



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Optimalisere prøvetakingspunkt for bestemmelse av partikulært materiale i avgass



HYDRO

Bachelorprosjekt utført ved
Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for ingeniørfag

Maskin, Prosess- og energiteknikk

Av: Ida Marie Jakobsen

Kand.nr.

35

Haugesund

Våren 2016

BACHELORPROSJEKT

Studentens navn: Ida Marie Jakobsen

Linje & studieretning Maskiningeniør, Prosess- og energiteknikk

Oppgavens tittel: *Optimalisere prøvetakingspunkt for bestemmelse av partikulært materiale i avgass.*

Oppgavetekst:

Skal finne det optimale prøvetakingspunktet for bestemmelse av partikulært materiale i avgass fra renseanleggene tilknyttet aluminiumsproduksjonen på Hydro Aluminium Karmøy.

Endelig oppgave gitt: Onsdag 2. mars 2016

Innleveringsfrist: Onsdag 4.mai 2016 kl. 12.00

Intern veileder: Gisle Kleppe – HSH, tlf: 52 70 26 71

Ekstern veileder: Tor-Erik Richardsen – Hydro Aluminium
Karmøy, tlf: 958 00 916

Adresse ekstern veileder: Hydrovegen 160, 4265 Håvik

Godkjent av
studieansvarlig:

Dato:

J.C. Løvdaas

15/4-16



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Høgskolen Stord/Haugesund
Studie for ingeniørfag
Bjørnsonsgt. 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 52 70 26 00
Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel		Rapportnummer
Optimalisere prøvetakingspunkt for bestemmelse av partikulært materiale i avgass		
Utført av		
Ida Marie Jakobsen		
Linje		Studieretning
Maskin, Prosess- og energiteknikk		Ingeniør
Gradering	Innlevert dato	Veiledere
Åpen	4. mai 2016	Gisle Kleppe – HSH Tor-Erik Richardsen – HAK

Ekstrakt

Rapporten tar for seg hvordan laboratoriet på Hydro Aluminium Karmøy (HAK) kan optimalisere prøvetakingspunktet for bestemmelse av partikulært materiale i avgass.

Videre blir det også lagt vekt på tilpassing av målerutinene og utstyret som brukes ved prøvetaking, slik at kravene som er gitt i standarden som omhandler utslipp og bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner, i størst mulig grad oppfylles. I tillegg til riktig prøvetakingspunkt og utstyr belyser studien viktigheten med isokinetisk prøvetaking ved måling av partikulært materiale.

Forord

Denne hovedoppgaven er et avslutningsprosjekt for en treårig utdannelse innenfor maskiningeniør ved Høgskolen Stord/Haugesund. Oppgaven har et omfang på 20 studiepoeng, hvor meningen er å bruke tilegnede kunnskaper fra de forskjellige fagene jeg har hatt i tiden som student. Denne oppgaven baserer seg i hovedsak på kunnskap tilegnet i faget «Varme og strømningslære».

Jeg vil takke laboratoriet på Hydro Aluminium Karmøy for tilrettelegging av oppgaven. En ekstra stor takk går til ekstern veileder Tor-Erik Richardsen, for god hjelp og veiledning. Takk til Fredrik Larssen og Evy Anne Fostenes for tilrettelegging av prøvepunkter i kanal.

Høgskolen Stord/Haugesund har også bidratt til oppgaven. En stor takk til intern veileder Gisle Kleppe for den gode hjelpen jeg har fått. Jeg vil også takke Grethe Høyvik Hansen ved skrivesenteret for gjennomgang av oppgaven.

Haugesund 04.05.2016

Ida Marie Jakobsen

Sammendrag

Hydro Aluminium Karmøy produserer rundt 190 000 tonn aluminium per år, avgassene fra denne produksjonen ledes gjennom et renseanlegg hvor 99% av partiklene gjenvinnes. For å ha kontroll på utslippet samt virkningsgraden til anlegget blir det tatt støv- og gassmengde-målinger fra renseanleggene.

Etter som prøvetakingspunktet for direkte bestemmelse av partikulært utslipp ikke oppfylte kravene i henhold til standarden var ikke punktet representativ. Prøvetakingspunktet må derfor optimaliseres.

Studien går ut på å tilpasse prøvetakingspunktet, målerutinene og utstyret som brukes slik at det i størst mulig grad oppfyller kravene som er gitt i standarden som omhandler utslipp og bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner. I tillegg til riktig prøvetakingspunkt belyser studien viktigheten med isokinetisk prøvetaking ved måling av partikulært materiale. Hvis prøvetakingen foregår over- eller under-isokinetisk vil den oppsamlede støvmengden bli veldig forskjellig fra støvmengden ved isokinetisk prøvetaking. Dette kan da føre til feilrapportering av støvutslipp. Viktigheten med isokinetisk måling ble belyst ved tre forskjellige prøvetakinger som resulterte i ulike støvkonsentrasjoner.

Det optimale prøvetakingspunktet for bestemmelse av partikulært materiale i avgass ble optimalisert i henhold til Hydros metode for valg av optimalt prøvetakingspunkt, som baserer seg på hastighetsmålinger. I tillegg til bestemmelse av optimalt prøvetakingspunkt og påvisning av viktigheten med isokinetikk, belyses det også at utstyret som brukes ved prøvetaking bør tilpasses enkelte av kravene beskrevet i standard NS-EN 13284 – Utslipp fra stasjonære kilder. Bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	ii
Figurliste	v
Tabelliste	vi
1. Forklaringer	vii
1.1 Definisjoner	vii
1.2 Forkortelser	viii
1.3 Ordforklaringer.....	viii
2. Innledning	1
2.1 Om bedriften	1
2.2 Bakgrunn for oppgaven.....	2
2.3 Problemstilling	2
2.4 Målsetting for oppgaven.....	3
2.5 Avgrensninger	3
2.5.1 Avvik fra standard.....	3
2.5.2 Valg av renseanlegg og kanal.....	4
2.6 Løsningsmetode	5
3. Teori	6
3.1 Pitotrør	6
3.1.1 Pitotrør type L.....	7
3.2 Gasstrøm i kanal	8
3.3 Isokinetisk prøvetaking	9
3.4 Laminær og turbulent strømning – Reynolds tall.....	12
3.5 Standarder.....	14
3.5.1 Norsk Standard NS-EN 13284-1.....	14
3.5.2 International standard ISO 3966.	15
4. Dagens situasjonen	16
4.1 Avvik fra standard	16
4.2 Utvalgte avvik	19
5. Pitotrørsmålinger	20
5.1 Valg av prøvetakingspunkt for pitotrørsmålinger.....	20
5.1.1 Tverrsnitt	21
5.1.2 Prøvetakingspunkter	22
5.2 Luftmengdemålinger.....	24
5.2.1 Forberedelser før måling	25

5.2.2	Utføring av hastighetsmålinger	27
5.2.3	Vurdering av målingene.....	30
6.	Optimalt prøvetakingspunkt	31
7.	Støvmålinger.....	32
7.1	<i>Forberedelser</i>	33
7.2	<i>Utførelse av målingene</i>	34
7.3	<i>Data og resultater</i>	36
8.	Feilkilder	38
9.	Beregninger	39
9.1	<i>Beregninger på grunnlag av målingene med pitotrør.....</i>	39
9.2	<i>Reynolds tall.....</i>	40
9.3	<i>Utregning av isokinetisk hastighet.....</i>	41
9.4	<i>Støvkonsentrasjon.....</i>	42
9.5	<i>Utregnet hastighet ved hjelp av Bernoulli's ligning</i>	43
10.	Diskusjon og forslag til videre arbeid	46
11.	Konklusjon	48
12.	Referanser	49
13.	Vedlegg	50
13.1	<i>Vedlegg 1.....</i>	50
13.2	<i>Vedlegg 2.....</i>	54
13.3	<i>Vedlegg 3.....</i>	61
13.4	<i>Vedlegg 4.....</i>	63
13.5	<i>Vedlegg 5.....</i>	65

Figurliste

Figur 2-1: Hydro Aluminium Karmøy.....	1
Figur 3-1: Pitotrør, total- og statisk trykk.....	6
Figur 3-2: Pitotrør type L.....	7
Figur 3-3: Oversiktstegning av vifte, kanal og våtvaskertårn sett ovenfra.....	8
Figur 3-4: Forenklet versjon av Bernoulli's formel.....	9
Figur 3-5: Isokinetisk prøvetaking.....	10
Figur 3-6: Avvik ved isokinetisk prøvetaking.....	11
Figur 3-7: Laminær strømning.....	13
Figur 3-8: Turbulent strømning.....	13
Figur 5-1: Ekstern veileder måler hastighet ved hjelp av pitotrør.....	20
Figur 5-2: Lokasjon av målepunkter.....	21
Figur 5-3: Målepunktene i kanalen merket med navn.....	23
Figur 5-4: Skisse av kanalens utforming.....	23
Figur 5-5: Det utvalgte tverrsnittet med målsatte prøvetakingspunkter.....	24
Figur 5-6: Skisse av hvor i kanalen tverrsnittet befinner seg.....	25
Figur 5-7: Punkter markert for boring av hull.....	26
Figur 5-8: Ferdig borede hull, tettet med gummikorker.....	26
Figur 5-9: Pitotrør markert med teip for posisjonering av målepunktene langs y-aksen....	27
Figur 5-10: Kanalen sett innen fra, pilene viser støttestagene.....	28
Figur 5-11: Viser helningen til kanalen i forhold til grunnflaten.....	29
Figur 5-12: Gassens strømningsretning i kanalen.....	30
Figur 7-1: Sonde og filterholder under prøvetaking.....	34
Figur 7-2: Alt utstyret montert og klar for støvmåling.....	35
Figur 13-1: Oversiktstegning K3.....	63
Figur 13-2: Oversiktsbilde av K3.....	64

Tabelliste

Tabell 1: Avvik fra standard.....	16
Tabell 2: Punkter i kanalen langs x-aksen	22
Tabell 3: Punkter i kanalen langs y-aksen	22
Tabell 4: Hastighet	31
Tabell 5: Hastigheten i de 3 utvalgte punktene for støvmåling.....	32
Tabell 6: Støvvекter	36
Tabell 7: Måling 1, punkt 4.2	36
Tabell 8: Måling 2, punkt 6.1	36
Tabell 9: Måling 3, punkt 2.2	36
Tabell 10: Støvkonsentrasjoner.....	37
Tabell 11: Feilkilder	38
Tabell 12: Gjennomsnittlig hastighet ved de 3 utførte pitotrørsmålingene	40
Tabell 13: Fysiske egenskaper til luft ved standard atmosfærisk trykk:	41
Tabell 14: Definisjoner fra Bernoulli's ligning	65

1. Forklaringer

1.1 Definisjoner

Symbol	Definisjon	Enhet
p_t	Stagnasjonstrykk (total)	mmH ₂ O
p_s	Statisk trykk	mmH ₂ O
p_D	Dynamisk trykk	mmH ₂ O
V	Hastighet	m/s
Re	Reynolds tall	-
d_h	Hydraulisk diameter	m
ν	Kinematisk viskositet	m ² /s
μ	Dynamisk viskositet	Pa·s
L	Lengde av kanal	m
H	Høyde av kanal	m
A	Areal	m ²
\bar{V}	Midlere hastighet	m/s
\bar{p}	Midlere trykk	mmH ₂ O
q_v	Volumstrøm	m ³ /s m ³ /h l/min
K	Kalibreringsfaktor til gassur	-
p_b	Barometertrykk	hPa
\bar{V}_{total}	Total gjennomsnittlig hastighet i kanalen	m/s

D_{dyse}	Diameteren til sonden	m
T_{gassur}	Temperatur i gassur	K
T_{gass}	Gassens temperatur	K
p_{gassur}	Trykk i gassur	mmH ₂ O

1.2 Forkortelser

Forkortelse	Betydning
HAK	Hydro Aluminium Karmøy

1.3 Ordforklaringer

Ordforklaring	
Partikulært materiale	Støvpartikler

2. Innledning

2.1 Om bedriften

Hydro er både produsent og global leverandør av aluminium. På Karmøy driver Hydro ulike anlegg tilknyttet aluminiumens verdikjede. Her skjer både produksjon av primæraluminium, viderefordeling til ulike produkter og distribusjon av disse. Den største enheten er anlegget for produksjon av primæraluminium (flytende aluminium). Anlegget er et av Europas største. I tillegg finnes det også tre støperier i anlegget på Karmøy, Trådstøperiet, Pressboltstøperiet og Båndstøp i Valseverket.

Hydro Aluminium Karmøy produserer rundt 190 000 tonn aluminium i året, og er ledende i verden innen AP18-teknologien (typen elektrolyseceller). Pressboltstøperiet leverer høykvalitets produkter til bilindustrien og store mengder metall går til for eksempel varmevekslere i personbiler i det europeiske markedet. Trådstøperiet leverer produkter til kabelprodusenter som lager høyspentkabler for et globalt marked. Valseverket mottar primæraluminium fra metallverket, derfra støper de plater i en kontinuerlig prosess. Produktene leveres til kunden i form av store ruller(coils) eller som flate plater(sheets).

Det kan også nevnes at det er satt i gang bygging av ny elektrolysehull på Karmøy. Teknologien som ligger til grunn for aluminiumsproduksjonen i den nye hallen er verdens mest klimavennlige og energieffektive aluminiumsproduksjon. [1]



Figur 2-1: Hydro Aluminium Karmøy

Hentet fra <http://www.hydro.com/no/Hydro-i-Norge/Var-virksomhet/Her-finner-du-oss/Karmoy-Karmoy-Metallverk/>

2.2 Bakgrunn for oppgaven

I forbindelse med aluminiumsproduksjonen på HAK slippes det ut partikler og gasser som er forurensende for atmosfæren. For å forhindre høye utslipp av produksjonsgassen har HAK 3 renseanlegg som skal rense utslippsgassene for uønskede stoffer. Det direkte utslippet måles fra våtvaskertårnene, som er det siste punktet i renseprosessen. For å ha kontroll på at renseanleggene alltid fungerer optimalt blir det tatt støv- og gassmengdemålinger ved flere punkter i renseanleggene. Dette gjøres for å ha kontroll på utslippet, virkningsgraden, total renseeffekt til anlegget og gjenvinningsgraden. I tillegg til at renseanlegget renser avgassene, gjenvinnes også fluoren slik at den kan brukes på nytt i selve aluminiumsproduksjonen.

Etter som prøvetakingspunktet for direkte bestemmelse av partikulært utslipp ikke oppfyller kravene i henhold til standarden [2], er ikke punktet representativ. Prøvetakingspunktet må derfor optimaliseres, og det må fremlegges dokumentasjon for hvorfor det valgte prøvetakingspunktet er representativt. Det er i den sammenheng at denne bacheloroppgaven ble til.

2.3 Problemstilling

Som nevnt var ikke prøvetakingspunktet i henhold til standarden, og en utbedring av punktet måtte til. Kravet var at det skulle kunne bevises at utslippstallene var representative i prøvetakingspunktet. Støvkonsentrasjonen som måles i det gitte punktet brukes når det rapporteres hvor mye partikulært støv som slippes ut fra HAK. Derfor er det essensielt å ha et optimalt prøvetakingspunkt, som gir korrekte utslippstall.

Problemstillingen går da ut på å tilpasse målepunktet, målerutinene og utstyret som brukes slik at det i størst mulig grad oppfyller kravene som er gitt i standarden som omhandler utslipp og bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner [2].

I standarden stilles det mange krav til riktig prøvetaking, en av de viktigste faktorene er å tilpasse målingen på en slik måte at den blir isokinetisk. Om isokinetisk prøvetaking var tatt hensyn til ved valg av det nåværende prøvetakingspunkt var det manglende dokumentasjon på, så dokumentasjon på isokinetikk ved valg av nytt prøvepunkt måtte fremlegges. Mer informasjon om isokinetisk prøvetaking kommer i avsnitt 3.3.

2.4 Målsetting for oppgaven

For å kunne optimalisere prøvetakingspunktet for bestemmelse av partikulært materiale i avgass er det flere parametere som må ses på og vurderes. Hvordan dagens situasjon er i forhold til standarden må belyses [2], deretter må det vurderes hvilke avvik som er mest kritiske og hvilke det ikke skal legges like stor vekt på i denne oppgaven.

Målsettingen er å finne et optimalt prøvetakingspunkt, men det er ikke sikkert det er mulig å optimalisere punktet 100%. Det er heller ikke sikkert at det trengs et nytt prøvetakingspunkt, da det som eksisterer i dag kan vise seg å være det best egnede. Uansett er målet å forbedre alle avvik som lar seg forbedres, og optimalisere punktet så langt det lar seg gjøre.

Da denne oppgaven tar for seg å finne et optimalt punkt, begynner arbeidet helt fra bunn uten påvirkning fra det nåværende punktet. Om det nåværende prøvetakingspunktet allikevel kan vise seg å være et optimalt punkt vil ikke bli belyst i denne oppgaven.

Å belyse viktigheten av isokinetisk prøvetaking og dokumentere alt som blir gjort rundt dette er også et mål med oppgaven. Isokinetisk prøvetaking er blitt vurdert på HAK en gang i tidligere, men det finnes ingen dokumentasjon på det.

2.5 Avgrensninger

Avgrensningene i denne oppgaven ble klarere etter hvert som standardene ble gjennomgått [2], [3]. I samarbeid med intern og ekstern veileder ble det bestemt at det var nødvendig med avgrensninger for å kunne utføre oppgaven i det gitte tidsrommet, og med en gjennomførbar arbeidsmengde.

2.5.1 Avvik fra standard

Det stilles omfattende krav for hvordan hver enkel del av prøvetakingen skal foregå [2]. På grunn av begrensninger i arbeidstid, arbeidskapasitet, tilgjengelige ressurser og design på allerede eksisterende anlegg er det noen av kravene i standarden som ikke kan oppfylles i den grad det kreves. Dette gjelder ikke bare for HAK, men også for alle de andre Hydroverkene i Norge.

Et eksempel på et krav som er vanskelig å gjennomføre er behandlingen av støvfilteret etter at målingen er gjort. Standarden sier at filteret sammen med alt støvet skal tørkes i varmeskap på 180 °C i 1 time, deretter skal det avkjøles til omgivelsestemperatur i en eksikator i minst 4 timer. Etter dette skal det støveksponeerte filteret veies, før det skal tilbake i varmeskap i 1 time, og deretter nok en runde i eksikatoren i 4 timer.

Totalt utgjør dette en tid på 10 timer. I og med at en arbeidsdag på laboratoriet bare er 8 timer, sier det seg selv at dette er en prosess som er for tidkrevende. I alle fall med tanke på at dette bare er en liten del av hele prøvetakingsprosessen. Avvik fra standarden oppsummeres i avsnitt 4.1.

[2]

2.5.2 Valg av renseanlegg og kanal

Det finnes tre renseanlegg på Hydro Karmøy – K3, K4 og K5. Hvert anlegg består av flere store deler, som har forskjellig oppgave og hensikt i renseprosessen. Den delen av renseanlegget som er aktuell i denne oppgaven, er den delen som kommer etter tørr-rens. Tørr-rens er hvor støv og partikler blir skilt ut fra gassen ved hjelp av filtre. Etter at gassen har gått gjennom disse filtrene går den videre til viftene. Derfra blir gassen blåst gjennom kanaler og inn i våtskrubberne. I våtskrubbene kommer gassen inn i bunn, mens sjøvann blir pumpet inn på toppen og renner ned mens gassen stiger opp. På den måten skiller saltvannet ut 99% av de uønskede avgassene.

Se Figur 13-1 og Figur 13-2 for oversikt over de forskjellige delene i renseanlegget.

På grunn av tidsrommet oppgaven skal utføres i samt arbeidsmengden var det nødvendig å avgrense oppgaven til et renseanlegg og deretter til kun én kanal (det finnes totalt 3 renseanlegg, og 10 tilhørende kanaler)

Etter samtaler med avdeling Gassrens på HAK kom vi frem til at oppgaven skulle ta for seg renseanlegg K3 og kanal 4. K3 og K4 er de største anleggene, derfor var det fordelaktig å se på et av disse. På K4 var det nettopp gjennomført store veldikeholdsoperasjoner, og siden oppgaven krevde at det måtte borres hull i kanalen for hastighetsmålinger foretrakk Gassrens at målingene ble gjort på renseanlegg K3. At det ble

kanal nr. 4 var ganske tilfeldig, men det er imidlertid denne kanalen som har lettest ankomst ved utføring av målinger.

Se Figur 3-3 side 8 for en oversikt av de 4 kanalene på K3. Kanal nr. 4 er markert med rødt.

2.6 Løsningsmetode

Oppgaven tar utgangspunkt i standard NS-EN 13284-1 som beskriver hvordan støvmålinger skal utføres i industrien [2]. Arbeidet i denne studien fokuserer på å optimalisere selve prøvetakingspunktet og rutiner rundt dette. Forarbeid, avvikshåndtering og etterarbeid i forbindelse med prøvetakning belyses ikke i detalj.

For å kunne optimalisere prøvetakingspunktet er det nødvendig å etablere en så nøyaktig hastighets- og volumstrømsprofil av gassen i kanalen som mulig. Disse profilene ble etablert ved bruk av pitotrør. På grunn av obstruksjoner i kanalen (ref. avsnitt 5.2.2) vil hastigheten kunne variere ganske mye i nærheten av disse. Siden man ikke kan garantere at man treffer eksakt samme målepunkt i kanalen hver gang, på grunn av justering etter stagene (ref. 5.2.2), vil en middelvei gi et mer konkret bilde av hastigheten i punktet. Det ble derfor utført gjentatte målinger over flere dager.

Metoden for optimalisering av prøvetakingspunkt for bestemmelse av partikulært materiale i avgass ble bestemt i samarbeid med laboratoriet på HAK. Metoden som brukes er utarbeidet i samarbeid mellom flere Hydroverk i Norge, og er basert på praktiske tilnærminger og erfaringer gjort over tid. Denne metoden skal ligge til grunn for alle prøvetakingspunkter på HAK.

Etter at det optimale punktet var funnet skulle det gjennomføres støvmålinger i flere punkter i kanalen. Dette var for å belyse viktigheten av isokinetisk måling, og påpeke konsekvensene dersom støvmålingene ikke ble gjennomført isokinetisk.

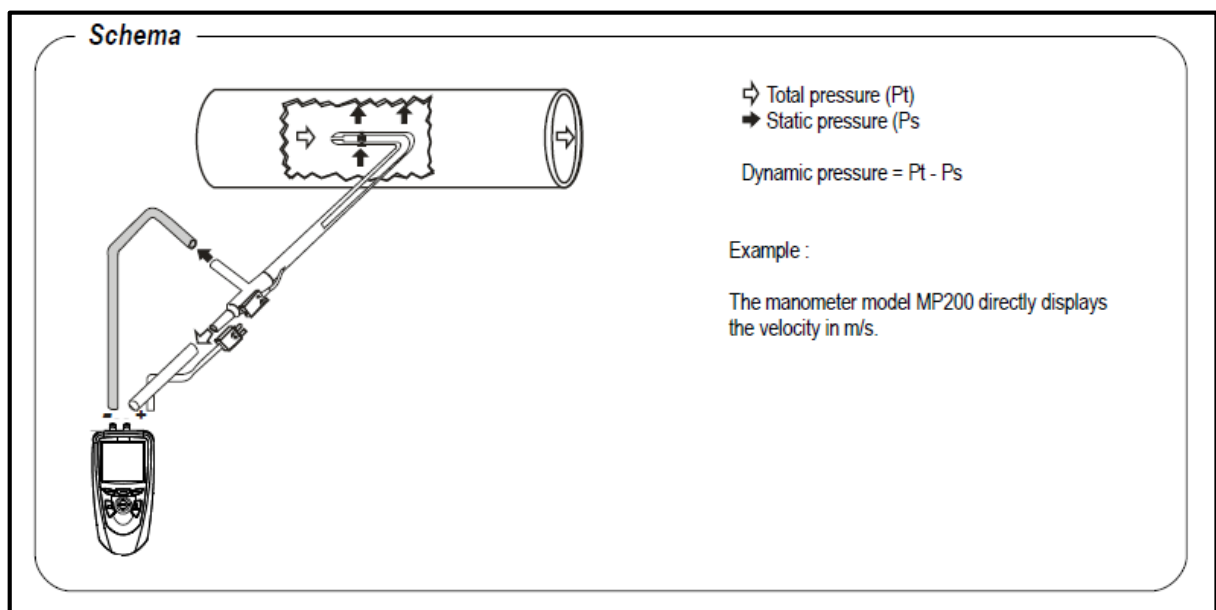
Mer informasjon om isokinetikk og isokinetisk prøvetaking kommer i avsnitt 3.3.

3. Teori

3.1 Pitotrør

Volumstrømmen til et fluid som strømmer i et rør kan bestemmes ved hastighetsmålinger og bruk av Bernoulli's prinsipper. I denne studien ble det brukt et pitotrør til å måle hastighet. Det var den beste måten å måle hastigheten til gassen i en lukket kanal, da pitotrøret utfører punktmålinger. Pitotrøret ble oppfunnet av den franske fysikeren Henri Pitot, og deretter videreutviklet av Henry Darcy. [4]

Pitotrøret finner hastigheten til fluidet ved hjelp av trykkmålinger. Røret måler trykket i to forskjellige punkter, en åpning som vender mot luftstrømmen, totaltrykk (stagnasjonstrykk), og en åpning som måler det statiske trykket, se Figur 3-1. Pitotrør måler ikke gjennomsnittsfarten i kanalen, men hastigheten til fluidet i et enkelt punkt. Det gjøres ved å se på forskjellen mellom totaltrykket og det statiske trykket i det aktuelle punktet. Bruk av pitotrør gir derfor en realistisk karakteristikk av hastighetsprofilen til gassen.



Figur 3-1: Pitotrør, total- og statisk trykk

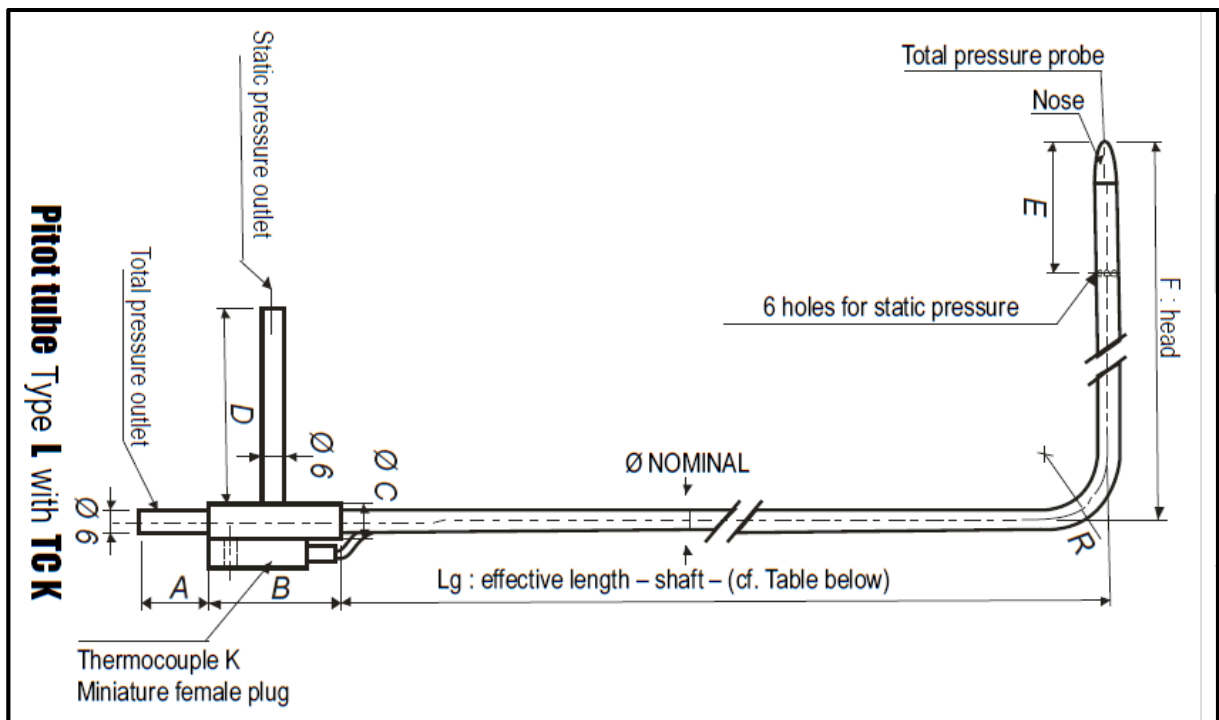
Hentet fra Vedlegg 1.

Se avsnitt 3.2 for nærmere forklaring på hvordan trykkmålingene brukes i kombinasjon med Bernoulli's ligning til å regne ut hastigheten til strømmingen.

3.1.1 Pitotrør type L

Pitotrøret som brukes til hastighetsmåling i denne oppgaven er av type L. Grunnen til navnet er at røret er formet som en L, se Figur 3-2. Det totale trykket måles på tuppen av røret, mens det statiske trykket måles av 6 små hull som ligger 9 cm nedstrøms «nesen». Det dynamiske trykket finnes da ved formel:

$$p_D = p_t - p_s$$



Figur 3-2: Pitotrør type L

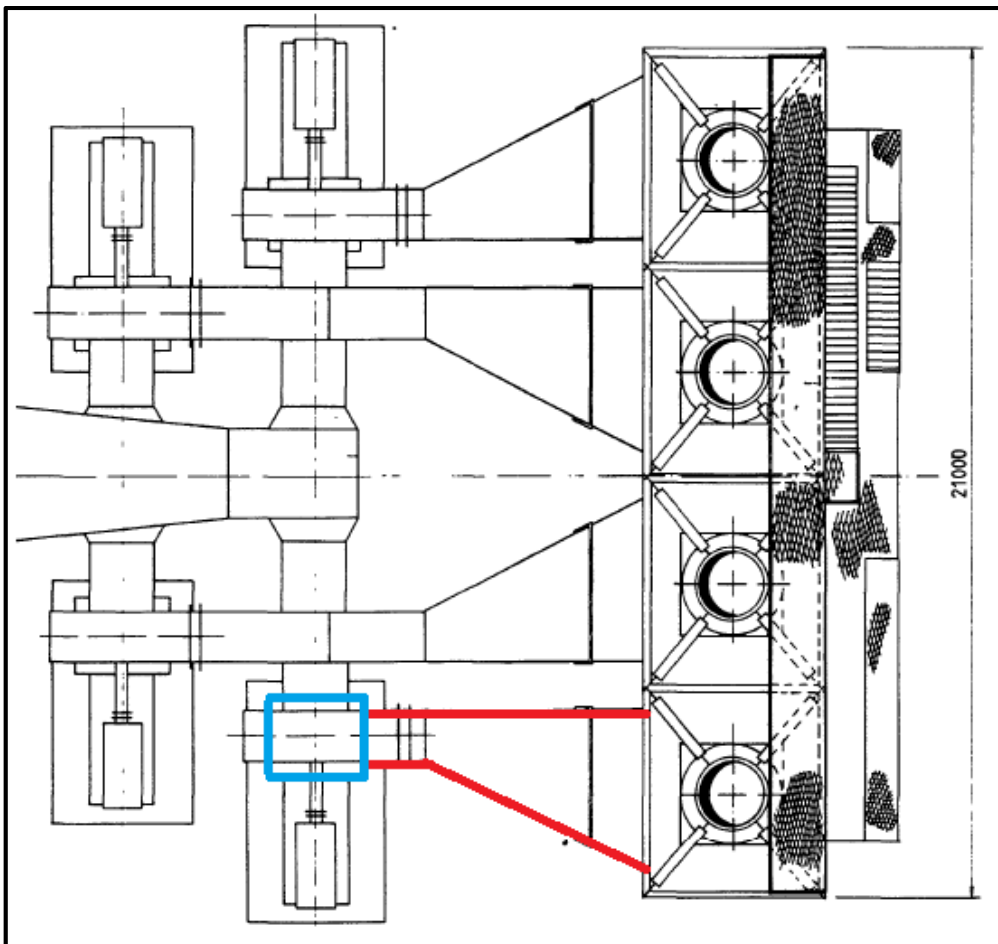
Hentet fra Vedlegg 1

Se Vedlegg 1 for mer informasjon om pitotrør type L.

3.2 Gasstrøm i kanal

Når en luftmasse beveger seg gjennom en kanal med varierende tverrsnitt endrer ikke massestrømmen seg, det som derimot endrer seg er hastigheten. For at den samme mengden luft skal kunne passere gjennom 2 etterfølgende tverrsnitt med ulik størrelse må luften strømme raskere noen steder. Hastigheten vil variere i kanalen, ut ifra hvordan geometrien utformer seg [5].

På Figur 3-3 vises geometrien til kanalen. En kan se at den består av to forskjellige utformede vegger, en som er rett og en som skrår utover (markert med rødt). Viften (markert med blått) er plassert til venstre og blåser rett inn i kanalen. Viften blåser med en effekt på 550 kW, og luftmengden gjennom kanalen skal være konstant.



Figur 3-3: Oversiktstegning av vifte, kanal og våtvaskertårn sett ovenfra

Ved å bruke trykkmålingene fra pitotrøret i en kombinasjon med en forenkling av Bernoulli's ligning bestemmes hastigheten til gassen i hvert enkelt målepunkt. Forenklingen av Bernoulli's ligning ble lagt frem i det tekniske databladet som fulgte med pitotrøret fra leverandøren, se Figur 3-4 og Vedlegg 1. All data fra hastighetsmålingene finnes i Vedlegg 2.

With the dynamic pressure in mm H₂O or in Pa, we can calculate the air velocity in m/s, with the simplified BERNOULLI formula :

$$V \text{ in m/s à } 20 \text{ °C} : 1,291\sqrt{Pd \text{ in Pa}}$$

or

$$V \text{ in m/s} : 4,05\sqrt{\Delta P \text{ en mm CE}}$$

Formula to get the velocity, with temperature balancing of the airflow :

$$V \text{ in m/s} = K \times \sqrt{\frac{574,2 \Theta + 156842,77}{P_o}} \times \sqrt{\Delta P \text{ in Pa}}$$

With

P_o = barometric pressure in Pa
 Θ = temperature in °C
 K = coefficient of the Pitot tube

Figur 3-4: Forenklet versjon av Bernoulli's formel

Hentet fra Vedlegg 1

3.3 Isokinetisk prøvetaking

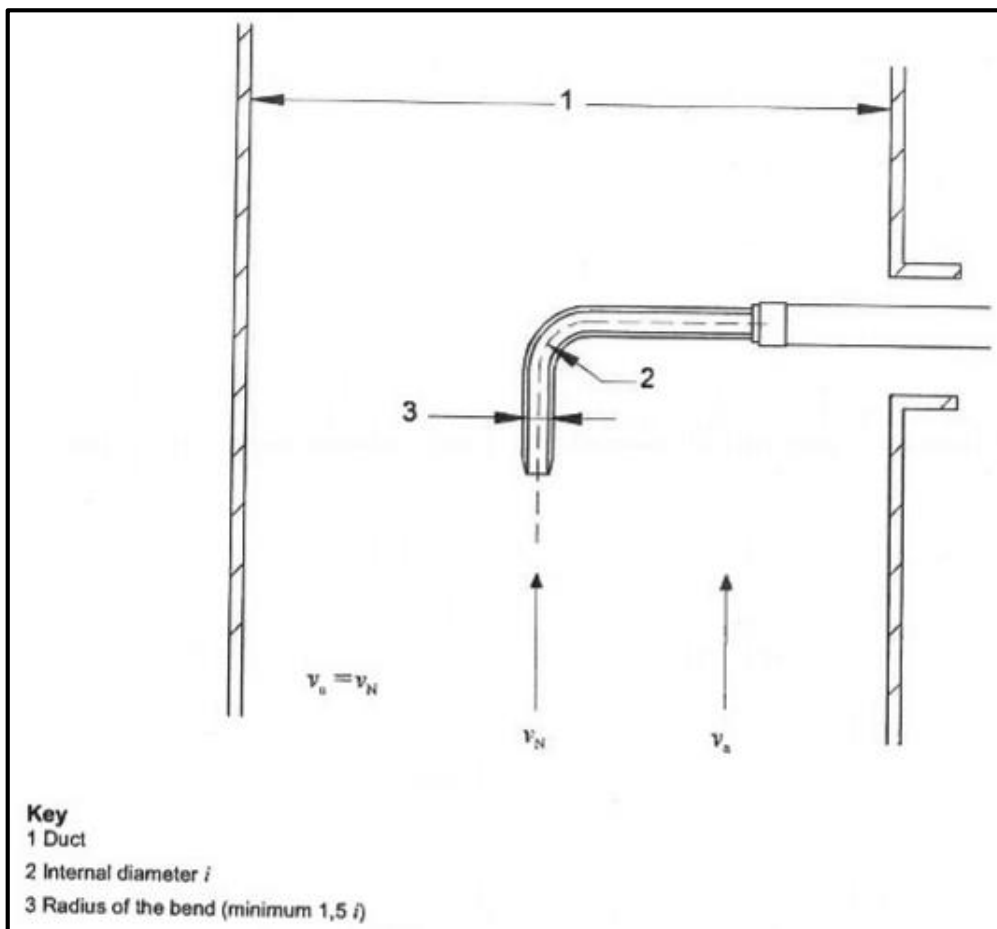
Støvmåling i henhold til standard NS-EN 13284-1 krever at prøvetakingen foregår under isokinetiske forhold [2]. At prøvetakingen er isokinetisk innebærer at strømningsraten og retningen til gassen som strømmer inn i prøvetakingssonden, tilsvarer gasshastigheten i det aktuelle målepunktet i kanaltverrsnittet.

Det gjøres ved at sugeenheten (pumpen) må være innstilt ved de aktuelle prøvetakingsforholdene, og med en sugehastighet som tilsvarer strømningsraten i det aktuelle punktet. Det må derfor være mulig å regulere strømmingen til pumpen, for å

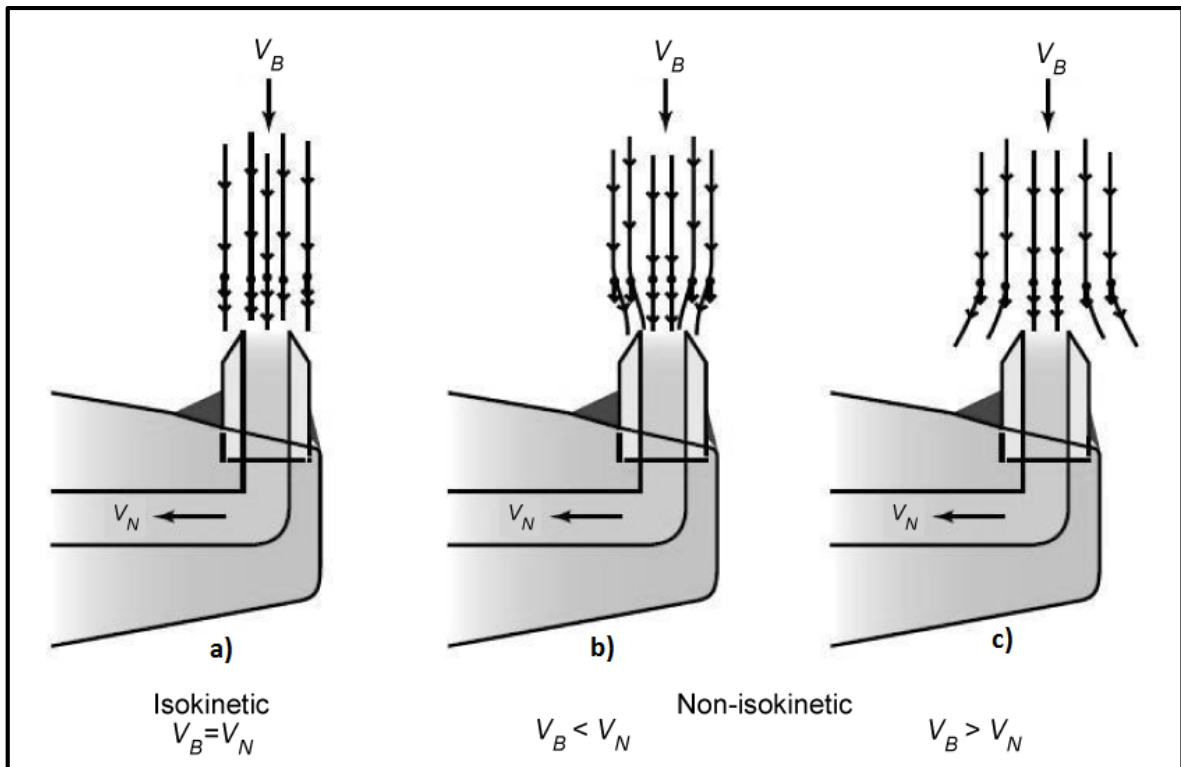
ivareta de isokinetiske forholdene. Pumpen som brukes til prøvetaking bør derfor være av en type hvor det er mulig å regulere strømmingen, for eksempel en pumpe med reguleringsventil, eller en annen måte det er mulig å regulere sugehastigheten.

Etter en gjennomgang av utstyret som finnes på laboratoriet ble løsningen en innsnevringsskrue som festes på slangen mellom pumpen og prøvetakingssonden, siden pumpene ikke var utstyrt med reguleringsventil. Ved hjelp av denne skruen kunne man regulere sugehastigheten til pumpen. Hastigheten kunne bare justeres ned, så det var viktig at pumpen leverte over nødvendig kapasitet.

Ved å koble pumpen til et gassur med telleverk, kan det registreres hvor mye luft som går gjennom systemet, og på den måten kunne man strupe sugehastigheten til pumpen helt til isokinetiske forhold var oppnådd.



Figur 3-5: Isokinetisk prøvetaking



Figur 3-6: Avvik ved isokinetisk prøvetaking

[6]

På Figur 3-6 vises det en illustrasjon av forholdene ved ulike sugehastigheter fra pumpen. På illustrasjon a) er prøvetakingen isokinetisk. Her er hastigheten V_B , i kanalen den samme som sugehastigheten V_N , fra pumpen. På illustrasjon b) er sugehastigheten fra pumpen større enn hastigheten til gassen i kanalen, over-isokinetisk prøvetaking. Dette fører til at sonden virker som en støvsuger, og får med seg for mange partikler. På illustrasjon c) er sugehastigheten under isokinetisk utsugning, det vil si at hastigheten til gassen i kanalen er høyere enn sugehastigheten til pumpen, under-isokinetisk prøvetaking. Dette fører til at det blir samlet opp for få partikler.

3.4 Laminær og turbulent strømning – Reynolds tall

Gassen som strømmer i kanalen kan bli karakterisert som laminær eller turbulent. Hvilken av disse kategoriene den kommer under er avhengig av hastigheten, utformingen av tverrsnittet og viskositeten til fluidet.

Når hastigheten til gassen er liten strømmer gassen jevnt og fint i parallelle lag i kanalen, dette karakteriseres som laminær strømning. Men når hastighet øker blir strømningsmønsteret til gassen ganske annerledes. Da strømmer den på kryss og tvers av kanalen og oppfører seg «kaotisk», dette karakteriseres som turbulent strømning.

[7]

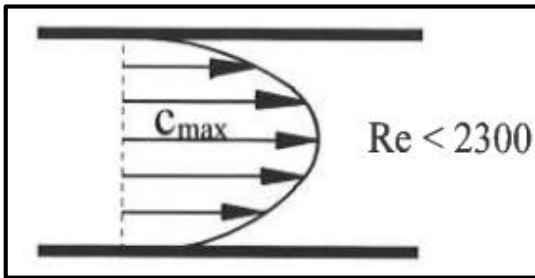
For å beskrive om strømningen er laminar eller turbulent brukes Reynolds tall, som er en dimensjonsløs størrelse. Den defineres slik:

$$Re = \frac{V \cdot d_h}{\nu}$$

Reynolds tall kan sees på som forholdet mellom treghetskrefte og friksjonskrefte i strømningen. For rørstrømning skjer omslaget fra laminar- til turbulent strømning når $Re \approx 2300$, denne grenseverdien blir kalt for det kritiske Reynolds tall. Da er strømningen laminar ved $Re < 2300$ og turbulent ved $Re > 2300$. Men den kritiske verdien varierer med ytre vilkår. For eksempel vil den være høyere i kovergerende rør, og lavere i divergrense rør enn i et rett rør.

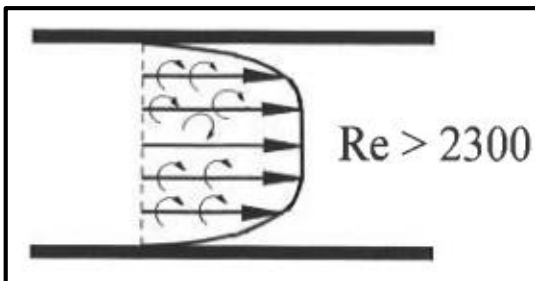
[8], [9]

Figur 3-7 og Figur 3-8 viser hastighetsfordelingen i et rør.



Figur 3-7: Laminær strømning

Hentet fra [9] side 194.



Figur 3-8: Turbulent strømning

Hentet fra [9] side 194.

Siden fluidet i denne oppgaven er en prosessgass som er sammensatt av mange forskjellige gasser blir det vanskelig å regne ut den eksakte dynamiske viskositeten. Men siden den største andelen av gassen er luft, oksygen og nitrogen, kan det antas at viskositeten til gassen er tilnærmet lik viskositeten til luft. «Kinematisk viskositet er en stoffkonstant som er avhengig av trykk og temperatur, men i de fleste praktiske tilfeller kan vi se bort ifra innvirkningen fra trykket» sier Ansgar Lund [9, p. 193].

I dette tilfellet brukes viskositeten ved en temperatur på 80°C. Det er fordi viskositeten leses av fra en tabell [8] som oppgir en verdi for hver 10°C. Som det kommer frem i Vedlegg 2 og Vedlegg 3 var den gjennomsnittlige temperaturen i kanalen 82°C. Derfor leses viskositeten av ved 80°C. Man kunne valgt å interpolert for å få en eksakt verdi ved 82°C, men det er valgt å gjøre en forenkling å bruke verdien ved 80°C.

Den absolutte viskositeten μ ved 80°C [8]:

$$20,94 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Strømningen i denne kanalen karakteriseres til å være turbulent, da Reynolds tall ble:

$$\text{Re} = 2857584,689$$

Utregning av Reynolds tall kommer i avsnitt 9.2.

3.5 Standarder

3.5.1 Norsk Standard NS-EN 13284-1.

Norsk Standard NS-EN 13284-1 Utslipp fra stasjonære kilder. Bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner. Del 1: Manuell gravimetrisk metode.

Ved bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner er det en rekke krav som må følges for at prøvetakingen skal være gyldig ifølge standarden. Blant annet hvordan målingen utføres, utvelgelse av det aktuelle prøvepunktet, behandling av utstyr, håndtering og etterbehandling av prøven og riktig utstyr.

Når det blir foretatt en prøve fra gasstrømmen i kanalen skal det være ved et representativt prøvepunkt, for en gitt tidsperiode. Prøvetakingen skal foregå isokinetisk, og mengden gassvolum som går gjennom systemet i løpet av prøvetakingsperioden skal registreres. Støvet som kommer inn i sonden samles på et forhåndsveid filter, det støvet som har stoppet opp i andre deler av prøvetakingsutstyret tas også med når filteret veies. På denne måten kan man bestemme støvkonsentrasjonen i gasstrømmen i den aktuelle måleperioden.

3.5.2 International standard ISO 3966.

International standard ISO 3966. Measurement of fluid flow in closed conduits – Velocity area method using Pitot static tubes.

Også ved kartlegging av volumstrøm i en lukket kanal er det en rekke krav som må følges for at prøvetakingen skal bli korrekt. Denne standarden er en detaljert gjennomgang av hvordan volumstrøm skal måles i en lukket kanal. Krav til hvilket utstyr som skal brukes, hvordan målingene skal gjennomføres, valg av målepunkter og utføring av selve målingen er bare noen av punktene som blir belyst i detalj i denne standarden.

4. Dagens situasjonen

Standard NS-EN 13284 er ganske omfattende. Den stiller høye krav til hvordan bestemmelsen av lave støvkonsentrasjoner skal utføres. Noen punkter er så krevende at de rett og slett ikke lar seg gjennomføre i hverdagen. Se avsnitt 2.5 for mer informasjon.

I dette kapittelet blir det sett nærmere på hvilke krav som stilles ved bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner, i forhold til rutiner og metoder som følges på laboratoriet på HAK i dag.

4.1 Avvik fra standard

I Tabell 1 blir de fleste kravene fra standarden angående støvmåling listet opp, og i de tre kolonnene til høyre er det markert om disse kravene oppfylles eller ikke. Tabellen er laget på grunnlag av hvordan situasjonen var da arbeidet med denne studien startet.

Tabell 1: Avvik fra standard

Krav nr:	Krav i Standard NS-EN 13284	Kravet oppfylles	Kravet oppfylles ikke	Ikke undersøkt eller tatt stilling til
1	Isokinetisk prøvetaking		X	
2	Det skal kontrolleres at prøvetakingen er isokinetisk hvert 5. minutt		X	
3	Mengden gass som går gjennom systemet må bli registrert	X		
4	Gass-strømmen skal ha en homogen og jevn hastighetsprofil			X
5	Sondespissen skal være glatt og fin, og peke mot gass-strømmen	X		

Krav nr:	Krav i Standard NS-EN 13284	Kravet oppfylles	Kravet oppfylles ikke	Ikke undersøkt eller tatt stilling til
6	Prøvetakingen skal foregå ved et nøye utvalgt prøvepunkt		X	
7	Det skal gjennomføres måling ved en tilstrekkelig mengde prøvepunkter i tverrsnittet		X	
8	Tverrsnittet bør være langt borte fra alle bend og andre forstyrrelser		X	
9	Prøvetakingsutstyret skal være designet for å unngå kondensasjon, kjemiske reaksjoner og for å minimere støvavleiringer			X
10	Alle deler må være av et korrosjonsbestandig og varmebestandig materiale	X		
11	Alle deler av utstyret som kommer i direkte kontakt med prøven må behandles slik at det ikke forurenser prøven		X	
12	Antall koplinger bør minimaliseres for å unngå lekkasjepunkter		X	
13	Overall blankvalue – prøve		X	
14	Prøvetakings- og veieprosedyrene er tilpasset forventet støvmengde	X		
15	Prøvetakingen bør foregå i en rett kanal, helst vertikal		X	
16	Kanalen bør ha konstant form og konstant tverrsnittsareal		X	
17	Prøvetakingssonden skal ikke overstige en vinkel på 15° i forhold til gasstrømmen under måling	X		

Krav nr:	Krav i Standard NS-EN 13284	Kravet oppfylles	Kravet oppfylles ikke	Ikke undersøkt eller tatt stilling til
18	Måleutstyret skal inneholde flere størrelser sondespisser for korrekt måling		X	
19	Sondespissen bør ha en indrediameter på større enn 6 og mindre enn 8 mm	X		
20	Forholdet mellom høyeste og laveste hastighetsmåling skal være mindre enn 3:1			X
21	Hastighetsmålinger av gassen skal gjennomføres av pitotrør type L	X		
22	Oppvarmet prøvetakingsutstyr for å hindre at det kommer uønsket fukt på filteret		X	
23	Filterdiameter mellom 50 og 150 mm	X		
24	Strømningsrate mellom 1 og 10 m ³ /h	X		
25	Sugeenheten(pumpen) må ha en reguleringsventil for å tilpasse strømningsraten til volumstrømmen i kanalen		X	
26	Sugeenheten bør ha en stengeventil		X	
27	Filteret skal for- og etter veies	X		
28	Alt støv i prøvetakingsutstyret skal være med når filteret veies	X		
29	Filteret skal behandles i varmeskap og eksikator for å fjerne all fuktighet	X		

Krav nr:	Krav i Standard NS-EN 13284	Kravet oppfylles	Kravet oppfylles ikke	Ikke undersøkt eller tatt stilling til
30	Filteret skal være i varmeskap i 1 time både før og etter veiing		X	
31	Filteret skal være i eksikator i 4 timer etter det har vært i varmeskap		X	

4.2 Utvalgte avvik

I og med at standarden er så omfattende er det nødvendig å velge ut de viktigste avvikene, for så å håndtere disse. Som nevnt i avsnitt 2.5.1, kan ikke alle kravene oppfylles på grunn av begrensninger i arbeidstid, arbeidskapasitet og tilgjengelige ressurser. Det er derfor viktig at det blir satt fokus på å oppfylle de kravene som er mest kritiske for å oppnå så korrekt prøvetaking som mulig. Dette gjelder derimot ikke bare for HAK, men også for alle andre Hydroverk i Norge.

Denne studien fokuserer på å optimalisere prøvetakingspunktet, så krav nr.6 i Tabell 1 vurderes som det viktigste punktet i standarden, men dette alene gir ikke et optimalt prøvepunkt. I samarbeid med Hydro, ble det besluttet at det viktigste avviket var mangel på isokinetisk prøvetaking. Da arbeidet med bacheloroppgaven startet var det manglende dokumenterte vurderinger av sugehastigheten til pumpen, i forhold til gasshastigheten i prøvepunktet. Som nevnt i avsnitt 3.3, vil ulik hastighet føre til for mye eller for lite oppsamlet støv under prøvetakingen. Dette kan ha konsekvenser for utslippstallene fra HAK ved at det potensielt blir rapportert et for høyt eller for lavt støvutslipp.

Et annet avvik som vektlegges er at tverrsnittet som prøvetakingen skulle foregå i måtte være langt borte fra bend og andre forstyrrelser. Dette kan ikke ivaretas da det vil kreve store ombygginger av renseanlegget. Men kravet ble til en viss grad tatt i betraktning da prøvetakingstverrsnittet skulle velges ut, ved at det ble plassert så langt borte fra bend og forstyrrelser som det lot seg gjøre.

5. Pitotrørsmålinger

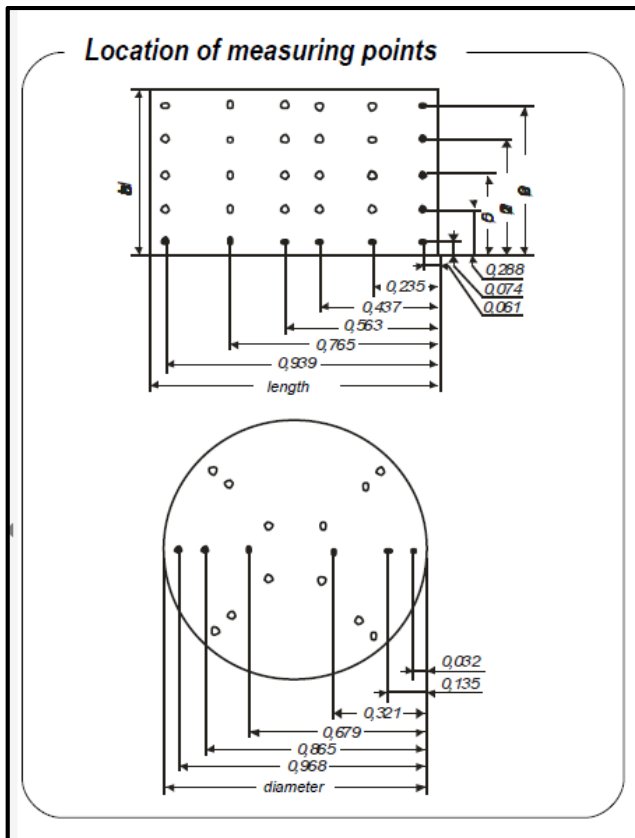


Figur 5-1: Ekstern veileder måler hastighet ved hjelp av pitotrør

5.1 Valg av prøvetakingspunkt for pitotrørsmålinger

For å få et riktig bilde av den gjennomsnittlige volumstrømmen i kanalen måtte hastigheten måles i flere punkter i et tverrsnitt i kanalen. Disse målepunktene ble funnet i samsvar med ISO Standard 3966 [3].

Figur 5-2 er hentet fra databladet som fulgte med pitotrøret, Vedlegg 1. Det er oppgitt at pitotrøret møter kravene fra ISO Standard 3966, så bestemmelse av målepunktene kunne bli gjort ved å ta utgangspunkt i denne figuren. Metoden som brukes til å finne disse målepunktene er en «Log-Chebyshev» metode, som beskrives nærmere i en av de aktuelle standardene [3].



Figur 5-2: Lokasjon av målepunkter

Figuren er hentet fra Vedlegg 1.

5.1.1 Tverrsnitt

Før prøvetakingspunktene kunne finnes måtte først prøvetakingstverrsnittet bestemmes. I følge ISO 3966 skal tverrsnittet være i en rett kanal, vinkelrett på strømmningen og lokalisert i et område hvor hastigheten representerer normale forhold [3]. Tverrsnittet skal også være så langt borte fra bend og andre forstyrrelser som mulig. Siden det ikke var mulig å gjøre noe med selve utformingen til renseanlegget, ble tverrsnittet plassert ved å følge kravene så godt det lot seg gjøre.

5.1.2 Prøvetakingspunkter

Ut ifra Figur 5-2 ble målepunktene i kanalen bestemt, 6 punkter på x-aksen og 5 punkter på y-aksen. Siden det finnes 6 punkter på x-aksen får man tilhørende 6 y-akser. Dette gav totalt 30 punkter.

Lengden til kanalen, x-aksen, $L = 2,375$ m

Høyden til kanalen, y-aksen, $H = 1,62$ m

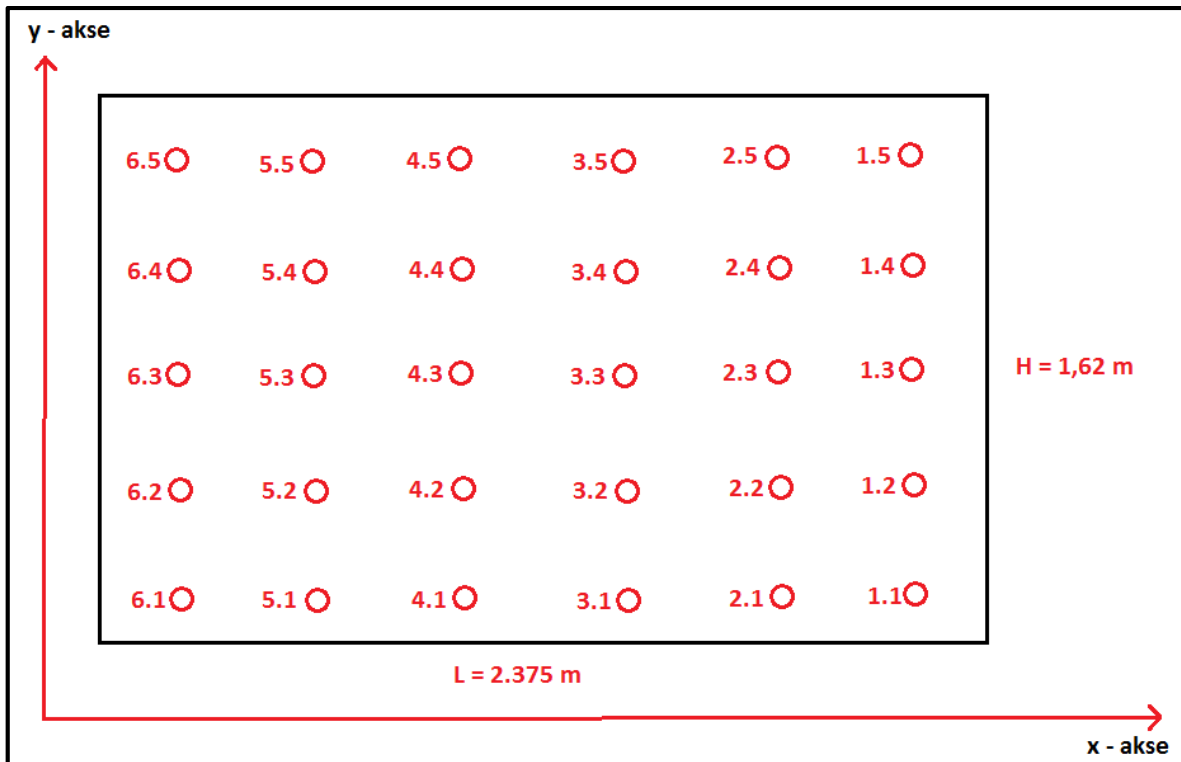
Tabell 2: Punkter i kanalen langs x-aksen

Punkt, x-akse	1	2	3	4	5	6
Avstand fra venstre kant	0,939 x L	0,765 x L	0,563 x L	0,437 x L	0,235 x L	0,061 x L
Avstand fra venstre kant i meter	2,230 m	1,817 m	1,337 m	1,038 m	0,558 m	0,145 m

Tabell 3: Punkter i kanalen langs y-aksen

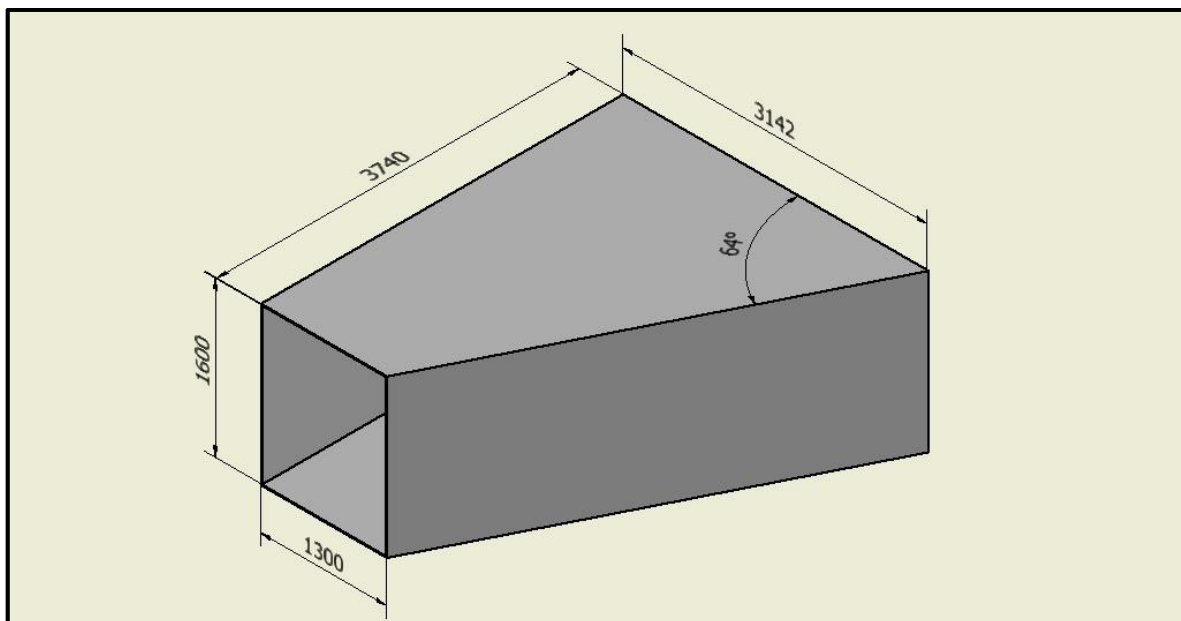
Punkt, y-akse	1	2	3	4	5
Avstand fra nedre kant	0,074 x H	0,288 x H	0,500 x H	0,712 x H	0,926 x H
Avstand fra nedre kant	0,120 m	0,466 m	0,810 m	1,153 m	1,500 m

Punktene er valgt på grunnlag av Log Chebyshev metoden, beskrevet i standard [3].

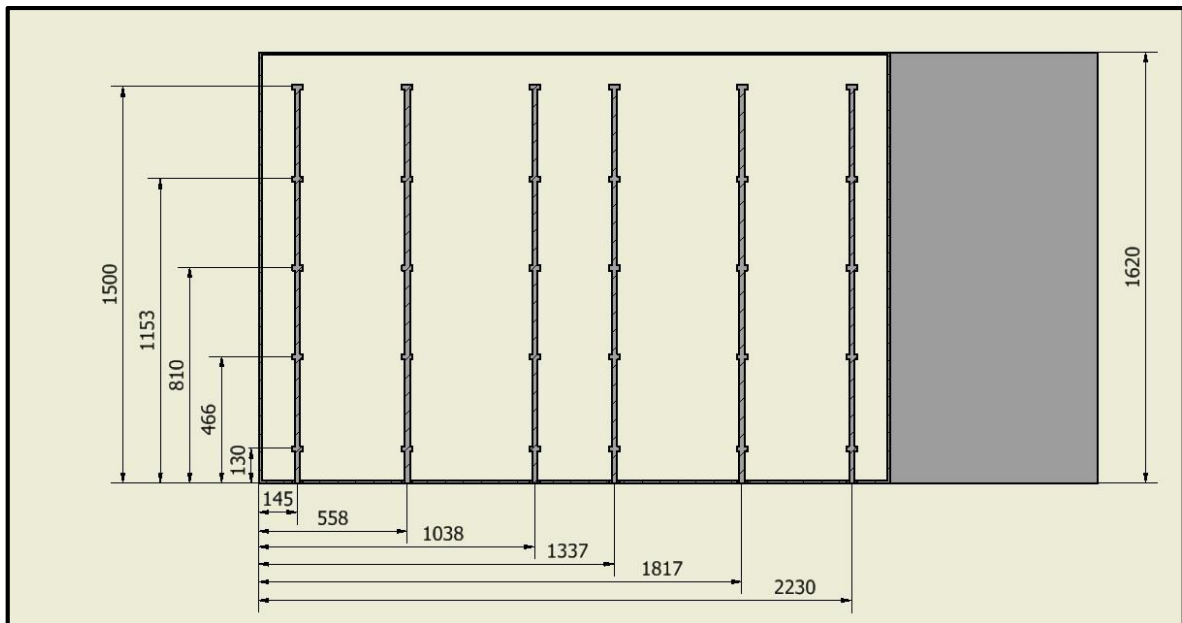


Figur 5-3: Målepunktene i kanalen merket med navn

Figur 5-3 viser en skisse av tverrsnittet i kanalen, hvor de aktuelle målepunktene er markert. Dette er kun en skisse, så avstanden mellom målepunktene er ikke korrekte. Skissen er kun laget for å navngi punktene på en enkel og grei måte.



Figur 5-4: Skisse av kanalens utforming



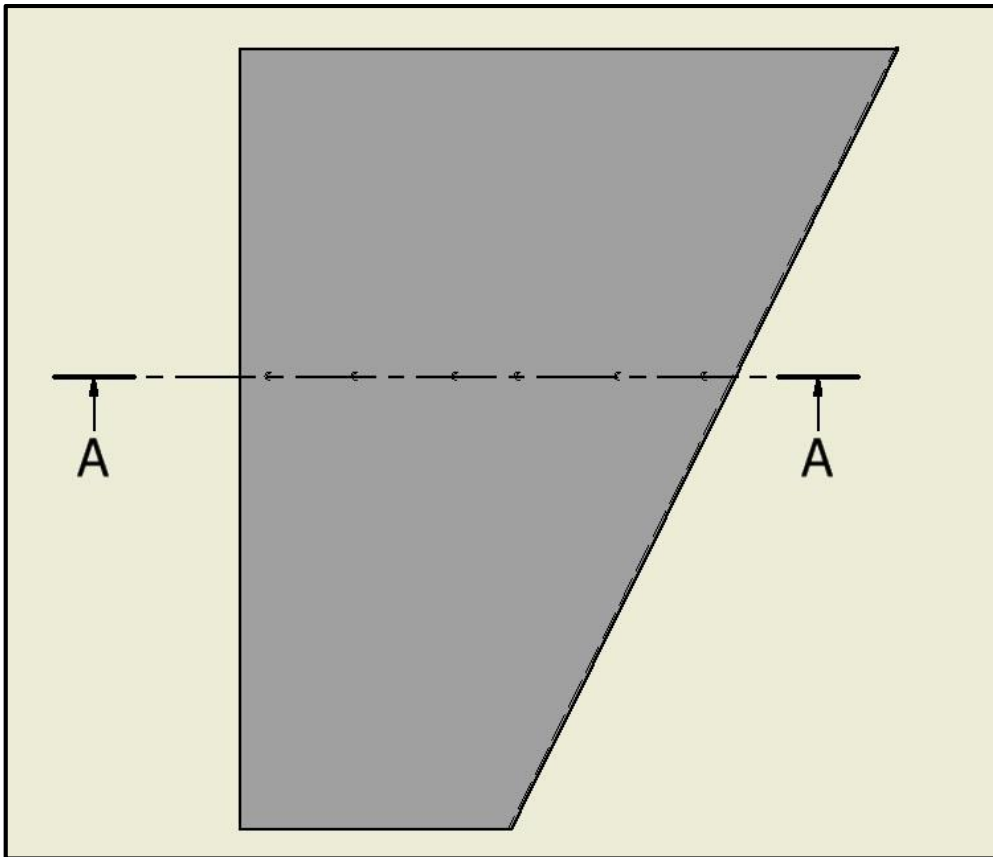
Figur 5-5: Det utvalgte tverrsnittet med målsatte prøvetakingspunkter

Figur 5-4 og Figur 5-5 er tegnet i konstruksjonsprogrammet Autodesk Inventor. Skissene av kanalen er derimot ikke 100% korrekte i forhold til virkeligheten. Dette er på grunn av mangel på tilgang til originaltegningene fra Hydro. Det var heller ikke mulig å målsette hele kanalen på egenhånd da det måtte tas hensyn til sikkerheten, med tanke på høyder og kanalens høye temperatur. De viktigste målene er derimot tatt. Målene på skissene er oppgitt i mm.

5.2 Luftmengdemålinger

For å være sikker på at målingene som ble tatt med pitotrøret var korrekte og ga et godt bilde av hvordan strømmingen i røret var over lengre tid måtte det tas flere målinger. I samarbeid med Hydro ble det bestemt at det skulle utføres 3 hastighetsmålinger i kanalen. Etter at målingene var gjennomført ble resultatene sammenlignet. Det ideelle resultatet ville være at de 3 gjennomsnittlige hastighetsmålingene skulle være likest mulig, noe som er en indikasjon på at volumstrømmen i røret er tilnærmet konstant.

Det optimale prøvetakingspunktet ville da være det punktet i kanalen hvor hastigheten var mest mulig lik den gjennomsnittlige verdien. Metoden for valg av optimalt prøvetakingspunkt er utarbeidet av Hydro (ref. avsnitt 2.6).



Figur 5-6: Skisse av hvor i kanalen tverrsnittet befinner seg

5.2.1 Forberedelser før måling

Før luftmengdemålingene kunne utføres ble det boret hull for prøvetaking.

Prøvetakingspunktene på x-aksen (ref. 5.1), ble markert på kanalen med tusj og deretter ble det boret hull i kanalen som ble tettet med gummikorker for å ikke ha lekkasjer fra kanalen mellom målingene. Se Figur 5-7 og Figur 5-8 på neste side.



Figur 5-7: Punkter markert for boring av hull



Figur 5-8: Ferdig borede hull, tettet med gummikorker

Det neste som måtte klargjøres var pitotrøret. For å vite hvor langt inn i kanalen pitotrøret måtte plasseres før det nådde målepunktene langs y-aksen ble det markert punkter med tusj og teip. Dette vises på Figur 5-9 på neste side. Det ble festet på 5 teipbiter som markerte de 5 punktene på y-aksen.



Figur 5-9: Pitotrør markert med teip for posisjonering av målepunktene langs y-aksen

5.2.2 Utføring av hastighetsmålinger

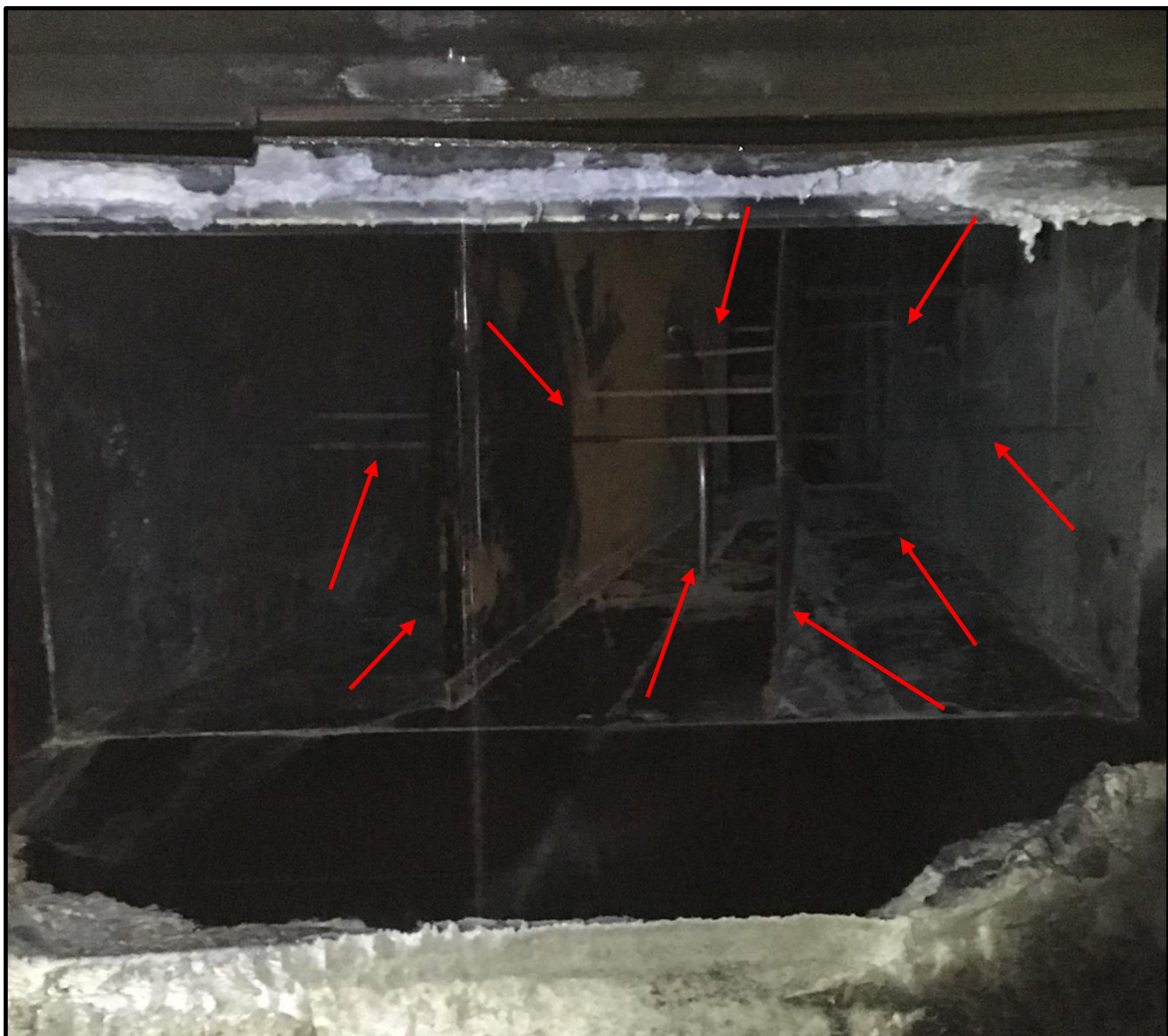
Hastighetsmålingene ble utført i løpet av en periode på 2 uker. Totalt ble det gjennomført 4 målinger, men kun 3 av disse ble brukt til videre beregninger. Den første målingen ble forkastet da denne ble sett på som en funksjonstest av pitotrør og målemetode.

Under funksjonstesten ble det oppdaget flere støttestag inne i kanalen, disse vises på Figur 5-10 på neste side. Avdeling Gassrens på HAK hadde informert om at stagene eksisterte, men de hadde ikke kunnskap om hvor i kanalen de befant seg.

Da hastighetsmålingene ble utført skapte stagene problemer for målingene. Problemet med stag, eller andre hindringer i kanalen, er at gassen skifter retning og da også hastighet for å komme rundt hindringen. Noen av de utvalgte målepunktene (ref. avsnitt 5.1.2) havnet bak stag, noe som gjorde at strømningshastigheten og retningen til gassen ble endret i disse punktene.

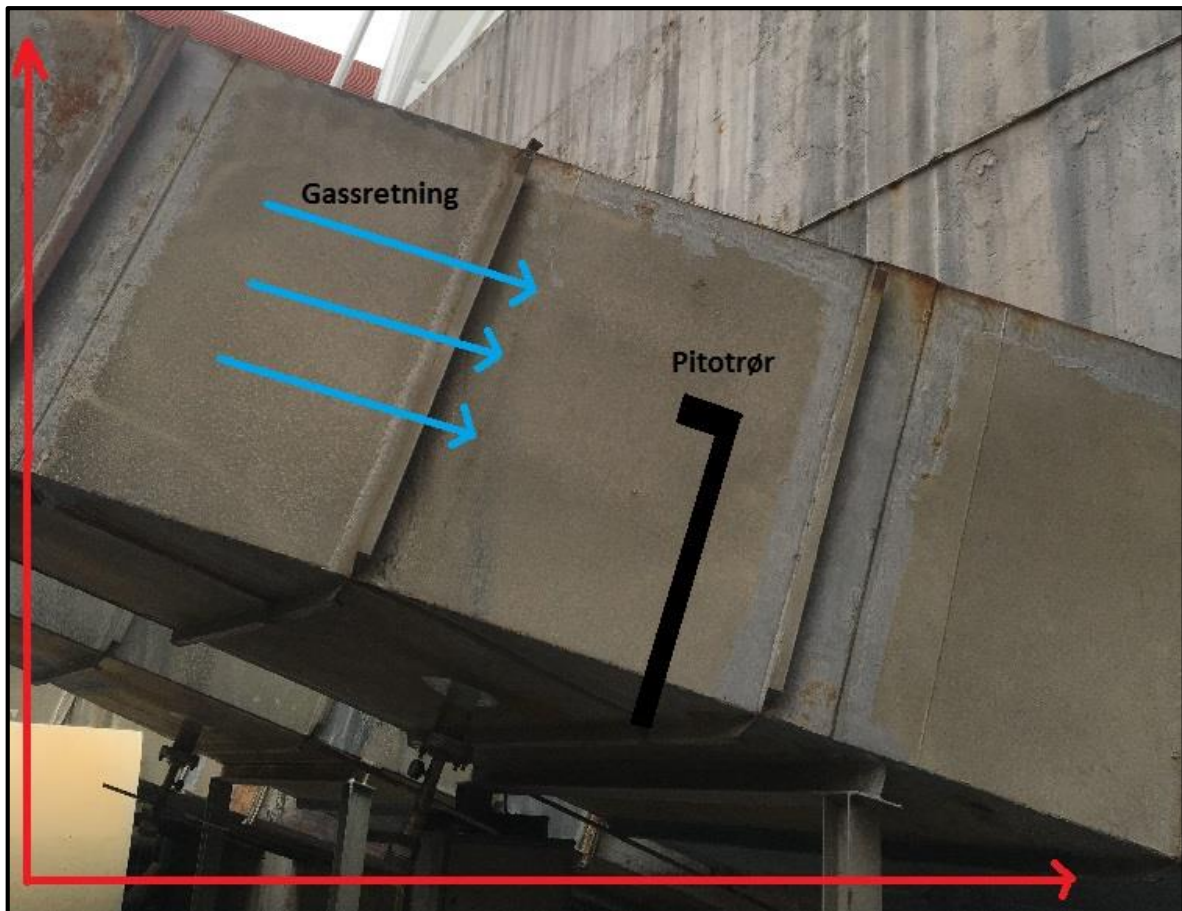
At pitotrøret befant seg bak et stag ble oppdaget ganske fort ved at trykket i punktet droppet ned mot 0 og hastigheten ble betydelig lavere.

For å kunne kartlegge hastighetsprofilen til gassen på best mulig måte var det viktig å få tilstrekkelig med målinger. På grunnlag av dette ble det sammen med intern og ekstern veileder bestemt at noen av målepunktene kunne flyttes litt (langs y-aksen) i forhold til det opprinnelige punktet, slik at pitotrøret ikke lenger var plassert rett bak et stag. Dette fungerte noen steder, men der hvor staget sto vertikalt i kanalen var det vanskelig å få målinger uten påvirkning fra stagene. Ved noen punkter var påvirkningen så stor at målingen i punktet måtte forkastes. Mer om dette kommer i avsnitt 5.2.3.



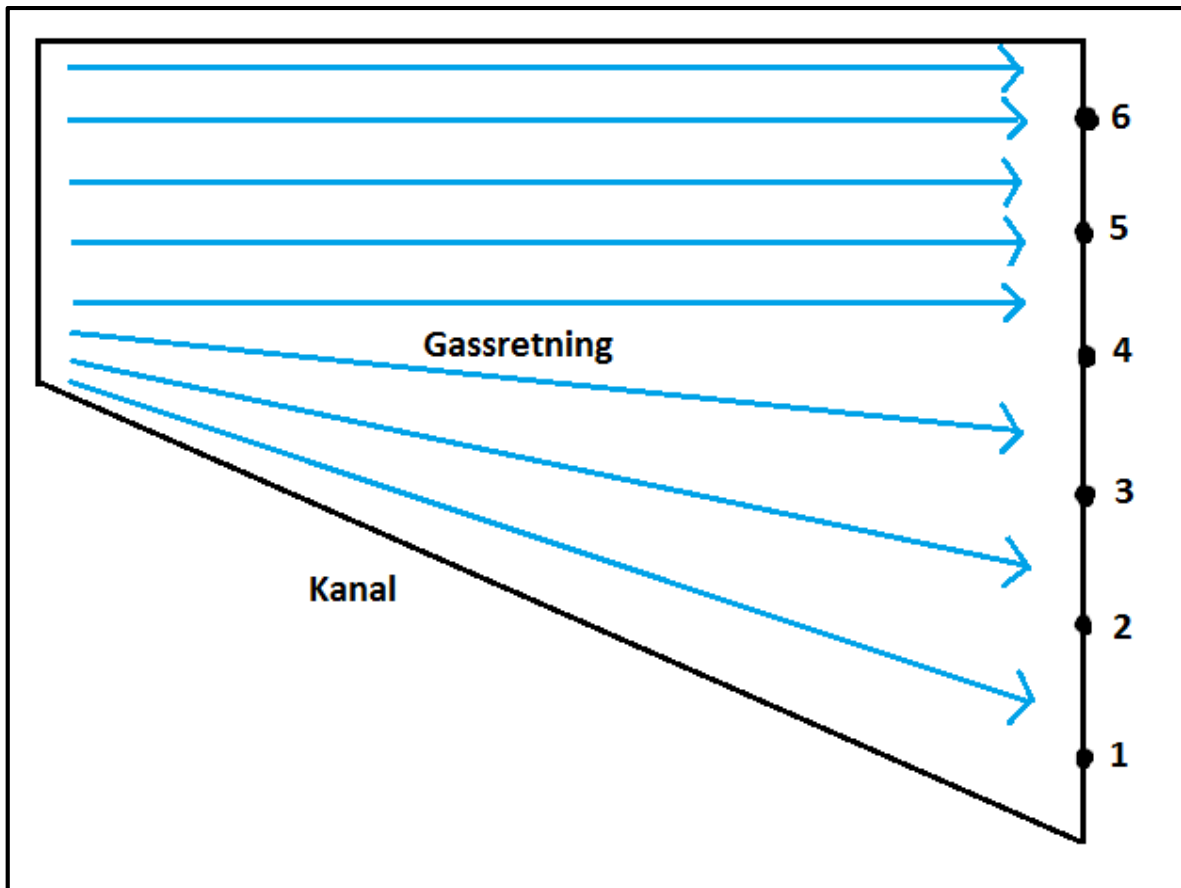
Figur 5-10: Kanalen sett innen fra, pilene viser støttestagene

Siden kanalen hvor målingene skulle utføres har en helningsvinkel i forhold til grunnflaten, var det viktig at pitotrøret ble plassert inn i kanalen med samme vinkel. Dette var for at målingene skulle bli korrekte, ved at gassen som strømmer inn i pitotrøret ikke har en vinkel i forhold til gassretningen, som er et krav i standarden [3].



Figur 5-11: Viser helningen til kanalen i forhold til grunnflaten

I tillegg til helningsvinkelen i forhold til bakkenivå måtte også pitotrøret plasseres riktig i forhold til gassens strømningsretning. Som man kan se på Figur 3-3 side 8 er viften plassert til venstre i kanalen, og derfra blir kanalen utvidet mot høyre (når man står bak viften og ser mot kanalen). Dette gjør at gassens strømningsretning er forskjellig i målepunkt 1 til 6, se Figur 5-12, og pitotrøret måtte plasseres mot strømningsretningen.



Figur 5-12: Gassens strømningsretning i kanalen

5.2.3 Vurdering av målingene

Etter alle målingene var utført ble de nøye evaluert. Målingene fra hvert enkelt punkt, 3 separate dager, ble sammenlignet for å vurdere om det var en sammenheng. Forskjellige målinger vil være en indikator på en ujevn hastighetsprofil i kanalen.

Det måtte også tas en vurdering på om noen av punktmålingene skulle slettes, da det var vanskelig å få korrekte målinger i alle punkt på grunn av stagene (ref. avsnitt 5.2.2). Sammen med intern og ekstern veileder ble det kommet frem til at noen av målingene ikke var representative for hastighetsprofilen til gassen, og skulle derfor ikke tas med. I de punktene målingen ble forkastet ble dette tatt hensyn til ved videre beregninger.

Resultatene av målingene finnes i Vedlegg 2, de målingene som ble forkastet er markert med rødt.

6. Optimalt prøvetakingspunkt

For å finne det optimale prøvetakingspunktet for partikulært materiale i avgass ble det utført hastighetsmålinger. Det ble opprettet en hastighetsprofil til gassen som strømmer i kanalen, og ut fra denne skulle det velges ut et punkt som representerer strømmingen i kanalen på best mulig måte. Punktet skulle da være representativt for måling av partikulært materiale.

Metoden for valg av optimalt prøvetakingspunkt ble utarbeidet av Hydro. Denne metoden dekker derimot ikke alle aspekter for utarbeiding av et optimalt punkt. Mer om dette kommer i kapittel 10.

Ut ifra de tre hastighetsmålingene som ble utført ble det funnet en gjennomsnittlig hastighet i hvert punkt, og fra disse ble det funnet en total gjennomsnittlig gasshastighet i hele kanalen.

Punkt 4.2 var det punktet hvor hastigheten var nærmest den gjennomsnittlige gasshastigheten i kanalen og dermed det punktet som representerer hastighetsprofilen til gassen på best mulig måte. På grunnlag av Hydros metode ble derfor dette punktet valgt som det optimale prøvetakingspunktet, et punkt som er representativt for måling av partikulært materiale i avgass.

Tabell 4: Hastighet

Gjennomsnittlig hastighet	Hastighet i punkt 4.2
$24,84 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$24,41 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Se Vedlegg 2 for alle verdiene fra hastighetsmålingene, og avsnitt 9.1 og Vedlegg 3 for nærmere beregninger.

7. Støvmålinger

Etter at pitotrørsmålingene var utført, og det optimale prøvetakingspunktet var funnet ble det gjennomført støvmålinger flere steder i kanalen. Det var for å påpeke hvor viktig isokinetisk prøvetaking ved måling av partikulært materiale er. Hvis prøvetakingen foregår over- eller under-isokinetisk vil den oppsamlede støvmengden bli veldig forskjellig fra støvmengden ved isokinetisk prøvetaking. Dette kan da føre til feilrapportering av støvutslipp. Isokinetisk prøvetaking er beskrevet i avsnitt 3.3.

Det ble bestemt at det skulle tas støvmålinger på 3 forskjellige steder i kanalen. Det ble målt i det utvalgte, optimale punktet. I tillegg ble det tatt støvmålinger i 2 punkt som befant seg i øvre og nedre sjikt av hastigheten i forhold til det optimale punktet.

Sammen med ekstern veileder ble det bestemt at prøvetakingen skulle tilpasses til den gjennomsnittlige hastigheten i kanalen. Siden punkt 4.2 er det optimale punktet basert på den gjennomsnittlige hastigheten, ble prøvetakingen innstilt etter dette punktet.

Støvmålingene i de tre forskjellige punktene ble gjennomført for å bevise viktigheten av isokinetisk prøvetaking. Etter teorien skulle prøvetakingen i punkt 2.2, som befinner seg i det nedre hastighetssjiktet, gi den høyeste støvvekten. Her er sugehastigheten fra pumpen høyere enn hastigheten i punktet, det vil da oppstå en slags «støvsuging». Prøvetakingen i punkt 6.2 skal etter teorien gi den minste støvvekten, da hastigheten i punktet er mye høyere enn sugehastigheten fra pumpen. Da oppstår det en situasjon hvor gasstrømmen unngår sonden (ref. avsnitt 3.3 og Figur 3-6 side 11).

Tabell 5: Hastigheten i de 3 utvalgte punktene for støvmåling

Punkt	Gass hastighet i punkt	Isokinetisk hastighet
4.2 - Optimalt punkt	24,41 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	17,0 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$
2.2 - Nedre sjikt	13,43 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	10,0 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$
6.1 - Øvre sjikt	38,41 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	26,3 $\frac{\text{l}}{\text{min}}$

Hastighetene i punktene er et gjennomsnitt av de 3 hastighetsmålingene som ble utført i kanalen. Disse er funnet ved hjelp av formel (1). Se Figur 5-3 side 23 for hvor de forskjellige punktene befinner seg i tverrsnittet.

7.1 Forberedelser

Da de tre punktene var valgt ut måtte prøvetakingen tilpasses slik at den ble isokinetisk i forhold til det optimale punktet. Isokinetisk prøvetaking er beskrevet i avsnitt 3.3.

Den isokinetiske strømningsraten ble beregnet til å være:

$$q_v = 16,9 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

Utrekningen vises i avsnitt 9.3.

Etter at den isokinetiske strømningsraten var beregnet, måtte pumpen stilles inn til de gitte forholdene. Det ble gjort ved at pumpen ble koblet til et gassur som registrerte hvor mye luft som gikk gjennom systemet. Pumpen ble startet og var på i 1 min før den ble stoppet igjen. Antall liter luft som var gått igjennom systemet kunne leses av på gassuret. På denne måten kjente man den leverte volumstrømmen til pumpen. For å stille inn riktig sugeshastighet på pumpen ble det brukt en innsnevringsskrue som regulerte hvor mye luft pumpen sugde gjennom systemet. Skruen ble strammet inn helt til pumpen leverte den isokinetiske volumstrømmen.

Etter at pumpen var riktig innstilt ble støvfilteret veid og plassert i filterholderen, som igjen ble montert på prøvetakingssonden som skulle plasseres i kanalen. Figur 7-1 på neste side viser sonden som er montert på filterholderen.

7.2 Utførelse av målingene

Da alt prøvetakingsutstyret var klargjort kunne støvmålingene begynne.

Prøvetakingssonden ble plassert i kanalen og koblet sammen med pumpen og gassuret. For at sonden skulle holde seg i posisjon ble den støttet opp av diverse skaft. Se Figur 7-2 på neste side for hvordan oppsettet så ut.

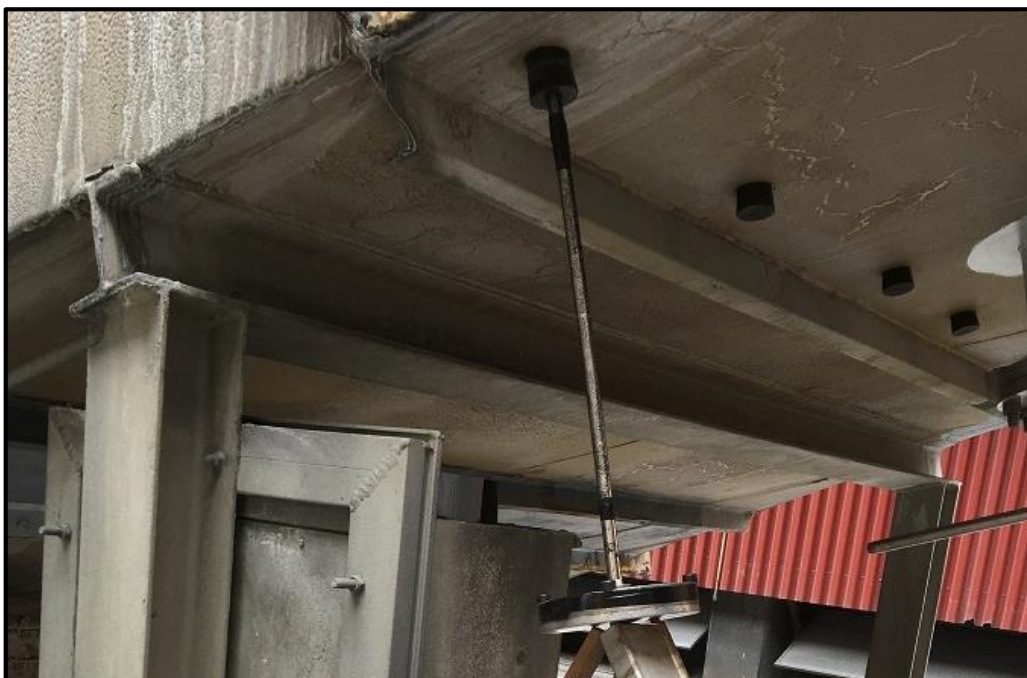
Kravene rundt selve prøvetakingen fra Tabell 1 ble fulgt så godt det lot seg gjøre. Det ble gjennomført en lekkasjetest av utstyret, den isokinetiske hastigheten til pumpen ble kontrollert, gassurstand og tidspunkt ble notert og deretter ble pumpen startet.

Denne klargjøringen ble gjentatt for hvert prøvetakingspunkt.

Kalibreringsfaktor K til gassur og barometertrykk under prøvetakingen:

$$K = 0,99$$

$$p_b = 1018 \text{ hPa}$$



Figur 7-1: Sonde og filterholder under prøvetaking



Figur 7-2: Alt utstyret montert og klar for støvmåling

7.3 Data og resultater

Etter at prøvetakingen var gjennomført i alle punktene ble utstyret demontert etter kravene fra standarden [2]. Resultatene fra veiing av filtrene og oppsamlet data under prøvetaking er oppgitt i Tabell 6, Tabell 7, Tabell 8 og Tabell 9.

Tabell 6: Støvvекter

Punkt nr:	Vekt før [mg]	Vekt etter [mg]	Støvvекt [mg]
4.2	4083,44	4096,94	13,5
6.1	4186,27	4192,59	6,32
2.2	4038,27	4082,27	44

Tabell 7: Måling 1, punkt 4.2

Gassurstand før [liter]	Gassurstand etter [liter]	Luft gjennom systemet [m ³]	Temperatur i gassur °C	Varighet prøvetaking [min]
14045	16485	2,44	13,7	149

Tabell 8: Måling 2, punkt 6.1

Gassurstand før [liter]	Gassurstand etter [liter]	Luft gjennom systemet [m ³]	Temperatur i gassur °C	Varighet prøvetaking [min]
16490	17975	1,485	13,4	86

Tabell 9: Måling 3, punkt 2.2

Gassurstand før [liter]	Gassurstand etter [liter]	Luft gjennom systemet [m ³]	Temperatur i gassur °C	Varighet prøvetaking [min]
17978	19488	1,51	13,4	87

Fra tabellene over ser man at det har gått forskjellige mengder luft gjennom systemet ved de 3 prøvetakingene, noe som har en påvirkning på hvor mye støv det er på filterne. Derfor må støvkonsentrasjonen finnes før det kan tas en beslutning på om teorien nevnt i begynnelsen av kapittelet faktisk stemmer.

Utregning av støvkonsentrasjon vises i avsnitt 9.4.

Tabell 10: Støvkonsentrasjoner

Punkt	Støvkonsentrasjon [mg/Nm^3]
4.2 – Isokinetisk	5,84
6.1 – Under - isokinetisk	4,48
2.2 – Over - isokinetisk	30,77

Som man ser ut fra støvkonsentrasjonene i Tabell 10 stemmer teorien om at resultatene ved over- og under-isokinetisk prøvetaking avviker i forhold til korrekt isokinetisk prøvetaking.

Dersom resultatene fra Tabell 10 var reelle målinger, og skulle rapporteres inn ville det blitt rapportert inn et resultat som avviker fra den korrekte verdien. Man ser at over – isokintesk prøvetaking er mest kritisk.

8. Feilkilder

Når målingene skal gjennomføres er det mye som skal tas hensyn til, tenkes på og vurderes. Standardene, [2] og [3], skal følges så godt det lar seg gjøre, og nøyaktighet er viktig for korrekte målinger. Men uansett hvor nøye standardene blir fulgt er det en risiko for at det oppstår feilkilder under planlegging, innsamling og bearbeiding av dataene. Feilkilder kan påvirke resultatenes pålitelighet og studiens konklusjon, derfor må de belyses [10].

I denne studien ble det gjennomført 2 type målinger, luftmengdemåling og støvmåling. Dette er 2 forskjellige målinger som allikevel har mye til felles, blant annet feilkilder.

Tabell 11: Feilkilder

Feilkilde	Hastighetsmåling	Støvmåling
Feil valg av prøvepunkt	X	X
Feil ved utregning av isokinetisk hastighet		X
Feil vinkel på sonde/pitotrør i forhold til gassretning under måling	X	X
Feil på grunn av forstyrrende stag i kanalen	X	X
Knekk på slange hvor gassen strømmer gjennom	X	X
Instrument påvirket av magnetfeltet	X	
Sonde/pitotrør står ikke i ro under måling	X	X
Feil plassering av sonde/pitotrør under måling	X	X
Feil innstilt pumpehastighet		X
Feil innsamling og bearbeiding av data	X	X
Feil opparbeiding av prøvemateriell		X

9. Beregninger

I dette kapitlet blir alle beregninger som er gjort i løpet av oppgaven gjennomgått. Selv om utregningene er utført flere ganger, blir de kun vist en gang som et eksempel her.

9.1 Beregninger på grunnlag av målingene med pitotrør

Etter at hastighetsmålingene var gjennomført ble målingene overført til et Excel dokument slik at de kunne brukes i videre beregninger. Disse hastighetsmålingene finnes i Vedlegg 2. Fra de 3 målingene som ble gjort i de 30 målepunktene ble det regnet ut midlere hastighet basert på trykket for hvert punkt. Hvilken formel som ligger til grunn for utregningen av hastighet ved hjelp av Bernoulli's ligning blir vist i Vedlegg 1.

Eksempel: Midlere hastighet og trykk ut i fra de tre målingene i punkt 1.2

$$\bar{v} = \frac{(V_1 + V_2 + V_3)}{3} \quad (1)$$

Setter inn i (1)

$$\bar{v} = \frac{17,52 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 14,86 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 18,06 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3} = \mathbf{16,81 \text{ m/s}}$$

$$\bar{p} = \frac{(p_1 + p_2 + p_3)}{3} \quad (2)$$

Setter inn i (2)

$$\bar{p} = \frac{17,19 \text{ mmH}_2\text{O} + 11,9 \text{ mmH}_2\text{O} + 17,53 \text{ mmH}_2\text{O}}{3} = \mathbf{15,54 \text{ mmH}_2\text{O}}$$

Etter at disse beregningene var gjort kunne det velges ut hvilke punkter det skulle tas støvmålinger fra (ref. kapittel 6 og 7).

Utregning av total gjennomsnittlig hastighet på grunnlag av pitotrørsmålingene:

Tabell 12: Gjennomsnittlig hastighet ved de 3 utførte pitotrørsmålingene

Måling 1, 26.02.16	24,29 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Måling 2, 03.03.16	26,07 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Måling 3, 08.03.16	24,18 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Total gjennomsnittlig hastighet:

$$\bar{V}_{total} = 24,29 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 26,07 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 24,18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\bar{V}_{total} = 24,84 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dette resultatet finnes igjen i Vedlegg 2.

9.2 Reynolds tall

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_h}{\nu} \quad (3)$$

$$d_h = \frac{4 \cdot L \cdot H}{2 \cdot (L + H)} \quad (4)$$
$$d_h = \frac{4 \cdot 2375 \text{ mm} \cdot 1620 \text{ mm}}{2 \cdot (2375 \text{ mm} + 1620 \text{ mm})} = 1,926 \text{ m}$$

Setter inn i (4)

$$d_h = \frac{4 \cdot 2375 \text{ mm} \cdot 1620 \text{ mm}}{2 \cdot (2375 \text{ mm} + 1620 \text{ mm})} = 1,926 \text{ m}$$

Hastigheten er hentet fra Vedlegg 3

$$V = 24,72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tabell 13: Fysiske egenskaper til luft ved standard atmosfærisk trykk:

Temperatur	Tetthet, ρ	Absolutt viskositet, μ	Kinematisk viskositet, ν
80[°C]	1,000 $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	20,9 $\left[10^{-6} \cdot \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}\right]$	20,9 $\left[10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$

[8]

Ser ut ifra Tabell 13 at absolutt viskositet og kinematisk viskositet er lik for luft ved 80°C.

Se avsnitt 3.4 for forklaring på hvorfor temperaturen er valgt til 80°C.

Innsatt i (3)

$$\text{Re} = \frac{24,72 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1,926 \text{ m}}{20,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$\text{Re} = 2278025 = 2,28 \cdot 10^6$$

Dette resultatet finnes igjen i Vedlegg 3. De to resultatene er derimot ikke helt like på grunn av ulik bruk av formelen, men begge resultatene er så høye at dette har ingen betydning. Reynolds tall sier noe om strømmingen i røret, og i dette tilfellet er Reynolds tall så høyt at strømmingen uansett er turbulent.

9.3 Utregning av isokinetisk hastighet

For å vite hvor stor sugehastighet pumpen skulle være innstilt på måtte volumstrømmen regnes ut. Hastigheten som er brukt er regnet ut ved hjelp av formel (19), det også tatt hensyn til temperatur og trykk i kanal, og ikke ved bruk av den forenklete Bernoullis ligning som ble presentert i databladet til pitotrøret (ref. Vedlegg 1).

$$q_v = V \cdot A \tag{5}$$

I tillegg til hastighet og areal må barometertrykket og temperaturen i gassuret tas hensyn til når volumstrømmen regnes ut.

$$q_v = \frac{V \cdot \pi \cdot D_{dyse}^2 \cdot T_{gassur} \cdot p_{barometer}}{4 \cdot T_{gass} \cdot (p_{Barometer} + p_{gassur})} \quad (6)$$

Utregning av isokinetisk hastighet i punkt 4.2, innsatt i (6)

$$q_v = \frac{24,89 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \pi \cdot (0,006 \text{ m})^2 \cdot (273 + 82)\text{K} \cdot 1009 \text{ hPa}}{4 \cdot (273 + 13,7)\text{K} \cdot (1009 + 1016)\text{hPa}} = 2,832 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$q_v = 17 \frac{\text{l}}{\text{min}} = 1,02 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Dette resultatet finnes igjen i Vedlegg 2.

9.4 Støvkonsentrasjon

Omregning av volumet fra m³ til Nm³

$$Volum[\text{Nm}^3] = \frac{Volum [\text{m}^3] \cdot T_{normal} [\text{K}] \cdot p_{barometer} [\text{hPa}]}{T_{gass} [\text{K}] \cdot p_{normal} [\text{hPa}]} \cdot K \quad (7)$$

Eksempel måling 1, punkt 4.2, setter inn i (7):

$$Volum[\text{Nm}^3] = \frac{2,44 [\text{m}^3] \cdot 273 [\text{K}] \cdot 1018 [\text{hPa}]}{273 [\text{K}] \cdot 1013,25 [\text{hPa}]} \cdot 0,99$$

$$Volum = 2,31\text{Nm}^3$$

Støvkonsentrasjon:

$$\text{Støvkonsentrasjon} \left[\frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \right] = \frac{\text{Støvvekt}}{\text{Volum}} \quad (8)$$

Setter inn i (8)

$$\text{Støvkonsentrasjon} = \frac{13,5 \text{ mg}}{2,31 \text{ Nm}^3}$$

$$\text{Støvkonsentrasjon} = 5,84 \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3}$$

9.5 Utreget hastighet ved hjelp av Bernoulli's ligning

Se fullstendig utregning i Vedlegg 5.

Starter med Bernoulli's ligning på løftehøydeform

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (9)$$

Punkt 1 er åpningen som peker mot strømningsretningen. Punkt 2 er en åpning som peker normalt på strømningsretningen. Da vil:

$$V_1 = 0 \quad (10)$$

$$V_2 = V \quad (11)$$

Grunnen til at hastigheten i punkt 1 vil være 0 er for i dette punktet vil fluidet lokalt stoppe opp foran åpningen som peker mot strømningsretningen til gassen. Fluidet stopper opp på grunn av at etter noen tid vil være fullt med fluid inne i pitotrøret. Utenfor den andre åpningen vil fluidet selvsagt bare strømme uhindret forbi åpningen, siden det ikke forsøker å strømme inn i den tilhørende kanalen inne i pitotrøret.

Antar at stagnasjonspunktet og målepunkt for statisk trykk, punkt 1 og 2, begge ligger i tilnærmet samme høyde slik at

$$\begin{aligned}z_1 &= z_2 \\z_1 - z_2 &= 0\end{aligned}\quad (13)$$

Antar at trykkforskjellen mellom de to punktene er så liten at

$$\begin{aligned}\gamma_1 &\approx \gamma_2 \\&= \gamma_{luft}\end{aligned}\quad (15)$$

Innsatt kjent verdi for tyngdens akselerasjon g , samt uttrykkene i (10), (11), (13), og (15) får vi:

$$V = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}}{\sqrt{\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{luft}} \cdot 1000 \text{ mm/m}}} \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]}\quad (17)$$

Forholdet $\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{luft}}$ er luftens relative tetthet ved den aktuelle temperaturen. Dersom vi brukes vanns tetthet ved 4 °C så er denne definert som

$$\rho_{H_2O_{T=4^\circ\text{C}}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\quad (18)$$

Uttrykket i (18) innsatt i (17) gir da

$$V = \frac{4,43 \sqrt{\text{m/s}}}{\sqrt{\rho_{luft} [\text{kg/m}^3] \text{ mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}}} \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]}\quad (19)$$

En rask dimensjonsanalyse viser oss at total enhet for V er m/s.

Morten Isaksen som har utarbeidet regnearket, Vedlegg 3, hvor formelen er lagt inn, tar også hensyn til gassens temperatur, normal temperatur og trykk. Setter man alt dette inn i formel (19) med utgangspunkt i verdiene fra punkt 1.1 i Vedlegg 3 får man:

$$V = \left(\frac{4,43}{\sqrt{\frac{1,293}{(273 + 82)} \cdot \frac{273}{760} \cdot 1009 \cdot 0,75}} \sqrt{16,22} \right) \text{ m/s}$$

$$V = 17,93 \text{ m/s}$$

Dette resultatet finnes igjen i Vedlegg 3.

10. Diskusjon og forslag til videre arbeid

Det optimale prøvetakingspunktet for måling av partikulært materiale i avgass er valgt til punkt 4.2 (ref. Figur 5-3). Dette punktet er valgt på grunnlag av hastighetsfordelingen til gassen. Punkt 4.2 er det punktet der gasshastigheten er mest lik den gjennomsnittlige gasshastigheten i kanalen, og vurderes derfor som det prøvetakingspunktet som gir mest korrekt støvmengde ved måling.

Denne studien har begrensninger i den grad at den ikke dekker alle aspekter for utarbeiding av et optimalt prøvetakingspunkt. Med bakgrunn i Hydros interne standard, som er utarbeidet og akseptert av alle Hydroverk i Norge, har arbeidet i denne studien fokusert på hastighetsprofilen til gassen. I henhold til etablerte standarder er dette en forenkling av en mer omfattende analyse. Hydro bruker denne forenklede metoden da kravene fra noen standarder er så omfattende at de ikke alltid lar seg gjennomføre på grunn av begrensninger i arbeidskapasitet og tilgjengelig utstyr (ref. avsnitt 4.2). Optimalisering av prøvetakingspunktet i denne studien er derfor lagt på et realistisk nivå som Hydro kan imøtekomme, og utførelsen av metoden er tilpasset den daglige arbeidshverdagen.

For ytterligere teoretisk optimalisering av prøvetakingspunktet som skal gi korrekte utslippstall for partikulært materiale, er en partikkelanalyse av partiklene i kanalen nødvendig. Partikkelstørrelse og -fordeling, samt partiklenes orientering i kanalen, må tas i betraktning dersom en skal være sikker på at partiklene som befinner seg i det valgte prøvepunktet representerer et gjennomsnitt av den totale mengden i kanalen.

Det som derimot er rikelig belyst, og utført på en teoretisk korrekt måte, er isokinetisk prøvetaking. Som beskrevet i kapittel 7 er isokinetisk prøvetaking svært viktig for korrekt prøvetaking. Da studien startet var det liten eller ingen kontroll på dette. Denne studien viser viktigheten av isokinetikk ved å sammenligne resultater fra tre støvmålinger med samme sugehastighet fra pumpen, men ulik gasshastighet i prøvetakingspunktene.

Resultatene fra målingene vises i Tabell 10 side 37. En kan se at de 3 målingene gir nok så forskjellige resultater.

Et optimalt prøvetakingspunkt er derfor ikke nødvendigvis godt nok for korrekt prøvetaking. Det anbefales at laboratoriet på HAK tar dette til betraktning når det skal foretas utslippsmålinger fra renseanleggene og alle andre utslippsmålinger, der samme teori er gjeldende. Sugehastigheten fra pumpen må alltid være den samme som hastigheten i prøvetakingspunktet.

Selv om den isokinetiske prøvetakingen er gjennomført på en teoretisk korrekt måte, er det vurdert i ettertid at fremgangsmåten for å bevise viktigheten med isokinetikk muligens burde vært gjennomført litt annerledes. I stedet for å ta støvmålinger med samme sugehastighet fra pumpen men ulik gasshastighet i prøvetakingspunktene, burde det vært tilpasset isokinetisk måling ved alle punktene. Deretter kunne støvkonsentrasjonen i de 3 punktene sammenlignes. Denne metoden ville fremhevet viktigheten av isokinetikk på en bedre og mer korrekt måte, da det ville bli tatt hensyn til at partiklene kan være ulikt fordelt i kanalen.

På grunn av tidsbegrensinger i studien kunne ikke støvmålingene utføres på ny, det anbefales derfor at laboratoriet på HAK bør vurdere å se nærmere på dette.

I tillegg til avvik fra isokinetisk prøvetaking, er det også andre krav i standarden [2] som ikke oppfylles ved laboratoriet på HAK. Enkelte av disse kravene er så omfattende at de ikke prioriteres (ref. avsnitt 2.5.1). Noen krav anbefales det derimot at laboratoriet bør etterstrebe å oppfylle. Antall koblinger på prøvetakingsutstyret bør holdes på et minimum for å redusere faren for lekkasje i systemet. Dersom det blir lekkasje vil dette føre til at «falsk luft» blir sugd inn istedenfor avgassen som tas prøve av, og resultatene vil bli påvirket. Pumpen som brukes under prøvetakingen bør ha en reguleringsventil for enkelt å kunne justere sugehastigheten, noe som er nødvendig for å kunne tilpasse isokinetisk prøvetaking.

11. Konklusjon

Det optimale prøvetakingspunktet for bestemmelse av partikulært materiale i avgass er valgt til å være punkt 4.2, (ref. Figur 5-3). Den gjennomsnittlige gasshastigheten i dette punktet, er hastigheten som er mest representativ i forhold til den gjennomsnittlige hastigheten i hele kanalen. Gasshastigheten i punkt 4.2 var også ganske stabil ved alle de 3 utførte målingene.

Punktet er optimalisert i henhold til Hydros metode for valg av optimalt prøvetakingspunkt. I tillegg til optimalisering av prøvepunktet viser studien viktigheten ved at isokinetisk tilstand er ivaretatt under prøvetaking, for å få mest mulig korrekte målinger. Det anbefales også at utstyret som brukes ved prøvetaking tilpasses enkelte av kravene beskrevet i standard NS-EN 13284-1 (ref. avsnitt 4.1) [2].

Denne studien representerer dokumentasjon på at prøvetakingspunktet for måling av partikulært materiale i avgass er optimalisert og at gode målerutiner er ivaretatt. Dersom laboratoriet ved HAK bruker det optimaliserte prøvetakingspunktet ved utslippsmålinger og utfører prøvetakingen under isokinetiske forhold med korrekt tilpasset utstyr, konkluderer denne studien med at utslippstallene er representative.

12. Referanser

- [1] Hydro Aluminium Karmøy, «Karmøy Metallverk,» 25.02.16. [Internett]. Available: <http://www.hydro.com/no/Hydro-i-Norge/Var-virksomhet/Her-finner-du-oss/Karmoy-Karmoy-Metallverk/>.
- [2] Standard Norge, «NS-EN 13284-1: Utslipp fra stasjonære kilder. Bestemmelse av lave støvkonsentrasjoner,» Standard Norge, Oslo, 2002.
- [3] ISO 3966, «ISO 3966: Measurement of fluid flow in closed conduits - Velocity area method using Pitot static tubes,» International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
- [4] B. Pedersen, «Pitotrør,» 4 Mars 2015. [Internett]. Available: <https://snl.no/pitotr%C3%B8r>.
- [5] R. Næss, «Luft og strømninger (SL serien nr. 6),» NTNU, Trondheim, 2005.
- [6] O. Rowshanaie, S. B. Mustapha, H. Rowshanale og M. Jadbaba, «Design and Setup the Sampling System to Modify and Reduce the Deposition in Sampling Fluid Pipe Lines by Reducing the Pressure Drop,» *Thermodynamics & Catalysis*, vol. 5, nr. 2, p. 3, 2014.
- [7] B. Gjevik, «Innføring i fluidmekanikk MEK 3230/4230,» Matematisk institutt, Oslo, 2009.
- [8] E. J. Finnemore og J. B. Franzini, *Fluid Mechanics*, New York: McGraw-Hill Higher Education, 2002.
- [9] A. Lund, *Termodynamikk og stømningslære*, Bergen: Fagbokforlaget Vigmostad og Bjørke, 2010.
- [10] K. Sander, «Feilkilder og usikkerhet ved resultatene,» 20.04.16. [Internett]. Available: <http://kunnskapssenteret.com/feilkilder-usikkerhet-ved-resultatene/>.

13. Vedlegg

13.1 Vedlegg 1

Datablad vedlagt pitotrøret som er brukt til hastighetsmålingene.



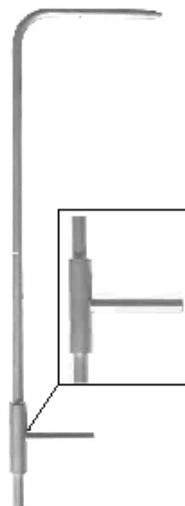
Technical Data Sheet

Pressure • Temperature • Humidity • Air Velocity • Airflow • Sound level

Pitot tube Type L

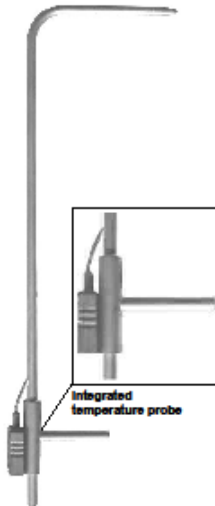


Pitot tube Type L



Pitot tube with ellipsoidal head.
An intake for total pressure and 6 holes for static pressure.
Body made of stainless steel.

Pitot tube Type L with TC K



Pitot tube with ellipsoidal head.
An intake for total pressure and 6 holes for static pressure.
Sheathed thermocouple K probe integrated, with connection cable length 1,5 m.
Body made of stainless steel.

■ Presentation

KIMO offers a wide range of high-quality and accurate **Pitot tubes**, as per the AFNOR NFX 10-112 norm.

These **Pitot tubes**, when being connected to a differential column / or needle / or electronic manometer, can measure the dynamic pressure of a moving fluid in a duct, and then can deduct its air velocity in m/s and its airflow in m³/h.

These **Pitot tubes** are used in HVAC field, vacuum cleaning and pneumatical transport. They are mainly dedicated to measure hot and particle-charged air, and also high air velocity.

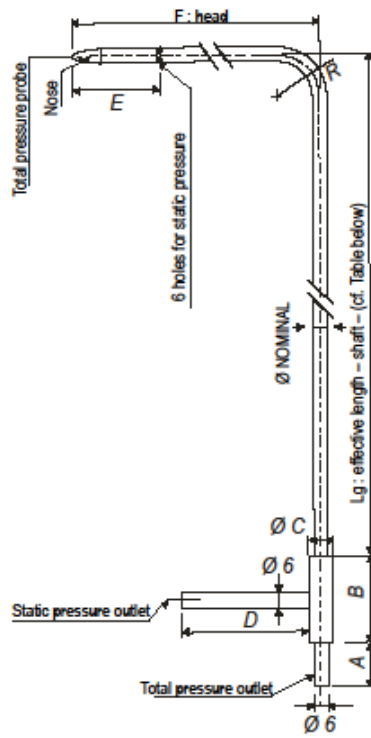
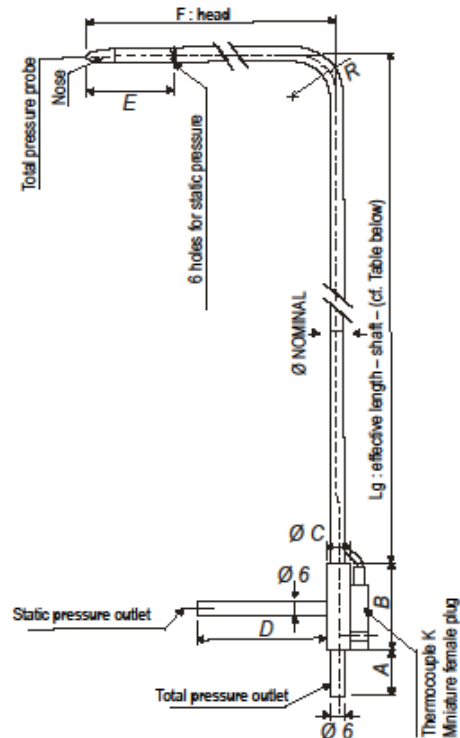
■ Features

Norm.	AFNOR NFX10-112. Annex 4 dated 14.9.77. This norm meets the requirements of the International Norm ISO 3966.
Model	NPL curved with ellipsoidal head
Coefficient	1,0015±0,01
Accuracy	Better than 1 %, for a ± 10 ° alignment to the fluid flow.
Quality	stainless steel 316 L
Operating temperature.	from 0 to 600 °C in standard and up to 1000 °C in option (except Ø 3 mm).



- The extent error of an air velocity or airflow measurement with a KIMO Pitot tube remains inferior to 2%, when being carried out as per the NFX10-112 norm.
- It is recommended to carry out a calibration of the Pitot tube, in order to determine its exact coefficient.



Dimensions

Pitot tube Type L

Pitot tube Type L with TC K

	A	B	Ø C	D	E	F	R
Pitot tube Ø 3 mm	17	32	10	30	25	48	9
Pitot tube Ø 6 mm	25	40	10	45	48	96	18
Pitot tube Ø 8 mm	25	40	10	45	64	128	24
Pitot tube Ø 12 mm	25	50	16	60	96	192	36
Pitot tube Ø 14 mm	25	50	16	60	112	224	42

Ranges
Pitot tube Type L

Diameter	Reference	Length
Ø 3 mm	TPL-03-100	100 mm
	TPL-03-200	200 mm
	TPL-03-300	300 mm
Ø 6 mm	TPL-06-300	300mm
	TPL-06-500	500 mm
	TPL-06-800	800 mm
Ø 8 mm	TPL-08-1000	1000 mm
	TPL-08-1250	1250 mm
Ø 12 mm	TPL-12-1500	1500 mm
	TPL-12-2000	2000 mm
Ø 14 mm	TPL-14-2500	2500 mm
	TPL-14-3000	3000 mm

Pitot tube Type L with TC K

Diameter	Reference	Length
Ø 3 mm	TPL-03-100-T	100 mm
	TPL-03-200-T	200 mm
	TPL-03-300-T	300 mm
Ø 6 mm	TPL-06-300-T	300 mm
	TPL-06-500-T	500 mm
	TPL-06-800-T	800 mm
Ø 8 mm	TPL-08-1000-T	1000 mm
	TPL-08-1250-T	1250 mm
Ø 12 mm	TPL-12-1500-T	1500 mm
	TPL-12-2000-T	2000 mm
Ø 14 mm	TPL-14-2500-T	2500 mm
	TPL-14-3000-T	3000 mm

Operating

The **Pitot tube** must be introduced perpendicularly into the duct, in several points pre-determined (see table "location of measuring points").

The head (ending with an ellipsoidal nose) must be maintained parallel and facing the flow.

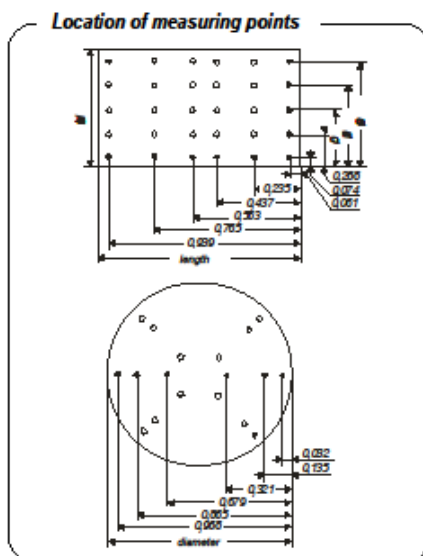
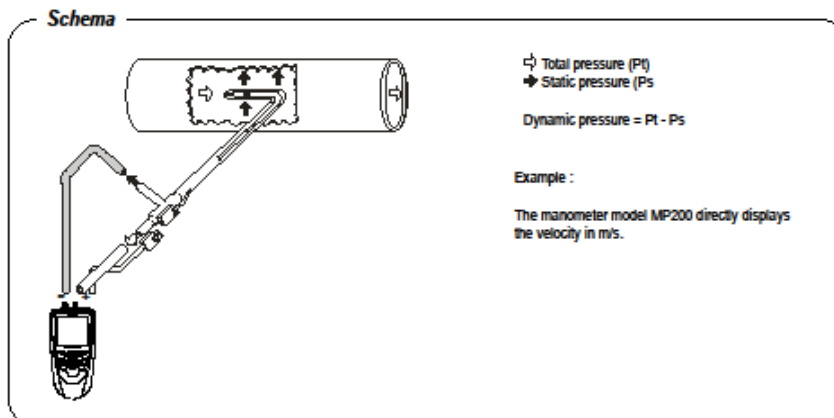
The total pressure (+) caught by the nose, is connected to the + of the manometer

The static pressure (-) caught by the holes of the head, is connected to the - of the manometer.

The connection cable of the thermocouple K probe is connected to the thermocouple K inlet of the manometer (only on the **Pitot type I with TC K**).

Then, the instrument can display the dynamic pressure, also named "velocity pressure".

The dynamic pressure corresponds to the difference between the total pressure and the static pressure : $P_d = P_t - P_s$



With the dynamic pressure in mm H₂O or in Pa, we can calculate the air velocity in m/s, with the simplified BERNOULLI formula :

$$V \text{ in m/s à } 20 \text{ °C} : 1,291 \sqrt{P_d \text{ in Pa}}$$

or

$$V \text{ in m/s} : 4,05 \sqrt{\Delta P \text{ en mm CE}}$$

Formula to get the velocity, with temperature balancing of the airflow :

$$V \text{ in m/s} = K \times \sqrt{\frac{574,2 \theta + 156842,77}{P_0} \times \Delta P \text{ in Pa}}$$

With

P_0 = barometric pressure in Pa

θ = temperature in °C

K = coefficient of the Pitot tube

■ **Accessories**

- Connection glands made of nickel plated brass (to install the Pitot tube in a fixed location)



- Clamp made of stainless steel and cast iron



- Sliding connections with nipple, made of stainless steel or Teflon

- Extension cable for thermocouple K class 1 :

- Rubber sealing caps : come in a 10-unit bag

- Caps : come in a 10-unit bag

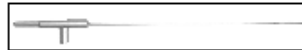
- Graduation (mm) red-marked on the shaft

- Tubes



- Straight **Pitot tube type L** and **type L with TC K** :
You can directly make the measurements by plunging this tube into the air duct.

Diameters and dimensions : same as the **Pitot tube** NPL curved.



Feel free to contact KIMO for any special case, any special manufacturing.

P'Range - Pitot-tube-L - 03/05 B - RCS (24) Péligueux B349 282 095 Non-contractual document - We reserve the right to modify the characteristics of our products without prior notice.

www.kimo.fr
EXPORT DEPARTMENT
 Tel : +33.1.60.06.69.29 - Fax : +33.1.60.06.69.29
 e-mail : export@kimo.fr

Distributed by :



13.2 Vedlegg 2

Hastighetsmålinger

Verdier markert med rødt, er verdier som ikke er tatt med i beregningene

Test ID:	10
Test Abbreviation:	K3030316
Start Date:	03.03.2016
Start Time:	14:24:54
Duration (dd:hh:mm:ss):	0:00:23:34
Log Interval (mm:ss):	00:10
Number of points:	30
Notes:	K3030316

Reading Type	Actual
Temperature	TC1

Statistics				
Channel:	Pitot Vel	P	BP	TC1
Units:	m/s	mmH2O	hPa	deg C
Average:	24,41	35,14	1003,98	81,2
Minimum:	9,86	6,19	1001,3	78,1
Time of Minimum:	14:40:14	14:26:57	14:46:54	14:25:04
Date of Minimum:	03.03.2016	03.03.2016	03.03.2016	03.03.2016
Maximum:	42,23	90,86	1005,3	85,2
Time of Maximum:	14:42:05	14:42:05	14:25:04	14:48:28
Date of Maximum:	03.03.2016	03.03.2016	03.03.2016	03.03.2016
Calibration	Meter:	05.05.2015		
Calibration	Sensor:			
	Cal. Date			

Date	Time	Pitot Vel	P	BP	TC1	Punkt nr
dd.MM.yyyy	hh:mm:ss	m/s	mmH2O	hPa	deg C	
03.03.2016	14:25:04	16,46	15,14	1005,3	78,1	1.1
03.03.2016	14:25:47	17,52	17,19	1004,9	78,9	1.2
03.03.2016	14:26:57	10,18	6,19	1004,9	79,5	1.3
03.03.2016	14:28:18	11,47	8,48	1004,9	79,7	1.4
03.03.2016	14:28:49	27,06	37,53	1004,8	79,9	1.5
03.03.2016	14:30:25	25,12	33,59	1005	79,6	2.1
03.03.2016	14:30:53	14,12	11,53	1004,9	80,1	2.2
03.03.2016	14:31:24	23,65	28,64	1004,7	80,4	2.3
03.03.2016	14:32:17	11,95	9,01	1004,5	80,7	2.4
03.03.2016	14:32:47	30,57	47,41	1004,9	80,9	2.5
03.03.2016	14:34:20	33,19	56,11	1004,4	80,3	3.1
03.03.2016	14:34:43	27,21	40,09	1004,3	80,9	3.2
03.03.2016	14:35:40	13,4	12,6	1004,3	81,6	3.3
03.03.2016	14:36:45	10,99	9,16	1004,4	81,8	3.4
03.03.2016	14:37:13	25,61	33,96	1004,3	81,8	3.5
03.03.2016	14:38:58	30,06	47,01	1004,4	80,4	4.1
03.03.2016	14:39:23	26,87	37,41	1004,2	81,2	4.2
03.03.2016	14:40:14	9,86	8,13	1004,4	81,8	4.3
03.03.2016	14:40:47	14,37	12,82	1004,2	81,9	4.4
03.03.2016	14:41:18	33,8	58,05	1004,6	82	4.5
03.03.2016	14:42:05	42,23	90,86	1003,7	78,6	5.1
03.03.2016	14:42:29	29,31	46,56	1003,4	80,6	5.2
03.03.2016	14:43:33	14,9	14,26	1003,6	81,9	5.3
03.03.2016	14:44:25	20,89	23,78	1003,5	82,1	5.4
03.03.2016	14:44:56	23,2	29,24	1004,2	82	5.5
03.03.2016	14:46:08	38,28	73,89	1002,1	81,8	6.1
03.03.2016	14:46:54	27,29	40,83	1001,3	84,1	6.2
03.03.2016	14:47:27	24,41	30,84	1001,9	84,8	6.3
03.03.2016	14:47:57	21,41	25,79	1002,1	85	6.4
03.03.2016	14:48:28	38,06	72,54	1002,4	85,2	6.5
Gjennomsnitt		26,07	38,54	1003,88	81,35	

Test ID:	11
Test Abbreviation:	K3080316
Start Date:	08.03.2016
Start Time:	14:01:49
Duration (dd:hh:mm:ss):	0:00:27:35
Log Interval (mm:ss):	00:10
Number of points:	30
Notes:	K3080316
Reading Type	Actual
Temperature	TC1

Statistics				
Channel:	Pitot Vel	P	BP	TC1
Units:	m/s	mmH2O	hPa	deg C
Average:	23,16	31,52	1011,2	82,67
Minimum:	1,74	1,09	1010,3	79,4
Time of Minimum:	14:17:32	14:17:32	14:28:04	14:01:59
Date of Minimum:	08.03.2016	08.03.2016	08.03.2016	08.03.2016
Maximum:	37,76	72,2	1012,2	83,9
Time of Maximum:	14:23:16	14:23:16	14:01:59	14:26:01
Date of Maximum:	08.03.2016	08.03.2016	08.03.2016	08.03.2016
Calibration	Meter:	05.05.2015		
Calibration	Sensor:			
	Cal. Date			

Date	Time	Pitot Vel	P	BP	TC1	Punkt nr
dd.MM.yyyy	hh:mm:ss	m/s	mmH2O	hPa	deg C	
08.03.2016	14:01:59	17,93	17,29	1012,2	79,4	1.1
08.03.2016	14:02:40	14,86	11,9	1012	79,9	1.2
08.03.2016	14:07:38	5,61	3,28	1012,2	80,9	1.3
08.03.2016	14:08:35	12,44	9,97	1011,5	81	1.4
08.03.2016	14:09:03	27,33	38,44	1011,5	81,2	1.5
08.03.2016	14:10:25	27,73	40,18	1011,8	81,5	2.1
08.03.2016	14:11:02	12,36	9,64	1011,6	81,9	2.2
08.03.2016	14:11:36	19,73	20,29	1011,6	82,3	2.3
08.03.2016	14:12:26	15,22	12,85	1011,4	82,2	2.4
08.03.2016	14:12:53	30,8	48,21	1011,4	82,4	2.5
08.03.2016	14:13:57	27,74	40,05	1011,4	81,9	3.1
08.03.2016	14:14:20	22,57	28,02	1011,3	82,7	3.2
08.03.2016	14:17:32	1,74	1,09	1011,2	83,7	3.3
08.03.2016	14:18:06	10,13	7,37	1011,4	83,7	3.4
08.03.2016	14:18:31	20,7	22,77	1011,1	83,7	3.5
08.03.2016	14:19:31	24,05	30,21	1011,1	83	4.1
08.03.2016	14:19:56	21,32	24,18	1010,9	83,6	4.2
08.03.2016	14:20:37	7,71	4,98	1011,1	83,8	4.3
08.03.2016	14:21:54	12,04	9,6	1011	83,8	4.4
08.03.2016	14:22:19	32,3	52,97	1011,5	83,8	4.5
08.03.2016	14:23:16	37,76	72,2	1010,8	82,9	5.1
08.03.2016	14:23:39	29,13	44,28	1010,4	83,5	5.2
08.03.2016	14:24:32	10,89	9	1010,7	83,9	5.3
08.03.2016	14:26:01	5,69	3,54	1011,3	83,9	5.4
08.03.2016	14:26:31	23,61	29,96	1011,1	83,7	5.5
08.03.2016	14:27:37	36,58	67,72	1010,8	83,3	6.1
08.03.2016	14:28:04	23,66	32,73	1010,3	83,7	6.2
08.03.2016	14:28:40	26,71	37,36	1010,8	83,8	6.3
08.03.2016	14:29:02	17,47	18,99	1010,7	83,9	6.4
08.03.2016	14:29:24	34,08	59,23	1011,1	83,7	6.5
Gjennomsnitt		24,18	33,45	1011,23	82,57	

Test ID:	32
Test Abbreviation:	K3260216
Start Date:	26.02.2016
Start Time:	11:21:37
Duration (dd:hh:mm:ss):	0:00:39:19
Log Interval (mm:ss):	00:10
Number of points:	31
Notes:	K3260216
Reading Type	Actual
Temperature	TC1

Statistics				
Channel:	Pitot Vel	P	BP	TC1
Units:	m/s	mmH2O	hPa	deg C
Average:	23,38	32,52	1013,34	83,42
Minimum:	5,25	3,44	1012,7	80,5
Time of Minimum:	11:42:43	11:42:43	11:52:42	11:38:13
Date of Minimum:	26.02.2016	26.02.2016	26.02.2016	26.02.2016
Maximum:	40,38	82,83	1014	85,6
Time of Maximum:	11:58:23	11:58:23	12:00:56	11:56:39
Date of Maximum:	26.02.2016	26.02.2016	26.02.2016	26.02.2016
Calibration	Meter:	05.05.2015		
Calibration	Sensor:			
	Cal. Date			

Date	Time	Pitot Vel	P	BP	TC1	Punkt nr
dd.MM.yyyy	hh:mm:ss	m/s	mmH2O	hPa	deg C	
26.02.2016	11:21:47	11,88	9,17	1013,7	80,9	1.1
26.02.2016	11:22:44	18,06	17,53	1013,4	81,9	1.2
26.02.2016	11:24:39	11,34	7,59	1013,4	82,2	1.3
26.02.2016	11:25:54	15,68	14,48	1012,9	81,6	1.4
26.02.2016	11:26:27	30,02	46,01	1013,1	82,1	1.5
26.02.2016	11:31:13	17,67	19,96	1013,3	80,5	2.1
26.02.2016	11:31:52	13,81	11,49	1013,2	81,7	2.2
26.02.2016	11:32:20	24,95	32,01	1013,4	82,3	2.3
26.02.2016	11:33:12	17,79	17,05	1013,1	82,8	2.4
26.02.2016	11:33:41	31,01	48,87	1013,3	83	2.5
26.02.2016	11:38:13	29,02	43,55	1013,3	80,5	3.1
26.02.2016	11:38:54	23,18	28,83	1013,2	82,2	3.2
26.02.2016	11:42:43	5,25	3,44	1013,3	84,7	3.3
26.02.2016	11:44:58	7,48	5,11	1013,4	85	3.4
26.02.2016	11:45:41	19,85	20,83	1013,6	85	3.5
26.02.2016	11:47:14	26	34,92	1013,4	83,6	4.1
26.02.2016	11:47:45	25,03	32,2	1013,5	84,6	4.2
26.02.2016	11:49:25	13,39	11,09	1013,6	85,4	4.3
26.02.2016	11:50:31	13,33	11,47	1013,6	85,5	4.4
26.02.2016	11:51:07	30,11	46,13	1013,8	85,5	4.5
26.02.2016	11:52:16	39,46	79,14	1013,1	83	5.1
26.02.2016	11:52:42	30,3	49,11	1012,7	84,5	5.2
26.02.2016	11:54:34	16,64	16,36	1013	85,5	5.3
26.02.2016	11:56:39	18,27	19,41	1013,2	85,6	5.4
26.02.2016	11:57:07	19,38	21,08	1013,2	85,4	5.5
26.02.2016	11:58:23	40,38	82,83	1013,5	83	6.1
26.02.2016	11:58:54	33,42	59,82	1012,7	84,3	6.2
26.02.2016	11:59:22	29,56	45,34	1013,6	84,6	6.3
26.02.2016	12:00:01	21,22	25,65	1013,7	84,8	6.4
26.02.2016	12:00:56	33,89	58,67	1014	83,8	6.5
Gjennomsnitt		24,29	34,38	1013,32	83,57	

Gjennomsnittverdier fra de 3 målingene			
Pitot Vel	P	BP	TC1
m/s	mmH2O	hPa	deg C
24,84	35,46	1009,48	82,49

		26.feb	03.mar	08.mar	Gj.snitt	
Øvre sjikt	6.1	40,38	38,28	36,58	38,41	m/s
Nedre sjikt	2.2	13,81	14,12	12,36	13,43	m/s
Valgt punkt	4.2	25,03	26,87	21,32	24,41	m/s

Gjennomsnitt av de 3 målingene i hvert punkt		
Punkt nr:	m/s	mmH2O
1.1	17,20	16,22
1.2	16,81	15,54
1.3	Ugyldig	Ugyldig
1.4	14,06	12,23
1.5	28,14	40,66
2.1	23,51	31,24
2.2	13,43	10,89
2.3	22,78	26,98
2.4	16,51	14,95
2.5	30,79	48,16
3.1	29,98	46,57
3.2	24,32	32,31
3.3	Ugyldig	Ugyldig
3.4	Ugyldig	Ugyldig
3.5	22,05	25,85
4.1	26,70	37,38
4.2	24,41	31,26
4.3	13,39	11,09
4.4	13,85	12,15
4.5	32,07	52,38
5.1	39,82	80,73
5.2	29,58	46,65
5.3	15,77	15,31
5.4	19,58	21,60
5.5	22,06	26,76
6.1	38,41	74,81
6.2	28,12	44,46
6.3	26,89	37,85
6.4	20,03	23,48
6.5	35,34	63,48

13.3 Vedlegg 3

Dette regnearket er utarbeidet av Morten Isaksen, Hydro PMT Porsgrunn.



Prosjekt: Bacheloroppgave

Anlegg: K3

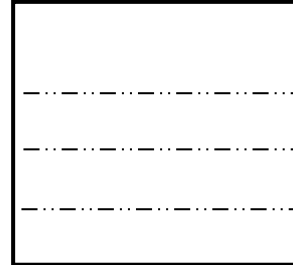
Prøvested: HAK

Dato: vår 16

PITOTRØRSMÅLING

Firkant kanal

Målepunkter 1-30



Målepkt.	Mpk. Kanal x-akse, m	Mpk. Kanal y-akse, m	Avlest mm H ₂ O	Hastighet m/sek.
1.1	2,23	0,12	16,22	17,93
1.2	2,23	0,47	15,54	17,55
1.3	2,23	0,81	Ugyldig	Ugyldig
1.4	2,23	1,15	12,23	15,57
1.5	2,23	1,50	40,66	28,39
2.1	1,82	0,12	31,24	24,89
2.2	1,82	0,47	10,89	14,69
2.3	1,82	0,81	26,98	23,13
2.4	1,82	1,15	14,95	17,21
2.5	1,82	1,50	48,16	30,90
3.1	1,34	0,12	46,57	30,38
3.2	1,34	0,47	32,31	25,31
3.3	1,34	0,81	Ugyldig	Ugyldig
3.4	1,34	1,15	Ugyldig	Ugyldig
3.5	1,34	1,50	25,85	22,64
4.1	1,04	0,12	37,38	27,22
4.2	1,04	0,47	31,26	24,89
4.3	1,04	0,81	11,09	14,83
4.4	1,04	1,15	12,15	15,52
4.5	1,04	1,50	52,38	32,22
5.1	0,56	0,12	80,73	40,00
5.2	0,56	0,47	46,65	30,41
5.3	0,56	0,81	15,31	17,42
5.4	0,56	1,15	21,60	20,69
5.5	0,56	1,50	26,76	23,03
6.1	0,15	0,12	74,81	38,51
6.2	0,15	0,47	44,46	29,69
6.3	0,15	0,81	37,85	27,39
6.4	0,15	1,15	23,48	21,57
6.5	0,15	1,50	63,48	35,47

Bredde:	2375 mm
Høyde:	1620 mm
Areal.....:	3,848 m ²
Barometer:	1009 mbarA
Gasstrykk:	0 mm H ₂ O
	0,00 mm Hg
Gasstemp.:	82 °C
Gassfuktighet:	0 % H ₂ O
Faktor	4,452135226
Sp.v. NTP	1,293 kg/m ³
Sp.v. reell:	0,995 kg/m ³
Reynolds tall:	2 255 946,66
Gasshast. (Gj.snitt):	24,72 m/s
Gassmengde:	328698 m ³ /h
	251775 Nm ³ /h



Valg av dyse og beregning av hastighet gjennom gassur

Anlegg: K3
Prøvested: HAK

Dato: vår 16

Målepunkt	Gass- hastighet m/sek.	Isokinetisk hastighet gjennom gassur	
		l/min.	m ³ /h
2.2	14,69	10,0	0,602
6.1	38,51	26,3	1,577
4.2	24,89	17,0	1,020

Barometer	1009 mbarA
Gasstemp. i kanal	82 °C
Trykk i kanal	0,00 mm Hg
Fuktighet	0 % H ₂ O
Gasshastighet	24,72 m/sek

Fyll ut antatte verdier for temperatur
og trykk i gassur:

Gasstemperatur i ur	13,7 °C
Trykk i ur	1016 mbarA

Velg dysediameter:	6 mm
Isokinetisk hastighet i ur (gj.snitt)	16,9 l/min

Beregningsformel:

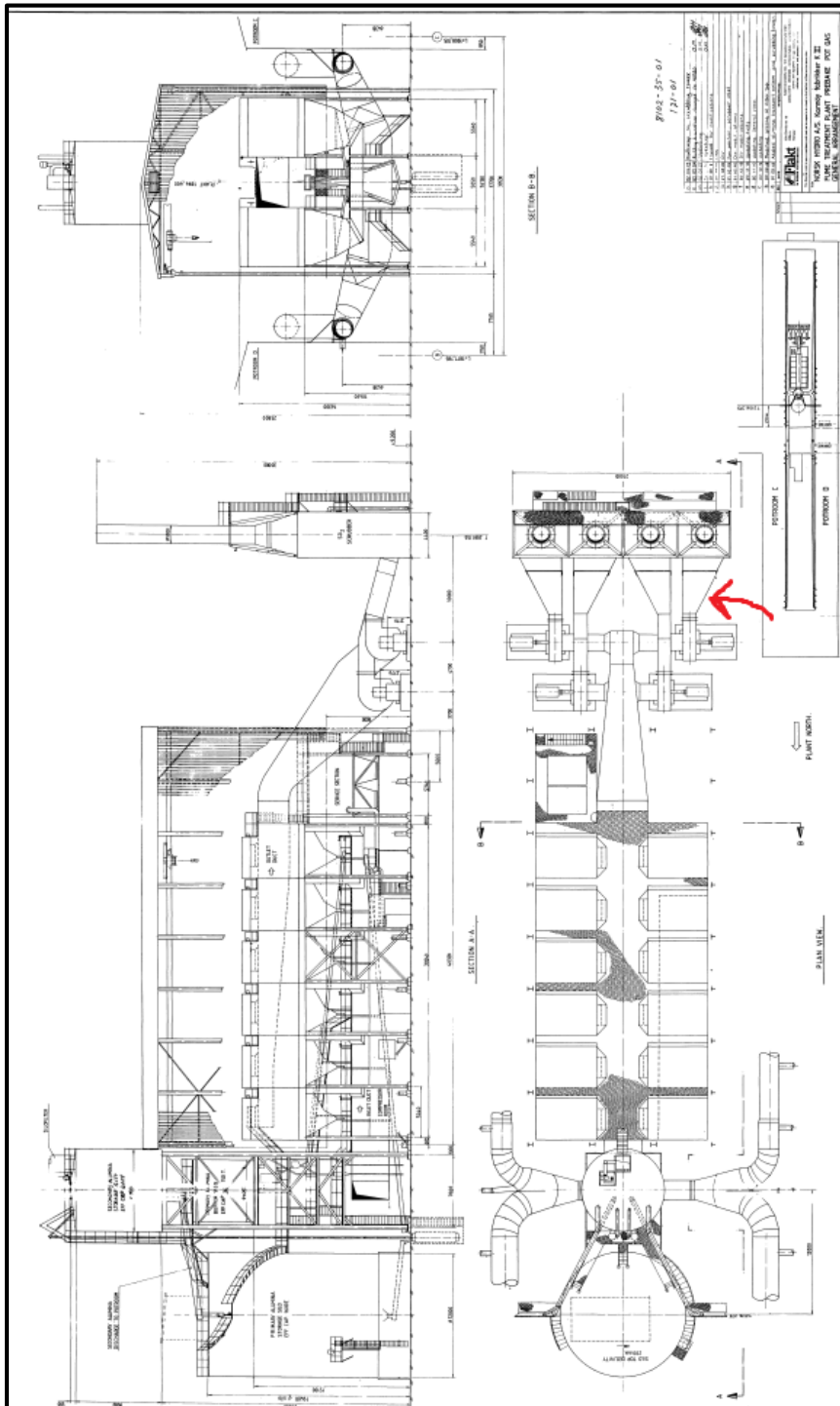
$$qd = (vk \cdot 3,1415927 \cdot d^2 \cdot 60 \cdot (273 + tu) \cdot (B + pk) \cdot (100 - W)) / (4 \cdot 1000 \cdot (273 + tk) \cdot (B + pu) \cdot 100)$$

qd	Gasshastighet i ur (l/min)
vk	Gasshastighet i kanal (m/sek)
d	Dysediameter (mm)
tu	Temperatur i ur (°C)
tk	Temperatur i kanal (°C)
pu	Trykk i ur (mm Hg)
pk	Trykk i kanal (mm Hg)
B	Barometerstand (mm Hg)
W	Volum % H ₂ O

mmHg = 0,7502 mbarA

13.4 Vedlegg 4

Oversiktstegninger/bilder av renseanlegg K3



Figur 13-1: Oversiktstegning K3



Figur 13-2: Oversiktsbilde av K3

Hentet fra <https://kommunekart.com/klient/Fonnakart/>

13.5 Vedlegg 5

Utleddning av V

Starter med Bernoulli's ligning på løftehøydeform

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma_2} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (9)$$

Tabell 14: Definisjoner fra Bernoulli's ligning

Symbol	Definisjon	Enhet
z_1	Fysisk høyde for punkt 1 relativt til et referansenivå	m
z_2	Fysisk høyde for punkt 2 relativt til det samme referansenivået som punkt 1	m
p_1	Trykkehøyde i punkt 1	mmH ₂ O
p_2	Trykkehøyde i punkt 2	mmH ₂ O
V_1	Fartshøyde i punkt 1	m/s
V_2	Fartshøyde i punkt 2	m/s

Punkt 1 er åpningen som peker mot strømningsretningen. Punkt 2 er en åpning som peker normalt på strømningsretningen. Da vil:

$$V_1 = 0 \quad (10)$$

$$V_2 = V \quad (11)$$

Dette er for fluidet vil lokalt stoppe opp foran åpningen pekende mot strømningsretningen fordi det etter noen tid vil være fullt med fluid inne i denne kanalen. Utenfor den andre åpningen vil fluidet selvsagt bare strømme uhindret forbi åpningen siden det ikke forsøker å strømme inn i den tilhørende kanalen.

Setter vi uttrykkene i (10) og (11) inn i (9) får vi:

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} + z_1 - z_2$$

$$V^2 = 2g \left(\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} + (z_1 - z_2) \right)$$

$$V = \sqrt{2g \left(\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} + (z_1 - z_2) \right)}$$

$$V = \sqrt{2g} \sqrt{\left(\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} + (z_1 - z_2) \right)} \quad (12)$$

Antar at stagnasjonspunktet og målepunkt for statisk trykk, punkt 1 og 2, begge ligger i tilnærmet samme høyde slik at

$$z_1 = z_2$$

$$z_1 - z_2 = 0 \quad (13)$$

Utrykket i (13) innsatt i (12) gir da

$$V = \sqrt{2g} \sqrt{\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} + (0)} = \sqrt{2g} \sqrt{\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2}}$$

$$V = \sqrt{2g} \sqrt{\frac{p_1}{\gamma_1} \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_{H_2O}} - \frac{p_2}{\gamma_2} \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_{H_2O}}}$$

$$V = \sqrt{2g} \sqrt{\frac{p_1}{\gamma_{H_2O}} \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_{H_2O}} \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_2}} \quad (14)$$

Dersom vi antar at trykkforskjellen mellom de to punktene er så liten at

$$\begin{aligned} \gamma_1 &\approx \gamma_2 \\ &= \gamma_{\text{luft}} \end{aligned} \quad (15)$$

Uttrykket i (15) innsatt i (14) gir da

$$\begin{aligned} V &= \sqrt{2g} \sqrt{\frac{p_1}{\gamma_{H_2O}} \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_{\text{luft}}} - \frac{p_2}{\gamma_{H_2O}} \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_{\text{luft}}}} = \sqrt{2g} \frac{\gamma_{H_2O}}{\gamma_{\text{luft}}} \sqrt{\frac{p_1}{\gamma_{H_2O}} - \frac{p_2}{\gamma_{H_2O}}} \\ V &= \sqrt{2g \frac{\rho_{H_2O} \cdot g}{\rho_{\text{luft}} \cdot g} \frac{1}{1000} \text{ m/mm} \cdot \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]}} \\ V &= \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{\text{luft}}} \cdot 1000 \text{ mm/m}}} \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]} \end{aligned} \quad (16)$$

Innsatt kjent verdi for tyngdens akselerasjon g i (16) gir

$$\begin{aligned} V &= \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}}{\sqrt{\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{\text{luft}}} \cdot 1000 \text{ mm/m}}} \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]} \\ V &= \frac{4,43 \sqrt{\text{m/s}}}{\sqrt{\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{\text{luft}}} \cdot 1000 \text{ mm/m}}} \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]} \end{aligned} \quad (17)$$

Forholdet $\frac{\rho_{H_2O}}{\rho_{luft}}$ er luftens relative tetthet ved den aktuelle temperaturen. Dersom vi brukes vanns tetthet ved $4^\circ C$ så er denne definert som

$$\rho_{H_2O_{T=4^\circ C}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (18)$$

Uttrykket i (18) innsatt i (17) gir da

$$V = \frac{4,43\sqrt{\text{m/s}}}{\sqrt{\frac{\rho_{luft}}{1000 \text{ kg/m}^3} 1000\text{mm/m}}} \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]}$$

$$V = \frac{4,43\sqrt{\text{m/s}}}{\sqrt{\rho_{luft} [\text{kg/m}^3] \text{mm} \cdot \text{m}^2/\text{kg}}} \sqrt{\Delta p [\text{mmH}_2\text{O}]} \quad (19)$$

En rask dimensjonsanalyse viser oss at total enhet for V er m/s.