kalibreringen i forhold til etablerte standarder og retningslinjer?
- Hvilke endringer er eventuelt nødvendige for å forbedre vindtunnelens ytelse, og hvordan kan effektiviteten verifiseres med ytterligere kalibreringseksperimenter?

Den første problemstillingen gjelder ytelses parametere for vindtunnelen. I kapittel 3.3 *viktige parametere*, 3.5 *måleusikkerhet* og 3.6 *kalibrering av instrumenter og utstyr*, så fås det formeller, fremgangsmåter og potensielle begrensninger for å få så nøyaktige parameter verdier som mulig.

Ved å observere måleusikkerheten for resultatene i *kapittel 5.1*, og deretter sammenligne resultatene med «*Tabell 1: Måleusikkerhet parametere for instrumentene*» i tillegg til standard- trykk og hastighet, så fås det indikasjoner på at parameterne er målt så nøyaktig som mulig. Den eneste begrensningen i form av måling og beregning av parameterne, er at noen av måleinstrumentene ikke var kalibrert i henhold til anbefalt kalibrerings frekvens, og dette kan ha en liten påvirkning på noen av parameterne som f.eks. målt strømningshastighet. Atmosfærisk trykk ble både målt med måleinstrument, og dobbeltsjekket ved å beregne med formelen fra *kapittel 3.3.3*, med innhentet data fra Metrologisk Institutt. Strømningshastighet ble målt med de samme parameterne med 3 forskjellige måleinstrumenter, 3 ulike vindmålere og et prandtlrør. Opprinnelig så skulle det også gjøres en måling med Almemo 2690-8A og en separat hastighetssonde som er egnet for måleinstrumentet, men



dessverre så passet ikke denne hastighetssonden med noen av endestykkene. Det var heller ikke nok tid eller ressurser til å kunne lage en separat sideplate eller kjøpe inn andre endestykker for å kunne eksperimentere med dette måleinstrumentet.

Ved å observere resultatene, der standard hastighet er sammenlignet med målt hastighet basert på ønsket trykk (visst i vedlegg G - *Parametere i Excel 1*) som deretter leses av skjermen TSI 8495, fås det indikasjoner på at metoden er en godt egnet kalibreringsprosedyre for vindtunnel på benk. Største måleusikkerheten i metoden kom ved bruk av VelociCalc 9555-P og Q-Trak 7565, koblet til en TSI 964 vindmåler. Som skrevet i *kapittel 4.3*, der de viktigste trinnene og metodene for en systematisk kalibreringsprosedyre er beskrevet, så er det ulike metoder for å kalibrere hastighetsfølere basert på måleinstrumentet. Det var en litt uventet resultat at det skulle være relativt ulike kalibreringsmetoder basert på vindmåler og måleinstrument. Ved bruk av VelociCalc og Q-Trak er det i hvert fall mulig å kalibrere hastighetsfølere direkte gjennom innstillingene i menyen som visst i «*Bilde 13: Eksempel på hvordan kalibrering av en hastighetssonde kan gjennomføres med Q-Trak eller VelociCalc*» i *kapittel 4.3*. I eksperimentet ble disse to måleinstrumentene kombinert med en separat TSI 964 sonde for hvert instrument, kalibrert ved bruk av vindtunnelen.

Resultatene etter kalibrering av TSI 964 med VelociCalc viser at det er en gjennomsnittlig måleusikkerhet, med tanke på strømningshastighet, på  $\pm 3.72\%$  uten dyseplate,  $\pm 3.00\%$  med dyseplate 1 og  $3.25\%$  med dyseplate 2. Begrensingene med målingene er at selvet måleinstrumentet VelociCalc ikke har blitt kalibrert siden 2017, også må det påminnes at manometeret MKD 220DD og skjermen TSI 8495 heller ikke har blitt kalibrert på lenge. Ved å kalibrere disse instrumentene i henhold til anbefalt kalibrerings frekvens, så er det stor sannsynlighet for at måleusikkerhet går under  $\pm 3.00\%$ , som er den ønskede måleusikkerheten ettersom det er den verdien som produsentene oppgir at den skal opprettholde. Det må også påminnes at maks måleusikkerheten på  $\pm 3.00\%$  for måleinstrumentet er ved en temperatur på  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , og derfor så betyr det ikke nødvendigvis at disse målingene er unøyaktige selv med begrensningene.

Resultatene etter kalibrering av TSI 964 med Q-Trak viser at det er en gjennomsnittlig måleusikkerhet på  $\pm 3.77\%$  uten dyseplate,  $\pm 3.42\%$  med dyseplate 1 og  $\pm 2.71\%$  med dyseplate 2. Begrensingene her er lik med tanke på manometeret og skjermen, men selve måleinstrument ble sist kalibrert februar 2023. Det er oppgitt av produsenten at maksimum måleusikkerheten på instrumentet her også skal være  $\pm 3.00\%$  ved  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ved ytelsesverifisering av vindtunnelen med SWA 31- og prandtlrør koblet til Swema 3000md, så fås det målinger med mindre måleusikkerhet, som indikerer at oppsettet av vindtunnelen for kalibrering fungerer som den skal. Grunnen til at ytelsesverifisering ble gjort ved bruk av SWA 31 og prandtlrør er fordi at det gir mer troverdige målinger og resultater ettersom Swema 3000 er et mer

moderne måleinstrument enn de andre, og fordi at den er kalibrert i henhold til anbefalt kalibrerings frekvens. Dessuten er prandtlrør et godt verktøy ved ytelsesverifisering som har blitt brukt til lignende formål i årevis. SWA 31 ble også brukt for å ha en referanse grunnlag slik at det var mulig å kartlegge og bekrefte ytelsen til vindtunnelen.

Resultatene med SWA 31 viser at det var en måleusikkerhet på  $\pm 1.20\%$  uten dyseplate,  $\pm 1.91\%$  med dyseplate 1, og  $\pm 2.20\%$  med dyseplate 2. Begrensningene med disse resultatene er at hastighetssonden SWA 31 ikke har blitt kalibrert siden 2021, selv om det er anbefalt en årlig kalibrering. En annen begrensning er at det ikke er gjort målinger over 20 m/s.

Resultatene med prandtlrør viser at det var en måleusikkerhet på  $\pm 2.44\%$  uten dyseplate,  $\pm 2.79\%$  med dyseplate 1, og  $\pm 0.4\%$  med dyseplate 2. Ved 10 m/s i forsøket så er måleusikkerheten  $\pm 1.48\%$  og sammenlignet med måleusikkerheten i *Tabell 1: Måleusikkerhet parametere for instrumentene*, der måleusikkerheten ved 10,16 m/s ved bruk av prandtlrør skal være  $\pm 1.50\%$ , er det en god indikasjon på at målingene er nøyaktige. Begrensningen ved ytelsesverifisering med prandtlrør er at det ikke var mulig å måle hastigheter under 0,80 m/s. Dette er en ulempe ettersom det gir mindre sammenlignings grunnlag når ytelsen skal verifiseres. Derfor er det også en fordel å gjøre ytelsesverifisering på 2 ulike metoder, og deretter sammenligne målt hastighet med standard hastighet. Det er anbefalt å bruke minst 2 ulike metoder ved fremtidig kalibrering og ytelses verifisering. Det er anbefalt å dokumentere målingene med databladet fra TSI, og bruke dataen som referanse ved fremtidig kalibrasjon eller ytelses verifisering. Ved å ha både standard verdier kombinert med tidligere målinger, bidrar det til å gjøre fremtidig vedlikehold og kalibrasjon både for vindtunnelen og hastighetssonder enkle.

Ved bruk av metoden i denne oppgaven, så er parameterne tatt på høyest alvor siden de har en direkte påvirkning på måleresultater av strømningshastighet. Etter at parameter verdiene for temperatur, atmosfærisk trykk og korreksjonsfaktor er funnet, så er det mulig å bruke metodene i kapittel 4.1, 4.2 og 4.3 for å få mest nøyaktige og troverdige målinger. Deretter kan disse målingene sammenlignes med referanse verdier som først og fremst burde være standard verdiene, også eventuelt tidligere målinger.

For å forbedre vindtunnelens ytelse er det mulig å gjøre noen tiltak. Først og fremst så burde måleinstrumentene alltid kalibreres etter anbefalt kalibrerings frekvens, spesielt manometeret MKD 220DD og tilkoblet skjerm TSI 8495. Dette sørger for at ønsket trykk som blir vist på skjermen er så tilnærmet forholdene i vindtunnelen som mulig. Samtidig gir dette et godt grunnlag for mer nøyaktige og pålitelige målinger. I dette eksperimentet så har ikke disse to måleinstrumentet blitt kalibrert, og det er en ulempe og begrensning. Ved fremtidig bruk av oppsettet med vindtunnelen, så er det anbefalt at disse to kalibreres.

Et annet tiltak for å forbedre vindtunnelens ytelse er å eventuelt lage en automatisert metode for å kontrollere hastigheten, ettersom det kan være vanskelig å få nøyaktig det ønskede trykket ved å bruke kontrolleren Hitachi SJ200.

For å oppsummere diskusjonen, så danner denne oppgaven et referanse grunnlag for oppsett av en vindtunnel på benk, både til kalibreringsformål, og for andre formål. Resultatene fra eksperimentene viser at teorien og metodene svarer på problemstillingene i denne oppgaven til tross for avgrensningene og begrensningene. Resultatene viser også at det er rom for forbedringer, som blant annet å kalibrere måleinstrumentene som benyttes ved drift av vindtunnelen på benk. Dette hadde gjort målingene mer pålitelige, og det er noe som kunne vært gjort annerledes i eksperimentet. Det hadde også vært interessant å kunne gjøre målinger med måleinstrumentet Almemo 2690-8A og trekkssensor SWA 03 for å få flere sammenlignings grunnlag. Oppsettet for kalibreringsprosedyren hadde også vært mye enklere, og bedre med en automasjons program for å styre hastigheten til viften basert på ønsket trykk.

## 6 Konklusjoner

Ved eksperimentet i denne oppgaven så har det blitt funnet mye nyttig kunnskap og informasjon som både kan brukes som referanse, eller til videre forbedringer. Oppgaven avslutter med en punktliste av hovedfunnene i oppgaven, og potensiale det har ved videre forskning.

### 6.1 Hovedfunn

- Hvordan man setter opp en systematisk kalibrerings prosedyre ved bruk av vindtunnel på benk. Og hvordan dette oppsettet kan bli brukt som referanse for fremtidig oppsett for vindtunneler som blir brukt til andre formål enn kalibrering av vindmålere.
- At det er ulike kalibreringsmetoder for hvert måleinstrument og hastighetsføler, og at konsekvensene av det er at kalibreringen av disse måleinstrumentet ikke kun kan gjennomføres ved bruk av vindtunnelen.
- Viktigheten av å holde måleinstrumenter og utstyr kalibrert etter anbefalt frekvens, både for vedlikehold og målinger. Dette reduserer begrensingene som oppstår ved målinger.
- Viktigheten av parametere ved måling av lufthastighet, spesielt i en vindtunnel på benk. Konsekvensen av å ikke se på dette som en faktor er at unøyaktige målinger oppstår siden målinger lufthastighet er avhengig av trykk, temperatur og en korreksjonsfaktor.

### 6.2 Videre forskning

Avslutningsvis så ønskes det å konkludere med potensiale ved videre forskning. Dersom det hadde vært mer tid og ressurser for denne oppgaven så hadde det vært interessant å teste følgende ting:

- Laget en ny sideplate eller kjøpt inn flere ulike endestykker som hadde gjort det mulig å eksperimentere med Almemo 2690-8A og trekksensor SWA 03.
- Prøvd å utvikle en automasjonsprogram for å kontrollere hastigheten i vindtunnelen mer effektivt og lettere. Dette hadde vært mulig med for eksempel Raspberry Pi og/eller en automasjonsprogrammerings program.
- Dannet et kalibrerings dokumentasjon for alle de ulike måleinstrumentene som f.eks. Swema 3000 og vindmålerne til dette måleinstrumentet.
- Kalibrert alle de ulike måleinstrumentene som ikke har blitt kalibrert i henhold til anbefalt kalibrerings frekvens, og prøvd å gjøre nye tester.

# Referanser

- Ahlborn. (u.å.). *Precision measuring instrument and data logger ALMEMO 2690-8A*.  
<https://www.ahlborn.com/en/products/almemo-2690-8a>
- Barometric Formula. (2023, 12. April) . I *Wikipedia*.  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Barometric\\_formula&oldid=1149553411](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Barometric_formula&oldid=1149553411)
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia. (2023, April 24). *measurement*. I *Encyclopedia Britannica*.  
<https://www.britannica.com/technology/measurement>
- Halbo, L. & Hoftstad, K. (2019, 31. juli). Kalibrering. I *Store norske leksikon*.  
<https://snl.no/.versionview/1762480>
- Hardy, J. E., Mcknight, T. E., & Madden, D. S. (2002b). Automation & Characterization of US Air Force Bench Top Wind Tunnels. *ResearchGate*.  
[https://www.researchgate.net/publication/237607706\\_Automation\\_Characterization\\_of\\_US\\_Air\\_Force\\_Bench\\_Top\\_Wind\\_Tunnels](https://www.researchgate.net/publication/237607706_Automation_Characterization_of_US_Air_Force_Bench_Top_Wind_Tunnels)
- Harstveit, K., Sivle, A. D. & Evans, A. K. D. (2023, 25. januar). Lufttrykk. I *Store norske leksikon*.  
<https://snl.no/.versionview/1803330>
- Helseth, L. E. (2023, 17. mars). Pitotrør. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/.versionview/1875598>
- Hitachi Ltd. (u.å.). *Hitachi AC Drive SJ200-015NFU*. Hitachi AC Drive. <https://hitachiacdrive.com/hitachi-ac-drive-sj200-015nfu/>
- Hofstad, K. (2022, 14. februar). Standard. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/.versionview/1558973>
- Hofstad, K. (2020, 22. februar). Måleusikkerhet. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/.versionview/1776902>
- Justervesenet. (u.å.). *Kalibreringsintervall*. <https://www.justervesenet.no/maleteknikk/maleteknisk-bistand/kalibrering/kalibreringsintervall/>
- Kimo Electronics Pvt. Ltd. (u.å.). *Pitot tubes Type L NPL type (L/straight)*. Kimoinstruments.  
<https://www.kimoinstruments.com/detail/pitot-tubes-type-l-npl-type-l-straight->
- Loosmore, G. A., & Hunt, J. G. (2000). Dust resuspension without saltation. *Journal of Geophysical Research*, 105(D16), 20663–20671. <https://doi.org/10.1029/2000jd900271>
- MKS Instruments. (u.å.). *220DD1-25000 Torr Heated (45°C) Baratron Differential Capacitance Manometer*.  
<https://www.mks.com/f/220dd-heated-differential-capacitance-manometers>
- Omega Engineering. (2006). *The Benchtop Wind Tunnel – A Useful but Little-Known tool for Science and Engineering*. <https://in.omega.com/techref/pdf/BenchWindTunnel.pdf>
- Omega Engineering. (u.å.). *45 m/s Open Loop Benchtop Wind Tunnel w/ 6”L x 4”W x 4”D Test Chamber*.  
<https://www.omega.com/en-us/test-inspection/wind-tunnels/p/WT4401-Wind-Tunnel>
- Pedersen, B. (2022, 12. oktober). Gass-tilstandsligningen. I *Store norske leksikon*.  
<https://snl.no/.versionview/1800853>
- Pedersen, B. (2020, 4. desember). Temperatur. I *Store norske leksikon*. <https://snl.no/.versionview/1802981>
- Samuelson, E. M. & Bjørndalen, E. (2022, 29. september). Lufttetthet. I *Store norske leksikon*.  
<https://snl.no/.versionview/1668171>

- Samuelsen, E. (2021, 17. august). Relativ fuktighet. I *Store norske leksikon*.  
<https://snl.no/.versionview/1466314>
- Standard Norge. (2018). *Generelle krav til prøvings- og kalibreringslaboratoriers kompetanse* (NS-EN ISO/IEC 17025:2017).  
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=958400>
- Standard Norge. (2015). *Ventilasjoner i bygninger – Feltmåling av luftmengder i ventilasjonsanlegg – Målemetode* (NS-EN 16211:2015).  
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=769858>
- Standard Norge. (2013). *Ventilasjon I bygninger – Prøvingsprosedyrer og målemetoder for overtakelse av ventilasjons- og luftkondisjoneringsanlegg* (NS-EN 12599:2012).  
<https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/produktpresentasjon/?ProductID=606810>
- Standard Norge. (2006). *Ergonomi i termisk miljø – Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort* (NS-EN 7730:2005).  
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=158329>
- Standard Norge. (2001). *Ergonomi for termisk miljø – Instrumenter for måling av fysiske størrelser* (NS-EN ISO 7726:2001).  
<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=145354>
- Swegon. (u.å.). *Understand the physics of air velocity*. <https://www.swegon.com/knowledge-hub/the-indoor-climate-guide/factors-affecting-the-indoor-climate-and-human-beings/air-velocity/understand-the-physics-of-air-velocity/>
- Swegon. (u.å.). *Air Velocity*. <https://www.swegon.com/knowledge-hub/the-indoor-climate-guide/factors-affecting-the-indoor-climate-and-human-beings/air-velocity/>
- Swema AB. (u.å.). *Swema 3000 Instrument & logger with external probes*. <https://swema.com/product/swema-3000/>
- Swema AB. (u.å.). *SWA 03 draught sensor For Swema 3000 /md/mdH+*. <https://swema.com/product/swa-03-draught-sensor/>
- Swema AB. (u.å.). *SWA 32 Anemometer*. <https://swema.com/product/swa-32/>
- TECQUIPMENT. (u.å.). *BENCH-TOP WIND TUNNEL*. <https://www.tecquipment.com/bench-top-wind-tunnel>
- TSI Incorporated. (u.å.). *Bench Top Wind Tunnel 8390*. <https://tsi.com/discontinued-products/bench-top-wind-tunnel-8390/>
- TSI Incorporated. (u.å.). *Q-Trak Indoor Air Quality Monitor 7565*. <https://tsi.com/discontinued-products/q-trak-indoor-air-quality-monitor-7565/>
- TSI Incorporated. (u.å.). *VelociCalc Multi-Function Ventilation Meter 9555-P*. <https://tsi.com/discontinued-products/velocicalc-multi-function-ventilation-meter-9555-p/>
- TSI Incorporated. (u.å.). *Thermoanemometer Straight Probe 964*. <https://tsi.com/product-accessories/thermoanemometer-straight-probe-964/>
- TSI Incorporated. (u.å.). *Transducer Display, Monitor, Power Supplies Model 8495*. <https://tsi.com/product-accessories/transducer-display,-monitor,-power-supplies-model-8495/>
- W. W. Grainger, Inc. (u.å.). *High Pressure Blower: 13 1/2 in Wheel, Direct Drive, For 1,319 cfm to 2,005 cfm Airflow*. <https://www.grainger.com/product/DAYTON-High-Pressure-Blower-13-1-4C330>

# VEDLEGG

## Vedlegg A – TSI dokumentasjoner

### Vedlegg 1 – TSI datablad

Model 8390 12 Bench-top Wind Tunnel

Table 2-B

**SAMPLE CALIBRATION DATA SHEET (METRIC)**

Date \_\_\_\_\_

Initials \_\_\_\_\_

Model No. \_\_\_\_\_

Barometric Pressure \_\_\_\_\_

Serial No. \_\_\_\_\_

Room Temperature \_\_\_\_\_

Density Correction Factor:

$$K = \frac{29.92}{P} \times \frac{460 + t}{530}$$

t = temperature (°F)

P = barometric pressure (inch of Hg)

or

Density Correction Factor:

$$K = \frac{760}{P} \times \frac{273.15 + t}{294.25}$$

t = temperature (°C)

P = barometric pressure (mm of Hg)

**NO NOZZLE INSERTED**

Standard Velocity S m/s	Standard P mm of Hg	Desired P (Column 2) x K mm of Hg	Velocity Transducer Output (volts or S m/s)
1	2	3	4
45.0	9.26		
40.0	7.32		
30.0	4.12		
25.0	2.86		
20.0	1.83		
15.0	1.03		
12.5	0.716		
10.0	0.462		
7.5	0.263		

## WITH NO. 1 NOZZLE PLATE (0.656" holes)

Standard Velocity S m/s	Standard P mm of Hg	Desired P (Column 2) x K mm of Hg	Velocity Transducer Output (volts or S m/s)
1	2	3	4
7.5	8.14		
6.5	6.05		
5.5	4.30		
5.0	3.55		
4.5	2.86		
4.0	2.25		
3.5	1.71		
3.25	1.47		
3.00	1.26		
2.75	1.05		
2.50	0.869		
2.25	0.702		
2.00	0.555		
1.75	0.424		
1.50	0.311		
1.4	0.270		
1.3	0.233		
1.25	0.215		



## WITH NO. 2 NOZZLE PLATE (0.25" holes)

Standard Velocity S m/s	Standard P mm of Hg	Desired P (Column 2) x K mm of Hg	Velocity Transducer Output (volts or S m/s)
1	2	3	4
1.25	8.43		
1.00	5.32		
0.75	2.94		
0.60	1.87		
0.50	1.28		
0.40	0.799		
0.30	0.440		
0.25	0.302		
0.20	0.193		
0.15	0.108		

## 7 Troubleshooting

Symptom	Solution
1. Scraping sounds at the fan	Realign fan.
2. The switch on control potentiometer is clockwise; no power to motor	Replace fuse in controller. See controller instruction manual.  Check that the power cord is plugged in and that the circuit or outlet is turned on
3. Inability to achieve specified velocity	Check that when the wind tunnel is running at maximum velocity the controller is receiving at least 115 VAC (220 VAC for the 220 AC model)  Clean flow straighteners and air filter. (see note 1. below)
4. Poor repeatability	Check for leaks in tunnel body and/or pressure hoses. Tunnel must not be operated in confined area. Room should have a minimum volume of 1600 cubic feet.
5. Poor accuracy	Check repeatability (see above). If the repeatability is good, check the accuracy of pressure transducer.
6. No reading or incorrect reading of pressure transducer and readout	Consult manufacturers manuals for pressure transducer and readout.

Note 1. The honeycomb flow straighteners and filter can be removed for cleaning. A mild soap or detergent can be used. Do not use any solvents. Allow filter element to drip dry, do not wring it out.

ENERGY AND COMFORT

## Indoor Air Quality Instruments



Model 7565

### Features and Benefits

- o Measures CO<sub>2</sub>, temperature, humidity, and CO
- o Calculates dew point, wet bulb and percent outside air
- o Displays up to 5 measurements simultaneously
- o One instrument with multiple plug-in probe options
- o User-selectable logging intervals and start/stop times
- o Store up to 38.9 days of data collected at one-minute log intervals
- o TrakPro™ software provided for data logging, analysis and documenting results
- o Perform single-point tests for quick building surveys

### Easy to Use

The Q-Trak features a menu-driven user interface for easy operation. On-screen prompts and step-by-step instructions guide the user through operation and field calibration. The Q-Trak also features an ergonomic, overmolded case design and a keypad lockout to prevent tampering during unattended use.

### Q-TRAK™ Indoor Air Quality Monitor Model 7565

Providing a comfortable, safe and healthy indoor environment is an increasingly important concern. Good air quality increases concentration and productivity. It can also reduce lost days due to absence. TSI's Q-Trak IAQ Monitor provides quick, accurate information to assess key IAQ parameters.

### Accurate Results

The Q-Trak monitor's state-of-the-art sensors and large, easy-to-read graphics allow real-time, simultaneous display of CO<sub>2</sub>, temperature, relative humidity, and CO.

### Data Collection and Reporting

Expanded data logging capacity and the inclusion of TrakPro Data Analysis Software provides the capabilities to work more effectively and efficiently. The Q-Trak can store up to 38.9 days of data collected at one-minute log intervals. The stored data can be recalled, reviewed on screen, and downloaded for easy reporting. TrakPro helps you to generate professional graphs for your reports.



TRUST. SCIENCE. INNOVATION.



## Specifications

### Q-TRAK Model 7565 (includes Model 982 Probe)

#### Carbon Monoxide (IAQ Probe Model 982)

**Sensor Type** Electro-chemical  
**Range** 0 to 500 ppm  
**Accuracy<sup>1</sup>** ±3% of reading or 3 ppm, whichever is greater  
**Resolution** 0.1 ppm  
**Response Time** <60 seconds to 90% step change

#### Carbon Dioxide (IAQ Probe Models 980 and 982)

**Sensor Type** Dual-wavelength NDIR (non-dispersive infrared)  
**Range** 0 to 5,000 ppm  
**Accuracy<sup>2</sup>** ±3.0% of reading or ±50 ppm, whichever is greater  
**Resolution** 1 ppm  
**Response Time** 20 seconds

#### Temperature (IAQ Probe Models 980 and 982)

**Sensor Type** Thermistor  
**Range** 32 to 140°F (0 to 60°C)  
**Accuracy** ±1.0°F (0.6°C)  
**Resolution** 0.1°F (0.1°C)  
**Response Time** 30 seconds (90% of final value, air velocity at 400 ft/min [2 m/s])

#### Relative Humidity (IAQ Probe Models 980 and 982)

**Sensor Type** Thin-film capacitive  
**Range** 0 to 95% RH  
**Accuracy<sup>3</sup>** ±3% RH  
**Resolution** 0.1% RH  
**Response Time** 20 seconds (for 63% of final value)

#### % Outside Air

**Range** 0 to 100%  
**Resolution** 0.1%

#### Barometric Pressure

**Range** 20.36 to 36.648 in. Hg  
 (517.15 to 930.87 mm Hg)  
**Accuracy** ±2% of reading

#### Operating Temperature

40 to 113°F (5 to 45°C)

#### Storage Temperature

-4 to 146°F (-20 to 60°C)

#### Logging Capability

**Range** Logs up to 56,035 data points with key (4) measured parameters enabled, 38.9 days at 1-minute log intervals

#### Time Constants

1 sec, 5 sec, 10 sec, 20 sec, 30 sec (user selectable)

#### Log Intervals

1 second up to 1 hour (user selectable)

#### Meter Dimensions

3.8 in. × 8.3 in. × 2.1 in. (9.7 cm × 21.1 cm × 5.3 cm)

#### Probe Dimensions

**Length** 7.0 in. (17.8 cm)  
**Diameter** 0.75 in. (1.9 cm)

#### Weight (with batteries)

0.8 lbs (0.36 kg)

#### Power Requirements

Four AA-size alkaline batteries or AC adapter, both included

	7565
Probe that measures CO, CO <sub>2</sub> , temperature, and humidity	includes 982 probe
CO <sub>2</sub>	•
CO	•
Temperature	•
%RH, wet bulb, and dew point	•
%Outside air	•
Statistics	•
Review data	•
Optional plug-in probes	•
TRAKPro data analysis software	•
LogDat2 downloading software	•
Optional Bluetooth printer	•
Certificate of Calibration	•

<sup>1</sup> At 77°F (25°C). Add uncertainty of +0.2%/F (+0.36%/°C) away from calibrated temperature.

<sup>2</sup> At calibration temperatures. Add uncertainty of +0.25%/F (0.5%/°C) for change in temperature.

<sup>3</sup> At 77°F (25°C). Add uncertainty of +0.03% RH/F (+0.05% RH/°C) away from calibrated temperature.

Specifications are subject to change without notice.

ENERGY AND COMFORT

## Ventilation Test Instruments



Model 9555

### Features and Benefits

- o Best in class accuracy, especially in low flows
- o Displays up to 5 measurements simultaneously
- o Optional "smart" plug-in probes, including CO<sub>2</sub> and rotating vane probes
- o Large graphic display
- o Manual or continuous data logging
- o TrakPro™ and LogDet2™ software included
- o Name test IDs meaningful to you
- o Bluetooth® printer capability
- o Fast calibration and repair service—just send in the probe

### VELOCICALC® Multi-Function Ventilation Meter

#### Series 9555

The Series 9555 are portable, hand held, Multi-Function Ventilation Test Instruments. These instruments are available with or without a differential pressure sensor and are designed to work with a wide range of plug-in probes. The probes allow users to make various measurements by simply plugging in a different probe that has the features and functions best suited for a particular application. They are designed to measure air velocity, temperature, humidity, CO and CO<sub>2</sub>. Calculations include air flow, heat flow, turbulence, wet bulb and dew point temperature.

The probes can be ordered at any time and include a data sheet with certificate of traceability. When its time for servicing, only the probe needs to be returned since all the calibration data is stored within the probe.

#### Applications

- o HVAC commissioning and troubleshooting
- o Clean room certification
- o Testing and balancing
- o Ventilation evaluations
- o Thermal comfort studies
- o IAQ investigations
- o Process air flow testing



TRUST. SCIENCE. INNOVATION.



## Specifications

### VELOCALC

#### Models 9555, 9555-A, 9555-P, 9555-X and Optional Probes

##### Velocity (Pitot Tube for Meter Models 9555, 9555-A, 9555-P)

Range <sup>1</sup>	1.27 to 78.7 m/s (250 to 15,500 ft/min)
Accuracy <sup>2</sup>	±1.5% at 10.16 m/s (2,000 ft/min)
Resolution	0.01 m/s (1 ft/min)

##### Duct Size

Dimensions	1 to 635 cm in increments of 0.1 cm (1 to 250 inches in increments of 0.1 in.)
------------	---

##### Volumetric Flow Rate

Range	Actual range is a function of velocity, pressure, duct size, and K factor
-------	---

##### Static/Differential Pressure (Meter Models 9555, 9555-A, 9555-P)

Range <sup>3</sup>	-28.0 to +28.0 mm Hg, -3735 to +3735 Pa (-15 to +15 in. H <sub>2</sub> O)
Accuracy	±1% of reading ±1 Pa, (±0.01 mm Hg, ±0.005 in. H <sub>2</sub> O)
Resolution	0.1 Pa, 0.01 mm Hg (0.001 in. H <sub>2</sub> O)

##### Barometric Pressure

Range	517.15 to 930.87 mm Hg (20.36 to 36.648 in. Hg)
Accuracy	±2% of reading

##### Instrument Temperature Range

Operating (Electronics)	5 to 45°C (40 to 113°F)
Operating (Probe)	-10 to 60°C (14 to 140°F)
Storage	-20 to 60°C (-4 to 140°F)

##### Data Storage Capabilities

Range	28,500+ samples and 100 test IDs
-------	----------------------------------

##### Logging Interval

1 second to 1 hour

##### Time Constant

User selectable

##### External Meter Dimensions

9.7 cm x 21.1 cm x 5.3 cm (3.8 in. x 8.3 in. x 2.1 in.)

##### Meter Weight with Batteries

0.36 kg (0.8 lbs.)

##### Power Requirements

Four AA-size batteries or AC adapter

#### Optional Probes for VeloCalc 9555 Series Multi-Functional Anemometers

Model	Probe Description
960	Air Velocity and Temperature, straight probe
962	Air Velocity and Temperature, articulating probe
964	Air Velocity, Temperature, and Humidity, straight probe
966	Air Velocity, Temperature, and Humidity, articulating probe
995	4 in. (100 mm) Rotating Vane probe
496	1.5 in. (35mm) Rotating Vane probe
792	Surface Temperature probe
794	Air Temperature probe
980	Indoor Air Quality probe
982	Indoor Air Quality probe, with CO

	9555	9555-A	9555-P	9555-X
Probe that measures velocity, temperature, and humidity	includes 964 probe	includes 966 probe	optional	optional
Pressure measurement	•	•	•	
Calculates flow, wet bulb, dew point, standard/actual	•	•	optional	optional
Optional velocity and temperature probe	•	•	•	•
Optional rotating vane probe	•	•	•	•
Optional IAQ probes (CO <sub>2</sub> , temperature, humidity, CO)	•	•	•	•
Data Logging (manual, auto save continuous)	•	•	•	•
Data logging software	•	•	•	•
Optional Bluetooth printer	•	•	•	•
Certificate of Calibration	•	•	•	•





<sup>1</sup> Pressure velocity measurements are not recommended below 1000 ft/min (5 m/s) and are best suited to velocities over 2,000 ft/min (10.00 m/s). Range can vary depending on barometric pressure.

<sup>2</sup> Accuracy is a function of converting pressure to velocity. Conversion accuracy improves when actual pressure values increase.

<sup>3</sup> Overpressure range = 190 in. H<sub>2</sub>O (280 mmHg, 48 kPa).

## Probe Specifications

Models 960, 962, 964, 966, 995, 496, 980, 982, 792 and 794

Thermoanemometer Probe Models		Range	Accuracy	Resolution	Probe Dimensions
	962	0 to 9,999 ft/min (0 to 50 m/s) 0 to 200°F (-18 to 93°C)	±3% of reading or ±3 ft/min (±0.015 m/s), whichever is greater <sup>4</sup> ±0.5°F (±0.3°C) <sup>5</sup> ±3% RH <sup>6</sup>	1 ft/min (0.01 m/s) 0.1°F (0.1°C)	Length 40 in. (101.6 cm) Tip dia. 0.28 in. (7.0 mm) Base dia. 0.51 in. (13.0 mm) Articulating Section Length 6 in. (15.2 cm) Articulating Knuckle dia. 0.38 in. (9.5 mm)
	966	0 to 9,999 ft/min (0 to 50 m/s) 14 to 140°F (-10 to 60°C) 0 to 95% RH	±3% of reading or ±3 ft/min (±0.015 m/s), whichever is greater <sup>4</sup> ±0.5°F (±0.3°C) <sup>5</sup> ±3% RH <sup>6</sup>	1 ft/min (0.01 m/s) 0.1°F (0.1°C) 0.1% RH	Length 40 in. (101.6 cm) Tip dia. 0.28 in. (7.0 mm) Base dia. 0.51 in. (13.0 mm) Articulating Section Length 6 in. (15.2 cm) Articulating Knuckle dia. 0.38 in. (9.5 mm)
	960	0 to 9,999 ft/min (0 to 50 m/s) 0 to 200°F (-18 to 93°C)	±3% of reading or ±3 ft/min (±0.015 m/s), whichever is greater <sup>4</sup> ±0.5°F (±0.3°C) <sup>5</sup> ±3% RH <sup>6</sup>	1 ft/min (0.01 m/s) 0.1°F (0.1°C)	Length 40 in. (101.6 cm) Tip dia. 0.28 in. (7.0 mm) Base dia. 0.51 in. (13.0 mm)
	964	0 to 9,999 ft/min (0 to 50 m/s) 14 to 140°F (-10 to 60°C) 0 to 95% RH	±3% of reading or ±3 ft/min (±0.015 m/s), whichever is greater <sup>4</sup> ±0.5°F (±0.3°C) <sup>5</sup> ±3% RH <sup>6</sup>	1 ft/min (0.01 m/s) 0.1°F (0.1°C) 0.1% RH	Length 40 in. (101.6 cm) Tip dia. 0.28 in. (7.0 mm) Base dia. 0.51 in. (13.0 mm)
Rotating Vane Probe Models		Range	Accuracy	Resolution	Probe Dimensions
	995	50 to 6,000 ft/min (0.25 to 30 m/s) 32 to 140°F (0 to 60°C)	±1% of reading ±4 ft/min (±0.02 m/s) ±2.0°F (±1.0°C)	1 ft/min (0.01 m/s) 0.1°F (0.1°C)	Diameter 4 in. (100mm)
	496	100 to 3,000 ft/min (0.50 to 15.00 m/s) 32 to 140°F (0 to 60°C)	±3% of reading ±4 ft/min (±0.02 m/s) ±2.0°F (±1.0°C)	1 ft/min (0.01 m/s) 0.1°F (0.1°C)	Diameter 1.5 in. (35mm)
IAQ Probe Models		Range	Accuracy	Resolution	Probe Dimensions
	980	0 to 5000 ppm CO <sub>2</sub> 0 to 95% RH 14 to 140°F (-10 to 60°C)	±3% of reading or ±50 ppm, whichever is greater <sup>4</sup> CO <sub>2</sub> ±3% RH <sup>6</sup> ±0.5°F (±0.3°C) <sup>5</sup>	1 ppm CO <sub>2</sub> 0.1% RH 0.1°F (0.1°C)	Length 7.0 in. (17.8 cm) Diameter 0.75 in. (1.9 cm)
	982	0 to 500 ppm CO 0 to 5000 ppm CO <sub>2</sub> 0 to 95% RH 14 to 140°F (-10 to 60°C)	±3% of reading or ±3 ppm, whichever is greater <sup>4</sup> CO ±3% of reading or ±50 ppm, whichever is greater <sup>4</sup> CO <sub>2</sub> ±3% RH <sup>6</sup> ±0.5°F (±0.3°C) <sup>5</sup>	0.1 ppm CO 1 ppm CO <sub>2</sub> 0.1% RH 0.1°F (0.1°C)	Length 7.0 in. (17.8 cm) Diameter 0.75 in. (1.9 cm)
Thermocouple Probe Models		Range	Accuracy	Resolution	Probe Dimensions
	792	-40 to 1200°F (-40 to 650°C)	±0.1% of reading +2°F (±0.056% of reading +1.1°C)	0.1°F (0.1°C)	Length 6 in. (15.0 cm) Diameter
	794	-40 to 1200°F (-40 to 650°C)	±0.1% of reading +2°F (±0.056% of reading +1.1°C)	0.1°F (0.1°C)	Length 6 in. (15.0 cm) Diameter

<sup>4</sup> Temperature compensated over an air temperature range of 40 to 150°F (5 to 65°C).

<sup>5</sup> The accuracy statement begins at 30 ft/min through 9,999 ft/min (0.15 m/s through 50 m/s).

<sup>6</sup> Accuracy with instrument case at 77°F (25°C), add uncertainty of 0.05°F/°F (0.03°C/°C) for change in instrument temperature.

<sup>7</sup> Accuracy with probe at 77°F (25°C). Add uncertainty of 0.1% RH/°F (0.2% RH/°C) for change in probe temperature. Includes 1% hysteresis.

<sup>8</sup> At 77°F (25°C). Add uncertainty of ±0.2%/°F (0.36%/°C) for change in temperature.

<sup>9</sup> At calibration temperature. Add uncertainty of ±0.28%/°F (0.5%/°C) for change in temperature.

Specifications are subject to change without notice.



## Transducer Display and Monitor



Model 8495

The TSI Transducer Display & Monitor provides a scaleable digital display for transducers with current or voltage outputs. The monitor's variable time constant controls the response time of the display. High and low alarms can indicate readings outside of a user-defined range. These alarms can be audible, visual and/or remote via relay contacts. The Transducer Display & Monitor also provides 500 mA of unregulated 12 VDC power to operate your transducer. The microprocessor-based design provides flexibility through menu-driven, field selectable options including signal input, full scale reading, time constant and alarm levels.

### Field Selectable Options

- Signal input (0-5 VDC, 0-10 VDC, 1-5 VDC, 2-10 VDC, 0-20 mA, 4-20 mA)
- Full scale reading (0.1000 to 99990)
- Zero adjust (0.1000 to 99.99)
- Span adjust (0.1 to 1.9)
- Low alarm (0 to full scale)
- High alarm (0 to full scale)
- Audible alarm/mute
- Time constant (1 to 20 seconds)
- Visual alarm latched or unlatched
- Relays latched or unlatched

The Transducer Display & Monitor Model 8495 is an ideal accessory for TSI's Air Velocity Transducers, providing flexibility in outputs while also powering the transducer. The adjustable full scale reading allows you to scale the display to fit your application. For example, if mounting the transducer in a duct, you can select a full scale reading that includes a multiplication factor to convert to units of volumetric flow rate or even mass flow rate. The span adjustment can be used as a density correction factor, allowing you to correct the readings for changes in temperature or pressure. When using an air velocity transducer in a fluctuating flow, increasing the variable time constant will provide a more stable display of velocity or flow. If monitoring velocity or flow in a critical process application, using the high and low alarms will indicate readings outside of an acceptable range.





# Swema 3000

## Universal Instrument

### Multifunctional

Swema 3000 is a multifunctional instrument and logger with external probes, leakage testers, SwemaTwin modems and measurement programs.

### Models and Sensors

Three models: Swema 3000 basic unit. Swema 3000md and mdH+ with differential pressure sensor, zeroing valve, barometer and thermo couple connector. Selection of external probes: anemometers, temperature probes and Rotronic humidity probes. Draught - omni-directional anemometer, black globe and humidity probes fulfill ISO-EN 7726 requirements. Probes and instruments are individually calibrated.

### Ventilation - Air flow

Swema 3000 is the ideal professional tool for ventilation testing, adjusting and balancing (TAB) and includes telescopic anemometers, air density compensation and measuring programs according to EN 16211 and 12599. Swema 3000md and mdH+ are micromanometers of highest accuracy for Pitot static tube and air terminal device (ATD) measurements. SwemaTwin is the proportional method with a second instrument communicating its measurement value from the reference valve by wireless modems.

### Duct and building leakage tester

Swema 3000md controls a leakage tester for ducts according to EN 12237 or EN 1507 and EN 1382 for buildings.



### Industry and research

The accurate instruments and sensors together with the logging capability meet the high demand for exact measurements of temperature, humidity, differential pressure, air velocity and flow.



SWEMA AB  
Pepparvägen 27  
SE-123 56 Farsta, Sweden

Tel: +46 8 94 00 90  
swema@swema.com  
www.swema.com

## Technical Data

### General:

**Memory:** 1.300 protocols or 10.500 logs  
Time and date.

**Sampling interval:** 0,1 second...24 hours.

**Battery:** 2 AA, standard/rechargeable.

**Battery time:** Up to 150h (24h display light)

**Interface:** USB to PC, RS232 for modems

**PC software:** SwemaTerminal2.

**Size:** 212x82x36 mm

**IP rating:** IP50 (protects against dust)

### Swema 3000 md/mdH+:

**Time constant:** 0,25...120 s (selectable)

**Differential pressure:** -300...1.500Pa (md, SWA 10)  
-10.000...10.000Pa (mdH+)

**Resolution:** 0,01 (mdH+), 0,1 or 1 Pa

**Pitot static tube velocity:** 2...49(md)...129(mdH+)m/s,  
390...9600(md)...9999fpm

**Other units:** l/s, m<sup>3</sup>/h, cfm, m/s, fpm

**Barometer:** 600...1200 hPa

**Temperature:** -270...1372 °C,  
-450...2500°F (Thermocouple connector type K)

**Thread sensor:** -40...400°C, -40...750 °F  
(Included) (class 1 thermo couple type K)

**Weight:** 490g

### Measurement uncertainty at 23°C ±5°C:

**Differential pressure:** ±0,3% read value or  
±0,3 Pa (md, after zeroing)  
±1% read value or  
±0,4 Pa (mdH+, after zeroing)

**Barometer:** ±2,5 hPa

**Temperature:** ±0,3°C at -10...70°C

**With sensor:** ±2,5°C

(Uncertainty according to GUM (JCGM 100:2008) using a coverage factor of 2, which for a normal distribution corresponds to a probability of 95%. It is important to correct the measurement values with the corrections stated in the calibration certificate to obtain the above uncertainties. Operational in 0...+50°C, non condensing, non moist air, <80%RH, non aggressive gases.)

Swema 3000 **Part.no. 764200:** Basic unit.  
Swema 3000md **764202:** -300...1.500 Pa.  
Swema 3000mdH+ **764203:** ±10 000Pa.

### All models include:

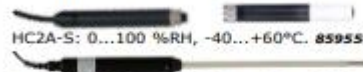
2 1.5V IEC LR6 AA batteries, USB cable, calibration certificate & manual.

## External Sensors

For full range and technical data see [www.swema.com](http://www.swema.com)



SWA 31: 0,1...30 m/s. **Part.no. 758150,**  
SWA 31E: -20...80°C Air velocity, flow. **760090**



HC2A-S: 0...100 %RH, -40...+60°C. **859550**

SWHP 28-HC2: 0...100%RH, -40...+85°C **767560**



SWA 03: 0,05...3,0 m/s +10...+40 °C,  
Omnidirectional Air velocity. **764730**



SWA 52 Globe temperature sensor. **765560**

Temperature sensors: -50...+450°C



**770280**

SWA Differential Pressure **761430**



Leakage testers

Duct **77110**

Building **765910**



SwemaTwin Bluetooth  
3000-B & 3000-3000  
modem  
**768730, 766361**



SwemaTwin Bluetooth  
repeater  
**766681**



SwemaTwin Radio modem  
**See www.swema.com**



SWEMA AB  
Pepparvägen 27  
SE-123 56 Farsta, Sweden

Tel: +46 8 94 00 90  
[swema@swema.com](mailto:swema@swema.com)  
[www.swema.com](http://www.swema.com)

# ALMEMO® MEASURING INSTRUMENTS

**new!**

**Handheld data logger  
ALMEMO® 2690-8  
with 5 measuring inputs, 2 outputs,  
RS232, Ethernet, analog**



## Technical data

**Measuring inputs:** 5 ALMEMO® input sockets, electr. isol., with semiconductor relay (50 V)

**Channels:** 5 primary chann., maximum 19 additional chann. for double sensors and function chann. (e.g. differential values)

**A/D converter:** Delta-sigma 24-bit, 50 meas. op. p. s. see Technical data, page 01.05

**Sensor power supply:** Battery 6 / 9 / 12 V, maximum 100 mA  
Mains adapter 12 V, maximum 100 mA

**Outputs:** 2 ALMEMO® sockets for all output modules (analog, data, trigger, relay cables, memory etc.)

## Standard equipment

**Display:** Graphics, 128x128 pixels, 16 rows  
Lighting, 5 white LEDs, 3 levels

**Keypad:** 9 tactile silicone keys (4 soft-keys)

**Memory:** 512-KB EEPROM (100,000 meas. values)

**Date and time-of-day:** Real-time clock, buffered with battery

## Power supply

**Battery:** 3 AA alkaline batt. or rechargeable batt.

**Mains adapter:** ZA2690NA1, 230 V AC to 12 V DC, 600 mA, electrically isolated  
DC adapter cable, electrically isolated  
ZA2690-UK, 10 to 30 V, 0.25 A

**Current consumption without input and output modules**

Active mode approx. 30 mA

with lighting approx. 50 to 150 mA

SLEEP mode approx. 0.05 mA

**Housing:** (LxWxH) 209 x 107 x 54 mm

ABS (maximum 70 °C), 570 g

**Protection:** IP54 (from 2nd quarter 2005) if water-proof connectors / sensors are used

Included as standard

Other general data see Technical Data, page 01.05

Other general data see Technical Data, page 01.05

**Extent of the delivery** Order no.

Data logger ALMEMO® 2690-8, Operating instructions,

ALMEMO® Manual, including manufacturer's test certificate,

AMR-Control software **MA26908**

Data logger set ALMEMO® 2690-8 in case, as above

including mains adapter and data cable in case **MA26908KS**

Option KL Multi-point calibration, special ranges **OA2690KL**

Option R Temperature ranges for 8 coolants **SB0000R**

**Accessories**

Mains adapter 12 V / 600 mA **ZA2690NA1**

Rechargeable battery set with 3 NiMH AA cells

1600 mAh, coded, and adapter **ZA2690AS**

for high-speed charging, maximum 2 A

DC adapter cable, **ZA2690UK**

10 to 30 V DC, 12 V / 0.25 A, electr. isol.

Memory connector with MMC card (Q1 05) **ZA1904MMC**

Analog output cable, **ZA1601RK**

-1.25 to 2.0 V, 0.1 mV / digit

Trigger and alarm cable **ZA1000EGK**

(2 relays, 1 ohm, 300 mA, 50 V)

V24 data cable, electr. isol., max. 115.2 KB **ZA1909DK5**

Ethernet data cable, electr. isol., max. 115.2 KB **ZA1945DK**

Network cable, electr. isol., max. 115.2 KB **ZA1999NK5**

Transport case, large (aluminum), **ZB2590TK2**

see Chapter 07

Network technology, Bluetooth modules, see Chapter 05

## Technical features

- ▶ Modern housing with rubberized impact protection and positioning clip; also moisture-proof thanks to new, injection-molded connectors and sealing lips
- ▶ 5 ALMEMO® input sockets, electrically isolated, for 5 ALMEMO® sensors, 20 sensor chann., 4 additional internal function chann.
- ▶ 2 ALMEMO® output sockets for digital interfaces, analog output, trigger input, alarm contacts, memory card
- ▶ High-speed, high-resolution A/D converter, 24-bit, 50 meas. op. per sec. New measuring ranges Pt100, 0.000 to 65.000 °C
- ▶ Ideal display with large, brightly illuminated graphics
- ▶ Easy and convenient operation by means of 4 soft-keys and cursor block, Comprehensive menu system with wizards and help windows
- ▶ 9 measuring menus (3 can be freely configured by user from range of 50 functions)
- ▶ Measured values can be displayed graphically in line diagram or bar chart form and from 1 to 20 measured values can be displayed numerically in various sizes.
- ▶ Measuring functions: Measured value, zero-setting, setpoint adjustment, maximum and minimum values stored with date and time-of-day, smoothing, average values over time or measuring points, limit value monitoring, cold junction compensation, temperature compensation, and atmospheric pressure compensation
- ▶ 8 programming menus for easy-to-understand parametrization of cycles, times, memory, output modules, and power supply  
Sensor programming with range, units, comments, scaling, error correction, etc.
- ▶ New Option KL: Multi-point calibration, calibration data management, user-defined linearization, special ranges in the ALMEMO® connector, e.g. 0.000 to 50.000 ohms, NTC -5.000 to 46.000 °C, YSI 400
- ▶ 10 wizards for quickly and easily mastering otherwise complex configurations: Sensor scaling, two-point adjustment, calculation functions, and reference channels; Sensor programming for determining thermal coefficients and wet-bulb globe temperature (WBGT), alarm relay assignment, scaling, and analog output assignment
- ▶ Choice of languages: German, English, French
- ▶ EEPROM with capacity for 100,000 measured values, internally configurable as linear or ring memory
- ▶ Memory connector with MMC card and standard file format
- ▶ SLEEP mode for long-term recording
- ▶ New Device software update via interface

01/2005 We reserve the right to make technical changes.

# ALMEMO® Measuring Instruments

10/2016 • We reserve the right to make technical changes.

## General technical specifications

### Inputs

Channel switching  
between input sockets  
for analog sensors

4-contact with photo-MOS relays  
Potential separation maximum 50 V  
Measuring modules with higher potential separation (see chapter „Input modules“)  
Offset voltage <5 µV

Cold junction compensation (CJC)

effective in range -30 to +100 °C, Accuracy ±0.2 K (±0.01 K / °C)

Nominal temperature

22 °C ±2 K

Sensor power supply

6 to 12 V depending on power supply

Self-calibration

Automatic zero-point correction, measuring current calibration

Monitoring functions

Automatic sensor recognition and sensor breakage detection

		Basic measuring instruments	Professional measuring instruments	Precision measuring instruments	
Precision class	C	B	A	AA	
ALMEMO® series	2450, 2420	2490, 2590	2470, 2790 2590A	2890, 4390 5690, 8490 8590, 8690	2690A, 710
Measuring rates Measuring operations per second (mops)	2.5 mops	2.5 / 10mops	2.5 / 10mops	2.5 / 10 / 50 / 100mops Option 400mops*   Option 500mops *	
Input range	0.26 to +2.6 V	-2 to +5 V	meas. range 2.6 V: -2 to +3 V in all other meas. ranges -1.9 to +2.9 V	meas. range 2.6 V: -3 to +3 V in all other meas. ranges -2.3 to +1.3 V	meas. range 2.6 V: -2 to +3 V in all other meas. ranges -1.9 to +2.9 V
Overload	-4 to +5 V	-2 to +5 V	-2 to +5 V	± 12V	± 12V
Input current	< 2nA	< 20nA	100pA	Meas. range 2.6 V: 500 nA in all other meas. ranges 500 pA	100pA
Measuring current		Pt100/1000: 0.3mA	Pt100/1000: 0.3mA	Pt100: 1mA, Pt1000: 0.1mA	
System accuracy at 2.5 mops	0.1% of measured value ±4 digits	0.03% of mea- sured value ±4 digits	0.03% of measured value ±3 digits	0.02% of measured value ±2 digits	
Temperature drift	0.01% / K (100 ppm)	0.005% / K (50 ppm)	0.003% / K (30 ppm)	0.003% / K (30 ppm)	

\*Measuring rate 400 mops (Option SA0000Q4)

\*Measuring rate 500 mops (Option SA0000Q5):

It is also possible, in addition to the standard conversion rates, to set 400 or 500 mops (measuring operations per second). At the rate of 400 or 500 mops just one selected measuring channel can be saved. This can only be used with sensors with voltage or current ranges or with NTC sensors. Nor is it possible to change channels in the course of a measuring operation.

The resolution, accuracy, and sensitivity to disturbance caused by mains hum or electromagnetic interference are comparable with measuring operations performed at a rate of 50 mops. Care must be taken to ensure that the environment is free from interference and that the sensor lines are kept short.

Data can only be output to a micro SD card. Accessories ZA1904SD Memory connector with micro SD Data is saved in table format (separated by semi-colons) and with a time-stamp resolution of 0.0001 seconds. This format can be processed using the WinControl software (as of version 6.1.1.6).

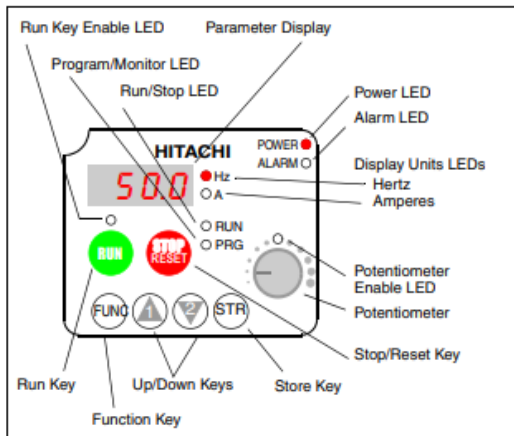
### Measuring instrument

Interface to all ALMEMO® plugs / modules	I2C bus
Operating temperature	-10 to +60 °C
Storage temperature	-30 to +60 °C
Humidity range	10 to 90 % (non-condensing)

01.04

## Vedlegg D – Hitachi SJ200

### Inverter Keypad Operation



- **Run/Stop LED** – ON when the inverter output is ON and the motor is developing torque, and OFF when the inverter output is OFF (Stop Mode).
  - **Program/Monitor LED** – ON when the inverter is ready for parameter editing (Program Mode). It is OFF when the parameter display is monitoring data (Monitor Mode).
  - **Run Key Enable LED** – ON when the inverter is ready to respond to the Run key, OFF when the Run key is disabled.
  - **Run Key** – Press this key to run the motor (the Run Enable LED must be ON first). Parameter F004, Keypad Run Key Routing, determines whether the Run key generates a Run FWD or Run REV command.
  - **Stop/Reset Key** – Press this key to stop the motor when it is running (uses the programmed deceleration rate). This key will also reset an alarm which has tripped.
  - **Potentiometer** – Allows an operator to directly set the motor speed when the potentiometer is enabled for output frequency control.
  - **Potentiometer Enable LED** – ON when the potentiometer is enabled for value entry.
- (continued, next page...)

- **Parameter Display** – A 4-digit, 7-segment display for parameters and function codes.
- **Display Units: Hertz/Amperes** – One of these LEDs will be ON to indicate the units associated with the parameter display.
- **Power LED** – ON when the power input to the inverter is ON.
- **Alarm LED** – ON when the inverter is in Trip Mode.
- **Function Key** – This key is used to navigate through the lists of parameters and functions for setting and monitoring parameter values.
- **Up/Down Keys** – Use these keys alternately to move up or down the lists of parameter and functions shown in the display, and to increment/decrement values.
- **Store Key** – When the unit is in Program Mode and the operator has edited a parameter value, press the Store key to write the new value to the EEPROM.



Pressure &

Vacuum Measurement  
Solutions

WWW.MKSINSTR.COM

## Type 220DD

### BARATRON® GENERAL PURPOSE DIFFERENTIAL CAPACITANCE MANOMETER

The MKS Type 220DD Baratron® General Purpose Differential Manometer offers a reliable, accurate, inexpensive solution to measuring low differential pressures.

Operating on the variable capacitance technique, the 220DD all-metal sensor contains a tensioned metal diaphragm, one side of which is exposed to the gas whose pressure is to be measured (Px side). The other side (reference, or Pr, side) is adjacent to an electrode assembly which is terminated in another like port. The diaphragm deflects with changing differential pressure, causing a capacitance change between the diaphragm and the adjacent electrode assembly. The capacitance change generates an AC voltage which is amplified, demodulated, and converted into a high level DC voltage output, linear with pressure, and calibrated against a pressure standard. The Type 220DD sensor is temperature controlled at 45°C for enhanced zero and span stability.

All components are housed in a rugged, NEMA 1 enclosure for protection when used in harsh environments. Two outputs, 0-10 VDC and 4-20 mA, are provided for interfacing with common process controllers.

#### Features & Benefits

- All-metal sensor eliminates handling problems associated with glass, mercury, and liquid gauges
- Useable resolution of 1 part in 10,000 — minimizes the number of capacitance manometers required to cover a wide range of pressures
- NEMA 1 enclosure provides sensor protection in harsh operating environments
- Sensor is temperature controlled at 45°C for stable performance
- Simultaneous 0 to 10 VDC and 4 to 20mA outputs interface with common process control systems



## Specifications and Ordering Information

### Full Scale Ranges

### Resolution

### Accuracy

### Temperature Coefficients

#### Zero

#### Span

### Ambient Operating Temperature

### Sensor Operating Temperature

### Maximum Overpressure

### Maximum Line Pressure

### Materials Exposed to Gases

#### Px side

#### Pr side

### Volume

### Fittings

#### Standard

#### Optional

### Power Required

### Outputs

### Electrical Connector

1, 10, 20, 100, 1000, 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 mmHg

(other engineering units available on request)

0.01% of F.S.

±0.15% of Rdg. (± temperature coefficients)

0.008% of F.S./°C for 1 Torr

0.005% of F.S./°C > 1 Torr

0.02% of Rdg./°C

5° to 40°C

Temperature controlled at 45°C

120% of F.S. or 20 psi (140 kPa), whichever is greater

(For Full Scale ranges less than 1000 mmHg, the following restrictions apply: if high pressure is on the Px side of the sensor, the maximum differential overpressure allowable is 120% of F.S. or 20 psi, whichever is greater; if high pressure is on the Pr side of the sensor, the maximum differential overpressure allowable is 120% of F.S. Consult factory for higher Pr overpressure protection.)

40 psig (275 kPa)

Inconel®

Inconel, Ceramic, Palladium, Stainless Steel, Glass

Px side: 7.0 cc Pr side: 19.0 cc

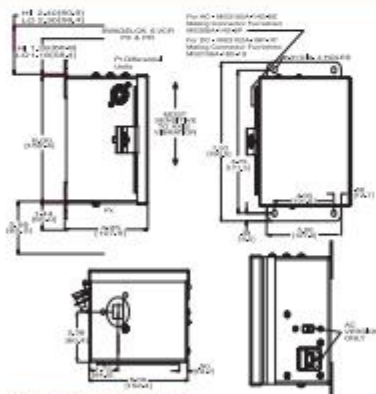
½" OD (12.7 mm) diameter tube

Swagelok® 8 VCR® female, NW 16 KF, mini-CF rotatable (High pressure units, 5000 to 25000 mmHg F.S., are available with certain fittings; consult factory for a complete listing.)

115/230 VAC, 50/60 Hz.

0 to 10 VDC into > 10K Ω load and 4 to 20 mA into < 500 Ω load

Mating connector P/N MS306A-14S-6S; MKS Connector Kit 220C-AC-K1



Dimensional Drawing —

Note: Unless otherwise specified, dimensions are nominal values in inches (mm referenced).

### Ordering Code Example: 2200D00100A2B

Type 2200D	Code	Configuration
Type 2200D	2200D	2200D
<b>Pressure Range Full Scale</b>		
1	00001	00100
10	00010	
20	00020	
100	00100	
1000	01000	
5000	05000	
10,000	10000	
15,000	15000	
20,000	20000	
25,000	25000	
<b>Fittings</b>		
½" OD (12.7 mm) diameter tube	A	A
Swagelok 8 VCR female	B	
Mini-CF, rotatable	C	
NW 16 KF	D	
<b>Power Input Code</b>		
115/230 VAC	2	2
<b>Signal Input Code</b>		
0-10 VDC and 4-20 mA	B	B



### MKS Instruments, Inc.

#### Global Headquarters

2 Tech Drive, Suite 201

Andover, MA 01810

Tel: 978.645.5500

Tel: 800.227.8766 (in U.S.A.)

Web: www.mksinst.com

### MKS Instruments, Inc.

#### Pressure & Vacuum Measurement Solutions

Six Shattuck Road

Andover, MA 01810

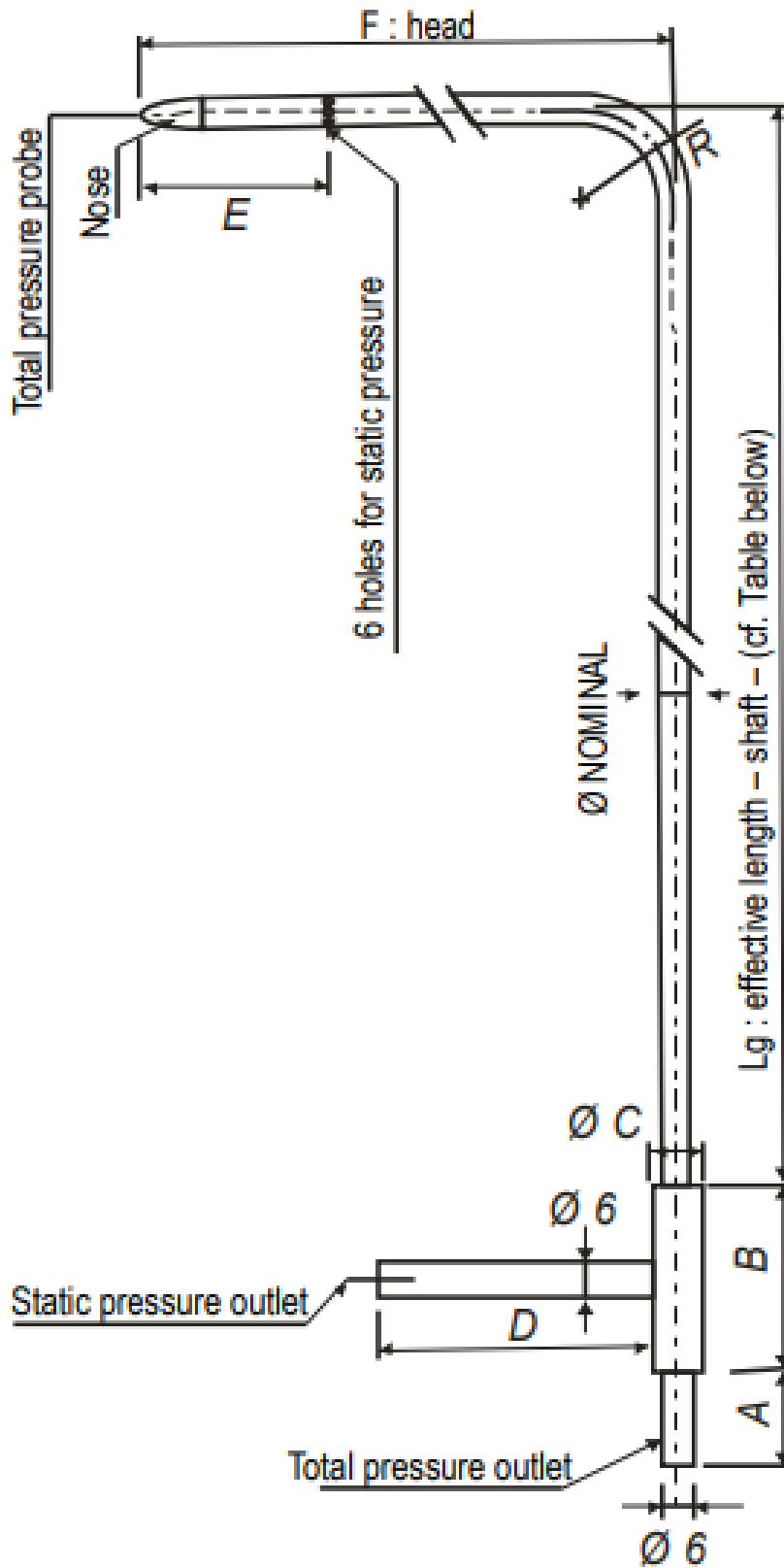
Tel: 978.975.2350

2200D - 8/16  
© 2003 MKS Instruments, Inc.  
All rights reserved.

Some Baratron® capacitance manometer products may not be exported to many and user countries without both US and local government export licenses under ECCN 2B235.

Specifications are subject to change without notice. mksinst® is a trademark and Baratron® is a registered trademark of MKS Instruments, Inc., Andover, MA. Swagelok® and VCR® are registered trademarks of Swagelok Co., Solon OH. Inconel® is a registered trademark of Inco Alloys International, Huntington, WV.

## Vedlegg F – Pitotrør



**Pitot tube Type L**



## Vedlegg G – Excel ark

Parametere i Excel 1

Wind tunnel calibration			
<b>Romtemperatur i Celsius [t]</b>			
21.5			
<b>Barometric pressure converted to mm of Hg [P]</b>	[Barometrisk trykk i hPa multiplisert med	Barometric pressure hPa	Sett inn verdi i hPa for å konverte til mm of Hg
764.4	0,75006]	1019.2	
<b>Density of correction factor with mm of Hg [K]</b>	K=760/P×(273,15+t)/294,25, der t=temperatur [°C] og P_standard=barometrisk trykk [mm of Hg]		
0.9955			

Ingen dyseplate			
Standard velocity S [m/s]	Standard P mm of Hg	Desired P (standard P) x K mm of Hg	Velocity Transducer output (S m/s)
45	9.260	9.219	
40	7.320	7.287	
30	4.120	4.102	
25	2.860	2.847	
20	1.830	1.822	
15	1.030	1.025	
12.5	0.716	0.713	
10	0.462	0.460	
7.5	0.263	0.262	

**Med dyseplate Nr. 1 (1,66 cm hull)**

<b>Standard velocity S [m/s]</b>	<b>Standard P mm of Hg</b>	<b>Desired P (standard P) x K mm of Hg</b>	<b>Velocity Transducer output (S m/s)</b>
7.5	8.140	8.104	
6.5	6.050	6.023	
5.5	4.300	4.281	
5	3.550	3.534	
4.5	2.860	2.847	
4	2.250	2.240	
3.5	1.710	1.702	
3.25	1.470	1.463	
3	1.260	1.254	
2.75	1.050	1.045	
2.5	0.869	0.865	
2.25	0.702	0.699	
2	0.555	0.553	
1.75	0.424	0.422	
1.5	0.311	0.310	
1.4	0.270	0.269	
1.3	0.233	0.232	
1.25	0.215	0.214	

**Med dyseplate Nr. 2 (0,625 cm hull)**

Standard velocity S [m/s]	Standard P mm of Hg	Desired P (standard P) x K mm of Hg	Velocity Transducer output (S m/s)
1.25	8.430	8.392	
1	5.320	5.296	
0.75	2.940	2.927	
0.6	1.870	1.862	
0.5	1.280	1.274	
0.4	0.799	0.795	
0.3	0.440	0.438	
0.25	0.302	0.301	
0.2	0.193	0.192	
0.15	0.108	0.108	

$P_b$ (referanse trykk stasjonsnivå) - hent data fra seklima fra Blindern SN18700	$T_b$ (referanse temperature i K ved stasjon) - hent data fra seklima	$L_b$ (temperature lapse rate (K/m))	$h$ (height at which pressure is calculated, bygget vi er i) (m)	$h_b$ (height of reference level b, fra værstasjon)	$R^*$ (universal gas constant)	$g$ (gravitational acceleration) [m/s <sup>2</sup> ]	$M$ (molar mass of earth's air) [kg/mol]
1013	291.7	-0.0065	42	94	8.31	9.81	0.029
Bruk linken til å finne referanse- trykk og temperatur på stasjonsnivå →				<a href="#">Seklima Blindern SN18700</a>			
Atmosfærisk trykk [hPa]	1019.18						