

# HYDRAULISK ANALYSE AF LETVÆGTS KONTRAKLAP

an

Jens Bjerrum Markussen Nikolaj Skov Gravesen 9.-10. semester Vand og Miljø 7. juni 2019



#### Titel

Hydraulisk analyse af letvægts kontraklapper

Projekttype

Afgangsprojekt

#### Projektperiode

September 2018 - juni 2019

#### Deltagere

Jens Bjerrum Markussen Nikolaj Skov Gravesen

#### Vejledere

Jesper Ellerbaek Nielsen Michael Robdrup Rasmussen

Sideantal: 96 Afsluttet: 7. juni 2019 Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet Institut for Byggeri og Anlæg Thomas Manns Vej 23 9220 Aalborg Øst www.civil.aau.dk

#### Synopsis:

Denne rapport omhandler undersøgelse af letvægts kontraklapper og bestemmelse af sammenhængen mellem beregningsparametre. Til at udføre undersøgelsen er der anvendt modelforsøg med plastskiver og forsøg med en udleveret Ø310 letvægts kontraklap fra Dannozzle. Ud fra forsøgsresultaterne er to sammenhænge bestemt; en mellem åbningsvinklen af en kontraklap i forhold til middelhastigheden og en med åbningsvinklen i forhold til modstandstallet. Disse to sammenhænge anvendes til at opstille en dimensioneringsmodel for kontraklappen. Den sidstnævnte sammenhæng muliggør også bestemmelse af energitabet fra en kontraklap som et enkelttab. For at kunne opstille sådan dimensioneringsmodel er der bestemt en systembeskrivelse for, hvordan momentbalancen for en kontraklap udsat for et flow fungerer. Modellen kan bestemme energitabet fra en kontraklap med vilkårlig vægt og er derfor anvendt til at vise forskellen mellem en letvægts kontraklap og en stålkontraklap. hvor energitabet er op til to gange lavere for letvægts kontraklappen.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

# Abstact

This thesis studies flap gates and the correlation between calculation parameters. To study this, a modelexperiment is used with plastic discs and an experiment with an extradited lightweight flap gate with a diameter of 0,31 meters from Dannozzle. From the experiment results two correlation are defined, one between opening angel of a flap gate relative to the mean velocity and one between the opening angel relative to the resistance number. These two correlations are used to make a dimensioning model for flap gates. The last mentioned correlation makes it possible to calculate the headloss from a flap gate as individual energy losses. To make such a dimensioning model, there is established a moment balance for flap gates, exposed to a flow. The model can calculate the headloss from a flap gate with an arbitrary weight and therefore is used to determine the difference in headloss for a steel flap gate and and the new lightweight flap gate, where the headloss is almost half for the new lightweight flap gate.

Nærværende rapport er udarbejdet af afgangsstuderende fra 9.-10. semester på civilingeniøruddannelsen Vand og Miljø ved Aalborg Universitet. Rapporten er skrevet i tidsperioden fra d. 1. september 2018 til d. 7. juni 2019. Det overordnede emne for projektet er *Forbedret beskyttelse af byer med ny type kontraklap*.

Formålet med projektet er at undersøge og eksperimentere med kontraklapper og komme frem til en dimensioneringsmodel, der kan udregne energitabet fra kontraklapper.

#### Læsevejledning

I rapporten angives kilder efter Harvard-metoden med [Efternavn, År]. Hvis der fremgår [red.] i kilden til en figur betyder det, at der har være redigeret på figuren. Alle kilder fremgår af en litteraturliste i slutningen af rapporten.

Figurer, formler og tabeller er nummereret efter det kapitel, de befinder sig i, så den første figur i kapitel 2 hedder figur 2.1 og så fremdeles.

Hvis en kildehenvisning ikke optræder ved figurer og tabeller, er de udarbejdet af gruppen.

Kilden til forsidebillede er Eriksen, 2018.

# Indholdsfortegnelse

1	Indledning	1	
	1.1 Konsekvenser ved oversvømmelser	1	
	1.2 Beskrivelse af traditionelle stålkontraklapper	3	
	1.3 Beskrivelse af klimaklappen	4	
<b>2</b>	Systembeskrivelse af kontraklapper	7	
	2.1 Moment påvirkning af kontraklap	7	
	2.2 Energiligningen	10	
3	Problemformulering	13	
4	Modelforsøg af skiver	15	
	4.1 Forsøgsopstilling af modelforsøg	15	
	4.2 Resultater fra modelforsøgene	18	
	4.3 Bestemmelse af korrektionskoefficient	22	
	4.4 Validering af koefficient med CFD-model	24	
	4.5 Diskussion af modelforsøg	27	
<b>5</b>	Undersøgelse af klimaklappen	29	
	5.1 Klimaklappens opbygning	29	
	5.2 Systembeskrivelse af klimaklappen	30	
	5.3 Forsøgsopstilling	33	
	5.4 Bestemmelse af måleopstillingens energitab	34	
	5.5 Forsøg med klimaklappen	41	
	5.6 Validering af dimensioneringsmodel	48	
	5.7 Diskussion af undersøgelsen af klimaklappen	50	
6	Konklusion	53	
Lit	tteratur	55	
A	Digitale bilag	57	
в	Rørtab 5		
С	Egenskaber og aflæsning af propelmåler 6		
D	Dimensionerne af skiverne til modelforsøget 6		
Е	Bestemmelse af hastighed ved kontraklap model baseret på Bernoullis		
$\mathbf{F}$	Resultater for modelforsøg 1 og 2		
$\mathbf{G}$	CFD illustrationer		
н	Klimaklappens dele	75	

Ι	Bestemmelse af det effektive areal	77
J	${f Angrebspunkt}$	81
K	Resultater fra forsøg af klimalklappen	83
$\mathbf{L}$	Lilliefors test	85

# Indledning 1

Danmark har i forhold til dets størrelse et af de længste kystlinjer i verden. Det har resulteret i, at mange havnebyer er blevet opført langs de danske kyster, da det kan være fordelagtigt indenfor transport og fiskeri. Placeringerne nær havet medbringer også ulemper, som risiko for oversvømmelser og erodering af kysten. Oversvømmelser forekommer oftest grundet havvandsstigning, kraftig nedbør eller stormfloder. Senest blev havene omkring Fyn ramt af en stormflod d. 2. januar 2019, hvor vandstanden nogle steder kom 1,62 meter over det normale, hvilket efterlod byområder oversvømmet. En af de største danske oversvømmelser, forekommet i nyere tid, var d. 2. juli 2011, hvor Danmark blev udsat for et kraftigt skybrud. I hovedstaden blev der målt en regnmængde på 135,4 mm på et døgn, hvor normalen for hele juli måned er 67 mm [Climate-Data, 2018]. Begge hændelser fremgår af figur 1.1 [Mandrup m.fl., 2019].



**Figur 1.1.** Billedet til venstre viser Istedgade, København d. 2. juli 2011 [Risager, 2011, red.] og billedet til højre viser Sønderborg Kommune d. 2. januar 2019 [Olsen, 2019].

### 1.1 Konsekvenser ved oversvømmelser

Oversvømmelser kan have væsentlige negative konsekvenser på helbred, økonomi, miljø og kulturarv. Ved hændelsen d. 2. juli 2011 blev der rapporteret mange skader, hvilket indledte til at kommunerne og forsyningerne i København og Frederiksberg påbegyndte et samarbejde med Forsikring & Pension om at bestemme den totale skadesudbetaling som efterfølge af skybruddet. Ved totalopgørelsen for oversvømmelseserstatningen viste det sig at være den dyreste oversvømmelseshændelse i Danmark, som lød på 92.533 skader med en omkostning på ca. 6,2 mia. kr. [Hasling, Villadsen og Kashani, 2014] [Forsikring & Pension, 2017].

Ifølge miljøstyrelsen er der en øget risiko for oversvømmelser i fremtiden. De fremtidige klimaforandringer betyder højere middelvandsstand, mere årsnedbør og ekstremhændelser

som stormfloder og skybrud, vil ske oftere. Dette kan være skyld i, at flere områder vil være udsat for oversvømmelse. Dette afspejles også i oversvømmelsesdirektivet, hvor der siden 2016 er udpeget fire nye risikoområder til de 10 forinden udpegede områder, hvoraf to af områderne også er væsentlig udvidet. Det er ikke kun i Danmark, at risikoen for oversvømmelser udbreder sig. EU's oversvømmelsesdirektiv blev opført i 2007, efter en periode fra 1998 til 2002, hvor Europa var udsat for over 100 større oversvømmelser, der kostede ca. 700 menneskeliv, evakuering af en halv million mennesker og omkostninger på mindst 25 mia. EUR. Siden 2007 har direktivet vurderet risikoen for oversvømmelser og derved reduceret muligheden for de negative konsekvenser. Dette gøres ved at udpege risikoområder, hvor der fokuseres på faren for oversvømmelser og sårbarheden i området. Selve udpegningen ændrer ikke på konsekvenserne, men giver områderne mulighed for at forebygge mod oversvømmelser [Kystdirektoratet, 2018].

Mange af havnebyerne har haft deres lokation over 1000 år, hvilket gør at problemerne ved havvandsstigningerne er begyndt at ophobe sig og blive et større problem i forhold til oversvømmelser [Hans Krongaard Kristensen and Bjørn Poulsen, 2016]. En løsning kunne være at flytte bydelene, men af økonomiske og kulturelle grunde er det sjældent en mulighed. Derimod implementeres løsninger til at forebygge oversvømmelser f.eks. ved at aflede eller holde vandet ude af byerne. Dette løses f.eks. med diger eller højvandsmure, der beskytter byerne specielt under stormfloder ved at holde vandet væk fra byerne. Ved de kraftige regnhændelser er der meget vand, som skal ledes ud af byer og i nogle tilfælde kan afløbssystemet ikke følge med, derfor benyttes pumper til at føre vandmængden på overfladerne væk. Denne metode har større energiomkostninger i forhold til andre løsninger og kan være upålidelig på grund af strømsvigt eller andre mekaniske fejl. Den sidste forebyggende løsning, som nævnes her, er en kontraventil, der normalt bruges til at afhjælpe danske afløbssystemer mod indtrængende havvand. I Danmark benyttes typisk kontraklapper lavet af stål eller støbejern, som gør at kontraklapperne er tunge [Gerhard Christensen A/S, 2011]. Denne høje vægt giver et stort modtryk, som afløbssytemet skal overkomme, før systemet kan aflastes. Det ekstra modtryk kan betyde, at der opstår scenarier, hvor afløbssystemet ikke udleder regnvand, hvorfor der kan ske opstuvning og i værste fald oversvømmelser opstrøms. Dette fremgår der eksempler på af figur 1.2.



Figur 1.2. A. Kontraklappen holder havvandet ude af afløbssystemet, men regnvandet opstuver i systemet. B. Kontraklappen er åben og vandet løber ud af systemet.

Et nordjysk firma har opfundet en ny type kontraklap, kaldet en klimaklap, som er en letvægts kontraklap. Denne opfindelse kan være svaret til det store modtryk fra de traditionelle stålkontraklapper, så antallet af scenarier, hvor afløbssystemet ikke kan udlede regnvand, muligvis reduceres. Dette kan betyde, at risikoen for oversvømmelser nedsættes.

# 1.2 Beskrivelse af traditionelle stålkontraklapper

Kontraventiler har en bestemt funktion, som er at lukke for den ene strømningsretning. Af figur 1.3 fremgår et principskitse af en kontraventils funktion. Åbningen af ventilen er afhængig af trykniveauet på begge sidder af ventilen. Hvis trykket er størst på indløbsiden af ventilen, åbner den og omvendt hvis trykket er størst på udløbssiden lukker den.



Figur 1.3. Principskitse af kontraventil.

Der findes flere typer kontraventiler, som egner sig bedre ved bestemte forhold, f.eks. kugleventiler, membraner og manuelt styrede låger. Ved valg af ventil er det typisk energitabet og vedligeholdelsen, der er de afgørende faktorer. Kontraklapper er den ventiltype, som oftest vælges til at beskytte afløbssystemer mod indtrængende havvand. Dette er en af de mest simple og ældste ventiler. Kontraklapper er placeret for enden af en udledningsledning, hvor de er udsat for naturlige kræfter. Denne placering gør det let at udskifte og observere om kontraklappen er funktionsdygtig [AECOM, 2012]. Under stormvejr kan det forekomme at grene eller andet sætter sig i åbningen af kontraklappen, hvilket forhindrer den i at lukke tæt, og derved mister kontraklappen sin funktion.



Figur 1.4. Traditionel stålkontraklap.

Stål og støbejern er materialer, som er gode til at optage kræfter, men de er ikke særlig fleksible. Derfor ender kontraklapper ofte med at deformere, efter de har været udsat for en kraftig storm med bølger, der slår ind. Når en kontraklap deformere kan den miste sin funktion, og det er nødvendigt at udskifte den. Udskiftningen af en kontraklap kan være helt ned til 1-2 år alt efter, hvor udsat den er placeret [Hansen, 2019]. Et andet problem er blokering af kontraklappen, i form af sand og andre materialer samt genstande, der kan forhindre kontraklappe i at fungere efter hensigten. Det gør, at der er meget eftersyn i form af vedligeholdelse eller udskiftning af kontraklappen. Af figur 1.4 fremgår et billede af en traditionel kontraklap af stål, som har flere af de omtalte fejl; let deformering og blokering af sand. Modtrykket fra en stål kontraklap, samt en vandstandstigning, kan tilsammen lede til scenarier, hvor modstandstrykket er så stort, at kontraklappen ikke åbnes. Dette leder til opstuvning af regnvand i afløbssystemet og i værste fald oversvømmelse opstrøms. Opstuvning og tilbagestrømmende vand i afløbssystemet kan være meget kritisk for rensningsanlæg, da saltvand kan skade renseprocesserne i anlægget.

#### 1.3 Beskrivelse af klimaklappen

Klimaklappen fungerer på samme måde som den traditionelle stålkontraklap og eksemplet af figur 1.3. Det nye ved klimaklappen er fremstillingen og materialerne den er opbygget af. Klimaklappen består af flere sammensatte dele, hvor selve klappen er lavet af glas-epoxy, som også anvendes til fremstilling af vindmøllevinger. Det er et fleksibelt materiale, som kan udholde stormvejr uden at deformere permanent. Monteringsdele, som hængsler og beslag, er lavet af rustfrit stål eller plast, og pakningsmaterialet er glastråd. Klimaklappen er vandskåret, hvilket er med til at give længere levetid [Dannozzle, 2016]. Det er observeret at algevækst, samt rurer, ikke vokser på klimaklappen, hvilket anses at være en fordel, da de nu ikke vil trænge ind og påvirke strømingen i røret [Eriksen, 2018]. Der er mindre vedligeholdelse og levetid af klimaklappen er længere end den traditionelle stålkontraklap, hvilket oftest vil være mere økonomisk rentable.



Figur 1.5. Doppeltklap, type af klimaklap fra Dannozzle [Eriksen, 2018]

Dannozzle, firmaet bag klimaklappen har en vision om at videreudvikle deres kontraklapper. Videreudviklingen har blandt andet bestået af et system af special kontraklapper, som kan grave sig selv fri fra blokerende sand. Et af de nyere tiltag i udviklingen er at påsætte vandfang på klimaklappen, som skulle give højere åbningsvinkel ved lave vandføringer, hvilket skulle give større udledning. Ydermere er klimaklappen i forhold til de traditionelle stålkontraklapper konstrueret af letvægtsdele, som kan have stort indflydelse på energitabet af klimaklappen. Dette energitab kaldes for et enkelttab og beskrives i følgende kapitel.

# Systembeskrivelse af kontraklapper 2

I dette kapitel vil systembeskrivelsen af kontraklapper bestemmes og, hvordan et system påvirker en kontraklap.

For at bestemme de hydrauliske virkemåder for en dykket kontraklap, skal der først skabes forståelse for systemet. Det er der overordnet brugt to teoretiske udgangspunkter til at fastslå; momentbalance af en kontraklap, og energiligningen. Momentbalance benyttes til at finde en relation mellem åbningsvinklen og vandføringen. Energiligningen bruges til at bestemme relationen mellem åbningsvinklen, vandføringen og enkelttabet for en kontraklap.

## 2.1 Moment påvirkning af kontraklap

Der opbygges en teoretisk sammenhæng for momentet af en kontraklap. Denne sammenhæng vil tage udgangspunkt i kraftpåvirkning og momentdrejning af en kontraklap. Figur 2.1 viser kraftsystemet af en kontraklap og de tilhørende arme, a, omdrejningspunktet, M og åbningsvinklen af en kontraklap  $\theta$ .



Figur 2.1. Kræfterne der påvirker en dykket kontraklap.

Det antages at en kontraklap påvirkes af tre kræfter; tyngdekraft,  $F_t$ , opdrift,  $F_{op}$ , og kraftpåvirkningen fra vandstrømningen,  $F_v$ . Opdriften fra vandet har samme angrebspunkt som tyngdekraften, men er modsatrettet, og kan derfor modregnes tyngdekraften. Angrebspunktet for tyngdekraften og opdriften bestemmes ud fra tyngdepunktet, og vandkraftens angrebspunkt kan bestemmes ved at finde kontraklappens tyngdepunkt. Armene ændrer sig alt efter åbningsvinklen af kontraklappen som vist på figur 2.1. Derved kan momentet omkring M bestemmes ved formel (2.1) [Meriam og Kraige, 2013].

$$M = F_v a_v - (F_t - F_{op}) a \sin(\theta)$$
(2.1)

Hvor:

 $\begin{array}{lll} M & \text{Momentet omkring } M & [\text{Nm}] \\ F_v & \text{Vandkraft [N]} \\ F_t & \text{Tyngdekraften af kontraklappen [N]} \\ F_{op} & \text{Opdriften af kontraklappen [N]} \\ a & \text{Armen til tyngdekraften [m]} \\ a_v & \text{Armen til vandkraften [m]} \\ \end{array}$ 

 $\theta$  Åbningsvinklen af kontraklappen [grader]

Til bestemmelsen af vandkraften,  $F_v$ , er der undersøgt to teoretiske grundlag; jet påvirkning af en plade og Bernoullis princip omkring dynamisk tryk. Typisk strømmer vandet i et rør, før det rammer en kontraklap. Vandets påvirkning på kontraklappen kan både anses som værende en jetstråle, eller et hastighedstryk fra det dynamiske tryk i vandet, hvorfor begge teoretiske opfattelser undersøges.

Når en plade anbringes i en jetståle, udøves en kraft fra jetstålen på pladen. Efter jetstrålen rammer overfladen på en plade afbøjes jetstrålen i forhold til pladen, og hastigheden vil være nul i retningen af jetstrålen. Denne kraft er beskrevet ud fra Newtons anden lov, der omhandler, hvordan en masse vil ændre dets hastighed, efter det påvirkes af en resulterende kraft.

Dynamisk tryk er et udtryk fra Bernoullis ligning. I Bernoullis ligning indgår statisk, dynamisk og det total tryk. Ligningen er udledt fra loven om bevarelse af energi. Med Bernoullis tilgang vil et legeme placeret i en strømlinie have et stagnationspunkt, på strømningssiden af legemet. I stagnationspunktet deler strømningen sig, dette sker kun, hvis hastigheden er nul i stagnationspunktet. Ved at benytte Bernoullis ligning i et punkt på strømlinien kan det dynamiske tryk bestemmes i stagnationspunktet. Da trykket er proportionalt på overfladen af legemet kan strømningskraften udtrykkes herfra.

Vandkraften udledt fra Bernoullis ligning fremgår af formel (2.2) og vandkraften fra jet fremgår af formel (2.3) [Labs, 2016] [Brorsen og Larsen, 2009].

$$F_v = \frac{1}{2} \rho_v A v^2$$
 (2.2)

$$F_v = \rho_v A v^2 \tag{2.3}$$

Hvor:

- $\rho_v$  | Densiteten af vand [kg/m<sup>3</sup>]
- A Arealet som udsættes for kræften  $[m^2]$
- v | Hastigheden af vandet [m/s]

Til at bestemme tyngdekraften af kontraklappen,  $F_t$ , bruges Newtons anden lov (2.4). Derudover skal opdriften af materialerne i vand bestemmes, hvilket gøres ved formel (2.5).

$$F_t = m g \tag{2.4}$$
  

$$F_{op} = V \rho_v g \tag{2.5}$$

Hvor:

 $\begin{array}{c|c} m & \text{Masse [kg]} \\ g & \text{Tyngdeacceleration } [m/s^2] \\ V & \text{Volumen af objektet } [m^3] \\ \end{array}$ 

Formel (2.2) og (2.4) indsættes i momentligningen (2.1). Ved at sætte momentligningen til at være lig nul, er det muligt at bestemme en relation mellem de to variabler; åbningsvinklen og hastigheden af vandet, da parametrene  $(m, a, V, \rho_v, A, g)$  ved hver vinkel er konstante. Dette er en relativ simpel måde at beskrive kraftsystemet, der påvirker kontraklappen, men virkeligheden er ofte ikke så simpel.

#### 2.1.1 Lift og drag

I formlerne bestemt i afsnit 2.1 er der ikke taget højde for det eventuelle lift og drag, der vil forekomme på en kontraklap. Lift og drag genereres på grund af hastighedsforskelle på over og undersiden af et objekt. Et eksempel på, hvordan strømningen kan have hastighedsforskelle og trykforskelle omkring en skive fremgår af figur 2.2 og figur 2.3.



Figur 2.2. CFD bergning af strømninger på en skive i en strømningsrende.



Figur 2.3. Trykfordeling af CFD model, hvor skiven står i 45 grader.

Påvirkningen fra lift og drag er generelt vanskelig at udregne, hvorfor den oftest bestemmes ud fra empiriske forsøg. Måden det implementeres i dette projekt er ved at tilføje en ekstra koefficient til Bernoullis/Jet formlen (2.2). Metoden til at bestemme denne koefficient beskrives med udgangspunkt i modelforsøg i kapitel 4.

## 2.2 Energiligningen

For at bestemme en kontraklaps energitab, er det nødvendigt at have styr på det samlede systems energitab. Dette gøres ved brug af energiligningen, som tager udgangspunkt mellem to snit i systemet og sætter energien ved de to snit lig hinanden. Energien i de to snit er ikke ens, da noget af energien bliver tabt til friktion, hvorfor der er et energitab. Dette energiregnskab kan bestemmes med energiligningen, som fremgår af formel (2.6) [Brorsen og Larsen, 2009].

$$y_A + \frac{\alpha \left(\frac{Q}{A_A}\right)^2}{2g} = y_B + \frac{\alpha \left(\frac{Q}{A_B}\right)^2}{2g} + \Delta H_{AB}$$
(2.6)

Hvor:

$$\begin{array}{ll} y_A & \text{Vandstand i snit A } [mVS] \\ y_B & \text{Vandstand i snit B } [mVS] \\ \alpha & \text{Hastighedsfordelingskoeffcienten [-]} \\ Q & \text{Vandføring } [m^3/s] \\ A_A & \text{Areal i snit A } [m^2] \\ A_B & \text{Areal i snit B } [m^2] \\ g & \text{Tyngdeacceleration } [m/s^2] \\ \Delta H_{AB} & \text{Energitab } [mVS] \end{array}$$

Enkelttab er en af to former for energitab, der forekommer i et rørsystem. Den anden form for energitab kaldes rørtab og skabes på grund af den friktion, der er imellem vandet

og rørets væg. Forskellen mellem de to former for energitab er, at rørtab forekommer kontinuerligt gennem røret, hvorimod enkelttab forekommer, hvor der er bratte ændringer, såsom ind- og udløb til systemet, rørudvigelser, bøjninger og ventiler.



Figur 2.4. Energitab gennem et system.

Som det fremgår af figur 2.4 sker der et energitab gennem systemet. I dette system skyldes det rørtabet, samt enkelttab ved røråbningen, rørudledningen og kontraklappen. Til at bestemme rørtabet bruges Colebrok og White's formel, se bilag B, og enkelttabet ved røråbningen kan bestemmes ud fra tabelopslag. Formlen der bruges til at bestemme enkelttabet og energitab fremgår af formel (2.7) [Brorsen og Larsen, 2009].

$$\Delta H_{AB} = H_E + H_L \tag{2.7}$$
$$\Delta H_E = \zeta_{Indl\phi b} \frac{V^2}{2q} + \zeta_{Kontraklap} \frac{V^2}{2q}$$

Hvor:

$$\begin{array}{l|ll} \Delta H_E & \text{Enkelttab } [mVS] \\ \Delta H_L & \text{Rørtab } [mVS] \\ \zeta & \text{Modstandstal } [-] \\ g & \text{Tyngdeacceleration } [m/s^2] \\ V & \text{Middelhastigheden } [m/s] \end{array}$$

Modstandstallet,  $\zeta$ , er en enhedsløs faktor, der bruges til at beskrive det tab af energi, som forekommer ved ændringer i systemet. Modstandtallet bestemmes på forskellige måder alt efter typen af enkelttabet, f.eks er brat udvidelse afhængig af rørdiametrene og indløb er en empirisk bestemt værdi. Typisk kan modstandstallet bestemmes ud fra målinger af enkelttabet,  $\Delta H$ , og middelhastigheden, V. For en kontraklap er det dog ikke helt så simpelt, idet den kan have mange forskellige åbningsvinkler,  $\theta$ , som vil ændre på modstandstallet. Ved to tilstande for kontraklappen er modstandstallet dog kendt. Dette er er ved lukket tilstand, hvor modstandstallet er uendelig stort og når kontraklappen er fuldt åben, hvilket antages at give det samme modstandstal som ved et frit udløb, som det fremgår af figur 2.5.



Figur 2.5. Modstandstallene for en kontraklap.

Det betyder, at modstandstallet er afhængig af åbningsvinklen. Åbningsvinklen afhænger af tyngden fra kontraklappen og trykket fra vandføringen ud af røret. De parametre for kontraklappen komplicerer yderligere bestemmelsen af kontraklappens enkelttab. Åbningsvinklens afhængighed af vandføringen betyder, at det bør være muligt at bestemme vandføringen ud fra åbningsvinklen. Det er relativt nemt at måle åbningsvinklen på en kontraklap i forhold til flowet i et rør, hvorfor der er interesse i at bestemme denne relation, som kan give bedre overblik af vandafledningen [AAU, 2018]. Det er dog stadig ikke nemt at bestemme disse forhold på grund af strømningen tæt på kontraklappen, kan opføre sig uforudsigeligt, hvorfor der skal laves forsøg til at bestemme disse forhold. Viden om den hydrauliske virkemåde af letvægts kontraklapper er begrænset. Uden kendskab til letvægts kontraklappernes hydrauliske virkemåde og hvordan energitabet skal bestemmes, er de vanskelige at dimensionere. Dette gør at udbredelsen af letvægts kontraklapper ikke står mål med deres potentiale. Dette projekt vil derfor omhandle nedenstående problemstilling.

• Hvordan skal energitabet bestemmes for en kontraklap, således det kan anvendes til dimensionering?

Dette kapitel omhandler modelforsøg, som skal eftervise momentbalancen af en kontraklap beskrevet i kapitel 2.

Formålet med modelforsøgene er at opstille simple forsøg, hvor det er muligt at eftervise systembeskrivelse af en kontraklap udarbejdet i 2.1. Dertil vil forsøget også bruges til at bestemme en relationen mellem vandhastigheden og åbningsvinklen af en kontraklap, hvorefter det undersøges om størrelse og vægt af en kontraklap har indflydelse på denne relation. Da dette er modelforsøg er målet samtidig at undersøge de samme tendenser mellem forskellige opstillinger af forsøg.

# 4.1 Forsøgsopstilling af modelforsøg

Forsøget udføres i en strømningsrende, der er 9,00 meter lang og har en højde og bredde på 0,49 meter og 0,78 meter, et billed fremgår af randen fremgår af figur 4.1. Under strømningsrenden er der monteret et rør, hvor der er tilkoblet en pumpe. Når pumpen startes cirkulerer vandet rundt mellem renden og røret. Ved brug af en frekvensomformer er det muligt at styre vandets hastighed.



Figur 4.1. Billed af strømningsrenden i AAU laboratorie.

Til at måle hastigheden i strømningsrenden anvendes en propelmåler (OTT C2). Ved brug af digital tæller (OTT Z400) kan antallet af propellens omdrejninger bestemmes og omregnes til en hastighed, se bilag C. Af figur 4.2 observeres to objekter i strømningsrenden, hvor det første er propelmåleren, og det bagerste er en forsøgsmodel af en kontraklap.



 $Figur\ 4.2.$  Skitsering af forsøgsopstillingen i strømningsrenden.

Til dette eksperiment bruges plastskiver, der fungerer som modeller af kontraklapper. Skiverne, som ses på figur 4.3, benyttes i forskellige størrelser for at undersøge om forsøget er skalerbart. Tekniske tegninger af skiverne fremgår af bilag D. Skiverne er konstrueret så det er muligt at øge vægten med vægtlodder, og de har en densitet på 1406 kg/m<sup>3</sup>. Dette er for at have så let en forsøgsmodel som muligt, da det vil være muligt at tilføje den manglende vægt.



Figur 4.3. Skiverne brugt i de principielle forsøg.

Skiven er placeret, så den er dækket af vand. For at måle åbningsvinklen monteres en forlængelse på skivens arm, som stikker op over vandet. De to dele roterer om samme

omdrejningspunkt, og forlængelsen viser derfor skivens åbningsvinkel. Ved hvert forsøg har åbningsvinklen en tilhørende hastighed, som er målt med propelmåleren. Et billede af forsøgsopstillingen fremgår af figur 4.4.



Figur 4.4. Forsøgsopstillingen i strømningsrenden.

Ved at sammenholde skivernes massefylde og størrelse med vandkraften, kan momentet omkring omdrejningspunktet sættes til nul ved en vilkårlig åbningsvinkel. Dette gør, at vandets hastighed er det eneste ukendte parameter. Derved ses en relation mellem vandets hastighed og åbningsvinklen, som er beskrevet i afsnit 2.1, kaldet kontraklap modellen. På figur 4.5 fremgår forholdet mellem de to forskellige formler for vandkraften. Metoden der bruges til at bestemme denne relation, fremgår af bilag E. Efter en åbningsvinkel på 40 grader begynder relationen at stige eksponentielt. Dette er fordi, overfladearealet for skiven bliver mindre, samtidig med at angrebsvinklen for vandkraften bliver større, hvilket gør at vandkraften har sværere ved at løfte kontraklappen. Tyngdekraftens angrebsvinkle bliver samtidigt mindre på skiven, hvilket gør at kraften, som trykker ned bliver større. Derfor kræves en højere hastighed til at skabe den yderligere forøgning i åbningsvinklen.



Figur 4.5. Kontraklap modellen, hvor skiven har en masse på 0,25 kilogram og diameter på 0,15 meter. Der er anvendt to forskellige vandkraftsformler i kontraklap modellen; jet og Bernoullis.

For at undersøge hvorledes kontraklap modellen stemmer overens med virkeligheden udføres tre forsøg. Til forsøgene benyttes skiven på 0,15 meter, hvorefter der tilføjes ekstra vægt mellem hvert forsøg, hvilket ses i tabel 4.1.

	Forsøg 1	Forsøg 2	Forsøg 3
Skivens diameter [m]	$0,\!150$	$0,\!150$	$0,\!150$
Vægt total [kg]	0,211	$0,\!275$	0,739
Vægt i vand [kg]	$0,\!104$	0,160	0,565
Afstand til tyngdepunkt [m]	$0,\!194$	$0,\!196$	0,205

Tabel 4.1. Opstilling af skiven i de tre forsøg.

## 4.2 Resultater fra modelforsøgene

Resultaterne fra forsøgene i strømningsrenden fremgår af figur 4.6, hvor den målte hastighed og aflæste vinkel er sat op mod hinanden.



Figur 4.6. Sammenligning af de tre forsøgresultater.

Da skiven har en åbningsvinkel på 50-60 grader opstår kontakt med vandoverfladen, hvorfor der ikke foretages yderligere målinger. Af figur 4.7 illustreres kontakten.



Figur 4.7. Skiven på 0,15 meter, der påvirkes af vandets overflade under forsøg 3.

Resultaterne fra forsøg 1 og 2 fremkommer lineære, hvor forsøg 3 er buet i start og slutning. Den første måling i forsøg 1 blev målt ved 12 grader. Ved forsøg 2 har skiven så lav vægt at små hastighedsændringer kan øge vinklen med 8 grader indenfor de første 10 grader, hvorfor det er svært at aflæse åbningsvinklen præcist i begyndelsen af forsøget. Forsøg 3 har en forøgelse af vægt på 350 % og hvorfor det er lettere at aflæse åbningsvinklen, da der skal større hastighedsændringer til at påvirke åbningsvinklen.

På figur 4.8 sammenholdes resultaterne for forsøg 3 med de udregnede relationer. Forsøgsresultaterne afviger både fra kontraklap modellen baseret på jet- og Bernoullis. Dette er ligeledes gældende for forsøg 1 og 2, som ses i bilag F. Ved de udregnede relationer skal hastigheden stige nærmest eksponentiel efter en åbningsvinkel på 20 grader. Forsøgsresultaterne følger ikke samme stigning. Dette kan betyde, at der er en eller flere parametre, som ikke tages højde for i udregningen. Siden skiven kan komme op på en åbningsvinkel på 50 grader ved lave hastigheder i forhold til, hvad de udregnede relationer fortæller, formodes det, at der er et lift, som påvirker skiven.



Figur 4.8. Sammenligning mellem forsøg 3 og de teoretiske udregninger.

For at bestemme grunden til afvigelsen benyttes en vægtføler til at validere kræfterne, som er brugt i kontraklap modellen. Denne vægtføler består af en aluminium Load Cell, der kan måle vægt op til 1 kg, samt en vægtføler Dual-Channel A/D Modul, 24 Bit, HX711 der kan aflæse målingerne fra en Load Cell og omdanne dem til digitale resultater [ArduinoTech, 2019a] [ArduinoTech, 2019b]. Disse resultater er blevet kalibreret, således at vægten, som vægtføleren påvirkes af, kan aflæses i gram. Vægtføleren udfører en måling af vægten, der kan omregnes til kræfter. for at kunne sammeligne resultaterne med de udregnede kræfter omregnes målingen til momentkræfter. Tyngdekraften på skiven undersøges uden strømning for at fjerne eventuelle usikkerheder og derved validere udregningen for tyngdekraft. Under målingerne har hele skiven været under vand. På figur 4.9 fremgår en skitse af, hvordan målingerne af tyngdekraften er indhentet. De sorte prikker repræsenterer placeringen for målepunkterne af vægtføleren, som så vidt muligt skal være lodret over midten af skiven.



Figur 4.9. Skitse af tyngdekraftmåling.

Figur 4.10 viser om den udregnede og målte tyngdekraft stemmer overens i forskellige åbningsvinkler. Der er indsamlet seks målinger, en ved hver 15. grad op til 90 grader. Alle punkterne ligger tilnærmelsesvis tæt på linjen, som indikerer, hvor de målte er lig med de udregnede. Derudfra kan det konkluderes, at udregningerne for tyngdekraften på skiven er stemmer overens.



Figur 4.10. Målt og udregnede momenter af tyngdekraft.

Vandkraften er målt ved fire forskellige hastigheder, hvor pladen har været positioneret i seks forskellige åbningsvinkler for hver hastighed. På figur 4.11 ses en skitse af opstillingen af, hvordan vandkræften måles. Når skiven åbnes, ændres vinklen mellem målepunktet og midtpunktet af skiven, hvilket kan have indflydelse på målingen. Dette er undersøgt, hvor vinklen ændrede sig med 5 grader, hvilket ikke var nok til at have betydning for resultatet.



Figur 4.11. Skitse af målinger af vandkraften.

På figur 4.12 sammenholdes de udregnede og målte vandkræfter med forskellige opstillinger. Det er tydeligt at se, at punkterne ligger langt fra linjen. Den målte vandkraft er større end den udregnede i alle scenarier. Afvigelsen til linjen bliver større ved 30, 45 og 60 grader, og specielt ved den højeste hastighed, med en åbningsvinkel på 45-60 grader bliver vandkraften tre til seks gange større end den udregnede.



Figur 4.12. Målte og udregnede momenter af vandkræfter.

Ud fra disse resultater kan det konkluderes, at den teoretiske tilgang ikke stemmer overens med forsøgene. Der er et bidrag fra en kraftpåvirkning, som ikke er medtaget i den teoretiske udregning, hvorfor det fremgår at vandkraften ikke stemmer overens. I det efterfølgende opstilles en metode, hvor denne fejl korrigeres, hvorved der kan bestemmes en sammenhæng mellem kontraklap model og forsøg.

## 4.3 Bestemmelse af korrektionskoefficient

For at undersøge en sammenhæng mellem forsøgsresultaterne og de teoretiske udregninger, er der for hvert forsøg fundet en afvigelse fra teorien til forsøget. På figur 4.13 fremgår afvigelsen af hastigheden fra Bernoullis relation til hastigheden fra forsøgsresultaterne i forhold til åbningsvinklen af pladen. Det vælges at bruge kontraklap modellen baseret på Bernoullis videregående i rapporten, da korrigeringen af modellerne gør de to teorier næsten ens. Forsøgene følger samme tendens, hvor der antages en lineær sammenhæng. Dette giver en korrektionskoefficient for hastigheden i forhold til åbningsvinklen, hvilket betyder at koefficienten er afhængig af åbningsvinklen.



**Figur 4.13.** Afvigelsen mellem hastigheden fra kontraklap modellen baseret på Bernoullis og hastigheden fra forsøgsresultaterne.

For at eftervise kontraklap modellen med korrektionskoefficienten, er der opstillet tre testforsøg. Disse forsøg udføres med nye vægte og skiver i forhold til de tidligere forsøg. Forsøgsparametrene ses i tabel 4.2.

	Test 1	Test 2	Test 3
Skivens diameter [m]	0,15	0,20	0,10
Vægt total [kg]	0,668	0,762	$0,\!147$
Vægt i vand [kg]	0,503	0,524	0,102
Afstand til tyngdepunkt [m]	0,198	$0,\!199$	$0,\!193$

Tabel 4.2. Forsøgsparametre for testforsøg.

Test 1 fremgår af figur 4.14, hvor målingerne følger de korrigerede udregninger. Ud fra figuren fremgår det, at testforsøget og den korrigerede kontraklap model stemmer overens.



Figur 4.14. Test 1 med 0,15 meter skive og en total vægt på 0,661 kg.

I test 2 og 3 er der primært undersøgt, om størrelsen på skiven har indflydelse på relationen mellem åbningsvinkel og hastighed. Test 2 fremgår af figur 4.15, hvor forsøgsresultaterne fra følger den korrigerede udregning på samme måde som ved test 1. For begge testforsøg er den største afvigelse ved en åbningsvinkel på 15 grader, hvilket kan skyldes, at det er her den største usikkerhed i korrektionskoefficienten forekommer, se figur 4.13. Derved har skivens størrelse ingen, eller kun en mindre, betydning for relationen mellem åbningsvinklen og hastigheden i vandet.



Figur 4.15. Test 2 med 0,2 meter skive og en total vægt på 0,755 kg.

I test 3 undersøges om den korrigerede kontraklap model stemmer overens med en skive på 0,10 meter. Test 3 afviger fra det forventede, hvilket kommer til udtryk i figur 4.16.



Figur 4.16. Test 3 med 0,10 m skive og en totalvægt på 0,156 kg.

Det viser sig at skivens størrelse, har indflydelse på forsøgsforholdene. Dette kan skyldes, at skivens areal bliver væsentligt mindre, hvorfor strømningsforholdene i strømningsrenden ændrer sig, som vist på figur 4.17. Strømningsrenden har en fast bredde, som kan påvirke strømningsforholdene, når der nedsættes objekter, sammenlignet med en uendelig bred kanal, hvor strømningsforholdene ville være upåvirket. Under test 1 og 2 har størrelsen på skiverne været relativt ens, hvilket har givet ensartede forhold, som giver samme resultat, hvor skiven i test 3 har ændret strømningsforholdene omkring skiven.



Figur 4.17. De mulige forskelle i strømningsforhold.

Test 1 og 2 bekræfter anvendelsen af denne metode til at modellere sammenhængen mellem vandhastigheden og åbningsvinklen af en skive med en vilkårlig vægt og størrelse.

# 4.4 Validering af koefficient med CFD-model

Det følgende afsnit omhandler opbygningen af en Computational Fluid Dynamics-model (CFD), samt bestemmelsen af drag-koefficienten på en skive i forskellige vinkler. CFD-modellen inddraget for at validere, hvorledes korrektionskoefficienten er korrekt. CFD-modellen er en steady, turbulent 3D-model lavet i programmet Star-CCM+.

Modelleringsområdet er opbygget så det repræsenterer strømningsrenden og har derfor samme højde og bredde. Det er ikke nødvendigt med samme længde, hvorfor den er kortet

ned til fire meter. I midten af modelområdet placeres et cylinder med samme dimensioner som 0,15 meter skiven. Opstillingen består af fire randbetingelser; velocity inlet, pressure outlet, summetry plane og wall, som fremgår af figur 4.18. Til at skabe en naturlig strømning i modellen benyttes en indløbs- og udløbsrandbetingelse, som henholdsvis er velocity inlet og pressure outlet. Toppen af renden har et frit vandspejl, hvorfor toppen af modellen har randbetingelsen summetry plane. De resterende sider og bunden af modellen har randbetingelsen wall.



Figur 4.18. Opbygning og randbetingelser af modelområdet.

Ved opbygningen af fysikken i modellen vælges en turbulenstype, som afgøre, hvordan modellen udregner strømningen. Til denne model benyttes K-Omega som turbulenstype. K-Omega er god til at beskrive turbulensen tæt på overflader, hvilket er ideelt for denne modelopsætning, hvor drag-koefficienten skal bestemmes. Yderligere tilføjes Shear Stress Transport (SST), som kombinerer det bedste fra to typer turbulencetyper. K-Omega har begrænsninger i den frie strømning, her kan SST skifte til K-Epsilon, som er bedre i frie strømninger. SST undgår K-Omegas beregningsproblem, som er at have for følsomme turbulensegenskaber ved indløbets friestrømning [Nicholas J. Georgiadis and Dennis A. Yoder, 2006].

For at bestemme mesh-størrelsen til modellen udføres en mesh-analyse, hvor det bestemmes, hvornår antallet af celler ikke længere har indflydelse på et af resultatsparametrene. Til mesh-størrelsen er det relevant at undersøge Y+ værdierne, da disse kan påvirke, hvordan fysikken af modellen udregnes. Til denne model anvendes K-Omega, som er bedst med en Y+ værdi mellem 0-1. For at opnå en Y+ indenfor dette interval, er det nødvendigt, at cellerne omkring skiven er små. Derfor benyttes prismelag til at danne meshet omkring overfladen af skiven. For at ændre meshet nemt, er alle dele af meshet sat til at være en relativ størrelse af baze size. Til mesh-analysen anvendes en opstilling, hvor skiven er vinklet i 45 grader, velocity inlet sat til 0,5 m/s og et pressure outlet på 0 Pa. Mesh-analysen fremgår af figur 4.19, hvor drag-kraften er brugt til at undersøge indflydelsen på antallet af celler i modellen. Der er udvalgt et mesh med ca. 900000 celler, hvor der stadig er ændringer af kraften i x-retningen til den næste størrelse, som er undersøgt. Beregningstiden for et finere mesh er begrænset af computerkraften. Modellen udregner et for højt resultat, da resultatet stadig påvirkes af mesh størrelsen. I Bilag G fremgår to tværsnit af den udvalgte mesh-størrelse, hvor skiven har en vinkel på 45 grader.



Figur 4.19. Indflydelsen på antallet af celler på kraften i x-retningen, hvor x-aksen er logaritmisk. Det røde punkt markerer det valgte mesh.

Når mesh størrelsen er valgt, er modellen klar til at bestemme kræfterne, som påvirker skiven. Dette gøres med syv opstillinger af modellen; en for hver 15 grad mellem 0 og 90 grader. Randbetingelsen, velocity inlet ændres til 0,47 m/s, da det var denne hastighed, som blev brugt under kræftmålingerne. Ved hver opstilling udtages to kræfter og et moment. Kræfterne anses for at være summen af kræfter, der påvirker kontraklappen i x og y retning, hvor drag og lift indgår. Resultaterne fra CFD-modellen fremgår af tabel 4.3.

Vinkel	Kræfter i x-retning [N]	Kræfter i y-retning [N]	Moment [Nm]
0	2,87	0,00	0,54
15	$2,\!69$	0,72	$0,\!51$
30	2,44	$1,\!40$	$0,\!51$
45	1,81	1,79	$0,\!46$
60	1,12	1,81	$0,\!38$
75	0,43	1,23	$0,\!22$

Tabel 4.3. Kraftresultater ved forskellig vinklede skiver fra CFD-model.

Disse to kræfter viser, hvornår drag og lift bidrager til momentet fra modellen. Hvis momentet for modellen er ens med udregningerne betyder det, at koefficienten anvendt i udregningen tilnærmelsesvis repræsenterer en drag/lift-koefficient for skiven. Sammenligningen af momenter fra forsøg, udregninger og model fremgår af figur 4.20.


Figur 4.20. Sammenligning af momentkrafterne.

Ved 0 og 15 grader stemmer momenterne ikke helt overens. Dette skyldes, at målingerne ved de lave vinkler er unøjagtig, og den største spredning mellem forsøgene forekom, hvilket fremgik af figur 4.13. Det vil give en upræcis koefficient til udregninger, hvorfor momentet vil skille sig ud. En lille afvigelse på koefficienten har stor betydning for momentet, da koefficienten er bestemt med hastigheden i anden. Med flere forsøg antages det, at denne type fejl ikke vil fremstå så tydeligt. Efter 30 grader begynder resultaterne at blive tættere. Generelt er simuleringen lavere end det korrigerede udregnede moment og momentet fra forsøgene.

# 4.5 Diskussion af modelforsøg

Det er formået at lave en relation mellem åbningsvinklen og hastigheden i vandet. Denne relation kan bruges uanset vægt og størrelse på skiven. Den mindste skive påviste dog, at forsøgsopstillingen ikke er uafhængig af skivens størrelse og det formodes, at det er de faktorer der er skyld i afvigelsen ved test 3, hvorfor den ikke kan sammelignes med de andre tests. De forhold, der er mellem virkeligheden og forsøget, gør at resultaterne ikke direkte kan bruges. Dette skyldes, at forsøget er opsat, så der skabes turbulens og strømningsforhold omkring kontraklappen, som ikke ville forekomme i virkeligheden. Eksempelvis ville vandet strømme igennem et rør og ind på kontraklappen, mens vandet omkring kontraklappen ville være mere stillestående. Metoden, brugt til at opbygge kontraklap modellen, som kan bestemme relationen mellem hastighed og åbningsvinkel, kan benyttes til forsøg med en kontraklap.

# Undersøgelse af klimaklappen 5

Dannozzle har til dette projekt lavet en Ø310 klimaklap, som anvendes til undersøgelsen af kontraklapper. De hydrauliske parametre energitab og modstandstal bestemmes for kontraklap. Derudfra opstilles en dimensioneringsmodel til kontraklapper, som kan bestemme energitabet for en vilkårlig kontraklap.

Formålet med forsøgene er at kunne opbygge en dimensioneringsmodel, der kan bestemme energitabet ud fra måleparametre som åbningsvinklen på kontraklappen eller flowet. Det undersøges om relationen mellem åbningsvinklen og flowet stemmer overens for kontraklapper, hvorfor den kan anvendes til modellen. Yderligere undersøges om energitabet fra en kontraklap, kan bestemmes som et enkelttab, hvorfor en relation mellem åbningsvinkel og modstandstal kan anvendes til modellen.

# 5.1 Klimaklappens opbygning

Til denne undersøgelse bruges en klimaklap udleveret af Dannozzle. Kun enkelte dele af klimaklappen er udskiftet til lettere materialer end de oprindelige. Overordnet består klimaklappen af seks dele, som fremgår af figur 5.1 og dimensionerne af de forskellige dele forekommer af bilag H. Det er muligt at udskifte flere af delene og derved justere vægten. Rillerne dækkes til med tape for at holde klimaklappen tæt under forsøgene.



Figur 5.1. Billedet af klimaklappen og dens dele.

Af tabel 5.1 fremgår materialerne af de dele, som roterer med klimaklappen. I forhold til en stålkontraklap er næsten alle de roterende dele udført i et lettere materiale, hvor dette er den letteste opstilling i undersøgelsen. Kun jernhængslet er af tungere materiale, men dens placering tæt på omdrejningspunktet gør, at den ikke har stor betydning for momentpåvirkningen.

	Materiale [-]	$f Densitet [kg/m^3]$	Vægt [kg]
1. Klap	Glas epoxy	$1785,\!64$	$0,\!82$
2. Plastbeslag	Plastik	$913,\!18$	$0,\!23$
3. Jernhængsel	Jern	7880,00	$1,\!19$
4. Rør	Aluminium	2700,00	$0,\!21$

Tabel 5.1. Materialeegenskaber af klimaklappens dele.

# 5.2 Systembeskrivelse af klimaklappen

Til opstillingen af udregningen for klimaklappen benyttes den samme systembeskrivelse anvendt i kapitel 2, som omhandler momentpåvirkning af en kontraklap. Denne metode blev ligeledes brugt til udregningen af skiverne i modelforsøg af skiver; kapitel 4. Klimaklappen er mere kompliceret opbygget end skiverne, hvorfor der er mere at tage hensyn til. Alle dele, som er med i rotationen, bidrager også til tyngdekraften. Der er i alt fire dele med skruer og møtrikker, som indgår i rotationen af klimaklappen. Disse dele har eget tyngdepunkt og afstand til omdrejningspunktet, som skal bestemmes, hvilket fremgår af figur 5.2. Afstanden fra omdrejningspunktet til tyngdepunkterne ved forskellige åbningsvinkler kan udregnes ved brug af armen, ay, og armen, ax.



Figur 5.2. Tyngdekraftpåvirkning af klimaklappen.

Ved bestemmelse af vandkraften ændres det effektive areal og angrebspunktet for hver vinkel. Det effektive areal er det areal af klappen, som udsættes for vandstrålen. Når klimaklappen åbnes vil det effektive areal blive omdannet til en ellipse samtidig med, at det bevæger sig væk fra strålen. Det effektive areal bliver derfor mindre jo større åbningsvinklen er.



Figur 5.3. Eksempel på det effektive areal ved en åbningsvinkel på 45 grader.

Af figur 5.3 fremgår et eksempel på det effektive areal ved en åbningsvinkel på 45 grader. Figuren viser ligeledes, hvordan klimaklappen bevæger sig op og væk fra strålen, hvilket giver en større del af klappen, som er upåvirket af strømningen. Bestemmelsen af det effektive areal fremgår af bilag I. Angrebspunktet for vandkraften er tyngdepunktet af det effektive areal, som bestemmes i bilag J. Når angrebspunktet og det effektive areal for klimaklappen er bestemt for alle åbningsvinkler, kan relationen mellem hastighed og åbningsvinkel bestemmes.

#### 5.2.1 Beregningseksempel for kontraklap model

For at kunne bestemme relationen mellem hastighed og åbningsvinkel, skal momentbalancen opstilles. Den består af to overordnede dele; tyngdekraften der trykker ned på kontraklappen og vandkraften, der skubber kontraklappen åben. De forskellige dele, deres egenskaber og arme fremgår af tabel 5.2.

Momentkrafterne fra materialerne kan udregnes ved formel (5.1). Derefter bestemmes vandkraften med Bernoullis formel (2.2) på side 8. Vandkraftens momentkraft og momentkraften fra materialerne indsættes i formel (5.2), hvor de skal være i ligevægt. Herefter isoleres middelvandshastigheden, således den kan bestemmes ved formel (5.3) til en vilkårlig vinkel.

Objekt	Arm1, $ay$	Arm2, $ax$	Densitet materiale, $\rho_m$	Densitet vand, $\rho_v$	Antal
	[m]	[m]	$[ m kg/m^3]$	$[ m kg/m^3]$	
Plade	0,310	-0,047	1786	1000	1
Alluminum rør	0,147	$0,\!055$	2700	1000	1
Plastikbeslag	0,310	0,012	913	1000	1
Jernhængsel	0,000	$0,\!055$	7880	1000	1
Lille møtrik	0,310	-0,056	8030	1000	2
Lille bolt	0,310	-0,030	8030	1000	2
Stor skive	0,310	-0,014	8030	1000	2
Små skirve	0,310	-0,052	8030	1000	2
Gummiknap	0,310	-0,022	934	1000	2
Stor bolt	0,310	0,042	8030	1000	1
Stor møtrik	0,310	0,064	8030	1000	1
Objekt	Volumen, $V$	Masse, $m$	Masse i vand, $mv$	Tyngdekraft, $Ft$	
	$[m^3]$	[kg]	[kg]	[N]	
Plade	4,61E-04	0,824	0,362	3,559	
Alluminum rør	7,75E-05	0,209	0,132	1,294	
Plastikbeslag	2,52E-04	0,230	-0,022	-0,214	
Jernhængsel	1,51E-04	$1,\!188$	1,037	10,182	
Lille møtrik	1,26E-06	0,010	0,009	$0,\!174$	
Lille bolt	4,56E-06	0,037	0,032	$0,\!629$	
Stor skive	$5,\!60E-07$	0,005	0,004	0,077	
Små skirve	$3,\!67E-07$	0,003	0,003	0,051	
Gummiknap	1,02E-05	0,010	-0,001	-0,013	
Stor bolt	2,73E-05	0,219	0,192	1,884	
Stor møtrik	$3,\!61E-06$	0,029	0,025	$0,\!249$	

Tabel 5.2.	Tabel over	parametre o	der bruges t	til momentb	eregninger.
------------	------------	-------------	--------------	-------------	-------------

$$M_{Tyngde} = \sum Ft(\cos(\theta)ay + \sin(\theta)ax)$$
(5.1)

$$M = \frac{1}{2} A V^2 \rho_v a_v - M_{Tyngde}$$
(5.2)

$$V = \sqrt{2} \frac{\sqrt{A a_v \rho_v M_{Tyngde}}}{A a_v \rho_v}$$
(5.3)

Hvor:

$M_{Tyngde}$	Momentkrafterne fra materialerne [Nm]
$\theta$	Åbningsvinkel [grader]
V	Middelhastigheden [m/s]
A	Effektive areal $[m^3]$
$a_v$	Arm til angrebspunkt $[m^3]$

Ved brug af formlerne er det således muligt at bestemme middelhastigheden ud fra åbningsvinklen, hvilket giver kontraklap modellen. En række eksempler for forskellige vinkler fremgår af tabel 5.3, hvor armen til vandkraften og arealet bestemmes ud fra

Vinkel, $\theta$	Arm Vand, $a_v$	Effektive areal, A	Moment, $M_{Tyngde}$	Middelvandhastighed, $V$
[Grader]	[m]	$[m^2]$	[Nm]	[m/s]
10	0,313	0,045	0,896	0,356
20	0,313	0,045	1,238	0,418
30	0,312	0,045	1,543	$0,\!470$
40	$0,\!295$	0,037	$1,\!800$	$0,\!572$

bilag J og I. Grunden til at der ikke er forskel mellem arm vand og det effektive areal ved 10 og 20 grader er at kontraklappen først bevæger sig ud af strålen fra røret ved 28 grader.

Tabel 5.3. Tabel over resultater fra kontraklap modellen.

# 5.3 Forsøgsopstilling

Forsøget udføres i et kar med en volumen på ca. 5  $m^3$ . I karet indsættes en skillevæg med et cirkulært hul med en diameter på 0,25 meter. Skillevæggen har et samlingspunkt, hvori klimaklappen passer. Normalt har kontraklapper en startvinkel mellem 0 og 12 grader for at sikre, at den lukker helt. Skillevæggen er vinklet fem grader, da erfaringer viser, at dette er bedst [Eriksen, 2018]. Skillevæggen deler karet i to, hvor der ved forskellige vandstande i hver del, kan generes et flow. For at holde et stabilt flow mellem de to dele placeres to dykpumper i den ene del af karet, som pumper vandet til den anden del. Den ene pumpe har en frekvensomformer, som justeres med en skrueknap, der har 10 omgange, hvor den anden pumpe kun kan yde én indstilling. Vandet skal igennem et 1,5 meter langt Ø250 plastrør, som er monteret i hullet på skillevæggen, hvor klimaklappen er for enden af røret. Klimaklappen skal derfor åbnes, for at der kan være et flow. Forsøgsopstillingen fremgår af figur 5.4.



Figur 5.4. Skitse forsøgsopstilling.

Under forsøget måles vandstanden i de to dele af karet, åbningsvinklen af klimaklappen og hastigheden af vandet i røret. Vandstanden måles med en hævert samt trykloggere. For at kunne aflæse vandstanden med en hævert, er der placeret et PVC-slange i hver del af karet, som løber ud til en målestation. Trykloggerne er HOBO® U20L-04 Data Loggers, som kan måle trykket med 0,1 % nøjagtighed [ONSET, 2019]. På klimaklappen monteres en laser pointer, som markerer åbningsvinklen på en plade, hvilket ses af figur 5.5. 20 centimeter inde i røret placeres den samme propelmåler, brugt til modelforsøgene, som måler centerhastigheden i røret, se bilag C. Forsøgsopstillingen er leveret af AAU, og fremgår af figur 5.6.



Figur 5.5. Billede af måling af åbningsvinklen Figur 5.6. Billede af forsøgsopstilling i AAUs på klimaklappen. laboratorier.

# 5.4 Bestemmelse af måleopstillingens energitab

Inden forsøgene med klimaklappen kan udføres, skal flere parametre bestemmes. Dette gøres ved hjælp af forsøg, hvor en metode til at bestemme middelhastigheden og energitabet bestemmes. Hovedårsagen til forsøgene uden klimaklap er, at det ikke er muligt at måle hastigheden ved udløbet af røret, når kontraklappen er monteret. Derfor benyttes en centerhastighed som reference til hastighedsprofilet ved udløbet af røret. Med kendskab til hastighedsprofilet er det muligt at bestemme middelhastigheden. Middelhastigheden indgår i udregningerne brugt til opbygningen af systembeskrivelsen af kontraklapper i afsnit 2.1, og er derfor essentiel for at kunne sammenligne udregninger med forsøgsresultaterne. Ydermere indsamles information om pumperne og trykniveauet under forsøgene uden klimaklap. Dette muliggør bestemmelsen af energitabet fra røret og undersøgelse om pumperne er stabile ved udvalgte frekvenser.

#### 5.4.1 Forsøgbeskrivelse

Ved forsøget til bestemmelse af middelhastigheden benyttes samme opstilling beskrevet i afsnit 5.3 med få ændringer. Klimaklappen er her ikke monteret, og der placeres en propelmåler mere ved udløbet af røret. Opstillingen af forsøgene uden klimaklap fremgår af figur 5.7. Forsøget er udført to gange; et med en vandstand på 0,61 meter i karet og et med en vandstand på 0,70 meter.



Figur 5.7. Skitse af opstilling.

Det første udført i karet er måling hastighedsprofilet over udløbet af røret og en tilhørende centerhastighed som reference. Det antages at hastighedsfordelingen er uniform, og hastigheden er nul langs væggen af røret. Gennemsnitshastigheden mellem væggen til det første målepunkt antages at afhænge 75% af det første målepunkt og 25% hastigheden ved væggen. Mellem de andre målepunkter bestemmes gennemsnitshastigheden som 50/50%. Gennemsnitshastigheden beskriver hastigheden i arealet mellem de to målepunkter. For at danne profilet, måles hastigheden i seks punkter i den nedre halvdel af rørets tværsnit. Den nedre halvdel spejles omkring midten af røret, således at den øvre og nedre del af hastighedsprofilet er ligedannede. Vandføringen i røret bestemmes ved at gange gennemsnitshastighederne på deres arealet, hvilket giver en vandføring i hver ring. Ved at summere vandføringerne fra ringene bestemmes vandføringen i røret. Målepunkterne i rørets tværsnit fremgår af figur 5.8.



2,4

1.8

[cm]

Figur 5.8. Målepunkterne fra propelmålinger gennem rørtværsnittet.

For at kunne bruge centerhastigheden som reference for hastighedsprofilet, er det nødvendigt at kende udviklingen af hastighedsprofilet ved forskellige pumpeydelser. Derfor er der valgt 11 pumpeydelser, hvor der udtages målinger og derfra kommer et hastighedsprofil. For pumpen med frekvensomformer er der valgt fem frekvenser på skrueknappen; 3,75 - 5 - 6,25 - 7,5 og 10 omgange. De fem frekvenser bruges med og uden den anden pumpe. Den sidste pumpeydelse udføres alene med den anden pumpe.

I andet forsøg uden klimaklappen sættes trykloggerne ved siden af hinanden, først over vandoverflader, hvor de efterfølgende sænkes i trin og slutteligt hævet over vandoverfladen igen. Trykloggerne er placeret i hvert trin i 10 minutter. Dette gøres for at undersøge om trykloggerne måler samme trykniveau, hvilket er grundlæggende for et forsøg med trykændringer på få millimeter. Efterfølgende behandles data fra dataloggerne, hvor det atmosfæriske tryk trækkes fra, så det kun er trykket fra vandet, der undersøges. Herefter sammenlignes målingerne fra loggeren ved hvert trin og til sidst med de manuelle målinger.

## 5.4.2 Forsøgsresultater

Forsøgene uden en kontraklap anvendes til at bestemme energitabet for forsøgsopstillingen samt hastighedsprofilet ved udløbet af røret. Ydermere benyttes det også til at bestemme om forsøgsudstyret fungerer og måler korrekt.

#### Verificering af trykloggere

For at verificere at dataloggernes målinger stemmer overens, placeres de i fem forskellige vanddybder. Trykmålingerne fra loggerne fremgår af figur 5.9, hvor det første og sidste trin er målt i luften og trinene mellem er målt i forskellige vanddybder.



Figur 5.9. Trykmålinger fra trinforsøget.

I starten af hvert trin bruges tid på at få loggerne i den rigtige dybde, hvilket forklarer de peaks, som ikke medtages i analysen af loggerne. Trykket i luften er faldet under forsøget, som kan ses på det første og sidste trin. Fordi forsøget er foregået over halvanden time har det atmosfæriske tryk ændret sig siden starten. For at dette ikke skal påvirke undersøgelsen, kan det atmosfæriske tryk trækkes fra det totale tryk, hvilket efterlader vandtrykket. Dette gøres ved at finde en tendens mellem alle målinger taget over vandoverfladen. Denne tendens antages at beskrive, hvordan det atmosfæriske tryk er faldet under forsøget, hvilket trækkes fra det totale tryk. Målinger over vandoverfladen, samt tendenserne for begge loggere, fremgår af figur 5.10.



Figur 5.10. Målinger taget i luften med tilhørende tendenser og udtryk for faldet af atmosfæriske tryk for begge trykloggere.

Efterfølgende omregnes målingerne fra Pa til enheden mmVS for at sammeholde med de manuelle målinger. Middelværdien findes ved hvert trin for begge loggere og forskellen mellem loggerne bestemmes, som fremgår i tabel 5.4.

Trin	Logger 1 [mmVS]	Logger 2 [mmVS]	Forskel [mmVS]	Manuelle målinger [mmVS]
1	159,70	157,04	$2,\!65$	153
2	229,01	$228,\!58$	$0,\!43$	221
3	328,87	$328,\!47$	$0,\!41$	322
4	394,49	$392,\!20$	$2,\!29$	391
5	524,48	$525,\!34$	$0,\!86$	523
Middel	240,27	$239,\!56$	0,72	-

Tabel 5.4. Resultater for trinforsøg.

Forskellen mellem loggerne er ved de fleste vanddybder under 1 mmVS og den største forskel ved en vanddybde er 2,65 mmVS. Middelværdien for de to loggere er også under 1 mmVS, hvorfor loggerne vurderes til at være præcis nok til forsøget. Afstanden fra målingerne af loggerne til de manuelle målinger er større. Vandstanden har dog mindre betydning end trykforskellen mellem de to kardele, hvorfor dette accepteres.

#### Bestemmelse af middelvandføring

Ved forsøget uden kontraklap er centerhastigheden målt ved hver pumpeydelse, minimum 24 gange. Målingerne er taget over seks perioder, hvorfor de kan anvendes til at beskrive om pumperne er stabile. Af figur 5.11 fremgår propelmålingerne af centerhastigheden taget fra forsøget med vandstanden på 0,70 meter. For at se udviklingen af pumperne tydeligere, indsættes tendenslinjer for hver pumpeydelse. Tendenserne fremgår jævne, hvilket betyder pumperne har været stabile under forsøgene uden klimaklap.



Figur 5.11. Udviklingen af centerhastigheden ved de 11 pumpeydelser med en vandstand på 0,70 meter.

Da centerhastigheden og pumperne er stabile er det muligt at benytte centerhastigheden som reference til hastighedsprofilet ved udløbet af røret. Hastighedsprofilerne omregnes til en middelhastighed, som sættes op mod en tilhørende centerhastighed. Ved de to højeste frekvenser p7,5 og p10 ændrede centerhastigheden sig ikke, mens middelhastigheden stadig blev større, hvilket kan skyldes en ændring i strømningsforholdene, som gør at centerhastigheden forbliver den samme. Derfor kan centerhastigheden ikke bruges som måleværktøj ved disse pumpefrekvenser. Hastighedsprofilerne fra udløbet af røret ved en vandstand på 0,70 meter fremgår af figur 5.12. Hastighedsprofilerne ved en vandstand på 0,61 meter kan ses i bilag K.1.



Figur 5.12. Hastighedsprofilerne fra propelmålinger gennem rørtværsnittet ved en vandstand på $0,\!70$ meter.

For at bestemme middelhastigheden ud fra en målt centerhastighed, er der lavet to lineære relationer mellem middelhastigheden i røret og centerhastigheden. Strømningsforholdene omkring målepuntet for centerhastigheden ændres når den sekundære pumpe startes, hvorfor der er lavet to lineære relationer. Relationerne fremgår af figur 5.13.



Figur 5.13. Middelhastighed i forhold til den målte centerhastighed.

Ved senere forsøg med klimaklappen vil middelhastigheden være bestemt med de to lineære relationer og en målt centerhastighed.

#### Energitab for forsøgsopstilling uden klimaklappen

Forsøget uden kontraklap anvendes også til at bestemme energitabet fra forsøgsopstillingen. Dette er nødvendigt for senere at kunne bestemme energitabet fra klimaklappen. Ved forsøgene til at bestemme energitabet fra klimaklappen, er centerhastigheden nødvendig, hvorfor der er placeret en propelmåler i forsøgsopstillingen. For at holde propelmålerens energitab ude af klimaklappens energitab, udføres forsøg med og uden propelmåleren. Energitabet er yderligere bestemt med udregninger, hvor metoden fra afsnit 2.2 anvendes. For denne forsøgsopstilling indgår to enkelttab i udregningen, som er indløb med skarp kant og et udløb. Til at udregne enkelttabene for opstillingen anvendes formel 5.4, hvor modstandtallene for indløb og frit udløb er slået op i Brorsen og Larsen, 2009 til 1,0 og 1,1. Fremgangsmåden til at bestemme rørtabet,  $H_L$ , fremgår i bilag B. Det antages at plastikrøret har en ruhed, k, på 0,001 meter.

$$\Delta H = H_E + H_L \tag{5.4}$$
$$\Delta H_E = \zeta_{Indl \phi b} \frac{V^2}{2g} + \zeta_{Udl \phi b} \frac{V^2}{2g}$$

Når en kontraklap placeres for enden af et rør omdannes enkelttabet fra udløbet til enkelttabet for kontraklappen. Det er ikke muligt at måle, hvor stort enkelttabet for udløbet er, hvorfor det bestemmes med udregninger, da udløbets enkelttab bliver en del af kontraklappens energitab. Enkelttabet fra udløbet bestemmes ved at fjerne udløbets enkelttab fra ligning 5.4. Enkelttabet for udløbet er forskellen mellem energitabet med og uden enkelttabet for udløbet.

Der laves to forsøg; et med propelmåleren for at bestemme middelhastigheden, og et uden propelmåleren for at bestemme energitabet. Det antages at hastigheden forbliver den samme under de to forsøg. Middelhastigheden målt under forsøget med propelmåler anvendes til udregningerne af energitabet af forsøgsopstillingen. Det beregnede og målte energitab af forsøgsopstillingen uden propelmåleren ses af figur 5.14. Målingerne stemmer overens med det beregnede energitab, og det antages at udregningen beskriver energitabet for opstillingen uden kontraklap.



Figur 5.14. Energitab fra forsøgsopstilling uden propelmåler

Det er muligt at måle energitabet fra propelmåleren med forsøg. Der er udført to forsøg med propelmåleren og to uden. Energitabet fra opstillingen med propelmåler ses af figur 5.15.



Figur 5.15. Energitab i forhold til middelhastighed fra forsøgsopstilling med propelmåler

Der bestemmes et udtryk for energitabet fra propelmåleren i forhold til middelhastigheden. Dette udtryk, samt de udregnede energitab fra 5.14, vil senere anvendes til at bestemme energitabet fra klimaklappen.

# 5.5 Forsøg med klimaklappen

#### 5.5.1 Forsøgsbeskrivelser

Der er udført to forskellige forsøg af klimaklappen, som beskrives i det efterfølgende.

#### Kontraklap med forskellige vægtopstillinger

I dette forsøg undersøges, hvordan vægten af kontraklappen har indflydelse på energitabet, åbningsvinkel og modstandstallet i forhold til åbningsvinklen. Resultaterne fra disse forsøg benyttes til at eftervise om den udregnede relation mellem åbningsvinkel og vandets hastighed stemmer overens. Forsøgene laves med tre forskellige vægtopstillinger. Den første opstilling er klimaklappen uden ændringer, i den anden opstilling udskiftes aluminumsrøret med et jernrør, hvilket er en vægtforøgelse på røret fra 0,21 til 0,97 kg. I den tredje opstilling fastgøres et vægtlod på klimaklappen, som vejer 3,00 kg. Den totale vægt af vægtopstillingerne og vægtforøgelsen i forhold til klimaklappen ses i tabel 5.5

	Klimaklap	Klimaklap med	Klimaklap med
		jernrør	vægt $3,0 \text{ kg}$
Vægt [kg]	2,45	3,21	5,45
Vægtforøgelse [%]	0	31	123

Tabel 5.5. Vægten og vægtforøgelsen af de tre forsøgsopstillingerne af klimaklappen.

#### Kontraklap med fastholdt åbeningsvinkel

Ved at fastholde åbningsvinklen på klimaklappen er det muligt at se om modstandstallet kun afhænger af åbningsvinklen. Er førnævnte gældende, skal der forekomme en lineær sammenhæng mellem hastigheden i anden over 2 gange tyndeaccellerationen og energitabet. Hældningen på den lineære sammenhæng er modstandtallet. Der udføres to forsøg med fastholdt vinkel; et med åbningsvinklen på 10,75 grader og et på 24,10 grader. Klimaklappen holdes fast med en trækile som vist på figur 5.16. Centerhastigheden måles ved de 11 pumpefrekvenser fra forsøgene af systemet uden klimaklap. Ved hver pumpefrekvens måles trykforskellen mellem de to kardele.



 $Figur \ 5.16.$ Klimaklappen fastholdt i en åbningsvinkel på 24,10 grader.

## 5.5.2 Forsøgsresultater

Resultaterne fra forsøgene med forskellige vægtopstillinger anvendes til at bestemme, hvorledes der er en relation mellem middelhastigheden og åbningsvinklen for en kontraklap. Ligeledes bestemmes en relation mellem åbningsvinklen og modstandstallet. Resultaterne fra forsøget med fastholdt vinkel anvendes til at validere relationen mellem åbningsvinklen og modstandstallet.

#### Relation mellem åbningsvinkel og middelhastighed for en kontraklap

Relationen mellem åbningsvinkel og middelhastighed bestemmes ud fra forsøgene med forskellig vægt og kontraklap modellen, som er bestemt i afsnit 5.2.1. Et eksempel på en sammenligning mellem kontraklap modellen og måleresultater fremgår af figur 5.17.



 $\label{eq:Figur 5.17.} Figur 5.17. \mbox{ Sammenligning mellem et af forsøgene med klimaklap-vægtopstillingen og kontraklap modellen.}$ 

Der er en afvigelse mellem kontraklap modellen og forsøgsresultaterne, som fremgår af figur 5.17. Derfor bestemmes korrektionskoefficienterne på samme måde som i afsnit 4.3, hvor afvigelsen ved en given vinkel bestemmes mellem forsøgsresultaterne og kontraklap modellen. Dette gøres for de tre forsøgsopstillinger, hvilket giver en korrektionskoefficient af middelhastigheden til en given vinkel, som fremgår af figur 5.18.

Det er valgt at bruge andengradspolynomiet til at beskrive tendensen for korrektionskoefficienten, da denne formel følger måleresultaterne acceptabelt, hvilket fremgår af figur 5.18. Korrektionskoefficienten har ikke en forudsigelig tendens, hvorfor andengradspolynomieformlen ikke kan bruges til at forudsige, hvordan tendensen er uden for måleområdet. Derfor har denne metode et gyldighedsinterval mellem 7-40 grader.



Figur 5.18. Afvigelsen mellem kontraklap modellens middelhastighed og middelhastigheden fra forsøgsresultaterne til en given vinkel.

Derved er der opnået en metode til at bestemme en relation mellem åbningsvinklen og middelhastigheden for kontraklapper, dette fremgår for klimaklappen med jernrør på figur 5.19 og i bilag K.2, og i K.3 fremgår resultaterne for klimaklap og klimaklap med vægt 3,0 kg.



Figur 5.19. Sammenligning mellem klimaklap med jernrør og den korrigerede kontraklap model.

#### Relation mellem åbningsvinkel og modstandstal for en kontraklap

Energitabet fra de forskellige vægtopstillinger bestemmes i forhold til middelhastigheden. I ovenstående afsnit blev det fastslået, at middelhastigheden kan beskrives med åbningsvinklen, hvorfor det undersøges om energitabet ligeledes har en sammenhæng med åbningsvinklen. Energitabet vises i forhold til middelhastigheden for hver vægtopstilling af figur 5.20.



 $Figur \ 5.20.$  Målte energitab af de tre opstillinger med klimaklappen i forhold til middelhastigheden.

Ud fra tendensen af forsøgsresultaterne bestemmes et udtryk, som beskriver energitabet i forhold til middelhastigheden for pågældende vægtopstilling. Udtrykkene fremgår nedenfor i ligning (5.5), (5.6) og (5.7).

Udtryk for forsøget af opstillingen klimaklap:

$$\Delta H = 0,0045V^2 + 0,0694V + 0,0142 \tag{5.5}$$

Udtryk for forsøget af opstillingen klimaklap med jernrør:

$$\Delta H = 0.0112V^2 + 0.0538V + 0.0057 \tag{5.6}$$

Udtryk for forsøget af opstillingen klimaklap med vægt 3,0 kg:

$$\Delta H = 0,0328V^2 + 0,0416V + 0,0036 \tag{5.7}$$

De tre udtryk beskriver det samlede energitab for deres respektive opstilling. For at kunne bestemme bidraget fra kontraklappen til energitabet, skal de resterende energitab trækkes fra. Dette gøres f.eks. for opstilling med klimaklappen på figur 5.21, hvor energitabet bliver delt op i fire bidrag. Disse bidrag er bestemt med udtrykkene fra forsøgsresultaterne og beregningerne af energitabet fra ligning 5.4.

Med en målt middelhastighed fra et af forsøgene er det muligt at bestemme energitabet fra de fire bidrag, da alle udtryk og beregninger afhænger af middelhastigheden. Energitabet fra de fire bidrag bestemmes således for alle målte middelhastigheder fra hvert forsøg, hvorefter bidragene, som kontraklappen ikke indgår i, trækkes fra. Det resterende energitab er fra kontraklappen.



Figur 5.21. Eksempel på opdeling af energitabsbidragene ved forsøg med en klimaklap.

Når energitabet fra vægtopstillingerne er bestemt kan modstandstallet for hvert målepunkt findes ved brug af formel 5.8, da modstandstallet er den eneste ubekendte.

$$\Delta H_E = \zeta_{Kontraklap} \, \frac{V^2}{2g} \tag{5.8}$$

Målepunkterne fra vægtopstillingerne har en tilhørende målt åbningsvinkel, hvorfor de beregnede modstandstal sættes op mod åbningsvinklen. De beregnede modstandstal i forhold til åbningsvinklen fra de forskellige opstillinger fremgår af figur 5.22.



Figur 5.22. Modstandstallet i logaritmisk skala i forhold til åbningsvinklen af klimaklappen.

Figuren viser, at der er en sammenhæng mellem modstandstallet og åbningsvinklen. For at kunne beskrive denne sammenhæng indsættes en model, som er tilpasset, således at der er den mindste afvigelse mellem målepunkterne og modellen. Modellen for modstandtallet fremgår af formel (5.9).

$$\zeta_k = 92, 49 \cdot (-5, 94 + \theta)^{-1,85} + 1, 1 \tag{5.9}$$

Ved at analysere på modellen for modstandstallet indgår fire konstanter, som bestemmer kurven for modellen. De fire konstanter er tilpasset, så der forekommer den mindste afvigelse mellem modellen og de uderegnede modstandstal fra forsøgsresultaterne. Der skal indsættes en åbningsvinkel i udtrykket, som trækkes fra en af konstanterne. Denne konstant er tilnærmelsesvis tæt på startvinklen anvendt ved forsøgene, hvorfor det formodes at denne konstant beskriver startvinklen. Dette betyder, at der kan være mulighed for, at modellen kan anvendes til en vilkårlig startvinkel. Den sidste konstant på 1,1 er modstandstallet for frit udløb. Hvis disse antagelser passer, er modellen for modstandstallet opbygget som det fremgår af ligning (5.10).

$$\zeta_k = a \cdot (\theta_0 + \theta)^b + c \tag{5.10}$$

Hvor:

 $\zeta_k$  | Modstandstal for kontraklap [-]

- $\theta_0$  Startvinkel [grader]
- $\theta$  Åbningsvinkel på kontraklappen [grader]

a Konstant [-]

b | Konstant [-]

c | Konstant [-]

#### Modstandstal ved en fastholdt åbningsvinkel af klimaklappen

Energitabet i forhold til hastigheden i anden over to gange tyngdeaccellerationen forekommer lineær ved forsøget med fastholdt åbningsvinkel i 10,75 grader, som fremgår af figur 5.23. Dette betyder, at modstandstallet kun er afhængig af åbningsvinklen. Skæringen med y-aksen indikerer, hvor stor trykforskel der skal til for at åbne klimaklappen.



Figur 5.23. Resultater fra forsøget med klimaklappen fastholdt i 10,75 grader.

Det samme ses for forsøget med fastholdt vinkel i 24,10 grader på figur 5.24.



Figur 5.24. Resultater fra forsøget med klimaklappen fastholdt i 24,10 grader.

For at validere modellen for modstandstallet i forhold til åbningsvinklen fra figur 5.22 sættes 10,75 og 24,10 grader ind i formel (5.9), som fremgår af udregning (5.11) og (5.12).

$$\zeta_k = 92, 49 \cdot (-5, 94 + 10, 75)^{-1,85} + 1, 1 = 6, 17$$
(5.11)

$$\zeta_k = 92, 49 \cdot (-5, 94 + 24, 10)^{-1,85} + 1, 1 = 1,54$$
(5.12)

Udregningen af modstandstallet med modellen viser, at modellen ikke altid stemmer overens med åbningsvinklen, hvorfor der indsættes en nedre og øvre grænseværdi i forhold til åbningsvinklen. Til at danne den nedre og øvre grænse anvendes 95% konfidensintervallet af afvigelsen mellem målepunkterne og modellen fra figur 5.22. Dette gøres med to gange spredningen, da afvigelsen mellem målepunkterne og modellen er normalfordelt. Der er udført en Lilliefors test for at bestemme, om det er normalfordelt, som kan ses i bilag L. Modellen med 95% konfidensinterval fremgår af figur 5.25.



Figur 5.25. Modstandstallet logaritmisk skala i forhold til åbningsvinklen af klimaklappen.

Ud fra modellen for modstandstallet, har en åbningsvinkel på 10,75 grader et modstandstal inden for et interval på 4,29-8,87 og intervallet for modstandstallet ved en åbningsvinkel på

24,10 grader er 1,07-2,21. De to forsøg med fastholdt klimaklap ligger inden for intervallet af modellen.

# 5.6 Validering af dimensioneringsmodel

Til at validere dimensioneringsmodellen anvendes to nye vægtopstillinger af klimaklappen. De to forsøgsopstillinger fremgår af tabel 5.6. For at validere dimensioneringsmodellen sammenholdes forsøgsresultaterne fra de nye vægtopstillinger med modelresultaterne. Dimensioneringsmodellen skal kende diameteren og vægten af kontraklappen, hvilket allerede er givet med disse forsøgsopstillinger. Yderligere skal enten åbningsvinklen eller middelhastigheden være kendt. Til denne validering anvendes åbningsvinklen som input til dimensioneringsmodellen.

	Klimaklap	Klimaklap med jernrør
	med vægt 0,85 kg	m og~vægt~0,85~kg
Vægt [kg]	3,30	4,06
Vægtforøgelse [%]	$34,\!69$	65,71

Tabel 5.6. Vægten og vægtforøgelsen af de to forsøgsopstillingerne i forhold til klimaklappen.

Første skridt af dimensioneringsmodellen er at bestemme middelhastigheden ud fra de målte åbningsvinkler. Forsøgsresultaterne og modelresultaterne af relationen mellem åbningsvinklen og middelhastigheden af forsøgene med nye vægtopstillinger fremgår af figur 5.26 og 5.27. Resultaterne fra modellen og forsøgene stemmer overens.



Figur 5.26. Sammenligning mellem forsøgs- og modelresultater af relationen mellem åbningsvinklen og middelhastigheden for klimaklappen med jernrør og vægt 0,85 kg.



Figur 5.27. Sammenligning mellem forsøgs- og modelresultater af relationen mellem åbningsvinklen og middelhastigheden for klimaklappen med vægt 0,85 kg.

Næste skridt i modellen er at bestemme modstandstallet i forhold til åbningsvinklen. Dette gøres med formel 5.9 og 95% konfidensintervallet anvendes til at bestemme modstandtallene for den nedre- og øvre grænse.

Når modstandstallet og middelhastigheden er bestemt kan energitabet beregnes. Forsøgsog modelresultaterne af energitabet i forhold til middelhastigheden fra begge forsøg fremgår af figur 5.28 og 5.29.



Figur 5.28. Sammenligning mellem forsøgs- og modelresultater af energitabet i forhold til middelhastigheden for klimaklappen med jernrør og vægt 0,85 kg



Figur 5.29. Sammenligning mellem forsøgs- og modelresultater af energitabet i forhold til middelhastigheden for klimaklappen med vægt 0.85 kg

Forsøgs- og modelresultaterne stemmer overens, hvorfor det kan bekræftes, at dimensioneringsmodellen kan beskrive energitabet af en kontraklap og vandføringen forbi en kontraklap ud fra åbningsvinklen af kontraklappen. Modellen kan regne begge veje, hvilket vil sige at hvis enten vandføringen, modstandstallet eller åbningsvinklen er kendt, er det muligt at bestemme de andre parametre.

# 5.7 Diskussion af undersøgelsen af klimaklappen

Under forsøgene anvendes en startvinkel på fem grader, men startvinklen på kontraklapper er normalt mellem 0 og 12 grader, i specielle tilfælde kan startvinklen også være negativ eller helt op til 50 grader. Betydningen af startvinklen kendes ikke og det er usikkert om korrektionskoefficienterne bestemt med en startvinklen på 5 grader kan anvendes ved andre startvinkler. Det antages dog at faktorene kan flyttes, så de passer med startvinklen og modstandstals-modellen kan muligvis anvendes med andre startvinkler.

Der bliver taget højde for størrelsen på kontraklappen i modellen ved Bernoullis formel og ved bestemmelsen af momentet, hvor det effektive areal, armene til kræfterne og vægte på objekterne indgår, hvorfor modellen skulle kunne bruges til andre dimensioner af kontraklapper. Hvorvidt størrelsen på en kontraklap ændre på de modstandstal, der er bestemt til åbningsvinklerne og korrektionskoefficinten for middelhastigheden til de bestemte åbningsvinkler, er ikke blevet undersøgt. Det forventes dog at disse relationer ikke ændre sig alt efter størrelse og derved er skalerbart.

Pumperne sætter en begrænsning for hastigheden, der kan opnås i forsøgsopstillingen, hvorfor der ikke kan opnås hastigheder store nok til at få en åbningsvinkler over 40 grader. Derfor har dimensioneringsmodellen et gyldighedsinterval mellem 7-40 grader. Det er et mindre problem, at modellen ikke kan beskrive energitabet fra kontraklappen efter 40 grader, da modstandstallet derefter er så lavt at energitabet, der skabes derfra, er minimal.

Forsøgsoptillingen er ikke fuldkommen, da rørets længde kun er 1,5 meter. Dette betyder at strømningen ikke stabiliserer sig gennem røret, hvorfor centerhastigheden ikke ændrede

sig, mens hastighedsprofilet ved udløbet blev højere ved de største pumpeydelser. Ved de lavere pumpeydelser stemmer hastighedsprofilet og centerhatigheden overens, hvorfor forsøgsopstillingen er tilstrækkelig til at udføre de pågældende forsøg. Kontraklapper er ikke altid under dykkede forhold som de har været under denne undersøgelse. Dimensioneringsmodellen er derfor kun gyldig for kontraklapper under dykkede forhold.

Kontraklap modellen bruges i dimensioneringsmodellen af kontraklapper til at udregne energitabet, dette er dog ikke den eneste måde kontraklap modellen kan bruges. Kontraklap modellen beskriver relationen mellem åbningsvinklen og flowet ud af en kontraklap. Derved kan man ved at måle åbningsvinklen på en kontraklap få en flowmåler af vandet, der udeledes. Det er ikke ualmindeligt at målinger af flowet og udledningsmængder på regnog spildevand har en afvigelse helt op til 30% på grund af målerens vitale dele ikke kan håndtere partiklerne og snavset fra regn- og spildevandet [Frederiksen, 2016].

Forsøgresultaterne viste, at vægten har stor indflydelse på energitabet, hvorfor en stålkontraklap sammenlignes med klimaklappen i dimensioneringsmodellen. Ved bestemmelsen af en stålkontraklap anvendes en stålklap og stålbeslag i stedet for klimaklappens; klap af glas epoxy og plastbeslag. Middelhastigheden for åbningsvinklen af de to kontraklap typer fremgår af figur 5.30.



Figur 5.30. Sammenligning mellem en klimaklap og en traditionel kontraklap.

Efterfølgende bestemmes energitabet i forhold til middelhastigheden. Det fremgår tydeligt af figur 5.31 at klimaklappen giver et mindre energitab.

Energitabene for klimaklappen og stålkontraklappen er bestemt for en Ø310 kontraklap, hvilket er en lille dimension for en kontraklap. For større kontraklapper bliver forskellen i energitabet for de to typer kun større, da forskellen i vægt kun vil blive forøget.



Figur 5.31. Dimensioneringsmodellens sammenligning af energitabet i forhold til middelhastigheden for en stålkontraklap og klimaklappen

Gennem projektet er der opstillet en metode, som kan bestemme energitabet for en kontraklap under dykkede forhold. For at metoden kan anvendes skal kontraklappens opbygning, hvilke materialer kontraklappen er lavet af og rørets diameter være kendt. Fra målinger af modelforsøg og undersøgelsen af en kontraklap, kan det konkluderes, at der er en relation mellem åbningsvinklen og middelhastigheden, samt en relation mellem åbningsvinklen og modstandstallet. Ud fra relationerne er der bestemt to modeller, som beskriver modstandtallet og middelhastigheden for en vilkårlig kontraklap ved at kende åbningsvinklen. Ved at måle åbningsvinklen på en kontraklappen kan flowet bestemmes med modellen for åbningsvinklen og middelhastigheden. Derved kan kontraklapper anvendes som flowmålere.

Med de to modeller kan dimensioneringsmodellen bestemme energitabet for en vilkårlig kontraklap. Er vandføringen i røret bestemt, kan dimensioneringmodellen beregne åbningsvinklen som kontraklappen vil stå i og ud fra åbningsvinklen beregne et modstandstal. Derved kan det konkluderes at dimensioneringsmodellen kan forudse opstuvningen fra en kontraklap opstrøms.

- AAU, 2018, Dansk vandteknologi i front med intelligent styring og overvågning. Besøgt 28-11-2018. URL: https://www.tech.aau.dk/nyheder-arrangementer/nyhed/danskvandteknologi-i-front-med-intelligent-styring-og-overvaagning.cid354854.
- AECOM, 2012, Stormwater Backflow Devices Feasibility Study Stage 2.
- ArduinoTech, 2019a, Vægt føler 1Kg. [online]. Besøgt 19-2-2019. URL: https://arduinotech.dk/shop/vaegt-foeler-1kg/.
- , 2019b, Vægt Føler Dual-Channel A/D Modul, HX711 [online]. Besøgt 19-2-2019. URL: https://arduinotech.dk/shop/vaegt-foeler-dual-channel-ad-modul-hx711/.
- Brorsen, Michal og Torben Larsen, 2009, *Lærebog i hydraulik*. ISBN: 978-87-7307-978-2. Aalborg Universitet.
- Climate-Data, 2018, *Historisk vejr data København [online]*. Besøgt 07-5-2019. URL: https://da.climate-data.org/.
- Dannozzle, 2016, *Kontraklapper, Dannozzle [online]*. Besøgt 30-1-2019. URL: http://www.dannozzle.dk/FORSIDE/f(Kategori/Kontraklapper.46).
- Eriksen, Jan, 2018, Jan og alger. Møde med Dannozzle, d.24/09-2018.
- famobix, 2019, Geometryx: Geometry Calculator. Besøgt 05-6-2019. URL: http:// famobix.blogspot.com/.
- Forsikring & Pension, 2017, Klimastatistik [online]. Besøgt 18-2-2019. URL: http://admin. forsikringogpension.dk/temaer/klimatilpasning/statistik/Sider/Forside. aspx.
- Frederiksen, John, 2016, Flowmåling af regn- og spildevand [online]. Besøgt 04-6-2019. URL: http://flowcenter.dk/wp-content/uploads/2016/04/Flowm%C3%A5ling-afregn-og-spildevand-ProblematikTestVejledning.pdf.
- Gerhard Christensen A/S, 2011, Kontraklapper, Traditionelle [online]. Besøgt 8-2-2019. URL: https://gc.dk/da/kontraklapper-eks4/.
- Hans Krongaard Kristensen and Bjørn Poulsen, 2016, *Danmarks byer i middelalderen[online]*. Besøgt 20-2-2019. URL: http://samples.pubhub.dk/9788771842685.pdf.
- Hansen, Rene, 2019, Frederikshavn forsyning A/S. Telefon samtale d. 08-5-2019.
- Hasling, Arne, Morten Villadsen og Nader Kashani, 2014, Enhedsomkostninger ved oversvømmelsesskader fra skybrud [online]. Besøgt 18-2-2019. URL: http://admin. forsikringogpension.dk/temaer/klimatilpasning/statistik/Documents/ Nedbor-omkostninger-V13.pdf.

- Kystdirektoratet, 2018, *Revurdering og ajourføring af risikoområder for oversvømmelse fra hav og vandløb[online]*. Besøgt 19-2-2019. URL: https://oversvommelse.kyst.dk/media/247968/kdi-2018-\_hovedrapport-om-revurdering-af-risikoomraader-efter-oversvoemmelsesloven.pdf.
- Labs, Virtuel, 2016, *Jet theory [online]*. Besøgt 23-4-2019. URL: http://fm-nitk.vlabs.ac.in/exp3/index.html.
- Mandrup, Louise m.fl., 2019, Billeder fra oversvømmet Danmark: Her strømmede vandet ind over land [online]. Besøgt 18-2-2019. URL: https://www.dr.dk/ nyheder/regionale/syd/billeder-fra-oversvoemmet-danmark-herstroemmede-vandet-ind-over-land?fbclid=IwAR2eKOwRxftUTHuaKlisNkNa\_te\_ xAkOkW62VmXrSVWHgCuCpkb07Pu-HUk#!/.
- Meriam, J.L. og L.G. Kraige, 2013, *Statics.* ISBN: 978-1-11816499-0. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.
- Nicholas J. Georgiadis and Dennis A. Yoder, 2006, Evaluation of Modified Two-Equation Turbulence Models for Jet Flow Predictions [online]. Besøgt 28-5-2019. URL: https: //www.grc.nasa.gov/WWW/wind/papers/AIAA-2006-0490-Georgiadis.pdf.
- Nielsen, Jesper Ellerbæk, 2017, Geostatistics Effective geostatistical approach for inputoutput models in chemical risk assessment I - towards building a geostatistically based risk assessment model. Forelæsning hos AAU d. 18/10-2017.
- Olsen, Ronnie Stobberup, 2019, Oversvømmelse i Sønderborg kommune. Sønderborg kommune d. 2/1/2019.
- ONSET, 2019, HOBO D20L-04 Data Logger [online]. Besøgt 17-4-2019. URL: https://www.onsetcomp.com/datasheet/U20L-04.
- OTT HydroMet, 2019, OTT C2[online]. Besøgt 19-2-2019. URL: https://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-c2-385/.
- Risager, Lisa, 2011, *Istedgade skybrud 2011-07-02 [online]*. Besøgt 18-2-2019. URL: https://da.wikipedia.org/wiki/Fil:Istedgade\_skybrud\_2011-07-02.jpg.

Med denne rapport medfølger følgende digitale bilag.

# Bilag - Forsøgsmålinger fra klimaklapforsøg

Bilaget indeholder måleresultater fra klimaklapforsøgene. Resultaterne kan åbnes i Microsoft Excel.

Til at bestemme rørtabet igennem røret bruges colebrok and white formel og det antages at middelhastigheden, V, i røret kendes og ruheden, k, bestemmes ved opslag. Det første der skal gøres er at bestemme den hydrauliske radius, R, og Reynolds' tal, Re, som vist i formel B.1 og B.2 [Brorsen og Larsen, 2009].

$$R = \frac{D}{4}$$
(B.1)  
$$Re = \frac{VR}{\nu}$$
(B.2)

Hvor:

- $\begin{array}{c|c} R & & \text{Hydraulisk radius } [m] \\ D & & \text{Diameter af rør } [m] \\ Re & & \text{Reynolds' tal } [-] \end{array}$
- V Middelhastighed [m/s]

 $\nu$  | Viskositet  $[m^2/s]$ 

Herefter bruges Colebrook og Whites formel (B.3) til at bestemme friktionstallet, f. Da friktionstallet er på begge sider af formlen bruges iterationer til at bestemme friktionstallet. Der startes med en værdig på 0,005 hvorefter der laves 10 iterationer hvilket antages at give et brugbart resultat [Brorsen og Larsen, 2009].

$$f = \frac{2}{\left(6, 4 - 2, 45 \ln(\frac{k}{R} + \frac{4,7}{Re\sqrt{f}})\right)^2}$$
(B.3)

Hvor:

 $\begin{array}{c|c} f & \text{Friktionstal[-]} \\ k & \text{Ruhed } [m] \end{array}$ 

Når friktionstallet er bestemt er det kan energiliniegradienten, I, bestemmes og ganges på længden af røret, L, kan rørtabet,  $\Delta H_L$  bestemmes ved formel (B.4) og (B.5) [Brorsen og Larsen, 2009].

$$I = f \frac{V^2}{2gR} \tag{B.4}$$

$$\Delta H_L = I \cdot L \tag{B.5}$$

Hvor:

- Energiliniegradienten [-] Ι kRuhed [m]Længde på rør [m]Tyngdeacceleration  $[m/s^2]$ L
- $\begin{array}{c|c}g & \text{Tyngdeacceler}\\ \Delta H_L & \text{Rørtabet} \ [m] \end{array}$

# Egenskaber og aflæsning af propelmåler C

#### I dette bilag fremvisses egenskaberne og kalibreringer for propelmåleren.

OTT C2 propelmåleren er en propelmåler der kan bruges i laboratorie forsøg, små kanaler og lignende. Til at tælle antallet af omdrejninger på propellen bruges en digital tæller OTT Z400. Der findes forskellige typer propeller der kan monteres på måleren, men propellen der bruges i modelforsøget er type 1 og i udersøgelsen af klimaklappen bruges både type 1 og type 5. Propel 1 har en diameter på 50 mm en pitch på 0,05 meter og kan måle hastigheder imellem 0,025-1 meter pr. sekund. Propel 5 har en diameter på 30 mm en pitch på 0,05 og kan måle hastigheder imellem 0,05-1 m/s. Et billede af propelmåleren fremgår af figur C.1. [OTT HydroMet, 2019]



 $Figur\ C.1.$ Billede af propelmåleren med propel type 1 monteret.

Hastigheden af vandet kan bestemmes ud fra antallet af omdrejninger propeller har per sekund ved at anvende formlerne. Disse formler er blevet lavet ud fra en kalibrering, således det mest nøjagtige resultat bestemmes. Propel 1's formler fremgår af (C.1) og propel 5's formler fremgår af (C.2).

$n \le 2,88$	v = 0,0632 n + 0,017	(C.1)
$2,88 \le n \le 8,80$	v = 0,0559  n + 0,038	
$8.80 \le n \le 26.97$	v = 0.0534 n + 0.060	

$n \le 6,06$	v = 0,0588  n + 0,029	(C.2)
n > 6,06	v = 0,0555 n + 0,049	

Hvor:

- $n \mid$  Antalet af omdregninger [rps]
- v Vandets hastighed [m/s]
## Dimensionerne af skiverne til modelforsøget



Figur D.1. Dimensioner af 0,10 m skive. Alle mål er i mm.



 $Figur \ D.2.$  Dimensioner af 0,15 m skive. Alle mål er i mm.



 $Figur \ D.3.$  Dimensioner af 0,20 m skive. Alle mål er i mm.

### Bestemmelse af hastighed ved kontraklap model baseret på Bernoullis

I dette bilag bliver der vist, hvordan hastigheden bliver beregnet ud fra kontraklap modellen baseret på bernoullis.

For at bestemme hastigheden der skal til at løfte kontraklappen og skiver til en bestemt vinkel bruges Bernoullis formel (E.1) [Brorsen og Larsen, 2009].

$$F_v = \frac{1}{2} \rho_v \, A \, v^2 \tag{E.1}$$

Hvor:

 $\rho_v$  | Densiteten af vand [kg/m<sup>3</sup>]

A Arealet som udsættes for kraften  $[m^2]$ 

v | Hastigheden af vandet [m/s]

Arealet, som udsættes for kraften, afhænger af åbningsvinklen, hvorfor arealet kan bestemmes med formel (E.2). Arealet der bestemmes i formlen er for skiven på 0,15 m i diameter. Dimensionerne af skiver fremgår af bilag D.

$$A = 0,075 \, m \cdot (0,075 \, m \cdot Cos(\theta)) \cdot \pi + 0,01 \, m \cdot (0,1125 \, m \cdot Cos(\theta)) +$$
(E.2)  
$$0,06 \, m \cdot (0,014 \, m \cdot Cos(\theta))$$

Tyngdekrafterne der påvirker klappen bliver bestem som det fremgår af tabel E.1. Ved at sætte momentligningen (2.1) lig 0 er det muligt at isolere hastigheden. Et eksempel på dette fremgår af beregning (E.3).

$$v = \frac{\sqrt{2}\sqrt{AaCos(\theta)p_v M_{Tyngde}}}{AaCos(\theta)p_v}$$
(E.3)

Hvor:

$M_{Tyngde}$	Momentkrafterne fra tyngden af kontraklappen [Nm]
$\theta$	Åbningsvinkelen [Grader]
a	Armen [m]

	Målepind*	$M  extsf{ø} trik$	Skrue	Jenplade	2 Skiver	Skive		Del
	1406,2	8030	8030	7880	8030	1406,2	$[kg/m^3]$	$\rho_{Matriale}$
	0	1000	1000	1000	1000	1000	$[kg/m^3]$	$ ho_{Vand}$
	4,25E-06	8,72E-08	3,11E-07	6,51E-05	8,82E-07	9,81E-05	$[m^3]$	Volumen
	0,0060	0,0006	0,0022	$0,\!4478$	0,0062	0,0399	[kg]	Masse i vand
	0,0587	0,0060	0,0215	$4,\!3982$	$0,\!1218$	0,3928	[N	$F_t$
	45	45	45	45	45	45	[Grader]	Vinkel
SUM	0,086	$^{0,2}$	$^{0,2}$	$^{0,2}$	$^{0,2}$	0,184	[m]	Arm
0,69077	-0,00355	0,00085	0,00304	$0,\!62200$	0,01723	0,05119	[Nm]	Momentkraft

Tabel E.1. Moment beregning for skiven på 0,15 m med en åbningsvinkel på 45 grader.
 \*Målepinden ligger over vandet og presser kontraklappen opad, hvilket giver den modsatrettede momentkraft.

# Resultater for modelforsøg 1 og 2



Figur F.1. Forsøg 1 sammenholdt med kontraklap modellen.



Figur F.2. Forsøg 2 sammenholdt med kontraklap modellen.



 $Figur\ G.1.$  Mesh af model med en skive på 0 grader.



Figur G.2. Mesh af model med en skive på 0 grader.



 $Figur\ G.3.$  Hastighedfordeling af CFD model, hvor skiven står i 45 grader.



 $\it Figur~G.4.$  Trykfordeling af CFD model, hvor skiven står i 45 grader.

# Klimaklappens dele



Figur H.1. Tegning af monteringspladen og klap med dimensioner fremvist. Alle mål er i centimeter.



Figur H.2. Tegning af de mindre dele fra klimaklappen med dimensioner fremvist. Alle mål er i centimeter.

### Bestemmelse af det effektive areal

Formel (I.1) kan anvendes til at bestemme arealet mellem to halvcirkler eller en halvellipse og en halvcirkel der ligger oven i hinanden. Dette eksempel vil fokusere på en halvellipse og en halvcirkel der skærer hinanden.

$$A = 2 \int_0^{\frac{2}{D}} y_1 - y_2 \,\mathrm{d}x \tag{I.1}$$

Hvor:

 $A \mid \text{Effektive areal } [\text{cm}^2]$ 

 $y_1$  | Funktion for cirklen

 $y_2$  Funktion for ellipse

D | Længden af lensen [cm]

På figur I.1 fremgår et eksempel arealerne med åbningsvinkel på 45 grader, hvor tilhørende symboler er tilføjet.



Figur I.1.

Ud fra cirklens ligning bestemmes funktionen for cirklen,  $y_1$ . Dette gøres ved at isolere for y, som giver to resultater et positivt for den øvre cirkelhalvdel og et negativt for den nedre cirkelhalvdel.

Af figur I.2 ses det, hvilken af halvcirklerne, der anvendes hvornår og hvilket areal der udregnes med dem. Det er nemlig ikke det effektive areal der bestemmes direkte når ellipsen skærer med den nedre halvdel af cirklen. Dette areal er den del af vandet, som ikke rammer klappen. Ved at trække dette areal fra det totale areal af cirkel bestemmes det effektive areal. Med opstillingen, som bruges til hovedforsøget skiller skæringen mellem den nedretil den øvre halvdel ved en åbningsvinkel på 48 grader.



Figur I.2.

Det samme gøres for ligningen af en ellipse, hvor der indsættes en parametre, C, som er afstanden mellem centrummerne af halvcirklen og halvellipsen. Dette giver ligeledes to resultater, men for ellipsen er det kun den positive der skal bruges da den negative del af ellipsen ikke interagere med cirklen.

Af figur I.1 fremgår tegnforklaringen, hvor a og b er radiusser for ellipsen. a er konstant, hvor b ændre sig i forhold til åbningsvinklen. b er derfor lige med  $Cos(\theta) \cdot a$  da det ved en åbningsvinklen på 0 grader er en cirkel.

C bestemmes med cirklens og ellipsens afstand til omdrejningspunktet. Cirklens centrum er konstant i forhold omdrejningspunktet, hvor ellipsen ændrer sig med åbningsvinklen af kontraklappen. Formelen (I.4) gælder kun, hvis centrum af ellipsen og cirklen er det samme sted med en åbningsvinkel på 0 grader.

$$C = L_1 - (L_1 \cdot Cos(\theta) + L_2 \cdot Sin(\theta)) \tag{I.4}$$

Hvor:

$\theta$	Åbningsvinklen
$L_1$	Længde fra omdrejningspunktet til centrum i y-retning [cm
T	

 $L_2$  | Længde fra omdrejningspunktet til centrum i z-retning [cm]

Sidste del inden det effektive areal kan findes er at bestemme længden af lensen, D. Placeringen af cirklen og ellipsen er afgørende for skæringspunkterne og derfor indgår cirklens og ellipsens koordinater. Cirklens centrum placeres i origo og da ellipse kun bevæger sig på y-aksen bliver den koordinater  $x_e = 0$  og  $y_e = L_1 - (L_1 \cdot Cos(\theta) + L_2 \cdot Sin(\theta))$ . Skæringen findes derved med cirklens ligning (I.5) og ellipsens ligning (I.6). Dette giver to ligninger med to ubekendte, som er x og y. Ved at isolere for dem, kan skæringspunkterne bestemmes. Længden af lensen, D er det dobbelte af x.

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$$
(I.5)

$$\frac{(x-x_e)^2}{a^2} \cdot \frac{(y-y_e)^2}{b^2} = 1$$
(I.6)

#### Angrebspunkt \_

Angrebspunkterne bestemmes for det effektive areal for at kunne bestemme momentarmen for vandkraften. Måden Angrebspunktet bliver bestem er ved at opdele kontraklappen og røråbningen i forskellige dele og bestemme deres angrebspunkt ud fra et nulpunkt og tilsidst samle alle delene således et sammenlagt angrebspunkt kan bestemmes. I tilfældet af kontraklap forsøgene er der to opdelinger af dele til bestemmelse af angrebspunkt. Et for 28-48 grader, se figur J.1, og et for 49-73 grader, se figur J.2.



Figur J.1. Eksempel på de forskellige dele, der indgår i bestemmelse af angrebspunktet ved en åbningsvinkel på 40 grader.



*Figur J.2.* Eksempel på de forskellige dele, der indgår i bestemmelse af angrebspunktet ved en åbningsvinkel på 60 grader.

Som det fremgår består de forskellige dele af ellipsesegmenter og ellipser. Derfor skal der bruges formler til at kunne bestemme angrebspunktet for de forskellige dele. Parametrene, der bruges i disse formler fremgår af figur J.3.



Figur J.3. Figur af ellipse og et ellipsesegment, samt de parametre der skal bruges til at bestemme angrebspunktet.

For de forskellige åbningsvinkler så er a altid konstant for kontraklappen mens b<br/> kan bestemmes ud fra åbningsvinklen, og for røret er a og b<br/> altid konstant. Skæringspunkterne  $x_p$  og  $y_p$  er bestemt ud fra en åbningsvinkel i bilag I. Form<br/>ler til at bestemme de andre parametre for en ellipse<br/>segment fremgår her [famobix, 2019]:

$$A = a \, b \, \arccos\left(\frac{y_p}{b}\right) - x_p \, y_p \tag{J.1}$$

$$a_S = \frac{2 b^2 x_p^3}{3 a^2 A} \tag{J.2}$$

Hvor:

A | Areal af ellipsesegment [m<sup>3</sup>]

a Radius i x-retningen [m]

*b* Radius i y-retningen [m]

 $y_p$  | Afstanden til punktet i y-retnignen [m]

 $y_p$  Afstanden til punktet i x-retnignen [m]

 $a_S$  | Afstanden til angrebspunktet fra midten af rør-ellipsen [m]

Derefter kan det totale angrebspunkt for alle delene bestemmes ved at finde afstanden fra angrebspunkterne til et nulpunkt og de forskellige deles areal i formel (J.3)

$$A_P = \frac{\sum A a_s}{\sum A} \tag{J.3}$$

Hvor:

 $A_P$  | Afstanden til angrebspunktet fra midten af rør-ellipsen [m]

## Resultater fra forsøg af klimalklappen



 $Figur\ K.1.$ Hastighedsprofilerne fra propelmålinger gennem rørtværsnittet ved en vandstand på $0,\!61$ meter.



Figur K.2. Sammenligning mellem klimaklap forsøg og den korrigerede kontraklap model.



Figur K.3. Sammenligning mellem klimaklap med vægt og den korrigerede kontraklap model.

Til at bestemme om afvigelsen mellem målepunkterne af modstandstallet i forhold til åbningsvinklen og beregningsmodellen, er normaltfordelt anvendes Lilliefors testen. Lilliefors testen er specifikt lavet til at bestemme om en mængde data er normaltfordelt. Testen anvender et niveau af betydning, hvor jo større niveau af betydning betyder at testen bliver mere vanskelig [Nielsen, 2017].

Testen anvender den største afvigelse mellem empiriske fordeling og normal fordelingen. Dette bestemmes med ligning L.1

$$T = max|F(x) - F_N(x)| \tag{L.1}$$

Hvor:

F(x)Normal fordeling [-] $F_N(x)$ Empiriske fordeling [-]TTestværdi [-]

Hvis T er mindre end en grænseværdi, som bestemmes med ligning L.2 er dataserien normaltfordelt.

$$d = \frac{N^{0,5} - 0,01 + 0,083}{N^{0,5}} \tag{L.2}$$

Hvor:

d | Grænseværdi [-] N | Antallet af datapunkter [-]

Der er 89 datapunkter, hvorfor at d bestemmes til at være 1,06.

$$\frac{89^{0,5} - 0,01 + 0,083}{89^{0,5}} = 1,06$$
(L.3)

T er bestemt til 0,73 og er derfor mindre end d, hvorfor dataserien er normaltfordelt.