

# Testing av luftmedrivning på flomløp Follsjødammen

**Karoline Mittet Brøste**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Kaspar Vatland Vereide, IBM

Medveileder: Leif Lia, IBM  
Kiflom Belete, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for bygg- og miljøteknikk





## MASTEROPPGÅVE

**Kandidat:** *KAROLINE MITTET BRØSTE*

**Tittel:** **TESTING AV LUFTMEDRIVING PÅ FLOMLØP FOLLSJØDAMMEN**

### 1 BAKGRUNN

Statkraft Region Midt-Norge undersøker for tida om flomløpskapasiteten på Follsjødammen i Trollheim kraftverk i Surnadal er tilfredsstillande. Dammen er ein 50 høg og 565 m lang steinfyllingsdam bygd i 1964 med tettingskjerne av morene og totalt magasinvolym er 180 mill m<sup>3</sup>. Flomløpet vart i si tid plassert rett med høgge vederlag og er utforma som eit «andenebb» med samla overløpslengde 120 m. Overløpsvatnet drenerast i ein hellande kanal som leiar inn mot sjakt og tunnel og utløp ned i opprinnleg elveløp.

Modellforsøka som vart utført for Flomløp Follsjødammen hausten 2016 viste at det var mogleg å få tilstrekkeleg kapasitet både for  $Q_{1000}$  og for  $Q_{PMF}$  med relativt enkle modifiseringar av eksisterande flomløp. Dei foreslåtte tiltaka med utviding av samlekanal, sjakt og utløp av tunnel vil mest sannsynleg bli gjennomført. I samband med forsøka er det funnen fleire forhold med modellforsøket, og modellforsøk generelt, som skaper uvisse i forsøk og konklusjonar. Dette er problemstillingar som dukkar opp i dei fleste liknande forsøk og som vanlegvis vert neglisjert med å legge resultatata på sikker side av det som vert funnen i laboratoriet. Det er derfor interessant å sjå meir nøye på fenomenen som kan få utslag på forholdet mellom kapasitet i laboratoriet og kapasitet i fullskala. Arbeidet er av vitenskapleg art og i prinsippet ikkje berre knytt til denne modellen.

### 2 HOVUDPUNKT I STUDIET

Hovuddelen av studiet vil no gå på å undersøke dei elementa i modellforsøket som kan ha innverknad på kapasitet og nøyaktighet. Flomberekningar, teikningar, revurdering og andre rapportar frå anlegget dannar grunnlag for arbeidet. Kandidaten kan nytte alt underlagsmateriale som Statkraft har tilgjengeleg i tillegg til alt materiale som vart produsert hausten 2016.

Oppgåva skal i hovudsak dekke:

1. Vurdering av nøyaktighet på modellforsøk utført 2016.
2. Vurdering og uttesting av korleis luftmeddriving påverkar resultatata.
3. Gjennomføre eventuelle justeringar av den fysiske modellen
4. Forslag til generelle råd for forhold i punkt 2.
5. Rapportering

Det er mange ulike forhold som påverkar luftmeddrivinga i eit flomløp som t.d. hastighet, overflateruhet, turbulens, geometri, ventilasjon m.m. Slike parametrar må undersøkast.

### **3 RETTLEIING, DATA OG INFORMASJON**

I. amanuensis II Kaspar Vereide vil vere rettleiar for oppgåva. Forskar Kiflom Belete og Professor Leif Lia vil vere medrettleiarar og assistere kandidaten i å få tilgang til relevant informasjon. Vassdragsteknisk ansvarlig VTA Ingebrigt Bævre vil vere kontaktperson i Statkraft.

Diskusjon med og bidrag frå kollegaer og medarbeidar på NTNU, NVE, rådgivane ingeniørfirma, Statkraft og andre kraftselskap er tilrådd. Bidrag som nyttast i oppgåva skal refererast.

### **4 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG LEVERING**

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5-format som .pdf i DAIM og trykkast i tre eksemplar som sendast direkte frå trykkeri til faglærer/institutt. Samandraget skal ikkje gå over meir enn 450 ord og skal vere eigna for elektronisk rapportering.

Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn den leveringsfristen som kjem fram i DAIM (20 veker + offentlege fridagar vårsemesteret).

Trondheim, 16. januar 2017

---

Leif Lia  
Professor

# Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en avslutning på den femårige sivilingeniørutdanningen ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU, våren 2017. Oppgaven er utført ved Institutt for bygg- og miljøteknikk, IBM, innen retningen Vassdragsteknikk.

Oppgavens hensikt er å bestemme hvor mye luft som trekkes ned i et lukket flomløp, med modell Follsjøen som utgangspunkt. Videre er det ønskelig å studere hvordan luftmedrivningen endres for ulik hastighet og for lavere ruhet.

Arbeidet med oppgaven har vært utfordrende og lærerikt, og jeg vil benytte anledningen til å takke for all hjelp og veiledning jeg har fått i arbeidet med oppgaven. Stor takk til min hovedveileder ved NTNU, Kaspar Vereide, for god veiledning og hjelp med faglige spørsmål og motivasjon underveis i oppgaven. Stor takk rettes også til Geir Tesaker og Leif Berntsen i Vassdragslaboratoriet for hjelp, innspill og gode løsninger. Takk rettes også til medveiledere ved NTNU, Leif Lia og Kiflom Belete.

Karoline Mittet Brøste  
Trondheim, juni 2017



# Sammendrag

Formålet med masteroppgaven har vært å studere luftmedrivning i modellen av det lukkede flomløpet ved dam Follsjøen i Rindal kommune. Modellen er opprinnelig bygget for et modellforsøk av flomavledningskapasiteten, men er nå tilgjengelig for undersøkelse av luftmedrivningen. Modellen er bygget i en skala på 1/40, ut fra Froudes modellov. Modellen er ikke lenger geometrisk lik prototypen, da utvidelser i modellen har vært nødvendig for å oppnå ønsket flomavledningskapasitet.

Det har i forbindelse med denne masteroppgaven blitt bygget en lufttett kasse over overløpet, for å oppnå et fullstendig lukket system, med kontroll av all luftmedrivning. Kassens innvirkning på systemet har blitt kontrollert ved hjelp av differensialtrykk og vannstandsmålinger i kasse og basseng. Kassens innvirkning er funnet til å være lav, maksimalt 23,82 mm differanse i vannstand og 0,56 mm i differensialtrykk.

Luftmedrivningen har blitt målt med en varmetrådsprobe i tre lufterør påmontert kasse, sjakt og overføringstunnel. Luftmedrivningen er undersøkt og sammenlignet for ulike vannhastigheter, ruheter og ulike punkt for lufttilgang. Vannhastigheten har blitt endret ved å variere vannføringen, og ruheten har blitt endret ved å variere antall innlimte lister i tunnel og sjakt. Målinger viser at luftmedrivningen i modellen øker for økende vannføring frem til 74,1 l/s, deretter avtar luftmedrivningen for en ytterligere økning i vannføring. Maksimal vannføring i forsøket er 138,8 l/s. Luftmedrivningen i modellen er betydelig større for en lavere ruhet ved samtlige vannføringer, og den største økningen i luftmedrivning for lavere ruhet er 4,7 l/s. Ved å variere hvor lufttilgangen gis i systemet ved å stenge eller åpne lufterørene på sjakt og overføringstunnel, kommer det frem at ulike luftepunkt gir ulik luftmedrivning i systemet, både i mengde og i område.

Maksimal luftmedrivning for systemet og luftmedrivning ved lukking av innløp har blitt undersøkt. Målingene viste at luftmedrivningen i modellen er størst mellom en vannføring på 74,1 og 79,1 l/s, og at innløpet lukkes ved 133,4 l/s. Et tydelig fall i luftmedrivning observeres ikke når innløpet dykkes. De målte verdiene i modellen lar seg ikke overføre direkte til prototype grunnet manglende skaleringslover for luft.





# Abstract

The purpose of this master thesis has been to study aeration in the model of the closed spillway at the Follsjøen dam in Rindal. The model is originally built for a model experiment of the flood discharge capacity, but is now available for examination of the aeration. The model is built in a scale of 1/40, according to the Froudes model law. The model, as it stands today, is no longer geometrically similar to the prototype, due to necessary expansions to fulfil the demands for flood discharge.

In connection with this master thesis, an air-tight box has been built over the overflow, to achieve a fully closed system, with control of the aeration. The box's impact on the system has been controlled by means of differential pressure and water level measurements inside and outside the box. The impact is found to be low, maximum 23.82 mm difference in water level and 0.56 mm in differential pressure.

The measurements of the aeration has been performed with a hot-wire probe in three air pipes mounted on the box, shaft and tunnel. The aeration has been examined and compared for different water velocities and roughness. The velocity of the water has been altered by changing the water flow, and the roughness has been reduced by removing glued rubber strips from the shaft and tunnel. Measurements show that the aeration increases for increased water flow in the model up to 74.1 l/s. For a further increase in water flow, the aeration decreases. The maximum water flow in the model test is 138.3 l/s. The aeration is measured larger in the model, for a lower roughness, for all water flows. When the roughness is decreased the biggest increase in aeration in the model is 4.7 l/s. By varying where the air supply is provided in the system, by closing or opening the air pipes on the shaft and transmission tunnel, it shows that different points of air supply provides different aeration in the system, both in amount and in area.

The maximum total aeration in the model has been measured, together with the aeration when the inlet submerges. The measurements show that the aeration is at its greatest in the model, for a water flow between 74.1 and 79.1 l/s. The inlet gets submerged for a water flow of 133.4 l/s, but a significant drop in the aeration isn't observed. The measured values in the model cannot be transferred directly to the prototype, because of the lack of scaling laws for air.



# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>INNLEDNING</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>FOLLSJØEN</b> .....	<b>5</b>
2.1	DAM FOLLSJØEN.....	5
2.2	MODELLFORSØK FLOMAVLEDNING.....	9
<b>3</b>	<b>TEORI</b> .....	<b>11</b>
3.1	LUFTINNBLANDING.....	11
3.2	LUFTTRANSPORT.....	17
3.3	SKRÅSJAKT.....	19
3.4	TUNNELER.....	22
3.5	SKALERING AV LUFT.....	22
3.6	KRAV OM MAKS 70 % VANNFYLT.....	27
<b>4</b>	<b>METODE</b> .....	<b>29</b>
4.1	LIKEDANNETHET.....	29
4.2	LABORATORIEMODELL.....	33
4.3	MÅLEMETODER.....	38
4.4	MODELLFORSØK LUFTMEDRIVNING.....	48
<b>5</b>	<b>RESULTATER</b> .....	<b>53</b>
5.1	DAGENS UTFORMING.....	53
5.2	LAVERE RUHET.....	58
<b>6</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>63</b>
6.1	DISKUSJON AV RESULTAT.....	63
6.2	KASSENS INNVIRKNING.....	70
6.3	MÅLENØYAKTIGHET OG ETTERPRØVBARHET.....	72
6.4	VURDERING AV MODELLFORSØK FLOMAVLEDNING.....	75
6.5	FEILKILDER.....	77
<b>7</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>79</b>
7.1	FORSLAG TIL VIDERE ARBEID.....	79
	<b>REFERANSER</b> .....	<b>81</b>
	<b>VEDLEGG</b> .....	<b>I</b>



# Symbolliste

A	areal, [m <sup>2</sup> ]
a	konstant, [-]
atm	atmosfæretrykk, [kPa]
C	luftinnhold, [%]
DFV	dimensjonerende flomvannstand, [moh]
d	diameter, [m]
Eu	lufttilgang
F	kraft, [kN]
f	ruhetskoeffisient, [-]
F <sub>r</sub>	Froudes tall, [-]
g	tyngdens akselerasjon, [m/s <sup>2</sup> ]
HRV	høyeste regulerte vannstand, [moh]
h	listetykkelse, [m]
I	fall, [-]
k	konstant, [-]
L	lengde, [m]
l	listelengde, [m]
LRV	laveste regulerte vannstand, [moh]
M	manningsfall, [m <sup>1/3</sup> /s]
moh	meter over havet
NTNU	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
p	trykk, [N/m <sup>2</sup> ]
PMF	påregnelig maksimal flomvannstand, [moh]
q	vannføring per lengdeenhet, [m <sup>3</sup> /s m]
Q	vannføring, [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>a</sub>	luftstrøm, [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>PMF</sub>	påregnelig maksimalflom, [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>dim</sub>	dimensjonerende flom, [m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>1000</sub>	sannsynlig tusenårsflom, [m <sup>3</sup> /s]
R	hydraulisk radius, [m]

$Re$	Reynolds tall, [-]
$T$	temperatur, [°C]
$Tu$	turbulens
$V$	volum, [m <sup>3</sup> ]
$v$	vannhastighet, [m/s]
$We$	Webers tall, [-]
$y$	vanndybde, [m]
$z$	væskeparameter
$\beta$	forholdstall, [-]
$\Delta$	endring, [-]
$\mu$	dynamisk viskositet, [N s/m <sup>2</sup> ]
$\rho$	densitet, [kg/m <sup>3</sup> ]

# 1 Innledning

Høsten 2016 ble kapasiteten til flomløpet ved dam Follsjøen undersøkt i Norges Hydrauliske Laboratorium (Vassdragslaboratoriet) ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), på oppdrag fra Statkraft. Nye og forhøyede flomberegninger utført av Multiconsult i 2010 ga usikkerhet i hvorvidt flomløpet hadde tilfredsstillende kapasitet til å håndtere de nye flomverdiene (Multiconsult, 2010). Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften) fastslår at flomløpet må håndtere både dimensjonerende flom, som for Follsjøen er tusenårsflom ( $Q_{1000}$ ), og påregnelig maksimal flom ( $Q_{PMF}$ ), uten bidrag fra andre avledningsmuligheter (Damsikkerhetsforskriften, 2009, §5-8). I modellforsøket for flomavledningskapasiteten ble det funnet at dagens flomløp håndterte  $Q_{1000}$ , men at flomløpet måtte utvides for å håndtere  $Q_{PMF}$  etter forskriftene. Dermed ble modellen utvidet til kravene for sikker flomavledning ble tilfredsstillt, og er derfor ikke lenger geometrisk lik prototypen.

Det kommersielle prosjektet for Follsjøen er avsluttet, men modellen med utførte modifiseringer, står fortsatt i Vassdragslaboratoriet. Follsjøen modell er derfor tilgjengelig for studering av luftmedrivning for denne masteroppgaven. Hensynet til luft ble ivaretatt i modellforsøket for flomavledning, ved at to luftesjakter ble montert på sjakt og tunnel for å sørge for at kapasiteten ikke overvurderes ved trykkstrømming. Det er ikke kjent hvorvidt en slik metode gir et korrekt resultat, men det er en vanlig metode benyttet for modellforsøk for å ta høyde for luftinnblanding.

Det er usikkerhet knyttet til luftens innvirkning på kapasiteten, og det tas derfor ofte ekstra høyde for nedsatt kapasitet i prototypen, som en følge av luftmedrivning. I denne oppgaven er det ønskelig å studere hvilken påvirkning luftmedrivning har på resultatene av modellforsøk og på hvilken måte luften lar seg måle i laboratoriet. Omfanget av luftmedrivningen i modellen, og hvordan luften kan skaleres til prototypen skal studeres. Videre skal det undersøkes i hvor stor grad vannets hastighet, vannvegens ruhet og ulike luftepunkt virker inn på luftmedrivningen. Resultatene av målinger utført i denne masteroppgaven skal benyttes til å utføre en vurdering av nøyaktigheten på modellforsøk utført høsten 2016.

For å måle luftmedrivningen har en kasse blitt bygget over overløpet. Kassen går utenfor overløpet og har et skjørt, slik at kassen alltid vil stå minst 10 mm ned i vannet. Når vannet stiger over terskelen vil dykkingen av kassen økes ytterligere. På toppen av kassen er det montert et rør med mulighet for to ulike diametere, henholdsvis 50 mm og 100 mm, hvor all luft inn i systemet måles med en varmetrårdsprobe. I tillegg er en differensialtrykkcelle montert på kassen, slik at differansen mellom trykket inne i og utenfor kassen kan måles. Det foretas også målinger av vannstand i bassenget og inne i kassen, og trykkmålinger i tunnelen. Luftmedrivningen måles også i to ekstra luftrør, et på sjakten og et på overføringstunnelen. Begge luftrørene kan tettes helt når målinger ikke foretas i rørene.

I oppgaveteksten er fem hovedpunkter listet opp for innholdet i masteroppgaven. I arbeidet med oppgaven har det kommet tydelig frem at det er vanskelig å skalere luft fra modell til prototype, og uten feltmålinger vil en vurdering av skalaeffekten vanskelig la seg gjøre. Det er dermed ikke mulig å gi fullgode svar på alle de opplistede punktene i oppgaveteksten, og masteroppgaven har derfor dreid seg mer om luftmedrivning kun i modell, og ulike faktorer som påvirker luftmedrivningen. I tillegg til punktene i oppgaveteksten har arbeidet i modellen omfattet vurdering av hvordan vannhastighet, ruhet og ulike luftepunkt påvirker resultatene, samt maksimal luftmedrivning, luftmedrivning når innløpet dykkes og differensiering mellom luftstrøm over vannflaten og luft innblandet i vannstrømmen. For å måle luftmedrivningen har en vurdering av ulike målemetoder også blitt gjennomført. I tillegg til at luftens innvirkning på resultater for flomavledningskapasiteten har blitt vurdert, har også faktiske målinger av luftmedrivningen blitt studert. Dermed vil en ny og oppdatert liste se ut slik:

1. Vurdering av nøyaktighet på modellforsøk utført 2016
2. Vurdering og uttesting av korleis luftmedrivning påverkar resultata
3. Gjennomføre eventuelle justeringar av den fysiske modellen
4. Forslag til generelle råd for forhold i punkt 2
5. Vurdere målemetoder for luftmedrivning
6. Utføre faktiske målinger av luftmedrivningen
7. Vurdere hvordan ulike luftepunkt påvirker luftmedrivningen
8. Rapportering



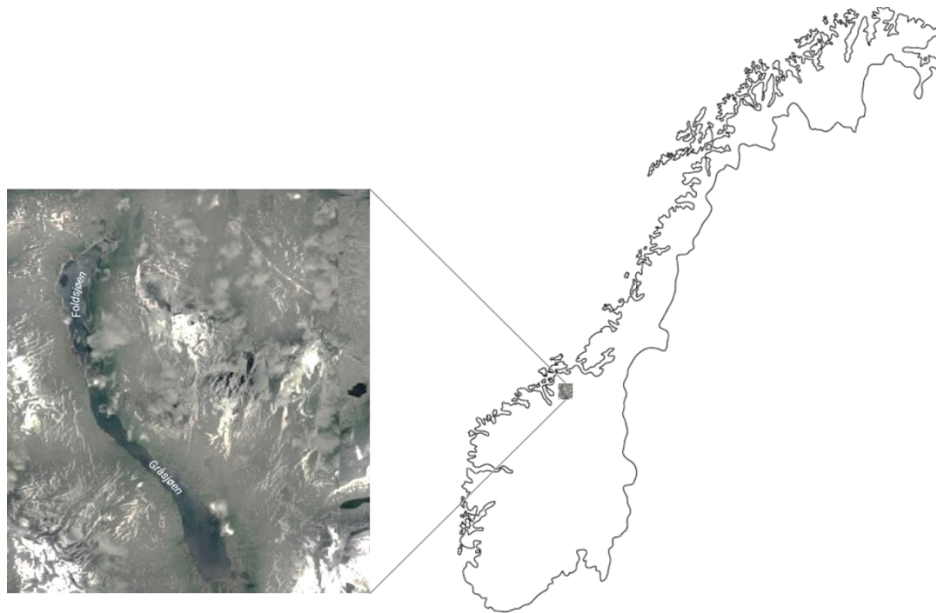
I masteren gjennomgås først dam Follsjøen, samt utførte modellforsøk for flomavledning, i kapittel 2. Deretter følger en teoridel i kapittel 3, hvor tofasestrømning mellom luft og vann gjennomgås. I kapittel 4 kommer en gjennomgang av modellover, en beskrivelse av modellen og metodene for målinger og innsamling av resultater. I kapittel 5 presenteres kort resultater fra gjennomførte forsøk. Diskusjon rundt resultatene foregår i kapittel 6, og konklusjonen av forsøkene og forslag til videre arbeid kommer i kapittel 7.



## 2 Follsjøen

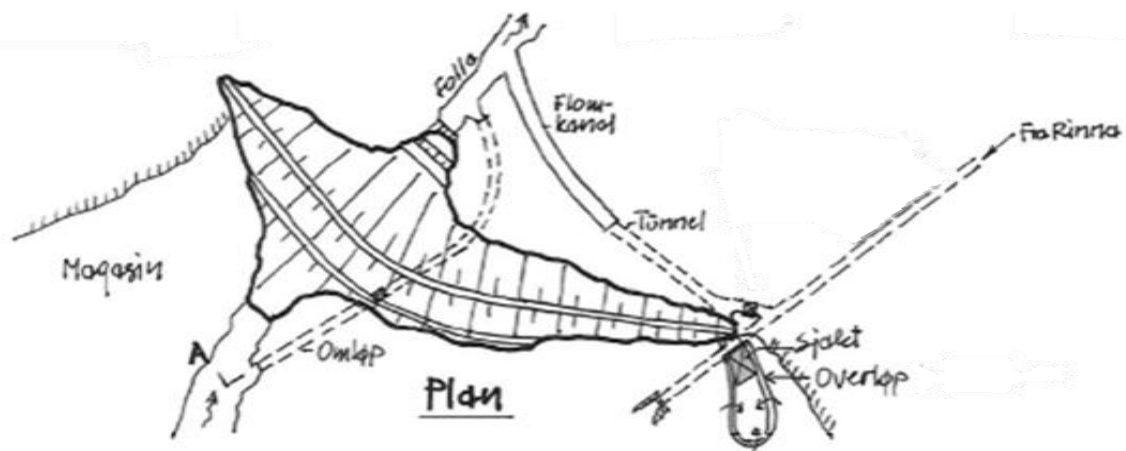
### 2.1 Dam Follsjøen

Dam Follsjøen eies av Statkraft region Midt-Norge og forsyner Trollheim kraftverk med vann. Follsjøen ligger i utkanten av Trollheimen i Rindal kommune i Møre og Romsdal fylke. Lokaliseringen vises i figur 2-1.



Figur 2-1 Lokalisering Follsjøen magasin

Follsjødammen er en steinfyllingsdam med en tetningskjerne av morene. Figur 2-2 viser en plantegning av dammen og flomløpet.



Figur 2-2 Prinsippskisse dam Follsjøen, Statkraft

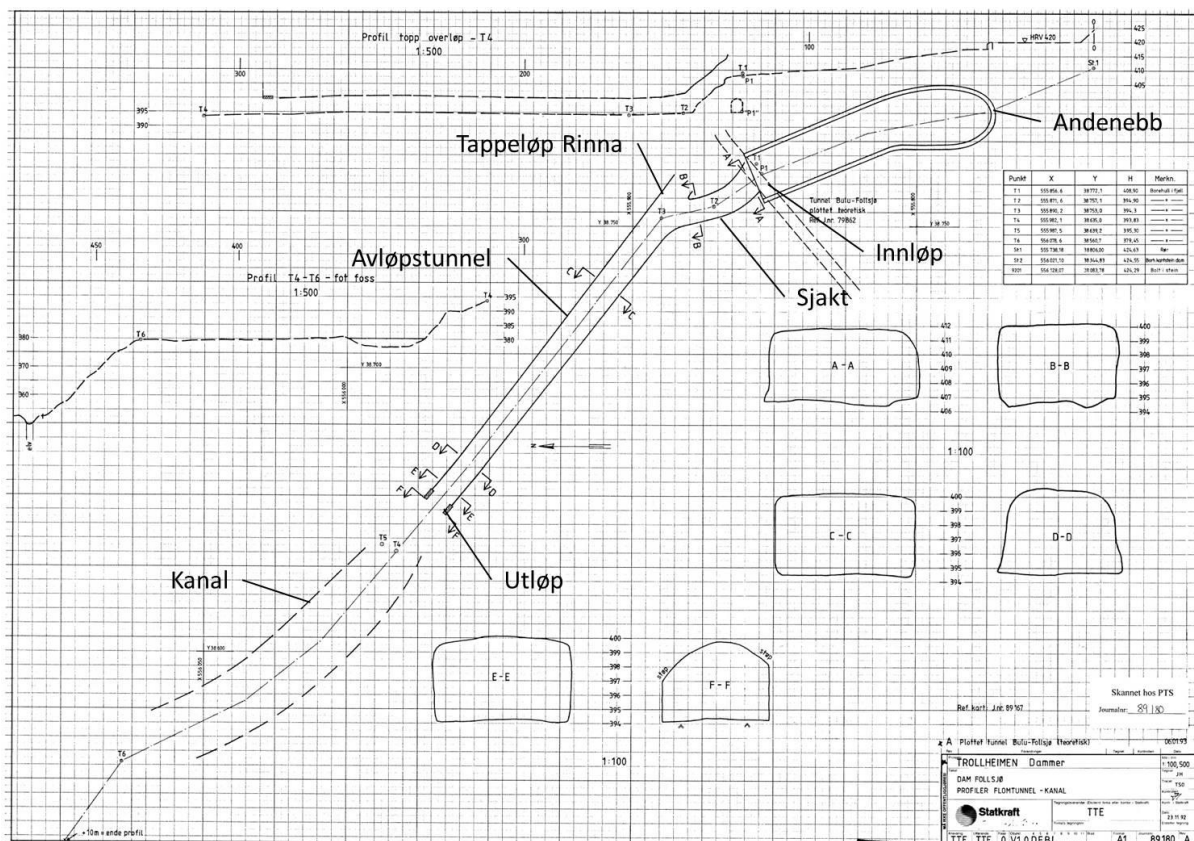
Figur 2-2 viser at dammen har en krumning vekk fra magasinet, og at flomløpet er plassert på høyre side. Bunntappeløpet går under dammen og ender i det opprinnelige elveleiet til elven Folla, hvor også flomløpet ender. Det kommer en overføringstunnel fra Rinna, som sees under flomløpet. De viktigste dataene for dams og magasin fremstilles i tabell 2-1 (Statkraft, 1997).

Tabell 2-1 Dam og magasin Follsjøen i tall

Maksimal høyde dam [m]	73,5
Topp fyllingsdam [moh]	426,0
Topp tetningskjerne [moh]	422,0
Lengde dam [m]	565
Konsekvensklasse	4
HRV [moh]	420
LRV [moh]	375
Reguleringshøyde [m]	45
DFV [moh]	421,61
PMF [moh]	422,41
Magasinvolum [mill. m <sup>3</sup> ]	179
Areal ved HRV [km <sup>2</sup> ]	6,75

Tabell 2-1 viser at Follsjøen er et magasin av betydelig størrelse, med en høy og lang dam. Konsekvensene av et eventuelt dambrudd vil være store, noe som gjenspeiles i at dammen er plassert i konsekvensklasse 4, som innebærer at mer enn 150 boenheter vil bli rammet ved et eventuelt dambrudd (NVE, 2014).

Flomavledningen ved Follsjøen skjer gjennom et lukket flomløpssystem, plassert ved dammens høyre vederlag. Overløpet er utformet som et andenebb, hvor vann kommer inn fra begge sider. Vannet renner fra overløpet videre gjennom innløpet til sjakt og avløpstunnel. Etter sjakten kommer tappeløpet fra Rinna overføringen inn på avløpstunnelen, slik at vann fra overføringen kan tappes direkte ut i avløpstunnelen. Etter avløpstunnelen ledes vannet videre i en sprengt kanal tilbake til det opprinnelige elveløpet nedstrøms dammen. Figur 2-3 viser de ulike elementene av flomløpet, for en mer detaljert tegning se Vedlegg A.



Figur 2-3 Oversiktsskisse flomløp. Tegning 89180 fra Statkraft

Figur 2-3 viser at overløpet har en tydelig knekk i utformingen i den øvre delen, før det går mer rett mot innløpet. Tappeløpet fra Rinna kommer rettere på avløpstunnelen enn det sjakten gjør. Sjakten har også en tydelig kurvatur, mens avløpstunnelen er utformet rett. Avløpskanalen har en svak kurvatur. De viktigste dataene for flomløpet er presentert i tabell 2-2.

Tabell 2-2 Flomløpet i tall

Kote overløpsterskel [moh]	420
Overløpslengde [m]	198
Helning flomløpskanal	1 : 6 (17 %)
Lengde sjakt [m]	25
Helning sjakt	1 : 1,6 (63 %)
Areal sjakt [m <sup>2</sup> ]	90
Lengde tunnel [m]	150
Helning tunnel	1 : 21 (5 %)
Areal tunnel [m <sup>2</sup> ]	90
Kote terskel luke overføringstunnel [moh]	395

Helningene for flomløpskanal, sjakt og avløpstunnel er funnet fra tegningen Follsjø Lengdeprofiltegning, se Vedlegg B. Arealene og lengdene er hentet fra Statkrafts rapport for Follsjødammen fra 1997 (Statkraft, 1997).



Figur 2-4 Flomløpet fra ulike vinkler

Figur 2-4 viser flomløpet fra ulike vinkler. Det øverste bildet (Statkraft) er et dronefotografi av hele dammen, hvor overløpet kan sees på høyre side. Nede til høyre vises et nærbilde av overløpet, tatt fra dammen. I det siste bildet sees kanalen etter avløpstunnelen, som leder vannet tilbake til det opprinnelige elveløpet.

## 2.2 Modellforsøk flomavledning

I 2010 utførte Multiconsult nye flomberegninger som ga forhøyede flomverdier for Follsjøen. Det ble da usikkert hvorvidt flomløpet ved Follsjø tilfredstilte kravene for sikker flomavledning. De beregnede flomverdiene for dimensjonerende flom,  $Q_{1000}$  og påregnelig maksimal flom,  $Q_{PMF}$ , fra rapporten presenteres i tabell 2-3 (Multiconsult, 2010).

Tabell 2-3 Resultater flomberegning

Flomsituasjon	Tilløpsflom [m <sup>3</sup> /s]	Avløpsflom [m <sup>3</sup> /s]
Q1000	789	752
QPMF	1430	1377

Flomløpet må håndtere beregnet avløpsflom på tilfredsstillende måte. Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg (Damsikkerhetsforskriften), § 5-8 bestemmer at det skal benyttes «anerkjente metoder» for beregning av flomløpets totale kapasitet (Damsikkerhetsforskriften, 2009, §5-8). Da det i dag ikke finnes tilfredsstillende måter å modellere lukkede flomløp teoretisk, var bygging av en fysisk modell nødvendig, for å vurdere flomløpskapasiteten til Follsjøen.

Modellforsøk for flomavledning så ikke spesifikt på luft, men det ble tatt hensyn til luftinnblanding ved å montere på to lufterør, et på sjakten, og et på overføringstunnelen. Lufterøret på overføringstunnelen skulle representere en lukesjakt hvor luft kunne passere ned til tunnelsystemet, mens lufterøret på sjakten ble påmontert for å hindre for stor kapasitet i modellen i forhold til prototypen. Modellforsøk for flomavledning viste at kapasiteten ble lavere når lufterøret på sjakten ble holdt åpen for høye vannføringer, og det ble derfor besluttet å kjøre forsøk med lufterøret åpent (Belete, 2017). Modellen står fortsatt i Vassdragslaboratoriet og i den sammenheng er det ønskelig å benytte modellen til å studere luftmedrivning.





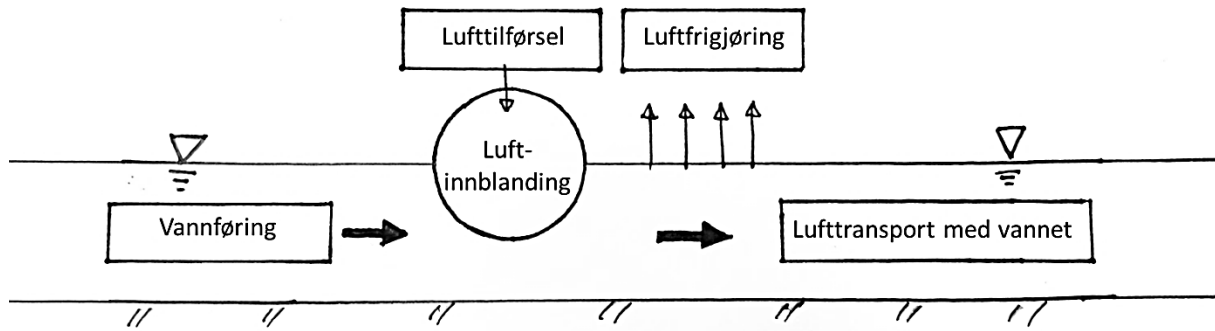
## 3 Teori

Luft og vann er normalt sett godt avskilt grunnet deres innbyrdes ekstreme forskjell i spesifikk vekt. Dersom de derimot blandes gir de grunnlag for en kompleks tofasestrømning, som er vanskelig å modellere. Det er av stor betydning at det tas hensyn til luft ved utførelse av vannveger, da det kan få store økonomiske og sikkerhetsmessige konsekvenser om det ikke gjøres (Kobus, 1984). Luft som kommer inn i vannveger kan skape luftlommer som gir økt falltap og lavere produksjon, dersom det skjer i en kraftverkstunnel. Luftlommene kan også føre til eksplosjonsartede utblåsninger, som har nok energi til å sprengne inntakskonstruksjoner i stykker. Ødelagte inntakskonstruksjoner utgjør en stor økonomisk utgift, samt fare for driftspersonell og tredjeperson. Luftinnblanding kan ved trykkstrømning også føre til nitrogenovermetning i avløpsvannet, som igjen kan forårsake fiskedød. Videre tar luften også ekstra plass, slik at kapasiteten til avledningsarrangement reduseres ved stor luftinnblanding, noe som påvirker sikkerheten til dammen. Økningen i totalt volum grunnet innblanding av luft vil også kreve større konstruksjoner for å håndtere strømmingene (Jenssen, Tesaker, Lund, & Huber, 2006).

Ulempen med luftinnblanding balanseres noe av det faktum at luften kan redusere kavitasjonsskader (Hager, 1992). Kavitasjon er et kjent problem innen vannkraftbransjen, som skader turbiner, rør og betong. Når vannet strømmer hurtig kan lavt trykk oppstå, som fører til at vannet fordampes. Når trykket deretter stiger igjen vil luftboblene kollapse, og det skapes lokalt et høyt trykk som kan skade betong- eller stålkonstruksjoner. Hvis det derimot er luft ved overgangen mellom vann og betong/stål, opptrer luften som en pute, som reduserer effekten av kavitasjon (Falvey, 1980).

### 3.1 Luftinnblanding

Luftinnblanding skaper en miks av luftbobler og vann, og luft vil være synlig som enkeltbobler eller brusing. Når vannet fremstår hvitt foregår det kraftig innblanding av luft, noe som forekommer blant annet i fosser og stryk (Guttormsen, 2006). Området hvor luft blir blandet inn kjennetegnes av en diskontinuitet i den frie overflaten, med betydelige hastighetsforskjeller. Eksempler på diskontinuiteter er vannstandssprang, vannstråle som bryter vannoverflaten eller virvler (Kobus, 1984). Figur 3-1 viser en skjematisk fremstilling av luftinnblanding. Vannet strømmer fra venstre mot høyre.



Figur 3-1 Lufttilførsel

Figur 3-1 illustrerer samspillet mellom luftinnblanding, lufttransport og luftfrigjøring. Dersom vannet har en diskontinuitet i overflaten, og gravitasjonen og treghetskreftene er større enn motstandskreftene viskositet og overflatespenning, vil luft blandes inn. Dersom mer luft blandes inn enn hva vannet kan klare å holde på, slippes noe ut igjen i form av luftfrigjøring (Kobus, 1984). Luften som ikke frigjøres transporteres videre med vannet dersom transportkapasiteten er tilfredsstillende høy. De kontrollerende forholdene for innblanding og transport av luft er følgende (Novak, Guinot, Jeffrey, & Reeve, 2010):

- Hastighet for begynnende luftinnblanding
- Froudetall for luftinnblanding
- Lufttilgang
- Transportkapasitet

For at luftinnblanding skal oppstå må vannstrømmen overskride en kritisk hastighet,  $v_c$ . For luftinnblanding fra en fri overflate er  $v_c = 6$  m/s. Videre må også Froudetallet ( $Fr$ ) i det tilstrømmende vannet overskride en viss verdi, avhengig av type strømning, for at innblanding skal oppstå. For et vannstandssprang antas luftinnblanding å oppstå rundt  $Fr=17$ . Hvor mye luft som blandes inn i vannet avhenger av strømningsforholdene og mengde tilgjengelig luft. I en åpen kanal vil lufttilgangen være ubegrenset, mens den ved rørstrømning er begrenset. Transportkapasiteten til vannet avhenger av forholdene i vannstrømmen nedstrøms luftinnblanding, i all hovedsak forholdet mellom vannets hastighet og turbulens og stighastigheten til luftboblene (Kobus, 1984). Det kan skilles mellom tre hovedmekanismer for luftinnblanding (Novak et al., 2010). De ulike mekanismene, samt eksempler på mekanismene, er listet opp under, og en beskrivelse følger i de neste kapitlene:

- Luftinnblanding ved frispeilsstrømning
  - Turbulent grenseflate krysser overflaten
- Lokal luftinnblanding
  - Vannstandssprang
  - Vannstråler
- Virvler
  - Ofte ved innløp

### **3.1.1 Luftinnblanding ved frispeilsstrømning**

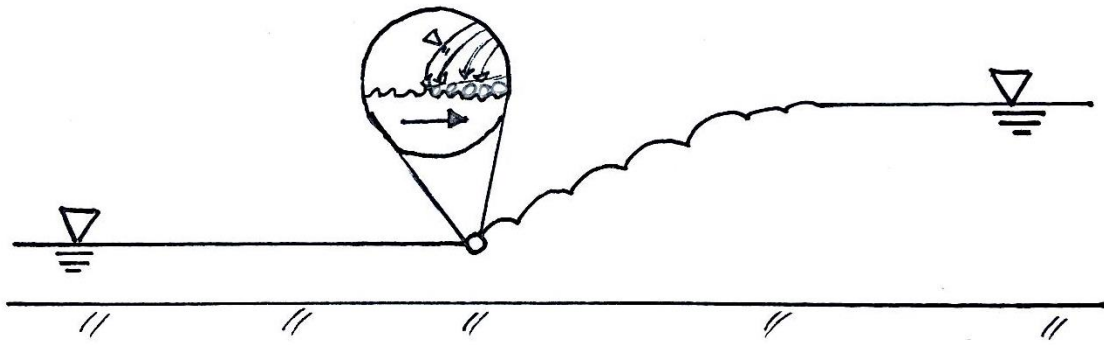
Vann som renner rolig er blankt og gjennomsiktig, men når helningen og dermed hastigheten økes tilstrekkelig, blir vannet hvitt og ugjennomsiktig. Det kan se ut som om vannet bruser, og fenomenet kalles naturlig luftet strømning, hvor store mengder luft blandes inn i vannet. Motsetningen, tvunget lufting er tilfellet når tilføring av luft skjer fra tekniske instrument. Forsøk har vist at dersom helningen på et overløp er liten nok vil ikke luftinnblanding forekomme, noe som betyr at en viss turbulens behøves før luftinnblanding kan forekomme. Turbulensen må forårsake nok uregelmessigheter til at luftbobler kan fanges i vannstrømmen (Falvey, 1980).

I frispeilsstrømning oppstår det turbulens i grenseflaten mellom vann og bunn eller vegg. Det turbulente grenselaget utvider seg langs strømningsretningen og på et visst tidspunkt krysser grenselaget overflaten. Da brytes overflatespenningene i vannet og luft kan blandes inn. Når grenselaget krysser overflaten har det oppstått fullt utviklet turbulens i strømmingen (Chow, 1959). Punktet hvor luftinnblandingen begynner ved frispeilsstrømning, defineres ofte som posisjonen hvor det turbulente grenselaget når overflaten (Boes & Hager, 2003). Av den årsak er hovedmekanismen for luftinnblanding i hydrauliske strukturer turbulens (Novak et al., 2010).

### **3.1.2 Lokal luftinnblanding**

#### *Vannstandssprang*

I et vannstandssprang skjer luftinnblandingen i overgangen mellom den frie vannoverflaten og den stillestående bølgen i vannstandsspranget. Figur 3-2 skisserer en forstørrelse av luftinnblandingen i et vannstandssprang.

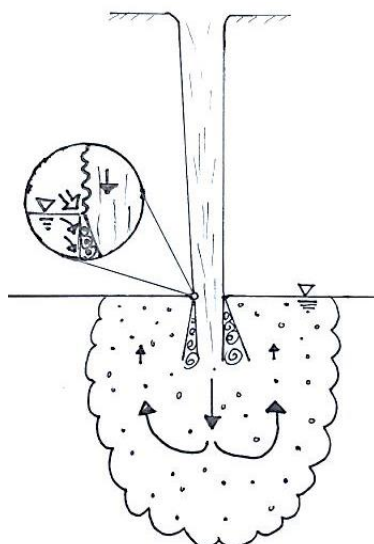


Figur 3-2 Innblanding av luft i vannstandssprang

Vannstandsspranget treffer den frie overflaten i vannstrømmen, og luft blandes inn i vannstandsspranget (Kobus, 1984). Luftinnblanding skjer i det frie skjærlaget mellom den frie vannoverflaten og den stående bølgen i vannstandsspranget, hvor det oppstår høy turbulens (Novak et al., 2010). For et vannstandssprang som fyller et lukket tverrsnitt, slik at strømmingen går over fra friseilsstrømning til rørstrømning, blandes mye luft inn i vannstrømmen. Det varierer om vannstandsspranget blander inn mer eller mindre luft enn hva vannet kan transportere videre. Dersom vannstandsspranget blander inn mer luft, vil luft returnere tilbake til friseilsstrømningen, hvis ikke transporteres luften videre i tunnelsystemet. Tunnelens helning etter vannstandsspranget avgjør, sammen med vannets hastighet, hvor mye luft som kan transporteres videre. Er tunnelen horisontal eller har en helning oppover, vil mer luft kunne transporteres videre enn om tunnelen heller nedover (Falvey, 1980).

### *Vannstråler*

Vannstråler som går ned i en fri vannoverflate, vil blande inn luft i skjæringen mellom vannstrålen og vannoverflaten (Kobus, 1984). Luftinnblandingen i en vannstråle skisseres i figur 3-3.

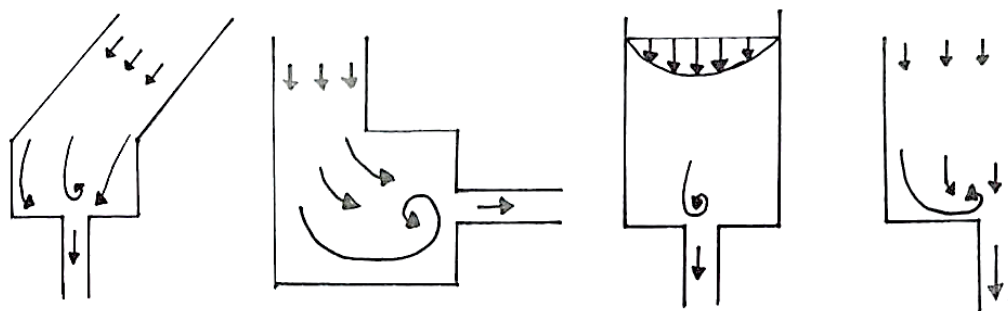


Figur 3-3 Vannstråle

Grunnet bevegelsesmengden til vannstrålen, blandes luft inn i det frie skjærlaget som oppstår mellom vannstrålen med høy hastighet og vannflaten med tilnærmet ingen hastighet. I skjærlaget oppstår intensiv turbulens (Kobus, 1984). Den kritiske hastigheten for at luftinnblanding skal oppstå for en vannstråle er  $v_c=0,8-1$  m/s (Kobus & Koschitzky, 1991).

### 3.1.3 Virvler




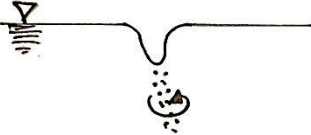

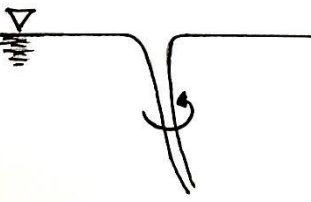
Virvler oppstår i hovedsak som følge av skjevstrømning. Skjevstrømning forekommer på grunn av usymmetrisk tilstrømning og hastighetsfordeling eller hindringer i tilstrømningsområdet (Jenssen et al., 2006). Figur 3-4 viser ulike årsaker til virveldannelse ved innløp.



Figur 3-4 Årsaker til virveldannelse

Vannet treffer innløpet med ulik hastighet eller retning, slik at det oppstår turbulens og en virvel etableres. I skisse nummer to fra høyre i figur 3-4, er et ulikt hastighetsprofil skissert.

Avhengig av type virvel som etableres kan enten bobler eller en sammenhengende luftstreng trekkes ned i innløpet. Klassifisering av ulike virvler vises i figur 3-5 (Jenssen et al., 2006).

Virvel-klasse	Skisse	Beskrivelse
1		Overflaterotasjon
2		Fordypning og rotasjon
3		Roterende vannstreng
4		Rask suges ned
5		Luftbobler suges ned
6		Sammenhengende luftstreng

Figur 3-5 Klassifisering av virvler

Figur 3-5 viser at hva som kan trekkes ned til et eventuelt innløp, avhenger av hvilken type virvel som er etablert. Enkelte virvler kan trekke ned rask, mens andre trekker luftbobler og luft. Om det kun er en overflaterotasjon eller om det etableres en sammenhengende luftstreng ned innløpet avhenger av styrken til virvelen. Gode tilstrømningsforhold vil kunne minske faren for virveldannelse (Jenssen et al., 2006).

## **3.2 Lufftransport**

Når luftboblene først er innblandet i vannstrømmen er det transportkapasiteten som avgjør om luftboblene blir med vannet videre eller returnerer til fri luft. Transportkapasiteten til vannet avhenger av forholdene i vannstrømmen nedstrøms luftinnblandingen, i all hovedsak forholdet mellom vannets hastighet, turbulens og stige-hastigheten til luftboblene. Vann med innblandet luft har en lavere friksjonsfaktor enn vann uten luftinnblanding, noe som fører til at hastigheten øker i vann med luft innblandet. Avhengig av luftkonsentrasjonen øker og avtar friksjonskoeffisienten (Novak et al., 2010).

En øvre grense for transportkapasitet er gitt av maksimal luftboblekonsentrasjon i vannstrømmen. I stillestående vann, vil all innblandet luft slippe ut igjen da luftboblene stiger til overflaten på grunn av deres oppdrift. I friskeisstrømning med vannhastighet høyere enn stige-hastigheten øker transportkapasiteten med økende hastighet og turbulens. I lukket strømning vil transportkapasiteten også avhenge av orienteringen av strømmen mot vertikal retning. Siden oppdriften virker i vertikalt oppadgående retning, vil strømning i vertikal oppadgående retning ha maksimal transportkapasitet, mens strømning i vertikal nedadgående retning vil ha lavest kapasitet (Kobus, 1984).

### **3.2.1 Luftbobler**

Luftinnblanding involverer innesperring av et luftvolum i overflatens diskontinuitet. Deretter brytes luftvolumet opp i en rekke luftbobler som transporteres med vannstrømmen. Luftboblene kan i transporten brytes opp til mindre, eller løpe sammen til større luftbobler, avhengig av treghetskrefter og gravitasjonskrefter, noe som fører til at størrelsesfordelingen av luftboblene stadig endres (Kobus, 1984). Transporten av luftbobler i vannstrøm krever en turbulent nedadgående hastighetskomponent som er større enn boblenes stige-hastighet. Majoriteten av store luftbobler i turbulent strømning er i størrelsesorden 1 til 10 mm i diameter, med en gjennomsnittlig diameter mellom 2,2 og 3,5 mm. For kraftig turbulens og

høye hastigheter, er boblestørrelsene ofte noe mindre (Novak et al., 2010). Stigehastigheten for typiske bobler med en diameter mellom 1 til 10 mm, er omtrent 0,3 m/s. Bobler med en større diameter enn 10 mm har en høy sannsynlighet for å bli blandet inn, men en liten sannsynlighet for å bli transportert nedover i vannstrømmen. For bobler med en diameter mindre enn 1 mm, er det motsatte tilfellet. Luftbobler med små diametere finnes lavere i strømningsene enn de store (Falvey & Ervine, 1988), og luftboblekonsentrasjonen vil være størst ved overflaten grunnet boblenes oppdrift (Tekle, 1967).

I stille vann er overflatespenninger de dominerende kreftene på små bobler. Derfor har små bobler tilnærmet perfekt sfærisk form. Boblenes bevegelse i en væske kan beskrives ved kraftlikevekten mellom oppdrift og viskøse krefter. Men når boblene blir større blir overflatekraftens effekt liten sammenlignet med skjærkreftene. Dermed er ikke de store boblene lenger sfæriske (Falvey, 1980).

### **3.2.2 Oppløst luft**

Luften kan forekomme i vannet på to ulike måter: oppløst og innblandet. Når luften er fordelt som enkeltmolekyler, i all hovedsak nitrogen ( $N_2$ ) og oksygen ( $O_2$ ), blant vannmolekylene, er det snakk om oppløst luft. Oppløst luft er ikke synlig visuelt, men det vil være mulig å se at vann er kraftig overmettet dersom det frigis brakkingsbobler, altså fri luft fra vannet (Guttormsen, 1981). Vann i en viss tilstand kan bare holde en bestemt mengde luft i en stabil oppløsning, som benevnes likevekts-innholdet eller løseligheten av luft i vann. Vann i naturen er som oftest svært nærme likevektstilstand i vannoverflaten og videre ned gjennom lagene. Hvor løselig luften er i vannet avhenger av trykk, temperatur, saltinnhold, forurensning og hvor mye luft som initielt er oppløst. Oppløsning av luft er en tidsavhengig prosess som alltid søker likevekt. Dersom forholdene endres vil det ta tid før en ny likevekt oppstår, da betingelsene for oppløsning av luft endres.

Løseligheten av oppløst luft i vann er proporsjonal med trykket, med økende oppløselighet for økende trykk. Ved 10 m vanddyb er løseligheten dobbelt så stor som i overflaten, da 10 m vanntrykk tilsvarer en atmosfære (atm) overtrykk. Løseligheten avhenger også av temperaturen, for hver grad temperaturen øker, avtar løseligheten med omtrentlig 2,5 %. Så når vann med etablert likevektsmetning varmes opp, dannes det omtrent 2,5 % overmetning for hver grad temperaturen stiger, dersom ingen luft avgasser. Hvis en væske inneholder mer



oppløst luft enn i naturlig tilstand anses den som overmettet. Dersom overmetningen overskrider 5-15 %, kan fiskedød forekomme (Bekkeinntakkomiteen, 1986).

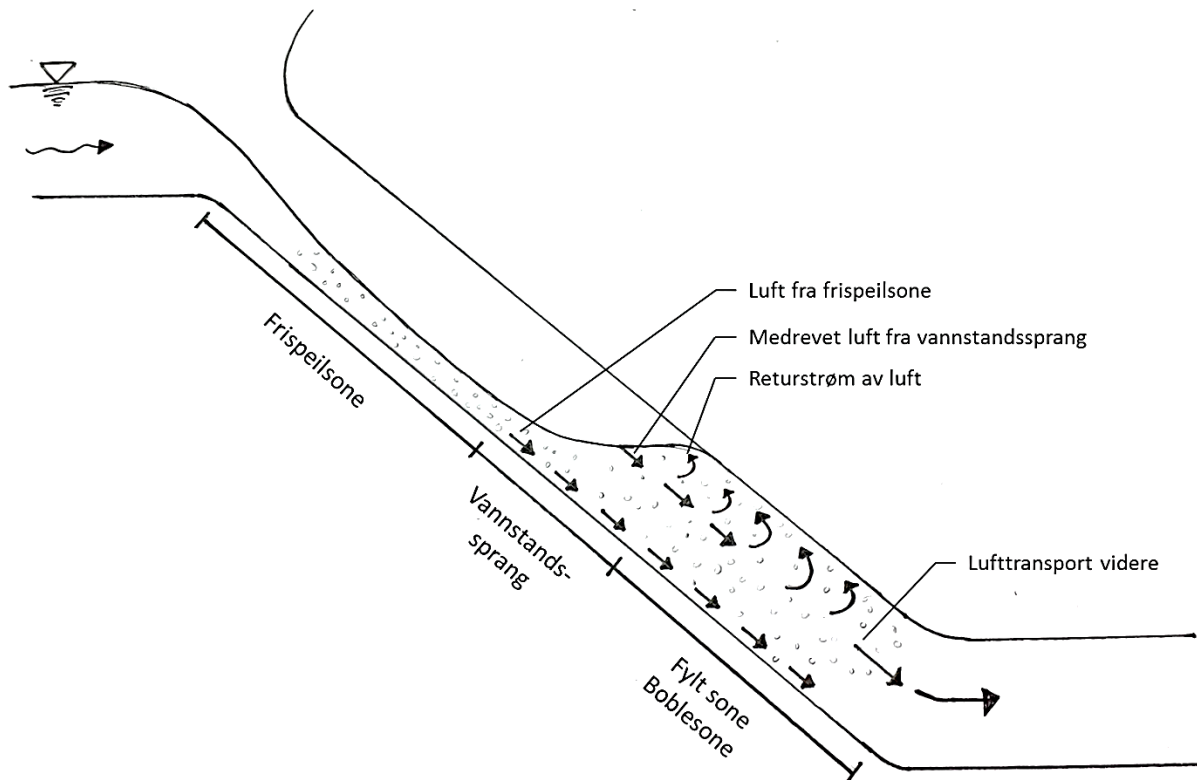
Vannets oksygeninnhold i form av oppløst luft kan økes ved luftinnblanding, slik at oksygen kan overføres fra luftbobler til vann (Kobus, 1984). For at overmettet vann skal dannes må luft blandes inn i vannet i finfordelt form, blandingen må videre settes under trykk og trykket må vare over en bestemt tid. Det vil enten være mengden innblandet luft eller trykket som setter en øvre grense for overmetning. I sjakter og tunneler oppstår overmettet vann ved at luft oppløses fra medrevne luftbobler under høyt trykk. Dersom vannhastigheten økes blir oppholdstiden i sjakten kortere noe som vil gi mindre oppløst luft, da luftoppløsning fra luftlommer skjer sakte (Bekkeinntakkomiteen, 1986).

### **3.2.3 Luftransport over vannflaten**

Frispeilsstrømning i lukket tverrsnitt kan sees på som kanalstrømning i et lukket tverrsnitt, hvor luften strømmer gjennom passasjen over vannspeilet. Siden vannet og luften i det frie rommet over vannflaten har ulik hastighet vil skjærkrefter oppstå i grensen mellom de to flatene. Dermed vil luft trekkes med vannet gjennom tunnelen grunnet vannets turbulens og høye hastighet. Økt overflateruhet i vannet skaper større friksjon mellom luft og vann, og dermed bedre evne til å trekke med luft gjennom systemet (Plate & Hidy, 1967). Det totale volumet av luft som kommer inn i den øvre delen av en sjakt/tunnel, tilsvarer summen av luften som er innblandet i vannstrømmen og luften som strømmer over vannspeilet som et resultat av skjærkrefter mellom luft og vann (Falvey, 1980).

### **3.3 Skråsjakt**

I en skråsjakt forekommer luftinnblanding både ved friskeilsstrømning og lokal luftinnblanding i form av et vannstandssprang. Vannet styrter som friskeilsstrømning ned til et nivå hvor sjakten fylles. Punktet for fylling bestemmes av trykklinjen i systemet. En skisse av strømningsmønsteret vises i figur 3-6.



Figur 3-6 Strømningsmønster i skråsjakt

Luft blandes inn både i friskeilsonen og i vannstandsspranget i overgangen til fylt tverrsnitt. Et stykke ned i friskeilsonen vil begynnende innblanding av luftbobler i de øvre vannlagene forekomme når turbulensen som skapes langs vegger og bunn, krysser overflaten og river luft ned i vannstrømmen (Hager, 1992). Nedover i sjakten øker luftinnblandingen både i mengde og dybde i vannet, og nærmer seg asymptotisk en grenseverdi. Fullt utviklet luftinnhold er i området 10-40 % av vannvolumet, og for råsprenge sjakter oppnås fullt utviklet luftinnhold etter en strømningslengde på 50 - 100 ganger normaldybden (Bekkeinntakkomiteen, 1986). Vannstandsspranget lenger ned i sjakten pisker også luft inn i vannet. Luftmedrivningen øker med hastigheten foran vannstandsspranget.

Selv om det foregår betydelig luftinnblanding i sjakter vil vannhastigheten være tilnærmet den samme som i modellforsøk uten luft eller ved teoretiske beregninger. Korresponderende hastighet betyr at vannedybden øker med et forhold som tilsvarer luftinnblandingen, for å opprettholde lik hastighet som for strømming uten luft (Bekkeinntakkomiteen, 1986).

Summen av luft i friskeilstrømmen og luft som rives med i vannstandsspranget kalles til sammen initielt medrevet luft. Hvor mye av den initielle luften som transporteres videre inn i

tunnelen, avhenger av transportkapasiteten i området hvor sjakten er fylt. Luften som ikke blir transportert videre med vannstrømmen returnerer tilbake i taket av sjakten, enten som pulserende eller jevn tilbakestrøm, som illustrert i figur 3-6. Ved lav vannhastighet er transportkapasiteten liten, slik at den begrensende faktoren for luftmedrivning vil være vannhastigheten. Ved høye vannhastigheter kan derimot transportkapasiteten være høyere enn innblandingskapasiteten, slik at det vil være selve innblandingen som setter begrensninger for lufttransporten (Bekkeinntakkomiteen, 1986).

I figur 3-6 er en boblesone markert i sonen med fylt tverrsnitt. Boblesonen defineres som den delen av vannfylt tverrsnitt hvor det finnes luftbobler innblandet i vannstrømmen. Boblesonen varer helt fremt til punktet hvor all medrevet luft har samlet seg under taket. Boblesonens lengde avhenger av vannføringen, og kan ved høye vannføringer bli uendelig lang og strekke seg inn i tunnelen.

Boblesonen kan igjen deles inn i to deler, hvor overgangssonen er den første delen. Her omsettes hastighetsenergien fra frispeilssonen. I overgangssonen er det virvler og sterk turbulens, og den medrevne luften er spredt i hele tverrsnittet. Ved enden av overgangssonen er vannhastigheten mer jevnt fordelt over tverrsnittet. Overgangssonens utstrekning bestemmes av vannhastigheten i det delvis fylte området av sjakta. Etter hvert som turbulens og virvling avtar gjennom sjakta, vil luftboblene i vannet begynne å stige mot taket, grunnet oppdrift (Bekkeinntakkomiteen, 1986).

Utsrekning av boblesonens nederste del bestemmes av vannhastigheten i den fylte delen av sjakta. Utsrekningen kan finnes ved å beregne hvor lang strekning, i lengderetningen, ei boble bruker for å gå fra gulvet i sjakta til taket. Dersom vannhastigheten er stor nok, mellom 4 – 5 m/s i råsprengt tunnel, holdes bobler i suspensjon uendelig lenge (Bekkeinntakkomiteen, 1986).

Opp til en viss grensehastighet vil tilnærmet all luft fra boblesonen som samler seg under taket, returnere opp igjen. For en 45° sjakt anslås grensehastigheten for naturlig avluftning å være omtrentlig 0,6 m/s for fylt tverrsnitt. Dersom vannhastigheten er lavere enn grensehastigheten, er lufttransportkapasiteten i fylt sjakttverrsnitt ubetydelig. Det vil likevel være noe netto lufttransport da litt av lufta i boblene vil løse seg opp og danne luftovermetning før resten av boblen returnerer. I en vertikal sjakt vil naturlig nok

grensehastigheten for naturlig avluftning være lik stigehastigheten til luftboblene, 0,15 – 0,2 m/s (Bekkeinntakkomiteen, 1986).

### **3.4 Tunneler**

I tunneler vil luft forekomme både som luftbobler og som oppløst luft. Etter sjakten og nedover i tunnelen jevnes hastigheten ut og reduseres. Reduksjonen i hastighet fører til at luftboblene stiger mot taket, og i en viss avstand fra bunnen av sjakta vil det ikke lenger være luft i vannet ved tunnelbunnen, dersom hastigheten er lav nok. Når det er vanlige vannhastigheter i tunneler, 1,2 – 1,8 m/s, vil luftboblene etter hvert samles i små lommer ved taket. Luftbobler søker alltid mot områder med lavere trykk. Dersom tunnelen har en helning som er mindre enn trykklinja, vil de små luftlommene bevege seg med vannstrømmen. Det dannes dermed ikke større luftlommer som kan blåse ut i sjakta. Luften som strømmer med vannet kan skape problemer senere i tunnelen, for eksempel ved høybrekk hvor luften kan samles, og forårsake falltap. Dersom helningen på tunneltaket er større enn helningen på trykklinja og oppdriften til luftboblene er større enn medrivningskraften fra vannet, vil større luftvolum kunne samles under tunneltaket. Medrivningskreftene øker ved høyere hastighet, og oppdriften er større for store luftlommer enn små, slik at store luftlommer går lettere mot vannstrømmen enn små (Damsikkerhetsforskriften, 2009).

### **3.5 Skalering av luft**

Luftmedrivning og tofasestrømning er komplekst og det er utført en rekke forsøk for å kunne skalere luftmedrivningen. Men modellforsøk for å studere strømning med luft og vann, tofasestrømning, gir usikre resultater da de normalt benyttede modellene for overføring av resultater fra modell til prototyp ikke kan benyttes for tofasestrømning (Guttormsen, 1981).

Når luftinnblanding skjer genereres tilnærmet den samme absolutte størrelsen på luftboblene, og i modellforsøk er derfor luftboblenes størrelse like store som i prototype. Dermed vil luftboblene kunne stige raskere i modellen enn i prototypen, sett i forhold til skalaen. Hvis det i tillegg tas høyde for det ekstra trykket i prototypen, som gir lavere oppdrift og høyere luftviskositet, stiger luftboblene raskere i modellen enn i prototypen. Luftboblene har også en lenger distanse å gå i prototypen enn i modellen, grunnet størrelsesforskjellene. I modellen brytes dermed både kravet om geometrisk likedannethet, da luftboblenes størrelse ikke kan skaleres ned, og kravet om dynamisk likedannethet, da stigningshastigheten for luftboblene

ikke skaleres med samme faktor som vannhastigheten (Kobus, 1984). Forholdet mellom stighastigheten til luftbobler,  $v_b$  og strømningshastigheten,  $v$  er for stort med en faktor på  $L_r^{1/2}$ , fordi skaleringsfaktoren benyttet for hastighet ved Froudes modellov er  $L_r^{1/2}$  i modellen, se kapittel 4.1. At luftbobler vil stige forholdsvis raskere i modellen enn i prototypen, vil føre til raskere luftfrigjøring og lavere lufttransport (Novak et al., 2010). Forskjellen fører også til at det tar lengre tid å etablere luftlommer i tak i prototype enn i modell, og avluftningen tar lengre tid i prototype enn i modell (Berg, 1986). Formel (1) viser kompleksiteten for beregning av forholdet mellom luftstrøm og vannføring (Novak et al., 2010).

$$\frac{Q_a}{Q} = \beta = f\left(\text{geometriske forhold}, Tu, Eu, Fr, Re, We, z, \frac{d_b}{y}\right) \quad (1)$$

Hvor:

$Q_a$	=	luftstrøm
$Q$	=	vannføring
$\beta$	=	forholdstall
$Tu$	=	turbulens
$Eu$	=	lufttilgang
$Fr$	=	Froudes tall
$Re$	=	Reynolds tall
$We$	=	Webers tall
$z$	=	væske parameter
$d_b$	=	diameter boble
$y$	=	dybde

For beregning av gjennomsnittlig luft i generelle tilfeller viser formel (1) kompleksiteten av beregningene. I tillegg må også de begrensende forholdene for begynnelse av luftinnblanding og transport legges til parameterne (Novak et al., 2010). For å overføre resultater fra modell til prototype må alle parameterne være like, noe som ikke lar seg gjøre. I de neste kapitlene gjennomgås empiriske formler for luftmedrivning.

### 3.5.1 Luftmedrivning ved frispeilsstrømning

Beregning av luftmedrivning i frispeilsstrømning har vært et forskningsfelt i mange år, spesielt på flomløp, da den enkleste beregningen av luftmedrivningen i vannoverflaten kobler forholdstallet,  $\beta$  og Froudetallet til vannstrøm uten luftmedrivning. Sammenhengen vises i formel (2) (Novak et al., 2010).

$$\frac{y_a - y_0}{y_0} = \beta = 0,1(0,2Fr^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Hvor

- $y_a$  = vanddybde uniform vannføring med luftinnblanding
- $y_0$  = vanddybde vannføring uten luftinnblanding
- $\beta$  = forholdstall
- Fr = Froudes tall

Formel (2) neglisjerer de andre parameterne i formel (1), og gir derfor en meget enkel tilnærming. Men ved å anta geometrisk likedannethet, fullt utviklet turbulens i modellen og like egenskaper for vannet i modell og prototype,  $z$ =konstant, vil hovedproblemet ved å reprodusere den gjennomsnittlige luftkonsentrasjonen og lufttransporten, være effekten av overflatespenning og luftboblestørrelsen som vil være lik i modell og prototype. Men dersom modellen er tilfredsstillende stor og strømmingen turbulent, vil formel (2) kunne gi brukbare resultat for prototypen. Vanskelighetene ved mer sofistikerte beregninger av dybden og luftkonsentrasjonen for vannføringer med luftinnblanding, er det faktum at friksjonskoeffisienten til vannstrømmen med innblandet luft er lavere enn for en strømning uten luft. Dermed er den gjennomsnittlige hastigheten for vannstrøm med innblandet luft høyere enn for strømning uten luft (Novak et al., 2010).

### 3.5.2 Lokal luftmedrivning

#### Vannstråle

Ved lokal overflate erosjon, som ved vannstråler, foreslås formel (3) for forholdet mellom luft og vann, på den ene siden av en vannstråle (Kobus & Koschitzky, 1991).

$$\beta = k \cdot Fr^2 \left(1 - \frac{v_c}{v}\right)^3 \quad (3)$$

Hvor:

- $\beta$  = forholdstall
- $k$  = konstant
- $Fr$  = Froudes tall
- $v_c$  = kritisk hastighet for å oppnå luftinnblanding
- $v$  = hastighet vannstråle

Siden formel (3) er avhengig av forholdet mellom kritisk vannhastighet for luftinnblanding og vannets hastighet er det ikke mulig å modellere forholdet mellom luft og vann korrekt, fordi  $v_c$  er konstant, og vil gi en skalaeffekt på  $L_r^{1/2}$  (Novak et al., 2010).

### *Vannstandssprang*

For et vannstandssprang begynner luftinnblandingen vanligvis ved  $Fr > 17$ . For et vannstandssprang kan formel (4) benyttes for å bestemme forholdet mellom luft og vann i strømmingen (Novak et al., 2010).

$$\beta = k_1 (Fr - 1)^a \quad (4)$$

Hvor:

- $\beta$  = forholdstall
- $k_1$  = konstant
- $Fr$  = Froudes tall
- $a$  = konstant

Ved bruk av formel (4) kan forholdet mellom luft og vann modelleres ettersom innblandingsgrensen er dominerende med høy turbulens og tilfredsstillende høyt Reynoldstall (Novak et al., 2010).

### **3.5.3 Oppløsning av luft**

Oppløsning av luft fra innestengte luftvolum eller luftbobler avhenger av vannets egenskaper som temperatur, trykk, saltinnhold og hvor mye oppløst luft som finnes i vannet allerede.

Mengden oppløst luft beskrives best ved forholdet mellom oppstrøms og nedstrøms mengde oppløst luft, som vist i formel (5) (Novak et al., 2010).

$$\beta = \frac{C_s - C_u}{C_s - C_d} \quad (5)$$

Hvor:

- $\beta$  = forholdstall
- $C_s$  = likevekts innholdet
- $C_u$  = oppløst luftinnhold oppstrøms
- $C_d$  = oppløst luft nedstrøms

Når resultater oppnådd ved bruk av formel (5) for ulike situasjoner skal sammenlignes, må korrigeringsfaktorer for temperatur og noen ganger vannkvaliteten, benyttes. Ved modellforsøk har formel (6) blitt utviklet for forholdstallet  $\beta$ , ved en temperatur på 15 grader celsius (Avery & Novak, 1978).

$$\beta_{15} - 1 = k \cdot Fr_j^{1,78} \cdot Re_j^{0,53} \quad (6)$$

Hvor:

- $\beta_{15}$  = forholdstall oppløst luft ved 15°C
- $k$  = konstant
- $Fr_j$  = Froudes tall for enhetsvannføring  $q_j$
- $Re_j$  = Reynolds tall for enhetsvannføring  $q_j$

En modell bygget etter Froudes modellov vil ikke kunne forutse oppløsningen av luft i prototypen effektivt, da ligningen avhenger av enhetsvannføringen  $q$ .

Artikler og gjennomførte forsøk for luftmedrivning fastslår alle det samme: Luftmedrivning og tofasestrømning er komplekse fenomen, og det finnes ingen universelle modeller som kan benyttes. Enkelte formler har blitt utviklet, som vist i det foregående, men bruksområdene av formlene begrenses sterkt til geometrisk identiske modeller og er ikke overførbare fra modell til modell. Skalaeffekter i modeller som inkluderer luftmedrivning er derfor

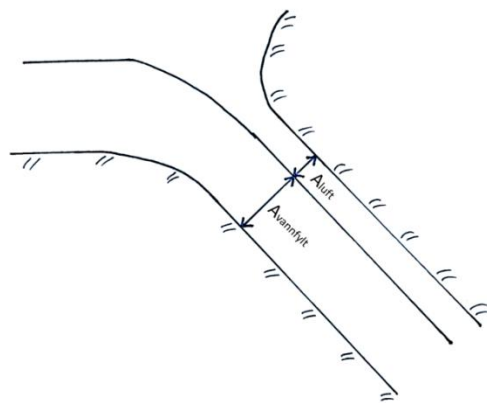


uunnngåelig, og en mye brukt metode for å estimere luftmedrivningen i fysiske modeller, er å bygge flere modeller med ulik målestokk og forsøke å ekstrapolere resultatene til prototypen (Novak et al., 2010). De foregående avsnittene konkluderer med at overføring fra modell til prototype vanskelig lar seg gjøre, uten store usikkerheter.

### 3.6 Krav om maks 70 % vannfylt

Dersom flomavledning foregår i et lukket flomløp, som for Follsjøen, skal ekstra varsomhet vises ved kapasitetsberegninger og utførelse av flomløpet. Årsaken er at ved et lukket flomløp som allerede går fullt, vil en liten økning i vannføring føre til en betydelig økning i vannstand i magasinet, sammenlignet med et åpent flomløp. Videre er kapasitetsberegningene for lukkede flomløp alltid noe usikre, blant annet i forhold til luftinnblanding, noe kapittel 3.5 slår fast. Derfor bør det ikke regnes med en full utnyttelse av lukkede tverrsnitt. Uten hensyn til luftinnblanding skal det ikke regnes med mer enn 0,7 ganger den beregningsmessige kapasiteten for dimensjonerende avløpsflom. Damsikkerhetsforskriften, § 5-8 fastslår derfor at «dersom flomavledning skjer gjennom sjakt eller tunnel (lukket avløp), skal disse utformes slik at det blir friskeilstrømning i øvre del av systemet ved avledning av dimensjonerende avløpsflom» (Damsikkerhetsforskriften, 2009, § 5-8). Videre står det i NVEs Retningslinjer for flomløp at NVE «godkjenner normalt ikke at mer enn 70 % av tverrsnittet går vannfylt» (NVE, 2005). Ved  $Q_{1000}$ , som er dimensjonerende flom for Follsjøen, skal det derfor være friskeilsstrømning i øvre halvdel av sjakt, med kun 70 % vannfylling. Formel (7) viser forholdet mellom vannfylt tverrsnitt og totalt tverrsnitt, som videre er skissert i figur 3-7:

$$A_{\text{vannfylt tverrsnitt}} = 0,7 \cdot A_{\text{tot.tverrsnitt}} \quad (7)$$



Figur 3-7 Krav til maks 70 % vannfylling

Figur 3-7 skisserer vannstrømningen som en rett linje, men i virkeligheten er strømningsbildet et helt annet. I sjakter foregår kraftig luftinnblanding ettersom de turbulente grenselagene fra bunn og sider, krysser vannoverflaten. Øverst er vannet derfor hvitskummende og nedover i lagene er det en betydelig andel luftbobler. Skalering av luft er forbundet med store usikkerheter, og ettersom mer luft blandes inn i prototypen enn i modellen, eksisterer kravet om maksimalt 70 % vannfylling, som en sikkerhetsmargin.

## 4 Metode

### 4.1 Likedannethet

Når modell og prototype oppnår likedannethet vil modellen gi samme respons som prototype, og dermed er det mulig å forutse hvordan prototypen vil oppføre seg ved ulike situasjoner (Crowe, Elger, Williams, & Roberson, 2010). Likedannethet kan oppnås selv om modellen ikke er geometrisk lik prototypen. I modellforsøk må forenklinger innføres, men det er viktig at modellen likevel gir samme respons som prototypen (Guttormsen, 2006). I de neste delkapitlene gjennomgås betingelser for modellforsøk av vassdragstekniske problem.

#### 4.1.1 Geometrisk likedannethet

Geometrisk likedannethet betyr at modellen er en geometrisk nedskalert gjengivelse av prototypen, med en skaleringsfaktor ( $L_r$ ) (Crowe et al., 2010). I ligning (8) vises  $L_r$ , som er forholdet mellom lengdene i modellen ( $L_m$ ) og prototypen ( $L_p$ ).

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (8)$$

Videre følger det at forholdet mellom modellens og prototypens areal vil være kvadratet av lengdeforholdet (Crowe et al., 2010), som fremstilles i formel (9).

$$A_r = \frac{A_m}{A_p} = \frac{L_m^2}{L_p^2} = L_r^2 \quad (9)$$

#### 4.1.2 Kinematisk likedannethet

Kinematisk likedannethet betyr likhet i bevegelse mellom væskepartikler. Strømlinjene i modellen skal til enhver bestemt tid være lik som i prototypen. Alle hastigheter må nedskaleres med samme faktor (Guttormsen, 2006). Nedskaleringen vises i formel (10), hvor hastighetene i ulike punkter (1, 2) har det samme forholdet.

$$V_r = \frac{V_m}{V_p} = \frac{V_{m,1}}{V_{p,1}} = \frac{V_{m,2}}{V_{p,2}} \quad (10)$$

### 4.1.3 Dynamisk likedannethet

Dynamisk likedannethet betyr at forholdet mellom alle krefter som virker i prototypen og modellen skal stå i samme forhold til hverandre (Guttormsen, 2006). Dynamisk likedannethet er den viktigste forutsetningen for fysisk modellering, og forsikrer at det er et konstant forhold mellom prototypen og modellen for alle krefter og masser som virker på systemet. Når dynamisk likedannethet er oppnådd og modellen er geometrisk lik prototypen, vil også kravet om kinematisk likedannethet være oppfylt (Guttormsen, 2006). I ligning (11) vises forholdet ( $F_r$ ) mellom krefter i modellen ( $F_m$ ) og prototypen ( $F_p$ ).

$$F_r = \frac{F_m}{F_p} \quad (11)$$

De viktigste kreftene som inngår i de fleste hydrauliske problemstillinger for modellbygging er treghetskrefter, tyngdekrefter, trykk-krefter og viskositetskrefter (Guttormsen, 2006). Kreftene vises i tabell 4-1, samt deres uttrykk.

Tabell 4-1 - De viktigste kreftene i hydrauliske problemstillinger

Krefter	Ligning	Uttrykk
Treghetskrefter, $F_i$	masse · akselerasjon	$\rho L^2 v^2$
Tyngdekrefter, $F_g$	masse · tyngdens akselerasjon	$\rho g L^3$
Viskositetskrefter, $F_v$	skjærkraft · areal	$\mu v L$
Trykk-krefter, $F_p$	trykk · areal	$p L^2$

Hvor:

- $\rho$  = densitet vann
- $V$  = volum
- $L$  = lengde
- $v$  = vannhastighet
- $g$  = tyngdens akselerasjon
- $p$  = trykk
- $\mu$  = dynamisk viskositet

I tillegg kommer overflatekrefter og elastiske krefter. Newtons 2. lov gir følgende oppsett av kreftene, fremstilt i ligning (12):

$$F_i = F_g + F_v + F_p \quad (12)$$

Dersom det nå antas at  $F_i$ ,  $F_g$ ,  $F_p$  og  $F_v$  er dominerende i et modellstudium, krever dynamisk likedannethet at forholdet mellom kreftene i modell og prototyp skal være likt. Dermed kommer følgende krav, fremstilt i ligning (13):

$$\frac{F_{im}}{F_{ip}} = \frac{F_{gm}}{F_{gp}} = \frac{F_{vm}}{F_{vp}} = \frac{F_{pm}}{F_{pp}} \quad (13)$$

For at en fullverdig dynamisk likedannethet skal være tilfellet, må alle kreftene skaleres likt, noe som vanskelig lar seg gjøre. For å gjennomføre modellforsøk er det derfor viktig å kjenne til hvilke krefter som er de dominerende kreftene i modellen, slik at modellen skaleres ut fra de dominerende kreftene.

#### 4.1.4 Froudes modellov

Ligning (13) kan settes opp som tre ligninger og deretter kombineres med uttrykkene gitt i tabell 4-1. Dersom første og andre ledd, henholdsvis treghetskreftene og tyngdekreftene, i ligning (13) kombineres, gir kombinasjonen resultatet vist i ligning (14):

$$\frac{F_{im}}{F_{gp}} = \frac{F_{ip}}{F_{gp}} \quad (14)$$

Som ved innsetting av uttrykkene for de respektive kreftene i tabell 4-1, gir følgende forhold, vist i ligning (15):

$$\left( \frac{v^2}{g \cdot L} \right)_m = \left( \frac{v^2}{g \cdot L} \right)_p \leftrightarrow F_{r_m}^2 = F_{r_p}^2 \quad (15)$$

I ligning (15) gjenkjennes Froudes tall som vises i formel (16):

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (16)$$

Ligning (15) sier at Froudes tall skal være likt for modell og prototype, som videre gir Froudes modellov som benyttes når treghetskrefter og gravitasjon er de dominerende kreftene. (Guttormsen, 2006). For modell Follsjø hvor det i all hovedsak er friskeisstrømning og gravitasjon som driver vannet gjennom modellen er derfor Froudes modellov benyttet. Tabell 4-2 viser de viktigste skaleringsfaktorene benyttet for Froudes modellov.

Tabell 4-2 - Skaleringsfaktorer for Froudes modellov

	Enhet	Skaleringsfaktor
Lengde, L	m	$L_R$
Areal, A	$m^2$	$L_R^2$
Volum, V	$m^3$	$L_R^3$
Tid, t	s	$L_R^{1/2}$
Vannhastighet, v	m/s	$L_R^{1/2}$
Vannføring, Q	$m^3/s$	$L_R^{5/2}$

#### Øvrige modellover

Ved å kombinere første og tredje ledd i ligning (13), henholdsvis treghetskrefter og viskøse krefter, fås Reynolds modellov, som sier at Reynoldstallet skal være likt i modell og prototype. Hvis modellen bygges ut fra Froudes modellov, slik at Froudetallet er likt i modell og prototype, vil det kunne oppstå skalaeffekter fordi Reynoldstallet ikke er korrekt modellert. Dermed blir ikke karakteristikken på den turbulente strømmingen lik i modellen. Reynoldstallet er alltid mindre i modellen enn i prototypen, slik at effekten av viskositet overdrives i modellen. Derfor forutsetter bruk av Froudes modellov, fullt utviklet turbulens, slik at viskøse krefter neglisjeres. I all hovedsak er strømmingene alltid turbulente i modellforsøk, slik at gravitasjonen blir den bestemmende kraften og Froudes modellov kan benyttes. Men ved luftinnblanding kan Froudes modellov likevel føre til skalaeffekter, da viskositetskrefte har stor betydning for luftinnblandingen, og ikke er korrekt skalert (Guttormsen, 2006).

Dersom første og siste ledd i ligning (13) kombineres, henholdsvis treghetskrefter og trykkrefter, fås Eulers modellov, som brukes for skalering av trykkrefter. For at Froudes modellov skal kunne benyttes, må det antas at vann er inkompressibelt, noe som er en rimelig antakelse ved unntak av store trykk, som for eksempel ved modellering av trykkstøt. For Follsjøen som ikke skal testes for trykkstøt, kan dermed Froudes modellov brukes.

Dersom elastisitetkrefter,  $E$ , virker inn på systemet må Machs modellov benyttes, noe som vil være tilfellet for små modeller hvor overflatespenningene er dominerende. For å unngå skalaeffekter, må vanddybdene i modellen være store nok til at overflatespenninger ikke påvirker resultatet, minst 20 mm. I modell Follsjøen er overløpsterskelen det eneste stedet hvor en vannstand lavere enn 20 mm kan oppstå. For den laveste vannføringen kan en vannstand lavere enn 20 mm ha betydning, men for alle de øvrige vannføringene stiger vannstanden mer enn 20 mm over terskelen, slik at overflatespenningene kan neglisjeres. Men for luftinnblandingen vil overflatespenningene ikke være korrekt skalert, og skalaeffekter i forbindelse med luftinnblanding kan oppstå.

## **4.2 Laboratiemodell**

### **4.2.1 Benyttet modellov og målestokk for Follsjøen**

Modellen av Follsjøen flomløp er bygget med Froudes modellov, og valgt målestokk for lengdeforholdet mellom modell og prototype er 1:40. Øvre begrensning for valg av målestokk avhenger av Vassdragslaboratoriets tilgjengelige plass og vannforsyning, samt prosjektets økonomi. Nedre begrensning vil avhenge av hvorvidt nedskaleringen gir uønskede skaleringseffekter. Ferdig bygget modell høsten 2016 vises i figur 4-1.



Figur 4-1 Bygget modell, geometrisk lik prototypen (Foto: Gunnar Fiskum)

Inkludert i modellen er en liten andel av magasinet, samt hele overløpet, sjakten og avløpstunnelen. Magasinet er representert i modellen med et basseng på 4 x 4 m, med en maksimal dybde på 0,75 m. Hoveddelen av magasinbunnen er en tilnærming til virkeligheten med kryssfinerplater. Overløpet og den tilstøtende delen av magasinet ble skannet og frest ut i 3D på MARINTEK, i en korrekt geometrisk gjengivelse av prototypen. Sjakten og avløpstunnelen er bygget i akrylplast, som gjør det mulig å studere strømmingen i den lukkede delen av systemet. Tappetunnelen fra Rinna overføringen er representert i modellen med en liten forgreining. Kanalen etter avløpstunnelen er ikke med i modellen, da det ble vurdert at kanalen ikke har innvirkning på forholdene lenger opp i flomløpet. Etter avløpstunnelen ender vannet i et utløpsbasseng. Vannet kommer inn i modellen i øvre, høyre hjørnet av magasinet, og leveres ved hjelp av to ulike pumpesystemer med en teoretisk, maksimal kapasitet på 100 og 200 l/s, inn til modellen. Foran innløpet er det plassert en diffusor for å oppnå rolig strømming i magasinet. Senere har både overløp, innløp, sjakt og avløpstunnel blitt utvidet i modellen for å møte kravene til sikker flomavledning.

#### **4.2.2 Dagens utforming**

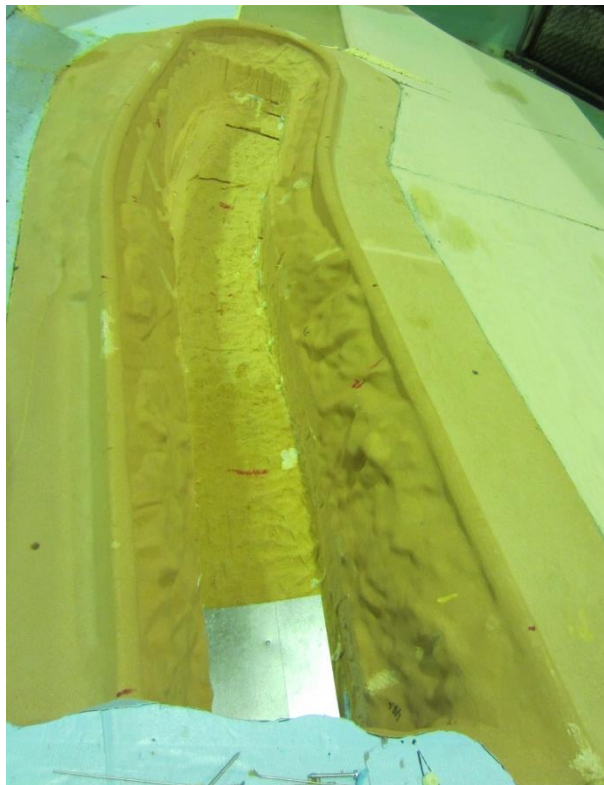
Kapasitetsmålingene gjennomført i modellen viste at Follsjø ikke tilfredstilte kravene til flomavledning for  $Q_{PMF}$ . For å møte kravene ble endringer utført i modellen og nye kapasitetsmålinger gjennomført, frem til modellen tilfredstilte kravene. Forsøkene resulterte i en ombygging av både flomløpskanal, sjakt og øvre og nedre del av avløpstunnel. Slik modellen står i laben i dag representerer det endelige resultatet for modellforsøket som ble



gjennomført for Statkraft i 2016. De utførte endringene er beskrevet nedenfor, i beskrivelsene er målene oppgitt for prototypen.

### *Flomløpskanal*

Flomløpskanalen ble senket slik at bunnen ble fjernet med en bredde tilsvarende 10 m. Øverst ble bunnen senket tilsvarende 10 m, ned til kote 409, og ved innløpet til sjakt ble bunnen senket til kote 401. Endringen ga en konstant helning på 10 %. Figur 4-2 viser flomløpet etter utgravningen.



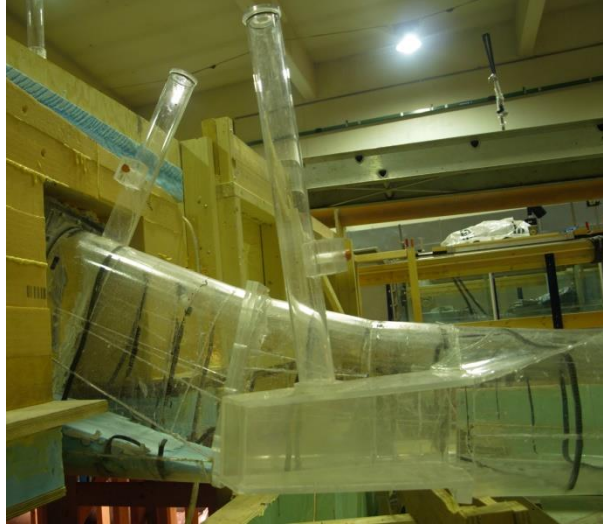
Figur 4-2 Flomløp

Dybden øverst i flomløpet er økt betydelig, og nederst er det satt på en aluminiumsplate for overgangen til den utvidede og oppbygde sjakten. Bildet av overløpet er tatt før kassen ble montert.

### *Sjakt/øvre del avløpstunnel*

Som en følge av senkningen i flomløpskanalen ble mye av sjaktens høyde fjernet, og sjakten i modellen måtte derfor bygges om. Bunnen av sjakten ble lagt på et nivå som tilsvarer kote 395 i prototypen. Deretter ble sjakten bygget opp igjen med en jevn helning til kote 400 ved innløpet. Høyre side av sjakten ble beholdt, mens sjaktens venstre side ble utvidet i snitt 5 m,

for å få en rett linje på sjakten mot krysset mellom avløpstunnel og overføringen fra Rinna. Innstrømningsforholdene i innløpet ble også forbedret ved at en utstikkende knaus i modellen ble fjernet. Figur 4-3 viser sjakten og overføringstunnelen etter ombyggingen.

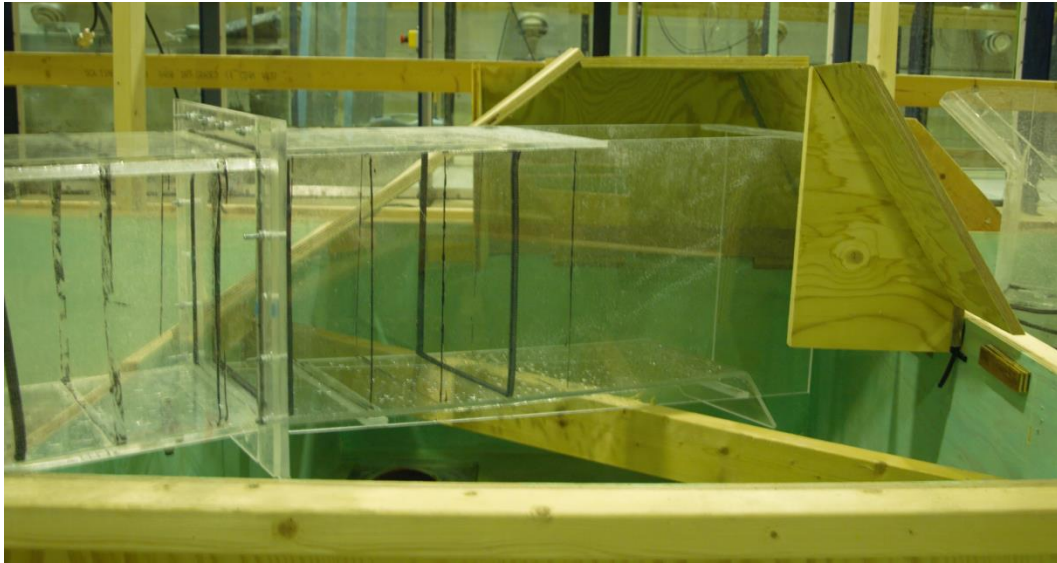


Figur 4-3 Sjakt og overføringstunnel

I bunnen av sjakten sees blå XPS-plater, benyttet for å bygge opp igjen sjakten frem til avledningskapasiteten ble godkjent. De to lufterørene sees på sjakt og overføringstunnel. På toppen av hvert lufterør er det satt på topper med hver sin o-ring som tetter lufterørene helt. I målehullene, som kan sees lavt på lufterørene, er det satt gummipropper som sørger for lufttetting når det ikke foregår målinger.

### *Utløp*

Avløpstunnelens utløp ble også vurdert som en begrensende faktor for kapasiteten. De siste 20 m av avløpstunnelen ble utvidet ved at tunnelsålen ble senket med en gradvis helning frem til maksimalt 6 m senkning ved utløpet. Tverrsnittet i utløpet ble også utført rektangulært, mens den opprinnelige avløpstunnel hadde et konvensjonelt tverrsnitt. Utløpet vises i figur 4-4.



Figur 4-4 Utløp og utløpsbasseng

Figur 4-4 viser at det nye utløpet ikke har et konvensjonelt tverrsnitt. Vannet fra avløpstunnelen ender i et utløpsbasseng, som også sees i bildet. Bildet er tatt etter at lister har blitt fjernet for å oppnå en lavere ruhet. Det er mulig å se restene av de fjernede listene. De tekniske dataene for den modifiserte utgaven av modellen er oppsummer i tabell 4-3. Her sammenlignes målene for modellen med prototypen.

Tabell 4-3 Tekniske data modell

	Modell	Prototype
<b>Magasin</b>		
Lengde [m]	4	160
Bredde [m]	4	160
Dybde [m]	0,75	30
<b>Flomløpskanal</b>		
Høyde terskel [moh]	420	420
Overløpslengde [m]	4,95	198
Høyde kanalbunn øverst [moh]	408	408
Høyde kanalbunn ved innløp [moh]	400	400
Helning kanal	10 %	10 %
<b>Sjakt</b>		
Høyde innløp [moh]	400	400
Høyde bunn sjakt [moh]	395	395
Areal innløp [m <sup>2</sup> ]	0,09	144
<b>Avløpstunnel</b>		
Lengde [m]	3,75	150
Minste areal [m <sup>2</sup> ]	0,07	108
Største areal [m <sup>2</sup> ]	0,09	144
Høydedifferanse terskel utløp	0,67	26,62

### 4.3 Målemetoder

I arbeidet med å bestemme luftmedrivning i modellen ble flere konseptuelle utførelser vurdert for å finne en god måte å måle luftmedrivningen på. Ulike målemetoder som ble vurdert er fremstilt i tabell 4-4.

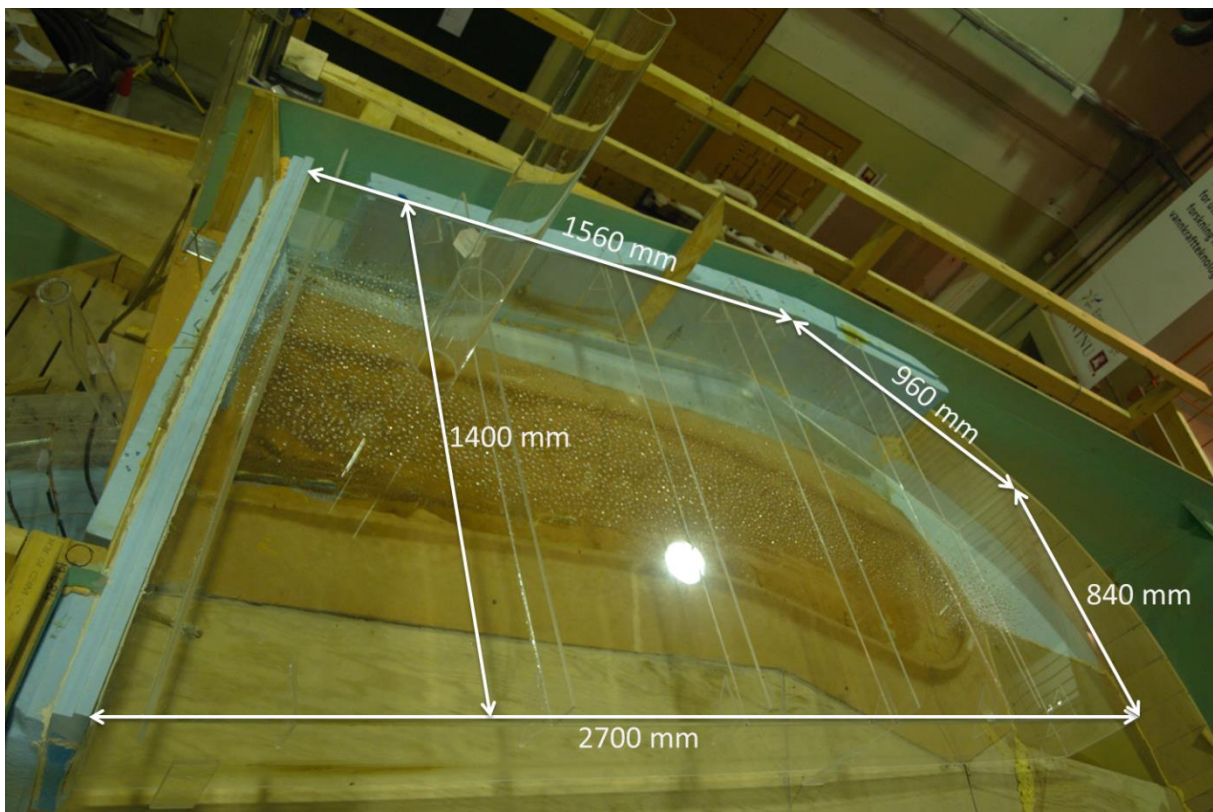
Tabell 4-4 Undersøkte målemetoder

Målemetode	Beskrivelse	Vurdering
Konseptuell utførelse		
Bygge kasse over overløp	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kasse i akryl over overløp, skjørt i vannet</li> <li>- Tetning mot dam, bærende pilarer</li> <li>- Luft passerer gjennom luftesjakt på kasse</li> <li>- Utstyr: Akryl, lim, fugemasse</li> <li>- Utgifter: Akryl og montering</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- God kontroll på all medrevet luft, enkel</li> <li>- Åpner for ulike måleinstrument i lufterør</li> <li>- Akryl gir visuell oversikt over strømning</li> <li>- Tidkrevende bygging</li> <li>- <b>Godt alternativ</b></li> </ul>
Konduktivitet gjennom tunnel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konduktiviteten gjennom tunnelelement</li> <li>- Ledningsevnen angir andel luft og vann</li> <li>- Utstyr: Strømkrets</li> <li>- Utgifter: Ingen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enkel montasje</li> <li>- Fungerer kun for vannfylt tverrsnitt</li> <li>- Utstyr finnes i laboratoriet</li> <li>- <b>Ikke et godt alternativ</b></li> </ul>
Veiing av tunnelelement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hengsle og veie tunnelelement</li> <li>- Utstyr: Hengsler, vekt</li> <li>- Kostand: Hengsler, vekt, montering</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Krever ombygging av tunnel</li> <li>- Leddet element påvirker tunnelstrømningen</li> <li>- <b>Ikke et godt alternativ</b></li> </ul>
Målemetoder for bygget kasse		
Varmetråd	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konverterer temperatur til hastighet</li> <li>- Utstyr: Probe og måleinstrument</li> <li>- Utgifter: 14.000 NOK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enkel å bruke, måleresultat direkte</li> <li>- Kostbart utstyr</li> <li>- <b>Godt alternativ</b></li> </ul>
Differensialtrykk kasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Måler <math>\Delta</math>trykk på innside og utside av kasse</li> <li>- Utstyr: Differensialtrykkcelle, slanger</li> <li>- Utgifter: Ingen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enkel å bruke</li> <li>- Finnes allerede i Vassdragslaboriet</li> <li>- <b>Godt alternativ til kontrollmål</b></li> </ul>
Trykkmåler	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Måler vanntrykk i tunnel</li> <li>- Utstyr: Trykkmåler</li> <li>- Kostnad: Ingen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enkel å bruke</li> <li>- Gir informasjon om vannstrøm/luftstrøm</li> <li>- <b>Godt alternativ til ekstra mål</b></li> </ul>
Vingehjul	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rotasjonshastighet gir strømningshastighet</li> <li>- Alternativ målemetode til varmetråds-probe</li> <li>- Utstyr: Vingehjul</li> <li>- Kostnad: ca. 6.000 NOK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enkel å bruke</li> <li>- Påvirker ikke systemet i stor grad</li> <li>- Fungerer selv for lave hastigheter</li> <li>- <b>Godt alternativ</b></li> </ul>
Pitotrør	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\Delta</math>trykk mellom totalt og statisk trykk</li> <li>- Finner hastighetstrykket, og hastigheten</li> <li>- Utstyr: Pitotrør</li> <li>- Kostnad: 1.500 NOK</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enkel å bruke</li> <li>- Finnes i Vassdragslaboriet</li> <li>- Dårlig oppløsning for lave hastigheter/trykk</li> <li>- <b>Ikke et godt alternativ</b></li> </ul>
Innsnevring i luftesjakt (Venturi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ulikt trykk og hastighet</li> <li>- Hastigheten ved Bernoulli og kontinuitetsprinsippet</li> <li>- Utstyr: Rør med innsnevring, to trykkmålere</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enkel å bruke</li> <li>- Unødvendig innvirkning på målesystemet</li> <li>- Unødvendig høyt undertrykk i kassen</li> <li>- <b>Ikke et godt alternativ</b></li> </ul>

Alternativene presentert i tabell 4-4 ble vurdert, og gjennom diskusjon ble alternativet med en kasse i plexiglass valgt. Deretter ble ulike målemetoder for måling av lufthastighet på en bygget kasse studert, for å finne de som ville gi de mest korrekte resultatene uten å påvirke systemet i for stor grad. På kassen ble en differensialtrykkcelle montert, og det ble bestemt at lufthastigheten skulle måles med en varmetrådsprobe. En trykkcelle ble påmontert i tunnelen for å kunne studere trykket fra vannstrømmen. Vannstandsmålere ble montert både ved trykkcellen, i bassenget og på hver side av overløpet inne i kassen. I de følgende kapitlene beskrives kassen som ble bygget og en mer detaljert beskrivelse av valgte målemetoder. Målenøyaktigheten for de ulike måleinstrumentene omtales i kapittel 6.3.

#### 4.3.1 Kasse

For å kunne måle medrevet luft i modellen ble det vurdert som en god metode å bygge en kasse i plexiglass (akryl) over overløpet. Bygging av kassen foregikk i Vassdragslaboratoriet, og ferdig bygget kasse med mål vises i figur 4-5.

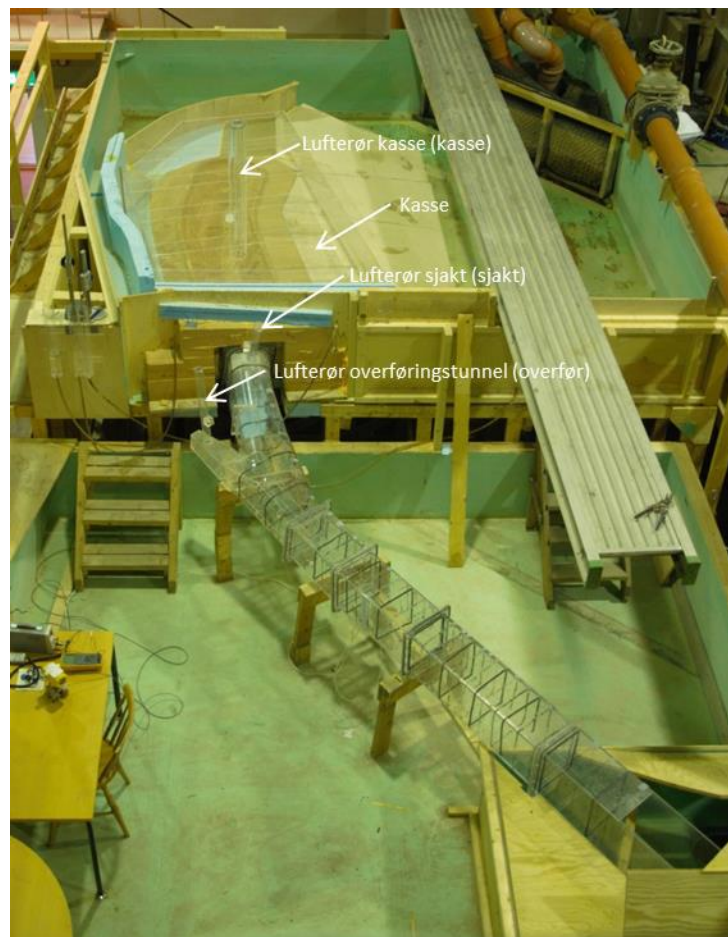


Figur 4-5 Kasse med mål

Kassen er 10 mm dypere i vannet enn overløpsterskelen. Dybden ble bestemt slik at det ikke oppsto virvler eller luftbobler som kunne trekke luft ned i systemet, andre steder enn gjennom



luftrøret på toppen av kassen, sjakt og overføringstunnel. Videre ble målehull boret på luftrørene, slik at medrevet luftmengde kunne måles. Diameteren på luftrøret på kassen kan varieres mellom 100 mm og 50 mm. Muligheten til variasjon i diameter er for å sikre at det oppnås høy nok hastighet gjennom røret, uten for stort falltap. Målinger i luftrøret med diameter 100 mm ga tilfredsstillende lufthastighet, slik at dette røret ble benyttet for alle offisielle målinger. Videre står det også et luftrør på flomløpssjakt og overføringstunnel, med diametere på henholdsvis 54 og 44 mm fra før. Alle de tre luftesjaktene har hull vinkelrett på strømningsretningen hvor måleinstrumentet kan stikkes inn for korrekte avlesninger. Når luftesjaktene skal tettes, tettes også målehullene. Modellen med bygget kasse og luftrør vises i figur 4-6.

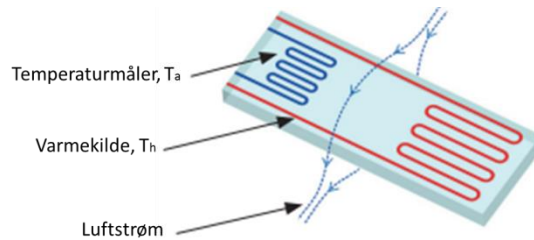


Figur 4-6 Modell med bygget kasse

Kassens utførelse i akryl gjør det mulig å studere strømmingene i overløpet, og vurdere om det oppstår uholdbart store trykkfall, utfra differansen i vannstand på innsiden og utsiden. Kassen er tettet mot innløpet med fugemasse, og står på pilarer ned i magasinet i ytterkant av overløpet.

### 4.3.2 Varmetråd

Luftstrømmen måles indirekte ved hjelp av en varmetråd og en termometer. Figur 4-7 viser prinsippet for benyttet instrument.

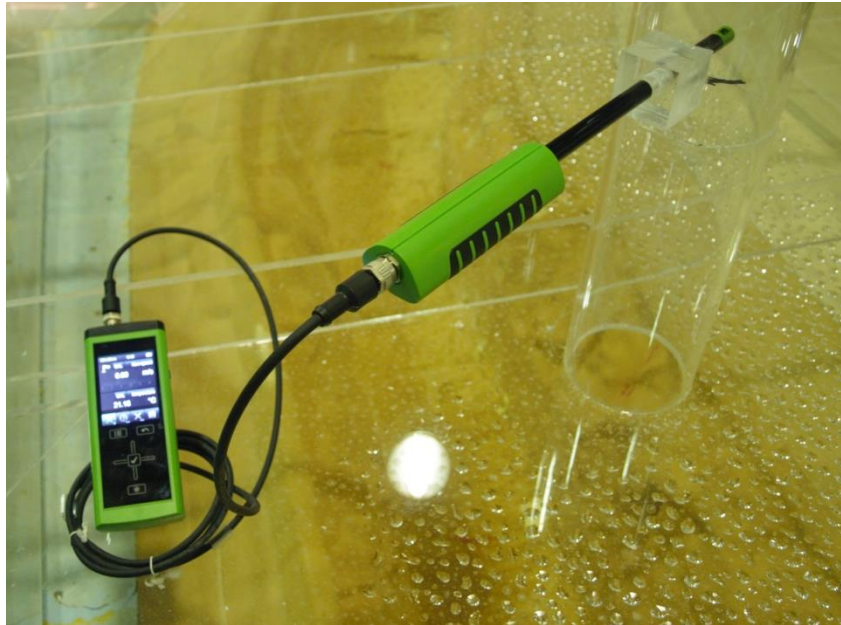


Figur 4-7 Termisk anemometer (E+E Elektronik, 2017)

Lufthastighetsføleren består av to motstander, hvor den ene motstanden måler temperaturen til den omgivende luften,  $T_a$ . Den andre motstanden er en varmekilde med en temperatur,  $T_h$ , som er større enn,  $T_a$ . Desto raskere luften strømmen forbi sensoren, desto større er kjøleeffekten på varmekilden. Den elektriske strømmen som behøves for å holde en konstant temperatordifferanse mellom varmekilden og den omgivende luften,  $\Delta T = T_h - T_a$ , har en kjent sammenheng med lufthastighet. Når sammenhengen er kjent kan lufthastigheten bestemmes. (E+E Elektronik, 2017).

Varmetråd ble vurdert som en enkel måte å måle luftstrømmen. Etter enkle forhåndsvurderinger av mulig lufthastighet, ble LOGPROBE 65 med tilhørende håndholdt måler OMNIPOINT 30, valgt, da LOGPROBE 65 hadde tilfredsstillende måleintervall. For mer detaljerte beskrivelser av instrumentet se datablad i Vedlegg C. For å oppnå korrekte målinger ble målehull borret på luftesjaktene i en avstand på seks diametere fra inngangen av røret og tre diametere fra utgangen av røret, utfra anbefalinger fra leverandøren av produktet. I tillegg var det viktig at målingene ble foretatt i senter av røret, grunnet lavere hastigheter nærme rørveggen (E+E Elektronik, 2017). Figur 4-8 viser måling av lufthastighet med varmetrådsprobe og logger.





Figur 4-8 Varmetrådsprobe og logger

Måleren OMNIPORT 30 logger lufthastighetene hvert sekund, og lagrer dataseriene. Den korteste dataserien som kunne velges var på fem minutter. For å være sikker på at målingene stabiliseres i løpet av fem minutter, ble måleserier for tre vannføringer og de fire situasjonene studert. Resultatet viste at målingene stabiliserte seg allerede etter ett minutt, se Vedlegg D for flere detaljer. For å overføre de loggede lufthastighetene til dataen ble dataprogrammet SmartGraph 3 benyttet. SmartGraph 3 laster inn dataene fra måleinstrumentet og eksporterer verdiene til Excel for videre behandling.

### 4.3.3 Differensialtrykkcelle

Ved å benytte en differensialtrykkcelle kan differansen i trykket på innsiden og utsiden av kassen måles. Trykkforskjellen sier noe om hvor stort tap som oppstår som en følge av at luften må passere gjennom et rør på kassen. Ved å studere Bernoullis ligning, (17), kan leddene for stedshøyde og hastighet strykes, da stedshøyden er lik og hastigheten er null i måleområdene. Dermed står kun trykket og tapsleddet igjen, (18).

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_f \quad (17)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_2}{\rho g} = h_f \quad (18)$$

Dersom trykkdifferansen blir for stor skaper kassen med rør et stort falltap som vil påvirke systemet kraftig. I såfall vil sammenligningsgrunnlaget med forsøk gjort høsten 2016 bli svekket, og resultatene for luftmedrivning vil kunne bli noe usikre. Ved å sammenligne målt falltap inne i kassen med det totale fallet på modellen, vil det være mulig å vurdere falltapets omfang i forhold til systemet. Det er antatt et visst falltap, men håpet er at falltapet ikke vil bli stort relativt til den totale fallhøyden. Differensialtrykkcellen ble også benyttet til å måle falltapet i tunnelen, slik at et manningstall for tunnelen kunne beregnes. Figur 4-9 viser differensialtrykkcellen benyttet i forsøkene.



Figur 4-9 Differensialtrykkcelle

Differensialtrykkcellen er av typen Aplisens smart differential pressure transmitter type APR-2000/AL. Et rør kobles på differensialtrykkcellen og går til kassen hvor trykket skal måles. Videre sammenlignes trykket opp mot lufttrykket i rommet. Trykkforskjellen måles i kPa. Måleren kobles opp mot en Aplisens konverterer, som videresender signalene via Bluetooth til datamaskin. Dataprogrammet Aplisens Rapport 2 mottar målingene, og logger trykkforskjellene over tid. Verdiene logges over en tidsperiode på 5 minutter, med en måling per sekund. Deretter eksporteres dataene til Excel og gjennomsnittet beregnes.

#### **4.3.4 Trykkmåler**

For å ha et kontrollmål på medrevet luft i vannstrømmen, og dermed indirekte måle luftstrømmen over vannflaten, ble en trykkmåler montert på et flatt parti av tunnelen. En

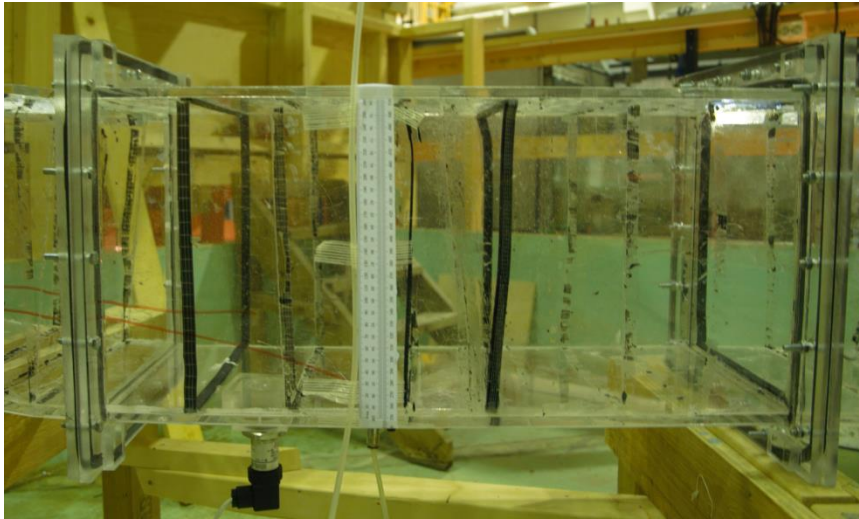
brakett med gjenger tilpasset trykkmåleren, ble festet på tunnelen. Det ble boret et lite hull i tunnelen for å slippe vann ned til trykkmålerens overflate. Trykkmåleren benyttet i forsøkene vises i figur 4-10.



Figur 4-10 Trykkmåler

Trykkmåleren er av typen WIKA S-11, og måler relativt trykk. En strømkrets går fra en strømforsyning via trykkmåleren og måleinstrumentet. Vanntrykket komprimerer måleren slik at en strekkklapp inne i trykkmåleren endrer lengde. Når strekkklappen tøyes, endres motstanden slik at det elektriske signalet endres. Det elektriske signalet kan leses av i milliampere (mA). Videre bestemmes trykket ut fra en kalibrert sammenheng mellom målt mA og trykk i mm vannsøyle. For flere detaljer om trykkmåleren se datablad i Vedlegg E. For å finne sammenhengen mellom mA og mm vannsøyle, ble trykkmåleren montert opp med en slange hvor vannstanden kunne leses av. For vannstander opp til i overkant av 1 m, ble den elektriske strømmen lest av og en sammenheng etablert. Sammenhengen vises i Vedlegg F. Trykkmålingene i forsøket gjennomføres ved at måleinstrumentet logger trykket over fem minutter og gir ut gjennomsnittet.

Ved siden av trykkmåleren måles også vannstanden i en slange med et trykkuttak på samme sted i tunnelen som trykkmåleren. Ved siden av slangen er det påmontert en målestav for avlesning av vannstanden. Dermed vil det være mulig å si noe om hvor stor andel av strømmen som er vann og luft ut fra trykk, vannstand og areal. Vannstandsmåleren vises i figur 4-11.



Figur 4-11 Vannstandsmåler ved trykkmåler

Til venstre for målestaven vises trykkmåleren, og rett under målestaven vises trykkuttaket til vannstandsmåleren. Helningen på tunnelen er tilnærmet horisontal i området hvor målingene utføres. For å fastslå hvor stor del av medrevet luft som strømmer over vannet og hvor stor del som er innblandet i vannet, sammenlignes målt vanntrykk med avlest vannstand i tunnelen. Dermed er det totale arealet av kun vann og det totale arealet av kun luft, kjent. Videre kan luftstrømmen over vannet bestemmes.

#### **4.3.5 Vannstand**

Vannstanden måles på fire ulike punkter i modellen: I bassenget, på venstre og høyre side inne i kassen og ved trykkmåleren. Vannstanden i bassenget gir grunnlag for sammenligning med forsøk utført høsten 2016, og differansen i vannstanden i og utenfor kassen kan si noe om falltapet kassen påfører systemet. Vannstanden måles på begge sider av kassen for å ha kontroll på vannstandene inne i kassen.

Vannstandene ble målt i tre vertikale rør som oppnår lik vannstand som måleområdene ved at vannslanger leder vann fra trykkuttak på de respektive måleområdene og inn i bunn av det

vertikale røret. Vannstanden leses av ved at en målestav tilknyttet en digital høydemåler senkes ned til den bryter vannoverflaten. Målingene utføres tre ganger og midles, for hver nye vannstand. Tre høydemålere ble benyttet for å måle vannstanden, ett i hvert rør. Målerne gir vannstanden i mm, med to desimalers nøyaktighet. Høydemålerene nullstilles mot overløpsterskelen ved at vannstanden i bassenget innstiller seg på terskelhøyde, og registrerer terskelen som nullpunkt. Dermed blir vannstanden over terskelen registrert. Alle vannstandsmålerne var digitale, to av typen Mitutoyo ABSOLUTE DIGIMATIC HIGHT GAUGE, og den tredje typen av et ukjent merke. De to ulike typene vises i figur 4-12.



Figur 4-12 Høydemålere

#### **4.3.6 Vannføring**

Modellen forsynes med vann fra to ulike pumpesystem for å oppnå nødvendig kapasitet. Vannføringen justeres manuelt med spjeldventiler, og måles av elektromagnetiske vannføringsmålere, Siemens SITRANS F MAGFLO MAG 5000, påmontert SIEMENS SITRANS FM MAGFLO MAG 5100 W målerør. Målerne er montert på den vertikale delen av røret som forsyner magasinet slik at røret alltid er vannfylt. Figur 4-13 viser vannføringsmåleren koblet på målerør.





Figur 4-13 Vannføringsmåler

### **4.3.7 Vannhastighet**

For å vurdere målingene for vannstand i basseng og inne i kasse, samt differensialtrykket, ble det gjort beregninger av hastigheten når vannet passerer under kassen og over overløpet på venstre side av kassen. Årsaken til at venstre side ble benyttet er at høyre side har en langsgående fjellvegg, som hindrer vannet i å gå under kassen, men heller kommer fra enden av kassen. Videre ble det antatt at gjennomsnittet av hastigheten under kassen og over overløpet kunne antas inne i kassen. Den samme beregningen ble ikke utført for lavere ruhet, da vannstanden inne i kassen er tilnærmet lik for lavere ruhet. For å finne hastigheten under kassen ble arealet under kassen målt hver 100 mm. Vannføringen inn i modellen ble deretter fordelt på kassen ved en vekting av sidenes lengde.

## **4.4 Modellforsøk luftmedrivning**

Modellforsøk for luftmedrivning ble gjennomført på modellen for ulike vannføringer og ulik ruhet for å kunne studere hvordan ulik hastighet og ruhet påvirker luftmedrivningen. For å få sammenlignbare resultater ble alle målinger utført for fire standardiserte situasjoner. Luftrøret på kassen ble alltid holdt åpen, for å sørge for lufttilførselen som vil gis i et åpent flomløp. Videre ble luftrørene på flomløpssjakt og overføringstunnel åpnet og lukket, slik at de fire ulike testsituasjonene, fremstilt i tabell 4-5, oppsto.

Tabell 4-5 Testsituasjoner

Situasjon		Lufferør flomløpssjakt	Lufferør overføringstunnel
1	Begge stengt	Stengt	Stengt
2	Sjakt åpen	Åpen	Stengt
3	Overfør åpen	Stengt	Åpen
4	Begge åpne	Åpen	Åpen

Hensikten med de fire testsituasjonene, var muligheten til å studere luftmedrivningen som oppsto i modellforsøket som ble utført for Follsjøen høsten 2016, og videre gi en vurdering av nøyaktigheten i forsøket med hensyn til luft. Løsningen med en påmontert luftesjakt benyttes ofte i modellforsøk for å unngå for gode kapasitetsmålinger i modellen, det vil dermed være mulig å vurdere kvaliteten av metoden. I tillegg åpner det for muligheten til å studere om lufttilgang på ulike steder i systemet, skaper ulik luftmedrivning.

#### 4.4.1 Dagens utforming

De første modellforsøkene for luftmedrivning ble utført på modell Follsjøen med sluttutformingen i modellforsøket for luftmedrivning, heretter kalt dagens utforming. Det ble gjennomført to uoffisielle forsøk for å teste modellen og vurdere om det var nødvendig med eventuelle endringer, se forsøksresultatene i Vedlegg G. Deretter ble et offisielt forsøk gjennomført for dagens utforming.

Etter at forsøket ble gjennomført og dataene bearbeidet, ble den maksimale luftmedrivningen ytterligere undersøkt ved å øke vannføringen stegvis tilsvarende  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  i prototypen, noe som tilsvarer  $4,9 \text{ l/s}$  i modellen, mellom  $Q_{1000}$  og  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  i prototypen. Luftmedrivningen ble målt for hver økning, for situasjonen 1, begge steng, da det var tydelig at luftmedrivningen var størst for røret på kassen. Når den maksimale luftmedrivningen ble kjent, ble en måleserie for de ulike situasjonene gjennomført også for vannføringen ved maksimal luftmedrivning. Til slutt ble luftmedrivningen undersøkt når innløpet lukker seg, ved en stegvis økning i vannføringen på samme måte som for toppunktet, men nå mellom  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  og PMF for prototypen, som tilsvarer  $98,8$  og  $138,3 \text{ l/s}$  i modellen. Ut fra studering av flomløpet var det kjent at innløpet lukket seg for en vannføring mellom  $98,8$  og  $138,3 \text{ l/s}$ . Luftmedrivningen ble målt i røret på kassen, når de andre to lufferørene var lukket.

#### 4.4.2 Lavere ruhet

Ruheten virker inn på luftmedrivningen og det var derfor av interesse å undersøke hvordan en endring av ruhet i modellen, ville endre luftmedrivningen. Ruheten i modellen ble senket fra dagens utforming ved å fjerne innlimte lister i tunnel og sjakt. For å bestemme hvor mange lister som skulle fjernes ble falltapet i modellen først undersøkt for dagens utforming. En differensialtrykkcelle ble montert på tunnelen mellom to trykkuttak, og vannføringen satt slik at tunnelen gikk full. Deretter ble trykkforskjellen logget mellom de to punktene og manningstallet beregnet ved hjelp av Mannings formel, gjengitt i formel (19).

$$Q = M \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

Hvor:

Q	=	vannføring [m <sup>3</sup> /s]
M	=	manningsfall [m <sup>1/3</sup> /s]
A	=	areal [m <sup>2</sup> ]
R	=	hydraulisk radius [m]
I	=	fall [-]

For å få et inntrykk av hvor mye falltapet ville endres ved å fjerne listene, ble Birkelands metode benyttet til å beregne ruheten for dagens utforming, samt endringen i ruhet når avstanden mellom listene avtar. Reidar Birkeland utviklet i sin masteroppgave et formelsett for beregning av ruhet (Birkeland, 2008), gjengitt i formel (20) og (21).

$$f = f_{ru} + f_{glatt} \quad (20)$$

Hvor:

f	=	total ruhetskoeffisient
f <sub>ru</sub>	=	friksjonstillegg for ruhetstillegg
f <sub>glatt</sub>	=	friksjonskoeffisient i glatt tunnel



$$f_{ru} = 8,43 \cdot \frac{L^{-0.796}}{4R} \cdot \frac{h^{1.655}}{4R} \cdot \frac{l}{4R} \quad (21)$$

Hvor:

- L = listavstand [m]
- h = listtykkelse [m]
- l = listlengde [m]
- R = hydraulisk radius [m]

Reidar Birkelands formel (20) deler den totale friksjonskoeffisienten opp i to koeffisienter,  $f_{ru}$  for ruhetstillegget og  $f_{glatt}$  for en glatt overflate i akryl uten lister. Ut fra tidligere erfaringer og Reidars undersøkelser ble  $f_{glatt}$  satt lik 0,017, mens  $f_{ru}$  finnes ved hjelp av formel (21). Manningstallet ble beregnet for dagens utforming for sjakt og tunnel, og for en økning i avstanden mellom listene til 0,25 m. Erfaring fra forsøket for flomavledningskapasitet, viser at Birkelands metode gir høyere manningstall enn hva som måles med differensialtrykkcelle. Derfor benyttes Birkelands metode her i all hovedsak til å studere endringen i manningstall når lister fjernes. Ved bruk av differensialtrykkcelle ble manningstallet også funnet for lavere ruhet, når listene var fjernet, resultatene vises i tabell 4-6. Beregningene vises i Vedlegg H.

Tabell 4-6 Resultater manningstall

Dagens utforming				Lavere ruhet			
Birkeland		Differensialtrykkcelle		Birkeland		Differensialtrykkcelle	
Sjakt	Tunnel	Tunnel	Tunnel	Sjakt	Tunnel	Tunnel	Tunnel
60 m <sup>1/3</sup> /s	50 m <sup>1/3</sup> /s	127 mm	42 m <sup>1/3</sup> /s	75 m <sup>1/3</sup> /s	70 m <sup>1/3</sup> /s	19 mm	108 m <sup>1/3</sup> /s

Resultatene i tabell 4-6 viser at manningstallet er 16 % lavere i tunnelen enn det Birkelands metode beregner. En endring i listenes avstand til 0,25 m, vil gi et manningstallet på 70 m<sup>1/3</sup>/s, i følge Birkelands metode, som tilsvarer en endring på 29 %. Det ble derfor besluttet å endre listeavstanden til 0,25 m i modellen, og forhåpentligvis oppnå at manningstallet avtar med nærmere 30 %. Etter at listeavstanden ble endret, ble falltapet på ny målt med differensialtrykkcelle og funnet til å være 19 mm, som tilsvarer et manningstall på 109 m<sup>1/3</sup>/s i modellen. For beregning se Vedlegg H. Fjerning av listene ga dermed en betydelig større

endring i falltap enn hva Birkelands metode antydte. For en så lav ruhet som endringen førte til viser Birkelands metode lavere manningstall enn målinger. Ruheten ble kraftig redusert, og dermed var mulighetene gode for å se en endring i luftmedrivningen for lavere ruhet.

Da ny ruhet var bestemt, ble et forsøk gjennomført for de samme fem vannføringene og fire situasjonene som for dagens utforming. Fremgangsmåten er som presentert i kapittel 4.4.1, men toppunkt og lukking har ikke blitt undersøkt for lavere ruhet.

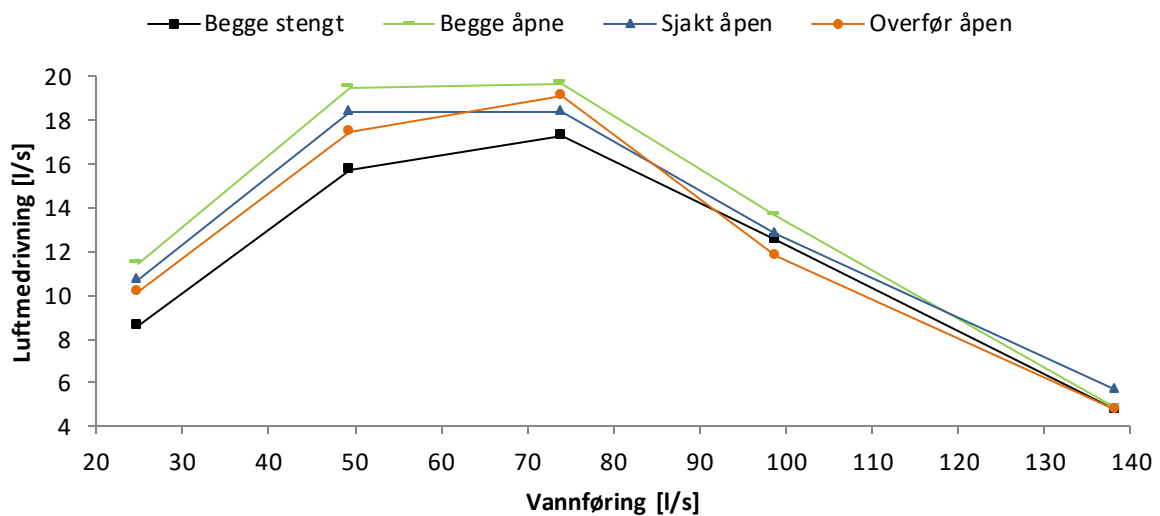
## 5 Resultater

I kapittel 5 fremstilles resultatene fra gjennomførte forsøk. Først kommer resultatene fra dagens utforming, og deretter presenteres resultatene for lavere ruhet. Linjene mellom målepunktene er kun antakelser, og er med for å gjøre avlesning av grafene enklere. De fire situasjonene presentert i kapittel 4.4, benyttes i diagrammene, se også figur 4-5 for illustrering. Diskusjon av resultatene følger i kapittel 6.

### 5.1 Dagens utforming

#### Total luftmedrivning

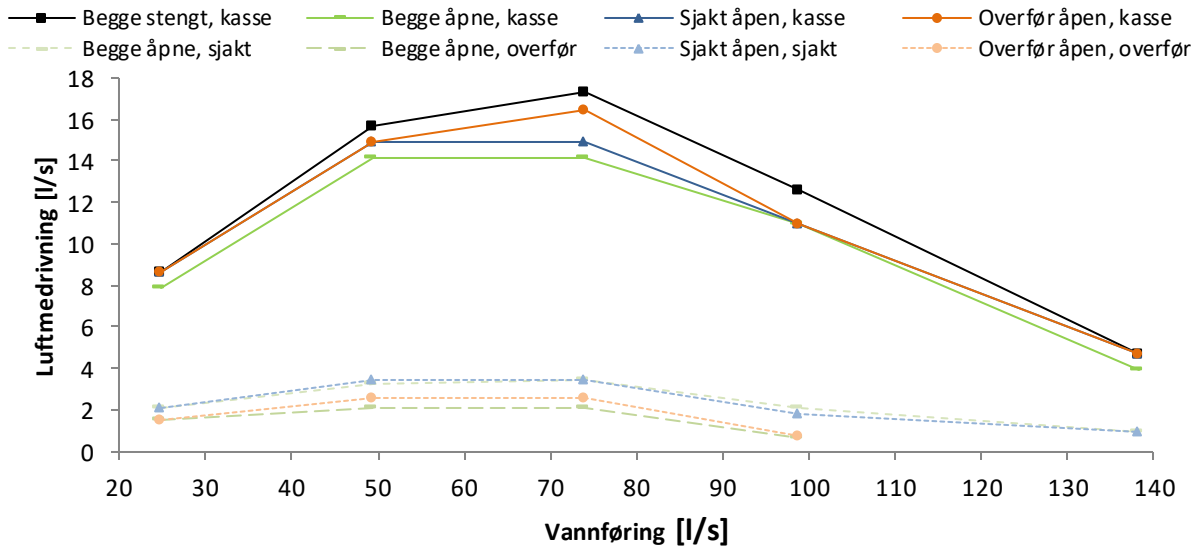
Figur 5-1 viser den totale luftmedrivningen for de fire ulike situasjonene og de fem ulike vannføringsene. Luftmedrivningen er summert for hver situasjon og gir dermed den totale luftmedrivningen for hver av de fire situasjonene. For flere detaljer se Vedlegg I.



Figur 5-1 Total luftmedrivning, dagens utforming

### Luftmedrivning i hvert lufterør

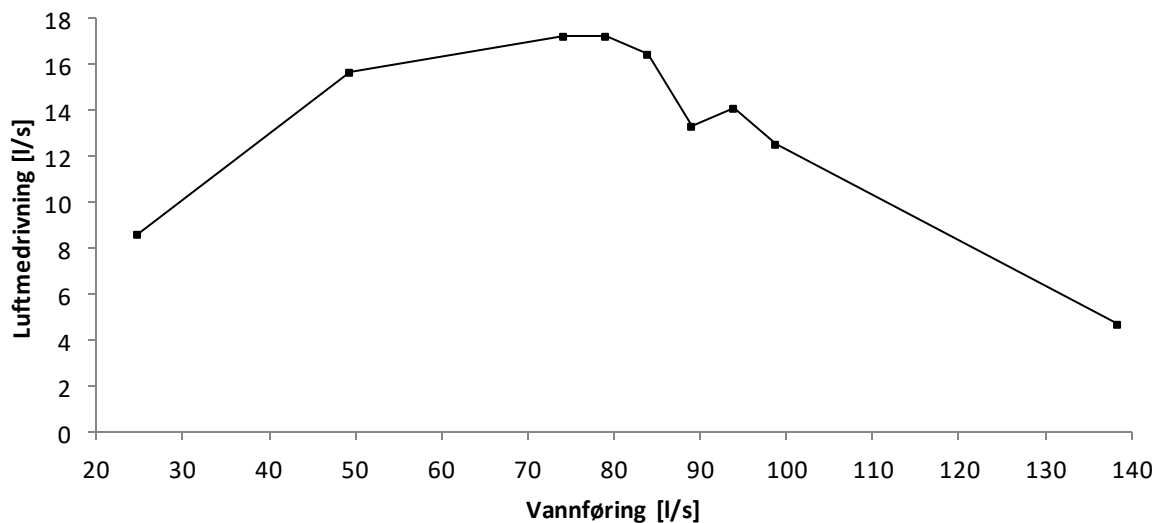
Figur 5-2 viser luftmedrivningen i alle lufterør for de fire ulike situasjonene og de fem vannføringsene. Målinger av luftmedrivning for de samme situasjonene har lik markør i diagrammet. For flere detaljer se Vedlegg I.



Figur 5-2 Luftmedrivning, dagens utforming

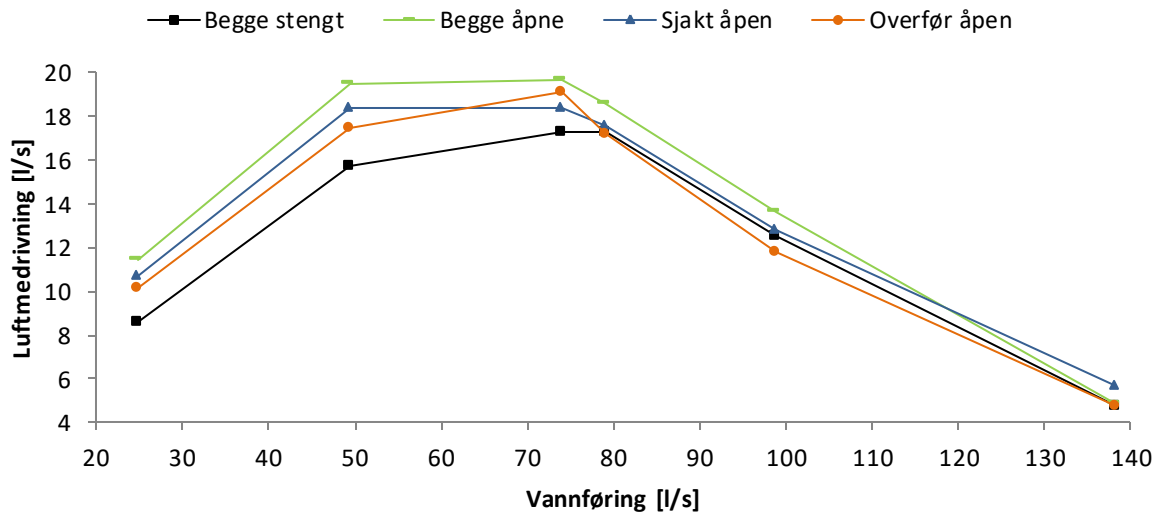
### Toppunkt

Figur 5-3 viser luftmedrivningen i røret på kassen når de andre to luftesjaktene er stengt, for en stegvis økning i vannføring mellom 74,1 og 138,3 l/s i modellen. Forsøket ble gjennomført for å finne toppunktet for luftmedrivningen. For flere detaljer se Vedlegg J.



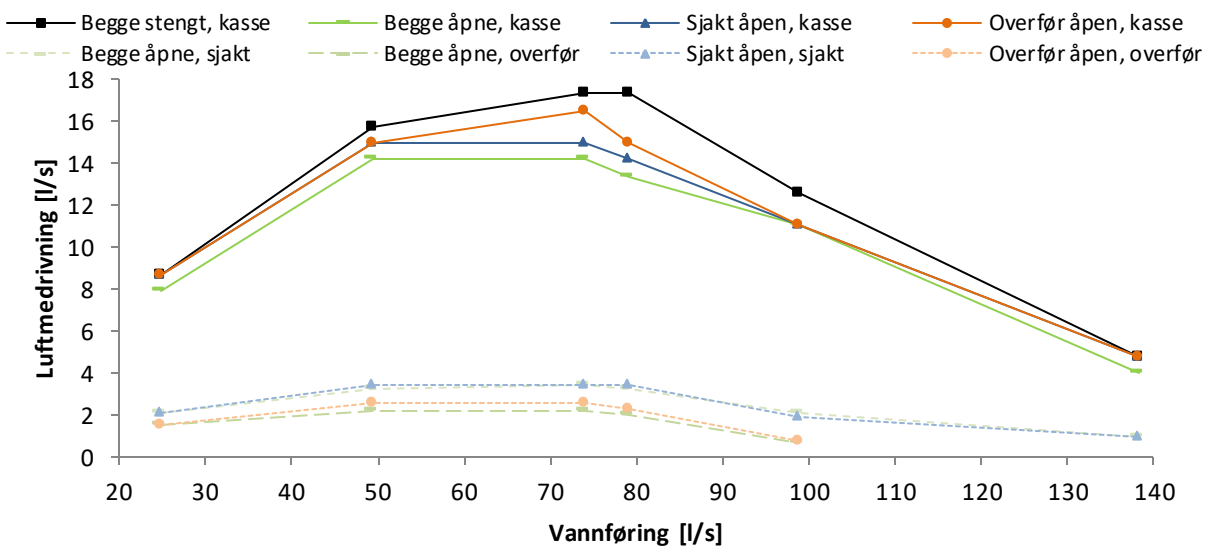
Figur 5-3 Toppunkt, dagens utforming

Figur 5-4 viser total luftmedrivning for de fire situasjonene og fem vannføringer, i tillegg er total luftmedrivning for vannføring lik 79,1 l/s, tilført diagrammet. Oppsettet i diagrammet er ellers helt likt som i figur 5-1.



Figur 5-4 Total luftmedrivning med toppunkt, dagens utforming

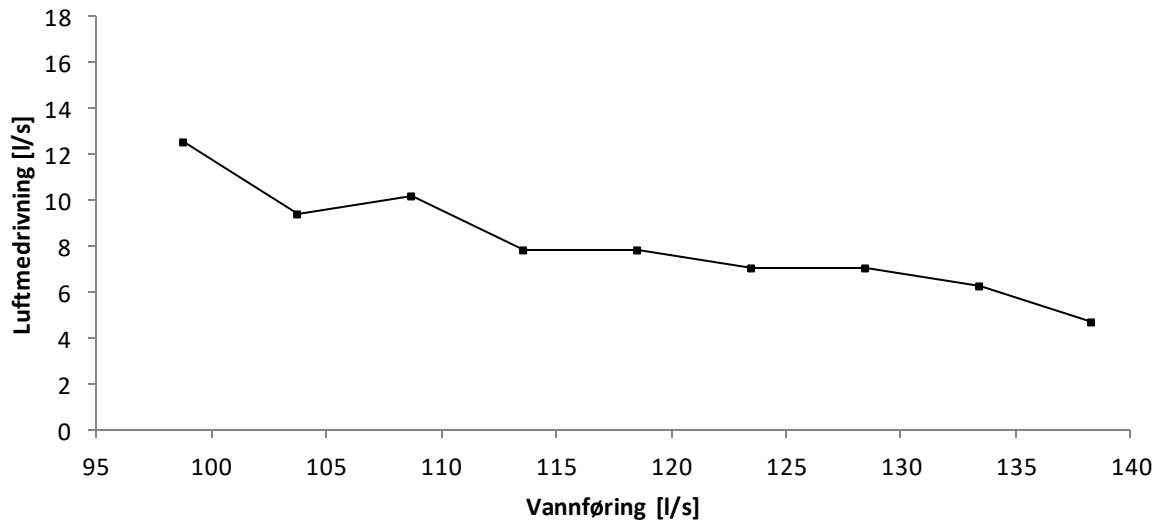
Figur 5-5 viser luftmedrivning for alle de fire situasjonene, og i tillegg til de fem faste vannføringene, er luftmedrivning for vannføring i modellen på 79,1 l/s, tilført diagrammet. Ellers er oppsettet helt likt som i figur 5-2.



Figur 5-5 Luftmedrivning med toppunkt, dagens utforming

### Lukking innløp

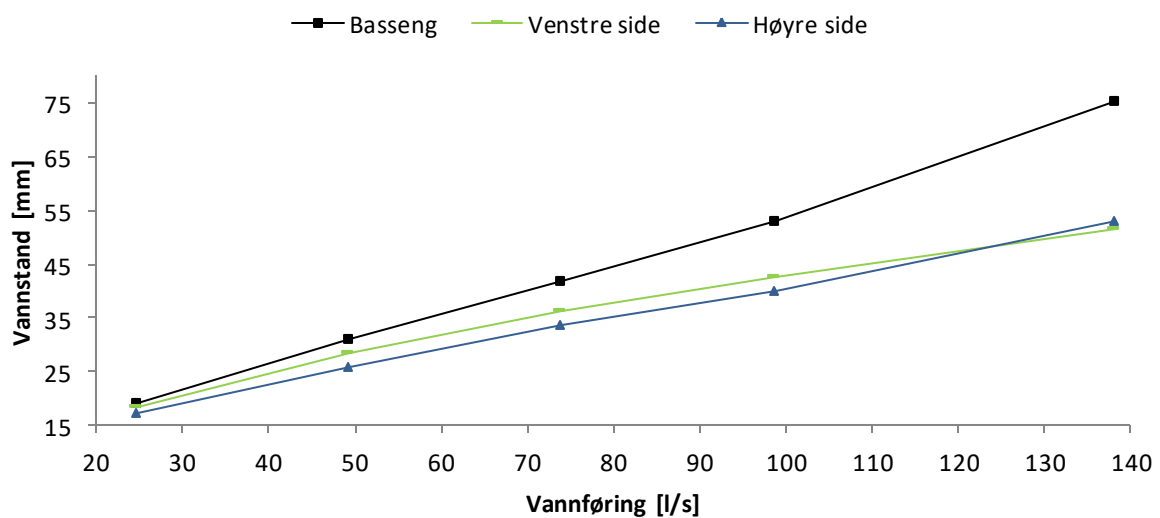
Figur 5-6 viser luftmedrivningen i røret på kassen når de andre to luftesjaktene er stengt, for en stegvis økning i vannføring mellom 98,8 og 138,3 l/s i modellen. Innløpet lukkes ved 133,4 l/s. For flere detaljer se Vedlegg K.



Figur 5-6 Dykking innløp, dagens utforming

### Vannstand

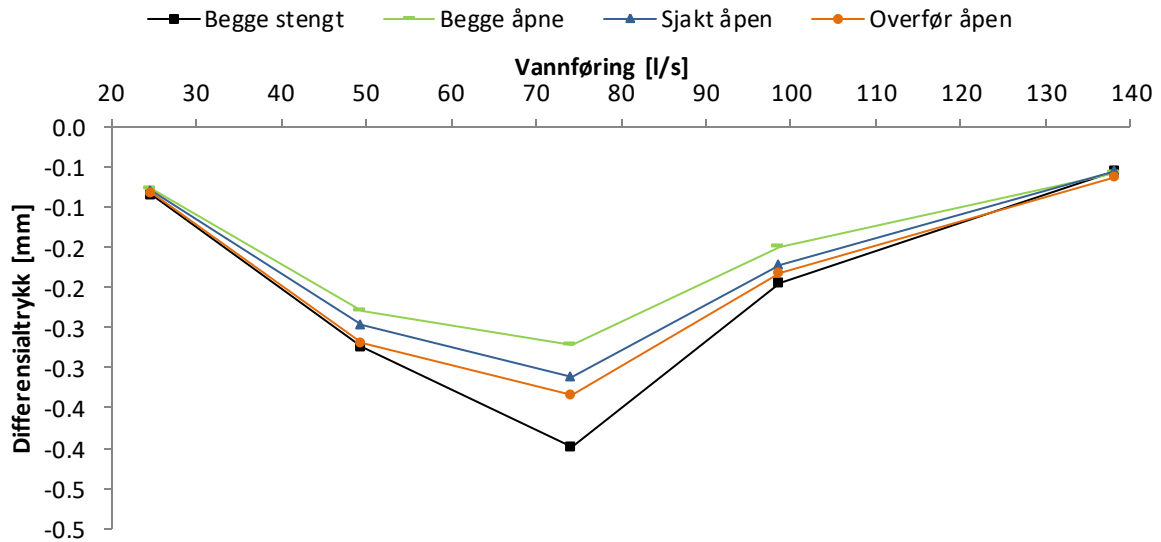
Figur 5-7 viser utviklingen i vannstanden for basseng og kasse når vannføringen økes. For flere detaljer se Vedlegg L.



Figur 5-7 Vannstand, dagens utforming

### Differensialtrykk kasse

Figur 5-8 viser diagrammet for målt differensialtrykk mellom innsiden av kassen og atmosfæretrykket. Målingene oppgis for de fem standardiserte vannføringene og de fire situasjonene. For flere detaljer se Vedlegg I.



Figur 5-8 Differensialtrykk kasse, dagens utforming

### Vannhastighet kasse

Hastigheten under kassen og over overløpsterskelen, samt gjennomsnittlig hastighet og hastighetshøyde vises i tabell 5-1. Beregningene vises i Vedlegg M.

Tabell 5-1 Hastighet og hastighetshøyde kasse

Vannføring	Hastighet under kasse v.s.	Hastighet terskel v.s.	Gjennomsnitt	Hastighets-høyde	$\Delta$ vannstand kasse v.s. og basseng	Falltap
[l/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[mm]	[mm]	[mm]
24,7	0,08	0,33	0,20	2,10	1,74	-0,36
49,4	0,15	0,43	0,29	4,28	5,02	0,74
74,1	0,23	0,50	0,37	6,88	8,15	1,27
98,8	0,31	0,57	0,44	9,81	12,99	3,18
138,3	0,43	0,66	0,55	15,15	22,2	7,05

### *Trykkmåler tunnel*

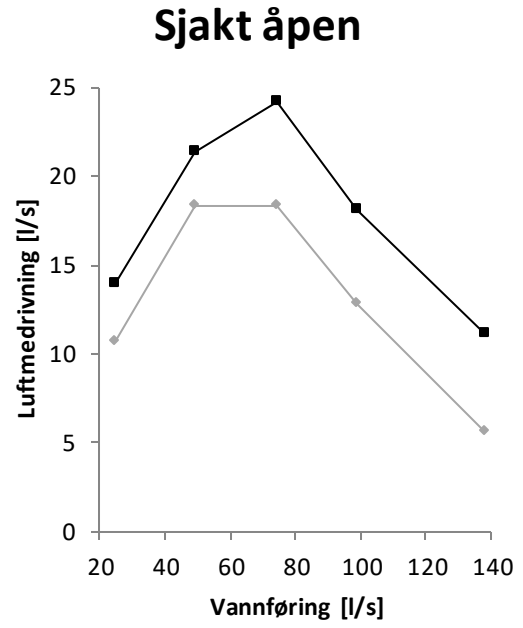
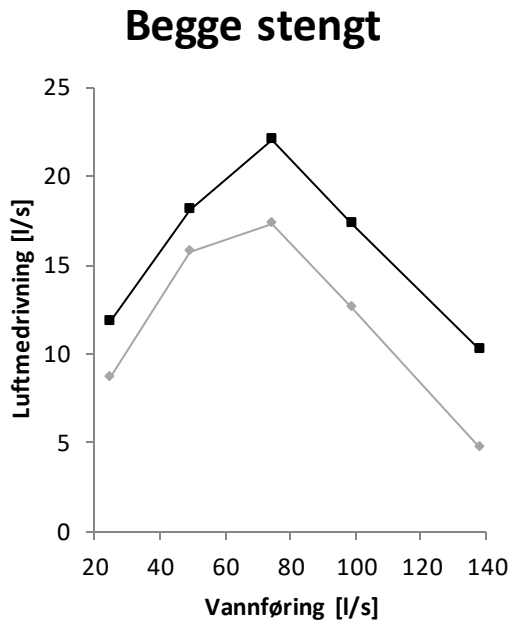
For beregning av luftstrøm over vann ble trykkmåler og vannstandsmåler benyttet. Forsøket ga dessverre ingen fornuftige resultater, men flere steder negativ verdi for luftstrøm over vann, for flere detaljer se Vedlegg N.

## **5.2 Lavere ruhet**

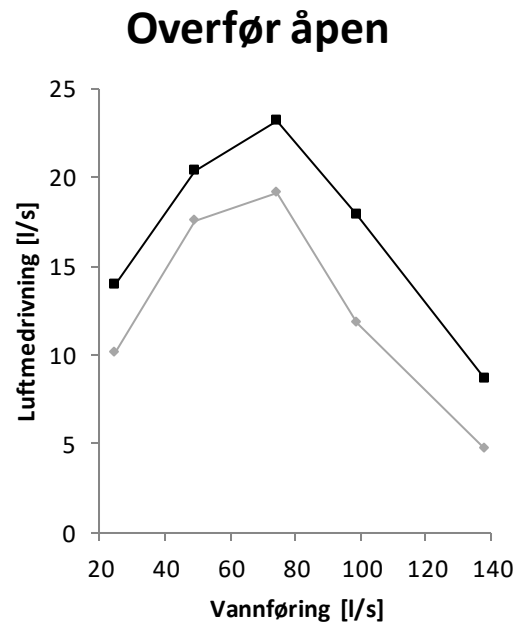
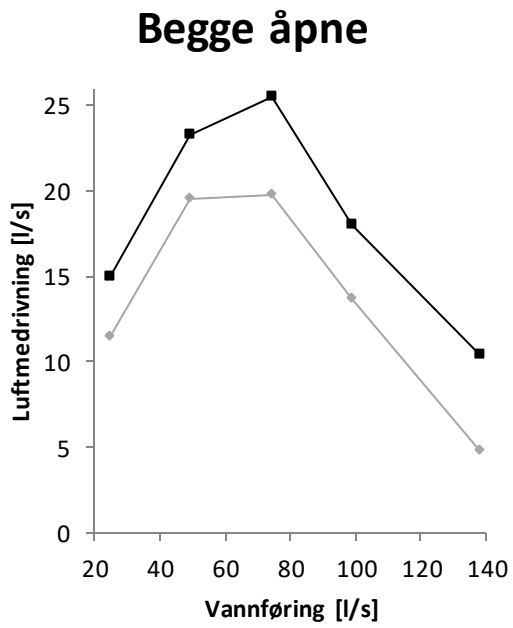
### *Total luftmedrivning*

For å sammenligne luftmedrivningen for lavere ruhet med dagens utforming, er resultatene for total luftmedrivning i de to forsøkene sammenstilt i fire diagrammer i figur 5-9. Hvert av diagrammene representerer de ulike situasjonene. Forklaringen for alle grafene er samlet i midten av figuren. For flere detaljer se Vedlegg O.





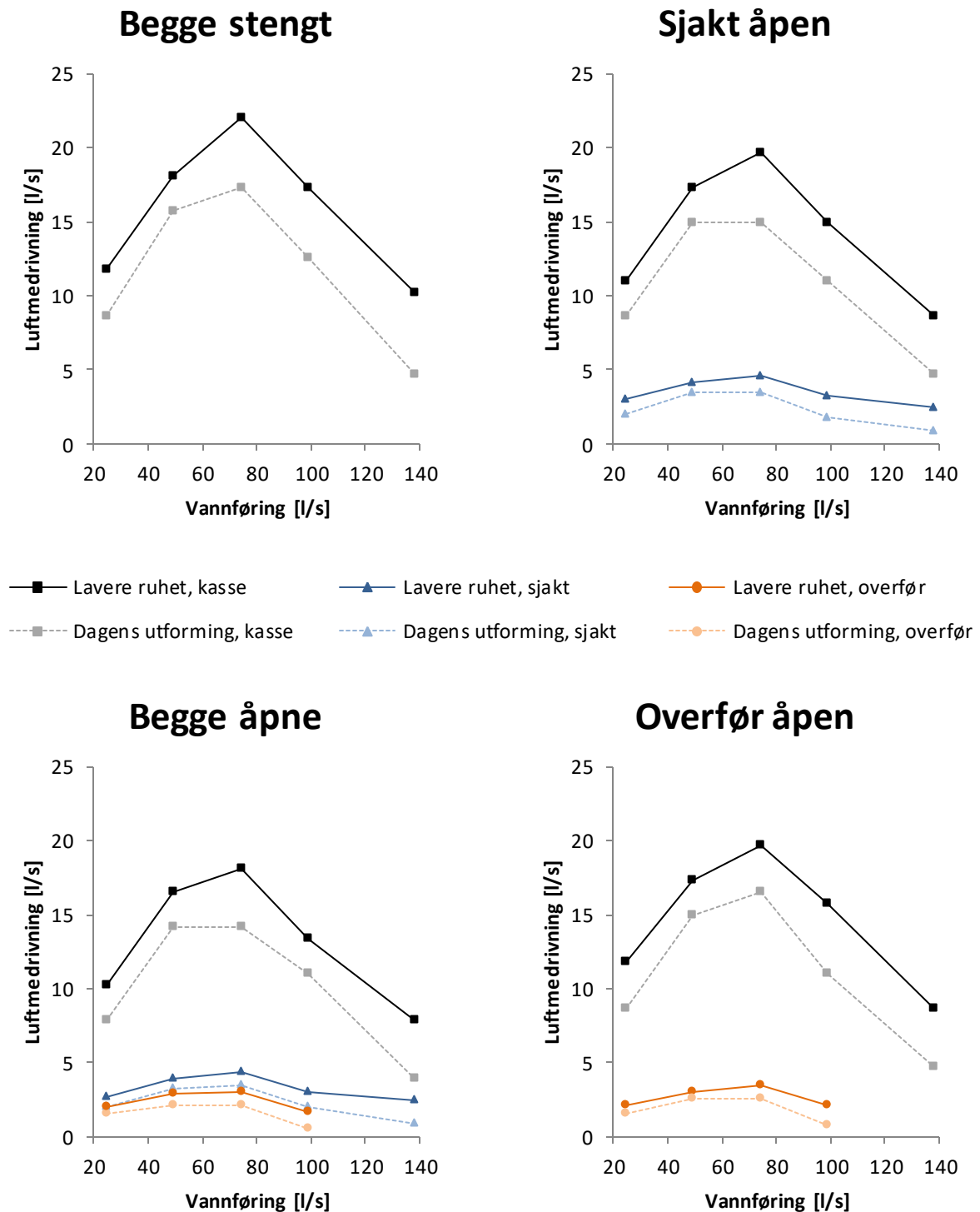
—■— Lavere ruhet    —◇— Dagens utforming



Figur 5-9 Sammenligning total luftmedrivning

### Luftmedrivning i hvert lufterør

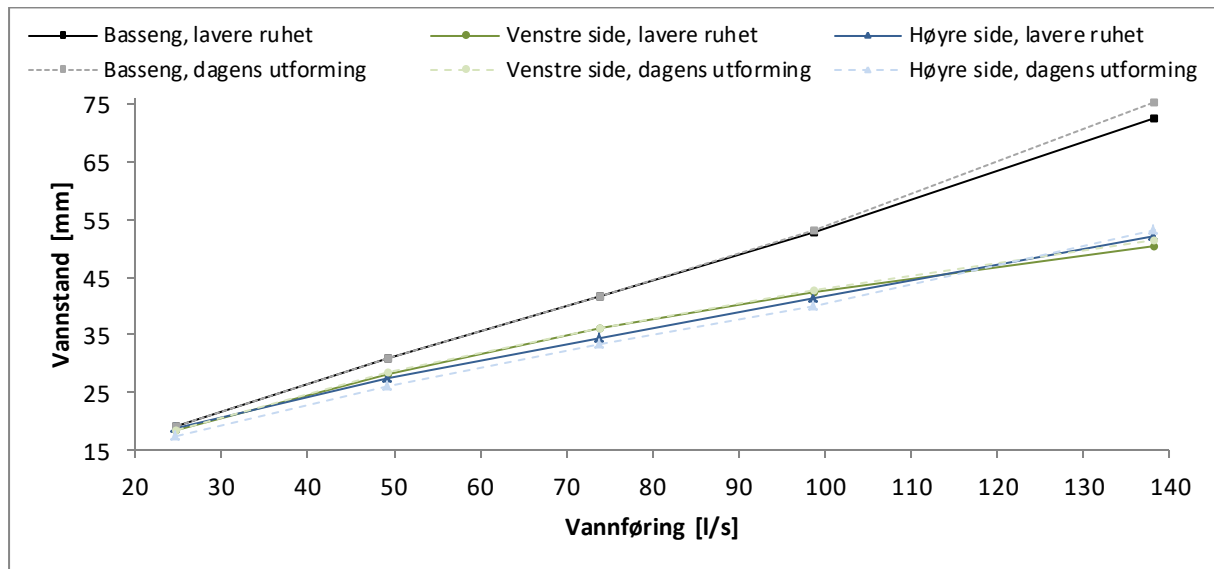
Figur 5-10 viser sammenligning av luftmedrivning i hvert lufterør for dagens situasjon og lavere ruhet. De fire situasjonene er representert i hvert sitt diagram, og forklaringen for alle grafene er samlet i midten av figuren. Hvert lufterør har lik markør i diagrammene. For flere detaljer se Vedlegg O.



Figur 5-10 Sammenligning luftmedrivning lufterør

## Vannstand

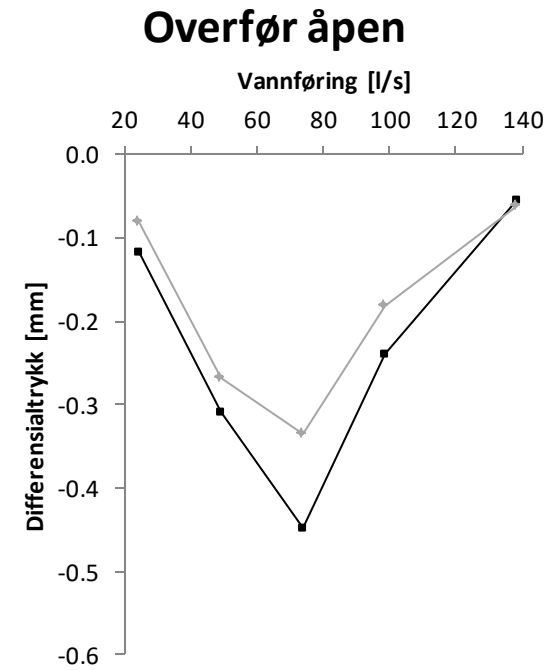
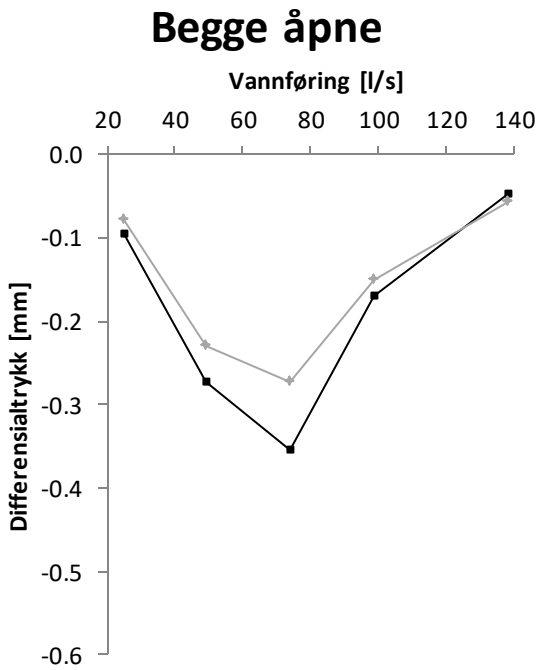
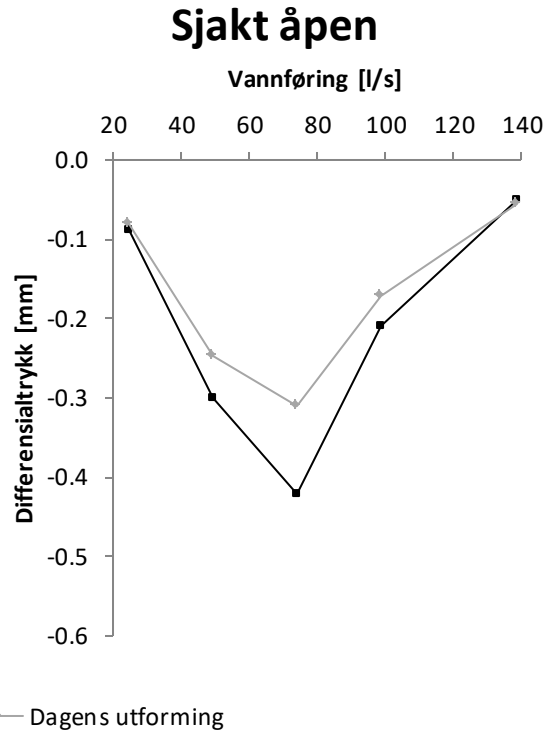
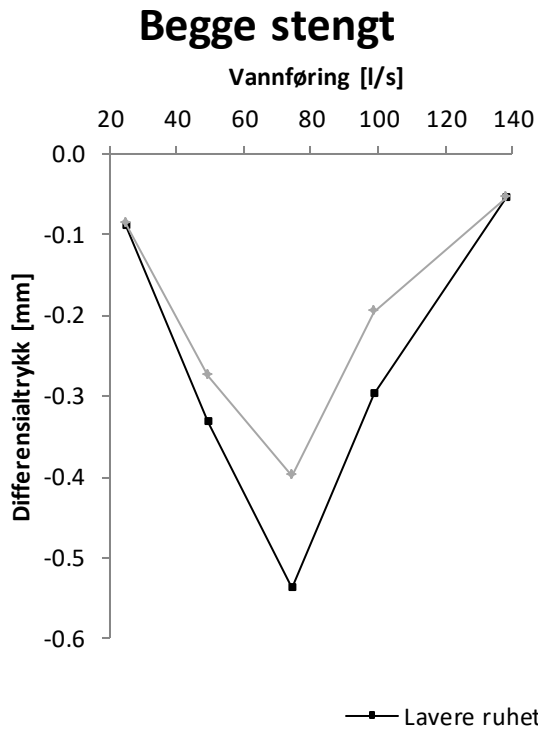
Figur 5-11 viser en sammenligning av vannstanden for dagens utforming og lavere ruhet. Hvert måleområde, basseng, venstre og høyre side kasse, har like markører for dagens situasjon og lavere ruhet.



Figur 5-11 Sammenligning vannstand

## Differensialtrykk kasse

Figur 5-12 viser en sammenligning av differensialtrykket mellom kassen og atmosfæretrykket, for dagens utforming og lavere ruhet. De fire situasjonene er representert i hvert sitt diagram. Forklaringen for alle grafene er samlet i midten av figuren, for flere detaljer Vedlegg O.



Figur 5-12 Sammenligning differensialtrykk

## 6 Diskusjon

### 6.1 Diskusjon av resultat

Nedenfor følger en diskusjon av resultatene presentert i kapittel 5 for dagens utforming og for lavere ruhet.

#### 6.1.1 Dagens utforming

##### Strømningsmønster

Ved gjennomføring av forsøkene har strømningsmønsteret i modellen blitt studert slik at det kan være mulig å forstå og forklare resultatene. En oppsummering av strømningsmønsteret for hver vannføring vises i tabell 6-1.

Tabell 6-1 Strømningsmønster, dagens utforming

Område	24,7 l/s	49,4 l/s	74,1 l/s	98,8 l/s	138,3 l/s
Overløp og innløp	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Overløp og innløp ikke dykket</li> <li>- Stor fallhøyde til bunn av overløp</li> <li>- Høy turbulens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Overløp og innløp ikke dykket, under halvfullt</li> <li>- Stor fallhøyde til bunn overløp</li> <li>- Høy turbulens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Overløp og innløp ikke dykket, innløp kun halvfullt</li> <li>- Lavere fallhøyde til bunn overløp</li> <li>- Høy turbulens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Overløp og innløp ikke dykket</li> <li>- Gjenstår 0,10-0,15 m opp til overløp</li> <li>- Høy turbulens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Overløp dykket høyre side</li> <li>- Vann strømmer parallelt med terskel høyre side</li> <li>- Terskel venstre side funksjonell, uten fall</li> <li>- Innløpet helt dykket</li> </ul>
Sjakt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frispeilstrømning i hele sjakten.</li> <li>- Ca. ¼ vannfylt</li> <li>- Mye luftbobler</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frispeilstrømning i hele sjakten</li> <li>- Sjakt er mindre enn halvfull</li> <li>- Blanding av luftbobler og vann</li> <li>- Kraftig omrøring i bend overgang sjakt og tunnel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frispeilstrømning i hele sjakten</li> <li>- Sjakten er halvfull</li> <li>- Blanding av luftbobler og vann</li> <li>- Kraftig omrøring bend, går opp i taket på tunnelen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frispeilstrømning i hele sjakten</li> <li>- Gjenstår ca. 0,2 m til taket av sjakt</li> <li>- Blanding av luftbobler og vann</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frispeilstrømning kun i begynnelsen av sjakt, hvor vannet akselereres</li> <li>- Rørstrømning videre</li> <li>- Blanding av luftbobler og vann</li> </ul>

Overføringstunnel	- Ikke vann i overførings-tunnelen	- Vannstanden har begynt å stige inn i overførings-tunnelen	- Vann i hele overførings-tunnelen - Klaring under taket	- Overførings-tunnelen er halvfull	- Overførings-tunnelen er vannfylt - Vann pulserer i luftesjakten til målehullet for luftmedrivning - Luftbobler samles i taket på overførings-tunnelen til større luftlommer, før de går opp i lufterøret. - Luftboblene kommer fra turbulensen som oppstår mellom sjakt og overføringstunnel
Tunnel	- Frispeils-strømning i hele tunnelen - Øverste laget er hvitskummende, deretter følger et klart sjikt med lite bobler, mens den nederste delen består av bobler	- Frispeils-strømning i hele tunnelen. - Tunnelen er ca. halvfull - Øverste laget er hvitskummende, deretter følger et klart sjikt med lite bobler, mens den nederste delen består av bobler	- Frispeils-strømning i hele tunnelen. - Øverste laget er hvitskummende, deretter følger et klart sjikt med lite bobler, mens den nederste delen består av bobler.	- Rørstrømning fra overgangen mellom sjakt og tunnel, og frem til tunnelen flater ut - Tydelige luftlommer under taket, der tunnelen flater ut. - Frispeil-strømning oppstår hvor helningen øker - Øverste laget er hvitskummende, deretter følger et klart sjikt med lite bobler, mens den nederste delen består av bobler	- Rørstrømning - Tilnærmet hele tverrsnittet er gjennomsiktig, utenom et sjikt på toppen - Tilnærmet ingen luftbobler nederst i tverrsnittet - I siste del av tunnelen, hvor helningen og tverrsnittet økes slipper vannet taket i tunnelen og frispeils-strømning oppstår

I videre diskusjon av resultater benyttes strømningsmønstrene beskrevet i tabell 6-1. Det er i tabellen ikke skilt på de ulike situasjonene, da det visuelt ikke er noen forskjell i strømningsmønstrene.

For overløpet er det beskrevet en god fallhøyde ned til bunnen av overløpet, noe som er av betydning da et slikt fall kan sammenlignes med jetstråler som penetrerer en vannoverflate og gir gode muligheter for innblanding av luft. Jetstråler er beskrevet i kapittel 3.1.2. Videre skaper de innlimte listene i sjakt og tunnel kraftig turbulens som også øker luftinnblanding

og vannets evne til å holde på luften. Den kraftige turbulensen i sjakt og spesielt i bendet ved sjaktens ende skaper også gode forhold for luftinnblanding.

### Total luftmedrivning

Figur 5-1 viser den totale luftmedrivningen for dagens situasjon. Figur 5-1 viser at det varierer hvilke av situasjonene som gir høyest luftmedrivning. Variasjonen presenteres i tabell 6-2, hvor nummerering 1 – 4 sier noe om rangeringen, hvor 1 representerer størst mengde.

Tabell 6-2 Rangering total luftmedrivning

Situasjon	24,7 l/s	49,4 l/s	74,1 l/s	98,8 l/s	138,3 l/s
Situasjon 1 Begge stengt	4	4	4	3	3
Situasjon 2 Sjakt åpen	2	2	3	2	1
Situasjon 3 Overfør åpen	3	3	2	4	3
Situasjon 4 Begge åpne	1	1	1	1	2

I tabell 6-2 kommer det frem at den totale luftmedrivningen er størst for situasjon 4, for alle vannføringer, unntatt 138,3 l/s. At luftmedrivningen er størst for situasjon 4, stemmer med teorien presentert i kapittel 3.1, da lufttilgangen er størst når alle rørene er åpne, slik at lufttilgangen ikke skaper noen begrensing. Men for en vannføring på 138,3 l/s er innløpet dukket, og den frie tilgangen på luft fra overløpet begrenset. For den største vannføringen gir situasjon 2 størst luftmedrivning. Situasjon 1 og situasjon 3 gir lik luftmedrivning for den høyeste vannføringen. At luftmedrivningen er lik gir mening da lufterøret på overføringstunnelen er vannfylt for den høyeste vannføringen, slik at luft ikke kan trekkes ned her, og dermed utgjør samme situasjon som situasjon 1.

Rekkefølgen på mengde medrevet luft varierer for de ulike vannføringene og situasjonene, noe som tyder på at endret strømningsbilde gir ulik grad av luftmedrivning i systemet. Den totale luftmedrivningen er større for situasjon 2 enn situasjon 3, ved de to laveste vannføringene, men ved 74 l/s skifter situasjonene rekkefølge, noe som kan tyde på at området hvor den største luftmedrivningen foregår, endres fra sjakt til nedenfor sjakten. Før

de igjen skifter rekkefølge for de neste vannføringene. Situasjon 1 gir lavest luftmedrivning for de tre minste vannføringene, noe som gir mening, da lufttilgangen begrenses når kun ett lufterør er åpent. Men for den fjerde vannføringen på 98,8 l/s gir situasjon 3 minst luftmedrivning, og for den største vannføringen er luftmedrivningen lik for situasjon 1 og 3.

#### *Luftmedrivning i hvert lufterør*

I figur 5-2 kommer det tydelig frem at luftmedrivningen er betydelig større i røret montert på kassen enn de to andre rørene, da de fire øverste grafene alle gjengir målt luftmedrivning i røret på kassen. Noe som tyder på at luftmedrivningen dermed er betydelig større i overløpet og øvre del av sjakt, enn nedover i sjakten og tunnelen. Høyere luftmedrivning i overløpet er forventet da overløpet har god tilgang på luft fra et stort rør og stor kasse, samt at omrøringen av vannet i overløpet er stor. De fire nederste grafene gir luftmedrivning i lufterøret på sjakt og overføringstunnel. Luftmedrivningen er større i røret på sjakten enn i røret på overføringstunnelen, for alle vannføringer, noe som kan tyde på at det skjer en betydelig større luftmedrivning i sjakten. Luftmedrivning videre i tunnelen kan trekke luft både fra lufterør på sjakt og overføringstunnel.

Ved å studere figur 5-1 og figur 5-2, kommer det tydelig frem at luftmedrivningen først øker for økt vannføring, og deretter avtar. Hvorvidt luftmedrivningen øker eller avtar for de ulike lufterørene og situasjonene fremstilles i tabell 6-3. En vurdering av endringene sammenlignet med målenøyaktigheten er gjennomført i kapittel 6.3.

Tabell 6-3 Endring luftmedrivning

Situasjon	Lufterør	24,7 l/s	49,4 l/s	74,1 l/s	98,8 l/s	138,3 l/s
Situasjon 1 Begge stengt	Kasse		Øker	Øker	Avtar	Avtar
	Sjakt		Øker	Lik	Avtar	Avtar
Situasjon 2 Sjakt åpen	Kasse		Øker	Lik	Avtar	Avtar
	Sjakt		Øker	Lik	Avtar	Avtar
Situasjon 3 Overfør åpen	Kasse		Øker	Øker	Avtar	Avtar
	Overfør		Øker	Lik	Avtar	-
Situasjon 4 Begge åpne	Kasse		Øker	Lik	Avtar	Avtar
	Sjakt		Øker	Øker	Avtar	Avtar
	Overfør		Øker	Lik	Avtar	-



Tabell 6-3 viser at luftmedrivningen øker for alle situasjoner og i alle lufterør, for en økning i vannføring fra 24,7 til 49,4 l/s. Ved en økning i vannføring øker også hastigheten i vannet, noe som kan ses ved å beregne vannhastigheten utfra vannstand i tunnelen og vannføringen inn i systemet. I samsvar med teorien i kapittel 3, øker luftmedrivningen ved økt hastighet fordi transportkapasiteten øker. Turbulensen økes også for økt hastighet, slik at muligheten til å blande inn luften i vannet økes.

Når vannføringen økes ytterligere fra 49,4 til 74,1 l/s viser tabell 6-3 at det varierer om luftmedrivningen øker for alle lufterørene. Luftmedrivningen i lufterøret på overføringstunnelen øker ikke for noen av situasjonene hvor lufterøret er åpent. At luftmedrivningen ikke øker, tyder på at luftmedrivningskapasiteten i tunnelen og bendet har nådd sitt maksimale nivå, og at en ytterligere økning i hastighet og turbulens ikke gir mer luftmedrivning. For lufterøret på sjakt og kasse varierer det om luftmedrivningen øker eller ikke. For situasjon 1 og 3 øker luftmedrivningen i lufterøret på kassen, noe som tyder på at når enten de to andre luftesjaktene er stengt, eller kun lufterøret på overføringstunnelen er åpen, skapes forhold som ved økt vannføring også gir økt luftmedrivning i kassen. Mens derimot lufterøret på sjakten kun øker sin luftmedrivning for økt vannføring, i situasjon 4, når begge lufterørene er åpne.

For en ytterligere økning i vannføring fra 74,1 til 98,8 l/s, viser tabell 6-3 at luftmedrivningen avtar for samtlige lufterør. Reduksjonen viser at den maksimale luftmedrivningen er nådd og en ytterligere økning i vannføring ikke gir en større luftmedrivning, noe som stemmer godt overens med teorien presentert i kapittel 3. Transportkapasiteten til systemet har antakeligvis nådd sin maksimale grense, og ytterligere økning i hastighet gir ikke bedre transportkapasitet. Årsaken til at luftmedrivningen avtar så betydelig og ikke holder seg tilnærmet konstant, antas å være reduksjon i det frie arealet over vannet i sjakt og tunnel, slik at mengden luft som kan strømme parallelt med vannet, grunnet skjærkrefter mellom luft og vann, blir betydelig mindre. I tillegg gir økt vannføring en lavere fallhøyde i overløpet, slik at innblandingsforholdene her også avtar.

Det samme forekommer også for økt vannføring fra 98,8 til 138,8 l/s, luftmedrivningen avtar for samtlige lufterør. I tillegg lukkes også innløpet i intervallet mellom 98,8 og 138,8 l/s, slik

at tilgangen på fri luft fra kassen begrenses betydelig. Ved 138,3 l/s står vannstanden opp i luftesjakten på overføringsrøret, slik at det ikke skjer noen luftmedrivning her.

### *Toppunkt*

I et forsøk på å se om luftmedrivning kunne økes ytterligere mellom 74,1 og 98,8 l/s ble det gjennomført et forsøk hvor vannføringen ble økt fra 74,1 til 98,8 l/s, med en stegvis økning på 4,95 l/s. Luftmedrivning ble målt i røret på kassen, da den høyeste luftmedrivningen forekommer her. Figur 5-3 viser resultatene av forsøket, og det kommer tydelig frem at maksimal luftmedrivning ligger i området mellom 74,1 og 98,8 l/s vannføring. Dermed ble en måleserie for en vannføring på 79,1 l/s fullført, for å se på resultatene. Dataene er lagt inn i figur 5-4 og figur 5-5 og viser at luftmedrivning avtar i samtlige rør, bortsett fra røret på kassen for situasjon 1 og røret på sjakten, for situasjonen 2. Når luftmedrivningen avtar viser det at den maksimale luftmedrivning enten er ved 74,1 l/s eller mellom 74,1 og 79,1 l/s.

### *Lukking innløp*

Figur 5-6 viser forsøksserien som undersøker luftmedrivningen når innløpet dykkes. I følge tabell 6-1 går tunnelen delvis full allerede ved 98,8 l/s, mens innløpet ikke lukkes før en ytterligere økning i vannføringen til 133,4 l/s. Innløpet pulserer fortsatt, slik at det slippes noe luft støtvis ned i sjakten. I sjakten er det fortsatt friskeisstrømning frem til omrøringen mellom overføringstunnelen. Ved en vannføring på 138,3 l/s, dykkes innløpet helt.

Figur 5-6 viser en stegvis avtaking i luftmedrivning som en følge av stadig reduser areal for luft over vannet. Det ser ut som om luftmedrivningen først avtar brått, før den stiger noe igjen, deretter avtar luftmedrivningen sterkt før det flater ut. Reduksjon og deretter en stabilisering danner en trend gjennom datasettet, helt frem til siste målepunkt, som ikke har en stabilisering i luftmedrivning, men avtar ytterligere. Det forventede droppet ved vannføring lik 133,4 l/s, hvor innløpet dukkes inntreffer altså ikke, kun en jevn reduksjon. At droppet uteblir skyldes antakeligvis at lukkingen av innløpet skjer gradvis.

### *Trykkmåler tunnel*

Resultatene fra trykkmåleren ble forsøkt benyttet til å vurdere hvor stor andel av luftmedrivningen som strømmer i området over vannstrømmen og hvor mye som er innblandet i vannstrømmen. Målingene anga hvor stor andel av vannstanden i tunnelen som var vann og hvor stor andel som var luft. Men for å beregne luftstrømmen innblandet i vannet

måtte en hastighet velges, og det ble antatt lik hastighet som for vannet. Dermed kunne det antas at differansen mellom målt luftstrøm med varmetrådsprobe og beregnet luftstrøm i vannstrømmen, tilsvarte luftstrømmen over vannflaten. Men dette ga som nevnt tidligere ingen fornuftige resultater. For å oppnå fornuftige og sikre resultater må luftboblenes hastighet kunne fastslås mer nøyaktig og vannstanden avlest på tunnelen bør kunne leses av med en høyere nøyaktighet for samsvarende trykkmålinger, da vannstanden her pulserer over et stort område.

### **6.1.2 Lavere ruhet**

#### *Strømningsmønster*

Strømningsmønsteret for lavere ruhet er svært likt som for dagens utforming. Det eneste som kan observeres av ulikheter er at turbulensen i sjakt og tunnel er noe lavere, fordi det er færre lister. Bak hver list skapes en tydelig turbulent strømning, og noe som nå inntreffer med en lavere hyppighet. Dermed blir strømmingen noe jevnere mellom listene. Bortsett fra de nevnte forskjellene er strømmingene som beskrevet i tabell 6-1 i kapittel 6.1.1.

#### *Total luftmedrivning*

Sammenligningen av den totale luftmedrivningen i figur 5-9, viser tydelig at luftmedrivningen har økt for en lavere ruhet i sjakt og tunnel. Den totale luftmedrivningen er større for samtlige situasjoner og vannføringer. Den største forskjellen sees for en vannføring i modellen på 74,1 l/s, her har luftmedrivningen økt mest i forhold til dagens utforming. Kurvene har noe ulik utforming for lavere ruhet enn for dagens utforming, noe som illustrerer at en endring av ruheten har ført til endring i hvor luftmedrivningen hovedsakelig foregår.

Lavere turbulens skaper mindre omrøring, som egentlig skulle ført til lavere luftinnblanding. Men turbulensen er antakeligvis fortsatt stor nok, slik at lavere turbulens ikke begrenser luftinnblandingen. Ruheten er uendret i overløpet. Lavere turbulens i sjakt og tunnel gir også mer kompakt vann, som tar opp mindre av arealet i sjakt og tunnel, slik at det er mer plass til luft over vannspeilet.

#### *Luftmedrivning i hvert lufferør*

Sammenligning av luftmedrivningen for hvert enkelt lufferør i figur 5-10, viser det samme som figur 5-9, luftmedrivningen har økt i samtlige lufferør og situasjoner. For lufferøret på kassen for situasjon 2 og 4, hvor maksimal luftmedrivning var nådd allerede ved 49,4 l/s i

modellen for dagens utforming, har lavere ruhet ført til at luftmedrivningen også her økes frem til 74,1 l/s, og ikke lenger stabiliseres ved 49,9 l/s.

## 6.2 Kassens innvirkning

Det ble antatt at kassen ville ha en innvirkning på systemet, i forhold til en utforming uten kasse. For å undersøke hvor stor innvirkningen ville være ble vannstandsmålinger og differensialtrykkmålinger utført i og utenfor kassen. Resultatet av målingene er presentert i kapittel 5.1 og 5.2 og diskuteres nedenfor.

### 6.2.1 Vannstand

#### *Dagens utforming*

Vannstanden ble målt på tre punkter, basseng og høyre og venstre side av overløp, for hver situasjon og vannføring. Ved sammenligning av vannstand for de fire situasjonene, er vannstanden tilnærmet lik for lik vannføring. Det største avviket var på 1.4 mm, noe som var tilfellet for kun en situasjon. Ellers var alle avvikene lavere enn 1 mm. Dermed ble gjennomsnittet for hver vannføring benyttet i figur 5-7.

Figur 5-7 viser at vannstanden i bassenget alltid er høyere enn inne i kassen. Forskjellen øker ettersom vannføringen blir større, noe som illustrerer at kassen virker inn på systemet. Det ville være naturlig å anta at vannstanden inne i kassen ville være høyere enn utenfor, ettersom differensialtrykkcellen måler et undertrykk inne i kassen, men lavere vannstand inne i kassen skyldes mest sannsynligvis at vannet har en høyere hastighet her enn utenfor. Økningen i hastighet skyldes at kassen skaper en innsnevring mot bunnen som vannet må passere.

Figur 5-7 viser at vannstanden ved samtlige målere stiger for økende vannføring, og at vannstanden i bassenget øker mer enn vannstandene inne i kassen. Ved en vannføring tilsvarende  $Q_{PMF}$ , er vannstanden i magasinet i overkant av 20 mm høyere enn inne i kassen, mens differansen kun er i underkant av 2 mm for den laveste vannføringen. Målingene tyder på at økt vannføring krever et høyere trykk for å drive vannet inn i kassen, og dermed oppstår vannstandsstigningen. Vannstandsstigningen inne i kassen øker ikke like mye grunnet den økte hastigheten på vannet.

### *Lavere ruhet*

Ved lavere ruhet kan det sees i figur 5-11 at utviklingen er tilnærmet den samme, sammenlignet med dagens utforming, for alle målingene. For venstre side inne i kassen og i bassenget, er vannstandene i praksis helt identiske for dagens utforming og lavere ruhet, det er kun avvik mindre enn 1 mm. Unntaket er ved vannføring tilsvarende  $Q_{PMF}$ , da dagens utforming gir en høyere vannstand enn for lavere ruhet, noe som også er tilfellet for høyre side. Forskjellen tyder på at lavere ruhet gir en lavere motstand, slik at en lavere vannstandstigning er nødvendig for å presse vannet gjennom tunnelsystemet. Vannstanden på høyre side av bassenget er lavere for dagens utforming enn for lavere ruhet, fremt til  $Q_{PMF}$ . Lavere vannstand tyder på at hastigheten for dagens utforming er høyere enn for lavere ruhet, på høyre side av kassen.

## **6.2.2 Differensialtrykk**

### *Dagens utforming*

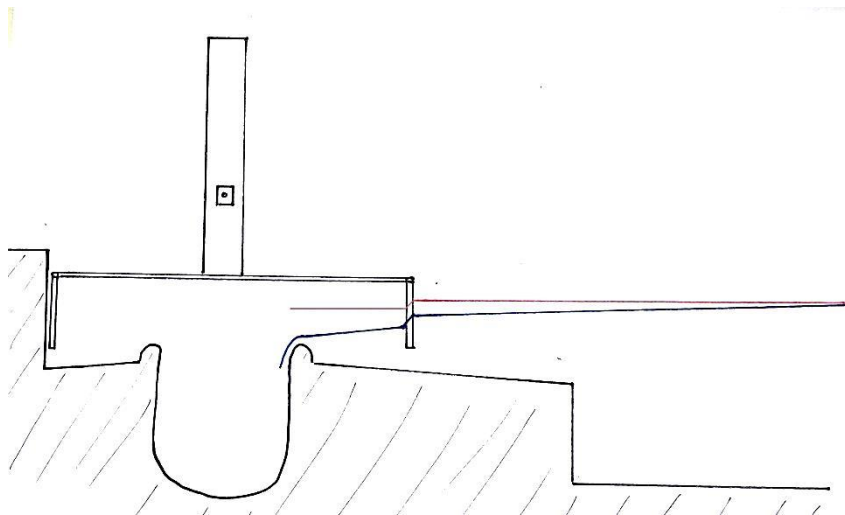
Figur 5-8 viser at differensialtrykket inne i kassen øker for økende vannføring frem til  $Q_{1000}$ , før differensialtrykket deretter avtar igjen. Målingene stemmer godt overens med resultatene av luftmedrivning i figur 5-1 og figur 5-2, som viser en økning i luftmedrivningen frem til  $Q_{1000}$ , og deretter en reduksjon for økt vannføring. Når luftmedrivningen er høy, vil falltapet i lufterøret på kassen være høyt, og dermed vil undertrykket inne i kassen øke. Når derimot luftmedrivningen avtar igjen minsker falltapet og dermed også undertrykket inne i kassen.

### *Lavere ruhet*

For en lavere ruhet viser figur 5-12 at differensialtrykket er større for lavere ruhet enn for dagens utforming, altså et større falltap for målingene med lavere ruhet. Ved å se på figur 5-9 og figur 5-10, hvor luftmedrivningen sammenlignes for dagens utforming og lavere ruhet, kommer det frem at luftmedrivningen er større for lavere ruhet, noe som genererer en større hastighet gjennom lufterøret og et større falltap. Differensialtrykkmålingene stemmer derfor godt overens med målingene for luftmedrivning.

## **6.2.3 Oppsummering kassens innvirkning**

For å oppsummere kassens innvirkning har hastighet og hastighetshøyde på vannet som strømmer under kassen mot overløpet blitt beregnet i tabell 5-1. I tillegg viser figur 6-1 en skisse av energi- og trykklinja for vannet.



Figur 6-1 Energi- og trykklinje kasse

Figur 6-1 viser at vannhastigheten øker inn mot kassen, og under skjørtet på kassen økes hastigheten betydelig, og et falltap oppstår. Etter passeringen av kassen øker hastigheten ytterligere mot overløpet. Differensialtrykket inne i kassen er for alle målinger lavere enn 1 mm, og sett i sammenheng med den totale fallhøyden i modellen på 0,67 m, er differensialtrykket lite. Videre viser vannstandsmålingene utført i bassenget og inne kassen at vannstanden varierer innenfor og utenfor kassen, og at differansen øker for økende vannføring. Tabell 5-1 viser hastighetshøyden i vannet inne i kassen, og sett bortsett fra målingene ved vannføring 24,7 l/s, utgjør hastighetshøyden en betydelig andel av høydedifferansen mellom basseng og kasse. Trykkuttaket for måling av vannstand i bassenget er plassert midt i bassenget, et stykke unna både overløp og tilførselen av vann, slik at hastigheten her kan antas lav. Den gjenstående andelen av høydedifferansen mellom basseng og kasse skyldes dermed falltap. Falltap vil være noe større enn hva differansen viser, da undertrykket i kassen gir en heving av vannstanden. Men målingene av differensialtrykket viser at hevingen er liten. De beregnede falltapene i tabell 5-1 viser et meget lite falltap sammenlignet med den totale fallhøyden på 0,67 m i modellen. Når vannføringen er 24,7 l/s, oppstår et negativt falltap. Falltapet vil ikke være negativt og, derfor antas det at undertrykket hever vannstanden så høyt at falltapet fremstår negativt i tabellen.

### 6.3 Målenøyaktighet og etterprøvbarehet

For å vurdere kvaliteten på forsøkene må målenøyaktigheten studeres for de ulike måleinstrumentene, og ekstra forsøk for kontroll av resultatene må gjennomføres. På denne måten verifiseres kvaliteten og forsøket kan gjennomføres flere ganger med samme resultat.

Det er viktig å undersøke målenøyaktigheten til hvert instrument for å kunne fastslå at variasjoner i målingene befinner seg utenfor målenøyaktigheten, slik at endringer ikke kan skyldes målenøyaktighet, men faktiske endringer i situasjon/modell. I tabell 6-4 vises målenøyaktigheten til de ulike instrumentene benyttet i forsøket.

Tabell 6-4 Målenøyaktighet

Instrument	Måleområde	Målenøyaktighet	Maksimalt avvik
Varmetrådsprobe [m/s]	0,2 – 20	$\pm 0,2 + 3 \%$ av målt verdi	0,206
Differensialtrykkcelle [kPa]	0 – 25	$\pm 0,075 \%$ av måleområde	$7,5 \cdot 10^{-4}$
Trykkmåler [mA]	0-20	$\pm 0,5 \%$ av måleområde	0,1
Vannstandsmåler basseng/kasse [mm]	450	Nøyaktighet person	$\pm 0,7$
Vannstandsmåler trykkcelle [mm]	400	Nøyaktighet person	1

### 6.3.1 Varmetrådsprobe

Tabell 6-4 viser at varmetrådsproben har en nøyaktighet på  $\pm 0,2 \text{ m/s} + 3 \%$  av målt verdi. For den maksimale lufthastigheten på 20 m/s, vil målenøyaktigheten kunne gi et avvik på  $\pm 0,206 \text{ m/s}$ . Dersom endringene for målt lufthastighet mellom de ulike vannføringene, sammenlignes med målenøyaktigheten, kommer det frem at endringen i målingene er innenfor målenøyaktigheten. Mindre endringer i målingene enn i målenøyaktigheten betyr at endringene kan skyldes avvik i målinger, for flere detaljer se Vedlegg Q.

For å undersøke etterprøvbareheten og kvaliteten på de gjennomførte målingene ble en kontrollserie for en vannføring på 74,1 l/s i modellen gjennomført. Sammenligningen av lufthastighetene for de to seriene ga et maksimalt avvik på 7 % for dagens utforming. Avviket viser at det er noe usikkerhet i målingene, men at variasjonen ikke er stor. For lavere ruhet er flertallet av målingene like, mens enkelte har en variasjon på 4 %. Unntaket er for luftmedrivningen i lufferøret på overføringstunnelen for situasjonen 3, her er avviket på hele 13 %, som vurderes som for mye. For flere detaljer se Vedlegg R. Sett bort fra avviket på 13 %, stemmer målingene godt overens mellom de to forsøkene. Den ekstra målingen viser at

kvaliteten på målingene er gode, men dersom det er ønskelig med bedre nøyaktighet kan en probe med mindre måleområde og høyere nøyaktighet kjøpes.

### **6.3.2 Differensialtrykkcelle**

Differensialtrykkcellen har en målenøyaktighet på  $\pm 0,075\%$  av måleområdet, noe som gir et maksimalt avvik på 0,00075 kPa. Dersom den samme sammenligningen gjøres for differensialtrykk som for varmetrådsproben, viser sammenligningen at endringen i målingene er større enn målenøyaktigheten for tilnærmet alle målingene, noe som tyder på at endringene ikke kun skyldes avvik i målinger. Målingene vises i Vedlegg Q.

For å kontrollere etterprøvbareheten til differensialtrykkmålingene ble verdiene sammenlignet for de to seriene som beskrevet over. Avviket ligger på 0,03 mm for dagens utforming, bortsett fra for situasjon 2, da differansen er 0,11 mm. Et avvik på 0,11 anses fortsatt som en meget lav verdi, og innenfor akseptområdet. For lavere ruhet var differensialtrykkcellen utsatt for en feil for begge målingene, og til slutt ble derfor en egen måleserie kjørt for å skaffe korrekte differensialtrykk. En kontrollserie ble ikke kjørt, men det kan antas at målingene er gode ut fra sammenligningen for dagens utforming. For flere detaljer se Vedlegg R.

### **6.3.3 Trykkmåler**

Trykkmåleren har en nøyaktighet på  $\pm 0,5\%$  av måleområde, som gir et maksimalt avvik på 0,1 mA. Ved å studere trykkmålingene for dagens utforming og lavere ruhet, som gjort for differensialtrykkcelle og varmetrådsprobe, viser målingene at endringene i trykkmålinger varierer mer enn målenøyaktigheten, og derfor kan ikke endringene kun skyldes avvik i målinger, for flere detaljer se Vedlegg Q.

Kontrollserien som ble kjørt for dagens utforming viser at trykkmålingene på det meste varierer med 7 % for en måling og ellers er betydelig lavere. For lavere ruhet er avvikene lavere enn 1 %. Derfor vurderes etterprøvbareheten til målingene som gode.

### **6.3.4 Vannstand basseng/kasse**

Vannstanden i kasse og basseng måles manuelt med en digital vannstandsmåler. Vannstanden oppgis med en nøyaktighet på to desimaler. Nøyaktigheten i målingene avhenger av personen som foretar målingene, og etter erfaring med bruk av instrumentet varierer målingene for



samme situasjon maksimalt 0,7 mm. Et maksimalt avvik på 0,7 mm er betydelig lavere enn variasjonen i målingene fra situasjon til situasjon, se figur 5-7 og figur 5-11.

Vannstandsmålingene målt for hver situasjon for samme vannføring gir et godt grunnlag for kontroll av målingene, i tillegg til ekstra forsøk for etterprøvbarehet, da vannstanden er tilnærmet lik for alle situasjonene. Alle målingene ligger innenfor en variasjon på 2 % eller mindre, og vurderes derfor som meget etterprøvbare, for detaljer se Vedlegg R.

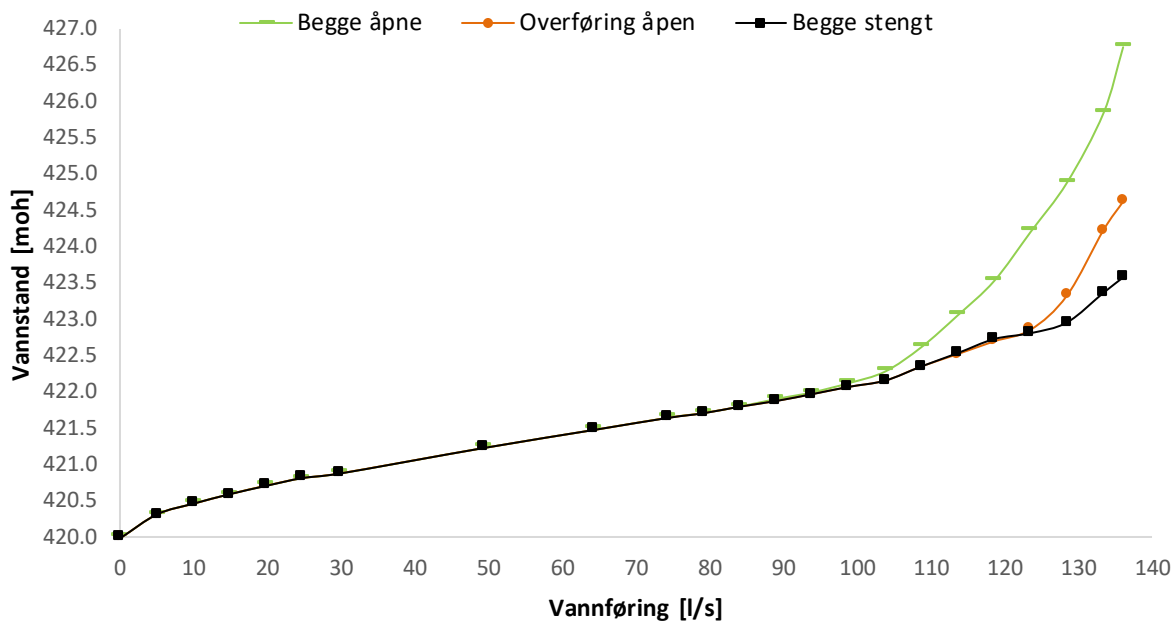
### **6.3.5 Vannstand tunnel**

Vannstanden på tunnelen måles meget enkelt med et trykkuttak og en målestav. Problemet er at grunnet høy turbulens i tunnelen varierer vannstanden for avlesningen fra 10 mm helt opp til 60 mm, derfor noteres gjennomsnittet mellom ytterkantene. Avlesningens nøyaktighet anslås likevel som 1 mm da målestavene er lett å lese av. Endringene i vannstanden varierer mer enn 1 mm for alle vannføringsøkninger, detaljer vises i Vedlegg Q. Derfor er måleresultatene i den sammenheng gode, men grunnet høy turbulens, meget usikre. For å kunne benytte vannstandsmålingene sammen med korresponderende trykkmålinger må vannstanden og trykkmålingen kunne leses av i eksakt samme øyeblikk, noe som er vanskelig med de store variasjonene i tunnelen.

Etterprøvbareheten av vannstanden i tunnelen har blitt testet både for dagens utforming og lavere ruhet, og avviket ligger på omtrent 1 %, noe som er meget bra. Derfor vurderes etterprøvbareheten som god, se Vedlegg R for verdier.

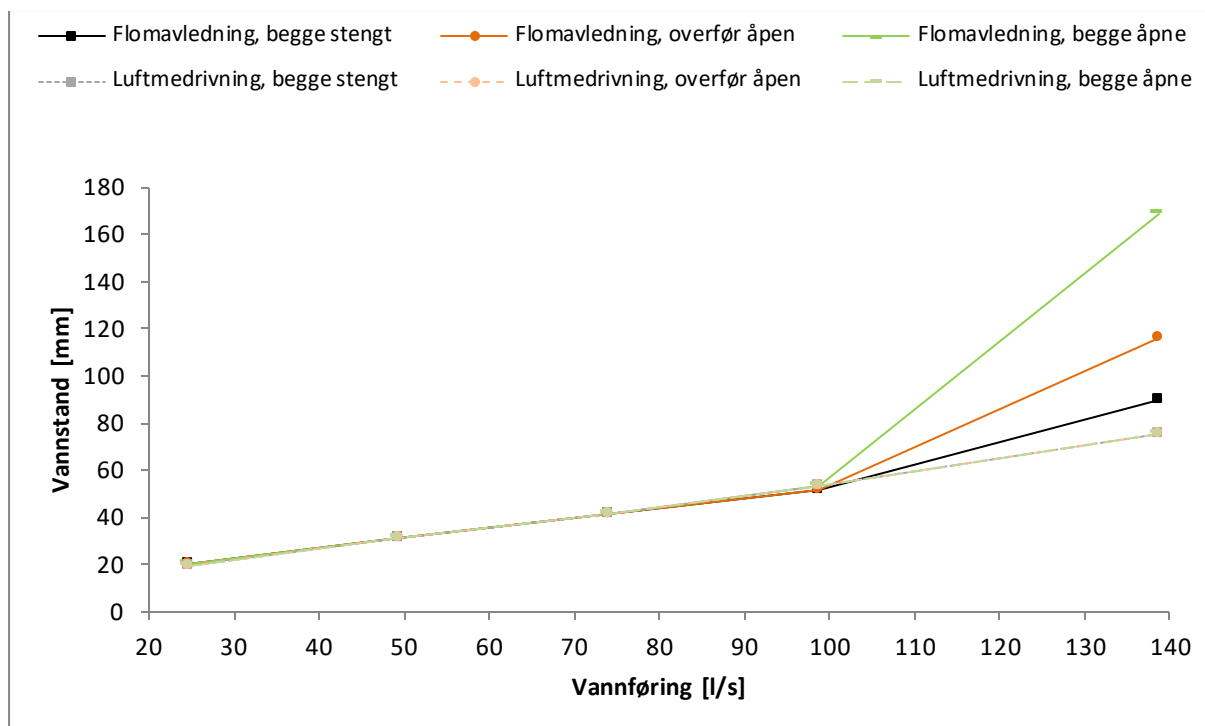
## **6.4 Vurdering av modellforsøk flomavledning**

Modellforsøket for flomavledning utført høsten 2016 studerte ikke spesifikt luftmedrivning, men et lufterør ble påmontert overføringstunnelen, da det i prototypen er en lukesjakt her, og et ekstra lufterør ble påmontert sjakten slik at kapasiteten i modellen ikke skulle overdrives. Dersom strømmingen ikke luftes vil et undertrykk kunne oppstå i tunnelen, og dermed trekke gjennom mer vann enn det som vil være tilfellet i prototypen. I modellforsøket for flomavledningen ble vannstanden målt for økende vannføring for situasjon 1,3 og 4. Forsøket med ulike lufterør åpne ble gjennomført når modellen var geometrisk lik prototypen, og flomløpskapasiteten ikke var tilfredsstillende til å håndtere  $Q_{PMF}$ . Figur 6-2 viser resultatene av målingene (Belete, 2017).



Figur 6-2 Luftens innvirkning modellforsøk flomavledning (Belete, 2017)

Figur 6-2 viser tydelig at vannstandene er tilnærmet identiske frem mot en vannføring på 88,9 l/s i modellen. Her stiger vannstanden mer når begge lufterørene er åpne. For vannføring tilsvarende  $Q_{PMF}$ , er det betydelig høyere vannstand når begge lufterørene er åpne enn når et eller to er stengt. Når kun lufterøret på overføringstunnelen er åpent stiger vannstanden betydelig mer enn for begge stengt, fra en vannføring på 123,5 l/s i modellen og frem til  $Q_{PMF}$ . Målingene viste at luften har en innvirkning på kapasiteten til flomløpet, og dermed ble modellforsøkene videre besluttet kjørt med begge lufterør åpne, slik at kapasiteten ikke skulle overvurderes i modellen. En etterprøving av resultatene direkte er vanskelig, da forsøkene ble utført for en annen utforming av modellen enn det som står i Vassdragslaboratoriet i dag. Figur 6-3 viser likevel en sammenligning av målt vannstand for modellforsøk luftmedrivning og modellforsøk flomavledning, for de fem vannføringene benyttet i forsøk for luftmedrivning.



Figur 6-3 Sammenligning vannstand modellforsøk flomavledning og luftmedrivning

Figur 6-3 viser at utbyggingen av modellen har resultert i en betraktelig lavere vannstandsstigning i bassenget, som også er helt uavhengig av luftmedrivningen. Ut fra teorien gjennomgått i kapittel 3 og figur 6-2, er det tydelig at avgjørelsen om å ha begge luftesjakter åpne for modellforsøket er en sikker måte å unngå underdimensjonering av flomløpet. Videre viser målinger av vannstanden i bassenget for modellforsøk luftmedrivning, fremstilt i figur 6-3, at etter utvidelsen av flomløpet har ikke lenger åpning og lukning av de ulike lufterørene noen innvirkning på vannstandsstigningen i bassenget. Dermed kan resultatene fra modellforsøket for vurdering av flomløpskapasiteten, med hensyn til luftmedrivning, vurderes som gode og sikre. Ut fra teorien gjennomgått i kapittel 3.5, kan ikke målingene skaleres til en prototype med en universell modellov. Derfor er det ikke mulig å si noe om luftmedrivningen i prototypen, og det må bare slås fast at en konservativ tilnærming i modellen, med et ekstra lufterør, vil være fornuftig.

## 6.5 Feilkilder

I de utførte forsøkene vil en viktig feilkilde være målenøyaktigheten i de benyttede instrumentene. Som omtalt i kapittel 6.3 har alle benyttede instrumenter en viss usikkerhet som vil kunne gi usikre resultater. Men ved gjentatte forsøk og etterprøving av resultatene minskes usikkerheten betraktelig.

Menneskelige feil kan også forekomme. Ved avlesning av vannstanden vil personen som utfører målingene avgjøre nøyaktigheten, men også her er gjentatte målinger en god forsikring. Feil i behandling av resultatene og i beregninger kan også forekomme.

Retur av luft skaper en kilde for usikkerhet i resultatene. Det er ikke utført konkrete målinger av eventuell retur av luft opp sjakt eller tunnel ved friskeilsstrømning. Varmetrådsproben måler kun temperaturforskjeller og ut i fra forskjellen bestemmes lufthastigheten. Dersom luft strømmer motsatt vei vil ikke det registreres i proben.

## 7 Konklusjon

Luftmedrivning lar seg vanskelig skalere til prototype noe som gjør at forhold studert i modell, ikke kan overføres med en universell modellov til prototypen. Funnene i forsøkene gjennomført i denne oppgaven kan derfor ikke overføres til prototype, men kun si noe om forholdene ved luftmedrivning. For økende vannføring og dermed økende hastighet, øker turbulensen og transportkapasiteten til vannet. Dermed kan mer luft blandes inn og transporteres med vannet. Når vannføringen når et visst nivå øker ikke luftmedrivningen for økt vannføring, men avtar. Reduksjonen i luftmedrivningen skyldes sannsynlig at arealet over vannstrømmen avtar, slik at mindre luft kan transporteres over vannflaten som en følge av skjærkrefter mellom vann og luft. Lavere ruhet i sjakt og tunnel gir en økt luftmedrivning i systemet, til tross for at turbulensen minker, noe som tyder på fullt utviklet turbulens på tross av lavere ruhet. Overløpet og luftinnblanding i overløpet forblir upåvirket av ruhetsendringen, mens en økt hastighet grunnet lavere ruhet, vil kunne øke transportkapasiteten. Dermed kan mer luft transporteres innblandet i vannet og over vannet.

Dersom lufttilgangen skjer fra ulike områder endres omfanget av luftmedrivningen, slik at plassering av eventuelle ekstra lufferør i et modellforsøk vil ha betydning for omfanget av luftmedrivningen. Kassen bygget over overløpet for kontroll av luftmedrivning i overløp og sjakt påvirker systemet, men ikke i betydelig grad, slik at målingene kan vurderes som gode og sammenlignbare med målinger for kapasitet uten bygget kasse. Bruk av ekstra lufferør i modellforsøk høst 2016 for flomavledning, vurderes som en sikker tilnærming for å unngå overvurdering av avledningskapasiteten, da det ikke er utviklet en universell modellov for skalering av luft.

### 7.1 Forslag til videre arbeid

Ved eventuelt videre arbeid kan en varmetrådsprobe med høyere nøyaktighet og mindre måleområde benyttes, slik at mer sikre målinger kan gjennomføres for luftmedrivning. Det vil også være aktuelt å finne en måte å måle luftstrømmen over vannspeilet direkte, slik at det kan undersøkes hvor mye av luften som er blandet inn i vannet og hvor mye som strømmer over vannspeilet. Måling av eventuell returstrøm opp sjakt eller tunnel vil også gi sikrere resultater for luftmedrivningen. Kravet om maksimalt 70 % vannfylt tverrsnitt ved  $Q_{dim}$  bør undersøkes på nytt. Dersom det tilføres tilstrekkelig luft i modellen vil muligens kravet kunne

fravikes. Det er ikke foretatt målinger av luftstrøm inn fra utløpet av tunnelen, da dette vurderes som lite sannsynlig. Dersom noe luft skulle kunne trekkes inn i utløpet, vil luften mest sannsynlig skape luftvirvler i utløpet og ikke gå videre opp i systemet. Et forsøk hvor dette studeres ville være av betydning. For eventuelt flere modellforsøk vil måling av oppløst luft i vannet før og etter flomløpet kunne si mye om oppløsning av luft i modellen. Til slutt vil arbeidet med å finne en universell lov for skalering fra målt luftmedrivning i modell til prototyp være aktuelt. Dersom det kunne være mulig å måle luftmedrivning på en prototype, ville målinger i modell kunne sammenlignes.

## Referanser

- Avery, S., & Novak, P. (1978). Oxygen transfer at hydraulic structures. Bekkeinntakkomiteen. (1986). Bekkeinntak på kraftverkstunneler.
- Belete, K. (2017). Modellforsøk flomløp Follsjødammen.
- Berg, A. (1986). Modellforsøk av tofase luft-vann-strømning i bekkeinntakssjakter.
- Birkeland, R. (2008). *Modellstudie av flomløpet på dam Sysenvatn*.
- Boes, R. M., & Hager, W. H. (2003). *Two-phase flow characteristics of stepped spillways*. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering.
- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. Tokyo: McGraw-Hill Book Company, Inc Kogakusha Company, LTD.
- Crowe, C. T., Elger, D. F., Williams, B. C., & Roberson, J. A. (2010). *Engineering Fluid Mechanics*. I (9 utg.): John Wiley & Sons, Inc.
- Damsikkerhetsforskriften. (2009). *Forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg*.
- E+E Elektronik. (2017). Air Velocity Measurement with Hot-Film Anemometers. Lastet ned fra [http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/miscellaneous/datasheet\\_air\\_velocity\\_measurement\\_basics.pdf](http://downloads.epluse.com/fileadmin/data/miscellaneous/datasheet_air_velocity_measurement_basics.pdf)
- Falvey, H. T. (1980). Air-water flow in hydraulic structures.
- Falvey, H. T., & Ervine, D. A. (1988). Aeration in jets and high velocity flows *Model-prototype correlation of hydraulic structures*.
- Guttormsen, O. (1981). Bekkeinntak, vannveier, luftproblemer.
- Guttormsen, O. (2006). *TVM 4165 Vannkraftverk og vassdragsteknikk*. Trondheim: Kompendieforlaget.
- Hager, W. H. (1992). Spillways. Shockwaves and air entrainment *Bulletin 81*.
- Jensen, L., Tesaker, E., Lund, S., & Huber, D. (2006). *Inntakshåndboken*. Oslo: NVE.
- Kobus, H. (1984). Local Air Entrainment and Detrainment. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Federal Republic of Germany.
- Kobus, H., & Koschitzky, H. P. (1991). Local surface aeration at hydraulic structures.
- Multiconsult. (2010). Flomberegninger for Gråsjø, Follsjø og Rinna. Trondheim.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. (2010). *Hydraulic Modelling - an introduction*: Spon Press.
- NVE. (2005). *Retningslinjer for flomløp*. Oslo: NVE.
- NVE. (2014). *Veileder til damsikkerhetsforskriften*.
- Plate, E. J., & Hidy, G. M. (1967). Laboratory Study of air flowing over a smooth surface onto small water waves.
- Statkraft. (1997). Follsjødammen.
- Tekle, T. (1967). Nes kraftverk - Luftansamling i tilløpstunnelens høybrekk *Rapport Oslo lysverker*.

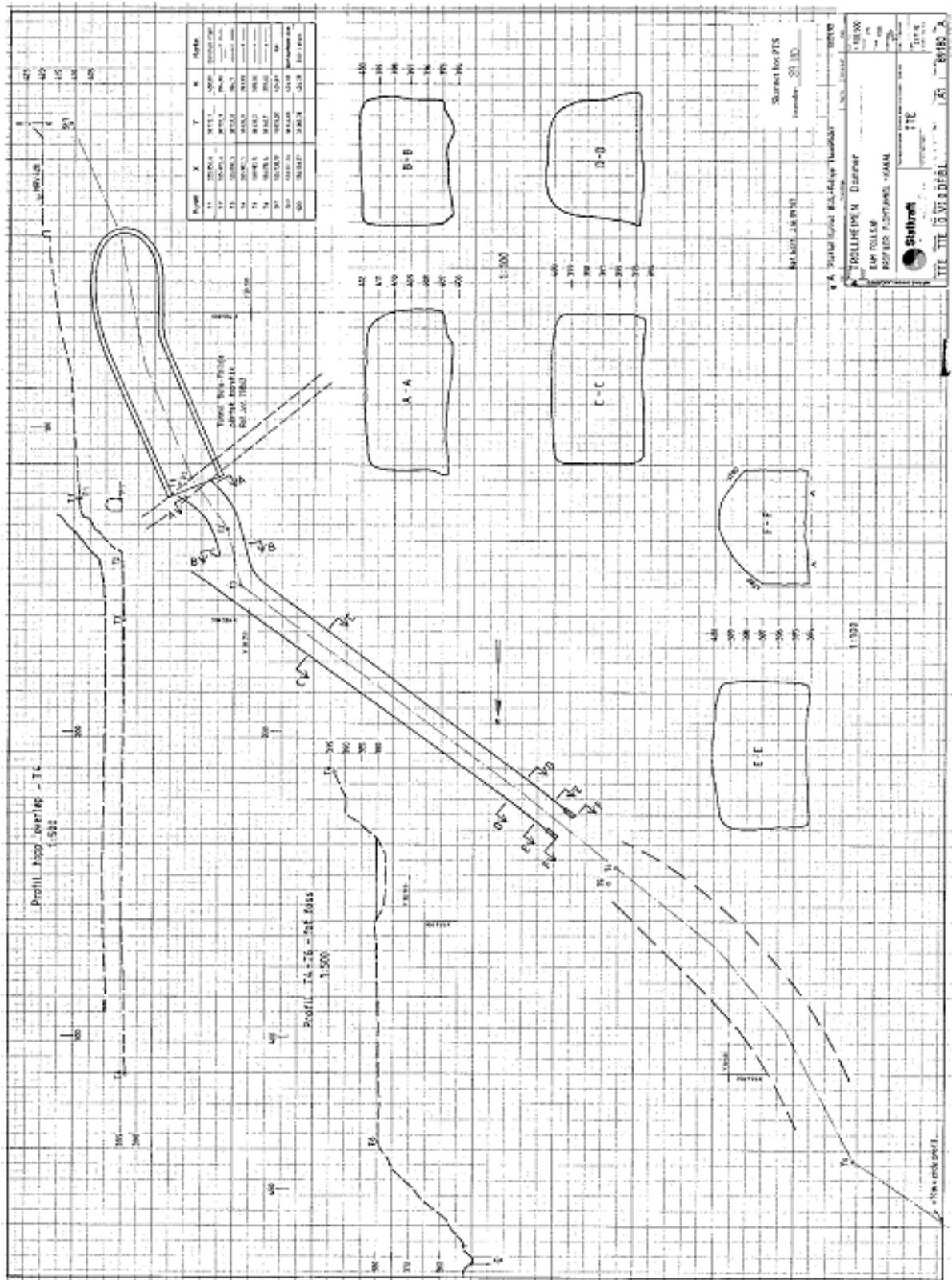




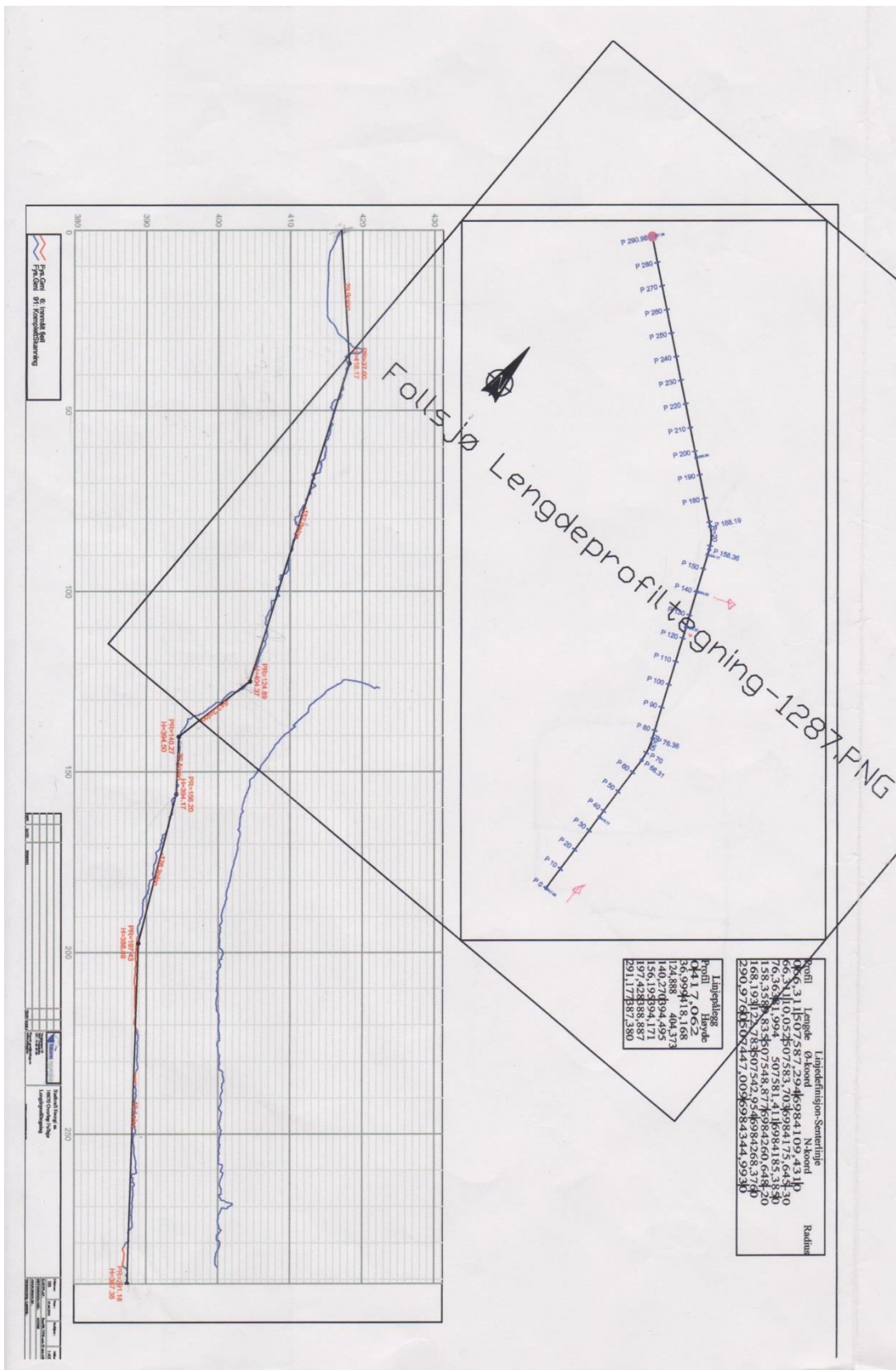
# Vedlegg

VEDLEGG A: OVERSIKTSSKISSE FLOMLØP .....	II
VEDLEGG B: LENGDEPROFILTEGNING FLOMLØP .....	III
VEDLEGG C: DATABLAD OMNI PORT 30 OG LOGPROBE 65.....	IV
VEDLEGG D: STABILISERING AV MÅLINGER LUFTHASTIGHET .....	VIII
VEDLEGG E: DATABLAD TRYKKMÅLER .....	IX
VEDLEGG F: KALIBRERING AV TRYKKMÅLER .....	XVIII
VEDLEGG G: UOFFISIELLE FORSØK .....	XIX
VEDLEGG H: DIFF.TRYKK, BEREGNING MANNINGSTALL OG FALLTAP .....	XXI
VEDLEGG I: FORSØK, DAGENS UTFORMING .....	XXIII
VEDLEGG J: MÅLING TOPPUNKT, DAGENS UTFORMING .....	XXIV
VEDLEGG K: MÅLING LUKKING, DAGENS UTFORMING .....	XXV
VEDLEGG L: VANNSTAND KASSE OG BASSENG, DAGENS UTFORMING.....	XXVI
VEDLEGG M: VANNHASTIGHET UNDER KASSE OG OVERLØP V.S. ....	XXVII
VEDLEGG N: LUFTSTRØM OVER VANN OG I VANN, DAGENS UTFORMING .....	XXVIII
VEDLEGG O: FORSØK, LAVERE RUHET .....	XXX
VEDLEGG P: VANNSTAND, LAVERE RUHET .....	XXXI
VEDLEGG Q: NØYAKTIGHET MÅLINGER.....	XXXII
VEDLEGG R: ETTERPRØVBARHET .....	XXXIV

# Vedlegg A: OVERSIKTSSKISSE FLOMLØP



# Vedlegg B: LENGDEPROFILTEGNING FLOMLØP



## Vedlegg C: DATABLAD OMNIPOINT 30 OG LOGPROBE 65



# OMNIPOINT 30

## Multifunctional Hand-Held

The robust multifunctional hand-held meets the highest requirements and comes with a wide range of accurate probes that fit various applications. Use touch-screen navigation to show, up to three measurement values simultaneously on the capacitive TFT display.

A total of 23 measurands (vary according to probe) is available, including:

- relative humidity RH
- temperature T
- dew point temperature Td
- absolute humidity dv
- mixing ratio r
- air velocity v
- volumetric flow  $\dot{v}$
- air pressure p
- CO<sub>2</sub> ppm



Store measurement values in the internal memory of the device and use the free SmartGraph3 software to manage data on your PC. The optional carrying case accommodates the hand-held and probes, as well as accessories.

### Data-Logging & Data-Management

The Omnipoint 30 offers both continuous and single-point data-logging. The measurement values of up to three channels are stored simultaneously, together with a time and date stamp, in the internal memory of the device.

Stored measurement data, as well as the minimum, maximum, average and standard deviation values can be shown directly on the display. Scroll through a recorded measurement and switch between graphs by using the control cross.



Data management is easy and intuitive by using the free SmartGraph3 software to create graphs that contain measurement channels of interest for better data analysis. Data can be exported in .csv format and then imported into EXCEL for further processing.

### Features

- Data logging
- Internal memory for 2 million measured values
- 23 physical quantities
- Capacitive TFT touch screen
- Displays measurands simultaneously

- Real-time HOLD / MIN / MAX / AVG readout
- Integrated air pressure sensor
- User friendly operation
- Free data management software

## Technical Data

### General

Power supply	4 x Alkaline LR6 AA batteries, 1.5 V (not in the scope of supply)	
Optional power supply	5V DC via USB (cable included)	
Temperature range	operating: handheld and handle of sensing probe: 0...50°C (32...122°F) storage: -20...60°C (-4...140°F)	
Internal memory	for approx. 2 million measured values	
Housing / protection class	ABS / IP40	
Dimensions (HxWxD)	170 x 62 x 34 mm (6.69 x 2.44 x 1.34")	
Weight	ca. 205g (0.45 lbs)	
Display	TFT display, 54 x 41 mm (2.13 x 1.61"), illuminated	
CE compatibility	Hand-held: EN61000-6-2:2005	EN61000-6-3:2007
	Logprobe: EN61326-1:2013	EN61326-2-3:2013



### Integrated air pressure sensor

Measuring range	800 to 1100 mbar (complete accuracy)
Accuracy	max. ± 0.5 mbar (at 25 °C, 1013.25 mbar)
Long term stability	typ. -1 mbar/year

## HUMIDITY / TEMPERATURE PROBES

### LOGPROBE 20 - compact, pluggable HVAC probe



Working range: 0...100% RH / -40...80°C (-40...176°F)  
 Accuracy: ±2% RH (0...90% RH), ±3% RH (90...100% RH) @20°C / 68°F  
 ±0.2°C / ±0.36°F @20°C / 68°F  
 max. ±0.6°C / ±1.08°F (-40...80°C / -40...176°F)

Order code: **LOGPROBE20-HTPC**

Response time  $\tau_w$ : ≤ 30 sec.

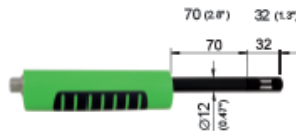
Filter: Membrane filter

Order code: **LOGPROBE20-HTPA**

Response time  $\tau_w$ : ≤ 10 sec.

Filter: Plastic grid filter

### LOGPROBE 16 - HVAC probe



Working range: 0...100% RH / -20...70°C (-4...158°F)  
 Accuracy: ±2% RH (0...90% RH), ±3% RH (90...100% RH) @20°C / 68°F  
 ±0.2°C / ±0.36°F @20°C / 68°F  
 max. ±0.5°C / ±0.9°F (-20...70°C / -4...158°F)

Response time  $\tau_w$ : ≤ 7 sec.

Order code: **LOGPROBE16**

### LOGPROBE 31 - high temperature probe



Working range: 0...100% RH / -40...180°C (-40...356°F)  
 (grip of sensing probe up to 50°C/122°F)  
 Accuracy: ±2% RH (0...90% RH), ±3% RH (90...100% RH) @20°C / 68°F  
 ±0.2°C / ±0.36°F @20°C / 68°F  
 max. ±0.6°C / ±1.08°F (-40...180°C / -40...356°F)

Response time  $\tau_w$ : ≤ 30 sec.

Temperature dependency: RH: ±0.03% RH/°C (% RH/1.8°F)

Order code: **LOGPROBE31**

### LOGPROBE 30 - confined space probe



Working range: 0...100% RH / -40...100°C (-40...212°F)  
 Accuracy: ±2% RH (0...90% RH), ±3% RH (90...100% RH) @20°C / 68°F  
 ±0.2°C / ±0.36°F @20°C / 68°F  
 max. ±0.6°C / ±1.08°F (-40...100°C / -40...212°F)

Response time  $\tau_w$ : ≤ 15 sec.

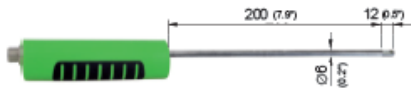
Temperature dependency: RH: ±0.03% RH/°C (% RH/1.8°F)

Order code: **LOGPROBE30**



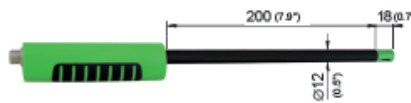
## AIR VELOCITY PROBES

### LOGPROBE 61/60 - stainless steel probe



Working range:	0.08...2m/s (15...400ft/min) -20...70°C (-4...158°F)	0.2...20m/s (40...4000ft/min) -20...70°C (-4...158°F)
Accuracy:	± (0.04m/s / 8ft/min + 1% of m. v.) ± 0.7°C / ±1.25°F (0...50°C / 32...122°F)	± (0.2m/s / 39ft/min + 2% of m. v.) ± 0.7°C / ±1.25°F (0...50°C / 32...122°F)
Response time $\tau_{90}$ :	≤ 1.5 sec.	
Order code:	<b>LOGPROBE61</b>	<b>LOGPROBE60</b>

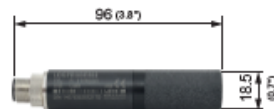
### LOGPROBE 65 - polycarbonate probe



Working range:	0.2...20m/s (40...4000ft/min) / 0...50°C (32...122°F)
Accuracy:	± (0.2 m/s / 39ft/min + 3% of m. v.) ± 1°C / ±1.8°F (0...50°C / 32...122°F)
Response time $\tau_{90}$ :	≤ 1.5 sec.
Order code:	<b>LOGPROBE65</b>

## CO<sub>2</sub> PROBE

### LOGPROBE 802/805/810 - CO<sub>2</sub> probe



Working range:	0...2000 / 5000 / 10000ppm
Technology:	dual wave NDIR with autocalibration
Accuracy at 25°C and 1013mbar (7°F and 14.69psi):	0...2000ppm: < ± (50ppm + 2% of measured value) 0...5000ppm: < ± (50ppm + 3% of measured value) 0...10000ppm: < ± (100ppm + 5% of measured value)
Warm-up time:	3 min.
Temperature dependency:	typ. 1ppm CO <sub>2</sub> /°C (-20...45°C) (-4...113°F)
Order code:	0...2000ppm <b>LOGPROBE802</b> 0...5000ppm <b>LOGPROBE805</b> 0...10000ppm <b>LOGPROBE810</b>

## Carrying Case

The optional carrying case protects the handheld, probes and accessories during transport and storage. It helps to avoid mechanical damage, as well as the contamination of the sensors, which is essential for the optimal long term performance of the instrument.



HA040906

## Protective Cover

The optional cover protects the handheld device during usage in dirty or oily environments. The integrated magnetic plate allows an easy temporary fixing of the handheld onto a metallic surface on site, while the hang-on straps helps keep your hands free while taking measurements.



HA040907



## Ordering Guide

		Pluggable Probes <sup>1)</sup>	Remote Probes <sup>2)</sup>
<b>POSITION 1</b>	<b>BASIC DEVICE</b>	OMNIPOINT30	OMNIPOINT30
<b>POSITION 2</b>	<b>CABLE</b> 2m (6.6ft)		HA010813
<b>POSITION 3</b>	<b>PROBES</b>		
	<b>Humidity / Temperature</b>	LOGPROBE20-HTPC LOGPROBE20-HTPA	LOGPROBE16 LOGPROBE31 LOGPROBE30
	LOGPROBE 20 - Response time ≤ 30 sec. LOGPROBE 20 - Response time ≤ 10 sec. LOGPROBE 16 - HVAC probe LOGPROBE 31 - high temperature probe LOGPROBE 30 - confined space probe		
	<b>Air Velocity</b>		LOGPROBE61 LOGPROBE60 LOGPROBE65
	LOGPROBE 61 - stainless steel probe / 0.08...2m/s (15...400ft/min) LOGPROBE 60 - stainless steel probe / 0.2...20m/s (40...400ft/min) LOGPROBE 65 - polycarbonate probe / 0.2...20m/s (40...400ft/min)		
	<b>CO<sub>2</sub></b>	LOGPROBE802 LOGPROBE805 LOGPROBE810	
	LOGPROBE 802 - 0...2000ppm LOGPROBE 805 - 0...5000ppm LOGPROBE 810 - 0...10000ppm		
<b>POSITION 4</b>	<b>CARRYING CASE</b> For basic device and up to 4 probes	HA040906	HA040906

1) Directly connected to device, cable is optional  
2) Cable is necessary

## Order Example

### Pluggable Probes:

Position 1 - Basic Device **OMNIPOINT30**  
Position 2 - Probe **LOGPROBE805**  
Position 3 - Carrying Case **HA040906**

### Remote Probes:

Position 1 - Basic Device **OMNIPOINT30**  
Position 2 - Cable **HA010813**  
Position 3 - Probes **LOGPROBE16**  
**LOGPROBE61**  
Position 4 - Carrying Case **HA040906**

## Accessories

Carrying case for basic device, 2 pluggable and 2 remote probes	<b>HA040906</b>
Protective cover	<b>HA040907</b>
Membrane filter PC (for Ø12mm RH/T probes)	<b>HA010118</b>
Metal grid filter PC (for Ø12mm RH/T probes)	<b>HA010119</b>
Stainless steel sintered filter (for Ø12mm RH/T probe)	<b>HA010103</b>
Plastic grid filter PC (for Logprobe 20-HTPA)	<b>HA010121</b>
Cable for remote probes 2m (6.6ft)	<b>HA010813</b>
Humidity standards / Calibration device	refer to data sheet Humidity Calibration Set
SmartGraph 3 - data management software	free download at <a href="http://www.epluse.com/smartgraph3">www.epluse.com/smartgraph3</a>

## Vedlegg D: STABILISERING AV MÅLINGER LUFTHASTIGHET

	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=24,7	Q=74,1	Q=74,1	Q=74,1	Q=74,1	Q=74,1	Q=108,3	Q=108,3	Q=108,3	Q=108,3	Q=108,3	Q=108,3	Q=108,3		
	Begge stengt	Sjakt åpen	Overfør åpen	Overfør r åpen	Begge åpne	Begge åpne	Begge åpne	Overfør r åpen	Overfør r åpen	Begge åpne	Overfør r åpen	Sjakt åpen	Sjakt åpen	Begge stengt	Begge stengt	Sjakt åpen	Sjakt åpen	Begge stengt	Begge stengt	Sjakt åpen	Sjakt åpen	Overfør r åpen	Overfør r åpen	Begge åpne	Begge åpne
	Rør kasse	Rør sjakt	Rør overfør	Rør kasse	Rør sjakt	Rør overfør	Rør kasse	Rør sjakt	Rør kasse	Rør sjakt	Rør overfør	Rør sjakt	Rør sjakt	Rør kasse	Rør sjakt	Rør kasse	Rør kasse	Rør kasse	Rør sjakt	Rør sjakt	Rør kasse	Rør kasse	Rør sjakt	Rør kasse	Rør sjakt
10 s	10 1,22	1,00	1,10	1,30	0,92	2,75	2,41	3,10	3,85	3,14	3,00	3,66	4,61	2,54	2,62	0,41	2,54	2,54	2,54	2,62	0,41	2,54	2,54	2,31	0,40
20 s	20 1,26	1,04	1,10	1,30	0,96	2,75	2,49	3,10	3,80	3,22	2,99	3,63	4,71	2,52	2,57	0,41	2,52	2,52	2,57	0,41	2,52	2,52	2,39	0,42	
30 s	30 1,27	1,03	1,10	1,30	0,97	2,74	2,51	3,10	3,80	3,30	2,97	3,62	4,72	2,51	2,49	0,41	2,53	2,51	2,49	0,41	2,53	2,53	2,45	0,43	
40 s	40 1,27	1,03	1,10	1,30	0,97	2,76	2,53	3,08	3,77	3,34	2,98	3,61	4,72	2,55	2,50	0,43	2,56	2,55	2,50	0,43	2,56	2,56	2,37	0,44	
50 s	50 1,28	1,02	1,10	1,30	0,96	2,76	2,54	3,07	3,76	3,34	2,99	3,59	4,75	2,54	2,48	0,42	2,53	2,54	2,48	0,42	2,53	2,53	2,40	0,43	
1 min	60 1,28	1,02	1,10	1,30	0,95	2,76	2,55	3,07	3,77	3,35	2,99	3,59	4,75	2,57	2,47	0,43	2,55	2,57	2,47	0,43	2,55	2,55	2,42	0,43	
1 min 10 s	70 1,28	1,02	1,10	1,30	0,95	2,75	2,55	3,08	3,78	3,35	2,98	3,58	4,74	2,55	2,48	0,42	2,55	2,55	2,48	0,42	2,55	2,55	2,40	0,43	
1 min 20 s	80 1,28	1,02	1,10	1,30	0,95	2,75	2,55	3,07	3,78	3,35	2,98	3,56	4,74	2,55	2,46	0,42	2,54	2,55	2,46	0,42	2,54	2,54	2,41	0,43	
1 min 30 s	90 1,28	1,01	1,10	1,30	0,95	2,74	2,55	3,07	3,79	3,35	2,98	3,56	4,72	2,55	2,45	0,42	2,54	2,55	2,45	0,42	2,54	2,54	2,40	0,43	
1 min 40 s	100 1,29	1,01	1,10	1,30	0,96	2,74	2,55	3,07	3,79	3,36	2,98	3,55	4,74	2,54	2,46	0,42	2,54	2,54	2,46	0,42	2,54	2,54	2,40	0,42	
1 min 50 s	110 1,29	1,01	1,10	1,30	0,96	2,74	2,55	3,06	3,79	3,35	2,98	3,54	4,75	2,55	2,44	0,42	2,52	2,55	2,44	0,42	2,52	2,52	2,41	0,42	
2 min	120 1,28	1,01	1,10	1,30	0,96	2,74	2,55	3,06	3,78	3,36	2,98	3,54	4,75	2,54	2,44	0,42	2,54	2,54	2,44	0,42	2,54	2,54	2,40	0,42	
2 min 10 s	130 1,28	1,01	1,10	1,30	0,97	2,73	2,55	3,05	3,78	3,36	2,98	3,54	4,75	2,55	2,44	0,42	2,53	2,55	2,44	0,42	2,53	2,53	2,39	0,43	
2 min 20 s	140 1,28	1,01	1,10	1,30	0,97	2,72	2,55	3,05	3,78	3,36	2,97	3,54	4,74	2,55	2,44	0,42	2,52	2,55	2,44	0,42	2,52	2,52	2,39	0,43	
2 min 30 s	150 1,28	1,01	1,10	1,30	0,97	2,71	2,54	3,05	3,78	3,36	2,96	3,54	4,74	2,56	2,44	0,42	2,52	2,56	2,44	0,42	2,52	2,52	2,38	0,43	
2 min 40 s	160 1,27	1,01	1,10	1,30	0,96	2,70	2,54	3,05	3,78	3,36	2,96	3,54	4,74	2,57	2,44	0,42	2,53	2,57	2,44	0,42	2,53	2,53	2,39	0,43	
2 min 50 s	170 1,27	1,01	1,10	1,30	0,96	2,69	2,55	3,04	3,78	3,36	2,95	3,54	4,74	2,56	2,44	0,42	2,53	2,56	2,44	0,42	2,53	2,53	2,39	0,43	
3 min	180 1,27	1,01	1,10	1,30	0,96	2,68	2,55	3,04	3,79	3,36	2,95	3,55	4,74	2,57	2,44	0,42	2,54	2,57	2,44	0,42	2,54	2,54	2,38	0,44	
3 min 10 s	190 1,27	1,01	1,10	1,30	0,95	2,67	2,55	3,04	3,79	3,36	2,96	3,55	4,74	2,57	2,43	0,42	2,54	2,57	2,43	0,42	2,54	2,54	2,37	0,43	
3 min 20 s	200 1,27	1,01	1,10	1,30	0,95	2,67	2,55	3,04	3,79	3,36	2,96	3,55	4,73	2,56	2,43	0,43	2,55	2,56	2,43	0,43	2,55	2,55	2,37	0,44	
3 min 30 s	210 1,27	1,01	1,10	1,30	0,95	2,66	2,55	3,04	3,79	3,36	2,95	3,55	4,73	2,56	2,43	0,43	2,54	2,56	2,43	0,43	2,54	2,54	2,37	0,44	
3 min 40 s	220 1,27	1,01	1,10	1,30	0,95	2,66	2,55	3,04	3,79	3,36	2,94	3,55	4,73	2,56	2,43	0,43	2,54	2,56	2,43	0,43	2,54	2,54	2,37	0,44	
3 min 50 s	230 1,27	1,01	1,11	1,30	0,95	2,65	2,55	3,03	3,79	3,36	2,94	3,55	4,73	2,56	2,43	0,43	2,54	2,56	2,43	0,43	2,54	2,54	2,37	0,43	
4 min	240 1,27	1,01	1,11	1,30	0,95	2,65	2,56	3,03	3,79	3,36	2,94	3,55	4,73	2,57	2,42	0,43	2,54	2,57	2,42	0,43	2,54	2,54	2,36	0,43	
4 min 10 s	250 1,27	1,01	1,11	1,30	0,96	2,64	2,55	3,03	3,78	3,36	2,94	3,55	4,72	2,57	2,42	0,43	2,53	2,57	2,42	0,43	2,53	2,53	2,36	0,43	
4 min 20 s	260 1,27	1,01	1,11	1,30	0,96	2,64	2,55	3,03	3,78	3,36	2,94	3,55	4,72	2,57	2,42	0,43	2,53	2,57	2,42	0,43	2,53	2,53	2,35	0,43	
4 min 30 s	270 1,27	1,01	1,11	1,30	0,96	2,63	2,55	3,03	3,78	3,36	2,94	3,55	4,71	2,57	2,42	0,43	2,53	2,57	2,42	0,43	2,53	2,53	2,35	0,43	
4 min 40 s	280 1,27	1,01	1,11	1,30	0,96	2,62	2,55	3,03	3,78	3,36	2,94	3,55	4,71	2,56	2,43	0,43	2,53	2,56	2,43	0,43	2,53	2,53	2,35	0,43	
4 min 50 s	290 1,27	1,01	1,11	1,30	0,96	2,61	2,55	3,03	3,78	3,36	2,94	3,55	4,71	2,56	2,43	0,43	2,53	2,56	2,43	0,43	2,53	2,53	2,35	0,43	
5 min	300 1,26	1,01	1,11	1,30	0,96	2,60	2,55	3,03	3,78	3,36	2,94	3,55	4,71	2,57	2,43	0,43	2,53	2,57	2,43	0,43	2,53	2,53	2,35	0,43	



## Flush pressure transmitter For viscous and particle-laden media Model S-11

WIKA data sheet PE 81.02



for further approvals  
see page 6

### Applications

- General industrial applications
- Food and beverage industry
- Filling and packing machinery
- Dosing technology
- Level measurement

### Special features

- High-quality product
- Many configurations possible
- Flush process connection
- Large stocks for short delivery times
- Vacuum-tight



Fig. left: Pressure transmitter model S-11  
Fig. right: Pressure transmitter model S-11 with cooling element

### Description

#### Expert for viscous and particle-laden media

The model S-11 pressure transmitter with flush diaphragm has been specifically designed for the measurement of viscous, paste-like, adhesive, crystallising, particle-laden and contaminated media, which would clog the pressure channel of conventional process connections.

Through its optimised design, the flush process connection enables cleanability with the wetted diaphragm integrated into the process. Low-maintenance and trouble-free pressure measurement is thus also guaranteed in critical applications with frequently changing media.

High accuracy, a robust design, high-quality workmanship and the high flexibility of configuration are key features of the model S-11.

#### Flush process connection

All process connections of the flush pressure transmitter are made of stainless steel and are fully welded and isolate the medium from the pressure measuring instrument via a positive seal. A reliable, dead-space free sealing between the process connection and the measuring medium is thus assured.

For high medium temperatures of up to 150 °C (302 °F), the pressure transmitter is also available with an integrated cooling element.

Specifically for the food and beverage industry, a version with internal system fill fluid in accordance with FDA 21 CFR 178.3750 can be chosen.

## Measuring ranges

Gauge pressure								
bar	Measuring range	0 ... 0.1	0 ... 0.16	0 ... 0.25	0 ... 0.4	0 ... 0.6	0 ... 1	0 ... 1.6
	Overpressure limit	1	1.5	2	2	4	5	10
	Measuring range	0 ... 2.5	0 ... 4	0 ... 6	0 ... 10	0 ... 16	0 ... 25	0 ... 40
	Overpressure limit	10	17	35	35	80	50	80
psi	Measuring range	0 ... 60	0 ... 100	0 ... 160	0 ... 250	0 ... 400	0 ... 600	
	Overpressure limit	120	200	320	500	800	1,200	
	Measuring range	0 ... 15	0 ... 20	0 ... 30	0 ... 50	0 ... 60	0 ... 100	0 ... 150
	Overpressure limit	145	145	145	240	240	500	500
psi	Measuring range	0 ... 160	0 ... 200	0 ... 250	0 ... 300	0 ... 400	0 ... 500	0 ... 600
	Overpressure limit	1,160	1,160	1,160	1,160	1,160	1,160	1,160
	Measuring range	0 ... 750	0 ... 1,000	0 ... 1,500	0 ... 2,000	0 ... 3,000	0 ... 5,000	0 ... 6,000
	Overpressure limit	1,740	1,740	2,900	4,600	7,200	11,600	11,600

Absolute pressure								
bar	Measuring range	0 ... 0.25	0 ... 0.4	0 ... 0.6	0 ... 1	0 ... 1.6	0 ... 2.5	0 ... 4
	Overpressure limit	2	2	4	5	10	10	17
	Measuring range	0 ... 6	0 ... 10	0 ... 16				
psi	Overpressure limit	35	35	80				
	Measuring range	0 ... 15	0 ... 25	0 ... 50	0 ... 100	0 ... 250		
	Overpressure limit	72.5	145	240	500	1,160		

Vacuum and +/- measuring range						
bar	Measuring range	-0.6 ... 0	-0.4 ... 0	-0.25 ... 0	-0.16 ... 0	-0.1 ... 0
	Overpressure limit	4	2	2	1.5	1
	Measuring range	-1 ... 0	-1 ... +0.6	-1 ... +1.5	-1 ... +3	-1 ... +5
	Overpressure limit	5	10	10	17	35
psi	Measuring range	-1 ... +9	-1 ... +15	-1 ... +24		
	Overpressure limit	35	80	50		
	Measuring range	-30 inHg ... 0	-30 inHg ... +30	-30 inHg ... +60	-30 inHg ... +100	-30 inHg ... +160
	Overpressure limit	72.5	240	240	500	1,160
psi	Measuring range	-30 inHg ... +200	-30 inHg ... +300			
	Overpressure limit	1,160	1,160			

The given measuring ranges are also available in mbar, MPa and further units.

### Vacuum tightness

Yes

## Output signals

### Output signal

Selectable versions	
Current (2-wire)	4 ... 20 mA
Current (3-wire)	0 ... 20 mA
Voltage (3-wire)	DC 0 ... 10 V
	DC 0 ... 5 V

Other output signals on request.

### Load

Depending on the signal type the following loads apply:

Current (2-wire):  $\leq$  (power supply - 10 V) / 0.02 A

Current (3-wire):  $\leq$  (power supply - 3 V) / 0.02 A

Voltage (3-wire):  $>$  max. output signal / 1 mA

## Voltage supply

### Power supply

The power supply depends on the selected output signal

4 ... 20 mA (2-wire): DC 10 ... 30 V

0 ... 20 mA (3-wire): DC 10 ... 30 V

DC 0 ... 10 V: DC 14 ... 30 V

DC 0 ... 5 V: DC 10 ... 30 V

## Reference conditions (per IEC 61298-1)

### Temperature

15 ... 25 °C (59 ... 77 °F)

### Atmospheric pressure

860 ... 1,060 mbar (12.47 ... 15.37 psi)

### Humidity

45 ... 75 % r. h.

### Power supply

DC 24 V

### Mounting position

Calibrated in vertical mounting position with process connection facing downwards.

## Accuracy specifications

### Accuracy at reference conditions

Selectable versions	
Standard	$\leq \pm 0.5$ % of span
Option	$\leq \pm 0.25$ % of span <sup>1)</sup>

1) Only for measuring ranges  $\geq 0.25$  bar

Including non-linearity, hysteresis, zero offset and end value deviation (corresponds to measured error per IEC 61298-2). Calibrated in vertical mounting position with process connection facing downwards.

### Non-linearity (per IEC 61298-2)

$\leq \pm 0.2$  % of span BFSL

### Non-repeatability

$\leq \pm 0.1$  % of span

### Temperature error in rated temperature range

Rated temperature range:

0 ... 80 °C (32 ... 176 °F)

Mean temperature coefficient of zero point:

Measuring range  $> 0.25$  bar:  $\leq \pm 0.2$  % of span/10 K

Measuring range  $\leq 0.25$  bar:  $< \pm 0.4$  % of span/10 K

Mean temperature coefficient of span:

$\leq \pm 0.2$  % of span/10 K

### Long-term drift

$\leq \pm 0.2$  % of span/year

### Adjustability of zero point and span

Adjustment is made using potentiometers inside the instrument.

Not possible for IP68 cable outlet.

Zero point:  $\pm 5$  %

Span:  $\pm 5$  %

## Time response

### Settling time

$\leq 2$  ms

## Operating conditions

### Ingress protection (per IEC 60529)

The ingress protection depends on the type of electrical connection.

Electrical connection	Ingress protection
Angular connector DIN 175301-803 A	IP65
Circular connector M12 x 1 (4-pin)	IP67
Cable outlet IP67	IP67
Cable outlet IP68	IP68 <sup>1)</sup>

1) Adjustability of zero point and span not possible.

The stated ingress protection only applies when plugged in using mating connectors that have the appropriate ingress protection.

### Vibration resistance

Process connections without cooling element:  
20 g (IEC 60068-2-6, under resonance)

Process connections with cooling element:  
10 g (IEC 60068-2-6, under resonance)

### Shock resistance

Process connections without cooling element:  
1,000 g (IEC 60068-2-27, mechanical)

Process connections with cooling element:  
400 g (IEC 60068-2-27, mechanical)

### Permissible temperature ranges

Also meets EN 50178, tab. 7, operation (C) 4K4H, storage (D) 1K4, transport (E) 2K3.

Process connections without cooling element		
Medium		
■ Standard	-30 ... +100 °C	-22 ... +212 °F
■ Option	-30 ... +125 °C	-22 ... +257 °F
Ambient	-20 ... +80 °C	-4 ... +176 °F
Storage	-40 ... +100 °C	-40 ... +212 °F

Process connections with cooling element		
Medium	-20 ... +150 °C	-4 ... +302 °F
Ambient	-20 ... +80 °C	-4 ... +176 °F
Storage	-40 ... +100 °C	-40 ... +212 °F

## Electrical connections

### Short-circuit resistance

S+ vs. U-

### Reverse polarity protection

U+ vs. U-


### Overvoltage protection

DC 36 V


### Insulation voltage


DC 500 V with NEC class 02 voltage supply (low voltage and low current max. 100 VA even under fault conditions)

### Connection diagrams

Angular connector DIN 175301-803 A		
	2-wire	3-wire
	U+ 1	1
	U- 2	2
	S+ -	3

Wire cross-section max. 1.5 mm<sup>2</sup> (AWG 16)  
Cable diameter 6 ... 8 mm (0.24 ... 0.31")

Circular connector M12 x 1 (4-pin)		
	2-wire	3-wire
	U+ 1	1
	U- 3	3
	S+ -	4

Cable outlet		
	2-wire	3-wire
	U+ brown	brown
	U- green	green
	S+ -	white
	Shield grey	grey

Wire cross-section 6 x 0.5 mm<sup>2</sup> (AWG 20)  
Cable diameter 6.8 mm (0.27")  
Cable lengths 1.5 m, 3 m, 5 m, 10 m, 15 m  
(4.9 ft, 9.8 ft, 16.4 ft, 32.8 ft, 49.2 ft)

Other connections on request.

## Process connections

Selectable versions		
Thread	Available measuring ranges	
G ½ B flush <sup>1)</sup>	0 ... 2.5 to 0 ... 600 bar	0 ... 50 to 0 ... 6,000 psi
G 1 B flush <sup>1)</sup>	0 ... 0.1 to 0 ... 1.6 bar	0 ... 15 psi
Hygienic G 1 B flush (in accordance with 3-A Sanitary Standards)	0 ... 0.1 to 0 ... 25 bar	0 ... 15 to 0 ... 300 psi

<sup>1)</sup> Process connection also available with cooling element.

### Cooling elements

For higher medium temperatures, process connections with a cooling element are available (see "Operating conditions").

### Sealing

Process connection	Max. medium temperature	Sealing material and max. pressure limitation		
		Standard	Option 1	Option 2
without cooling element	up to 100 °C (212 °F)	NBR up to 600 bar (8,700 psi)	FKM/FPM <sup>1)</sup> up to 600 bar (8,700 psi)	EPDM up to 200 bar (2,900 psi)
	up to 125 °C (257 °F)	NBR up to 600 bar (8,700 psi)	FKM/FPM <sup>1)</sup> up to 400 bar (5,800 psi)	EPDM up to 200 bar (2,900 psi)
with cooling element	up to 150 °C (302 °F)	FKM/FPM <sup>1)</sup> up to 300 bar (4,350 psi)	EPDM up to 200 bar (2,900 psi)	-
Hygienic	up to 150 °C (302 °F)	EPDM up to 200 bar (2,900 psi)	-	-

<sup>1)</sup> Minimum permissible medium and ambient temperature -20 °C / -4 °F

O-ring for G ½ B flush process connection optionally available with FFKM seal material (pressure limitation 600 bar (8,700 psi) for all medium temperatures)

The sealings listed under "Standard" are included in the delivery.

## Materials









### Wetted parts

- G ½ B and G 1 B flush: 316Ti
- G 1 B flush, hygienic: 316L
- For sealing materials see "Process connections"

### Internal system fill fluid

Selectable versions	
Standard	Synthetic oil
Option	Food-compatible system fill fluid per FDA 21 CFR 178.3750

## Approvals

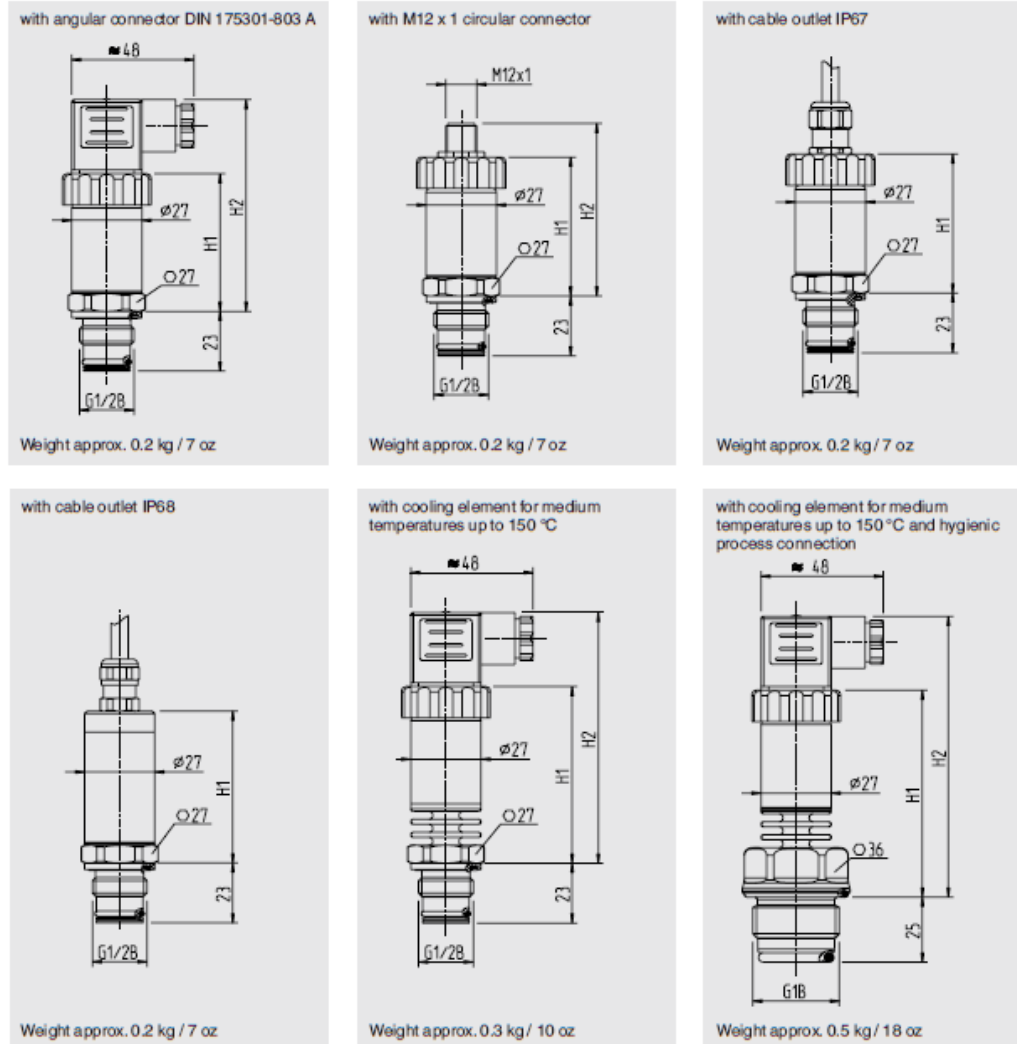
Logo	Description	Country
	<b>EU declaration of conformity</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ EMC directive <sup>1)</sup></li> <li>■ EN 61326 emission (group 1, class B) and interference immunity (industrial application)</li> <li>■ Pressure equipment directive</li> </ul>	European Community
	<b>CSA</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Safety (e.g. electr. safety, overpressure, ...)</li> <li>■ Hazardous areas</li> </ul>	Canada
	<b>EAC</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Electromagnetic compatibility</li> </ul>	Eurasian Economic Community
	<b>GOST</b> Metrology, measurement technology	Russia
	<b>KazInMetr</b> Metrology, measurement technology	Kazakhstan
-	<b>MTSCHS</b> Permission for commissioning	Kazakhstan
	<b>BelGIM</b> Metrology, measurement technology	Belarus
	<b>Uzstandard</b> Metrology, measurement technology	Uzbekistan
	<b>3-A</b> Sanitary Standard  only for instruments with process connection hygienic G 1 B This instrument is 3-A marked, based on a third party verification for conformance to the 3-A standard.	USA

<sup>1)</sup>The existence of strong electromagnetic fields in a frequency range of < 2.7 GHz can result in increased measuring errors up to 1 %. Do not install the instruments in the vicinity of strong electromagnetic sources of interference (e.g. transmitting devices, radio equipment), or use sheath current filters where applicable.

Approvals and certificates, see website

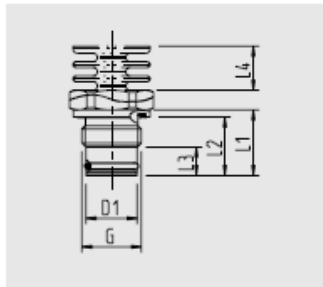
## Dimensions in mm (inch)

### Pressure transmitter

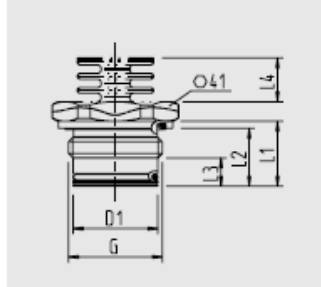


Electrical connection	Dimension	Process connection		
		G ½ B, G 1 B		G 1 hygienic
		without cooling element	with cooling element	with cooling element
Angular connector DIN 175301-803 A	H1	54 (2.13)	69 (2.72)	80 (3.15)
	H2	83.5 (3.29)	98 (3.56)	109 (4.29)
Circular connector M12 x 1	H1	54 (2.13)	69 (2.72)	80 (3.15)
	H2	67 (2.64)	82 (3.23)	93 (3.66)
Cable outlet IP67	H1	54 (2.13)	69 (2.72)	80 (3.15)
Cable outlet IP68	H1	58 (2.28)	73 (2.87)	84 (3.31)

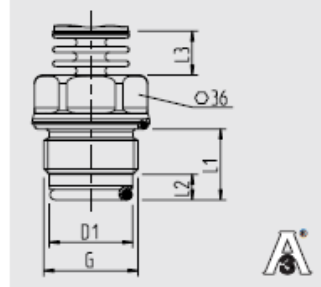
## Process connections



G	D1	L1	L2	L3	L4
G 1/2 B	18 (0.71)	23 (0.91)	20.5 (0.81)	10 (0.4)	15.5 (0.61)



G	D1	L1	L2	L3	L4
G 1 B	30 (1.19)	23 (0.91)	20.5 (0.81)	10 (0.4)	15.5 (0.61)





G	D1	L1	L2	L3
G 1 B hygienic	29.5 (1.17)	25 (0.99)	9 (0.36)	15.5 (0.61)

Surface roughness of wetted metallic parts, Ra ≤ 0.76 µm

For information on tapped holes and welding sockets, see Technical information IN 00.14 at [www.wika.com](http://www.wika.com).

## Accessories

### Welding socket

	Designation	Order number
	Welding socket for G 1/2 B flush	1192299
	Welding socket for G 1 B flush	1192264
	Welding socket for G 1 B hygienic flush	14145179
	Welding socket for G 1 B hygienic flush with leak-control channel Fulfills the 3-A Sanitary Standards	 14145183

For further adapter systems for measuring instruments with G 1 B hygienic process connection, see data sheet AC 09.20.

### Mating connector

Designation	Order number			
	without cable	2 m cable, shielded	5 m cable, shielded	10 m cable, shielded
Angular connector DIN 175301-803 A				
■ with cable gland, metric	11427567	14100465	14100466	-
■ with cable gland, conduit	11022485	-	-	-
Circular connector M12 x 1 (4-pin)				
■ straight	-	14086880	14086883	14086884
■ angled	-	14086889	14086891	14086892



### Sealings for mating connectors

Mating connector	Order number	
	Blue (WIKA)	Brown (neutral)
Angular connector DIN EN 175301-803 A	1576240	11437902

### Sealings for process connection

Thread size and sealing	Order number			
	NBR	FPM/FKM	EPDM	FKKM
G ½ B				
■ O-ring	14072275	14072276	14072277	14073739
■ Profile sealing	1039067	1039075	1538306	-
G 1 B				
■ O-ring	1108247	1099094	1535056	-
■ Profile sealing	1100386	1145967	11522381	-
G 1 B hygienic				
■ O-ring	-	-	2225859	-
■ Profile sealing	-	-	11522381	-

### Ordering information

Model / Measuring range / Output signal / Accuracy / Electrical connection / Medium temperature / Process connection / Sealing / System fill fluid

© 2012 WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, all rights reserved.  
The specifications given in this document represent the state of engineering at the time of publishing.  
We reserve the right to make modifications to the specifications and materials.

WIKA data sheet PE 81.02 · 06/2016

Page 9 of 9

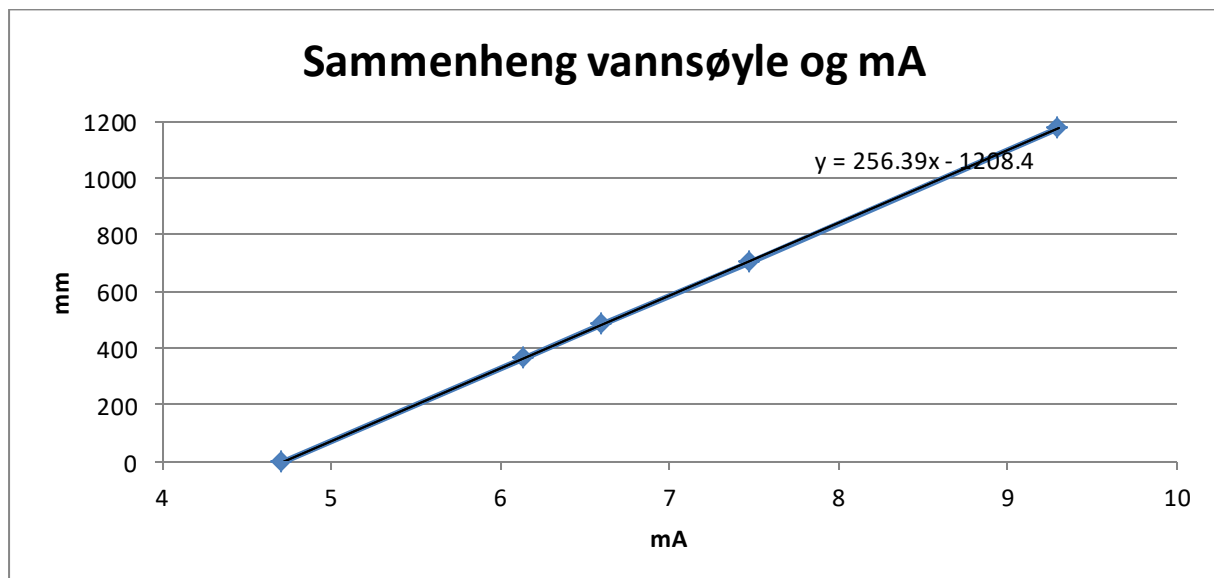
06/2016 EN



**WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG**  
Alexander-Wiegand-Straße 30  
63911 Klingenberg/Germany  
Tel. +49 9372 132-0  
Fax +49 9372 132-406  
info@wika.de  
www.wika.de

## Vedlegg F: KALIBRERING AV TRYKKMÅLER

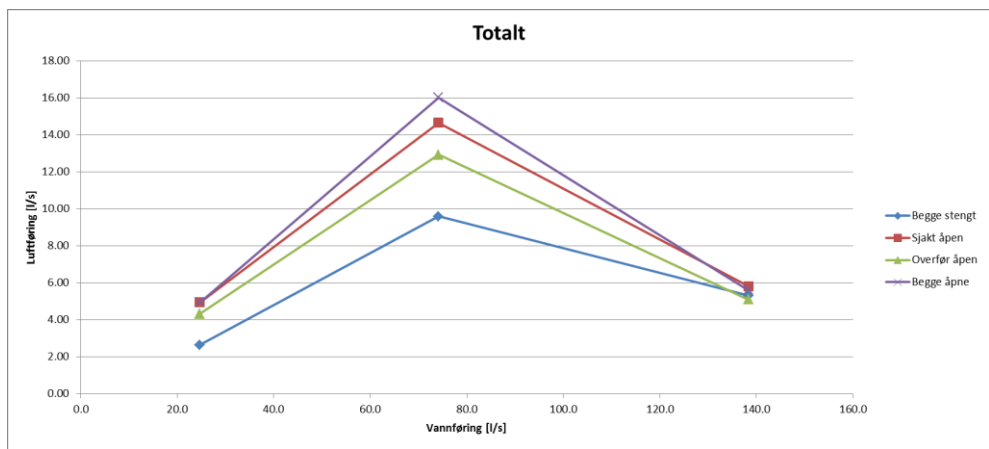
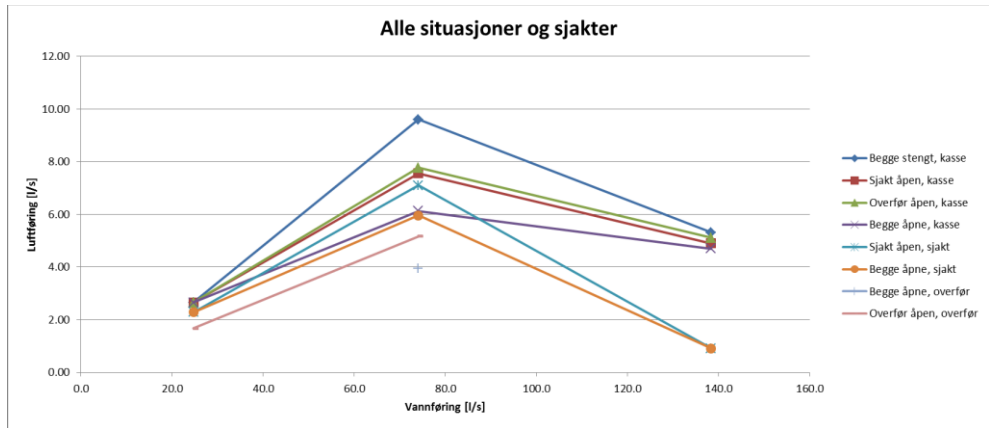
Kalibrering trykkcelle	
Vannsøyle [mm]	Avlesning [mA]
0	4.714
367	6.143
487	6.604
707	7.483
1177	9.3



# Vedlegg G: UOFFISIELLE FORSØK

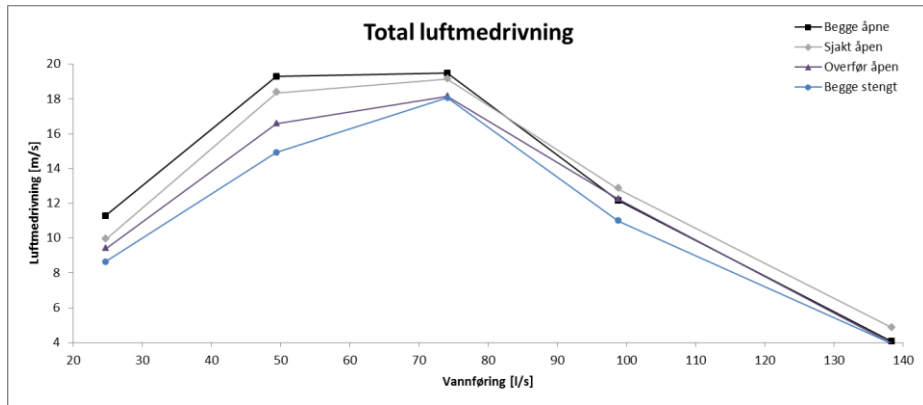
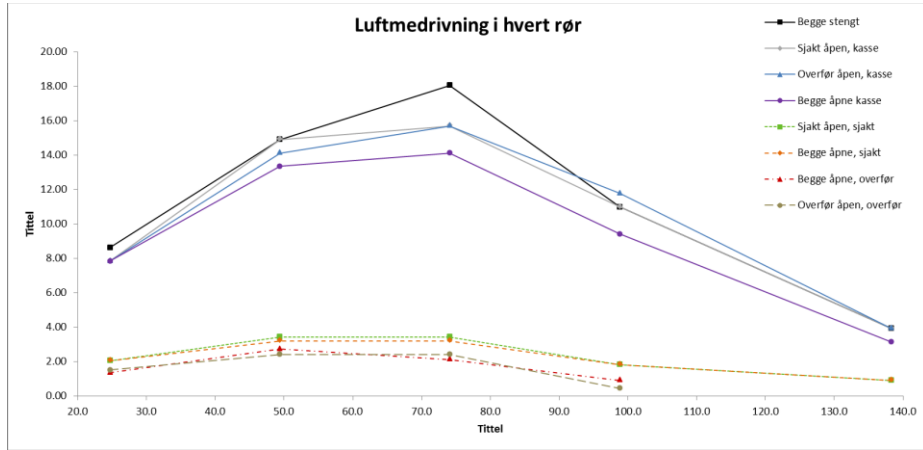
## Forsøk 1:

Prototyp [m³/s]	Modell [l/s]	Begge stengt			Sjakt åpen			Overfør. åpen			Begge åpne			Diff.trykk [m]	SUM [l/s]	Diff.trykk [m]
		Rør kasse [m/s]	Rør sjakt [m/s]	Rør overfør. [m/s]	Rør kasse [m/s]	Rør sjakt [m/s]	Rør overfør. [m/s]	Rør kasse [m/s]	Rør sjakt [m/s]	Rør overfør. [m/s]	Rør kasse [m/s]	Rør sjakt [m/s]	Rør overfør. [m/s]			
		[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]	[l/s]			
250	24.7	1.3	2.66	0.0001	1.3	2.66	1.1	1.67	4.33	1.3	2.66	1	2.29	Mangler	4.95	0.0001
750	74.1	44.1	30.0	0.0017-0.0018	3.7	7.36	3.4	5.17	12.93	3.8	7.76	2.6	5.95	Ikke målbart	16.04	0.0007
1400	138.3	108.3	30.0	0.0003-0.0007	2.4	4.90	2.5	5.11	5.11	2.5	5.11	0.4	0.92	Ikke målbart	5.61	0.0004



## Forsøk 2:

Prosjekt [m³/s]	Modell [l/s]	Re kasse [m/s]	Diff trykk [Pa]	Vannstand høising [mm]	Trykkmåler [mm]	Re kasse [m/s]	Re sjakt [m/s]	Re overf. [m/s]	SUM [Pa]	Diff trykk [Pa]	Vannstand høising [mm]	Vannstand kasse v.s. [mm]	Trykkmåler [mm]	Trykkmåler [mm]	Re sjakt [m/s]	Re overf. [m/s]	SUM [Pa]	Diff trykk [Pa]	Vannstand høising [mm]	Vannstand kasse v.s. [mm]	Trykkmåler [mm]	Trykkmåler [mm]
250	24,2	24,2	1,1	21,08	21,08	24,2	0,0	0,0	1,1	0,00027317	21,08	21,08	21,08	21,08	0,0	0,0	1,1	0,00027317	21,08	21,08	21,08	21,08
500	49,4	30,0	1,5	31,28	31,28	30,0	1,4	1,4	1,5	0,0004156	31,28	31,28	31,28	31,28	1,4	1,4	1,5	0,0004156	31,28	31,28	31,28	31,28
750	74,1	44,1	2,1	44,18	44,18	44,1	2,1	2,1	2,1	0,0008294	44,18	44,18	44,18	44,18	2,1	2,1	2,1	0,0008294	44,18	44,18	44,18	44,18
1000	98,8	68,8	3,0	68,8	68,8	68,8	3,0	3,0	3,0	0,0012432	68,8	68,8	68,8	68,8	3,0	3,0	3,0	0,0012432	68,8	68,8	68,8	68,8
1400	138,3	104,3	4,0	104,3	104,3	104,3	4,0	4,0	4,0	0,0017824	104,3	104,3	104,3	104,3	4,0	4,0	4,0	0,0017824	104,3	104,3	104,3	104,3



## Vedlegg H: DIFF.TRYKK, BEREGNING MANNINGSTALL OG FALLTAP

### Dagens utforming, diff.trykk:

fglatt	0.017	-
Listetykkelse, h	0.003	m
Listelengde sjakt, ls	0.910	m
Hydraulisk radius sjakt, Rs	0.069	m
Listelengde tunnel, lt	0.940	m
Hydraulisk radius tunnel, Rt	0.059	m
Listeavstand, dagens utf:	74.1	mm
Vannføring forsøk:	148.3	l/s
Areal tunnel:	0.055	m <sup>2</sup>
Falltap forsøk:	127	mm
Avstand målere:	700	mm
M	42	m <sup>1/3</sup> /s

### Dagens utforming, Birkelands metode:

		SJAKT							TUNNEL					
Avstand lister,		f ru sjakt					f sjakt	M	f ru sjakt				f sjakt	M
[cm]	[m]	Ledd 1	Ledd 2	Ledd 3	f ru sjakt			Ledd 1	Ledd 2	Ledd 3	f ru sjakt			
1	0.01	13.962	0.001	3.316496164	0.222	0.239	28	12.302	0.001	4.016363636	0.308	0.325	25	
2	0.02	8.041	0.001	3.316496164	0.128	0.145	36	7.085	0.001	4.016363636	0.177	0.194	32	
3	0.03	5.823	0.001	3.316496164	0.092	0.109	42	5.131	0.001	4.016363636	0.128	0.145	37	
4	0.04	4.631	0.001	3.316496164	0.074	0.091	46	4.081	0.001	4.016363636	0.102	0.119	41	
5	0.05	3.878	0.001	3.316496164	0.062	0.079	49	3.416	0.001	4.016363636	0.085	0.102	44	
6	0.06	3.354	0.001	3.316496164	0.053	0.070	52	2.955	0.001	4.016363636	0.074	0.091	47	
7	0.07	2.966	0.001	3.316496164	0.047	0.064	55	2.614	0.001	4.016363636	0.065	0.082	50	
7.41	0.0741	2.835	0.001	3.316496164	0.045	0.062	56	2.498	0.001	4.016363636	0.062	0.079	50	
8	0.08	2.667	0.001	3.316496164	0.042	0.059	57	2.350	0.001	4.016363636	0.059	0.076	52	
9	0.09	2.429	0.001	3.316496164	0.039	0.056	59	2.140	0.001	4.016363636	0.054	0.071	54	
10	0.1	2.233	0.001	3.316496164	0.035	0.052	60	1.968	0.001	4.016363636	0.049	0.066	55	
11	0.11	2.070	0.001	3.316496164	0.033	0.050	62	1.824	0.001	4.016363636	0.046	0.063	57	
12	0.12	1.932	0.001	3.316496164	0.031	0.048	63	1.702	0.001	4.016363636	0.043	0.060	58	
13	0.13	1.812	0.001	3.316496164	0.029	0.046	65	1.597	0.001	4.016363636	0.040	0.057	60	
14	0.14	1.709	0.001	3.316496164	0.027	0.044	66	1.505	0.001	4.016363636	0.038	0.055	61	
15	0.15	1.617	0.001	3.316496164	0.026	0.043	67	1.425	0.001	4.016363636	0.036	0.053	62	
16	0.16	1.536	0.001	3.316496164	0.024	0.041	68	1.354	0.001	4.016363636	0.034	0.051	63	
17	0.17	1.464	0.001	3.316496164	0.023	0.040	69	1.290	0.001	4.016363636	0.032	0.049	64	
18	0.18	1.399	0.001	3.316496164	0.022	0.039	70	1.232	0.001	4.016363636	0.031	0.048	65	
19	0.19	1.340	0.001	3.316496164	0.021	0.038	71	1.181	0.001	4.016363636	0.030	0.047	66	
20	0.2	1.286	0.001	3.316496164	0.020	0.037	72	1.133	0.001	4.016363636	0.028	0.045	67	
21	0.21	1.237	0.001	3.316496164	0.020	0.037	72	1.090	0.001	4.016363636	0.027	0.044	68	
22	0.22	1.192	0.001	3.316496164	0.019	0.036	73	1.050	0.001	4.016363636	0.026	0.043	68	
23	0.23	1.151	0.001	3.316496164	0.018	0.035	74	1.014	0.001	4.016363636	0.025	0.042	69	
24	0.24	1.112	0.001	3.316496164	0.018	0.035	74	0.980	0.001	4.016363636	0.025	0.042	70	
25	0.25	1.077	0.001	3.316496164	0.017	0.034	75	0.949	0.001	4.016363636	0.024	0.041	70	
26	0.26	1.044	0.001	3.316496164	0.017	0.034	76	0.920	0.001	4.016363636	0.023	0.040	71	
27	0.27	1.013	0.001	3.316496164	0.016	0.033	76	0.892	0.001	4.016363636	0.022	0.039	72	
28	0.28	0.984	0.001	3.316496164	0.016	0.033	77	0.867	0.001	4.016363636	0.022	0.039	72	
29	0.29	0.957	0.001	3.316496164	0.015	0.032	77	0.843	0.001	4.016363636	0.021	0.038	73	
30	0.3	0.931	0.001	3.316496164	0.015	0.032	78	0.821	0.001	4.016363636	0.021	0.038	73	

### Lavere ruhet, diff.trykk:

fglatt	0.017	-
Listetykkelse, h	0.003	m
Listelengde sjakt, ls	0.910	m
Hydraulisk radius sjakt, Rs	0.069	m
Listelengde tunnel, lt	0.940	m
Hydraulisk radius tunnel, Rt	0.059	m
Listeavstand, dagens utf:	240.0	mm
Vannføring forsøk:	148.3	l/s
Areal tunnel:	0.055	m <sup>2</sup>
Falltap forsøk:	19	mm
Avstand målere:	700	mm
M	109	m <sup>1/3</sup> /s

### Lavere ruhet, Birkelands metode:

		SJAKT						TUNNEL					
Avstand lister,		f ru sjakt				f sjakt	M	f ru sjakt				f sjakt	M
[cm]	[m]	Ledd 1	Ledd 2	Ledd 3	f ru sjakt			Ledd 1	Ledd 2	Ledd 3	f ru sjakt		
1	0.01	13.962	0.001	3.316496164	0.222	0.239	28	12.302	0.001	4.016363636	0.308	0.325	25
2	0.02	8.041	0.001	3.316496164	0.128	0.145	36	7.085	0.001	4.016363636	0.177	0.194	32
3	0.03	5.823	0.001	3.316496164	0.092	0.109	42	5.131	0.001	4.016363636	0.128	0.145	37
4	0.04	4.631	0.001	3.316496164	0.074	0.091	46	4.081	0.001	4.016363636	0.102	0.119	41
5	0.05	3.878	0.001	3.316496164	0.062	0.079	49	3.416	0.001	4.016363636	0.085	0.102	44
6	0.06	3.354	0.001	3.316496164	0.053	0.070	52	2.955	0.001	4.016363636	0.074	0.091	47
7	0.07	2.966	0.001	3.316496164	0.047	0.064	55	2.614	0.001	4.016363636	0.065	0.082	50
7.41	0.0741	2.835	0.001	3.316496164	0.045	0.062	56	2.498	0.001	4.016363636	0.062	0.079	50
8	0.08	2.667	0.001	3.316496164	0.042	0.059	57	2.350	0.001	4.016363636	0.059	0.076	52
9	0.09	2.429	0.001	3.316496164	0.039	0.056	59	2.140	0.001	4.016363636	0.054	0.071	54
10	0.1	2.233	0.001	3.316496164	0.035	0.052	60	1.968	0.001	4.016363636	0.049	0.066	55
11	0.11	2.070	0.001	3.316496164	0.033	0.050	62	1.824	0.001	4.016363636	0.046	0.063	57
12	0.12	1.932	0.001	3.316496164	0.031	0.048	63	1.702	0.001	4.016363636	0.043	0.060	58
13	0.13	1.812	0.001	3.316496164	0.029	0.046	65	1.597	0.001	4.016363636	0.040	0.057	60
14	0.14	1.709	0.001	3.316496164	0.027	0.044	66	1.505	0.001	4.016363636	0.038	0.055	61
15	0.15	1.617	0.001	3.316496164	0.026	0.043	67	1.425	0.001	4.016363636	0.036	0.053	62
16	0.16	1.536	0.001	3.316496164	0.024	0.041	68	1.354	0.001	4.016363636	0.034	0.051	63
17	0.17	1.464	0.001	3.316496164	0.023	0.040	69	1.290	0.001	4.016363636	0.032	0.049	64
18	0.18	1.399	0.001	3.316496164	0.022	0.039	70	1.232	0.001	4.016363636	0.031	0.048	65
19	0.19	1.340	0.001	3.316496164	0.021	0.038	71	1.181	0.001	4.016363636	0.030	0.047	66
20	0.2	1.286	0.001	3.316496164	0.020	0.037	72	1.133	0.001	4.016363636	0.028	0.045	67
21	0.21	1.237	0.001	3.316496164	0.020	0.037	72	1.090	0.001	4.016363636	0.027	0.044	68
22	0.22	1.192	0.001	3.316496164	0.019	0.036	73	1.050	0.001	4.016363636	0.026	0.043	68
23	0.23	1.151	0.001	3.316496164	0.018	0.035	74	1.014	0.001	4.016363636	0.025	0.042	69
24	0.24	1.112	0.001	3.316496164	0.018	0.035	74	0.980	0.001	4.016363636	0.025	0.042	70
25	0.25	1.077	0.001	3.316496164	0.017	0.034	75	0.949	0.001	4.016363636	0.024	0.041	70
26	0.26	1.044	0.001	3.316496164	0.017	0.034	76	0.920	0.001	4.016363636	0.023	0.040	71
27	0.27	1.013	0.001	3.316496164	0.016	0.033	76	0.892	0.001	4.016363636	0.022	0.039	72
28	0.28	0.984	0.001	3.316496164	0.016	0.033	77	0.867	0.001	4.016363636	0.022	0.039	72
29	0.29	0.957	0.001	3.316496164	0.015	0.032	77	0.843	0.001	4.016363636	0.021	0.038	73
30	0.3	0.931	0.001	3.316496164	0.015	0.032	78	0.821	0.001	4.016363636	0.021	0.038	73

## Vedlegg I: FORSØK, DAGENS UTFORMING

		Begge stengt												
	Prototyp [m <sup>3</sup> /s]	Modell [l/s]			Rør kasse		Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler		
					[m/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]
	250	24.7		24.7	1.1	8.6	-0.00084	-0.09	19.20	18.38	17.43	97.00	5.045	58.5
	500	49.4	19.4	30.0	2.0	15.7	-0.00270	-0.27	31.00	28.40	25.91	170.00	5.375	143.1
<b>Qdim</b>	<b>750</b>	<b>74.1</b>	<b>44.1</b>	<b>30.0</b>	<b>2.2</b>	<b>17.3</b>	-0.00391	-0.40	41.63	35.88	33.48	222.00	5.577	194.9
	1000	98.8	68.8	30.0	1.6	12.6	-0.00192	-0.20	53.01	43.09	39.64	255-265	5.733	234.9
<b>QPMF</b>	<b>1400</b>	<b>138.3</b>	<b>108.3</b>	<b>30.0</b>	<b>0.6</b>	<b>4.7</b>	-0.00054	-0.05	75.41	50.86	53.63	340-370	6.155	343.0

Sjakt åpen												
Rør kasse		Rør sjakt		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler		
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]
1.1	8.6	0.9	2.1	10.7	-0.0007804	-0.08	19.26	18.53	17.51	98	5.051	60.0
1.90	14.9	1.5	3.4	18.4	-0.0024311	-0.25	31.07	28.61	25.97	173	5.374	142.8
1.9	14.9	1.5	3.4	18.4	-0.0030469	-0.31	41.81	36.37	33.81	222	5.580	195.6
1.4	11.0	0.8	1.8	12.8	-0.0016806	-0.17	53.08	42.30	40.11	255-265	5.727	233.3
0.6	4.7	0.4	0.9	5.6	-0.0005461	-0.06	75.67	52.26	53.13	340-370	6.155	343.0

Begge åpne														
Rør kasse		Rør sjakt		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler		
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]
1	7.9	0.9	2.1	1.00	1.5	11.44	-0.000763616	-0.08	19.22	18.59	17.43	98.00	5.059	62.0
1.8	14.1	1.4	3.2	1.40	2.1	19.47	-0.002261072	-0.23	31.09	28.59	26.16	170.00	5.374	142.8
1.8	14.1	1.5	3.4	1.40	2.1	19.70	-0.002670224	-0.27	41.86	36.24	33.66	222.00	5.918	282.3
1.4	11.0	0.9	2.1	0.40	0.6	13.66	-0.001472772	-0.15	53.08	42.55	40.28	255-265	5.734	235.1
0.5	3.9	0.4	0.9	-	-	4.84	-0.000568205	-0.06	75.30	51.88	52.74	340-370	6.154	342.8

Overfør. åpen												
Rør kasse		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler		
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]
1.1	8.6	1	1.5	10.2	-0.000808538	-0.08	19.25	18.43	17.58	98.00	5.063	63.1
1.9	14.9	1.7	2.6	17.5	-0.002642156	-0.27	31.03	28.63	26.06	170.00	5.377	143.6
2.1	16.5	1.7	2.6	19.1	-0.003285175	-0.33	41.62	36.21	33.38	222.00	6.016	307.4
1.4	11.0	0.5	0.8	11.8	-0.001790944	-0.18	53.17	42.59	40.35	255-265	5.732	234.6
0.6	4.7	-	-	4.7	-0.000610728	-0.06	75.11	51.21	53.19	350-370	6.155	343.0

## Vedlegg J: MÅLING TOPPUNKT, DAGENS UTFORMING

						Begge stengt	
	Prototyp [m <sup>3</sup> /s]	Modell [l/s]			Rør kasse		
					[m/s]	[l/s]	
	250	24.7		24.7	1.1	8.6394	
	500	49.4	19.4	30.0	2	15.708	
<b>Qdim</b>	<b>750</b>	<b>74.1</b>		<b>24.7</b>	<b>2.2</b>	<b>17.28</b>	
	800	79.1	49.1	30.0	2.2	17.28	
	850	84.0	54.0	30.0	2.1	16.49	
	900	88.9	58.9	30.0	1.7	13.35	
	950	93.9	63.9	30.0	1.8	14.14	
	1000	98.8	68.8	30.0	1.6	12.57	
<b>QPMF</b>	<b>1400</b>	<b>138.3</b>	<b>108.3</b>	<b>30.0</b>	<b>0.6</b>	<b>4.7124</b>	



## Vedlegg K: MÅLING LUKKING, DAGENS UTFORMING

					Begge stengt	
	Prototyp [m <sup>3</sup> /s]	Modell [l/s]			Rør kasse	
					[m/s]	[l/s]
	1000	98.8	58.8	40.0	1.6	12.57
	1050	103.8	63.8	40.0	1.20	9.42
	1100	108.7	68.7	40.0	1.30	10.21
	1150	113.6	73.6	40.0	1.00	7.85
	1200	118.6	78.6	40.0	1.00	7.85
	1250	123.5	83.5	40.0	0.90	7.07
	1300	128.5	88.5	40	0.90	7.07
Innløpet lukkes	1350	133.4	93.4	40	0.80	6.28
<b>QPMF</b>	<b>1400</b>	<b>138.3</b>	<b>98.3</b>	<b>40.0</b>	<b>0.60</b>	<b>4.71</b>

## Vedlegg L: VANNSTAND KASSE OG BASSENG, DAGENS UTFORMING

Begge stengt	Sjakt åpen	Begge åpne	Overfør åper
Vannstand basseng	Vannstand basseng	Vannstand basseng	Vannstand basseng
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
19.20	19.26	19.22	19.25
31.00	31.07	31.09	31.03
41.63	41.81	41.86	41.62
53.01	53.08	53.08	53.17
75.41	75.67	75.30	75.11

Begge stengt	Sjakt åpen	Begge åpne	Overfør åper
Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse v.s.
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
18.38	18.53	18.59	18.43
28.40	28.61	28.59	28.63
35.88	36.37	36.24	36.21
43.09	42.30	42.55	42.59
50.86	52.26	51.88	51.21

Begge stengt	Sjakt åpen	Begge åpne	Overfør åper
Vannstand kasse h.s.	Vannstand kasse h.s.	Vannstand kasse h.s.	Vannstand kasse h.s.
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
17.43	17.51	17.43	17.58
25.91	25.97	26.16	26.06
33.48	33.81	33.66	33.38
39.64	40.11	40.28	40.35
53.63	53.13	52.74	53.19

Gjennomsnitt			
	Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.
	[mm]	[mm]	[mm]
24.7	19.23	18.48	17.49
49.4	31.05	28.56	26.02
<b>74.1</b>	41.73	36.18	33.58
98.8	53.08	42.63	40.10
<b>138.3</b>	75.37	51.55	53.17

## Vedlegg M: VANNHASTIGHET UNDER KASSE OG OVERLØP V.S.

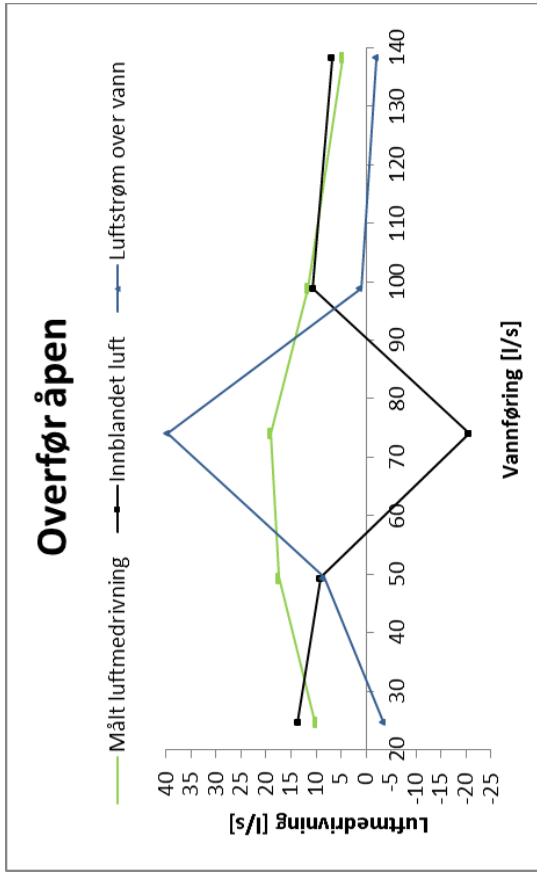
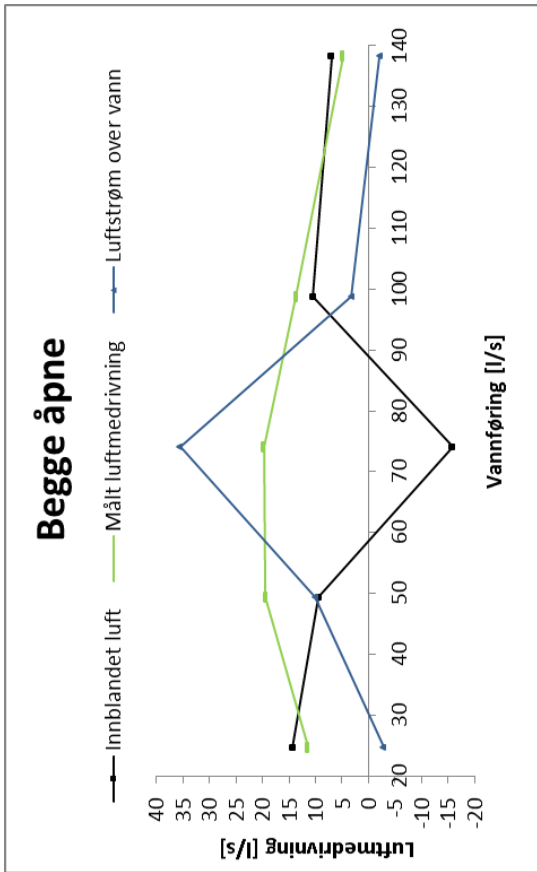
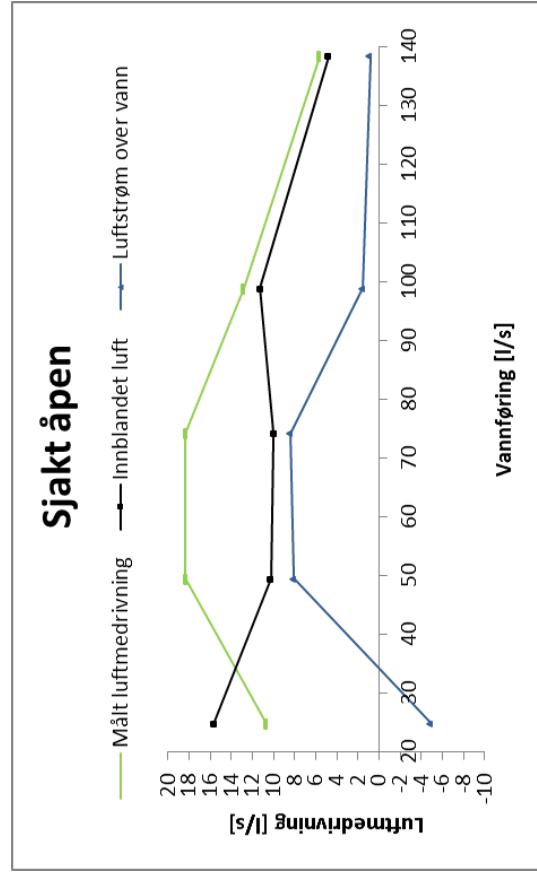
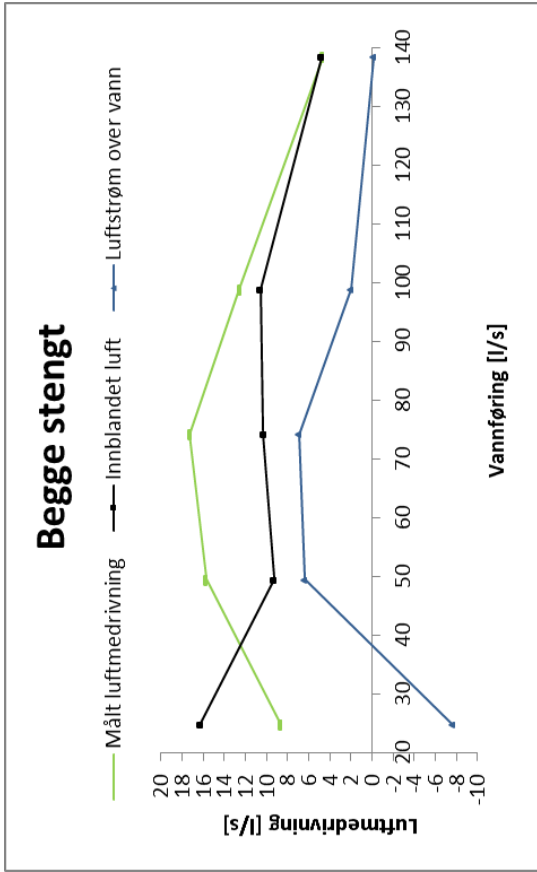
Mål kasse				Tot.lengde kasse	Gjennomsnittlig hastighet per side							
Venstre langside	Endeside	Skråside	Vannføring		Vannføring	Vannføring langside	Hastighet langside	Vannførin g skråside	Hastighet skråside	Vannførin g endeside	Hastighet endeside	
Gj.snitt høyde	7.8	9.8	10.0	420	l/s	m3/s	m3/s	m/s	m3/s	m/s	m3/s	m/s
Areal	1964.0	764.4	956.5		24.7	0.02	0.02	0.08	0.00	0.06	0.01	0.06
Areal tot	3684.9				49.4	0.05	0.03	0.15	0.01	0.12	0.01	0.12
	Høyder				74.1	0.07	0.05	0.23	0.01	0.18	0.02	0.18
	6.7	8	11.2		98.8	0.10	0.06	0.31	0.02	0.24	0.02	0.24
	7	10	11.2		138.3	0.14	0.08	0.43	0.03	0.34	0.03	0.33
	7.1	9.2	10.8		Dagens utforming, v.s.							
	7.1	9.1	10.4		Vannføring	Vannføring	Vannføring langside	Vannstand v.s.	Hastighet	Hastighets		
	7.4	9.6	10.5	Terskellengde	l/s	m3/s	m3/s	[mm]	[m/s]	høyde v.s.		
	7.8	9.1	11	4.95	24.7	0.0247	0.0151	18.48	0.33	5.52		
	7.9	10	11		49.4	0.0494	0.0301	28.56	0.43	9.25		
	8	10	10		74.1	0.0741	0.0452	36.18	0.50	12.98		
	8.3	11.5	9		98.8	0.0988	0.0602	42.63	0.57	16.61		
	8.3	11.5	7.5		138.3	0.1383	0.0843	51.55	0.66	22.26		
	8.4		7									
	8.4				Vannføring	Hastighet	Hastighet terskel v.s.	Gjennomsnitt	Hastighets høyde	Diff.vannst and kasse v.v. og bass	Falltap	
	8.4				l/s	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[mm]	[mm]	[mm]	
	8.3				24.7	0.08	0.33	0.20	2.10	1.74	-0.36	
	8.5				49.4	0.15	0.43	0.29	4.28	5.02	0.74	
	8.5				74.1	0.23	0.50	0.37	6.88	8.15	1.27	
	8.2				98.8	0.31	0.57	0.44	9.81	12.99	3.18	
	8				138.3	0.43	0.66	0.55	15.15	22.20	7.05	
	7.5											
	7				Langside	Skråside	Endeside					
					Hastighet	Hastighets-høyde	Hastighet	Hastighets-høyde	Hastighet	Hastighets-høyde		
					[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[mm]		
	6.5				0.08	0.30	0.06	0.18	0.06	0.18		
	5.8				0.15	1.20	0.12	0.73	0.12	0.71		
	5.9				0.23	2.70	0.18	1.65	0.18	1.60		
	7.8				0.31	4.79	0.24	2.94	0.24	2.84		
	9.5				0.43	9.40	0.34	5.76	0.33	5.57		
	9.1											

# Vedlegg N: LUFTSTRØM OVER VANN OG I VANN, DAGENS UTFORMING

Prototyp [m <sup>3</sup> /s]	Begge stengt														Sjakt åpen													
	Trykkmåler														Trykkmåler													
	Trykkmåler				Vann				Luft				Trykkmåler				Vann				Luft							
Modell [l/s]	Vann-stand [mm]	Strøm [mA]	Vann [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Høyde [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Strøm [l/s]	Målt [l/s]	Diff [l/s]	Vann-stand [mm]	Strøm [mA]	Vann [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Høyde [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Strøm [l/s]	Målt [l/s]	Diff [l/s]						
250	24.7	97.00	5.045	58.5	12860.5	1.9	38.5	8479.5	1.9	16.3	8.6	-7.6	98.00	5.051	60.0	13199.0	1.9	38.0	8361.0	1.9	15.6	10.7	-4.9					
500	49.4	170.00	5.375	143.1	31474.4	1.6	26.9	5925.6	1.6	9.3	15.7	6.4	172.50	5.374	142.8	31418.0	1.6	29.7	6532.0	1.6	10.3	18.4	8.1					
<b>750</b>	<b>74.1</b>	<b>222.00</b>	<b>5.577</b>	<b>194.9</b>	<b>42868.4</b>	<b>1.7</b>	<b>27.1</b>	<b>5971.6</b>	<b>1.7</b>	<b>10.3</b>	<b>17.3</b>	<b>7.0</b>	<b>222.00</b>	<b>5.580</b>	<b>195.6</b>	<b>43037.6</b>	<b>1.7</b>	<b>26.4</b>	<b>5802.4</b>	<b>1.7</b>	<b>10.0</b>	<b>18.4</b>	<b>8.4</b>					
1000	98.8	300.00	5.733	234.9	51667.7	1.9	25.1	5532.3	1.9	10.6	12.6	2.0	260.00	5.727	233.3	51329.3	1.9	26.7	5870.7	1.9	11.3	12.8	1.5					
<b>1400</b>	<b>138.3</b>	<b>300.00</b>	<b>6.155</b>	<b>343.0</b>	<b>75471.0</b>	<b>1.8</b>	<b>12.0</b>	<b>2629.0</b>	<b>1.8</b>	<b>4.8</b>	<b>4.7</b>	<b>-0.1</b>	<b>355.00</b>	<b>6.155</b>	<b>343.0</b>	<b>75471.0</b>	<b>1.8</b>	<b>12.0</b>	<b>2629.0</b>	<b>1.8</b>	<b>4.8</b>	<b>5.6</b>	<b>0.8</b>					

Prototyp [m <sup>3</sup> /s]	Begge åpne														Overfør åpen													
	Trykkmåler														Trykkmåler													
	Trykkmåler				Vann				Luft				Trykkmåler				Vann				Luft							
Modell [l/s]	Vann-stand [mm]	Strøm [mA]	Vann [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Høyde [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Strøm [l/s]	Målt [l/s]	Diff [l/s]	Vann-stand [mm]	Strøm [mA]	Vann [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Høyde [mm]	Areal [mm <sup>2</sup> ]	Hastighet [m/s]	Strøm [l/s]	Målt [l/s]	Diff [l/s]						
250	24.7	98.00	5.059	62.0	13650.2	1.8	36.0	7909.8	1.8	14.3	11.4	-2.9	98	5.063	63.1	13875.8	1.8	34.9	7684.2	1.8	13.7	10.2	-3.5					
500	49.4	170.00	5.374	142.8	31418.0	1.6	27.2	5982.0	1.6	9.4	19.5	10.1	170	5.377	143.6	31587.2	1.6	26.4	5812.8	1.6	9.1	17.5	8.4					
<b>750</b>	<b>74.1</b>	<b>222.00</b>	<b>5.918</b>	<b>282.3</b>	<b>62102.8</b>	<b>1.2</b>	<b>-60.3</b>	<b>-13262.8</b>	<b>1.2</b>	<b>-15.8</b>	<b>19.7</b>	<b>35.5</b>	<b>222</b>	<b>6.016</b>	<b>307.4</b>	<b>67630.6</b>	<b>1.1</b>	<b>-85.4</b>	<b>-18790.6</b>	<b>1.1</b>	<b>-20.6</b>	<b>19.1</b>	<b>39.7</b>					
1000	98.8	300.00	5.734	235.1	51724.1	1.9	24.9	5475.9	1.9	10.5	13.7	3.2	260	5.732	234.6	51611.3	1.9	25.4	5588.7	1.9	10.7	11.8	1.1					
<b>1400</b>	<b>138.3</b>	<b>300.00</b>	<b>6.154</b>	<b>342.8</b>	<b>75414.6</b>	<b>1.8</b>	<b>17.2</b>	<b>3785.4</b>	<b>1.8</b>	<b>6.9</b>	<b>4.8</b>	<b>-2.1</b>	<b>360</b>	<b>6.155</b>	<b>343.0</b>	<b>75471.0</b>	<b>1.8</b>	<b>17.0</b>	<b>3729.0</b>	<b>1.8</b>	<b>6.8</b>	<b>4.7</b>	<b>-2.1</b>					

Diagrammer:



## Vedlegg O: FORSØK, LAVERE RUHET

														Begge stengt					
Prototyp [m <sup>3</sup> /s]		Modell [l/s]				Rør kasse		Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler						
						[m/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]				
	250	24.7			24.7	1.5	11.8	0.039294	4.01	19.33	18.63	18.86	57	5.059	62.05				
	500	49.4	19.4	30.0		2.3	18.1	0.011451	1.17	30.96	28.19	27.28	150	5.338	133.58				
<b>Qdim</b>	<b>750</b>	<b>74.1</b>	<b>44.1</b>	<b>30.0</b>		<b>2.8</b>	<b>22.0</b>	0.001978	0.20	41.96	36.33	34.57	187	5.498	174.60				
	1000	98.8	68.8	30.0		2.2	17.3	-0.004601	-0.47	52.62	42.44	40.78	225	5.637	210.24				
<b>QPMF</b>	<b>1400</b>	<b>138.3</b>	<b>108.3</b>	<b>30.0</b>		<b>1.3</b>	<b>10.2</b>	-0.009579	-0.98	72.64	50.49	52.31	240	5.649	213.32				

Sjakt åpen													
Rør kasse		Rør sjakt		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
1.4	11.0	1.3	3.0	14.0	0.037387	3.81	19.29	18.66	18.83	67	5.060	62.30	
2.2	17.3	1.8	4.1	21.4	0.010854	1.11	30.95	28.37	27.68	152	5.341	134.35	
2.5	19.6	2.0	4.6	24.2	0.001228	0.13	42.00	36.17	34.28	189	5.498	174.60	
1.9	14.9	1.4	3.2	18.1	0.006566	0.67	52.81	42.53	41.53	225	5.637	210.24	
1.1	8.6	1.1	2.5	11.2	-0.025983	-2.65	72.43	50.66	51.64	240	5.665	217.42	

Begge åpne															
Rør kasse		Rør sjakt		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
1.3	10.2	1.2	2.7	1.3	2.0	14.9	0.040963	4.18	19.37	18.65	18.64	70	5.059	62.05	
2.1	16.5	1.7	3.9	1.9	2.9	23.3	0.004861	0.50	31.09	28.42	27.51	152	5.341	134.35	
2.3	18.1	1.9	4.4	2.0	3.0	25.5	-0.017873	-1.82	41.75	35.91	34.24	188	5.497	174.35	
1.7	13.4	1.3	3.0	1.1	1.7	18.0	0.004259	0.43	52.94	42.73	41.88	225	5.636	209.98	
1.0	7.9	1.1	2.5			10.4	-0.025555	-2.60	72.87	50.07	52.14	240	5.655	214.85	

Overfør. åpen													
Rør kasse		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
1.5	11.8	1.4	2.1	13.9	0.041858	4.27	19.31	18.73	18.88	70	5.059	62.05	
2.2	17.3	2.0	3.0	20.3	0.006895	0.70	31.13	28.47	27.59	152	5.341	134.35	
2.5	19.6	2.3	3.5	23.1	-0.020576	-2.10	34.38	36.17	34.53	187	5.497	174.35	
2.0	15.7	1.4	2.1	17.8	-0.003539	-0.36	52.78	42.09	41.31	225	5.635	209.73	
1.1	8.6			8.6	-0.026008	-2.65	72.95	50.04	51.97	240	5.728	233.57	

## Vedlegg P: VANNSTAND, LAVERE RUHET

Begge stengt	Sjakt åpen	Begge åpne	Overfør åper
Vannstand basseng	Vannstand basseng	Vannstand basseng	Vannstand basseng
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
19.33	19.29	19.37	19.31
30.96	30.95	31.09	31.13
41.96	42.00	41.75	34.38
52.62	52.81	52.94	52.78
72.64	72.43	72.87	72.95

Begge stengt	Sjakt åpen	Begge åpne	Overfør åper
Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse v.s.
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
18.63	18.66	18.65	18.73
28.19	28.37	28.42	28.47
36.33	36.17	35.91	36.17
42.44	42.53	42.73	42.09
50.49	50.66	50.07	50.04

Begge stengt	Sjakt åpen	Begge åpne	Overfør åper
Vannstand kasse h.s.	Vannstand kasse h.s.	Vannstand kasse h.s.	Vannstand kasse h.s.
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
18.86	18.83	18.64	18.88
27.28	27.68	27.51	27.59
34.57	34.28	34.24	34.53
40.78	41.53	41.88	41.31
52.31	51.64	52.14	51.97

Gjennomsnitt lavere ruhet			
	Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.
	[mm]	[mm]	[mm]
24.7	19.33	18.67	18.81
49.4	31.03	28.36	27.52
<b>74.1</b>	41.90	36.15	34.41
98.8	52.79	42.45	41.37
<b>138.3</b>	72.72	50.31	52.02

# Vedlegg Q: NØYAKTIGHET MÅLINGER

Dagens utforming:

Lufthastighet																																	
Begge stengt						Sjakt åpen						Begge åpne						Overfør åpen															
Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt						
Målt	Δ	Awik	Midler	Test	Målt	Δ	Awik	Midler	Test	Målt	Δ	Awik	Midler	Test	Målt	Δ	Awik	Midler	Test	Målt	Δ	Awik	Midler	Test	Målt	Δ	Awik	Midler	Test				
0																																	
24.7	1.1	1.333	1.80	FEIL	0.9	1.127	1.44	FEIL	1.8	0.81	2.054	1.64	FEIL	1.4	0.5	1.642	1.38	FEIL	1.4	0.4	1.642	1.44	FEIL	1.9	0.8	2.157	1.75	FEIL	1.7	0.7	1.951	1.59	FEIL
49.4	2	0.9	2.466	FEIL	1.5	0.6	1.745	FEIL	1.8	0	2.054	2.05	FEIL	1.5	0.1	1.745	1.69	FEIL	1.4	0	1.642	1.64	FEIL	2.1	0.2	2.363	2.26	FEIL	1.7	0	1.951	1.95	FEIL
74.1	2.2	0.2	2.466	FEIL	1.5	0.7	1.024	FEIL	1.4	0.4	1.642	1.85	FEIL	0.9	0.6	1.127	1.44	FEIL	0.4	3	0.612	1.13	FEIL	1.4	0.7	1.642	2.00	FEIL	0.5	1.2	0.715	1.33	FEIL
98.8	1.6	0.6	1.848	FEIL	0.4	0.4	0.612	FEIL	0.5	0.91	0.715	1.18	FEIL	0.4	0.5	0.642	0.87	FEIL						0.6	0.8	0.818	1.23	FEIL					
138.3	0.6	1	0.818	FEIL	0.4	0.4	0.612	FEIL	0.5	0.91	0.715	1.18	FEIL	0.4	0.5	0.642	0.87	FEIL						0.6	0.8	0.818	1.23	FEIL					

Differensialtrykk																																
Begge stengt						Sjakt åpen						Begge åpne						Overfør åpen														
Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt					
Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	
Q																																
24.7	-0.00084		0.00075	OK	-0.00078		0.00075	OK	-0.00076		0.00075	OK	-0.00081		0.00075	OK	-0.00081		0.00075	OK	-0.00081		0.00075	OK	-0.00081		0.00075	OK	-0.00081		0.00075	OK
49.4	-0.00270		0.00185	OK	-0.00243		0.00165	OK	-0.00226		0.00150	OK	-0.00264		0.00075	OK	-0.00264		0.00075	OK	-0.00264		0.00075	OK	-0.00264		0.00075	OK	-0.00264		0.00075	OK
74.1	-0.00391		0.00122	OK	-0.00305		0.00062	OK	-0.00267		0.00041	FEIL	-0.00329		0.00075	FEIL	-0.00329		0.00075	FEIL	-0.00329		0.00075	FEIL	-0.00329		0.00075	FEIL	-0.00329		0.00075	FEIL
98.8	-0.00192		0.00199	OK	-0.00168		0.00137	OK	-0.00147		0.00120	OK	-0.00179		0.00075	OK	-0.00179		0.00075	OK	-0.00179		0.00075	OK	-0.00179		0.00075	OK	-0.00179		0.00075	OK
138.3	-0.00054		0.00138	OK	-0.00055		0.00113	OK	-0.00057		0.00090	OK	-0.00061		0.00075	OK	-0.00061		0.00075	OK	-0.00061		0.00075	OK	-0.00061		0.00075	OK	-0.00061		0.00075	OK

Trykkmåler																																
Begge stengt						Sjakt åpen						Begge åpne						Overfør åpen														
Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt					
Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	Målt	Δ	Awik	Test	
24.7	5.045		0.1	OK	5.051		0.1	OK	5.059		0.1	OK	5.063		0.1	OK	5.063		0.1	OK	5.063		0.1	OK	5.063		0.1	OK	5.063		0.1	OK
49.4	5.375	0.330	0.1	OK	5.374	0.323	0.1	OK	5.374	0.315	0.1	OK	5.377	0.314	0.1	OK	5.377	0.314	0.1	OK	5.377	0.314	0.1	OK	5.377	0.314	0.1	OK	5.377	0.314	0.1	OK
74.1	5.577	0.202	0.1	OK	5.580	0.206	0.1	OK	5.918	0.544	0.1	OK	6.016	0.639	0.1	OK	6.016	0.639	0.1	OK	6.016	0.639	0.1	OK	6.016	0.639	0.1	OK	6.016	0.639	0.1	OK
98.8	5.733	0.156	0.1	OK	5.727	0.147	0.1	OK	5.734	0.184	0.1	OK	5.732	0.284	0.1	OK	5.732	0.284	0.1	OK	5.732	0.284	0.1	OK	5.732	0.284	0.1	OK	5.732	0.284	0.1	OK
138.3	6.155	0.422	0.1	OK	6.155	0.428	0.1	OK	6.154	0.42	0.1	OK	6.155	0.423	0.1	OK	6.155	0.423	0.1	OK	6.155	0.423	0.1	OK	6.155	0.423	0.1	OK	6.155	0.423	0.1	OK



Lavere ruhet:

Q	Lufthastighet																									
	Begge stengt						Sjakt åpen						Begge åpne						Overfør åpen							
	Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt				
	Målt Δ	Awik	Midler	Test	Målt Δ	Awik	Midler	Test	Målt Δ	Awik	Midler	Test	Målt Δ	Awik	Midler	Test	Målt Δ	Awik	Midler	Test	Målt Δ	Awik	Midler	Test		
24.7	1.5	1.745	2.569	2.16	FEIL	1.4	1.642	2.2	0.8	2.466	2.05	FEIL	1.8	0.5	2.054	1.8	0.5	1.539	1.3	1.539	1.3	1.539	1.3	1.539		
49.4	2.3	0.8	2.569	2.83	FEIL	2.5	0.3	2.775	1.9	0.6	2.457	2.62	FEIL	2	0.2	2.26	2.16	FEIL	2.3	0.2	2.569	2.47	FEIL	2.3	0.2	
74.1	2.8	0.5	3.084	2.83	FEIL	1.9	0.6	2.457	1.9	0.6	2.457	2.62	FEIL	1.4	0.6	1.642	1.9	0.6	2.457	1.9	0.6	2.457	2.62	FEIL	2.3	0.3
98.8	2.2	0.6	2.466	2.78	FEIL	1.1	0.8	1.333	1.1	0.8	1.333	1.49	FEIL	1.1	0.3	1.333	1.49	FEIL	1.1	0.3	1.333	1.44	FEIL	1.1	0.9	
138.3	1.3	0.9	1.539	2.00	FEIL	1.1	0.8	1.333	1.1	0.8	1.333	1.49	FEIL	1.1	0.3	1.333	1.49	FEIL	1.1	0.3	1.333	1.44	FEIL	1.1	0.9	

Differensialtrykk																								
Begge stengt						Sjakt åpen						Begge åpne						Overfør åpen						
Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			
Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	
24.7	-0.00086	0.00075	-0.00087	0.00075	0.00075	-0.00094	0.00075	0.00075	-0.00094	0.00075	0.00075	-0.00115	0.00075	0.00075	-0.00115	0.00075	0.00075	-0.00115	0.00075	0.00075	-0.00115	0.00075	0.00075	
49.4	-0.00326	0.002400515	0.00075	OK	-0.00293	0.002057251	0.00075	OK	-0.00267	0.001734514	0.00075	OK	-0.00303	0.001882403	0.00075	OK	-0.00349	0.001365449	0.00075	OK	-0.00234	0.002049974	0.00075	OK
74.1	-0.00528	0.002013531	0.00075	OK	-0.00413	0.001203631	0.00075	OK	-0.00348	0.000813153	0.00075	OK	-0.00439	0.001365449	0.00075	OK	-0.00439	0.001365449	0.00075	OK	-0.00234	0.002049974	0.00075	OK
98.8	-0.00290	0.002375437	0.00075	OK	-0.00205	0.002081321	0.00075	OK	-0.00167	0.00181549	0.00075	OK	-0.00167	0.00181549	0.00075	OK	-0.00054	0.001798845	0.00075	OK	-0.00054	0.001798845	0.00075	OK
138.3	-0.00054	0.002361254	0.00075	OK	-0.00048	0.001571291	0.00075	OK	-0.00048	0.001189911	0.00075	OK	-0.00048	0.001189911	0.00075	OK	-0.00054	0.001798845	0.00075	OK	-0.00054	0.001798845	0.00075	OK

Trykkmåler																								
Begge stengt						Sjakt åpen						Begge åpne						Overfør åpen						
Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			Kasse			Sjakt			
Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	Målt Δ	Awik	Test	
24.7	5.059	0.1	5.060	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	0.1	5.059	
49.4	5.338	0.279	0.1	OK	5.341	0.281	0.1	OK	5.341	0.282	0.1	OK	5.341	0.282	0.1	OK	5.341	0.282	0.1	OK	5.341	0.282	0.1	OK
74.1	5.498	0.16	0.1	OK	5.498	0.157	0.1	OK	5.497	0.156	0.1	OK	5.497	0.156	0.1	OK	5.497	0.156	0.1	OK	5.497	0.156	0.1	OK
98.8	5.637	0.139	0.1	OK	5.637	0.139	0.1	OK	5.636	0.139	0.1	OK	5.636	0.139	0.1	OK	5.635	0.138	0.1	OK	5.635	0.138	0.1	OK
138.3	5.649	0.012	0.1	FEIL	5.665	0.028	0.1	FEIL	5.665	0.019	0.1	FEIL	5.665	0.019	0.1	FEIL	5.665	0.019	0.1	FEIL	5.665	0.019	0.1	FEIL

# Vedlegg R: ETTERPRØVBARHET

## Dagens utforming:

	Begge stengt													
	Prototyp [m <sup>3</sup> /s]	Modell [l/s]			Rør kasse		Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler		
						[m/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]
Qdim SAMMNLIGNING	750	74.1	44.1	30.0	2.2	17.3	-0.003578785	-0.36	41.92	36.49	33.75	225	5.592	198.7
Qdim 02.05.17	750	74.12	44.1	30	2.2	17.3	-0.003912702	-0.40	41.63	35.88	33.48	222	5.577	184.1
			Avvik	%	0	0	9	9	-1	-2	-1	-1	0	-8
			Diff		0	0	0	0	0	1	0	3	0	15

Sjakt åpen													
Rør kasse		Rør sjakt		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
1.9	14.9	1.6	3.7	18.6	-0.00272851	-0.28	42.02	36.59	33.14	225	5.591	198.4	
1.9	14.9	1.5	3.4	18.4	-0.00168058	-0.171	41.81	36.37	33.81	222	5.580	184.9	
0	0	-7	-7	-1	-62	-62	-1	-1	2	-1	0	-7	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	3	0	14	

Begge åpne														
Rør kasse		Rør sjakt		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler		
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]
1.8	14.1	1.4	3	1.40	2.1	19.5	-0.002345401	-0.24	41.93	36.59	33.71	225	5.591	198.4
1.8	14.1	1.5	3	1.40	2.1	19.7	-0.002670224	-0.27	41.86	36.24	33.66	222	5.918	271.5
0	0	7	7	0	0	1	12	12	0	-1	0	-1	6	27
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	-73

Overfør. åpen													
Rør kasse		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
2.0	15.7	1.6	2.4	18.1	-0.002958112	-0.30	42.02	36.66	33.33	227.00	5.593	199.0	
2.1	16.5	1.7	2.6	19.1	-0.003285175	-0.33	41.62	36.21	33.38	222	6.016	296.6	
5	5	6	6	5	10	10	-1	-1	0	-2	7	33	
0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	5	0	-98	

## Lavere ruhet:

		Begge stengt														
		Prototyp [m <sup>3</sup> /s]	Modell [l/s]				Rør kasse		Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler		
						[m/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
22.05.2017	Qdim	750	74.1	44.1	30.0	2.8	22.0	0.00842	0.86	41.76	35.80	38.12	190.00	5.50	175.63	
15.05.2017	Qdim	750	74.12	44.1	30	2.8	22.0	0.00198	0.20	42.0	36.3	34.6	187.0	5.5	174.6	
	Awwik	%				0.0	0.0	325.6	325.6	-0.5	-1.4	10.3	1.6	0.1	0.6	
		diff				0.0	0.0	0.0	0.7	-0.2	-0.5	3.6	3.0	0.0	1.0	

Sjakt åpen													
Rør kasse		Rør sjakt		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
2.5	19.6	2.1	4.8	24.4	0.02005	2.04	41.87	36.35	37.92	190	5.50	175.63	
2.5	19.6	2.0	4.6	24.2	0.00123	0.1	42.0	36.2	34.3	189.0	5.5	174.6	
0.0	0.0	5.0	5.0	0.9	1532.7	1532.7	-0.3	0.5	10.6	0.5	0.1	0.6	
0.0	0.0	0.1	0.2	0.2	0.0	1.9	-0.1	0.2	3.6	1.0	0.0	1.0	

Begge åpne															
Rør kasse		Rør sjakt		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
2.3	18.1	1.9	4.4	2.0	3.0	25.5	0.02	2.54	42.13	36.36	38.32	190	5.50	175.63	
2.3	18.1	1.9	4.4	2.0	3.0	25.5	0.0	-1.8	41.7	35.9	34.2	188.0	5.5	174.3	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-239.4	-239.4	0.9	1.3	11.9	1.1	0.1	0.7	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.4	0.4	0.4	4.1	2.0	0.0	1.3	

Overfør. åpen													
Rør kasse		Rør overfør.		SUM	Diff.trykk		Vannstand basseng	Vannstand kasse v.s.	Vannstand kasse h.s.	Trykkmåler			
[m/s]	[l/s]	[m/s]	[l/s]	[l/s]	[kPa]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mA]	[mm]	
2.6	20.4	2.6	4.0	24.4	0.03140	3.20	42.09	36.50	38.34	187.00	5.50	175.63	
2.5	19.6	2.3	3.5	23.1	0.0	-2.1	34.4	36.2	34.5	187.0	5.5	174.3	
4.0	4.0	13.0	13.0	5.4	-252.6	-252.6	22.4	0.9	11.0	0.0	0.1	0.7	
0.1	0.8	0.3	0.5	1.2	0.1	5.3	7.7	0.3	3.8	0.0	0.0	1.3	