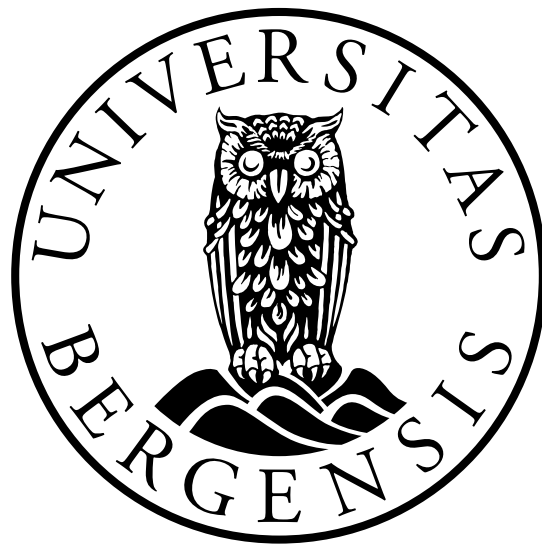


# Design og anvendelse av en eksperimentell hydrofoil testrigg

Vilde Fitjar Lunestad



Masteroppgave i Havteknologi

Universitetet i Bergen  
Institutt for fysikk og teknologi

Desember 2020



# Forord

Dette masterprosjektet beskriver arbeid utført i et samarbeid mellom Universitetet i Bergen (UiB) og Høgskulen på Vestlandet (HVL). Prosjektet er skrevet som det avsluttende arbeidet ved studiet i Havteknologi - Marine operasjoner, ved Institutt for fysikk og teknologi, UiB. Oppgaven omhandler design, konstruksjon og eksperimentell testing av en foilrigg tilpasset en hydrofoil hos HVL sin MarinLab i Bergen. Det er i tillegg utført numeriske analyser ved hjelp av computational fluid dynamics (CFD) for sammenligning med eksperimentelle forsøk.

Jeg vil spesielt rette en stor takk til min veileder Dr. Gloria Stenfelt, for god hjelp og veiledning gjennom tiden jeg har arbeidet med dette prosjektet.

Videre vil jeg også takke de ansatte på Høgskulens verksted: Bernt Hustad Hembre, Nafez Ardestani, Kjetil Gravelseter, Harald Moen og Frode Jansen for god hjelp både under designfasen og i den praktiske delen av prosjektet.

Jeg vil også takke Dr. Thomas Hansen for god hjelp med bakgrunn og forståelse av CFD-analyse.

Avslutningsvis vil jeg takke min samboer Didrik Furnes for tålmodighet og god støtte dette året.



# Sammendrag

I dette masterprosjektet designes og konstrueres en eksperimentell testrigg for hydrofoiler. For å undersøke testriggens yteevne benyttes den godt dokumenterte foilen NACA0018 som testobjekt. Preliminære eksperimentelle forsøk utføres ved Høgskulen på Vestlandets (HVL) hydrodynamiske laboratorium MarinLab. Her utføres det slepetester med ulike hastigheter som tilsvarer relativt lave Reynolds tall ( $Re$ ), hvor foilens hydrodynamiske egenskaper i form av todimensjonale løft- og dragkoeffisienter måles. I tillegg utføres det numeriske analyser av strømmingen over den aktuelle foilen ved hjelp av Computational fluid dynamics (CFD) i OpenFOAM og Xfoil. Prosjektet muliggjør fremtidig utvikling og forskning på foiler ved HVL. Optimalisering og videreutvikling av foilteknologi kan ha en betydning for energiøkonomien i en verden med et økende energibehov.

Resultater fra numeriske analyser viser godt samsvar i den lineære delen av løftkurven. I steilingsområdet observeres større grad av spredning ved de laveste  $Re$ . Totalt sett viser resultatene fra OpenFOAM høyere løft- og lavere dragprediksjoner enn resultater fra Xfoil. Resultater fra Xfoil med et høyt turbulensnivå viser godt samsvar med valideringsdata fra National Advisory Committee for Aeronautics (NACA).

Resultater fra eksperimentelle forsøk indikerer at det er større turbulens i fristrømmen enn opprinnelig antatt. Resultatene kan også tyde på at 3D-effekter kan ha oppstått i strømmingen. Det observeres betydelig økt drag under eksperimentelle forsøk sammenlignet med CFD-analyser og valideringsdata fra NACA. Dette kan tyde på økt drag fra selve testriggen. Det er derfor behov for videre utprøving og optimalisering av testriggen.

Arbeidet som beskrives i denne masteroppgaven representerer første trinn i prosessen mot en optimalisert testrigg for hydrofoiler. Prosjektet undersøker foilens grunnleggende hydrodynamiske egenskaper med utarbeidet testoppsett. Foreliggende masterprosjekt danner et grunnlag som videre kan forbedres og anvendes innenfor andre områder i kommende studier.

# Abstract

In this master thesis an experimental hydrofoil testrig is designed and constructed. To examine the performance of the test rig, the well-documented foil NACA0018 is applied as the test object. Preliminary experimental tests are performed at Western Norway University of Applied Sciences' (HVL) hydrodynamic laboratory MarinLab. Towing tests are performed at different velocities corresponding to relatively low Reynolds numbers ( $Re$ ), where the foils' hydrodynamic properties in the form of two-dimensional lift- and drag coefficients are measured. In addition, numerical analyses of the flow past the current foil are performed using Computational fluid dynamics (CFD) in OpenFOAM and Xfoil. The project enables enhanced future development and research on foils at HVL. Optimization and further research of foil technology can have an impact on the energy economy in a world with an increasing demand of energy.

Results from numerical analyses show good agreement in the linear part of the lifting curve. In the stall area, a higher deviation is observed at the lower  $Re$ . Overall, the results from OpenFOAM show higher lift and lower drag predictions than results from Xfoil. Results from Xfoil with a high level of turbulence show good agreement with validation data from National Advisory Committee of Aeronautics (NACA).

Experimental results may indicate a greater degree of turbulence than expected prior to testing, and that 3D-effects may have occurred in the flow. The results show significantly increased drag compared to CFD analyses and data from NACA, which may indicate a drag contribution from the test rig itself. Thus, there is a need for further testing and optimization of the test rig.

The work described in this thesis represents the first step in the process towards an optimized hydrofoil test rig at HVL. The project investigates the hydrodynamic properties of the foil with the elaborated test setup. The present thesis provides a basis that can be further improved and also used in other relevant areas in future studies.



# Innhold

<b>Forord</b>	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
<b>2 Metode</b>	<b>3</b>
2.1 Teoretisk metode . . . . .	3
2.1.1 Geometrien til en foil . . . . .	3
2.1.2 Strømning rundt et objekt . . . . .	6
2.1.3 Løft- og dragkraft . . . . .	11
2.1.4 2D- og 3D-strømning . . . . .	12
2.2 Numerisk metode . . . . .	14
2.2.1 Computational fluid dynamics (CFD) . . . . .	14
2.2.2 Navier-Stokes ligningene . . . . .	14
2.2.3 Mesh . . . . .	16
2.2.4 OpenFOAM . . . . .	18
2.2.5 Turbulensmodell . . . . .	20
2.2.6 Filoppsett ved simulering i OpenFOAM . . . . .	23
2.2.7 Xfoil . . . . .	25
2.2.8 Construct2D . . . . .	27
2.2.9 Mesh-uavhengighetsstudie . . . . .	27
2.3 Eksperimentell metode . . . . .	28
2.3.1 Testoppsett . . . . .	28
2.3.2 Undersøkelse av testobjektets geometri . . . . .	36
2.3.3 Undersøkelse av naturlig frekvens . . . . .	37
2.3.4 Testplan . . . . .	38
2.4 Feilkilder . . . . .	40
<b>3 Resultater</b>	<b>42</b>
3.1 Mesh-uavhengighetsstudie . . . . .	42
3.2 Numeriske resultater . . . . .	46
3.3 Eksperimentelle resultater . . . . .	54



3.3.1	Undersøkelse av symmetri . . . . .	57
3.3.2	Undersøkelse av trigget transisjon . . . . .	59
3.3.3	Ventetid mellom forsøk . . . . .	61
<b>4</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>Forslag til videre arbeid</b>	<b>64</b>
	<b>Referanser</b>	<b>65</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>70</b>
<b>A</b>	<b>: Undersøkelser av måleutstyr</b>	<b>70</b>
A.1	: Lastcellekalibrering før forsøk . . . . .	70
A.2	: Lastcellekalibrering etter forsøk . . . . .	71
A.3	: Undersøkelse av usikkerhet i lastceller . . . . .	71
<b>B</b>	<b>: MATLAB skript</b>	<b>73</b>
B.1	Skript for prosessering av eksperimentelle data . . . . .	73
<b>C</b>	<b>: OpenFOAM skript</b>	<b>75</b>
C.1	ControlDict . . . . .	75
C.2	fvSchemes . . . . .	76
C.3	fvSolution . . . . .	78
C.4	RASproperties . . . . .	79
C.5	p . . . . .	80
C.6	U . . . . .	81
C.7	Nut . . . . .	82
C.8	nuTilda . . . . .	83
<b>D</b>	<b>: Tekniske tegninger og 3D-modeller</b>	<b>84</b>
D.1	Toppfeste underdel . . . . .	84
D.2	Klemme til Aluflex profil 6 . . . . .	85
D.3	3D-modell av ferdigstilt testtrigg . . . . .	86



# 1 Innledning

Verdens energibehov er i stadig vekst, og samtidig som tilgangen til fossile brennkilder avtar øker fokuset på å benytte fornybare energikilder og minimere forbruket for å mette energibehovet på en miljøvennlig måte. I en rapport utarbeidet av International energy agency fremkommer det at andelen av fornybar energi i global kraftproduksjon i starten av 2020 var 28%, noe som understreker hvor avhengig verden fortsatt er av ikke-fornybare energikilder. Rapporten fastslår at det likevel er en økning i andelen fornybar energi fra 26% i 2019 [1]. Fornybare energikilder utvinnes vanligvis fra naturressurser som vind-, vann-, geotermisk- og solenergi. Felles for flere velkjente metoder for å uthente fornybar energi som vindmøller og ulike typer vannturbiner, er at de omgjør energi fra ressursen til mekanisk energi ved hjelp av vinger, eller foiler. En foil kjennetegnes ved den vingelignende formen, og dersom den benyttes i vann kalles det en hydrofoil. Hydrofoiler kan også monteres under skroget på båter, som fører til at fartøyets skrog ved en viss hastighet heves over vannflaten slik at motstanden på skroget avtar. Fartøyet kan dermed operere med en høyere hastighet uten å bruke mer framdriftsenergi.

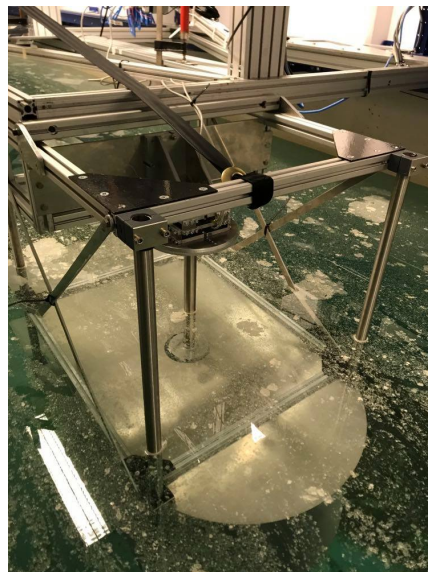
Hydrofoilteknologi bygger på airfoilteori hvor NACA-profilene kanskje er de mest kjente. Gjennom 1930-tallet utviklet og testet den amerikanske organisasjonen National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) serier av airfoiler. Noen av de mest suksessfulle av profilene var de fire- og femsifrede seriene. Disse består av et sett med grunnleggende utforminger hvor sifrene beskriver geometriske parametere som er karakteristiske for hver enkelt profil. Mange av disse profilene brukes fortsatt i dag, og NACAs 23000 serie, fra 1935, er etter alt å dømme de mest brukte airfoilene i historien [2].

Foiler utviklet av NACA har godt dokumenterte egenskaper, noe som er hensiktsmessig for å kunne validere data fra forsøk som utføres i arbeidet med denne oppgaven. Det er tidligere utført flere vindtunelltester av foilseksjoner fra NACA. Sheldahl og Klimas studie fra 1981 viser aerodynamiske karakteristikk for NACA0012, NACA0015 og NACA0018 ved ulike Reynolds tall og angrepsvinkler mellom  $0^\circ$  og  $180^\circ$  [3]. I annen studie utgitt av NACA undersøkes de aerodynamiske karakteristikkene på en rekke NACA-profiler, deriblant NACA0018 [4]. Resultater fra den sistnevnte studien benyttes til å validere de eksperimentelle og numeriske forsøkene som utføres i denne oppgaven. I tillegg til eksperimentelle forsøk er det også utført en rekke numeriske analyser, også kalt Computational fluid dynamics (CFD), av seksjoner fra NACA. Hassan og Yousef [5] sammenlignet numeriske analyser av NACA0018 med

ulike turbulensmodeller med eksperimentelle data, og viste at det for Reynolds tall mellom  $3 \cdot 10^5$  og  $1 \cdot 10^6$  var  $k - \epsilon SST$  som gav mest pålitelige resultater. Srinivasan og McCroskey undersøkte oscillerende strømninger over NACA0015 med ulike turbulensmodeller. Resultatene viste at Spalart-Allmaras ga god samsvar med eksperimentelle data [6].

Hovedmålet med dette masterprosjektet er å designe og konstruere en testrigg for eksperimentell utprøving av hydrofoiler ved Høgskulen på Vestlandets (HVL) hydromekaniske laboratorium, MarinLab. Det har ikke tidligere eksistert en slik rigg ved HVL, og konstruksjonen vil kunne bidra til videre utvikling og forskning på foiler. I første omgang benyttes en NACA0018 som testobjekt grunnet dens godt dokumenterte egenskaper, men det er et mål at testriggen enkelt skal kunne tilpasses til å analysere andre foilseksjoner med ulik størrelse og utforming. Denne oppgaven vil fokusere på å undersøke foilens hydrodynamiske karakteristikk ved lave Reynolds tall ( $Re$ ) da det fremkommer av litteraturstudie at dette området ikke er utforsket i stor grad. CFD-analyse av strømninger over foiler ved lave  $Re$  har vist å gi større avvik fra eksperimentelle resultater enn ved moderate til høye  $Re$  [7]. Dermed er det i tillegg et mål å undersøke evnen CFD-programvarene OpenFOAM og Xfoil har til å predikere strømmingen over den aktuelle foilen ved lave Reynolds tall. Bruken av OpenFOAM er relativt nytt ved instituttet. Masterprosjektet vil derfor også omhandle å sette seg inn i metodikken ved å løse strømningsproblemer tilknyttet 2D-foiler spesifikt med denne programvaren. I første omgang vil flere aspekter ved å benytte programvaren undersøkes, som for eksempel fremgangsmåte og utførelse av analyser med en standard turbulensmodell.

Endelig design og ferdigstilt testrigg som benyttes under eksperimentelle forsøk vises i Figur 1.



Figur 1: Ferdigstilt testrigg festet til slepevogn i MarinLab.

## 2 Metode

I arbeidet med denne oppgaven benyttes det flere metoder og fremgangsmåter. I første del av kapitlet presenteres relevant teori og bakgrunn. Deretter forklares den numeriske fremgangsmåten med CFD-analyse i programvaren OpenFOAM og Xfoil. Avslutningsvis presenteres den eksperimentelle metoden hvor testoppsett og testplan utdypes.

### 2.1 Teoretisk metode

I dette kapitlet presenteres det relevant teori som bakgrunn for å forstå geometrien og strømmingen rundt en foil, samt hvordan relevante parametere kan beregnes. Det er ikke utført direkte beregninger for å fremstille resultater til denne oppgaven, men relevante formler vil presenteres for forståelse og mulighet for etterprøving av metoden.

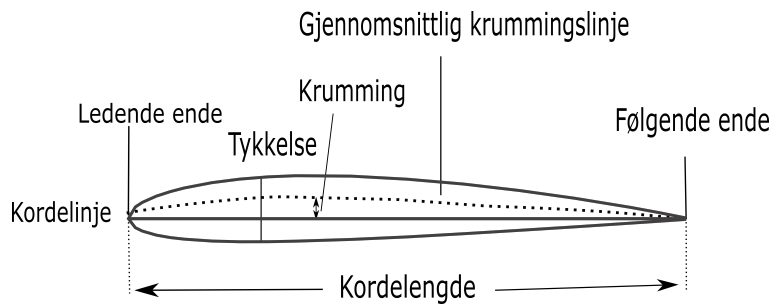
#### 2.1.1 Geometrien til en foil

En hydrofoil er en vinge som virker i vann, og på samme måte som en flyvinge i luft genererer den løftekraft [8]. Figur 2 viser et eksempel på geometrien til en foil, eller vingeprofil.



Figur 2: Skjematisk fremstilling av en foil.

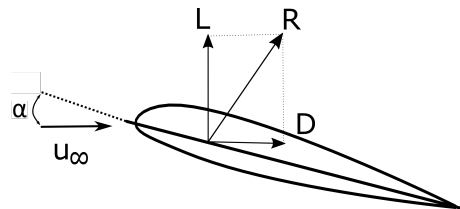
Foilen strekker seg ut i  $y$ -retning, og fristrømhastigheten  $u_\infty$  er parallell med  $xz$ -planet. Enhver seksjon av vingen som kuttet i et plan parallellt til  $xz$ -planet kan kalles en foil [9]. Det finnes mange ulike utforminger og geometrier av foiler, og flere parametere kan endres etter behov. Geometrien til en foil er kompleks, og må beskrives ved hjelp av mange parametere, noen av dem er vist i Figur 3.



Figur 3: Geometriske parametere som beskriver en foil.

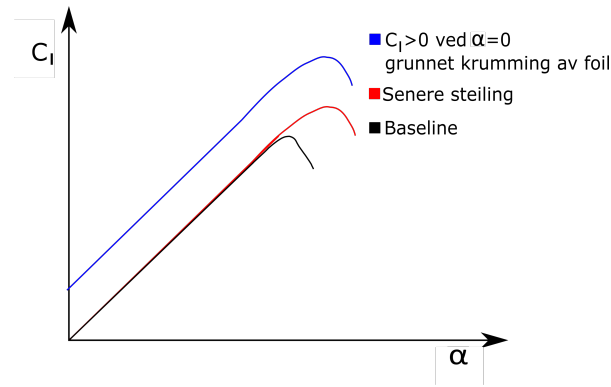
Av figuren kan man se at foilen har en ledende og en følgende ende som tilsvarer henholdsvis det aller fremste og bakerste punktet. Den ledende enden vil være på samme side som strømmingen innkommer. Kordelengden defineres som lengden av en linje som trekkes fra den ledende til den følgende enden, og bestemmer også ofte maksimal tykkelse på foilen, da denne ofte oppgis som en prosentandel av kordelengden. Den gjennomsnittlige krummingslinjen forteller noe om krummingen på foilen, og defineres som linjen trukket gjennom punkter midt mellom øverste og nederste overflate målt vinkelrett på krummingen selv [9]. For en helt symmetrisk foil, vil den gjennomsnittlige krummingslinjen gå i ett med kordelengden. Krummingen kan måles som den største avstanden mellom kordelengden og den gjennomsnittlige krummingslinjen på en foil som ikke er symmetrisk. Ved å endre disse parameterne vil det påvirke foilens løft og drag, som ofte gis ved løftekoeffisienten  $C_l$  og dragkoeffisienten  $C_d$ . En nærmere beskrivelse av dette kommer under seksjon 2.1.3. Det er ønskelig å ha mest mulig løft, samtidig som man har minst mulig drag, noe som også refereres til betegnelsen glidetall som er forholdet mellom  $C_l$  og  $C_d$ . Når et hydrofoilfartøy øker hastigheten, genereres det på et tidspunkt nok løft til å heve skroget over vannflaten, dette vil redusere draget da denne er avhengig av våt overflate, noe som fører til at fartøyet kan ha høyere hastighet med samme energiforbruk. Man vil fortsatt ha noe dragkraft, men bidraget vil være betraktelig lavere enn motstanden fra et neddykket skipsskrog hvor også bølgemotstanden er dominerende ved høye hastigheter.

En annen viktig parameter er angrepsvinkelen  $\alpha$ . Denne defineres som vinkelen mellom fluidstrømmen og kordelinjen [10], som vist i Figur 4.



Figur 4: Angrepsvinkel, løft og drag.

Løft- og dragkrefter er henholdsvis den vertikale og horisontale komponenten av den totale hydrodynamiske kraften  $R$ . Løftkraften,  $L$  vil virke vinkelrett på strømningsretningen, og dragkraften,  $D$  vil virke parallelt med strømningsretningen. Effekten av angrepsvinkelen på løftkoeffisienten kan vises som en  $C_l$  mot  $\alpha$  kurve. Figur 5 viser eksempler på tre ulike  $C_l$ - $\alpha$  kurver.

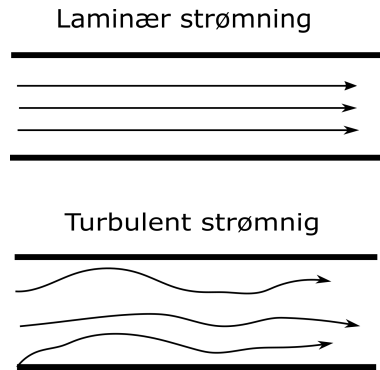


Figur 5: Forholdet mellom løftkoeffisient  $C_l$  og angrepsvinkel  $\alpha$ .

Av figuren kan man lese av angrepsvinkelen ( $\alpha$ ) i grader langs x-aksen og løftkoeffisienten ( $C_l$ ) langs y-aksen. Av grafen ser man at ved små  $\alpha$  vil løftkoeffisienten øke relativt lineært. Kurven vil være forskjellig for ulike foilgeometrier. Ved en viss  $\alpha$  når løftkoeffisienten sitt maksimum og avtar herfra ved økende angrepsvinkel. Ved angrepsvinkler over den maksimale løftkoeffisienten kan man oppleve et fenomen som kalles steiling, hvor væskestrømmen separeres fra foilens overflate. Steiling kan oppstå når vinkelen overgår den kritiske angrepsvinkelen, og fører til et fall i løftkoeffisienten. Det er en fordel at man har en myk overgang i steilingsområdet, på denne måten vil tapet i løftkraft skje gradvis og på en forutsigbar måte. For symmetriske foiler vil det ikke genereres løftkraft ved  $\alpha = 0^\circ$ , som det observeres i figuren ved den sorte og røde kurven. Ser man på den blå kurven derimot har man løft ved  $\alpha = 0^\circ$ . Dette er fordi denne kurven representerer en usymmetrisk foil, og det kan noteres at denne generelt genererer større løftkraft og mindre dragkraft enn en symmetrisk foil. Den symmetriske foilen vil være like effektiv når den brukes begge veier, men egenskapene til en usymmetrisk foil overgår den symmetriske kun ved bruk den ene veien.

### 2.1.2 Strømning rundt et objekt

En fluidstrøm kan illustreres ved hjelp av strømlinjer. Disse kan beskrives som bevegelsesmønsteret en tenkt fluidpartikkel vil følge. En fluidstrøm kan deles inn i tre hovedgrupper: laminær, transient og turbulent strømning. Ved laminær strømning beveger fluidpartiklene seg i rette baner, eller strømlinjer. Ved turbulent strømning beveger fluidpartiklene seg i tilfeldige og uordnede baner, mens en transient strømning vil være i overgangsfasen fra laminær til turbulent. Figur 6 illustrerer forskjellen mellom laminær og turbulent strømning.



Figur 6: Laminær og turbulent strømning.

En viktig størrelse for å beskrive en strømning er Reynolds tall ( $Re$ ). Reynolds tall er en dimensjonsløs størrelse som beskriver forholdet mellom treghetskrefter og viskøse krefter [11] og er gitt ved

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (1)$$

hvor  $\rho$  er fluidets tetthet gitt i  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $v$  er fluidets hastighet gitt i  $[\text{m}/\text{s}]$ ,  $L$  er karakteristisk lengde gitt i  $[\text{m}]$  og  $\mu$  er dynamisk viskositet gitt i  $[\text{Ns}/\text{m}^2]$ .

Man kan også utlede  $Re$  som forholdet mellom trykk- og skjærkrefter, og vil da være gitt som

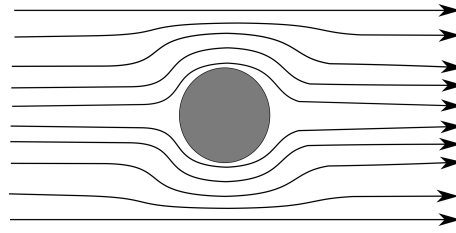
$$Re = \frac{\rho v^2}{\frac{\mu v}{L}} = \frac{v L}{\nu}, \quad (2)$$

hvor  $\nu$  er fluidets kinematiske viskositet gitt i  $[\text{m}^2/\text{s}]$ .

Ved hjelp av Reynolds tall kan man definere om strømningen er laminær, transient eller turbulent. For strømning i et rør har man for eksempel en laminær strøm ved  $Re < 2300$ , ved  $2300 < Re < 4000$  vil strømningen være transient, mens ved  $Re > 4000$  har man en turbulent strømning. Ved ytre påvirkning eller strømning over andre geometrier vil overgangen fra laminær til turbulent strøm forekomme ved andre  $Re$ .

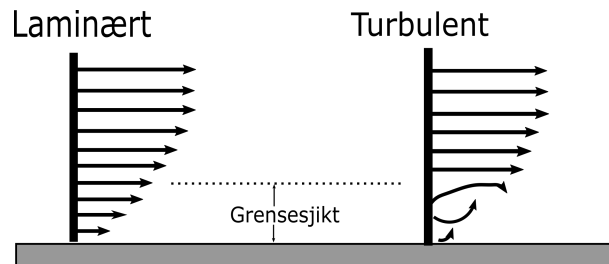


Figur 7 viser laminær strømning rundt en sirkulær sylinder.



Figur 7: Strømningsmønsteret over en sylinder.

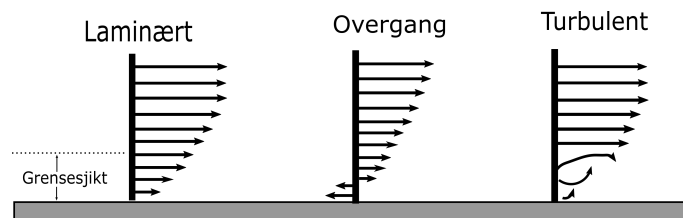
Av figuren ser man at strømlinjene nærmest sylindere blir omdirigert rundt sylindere, for så å samles igjen på den andre siden. Denne situasjonen viser en såkalt ideell strømning, hvor man ikke har friksjon og turbulens. Dette er ikke mulig i virkeligheten, da et fluid alltid vil ha en viss viskositet, som vil skape friksjon. I en virkelig væske vil fluidpartiklene som er i kontakt med det neddykkede legemet, ha samme hastighet som legemet. Er legemet stillestående, vil fluidpartiklene nærmest legemets overflate også være det. Det er heller ingen plutselig økning i fluidhastigheten. I et område helt nært legemet vil det derfor være et tynt lag, et grensesjikt, hvor hastigheten gradvis øker fra null, eller fra legemets hastighet, til en viss verdi som bestemmes av den ytre strømmen og legemets form [12]. Dette kan illustreres som en hastighetsgradient som står vinkelrett på legemets overflate, som vist i Figur 8.



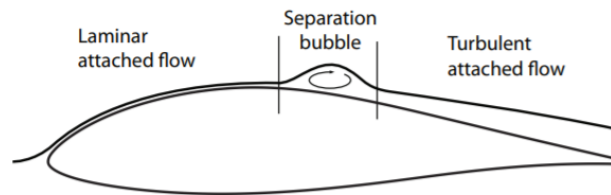
Figur 8: Laminært og turbulent grensesjikt.

Grensesjiktet kan, avhengig av  $Re$ , være enten laminært, turbulent eller i overgangen mellom disse. For et laminært grensesjikt, vil hastigheten øke uniformt når en beveger seg fra objektets overflate og utover. For et høyere  $Re$  vil grensesjiktet være turbulent, og hastigheten er preget av virvlende strømninger innenfor sjiktet. Tykkelsen på grensesjiktet påvirkes også av  $Re$ , og vil bli tynnere med økende verdi. Den ytre strømmen reagerer på kanten av grensesjiktet på samme måte som på den fysiske overflaten av objektet. Dermed vil grensesjiktet gi ethvert objekt en form som er litt ulik den fysiske formen.

Grensesjiktet oppfører seg ulikt ved strømming over objekter med ulike overflater og former. Ved strømming over en foil kan det i overgangen mellom laminær og turbulent strømming forekomme at strømmingen i grensesjiktet separeres fra overflaten for senere å igjen feste seg til overflaten. Dette fenomenet kalles laminære separasjonsbobler. Separasjonen forekommer fordi strømmingen i grensesjiktet har lavere energi enn den ytre strømmingen, og dermed lettere påvirkes av endringer i omgivelsene [13]. Den separerte strømmingen får mer moment fra fristrømmen og fester seg igjen som et turbulent grensesjikt. Dette området mellom separasjonspunktet og hvor strømmingen festes igjen, defineres som en laminær separasjonsboble [14]. I dette området vil man ha en negativ hastighetsgradient, som vist i Figur 9 (a). For lavere Reynoldstall ( $50 \cdot 10^3 < Re < 100 \cdot 10^3$ ) vil strømmingen separeres lengre bak på foilen, som vist i Figur 9 (b), mens ved høyere  $Re$  vil separasjonen opptre lengre mot foilens ledende ende [14]. Separasjonspunktet avhenger også av objektets form og strømningshastigheten.



(a)

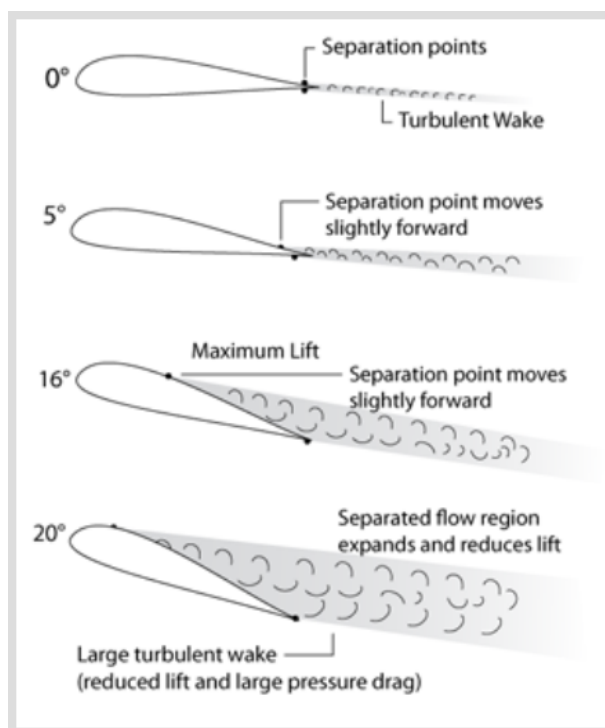


(b) [15]

Figur 9: Dannelse av en laminær separasjonsboble.

Dannelsen av laminære separasjonsbobler er ikke ønskelig da det vil øke motstanden på foilen. Avhengig av foilens form, overflateruhet, angrepsvinkel og  $Re$ , vil det separerte laminære grensesjiktet typisk gå over til en turbulent strømming og vil enten forbli separert eller feste seg igjen langs foilen [16].

Figur 10 viser hvordan strømmingen og separasjonspunktet endres ved økende angrepsvinkel.



Figur 10: Sammenheng mellom separasjonspunkt og angrepsvinkel ved strømning over foil [17].

Som vist i figuren er det ved lave angrepsvinkler lite turbulent avløsning fra foilen, og separasjonspunktet opptrer ved foilens følgende ende. Ved større angrepsvinkler forblir grensesjiktet separert og bredden på vaken øker. Man kan også observere at separasjonspunktet opptrer lenger og lenger fram mot foilens ledende ende ved økende angrepsvinkel.

En vanlig måte å karakterisere turbulensen i en strømning er ved hjelp av turbulensintensiteten som er et mål på hvor mye turbulens som opptrer i en strømning. Ved en laminær strømning vil ikke strømningshastigheten variere over tid. For en turbulent strømning derimot vil hastigheten inkludere en gjennomsnittsverdi og en fluktuerende komponent. Hastigheten ved en turbulent strømning er gitt ved

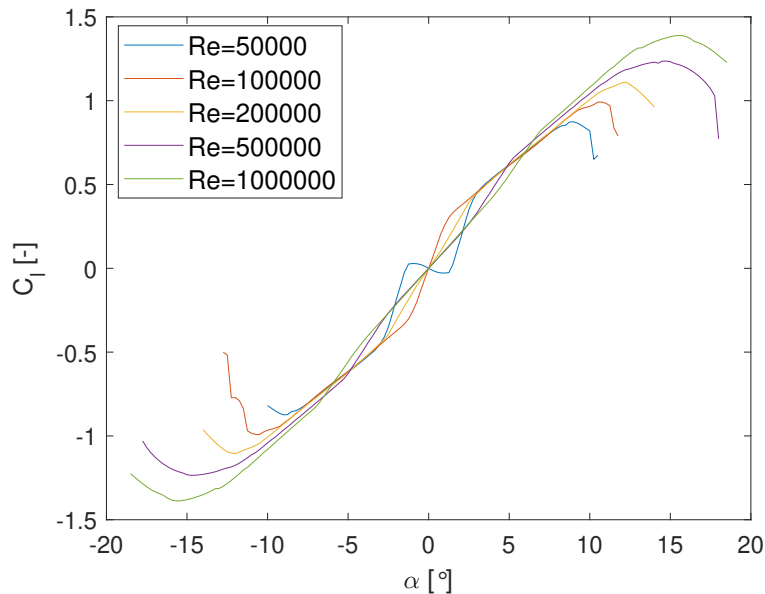
$$v(t) = \bar{v} + v'(t), \quad (3)$$

hvor  $\bar{v}$  er gjennomsnittlig strømningshastighet og  $v'(t)$  er den turbulente fluktuasjonen. De turbulente fluktuasjonene er tilfeldige, derfor benyttes statistiske beregninger for å kvantifisere dem. Turbulensintensiteten er gitt som [18]

$$I = \frac{v_{rms}}{\bar{v}}, \quad (4)$$

hvor  $v_{rms}$  er det kvadratiske gjennomsnittet av strømningshastigheten. Det er vist at turbulensintensiteten har en mer uttalt effekt ved lavere  $Re$  enn ved høyere  $Re$  ved separasjon og igjen-festelse (eng: re-attachment) av grensesjiktet, transisjon og dannelse av laminære separasjonsbobler. Som et resultat varierer  $C_l$ ,  $C_d$  og deres avhengighet av angrepsvinkelen med turbulensintensiteten [19].

Reynoldstallet vil som nevnt ha en effekt på strømmingen over en foil. Figur 11 viser et utvalg  $C_l$ - $\alpha$  kurver for samme foilseksjon ved ulike  $Re$ .

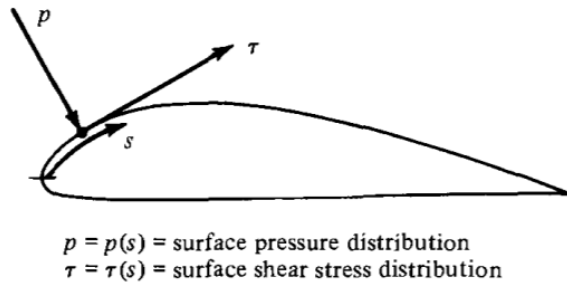


Figur 11:  $C_l$ - $\alpha$  kurve ved ulike Reynoldstall.

Av figuren ser man at kurvene er nokså like i det lineære området, men at det oppstår forskjeller ved større angrepsvinkler hvor steiling opptrer. Angrepsvinkelen hvor maksimal løftkoeffisient oppnås og grafens form i steilingsområdet er også ulik ved forskjellige  $Re$ . Jo høyere Reynoldstall, desto større er  $C_{l_{maks}}$  og i tillegg forskyves punktet denne opptrer ved til større angrepsvinkler. Reynolds tallet er som nevnt et forholdstall mellom treghetskrefter og viskøse krefter. Ved lave  $Re$  dominerer de viskøse kreftene som dannes i grensesjiktet og treghetskreftene kan neglisjeres. Ved større  $Re$  øker treghetskreftene som gir større trykkforskjell mellom foilens over- og underside og dermed genererer høyere løft. Grensesjiktet blir også tynnere ved økende  $Re$  og treghetskreftene utenfor grensesjiktet vil dominere. Dette gir foilen en litt annen form, noe som påvirker løftet.

### 2.1.3 Løft- og dragkraft

Et fluid som strømmer forbi en overflate vil utøve krefter på overflaten. Den totale kraften et objekt neddykket i et fluid påvirkes av, kalles hydrodynamisk kraft. Den hydrodynamiske kraften kommer fra to kilder: trykk- og skjærkraft, som begge virker over hele legemets overflate. Trykket virker lokalt vinkelrett på overflaten og skjærkreftene virker lokalt parallelt til overflaten. Figur 12 viser trykk- og skjærkreftene som virker over foilens overflate, her betegnet ved henholdsvis  $p$  og  $\tau$ .



Figur 12: Illustrasjon av trykk- og skjærkraft over en foil [9].

Netto-hydrodynamisk kraft,  $R$  finnes ved å integrere trykk- og skjærkrefter over hele den eksponerte overflaten. Den vertikale komponenten av  $R$  er løftkraften og vil virke normalt på den innkommende strømmingen, mens den horisontale komponenten som virker parallelt med strømmingen er dragkraft. Løftkraften forekommer i hovedsak grunnet trykkfordelingen over legemets overflate, skjærkreftene har kun en liten effekt på løftet. Generelt sett for en foil som generer løft, vil det gjennomsnittlige trykket som utøves på oversiden være mindre enn det gjennomsnittlige trykket som utøves på undersiden. Dette resulterer i et netto løft på foilen [20]. Trykkforskjellen mellom over- og undersiden skyldes at foilen omdirigerer væskestrømmen nedover.

Løftkraften  $L$ , for en 3D-foil er gitt ved

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 C_L c b, \quad (5)$$

hvor  $c$  er foilens kordelengde gitt i [m] og  $b$  er foilens spennvidde gitt i [m].

Dragkraft er den horisontale komponenten av den hydrodynamiske kraften, og virker i motsatt retning av objektets bevegelsesretning. Det er altså en type motstand, eller friksjon.

Dragkraften  $D$ , for en 3D-foil er gitt ved

$$D = \frac{1}{2}\rho v^2 C_D c b, \quad (6)$$

Dragkraft kan deles inn i form-drag, overflate-drag og induisert drag. Form-drag, også kalt trykkmotstand, er motstand grunnet formen på objektet. Et strømlinjeformet og tynt objekt, som en foil, vil oppleve mindre form-drag enn et objekt med større tverrsnittsareal. Overflate-drag er motstand forårsaket av friksjonen mellom fluidstrømmen og objektets overflate. Overflate-drag er direkte proporsjonal med den våte overflaten av objektet, og øker med kvadratet av hastigheten [21]. Indusert drag er en effekt av løftkraften, og kalles ofte for løft-indusert drag. Indusert drag forekommer når det dannes virvler ved foilens hale som reduserer foilens evne til å generer løftkraft. Den totale 3D-motstanden for en foil er dermed gitt som

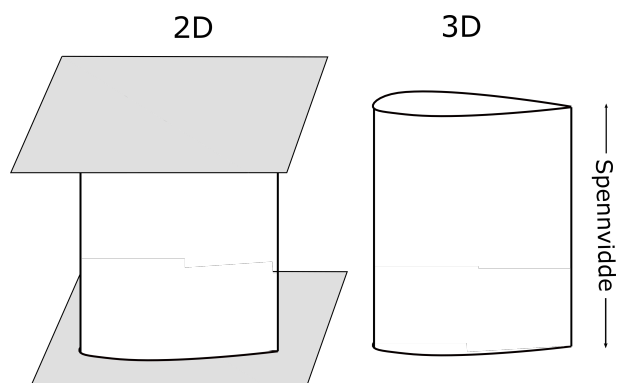
$$C_D = C_{D_i} + C_{D_f} + C_{D_p}, \quad (7)$$

hvor  $C_{D_i}$  er induisert dragkoeffisient,  $C_{D_f}$  er friksjonskoeffisienten og  $C_{D_p}$  er trykkmotstanden.

#### 2.1.4 2D- og 3D-strømning

2D- eller 3D-strømning referer til antall dimensjoner som trengs for å forklare væskepartiklenes bevegelser i en væskestrøm. Ved en 3D-strømning vil altså strømmingen kunne bevege seg i både x-, y-, og z-retning, mens ved en 2D-strømning beveger strømmen seg kun i to retninger. I virkeligheten vil en strømning være 3D, men kan i flere sammenhenger forenkles til en 2D-strømning.

En tredimensjonal foil betegnes ofte som en endelig vinge, altså at den har et endelig vingespenn, som vist i Figur 13. Dette er på grunn av at strømmingen har mulighet til å strømme fra undersiden til oversiden av foilen. En todimensjonal foil betegnes på den andre siden som «uendelig» grunnet at strømmingen her ikke har muligheten til å strømme fra under- til oversiden. Det er selvsagt ikke mulig å fremstille en uendelig vinge, men ved å feste plater i vingens ender kan man unngå strømning fra under- til oversiden og dermed tilnærme en uendelig vinge. Ved slike eksperimenter er det anbefalt at forholdet mellom spennvidde og kordelengde er større eller lik 1.5 [22].



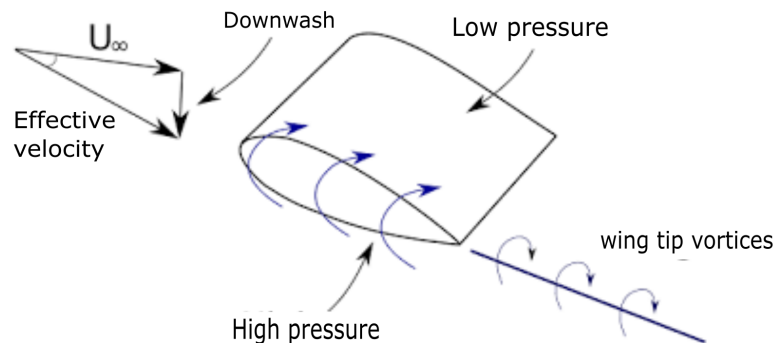
Figur 13: Geometrien av en 2D- og 3D-foil.

Ved beregning av hydrodynamiske krefter for en 2D-foil beregnes krefter for et tverrsnitt av foilen. Løft- og dragkrefter for en 2D-foil er dermed gitt ved

$$\frac{L}{b} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_{l_c} \quad (8)$$

$$\frac{D}{b} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_{d_c} \quad (9)$$

For en løftende foil er trykket større på undersiden enn på oversiden. Nært enden av en 3D-vinge kan fluidet bevege seg fra regioner med høyt trykk til regioner med lavt trykk. Den resulterende strømmingen vil være virvling fra enden (eng: wing tip vortices) som vist i Figur 14 ved de blå sirkulerende pilene.



Figur 14: Dannelse av wing tip vortices [23].

Dannelsen av slike virvler fører til et fenomen som kalles downwash. Den effektive angrepsvinkelen til vingen avtar grunnet downwash, noe som gir en ekstra komponent til den hydrodynamiske kraften som vil virke i motsatt retning av strømmingen langs hele vingen. Denne komponenten kalles induisert drag fordi den virker i drag-retningen og blir induisert av virvlingen. Den lokale strømmingen nært enden av vingen kommer inn med en mindre effektiv angrepsvinkel enn fristrømmen grunnet den induserte strømmingen, noe som fører til en reduksjon i løftekoeffisienten for hele vingen [9].

Denne oppgaven er avgrenset til å undersøke en todimensjonal foil, og det monteres derfor endeplater på hydrofoilen under de eksperimentelle forsøkene for å unngå 3D-effekter som wing tip vortices og dermed induisert drag. Det er forøvrig mulig å fjerne endeplatene, dersom det er ønskelig å analysere 3D-effekter i et eventuelt kommende forsøk.

## 2.2 Numerisk metode

I dette kapittelet vil teori og bakgrunn for numeriske analyser av strømmingen rundt en foil beskrives nærmere.

### 2.2.1 Computational fluid dynamics (CFD)

Høy-hastighets digitale datamaskiner har revolusjonert løsningen av aero- og hydrodynamiske problemer og har gitt opphavet til en helt ny disiplin, kalt numerisk fluiddynamikk [9]. Numerisk fluiddynamikk er en gren innen fluiddynamikken hvor strømmingen rundt legemer simuleres og analyseres, dette kalles computational fluid dynamics (CFD). CFD har gitt oss et tredje verktøy for å løse disse problemene, sammen med ren teori og eksperimentelle metoder. Ved hjelp av CFD kan man i dag løse mange komplekse problemer som ikke tidligere var mulig. Gass- og væskestrømninger kvantifiseres ved hjelp av spesifikke partielle differensiallikninger, Navier-Stokes ligningene, som representerer konserveringslovene for moment. I tillegg løses konserveringslover for masse og i noen tilfeller energi, som det også er vanlig å definere som en del av Navier-Stokes ligningene.

### 2.2.2 Navier-Stokes ligningene

Navier-Stokes ligningene beskriver bevegelsen av viskøse fluider. For en inkompressibel 3D-strømning med konstant viskositet, er ligningene som følger [24]

$$\nabla \vec{u} = 0 \tag{10}$$



$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = \rho f_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (11)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = \rho f_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) \quad (12)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = \rho f_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) \quad (13)$$

Formel 10 kalles kontinuitetsligningen og beskriver konservering av masse ved hvert punkt i strømmingen. Formel 11-13 er basert på Newtons 2. lov og beskriver krefter i henholdsvis x-, y-, og z-retning. Disse ligningen kan forenklet skrives på vektorform

$$\rho\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \rho\vec{f} - \nabla P + \mu\nabla^2\vec{u}, \quad (14)$$

hvor  $u$  er fluidets hastighet gitt i [m/s],  $t$  er tid gitt i [s],  $f$  er ytre krefter gitt i [N],  $\nabla P$  er endring i trykket gitt i [Pa],  $\mu$  er fluidets dynamiske viskositet gitt i [Pa·s].

Navier-Stokes ligningene er anvendelige til både laminære og turbulente gass- og væskestrømmer, og løsningen av ligningene gir hastighets- og trykkfeltet for strømminger av fluider med konstant trykk og viskositet.

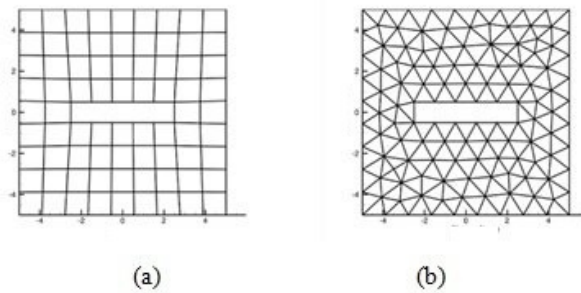
Det kan i noen tilfeller være nødvendig å løse en ekstra ligning, energiligningen. Ligningen inkluderes dersom strømningsproblemet for eksempel involverer varmeoverføring og multifasestrømninger, noe som ikke er tilfelle for analysene som utføres i denne oppgaven. Energiligningen utledes fra termodynamikkens 1. lov som sier at energi ikke kan forsvinne, men bare gå over til andre former. Energiligningen for en inkompressibel strømning med konstant viskositet er gitt ved [25]

$$\rho c_p\left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v}\nabla)T\right] = k\nabla^2 T + \Phi, \quad (15)$$

hvor  $c_p$  er spesifikk varmekapasitet gitt i [J/gK],  $T$  er absolutt temperatur gitt i [K],  $k$  er termisk konduktivitet gitt i [W/Km] og  $\Phi$  er en dissipasjonsfunksjon. Denne funksjonen representerer arbeidet som gjøres mot de viskøse kreftene som irreversibelt omdannes til indre energi.

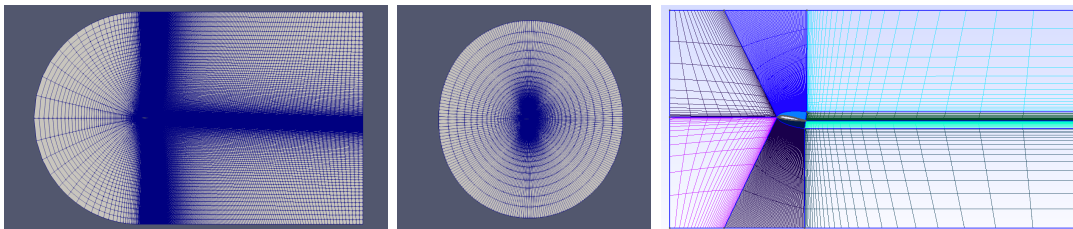
### 2.2.3 Mesh

Før en CFD-simulering deles fluidstrømmen inn i diskrete punkter, og koordinatlinjer gjennom disse punktene genererer et nett. Det er alle disse cellene satt sammen, som i denne sammenheng kalles for en mesh. Det settes opp ligninger for ønskede parametere som beregnes for hver enkelt celle. Det finnes i hovedsak to typer mesh, strukturert og ustrukturert. En strukturert mesh kjennetegnes ved gjentatt regelmessighet av en form i rommet, eller en regulær topologi. Ustrukturert mesh kjennetegnes ved uregelmessig toppunktforbindelse, uten noen underliggende formgjentagelse [26]. Figur 15 illustrerer forskjellen på strukturert (a) og ustrukturert mesh (b).



Figur 15: Strukturert og ustrukturert mesh [27].

Figuren viser her en strukturert kvadrat-mesh og en ustrukturert triangel-mesh. Det finnes for øvrig også ustrukturert kvadrat-mesh og strukturert triangel-mesh. En strukturert variant er ofte mest anvendelig når man ønsker å konstruere en mesh for en enkel geometri. En slik mesh tar opp mindre dataminne, samt krever kortere tidsbruk under simulering. Dersom man har en mer kompleks geometri vil en ustrukturert mesh være et bedre alternativ. En mesh kan i tillegg utformes med forskjellige topologier. Topologien beskriver hvordan de ulike cellene i meshen er sammensatt. Figur 16 viser et utvalg av mesh-topologier som kan brukes under CFD-analyse av for eksempel foiler.



Figur 16: Ulike mesh-topologier.

Figuren viser fra venstre en c-mesh, o-mesh og en rektangulær mesh. Valg av topologi kan

være viktig for å få en god kvalitet på meshen. Det er fordeler og ulemper ved alle topologier, men ved mesh-generering for en foil er c- og o-mesh mest benyttet.

Det er vanskelig å eksakt definere hva som er en «god» mesh, men det er noen indikatorer man kan benytte, disse er beskrevet under.

### Skjevhet (skewness):

Skjevhet inntreffer når det er et avvik mellom lokasjonen av nærliggende cellers sentrum. Det er ulike måter å beregne skjevheten på for de ulike mesh-topologiene. Den ideelle verdien for skjevhet vil være null, og terskelen for skjevhet i OpenFOAM er satt til fire [28].

### Størrelsesforhold (aspect ratio):

Viser til forholdet mellom den lengste og den korteste siden i en celle. Ideelt sett skulle denne vært 1 for å gi best resultater. Størrelsen på celler som ligger ved siden av hverandre bør ikke variere med mer enn 20 %, dette innebærer at maksimal størrelsesforskjell mellom to celler ikke bør være mer enn 1,2 [28].

### Ikke-ortogonalitet (non-orthogonality):

Definert som vinkelen mellom arealvektoren  $S_f$  og sentrum til sentrum-vektoren,  $d$ . Dersom man har ikke-ortogonalitet blir resultatet et avvik mellom  $S_f$  og  $d$ . I OpenFOAM er standardverdien for maksimum ikke-ortogonalitet satt til 70 grader. Figur 17 viser forskjellen på ortogonale (a) og ikke-ortogonale celler (b).



Figur 17: Ortogonale (a) og ikke-ortogonale celler (b) [28].

$y^+$  :

$y^+$  er en ikke-dimensjonal distanse som sier noe om avstanden mellom objektets overflate og første beregningspunkt. Verdien er derfor ofte benyttet til å beskrive hvor grov eller fin en mesh er for et spesifikt strømningsmønster [29].  $y^+$  er gitt ved [15]

$$y^+ = \frac{yu^*}{\mu}, \quad (16)$$

hvor  $y$  er normaldistansen til første celle-sentroid,  $u^*$  er friksjonshastigheten og  $\mu$  er den kinematiske viskositeten.

For foiler bør verdien av  $y^+$  være mindre enn 1 for å være optimal med tanke på strømningsfysikken i grensesjiktet.  $y^+$  kan finnes etter en simulering i OpenFOAM ved å taste følgende i terminalen:

```
simpleFoam -postProcess -func yPlus
```

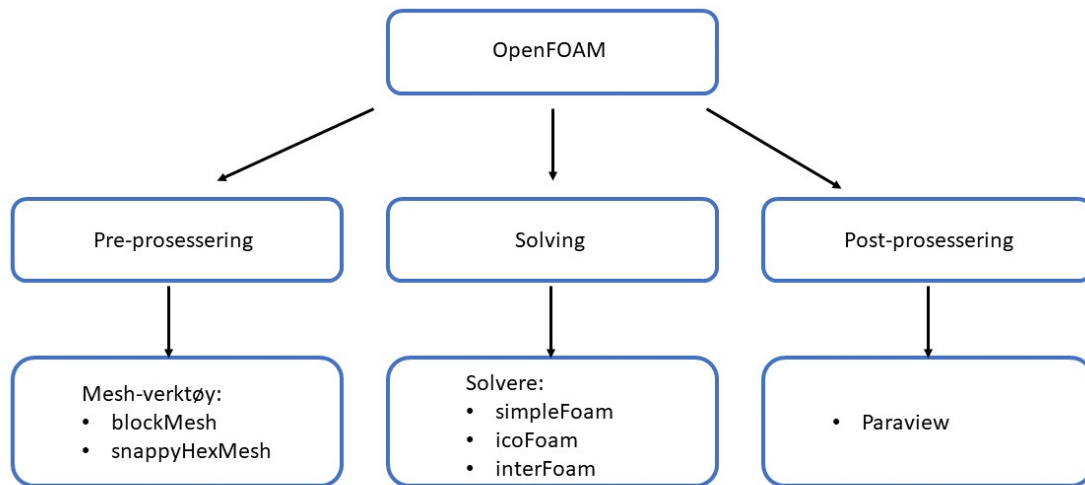
### **Residualer:**

Residualer kan tenkes på som summen av feil for hver av ligningene som løses under en simulering. Dermed er det nyttig å se på residualene etter en simulering for å undersøke om løsningen er fullstendig konvertert. Jo lavere residualene er, desto mer numerisk nøyaktig er løsningen. Ettersom mesh-kvalitet og numerisk nøyaktighet henger sammen, kan residualer også brukes som en indikator på mesh-kvalitet.

I tillegg til disse parameterne kan man for eksempel minke cellestørrelsen eller øke antall celler for å få bedre presisjon, men dette vil igjen føre til at simuleringstidsbruken øker. Man kan også gjøre meshen finere (eng. mesh refinement) ved utvalgte områder av geometrien hvor det kreves større presisjon.

## **2.2.4 OpenFOAM**

OpenFOAM er en open source CFD-programvare utviklet av OpenCFD Ltd og lansert 2004. Senere har selskapet delt seg i to grupper: openfoam.org og openfoam.com. I denne oppgaven benyttes versjonen fra openfoam.org utviklet av «The OpenFOAM Foundation» [30]. Programvaren har en stor brukerbase på tvers av de fleste områder innen ingeniørvitenskapen. OpenFOAM har et omfattende utvalg av funksjoner for å løse simulering knyttet til alt fra komplekse væskestrømmer, turbulens og varmeoverføring, til akustikk, fast mekanikk og elektromagnetikk. I OpenFOAM finnes det flere ulike underprogrammer (solvers) som velges etter hva man ønsker å simulere, samt hvilke forutsetninger som gjelder for den gitte simuleringen. Figur 18 viser en forenklet struktur av programvaren.



Figur 18: Oversikt over programstrukturen av OpenFOAM.

I denne oppgaven benyttes underprogrammet `simpleFoam`, som er en steady-state solver med forutsetninger om en inkompressibel og turbulent strømning.

En del av pre-prosesseringen før en simulering vil være å generere en mesh. Som vist i Figur 18 kan man generere en mesh direkte i OpenFOAM. `BlockMesh` er en av de mest grunnleggende meshgeneratorene i OpenFOAM, og her utvikles meshen basert på en eller flere tredimensjonale klosser. Kantene på disse blokkene kan bestå av linjer, spliner eller buer.

`SnappyHexMesh` er basert på å justere en allerede eksisterende mesh etter en gitt geometri. Vanligvis etterfølges `snappyHexMesh` av en eksisterende `blockMesh`. `SnappyHexMesh` benytter en kartesisk-basert meshtilnærming. I den kartesiske meshmetoden er hele domenet delt i et heksahedralt rutenett som strekker seg gjennom solide vegger i beregningsdomenet. Celler som er inne i strømningsdomenet beholdes, mens celler utenfor forkastes. Celler som krysses av strømningsdomenet blir deretter «snappet» til strømningsdomenets grensegeometri [26].

Post-prosessering kan gjøres direkte i OpenFOAMs integrerte `Paraview`. Her kan man visualisere simuleringobjektet, meshen og ulike resultater. For eksempel kan endringer i hastighet og trykk over tid vises. I tillegg kan man legge til ulike filtre som strømlinjer, konturlinjer og vektorpiler, for å bedre visualisere resultatene.

OpenFOAM bruker finite volume metoden (FVM) for å løse strømningsproblemer. FVM er en numerisk teknikk som transformerer de partielle differensiallikningene som representerer

konserveringslovene over differensielle volumer, til diskrete algebraiske ligninger over endelige volumer eller celler. Denne prosessen kalles diskretisering, her byttes Navier-Stokes ligningene med algebraiske tilnærminger som kan løses ved hjelp av en numerisk metode. Det første steget i løsningsprosessen er å diskretisere det geometriske domenet, som vil være diskretisering til ikke-overlappende elementer eller endelige volumer. De partielle differensialligningene transformeres deretter til algebraiske ligninger ved å integrere dem over hvert diskrete element. Systemet av algebraiske ligninger løses deretter for å beregne verdiene av de avhengige variablene for hvert element [31].

### 2.2.5 Turbulensmodell

For å simulere hvordan turbulensen i en strømning vil utvikle seg, benyttes det turbulensmodeller under CFD-analyser. Det er utviklet flere grupper med turbulensmodeller og de mest benyttede er sannsynligvis Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) modeller. Ved denne metoden dekomponeres strømningsvariabler som hastighet og trykk til en gjennomsnittlig del og en fluktuerende del. Denne dekomponeringen gir altså RANS-ligningene som beskriver gjennomsnittsstrømmen, og fører til at man har flere ekstra spenningsledd sammenlignet med de opprinnelige Navier-Stokes ligningene. Disse ekstra spenningsleddene kalles Reynolds-spenninger og kommer av interaksjonen mellom ulike turbulente fluktuasjoner [32]. For å løse disse ukjente variablene trengs det en turbulensmodell. Det er flere turbulensmodeller å velge mellom for å løse RANS-ligningene.

I denne oppgaven benyttes Spalart-Allmaras modellen som er basert på å løse bare en ekstra transportligning. Spalart-Allmaras følger Boussinesqs hypotese om at disse ukjente spenningsleddene kan relateres til den turbulente virvel-viskositeten (eng: turbulent eddy viscosity) [33]. Under CFD-analyse med Spalart-Allmaras løses det derfor en transportligning for  $\tilde{\nu}$ , som er en tilnærming til den kinematiske virvel-viskositeten. Transportligningen som løses er som følger [34]

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \Delta(U\tilde{\nu}) = c_{b1}\bar{S}\tilde{\nu} + \frac{1}{\sigma}[\Delta(\nu + \tilde{\nu})\Delta\tilde{\nu} + c_{b2}(\Delta\tilde{\nu})^2] - c_{w1}f_w\left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2, \quad (17)$$

hvor  $U$  er fristrøms hastigheten gitt i [m/s],  $c_{b1}$ ,  $c_{b2}$  og  $c_{w1}$  er konstanter,  $\bar{S}$  er en vektor som beskriver skjær-raten,  $\sigma$  er det turbulente Prandtl-nummeret,  $f_w$  er en funksjon som benyttes for å modellere turbulensen i grensesjiktet nært veggen og  $d$  er veggdistansen.

Den kinematiske virvel-viskositeten,  $\nu_t$  kan deretter beregnes på følgende måte

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1}, \quad (18)$$

hvor  $f_{v1}$  er en vegg-funksjon som vil avhenge av legemets form.

Dermed kan den dynamiske virvel-viskositeten,  $\mu_t$  finnes ved følgende sammenheng

$$\mu_t = \nu_t \rho \quad (19)$$

Denne turbulensmodellen er valgt fordi at man i forhold til andre transportmodeller bruker mindre beregningskapasitet, da andre modeller gjerne baseres på to eller flere ekstra ligninger. I tillegg er Spalart-Allmaras en modell som er benyttet bredt og samsvarer godt med eksperimentelle resultater.

Det finnes som nevnt flere andre turbulensmodeller som benyttes for å løse RANS-ligningene. Tabell 1 viser en sammenligning av noen av de mest benyttede turbulensmodellene i denne gruppen.

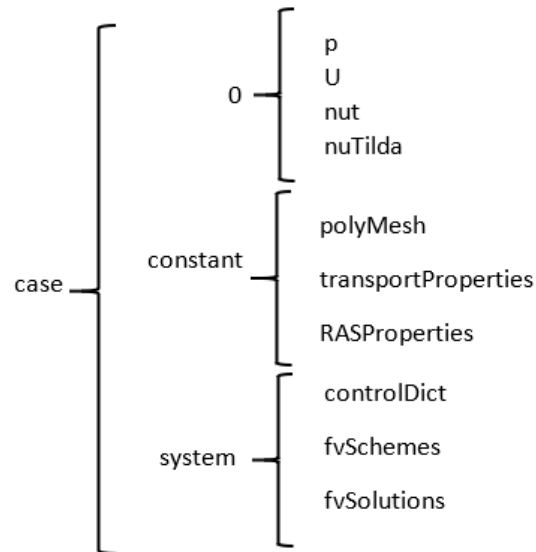
Tabell 1: Sammenligning av ulike RANS turbulensmodeller [35][36][37].

Turbulensmodell	Spalart-Allmaras	$k - \epsilon$	$k - \omega$
<b>Ant. transport-ligninger</b>	1	2	2
<b>Variabler</b>	$\tilde{\nu}$ = tilnærmet kinematisk virvel-viskositet	$k$ = turbulent kinetisk energi $\epsilon$ = spredningsraten til den turbulente kinetiske energien	$k$ = turbulent kinetisk energi $\omega$ = spesifikk spredningsrate til den turbulente kinetiske energien
<b>Løser RANS ved</b>	$\nu_t = \tilde{\nu} f v_1$	$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ , hvor $C_\mu$ er en modellkoeffisient. Defaultverdi satt til 0,09.	$\nu_t = \frac{k}{\omega}$
<b>Passende for</b>	Fullt turbulente strømninger. Strømning over foiler og skipsskrog.	Fullt turbulente strømninger	Lave Re strømninger
<b>Mindre passende for</b>	3D-strømninger. Frie skjærstrømninger	Komplekse strømninger som involverer sterk trykkgradient	Vist å overpredikere tidlig separasjon



## 2.2.6 Filoppsett ved simulering i OpenFOAM

Filoppsettet ved simulering av strømming rundt en foil vil variere avhengig av hvilken solver, turbulensmodell og mesh man ønsker å bruke, men i hovedsak vil filoppsettet når det simuleres ved hjelp av simpleFoam og turbulensmodell Spalart-Allmaras være som vist i Figur 19.



Figur 19: Filoppsett ved simulering.

### 0-mappen:

Denne mappen inneholder informasjonen om hastigheten og trykket, dette skrives inn i henholdsvis U og p-filene. Nut og nuTilda er parametere som trengs for en simulering hvor man bruker Spalart-Allmaras turbulensmodellen [38].

### Constant-mappen:

Inneholder alle verdier som holdes konstante gjennom beregningene. Filene i denne mappen spesifiserer fysiske egenskaper, som transportProperties og turbulensmodellen (RASProperties). Etter at brukeren har generert en type mesh, vil denne mappen også inneholde en undermappe kalt polyMesh som igjen inneholder informasjon om meshen. Dette vil eksempelvis være inndelingen av strømningsdomenet, som finnes i boundary-filen.

### System-mappen:

Inneholder parametere som kan endres etter behov for den gitte simuleringen. Filer som må være til stede er controlDict hvor man velger start/slutt tiden og hvilke parametere som skal lagres til post-prosessering, fvSchemes hvor det blant annet legges inn numeriske systemer for

hvordan en egenskap blir integrert som funksjon av tid, og fvSolutions hvor man eksempelvis velger hvilken solver som skal benyttes til simuleringen. Dersom man skal bruke OpenFOAM til meshgenereringen trengs det i tillegg blockMeshDict og/eller snappyHexMeshDict under system-mappen.

Man kan enkelt lagre dataene for hvert tidssteg ved å legge det til i controlDict-skriptet. Det vil da opprettes mapper som inneholder informasjonen om hver tidsserie i løpet av simuleringen. Disse mappene vil plasseres i simuleringens hovedmappe, som i Figur 19 blir betegnet som «case».

Tabell 2 viser en oversikt over utvalgte innstillinger som er satt før simulering, samt hvor man kan endre de ulike innstillingene.

Tabell 2: Innstillinger ved simulering.

	<b>Innstilling</b>	<b>Plassering</b>
<b>Solver</b>	simpleFoam	controlDict
<b>Strømhastighet</b>	$[0, 21 - 0, 71]$ m/s	U
<b>Reynoldstall</b>	$[6 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5]$	*
<b>Transportmodell</b>	Newtonian	RASproperties
<b>Turbulensmodell</b>	Spalart-Allmaras	RASProperties
<b>nut</b>	$1 \cdot 10^{-6}$	nut
<b>nuTilda</b>	$3 \cdot 10^{-6}$	nuTilda
<b>nu</b>	$1 \cdot 10^{-6}$	transportProperties
<b>rhoInf</b>	1000	controlDict
<b>Aref</b>	1	controlDict

\*Reynoldstallet spesifiseres ikke noen av skriptene benyttet i under arbeidet med denne oppgaven, men kan beregnes som vist i Formel 1.

Eksempler på skriptene som benyttes under numeriske analyser i OpenFOAM vises i Vedlegg C.

### 2.2.7 Xfoil

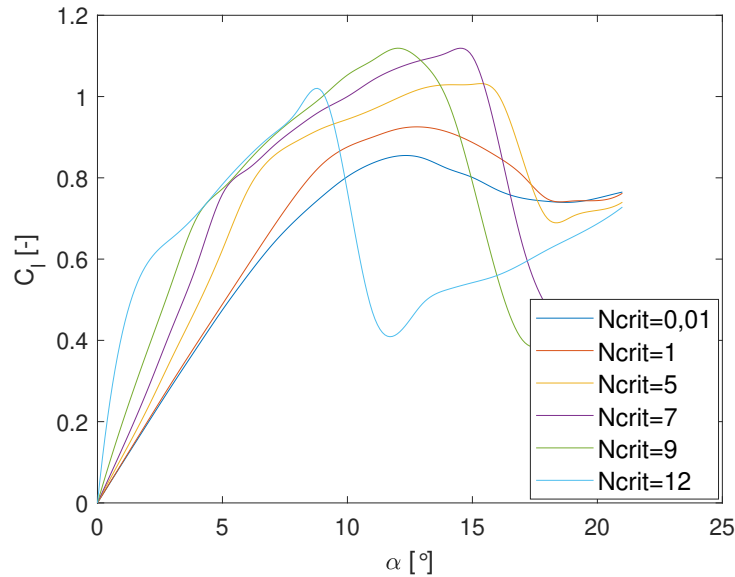
I tillegg til numerisk analyser i OpenFOAM benyttes også Xfoil [39] for å analysere problemstillingen. Xfoil er en CFD-programvare som benytter en panelmetode for å løse strømningsproblemer, og er spesielt designet for å analysere strømming rundt todimensjonale foiler. Panelmetoden brukes til å beregne hastighetsdistribusjonen langs overflaten til foilen. Metoden går ut på at geometrien objektet deles inn i rette individuelle paneler. Matematisk vil hvert panel inducere en hastighet på seg selv og på de resterende panelene. Disse hastighetene kan uttrykkes av relativt enkle ligninger, som bare inneholder geometriske forhold som avstander og vinkler mellom panelene. Alle disse påvirkningene samles i en matrise, og i tillegg defineres en strømmingstilstand på overflaten som må oppfylles av de induerte hastighetene. Denne grensebetingelsen er kravet om at strømmen ikke skal passere gjennom foilen, men flyte tangentielt langs overflaten. Sammen med strømrretningen fra start kan et system med lineære ligninger komponeres og løses for de ulike panelhastighetene [40]. Panelhastighetene representeres som trykkoeffisienter, og løftkoeffisienten beregnes ved å integrere trykkfordelingen over foilens overflate. For å inkludere viskøse effekter trengs også en modell for å beregne grensesjiktet og derunder en transisjonsmodell [39].

Xfoil bruker en tilnærmet  $e^N$ -metode for å beregne transisjonspunktet hvor grensesjiktet går fra å være laminært til turbulent. Ved denne metoden sporer koden bare den mest forsterkede frekvensen på et gitt punkt på foilen nedstrøms fra ustabilitetspunktet for å oppnå amplituden på denne forstyrrelsen. Transisjon antas når denne integrerte amplituden oppnår en empirisk bestemt verdi, den kritiske forsterkningsfaktoren  $N_{crit}$  [41]. Hvilken verdi av  $N_{crit}$  som skal brukes kan beregnes ved hjelp av Ligning 20.

$$N_{crit} = -8,43 - 2,4 \ln\left(\frac{I}{100}\right), \quad (20)$$

hvor  $I$  er % turbulensintensitet.

$N_{crit}$ -verdien forteller noe om hvor enkelt transisjon fra laminær til turbulent strømming i grensesjiktet oppstår, og kan stilles inn av brukeren i Xfoil. Effekten av  $N_{crit}$ -verdi på  $C_l - \alpha$  kurven ved samme Reynolds tall for en type foil illustreres i Figur 20.



Figur 20:  $C_l - \alpha$  kurve for  $Re = 81000$  ved ulike  $N_{crit}$ -verdier.

Av figuren ser man at det er store variasjoner i resultatene ved de ulike  $N_{crit}$ , noe som illustrerer viktigheten av å velge riktig verdi under simulering. Det fremkommer at stigningstallet til kurven i det lineære området øker ved økende  $N_{crit}$ , samt at  $C_{l_{maks}}$  forekommer ved forskjellige angrepsvinkler. I tillegg ser man at  $C_{l_{maks}}$  øker ved større  $N_{crit}$  til en viss verdi, før den igjen avtar ved de største  $N_{crit}$ . Hvordan kurvene endres ved ulike turbulensintensiteter vil avhenge av hvilken foileksjon som undersøkes.

Xfoil-koden er rettet mot analysering av viskøse strømminger rundt foiler, hvor det tillates tvunget eller fri transisjon, laminære separasjonsbobler, samt løft- og dragberegning rett forbi  $C_{l_{maks}}$ . Så lenge grensesjiktet ikke separeres fra foilen oppnås gode resultater i form av løft og drag-prediksjoner ved bruk av Xfoil. Når separasjon som fører til steiling opptrer, er koden mindre pålitelig, noe som er en begrensning ved denne programvaren [42].

Av numeriske analyser forventes det at resultater fra OpenFOAM som baseres på Navier-Stokes ligningene predikerer viskøse effekter i strømmingen bedre ved steiling og dermed  $C_{l_{maks}}$ , enn den forenklede modellen som Xfoil bruker for viskositet. Dersom eksperimentelle resultater viser at det forekommer laminære separasjonsbobler forventes det derimot at Xfoil predikerer kreftene bedre enn OpenFOAM i det lineære området.

### 2.2.8 Construct2D

Construct2D er en mesh-generator designet for å lage 2D-mesher til benyttelse under CFD-analyse av foiler. Den inneholder også et eget visualiseringsverktøy hvor man kan inspisere meshen før den benyttes videre [43]. Den eneste inputen som trengs for å bruke denne er en dat-fil som inneholder x- og y-koordinater som definerer foilens geometri.

Programmet startes ved å taste inn «./construct2D» etterfulgt av navnet på dat-filen i terminalen. Brukeren vil deretter få flere mulige valg som gjelder hvilken type mesh man ønsker å generere, samt endring av ulike parametere etter brukerens ønsker. Construct2D kan generere både c- og o-mesh. Mesh-generatoren vil opprette to nye filer av typen p3d etter meshingen er ferdig. Meshen kan enkelt omgjøres til OpenFOAM-format ved å taste inn «plot3dToFoam filnavn.p3d -2D 1 -singleBlock -noBlank» i terminalen.

### 2.2.9 Mesh-uavhengighetsstudie

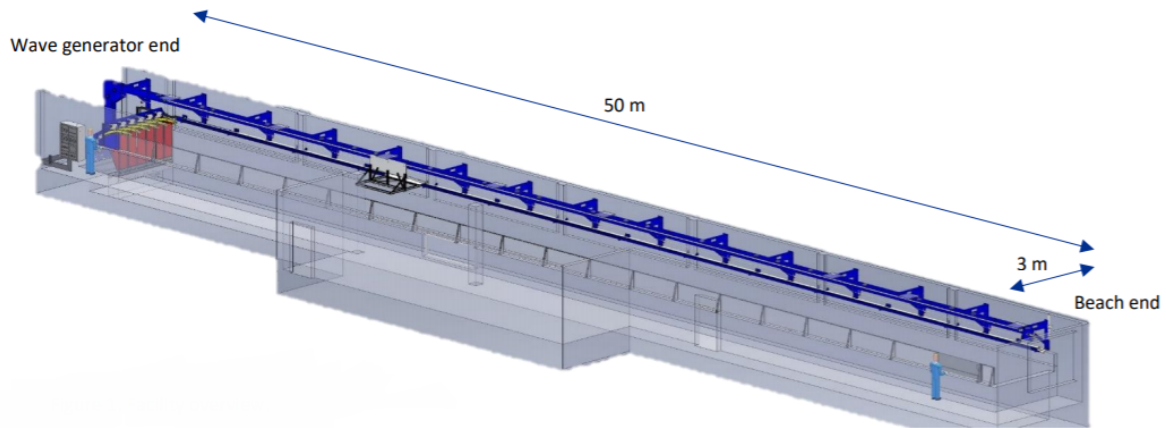
Formålet med en mesh-uavhengighetsstudie er å generere en mesh som nettopp er uavhengig av resultatene. Det vil si at man har generert en mesh med tilstrekkelig kvalitet slik at ytterligere finjusteringer ikke vil gi utslag på resultatene. Eller at endringen i resultater er så liten at den er neglisjerbar. Som oftest fører finjustering også til økt beregningstid, dermed er en del av oppgaven å finne balansen mellom finheten av meshen og fornuftig tidsbruk ved en simulering. For å avgjøre hvilken mesh som skal benyttes under de numeriske forsøkene benyttes resultater i form av løftkoeffisienten som finnes ved simulering med de ulike meshene.

I denne oppgaven benyttes Construct2D til å generere en mesh som benyttes under CFD-simuleringene. Construct2D er valgt på bakgrunn av et tidligere mesh-studie utført i tidligere studie [44], hvor det ble funnet at Construct2D genererte mesh med høyest kvalitet og i tillegg var meget brukervennlig.

## 2.3 Eksperimentell metode

I dette kapitlet vil testoppsettet og testplanen benyttet under den eksperimentelle fremgangsmåten beskrives.

Eksperimentene i denne oppgaven gjennomføres ved Høgskulen på Vestlandets MarinLab. Dette er et hydrodynamisk laboratorium som har en slepetank med ferskvann, og er utstyrt med en bølgemaskin og en slepevogn. Figur 21 viser en illustrasjon av MarinLab.

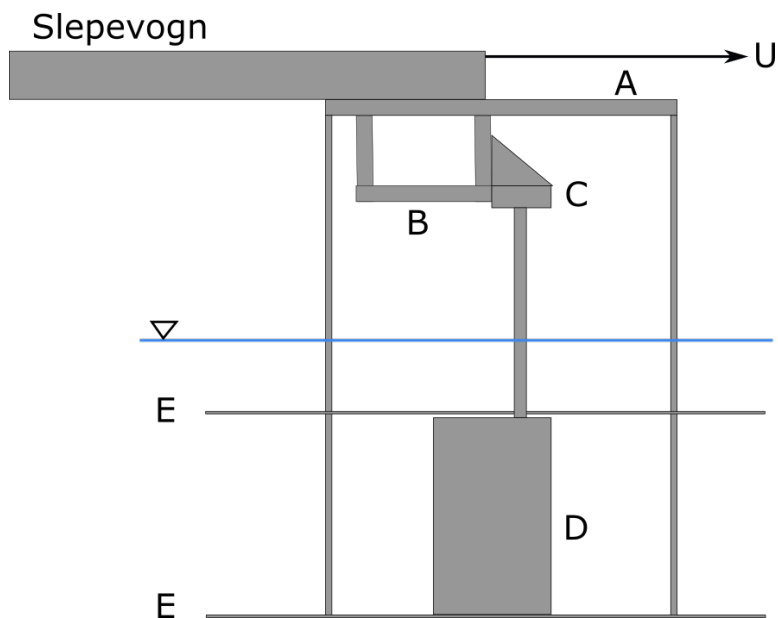


Figur 21: Testseksjonen ved Høgskulen på Vestlandets MarinLab [45].

Hoveddimensjonen av testseksjonen er  $50 \times 3 \times 2,2$  meter. Den ytre testseksjonen er bygget av glass, slik at man kan observere testobjektet under eksperimentene. I denne oppgaven benyttes kun slepevognen under de eksperimentelle testene, denne kan opereres under hastigheter mellom 0 – 5 m/s. Under de eksperimentelle forsøkene festes testoppsettet direkte i slepevognen. Denne vil slepe testobjektet i stille vann langs tanken i en forhåndsinnstilt hastighet.

### 2.3.1 Testoppsett

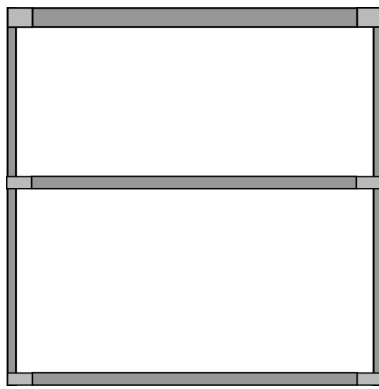
En essensiell del av oppgaven er design og konstruksjon av en rigg for eksperimentell testing av hydrofoiler. I første omgang er testobjektet en NACA0018 hydrofoil, men det skal være mulig å benytte testriggen også for andre foiltyper. Under arbeidet med designet av riggen benyttes 3D-modelleringsprogramvaren Inventor hvor hver del utformes i forkant av fysisk konstruksjon. Figur 22 viser en skisse over den fullstendige testriggen.



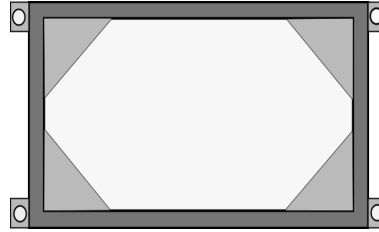
Figur 22: Sammensatt testrigg.

Av figuren ser man testoppsettet bestående av platerigg (A) med to endeplater (E), underheng (B) hvor måleutstyr (C) og testobjekt (D) monteres. Her vises vognens bevegelsesretning ved U og vannoverflaten ved  $\nabla$ .

Testoppsettet består av to hoveddeler, en platerigg og et underheng hvor lastcellen og foilen innfestes. Plateriggen består av tre rammer sammensatt av aluminiumsprofilen Aluflex [46] som er festet sammen med fire vertikale stålrør. Den øverste rammen er laget av Aluflex profil 8 som har dimensjoner  $40 \times 40$  mm, mens de resterende er laget av profil 6 med dimensjoner  $30 \times 30$  mm. Tolv klemmer brukes til å feste stålrørene med diameter 32 mm fast i rammene. Det brukes to typer klemmer med ulik høyde, tilpasset de to Aluflexprofilene. Teknisk spesifisering av klemmene tilpasse profil 6 vises i Vedlegg D.2. Klemmene 3D-printes av et plastmateriale, og det freses også ut aluminiumsplater som settes på utsiden av klemmene for forsterkning. Figur 23 illustrerer plateriggen henholdsvis forfra (a) og ovenfra (b).



(a) Platerigg sett forfra.



(b) Platerigg sett ovenfra.

Figur 23: Illustrasjon av plateriggen.

Av figuren ser man at det i tillegg er montert trekanter i rammenes hjørner for å styrke og stive av riggen. Den øverste rammen monteres direkte i slepevognen i MarinLab. Tabell 3 viser en oversikt over plateriggens hoveddimensjoner.

Tabell 3: Dimensjoner av platerigg.

Høyde	Bredde	Dybde	Dypgang	Vekt
1,35 m	1,01 m	0,750 m	0,799 m	25,9 kg

Som nevnt er oppgaven avgrenset til å utføre numeriske og eksperimentelle analyser av en hydrofoil i en todimensjonal væskestrøm. For å avgrense strømmingen benyttes det to endeplater i aluminium som festes i plateriggens midterste og nederste ramme. Platene plasseres 2 mm fra testobjektet i hver ende. Endeplatene er avrundet i den enden hvor strømmingen innkommer for å minimere påvirkningen på strømmen, og er formet slik at det er plass til klemmene fra plateriggen, slik som vist i Figur 24. Selv om det ikke er en del av oppgaven å optimalisere platelengden utføres det enkle beregninger av grensesjikt på tynn plate å forsøke å minimere 3D-effekter på foilen ved hjelp av platene [24]. Platenes hoveddimensjoner vises i Tabell 4.



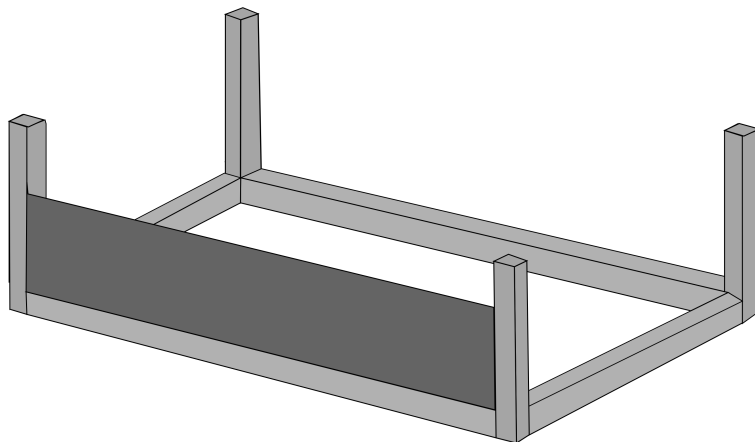


Figur 24: Geometri av endeplater.

Tabell 4: Dimensjoner av endeplater.

Lengde	Bredde	Tykkelse	Vekt
1,48 m	0,750 m	2,50 mm	6,98 kg

Underhenget er også delvis konstruert av aluminiumsprofiler i Aluflex. Det er satt sammen i en mindre ramme med høydestenger som festes i plateriggen. En aluminiumsplate er festet til den ene langsiden som vist i Figur 25. Aluminiumsplatene fungerer som innfestningspunkt for måleutstyret, og vil i tillegg bidra til å avstive underhenget.

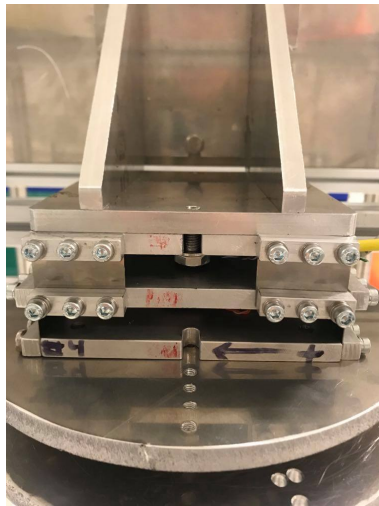


Figur 25: Illustrasjon av underheng med innfestningsplate for måleutstyr.

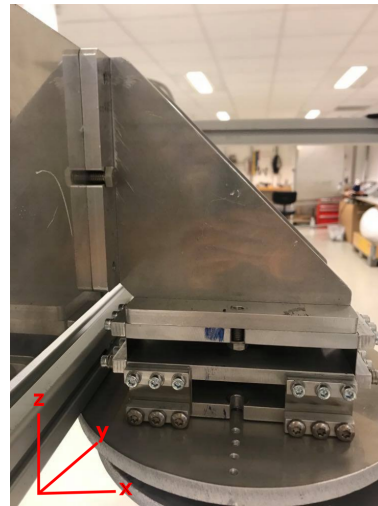
Tabell 5: Dimensjoner av underheng.

Høyde	Bredde	Dybde	Vekt
0,195 m	0,260 m	0,540 m	7,94 kg

For å måle foilens hydrodynamiske ytelse i form av løft- og dragkrefter benyttes to lastceller som kan måle krefter i x- og y-retning. Lastcellene virker slik at de konverterer krefter til et elektrisk signal som videresendes til en datamaskin hvor signalet igjen kan omgjøres til ønsket enhet. Maksimal belastning per lastcelle er 10 kg og det maksimale signalutslaget ved en last på 10 kg er 1 mV/V. Lastcellene skrues fast i en vinkeladapter som igjen festes til platen i underhenget som vist i Figur 22 ved bokstav C. Ferdigstilt lastcelleoppsett vises i Figur 26.



(a) Lastceller sett fra strømretning.



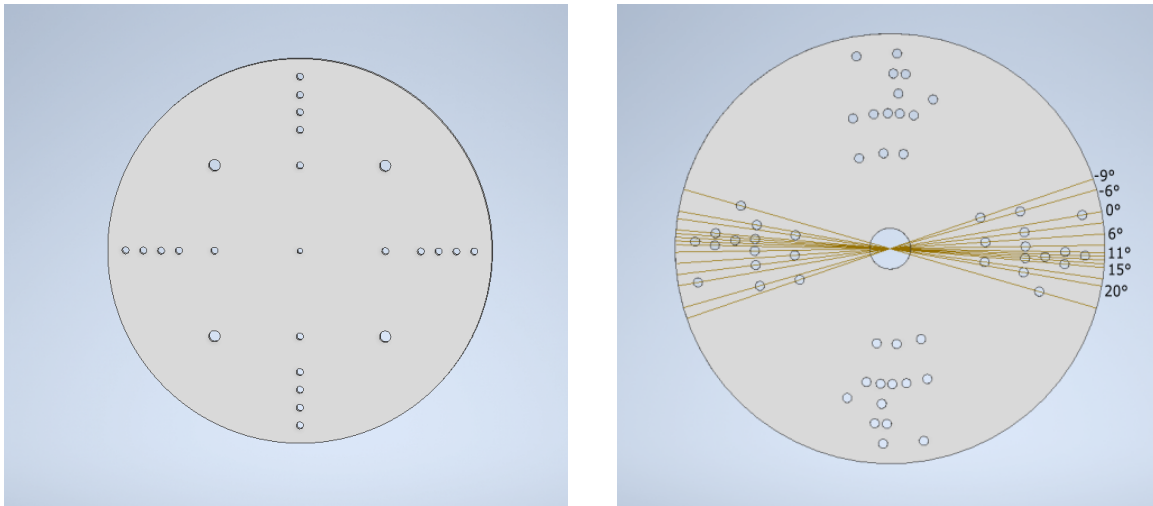
(b) Lastceller sett vinkelrett på strømretning.

Figur 26: Ferdigstilt lastcelleoppsett.

I figuren ser man de to lastcellene som er adskilt med en plate og festet i vinkeladapteren. Ved dette oppsettet og foilen plassert horisontalt virker løftkreftene i y-retning og dragkreftene virker i x-retning. Lastcellene kobles til et innfestningspunkt i slepevognen slik at signalet kan hentes ut og visualiseres ved hjelp av et LabVIEW-skript. Ved hjelp av LabVIEW utføres det kontinuerlig prøvetaking av kreftene under forsøkene som lagres i en tekstfil hvor løft- og dragkreftene over prøvetakingstiden skrives. Et MATLAB-skript benyttes til å behandle tekstfilen videre for å beregne løft- og dragkoeffisientene, skriptet vises i Vedlegg B.1. Det utføres en kalibrering av lastcellene før forsøkene, slik at funnet bias og forsterkning kan inkluderes i Labview-skriptet for å få kompensere for dette. Resultatene fra kalibreringen vises i Vedlegg A.1. Av re-kalibrering etter utførte forsøk kan det konkluderes med at kalibreringen utført i forkant er gyldig, se Vedlegg A.2. For å undersøke lastcellenes usikkerhet utføres det 5 forsøk med samme angrepsvinkel og hastighet. Resultatet fra forsøkene vises i Vedlegg A.3.

Ettersom det er behov for å endre angrepsvinkelen under forsøkene er det designet et toppfeste

for å muliggjøre dette. Toppfestet består av to sirkulære plater i aluminium, en overdel som fastmonteres i platen under den nederste lastcellen, og en underdel som kan roteres etter ønsket vinkel. Figur 27 viser over- og underdelen av toppfestet.



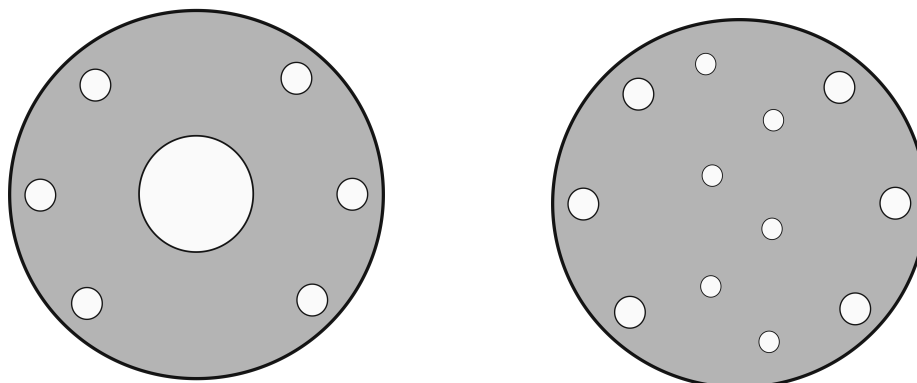
(a) Toppfeste overdel.

(b) Toppfeste underdel.

Figur 27: Toppfeste av foil til lastcelle.

Stripene som vises i Figur (b) risses inn i platen for å indikere de ulike vinklene. Hullmønsteret i underdelen er designet slik at det for hver vinkel alltid vil være fire skruehull som passer perfekt til den fastmonterte overdelen. Festet har en diameter på 270 mm og hver del har en tykkelse på 10 mm. Teknisk spesifikasjon av toppfestets underdel vises i Vedlegg D.1

Testobjektet sammenføres med toppfestet via et stålrør som festes til en dobbel aluminiumsflens, som vist i Figur 28.



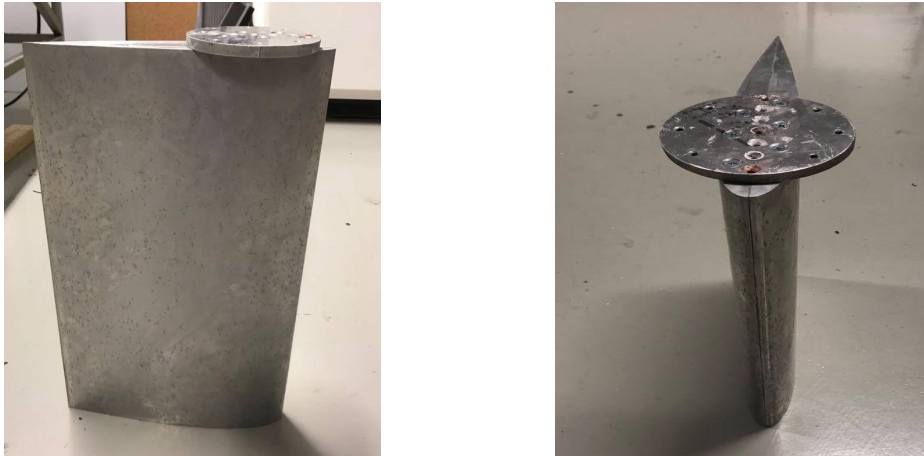
(a) Foilfeste overdel.

(b) Foilfeste underdel.

Figur 28: Illustrasjon av foilfestet.

Flensens overdel sveises fast til stålrøret, mens underdelen skrues fast i testobjektet ved hjelp av fem M6 skruer. De to flensene kan deretter skrues sammen med seks M8 skruer. Foilfestet har diameter 134 mm og tykkelse 10 mm.

Testobjektet for de eksperimentelle testene som utføres i dette prosjektet er en NACA0018 foil. Dette er en seksjon fra NACAs 4-sifrede serie, hvor hvert siffer forteller noe om foilens egenskaper. De to første sifrene beskriver foilens krumming, da dette er en symmetrisk foil har den ingen krumming, dermed er de to første sifrene null. De to siste sifrene beskriver foilens tykkelse som prosent av kordelengden. Det vil si at denne foilen har en maksimal tykkelse på 18% av kordelengden. Foilen freses ut i to deler av aluminium og limes deretter sammen. De to delene holdes også sammen ved hjelp av underdelen av foilfestet, hvor skruene er plassert slik at de ikke treffer midten av foilen. Figur 29 viser det ferdigstilte testobjektet med foilfeste.



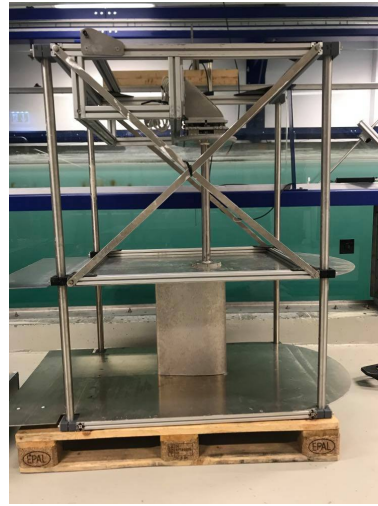
Figur 29: Ferdigstilt testobjekt med montert foilfeste.

Under testing plasseres foilen horisontalt, med endeplater 2 mm fra hver endeflate, som vist i Figur 22. Foilen har en spennvidde på 500 mm, en kordelengde på 320 mm og har dermed en maksimal tykkelse på 57,6 mm.

Den ferdigstilte testriggeren før montering i slepetanken vises i Figur 30. Den endelige 3D-modellen av testriggeren fremvises i Vedlegg D.3.



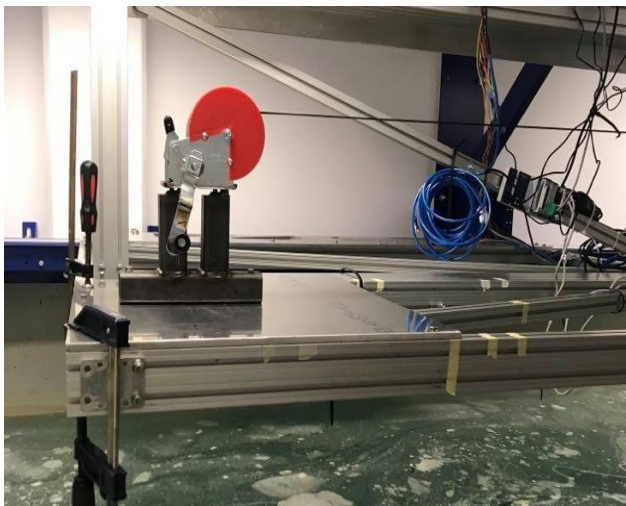
(a) Testrigg sett fra strømretningen.



(b) Testrigg sett vinkelrett på strømretningen.

Figur 30: Ferdigstilt testrigg med testobjekt NACA0018.

For å enkelt komme til i området hvor riggen er nedsenket for å eksempelvis bytte foilseksjon er det designet en mulighet til å rotere riggen ut av vannet. Riggens eneste fastmonterte festepunkt til vognen er i et horisontalt stag av Aluflex med små avrundede plater i hver ende. Under testing vil det i tillegg monteres flere tvinger for å sikre at riggen holdes på plass og festepunktet er satt i riggens tyngdepunkt slik at fjerning av tvingene kan gjøres på en trygg måte. Ved hjelp av en vinsj festet i en plate på vognens bakre overflate kan hele riggen vippes opp til 90 grader ut av vannet som vist i Figur 31.



(a) Vinsj motert på slepevognen.



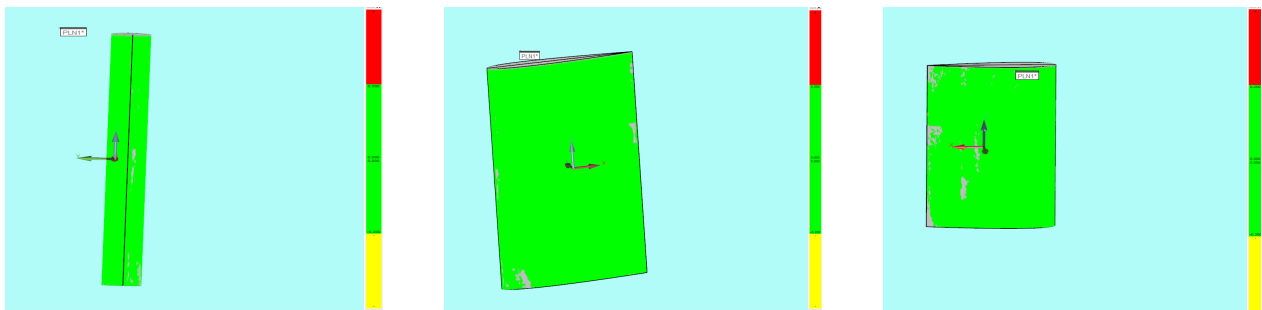
(b) Testrigg rotert over vannflaten.

Figur 31: Rotert testrigg festet til slepevognen.

Muligheten for rotering er svært nyttig dersom det for eksempel skal utføres forsøk med foiler som har ulik spennvidde. Da kan den midterste rammen på denne måten enkelt flyttes til ønsket punkt, og endeplatene kan også fjernes dersom 3D-effekter skal undersøkes.

### 2.3.2 Undersøkelse av testobjektets geometri

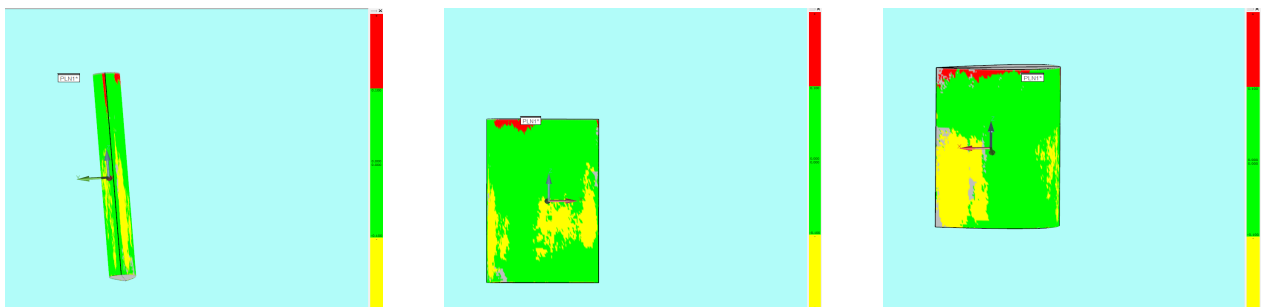
Det utføres en 3D-scan ved hjelp av programvaren PC-DMIS [47] av testobjektets overflate for å undersøke om geometrien avviker fra den opprinnelige 3D-modellen. NACA0018 er en symmetrisk foil, dermed vil avvik som forekommer under maskineringen av testobjektet kunne føre til at foilen ikke er helt symmetrisk. Resultater fra overflatescanningen med en terskel satt til 0,2 mm vises i Figur 32.



Figur 32: Overflatescan med punkter innenfor 0,2 mm.

I figuren ser man at hele den scannede overflaten er grønn, noe som betyr at det ikke forekommer noen områder hvor geometrien til testobjektet avviker mer enn 0,2 mm sammenlignet med 3D-modellen.

Resultater fra 3D-scan med en terskeverdi satt til 0,1 mm vises i Figur 33.



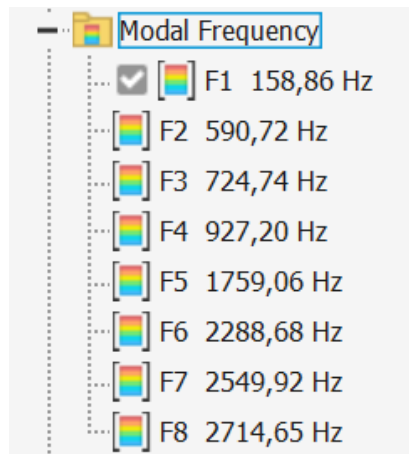
Figur 33: Overflatescan med punkter innenfor 0,1 mm.

Av figuren ser man at det her en noen gule og noen røde områder. Røde områder betyr at avviket er over maksimumsverdien satt av brukeren, mens gult betyr at avviket er under

minimumsverdien. De røde og gule områdene viser til at geometrien her avviker mer enn 0,1 mm. Fortsatt er det mest grønne områder på overflaten, som tilsvarer at størsteparten av overflaten avviker mindre enn 0,1 mm. Det kan konkluderes av undersøkelsen at hele den scannede overflaten avviker mindre enn 0,2 mm fra den opprinnelige modellen, noe som er et svært godt resultat. Dermed vil testobjektets geometri være en svært liten feilkilde under de eksperimentelle forsøkene.

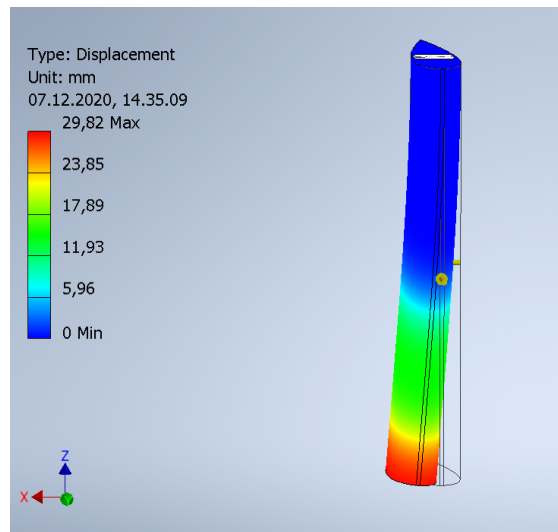
### 2.3.3 Undersøkelse av naturlig frekvens

Naturlig frekvens eller egenfrekvens er den/de frekvensene som et system eller et objekt svinger med når det har fått en svingebevegelse og overlates til seg selv [48]. Det er viktig å undersøke testobjektets naturlige frekvens da man ønsker å unngå resonans. Resonans kan oppstå dersom systemet påvirkes av en kraft med samme frekvens som egenfrekvensen, og fører til større svingninger og i værste fall ødeleggelser. Ved hjelp av programvaren Inventor utføres det en egenfrekvensanalyse av testobjektet. Figur 34 viser en oversikt over egenfrekvensene som finnes av analysen.



Figur 34: Oversikt over egenfrekvenser for testobjekt.

Av figuren ser man at alle egenfrekvensene som ble funnet er relativt høye. Under testing er det derfor lite sannsynlig at testobjektet vil nå noen av sine egenfrekvenser. For å illustrere påvirkningen av at foilen svinger i sin egenfrekvens vises det i Figur 35 et eksempel på forflytningen som oppstår ved den laveste egenfrekvensen.



Figur 35: Testobjektets forflytning ved frekvens på 158,86 Hz.

Av figuren fremkommer det at maksimal forflytning ved en frekvens på 158,86 Hz vil være 29.82 mm. Foilen er fastspent i toppen, og man ser at forflytningen øker med avstanden fra festepunktet. Det er selvsagt ikke ønskelig med en slik forflytning under forsøkene da det vil påvirke resultatene. Mellomrommet mellom foil og endeplater er kun 2 mm, dermed vil en slik forflytning også føre til at testobjektet vil være i kontakt med endeplatene.

I tillegg til frekvensanalyse er programvaren benyttet til FEM-analyser for dimensjonering av ulike deler under designprosessen.

### 2.3.4 Testplan

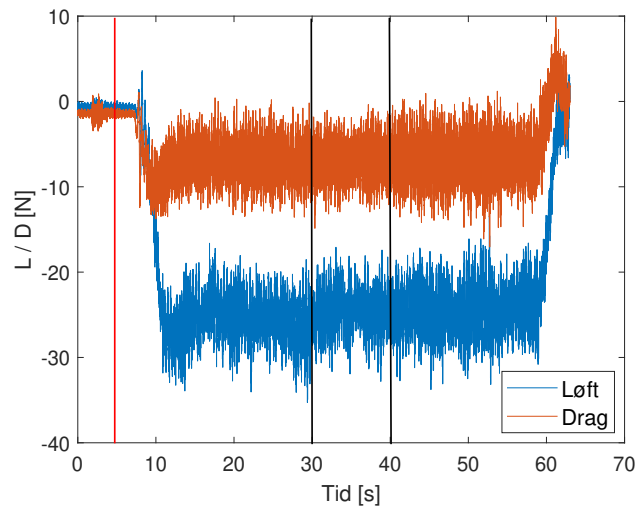
De eksperimentelle testene utføres ved at oppsettet som forklart under seksjon 2.3.1 festes i slepevognen, slik at hydrofoilen står vertikalt under vannflaten. Slepevognen innstilles deretter til en viss hastighet slik at ønsket Reynolds tall oppnås. Slepevognen styres av programvaren Carriage Control, hvor man kan stille inn hastighet og hvor langt man ønsker å slepe testobjektet. Det utføres forsøk med  $Re$  mellom  $6 \cdot 10^4$  og  $2 \cdot 10^5$  hvor foilen er stilt inn i ulike angrepsvinkler. Utførelsen av forsøkene følger oppsettet som vises i Tabell 6. Her oppgis hastighetene med to desimaler ettersom usikkerheten i innsilt slepehastighet er  $\pm 0,01$  m/s.



Tabell 6: Testplan ved en gitt angrepsvinkel.

Reynolds tall [-]	Strømningshastighet [m/s]	Løftkoeffisient [-]	Dragkoeffisient [-]
60000	0,21		
81000	0,29		
100000	0,36		
140000	0,50		
163000	0,58		
200000	0,71		

Det utføres som vist av tabellen tester ved seks ulike Reynolds tall, og dermed ulike hastigheter. Testplanen utføres på denne måten med testobjektet innstilt i forskjellige angrepsvinkler. Løft- og dragkoeffisienten målt av lastcellene finnes ved å prosessere testdata fra LabVIEW. MATLAB-skriptet som benyttet til prosessering av de eksperimentelle dataene vises i Vedlegg B.1. Et eksempel på rådata fra et forsøk, visualisert vha. MATLAB vises i Figur 36.



Figur 36: Eksempel på rådata fra forsøk ved  $Re=163000$  og  $\alpha = 15^\circ$ .

Løft- og dragkraften for et gitt forsøk beregnes ved å midle over de midterste målingene, som i figuren vises mellom de sorte vertikale linjene. Da det tas 2000 målinger i sekundet tilsvarer dette området 20000 målinger. Opptaket av målingene startes noen sekunder før vognen settes i bevegelse slik at det kan korrigeres for signalstøy. Dette gjøres ved å midle over målingene i det første fem sekundene, i figuren illustrert som verdiene til venstre for den røde linjen.

De numeriske simuleringene utføres etter samme plan og løft- og dragkoeffisienten hentes fra resultatene ved hver simulering. Angrepsvinklene det testes ved varierer noe for de valgte Reynoldstallene, men vil være mellom 0 og 20 grader. Dette er grunnet at steilingsområdet og maksimal løftkoeffisient opptrer ved forskjellige angrepsvinkler for de ulike  $Re$ , som illustrert i Figur 11. I disse områdene behøves det også flere forsøk ved tettere angrepsvinkler for å forsikre at  $C_l$ - $\alpha$ -kurven blir så nøyaktig som mulig. Testresultatene føres i MATLAB hvor det visualiseres i form av kurver, slik at det enkelt kan sammenlignes med de numeriske analysene samt eksperimentelle valideringsdata.

Det vil i tillegg testes for to negative angrepsvinkler, -6 og -9 grader. Dette er for å undersøke om foilen er helt symmetrisk, noe som også undersøkes ved 3D-scanning av geometrien. I tillegg kan det undersøkes om selve testriggeren påvirker slik at resultatene blir usymmetriske. Siden NACA0018 i utgangspunktet er en symmetrisk foil, vil foilen i teorien skape samme løft- og drakraft ved tilsvarende positive og negative angrepsvinkler.

## 2.4 Feilkilder

Det er en rekke ulike feilkilder som kan påvirke resultatene som fremkomme i denne oppgaven. I den numeriske metoden med CFD-analyse kan det oppstå små feil i et eller flere av skriptene som benyttes. I tillegg kan det være feil eller «bugs» i selve programvaren. Når det gjelder den praktiske delen hvor testriggeren konstrueres er følgende feilkilder mulige:

- Menneskelig feil ved avlesning fra måleutstyr
- Unøyaktighet fra maskiner benyttet til fremstilling av deler til testoppsettet
- Testobjektets symmetri
- Overflateruhet på testobjektet
- Bias i innstilt nullvinkel under sammenføring av foilfeste og toppfeste som det ikke er korrigert for. Estimert til  $+1.5^\circ$ , se Seksjon 3.3.1

Under eksperimentell testing med tilgjengelig modell og nevnt måleutstyr forventes følgende feilkilder:

- Lastcellenes usikkerhet i løft- og dragkoeffisienten funnet ved repeterte målinger, se Vedlegg A.3. Lastcelle i drag-retning:  $\pm 0,01$  [-] og lastcelle i løft-retning:  $\pm 0,03$  [-]

- Signalstøy
- Turbulens i vannet, antar helt stillestående vann før forsøk
- Usikkerhet om det oppstår 3D-effekter under forsøk slik at strømmingen over foilen ikke er helt 2D
- Usikkerhet i innstilt slepehastighet:  $\pm 0,01$  m/s
- Vibrasjoner i slepevognen
- Effekter av tankvegg i testseksjonen
- Usikkerhet i posisjonering av riggen mellom hver gang den roteres over vannflaten

Andre feilkilder som også kan være til stede, men hvor bidraget antas neglisjerbart er: Endringer i vanntemperatur og dermed tetthet, samt endring av vinkel etter første innstilte nullvinkel.

### 3 Resultater

I dette kapitlet vil resultater fra arbeidet med prosjektet presenteres. I første del vises resultater fra mesh-uavhengighetsstudiet, deretter vil de numeriske resultatene presenteres i form av kurver som viser løft- og dragkoeffisientene fra de ulike CFD-analysene. Avslutningsvis fremvises resultater fra eksperimentelle forsøk i MarinLab utført i henhold til testplanen, samt resultater fra forsøk med trigget separasjonspunkt i testobjektets fremkant.

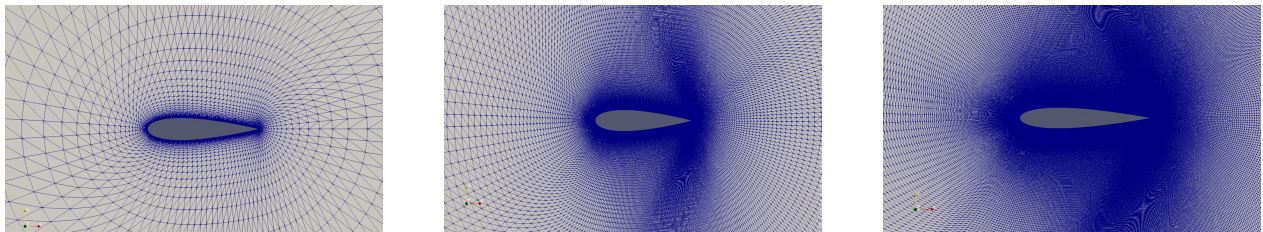
#### 3.1 Mesh-uavhengighetsstudie

Ved hjelp av Construct2D er det generert en strukturert o-mesh. Det benyttes en Naca0018 foil, med en angrepsvinkel på  $3^\circ$  og en strømningshastighet på 0,5 m/s i mesh-studiet. Etter at det er funnet en mesh hvor ønsket kvalitet er oppnådd, finjusteres denne i to omganger ved å øke antall celler. Dette ble utført direkte i Construct2D ved å øke antall punkter på foilens overflate i x- og y-retning.

Ved hjelp av simpleFoam utføres det simulering av strømmingen rundt foilen for hver mesh for å undersøke om resultatene i form av løftkoeffisienten er uavhengig av meshen. Forskjellen i celleantall, samt hvilke innstillinger som er satt for henholdsvis grov, medium og fin mesh er vist i Tabell 7. Figur 37 illustrerer forskjellen i celleantall. Innstillingene som vises for grov mesh er grunninnstillingene i Construct2D.

Tabell 7: Innstillinger og resulterende celleantall for de ulike meshene.

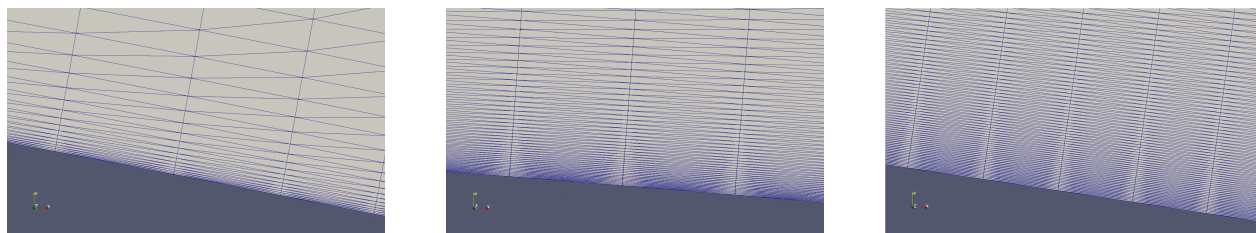
Mesh	Grov	Medium	Fin
Ant. Celler	4851	79401	239001
Ant. Punkt i x-retning	250	400	600
Ant. punkt i y-retning	100	200	400
Mesh-radius	15	50	50
Trailing edge spacing	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Leading edge spacing	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$



Figur 37: Geometri av grov, medium og fin mesh.

Av figuren ser man tydelig økningen i celleantall. I tillegg viser de mørke områdene for medium og fin mesh den jevne økningen i cellestørrelse fra foilen og utover i strømningsdomenet.

Et forstørret bilde av meshene fra Figur 37 nærmest foilens overflate kan sees i Figur 38.



Figur 38: Lagoppbygging av mesh ved objektets overflate.

Her vises det en forskjell i hvordan lagene er satt sammen. Jo høyere oppløsning i meshen, desto tettere legges lagene, både i x- og y-retning.

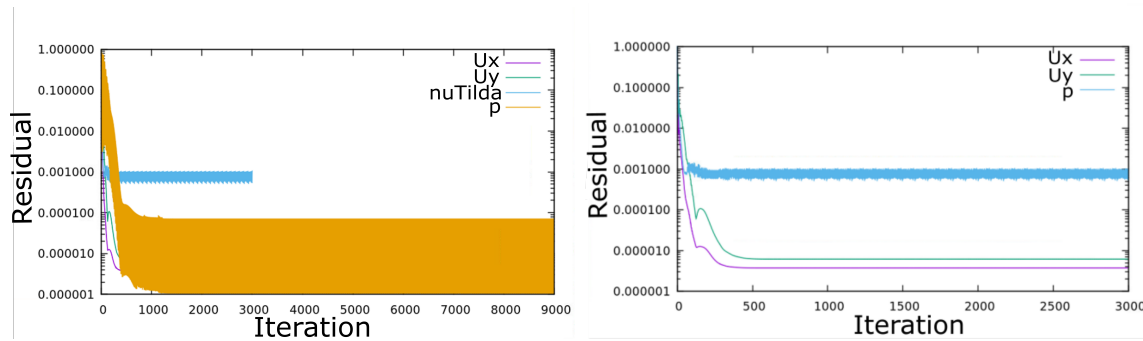
I tillegg til å visuelt inspisere meshene er kommandoen `checkMesh` benyttet for å undersøke kvalitetsparameterne som forklart i avsnitt 2.2.3. Tabell 8 viser en oversikt av kvalitetsparameterne fra `checkMesh` hentet fra OpenFOAM.

Tabell 8: Mesh-kvalitet.

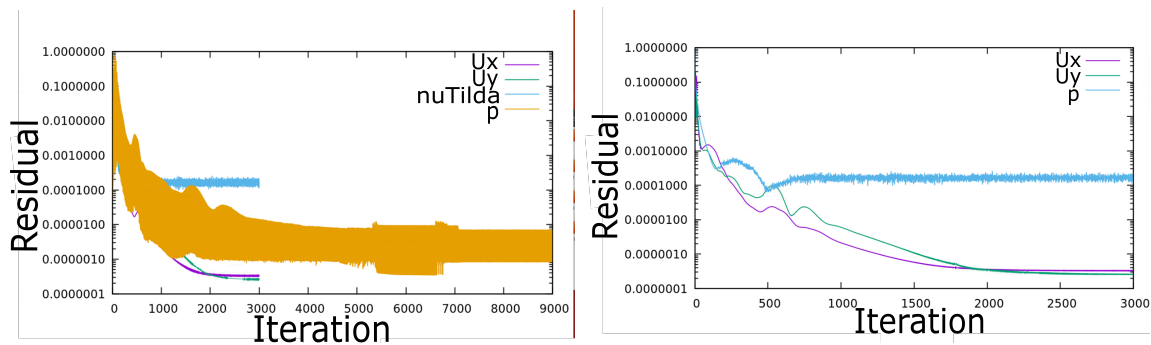
	Størrelsesforhold	Gjennomsnittlig skjevhet	Gjennomsnittlig ikke-ortogonalitet	$y^+$
Grov	121	0,830	6,31	1,72
Medium	67,3	0,150	5,52	0,810
Fin	36,5	0,140	6,19	0,790

Som vist i tabellen blir størrelsesforholdet betraktelig bedre med økende celleantall. Dette var som forventet da det vil være en jevnere økning i cellestørrelsen med et større antall celler. Den gjennomsnittlige skjevheten ble også forbedret med økende finhet på meshen, og en skjevhet på 0,14 er godt innenfor terskelverdien i OpenFOAM som er satt til fire. Den gjennomsnittlige ikke-ortogonaliteten avtar noe ved medium finhet, men øker igjen ved den fineste meshen. Det observeres likevel en forbedring fra den grovste meshen til den fineste, og ikke-ortogonaliteten er innenfor terskelverdien i OpenFOAM og godkjennes ved `checkMesh`. Det er som tidligere nevnt ønskelig med en  $y^+$ -verdi under 1 for foiler, dermed er verdien noe høy ved den grovste meshen. For både medium og fin mesh er verdien innenfor ønsket og forventet område, noe som også gjenspeiles i Figur 38 hvor man ser en tettere lagoppbygging.

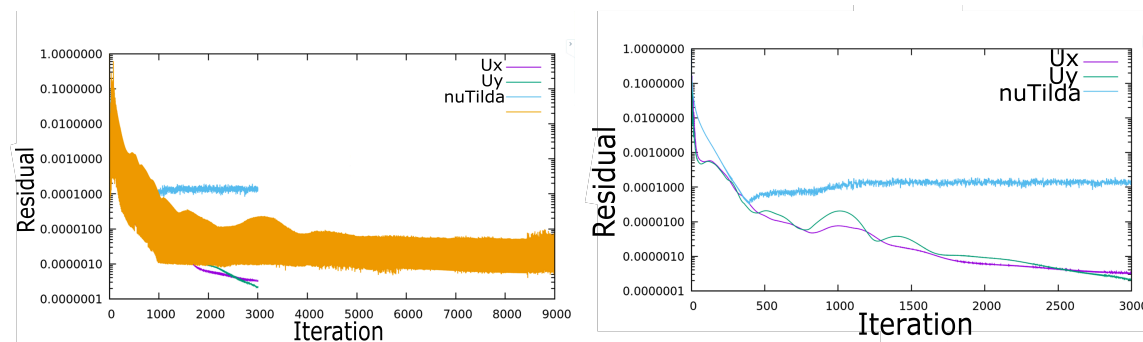
I mesh-studiet utføres simuleringene i 30 iterasjoner hvor hver iterasjon har et tidssteg på 100. Ved større  $\alpha$  må antall iterasjoner ofte økes for å sikre en konvergent løsning. Residualkurver for de tre meshene vises i Figur 39, 40 og 41. Da residualen for trykket ( $p$ ) er noe ustabil, er det vanskelig å visualisere de resterende residualene. Derfor vises kurvene to ganger, med og uten trykk-residualen.



Figur 39: Residualer for grov mesh.



Figur 40: Residualer for medium mesh.

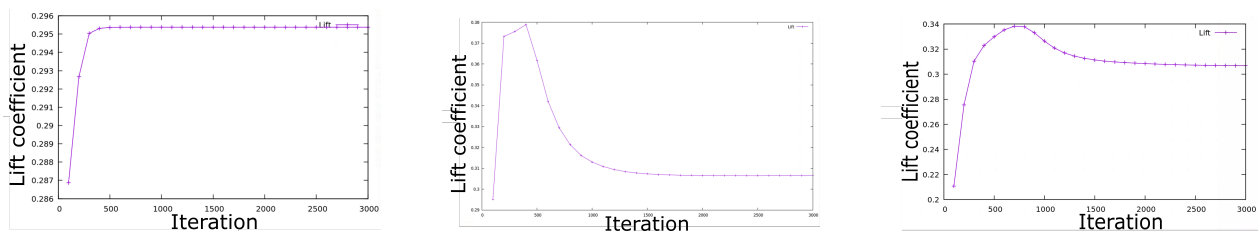


Figur 41: Residualer for fin mesh.

Av figurene observeres det at residualen for trykket er ustabil, men at gjennomsnittsverdien likevel konvergerer relativt bra ved alle mesher. I tillegg kan man se at stabiliteten øker med

økende oppløsning i meshen. I figurene på høyre side vises residualen for nuTilda og hastighe-  
 ten i x- og y-retning. Her fremkommer det at feilmarginen for hastigheten er under en verdi  
 på  $1 \cdot 10^{-5}$  ved alle simuleringene, noe som tilsier at løsningen er meget godt konver-  
 gert. Når det gjelder nuTilda som er den tilnærmede kinematiske virvel-viskositeten  $\tilde{\nu}$ , viser figurene  
 en feilmargin på 0,001 for den grove meshen og forbedres med økende oppløsning i meshen  
 til 0,0001 for den fineste, som også tilsier en konvertert løsning.

Løftkoeffisienten beregnes også for hvert tidssteg. Figur 42 viser løftkoeffisienten beregnet  
 ved de ulike tidsstegene for grov, medium og fin mesh. Her er iterasjon langs x-aksen og  
 løftkoeffisienten langs y-aksen.



Figur 42: Løftkoeffisient som funksjon av iterasjon for grov, medium og fin mesh.

Av figuren ser man at løftkoeffisienten øker relativt lineært med tiden frem til grafen flater  
 ut og etter hvert stabiliseres ved en viss løftkoeffisient. Tabell 9 viser endelig løftkoeffisient  
 etter 10 iterasjoner for de tre simuleringene.

Tabell 9: Løftkoeffisient for de ulike simuleringene.

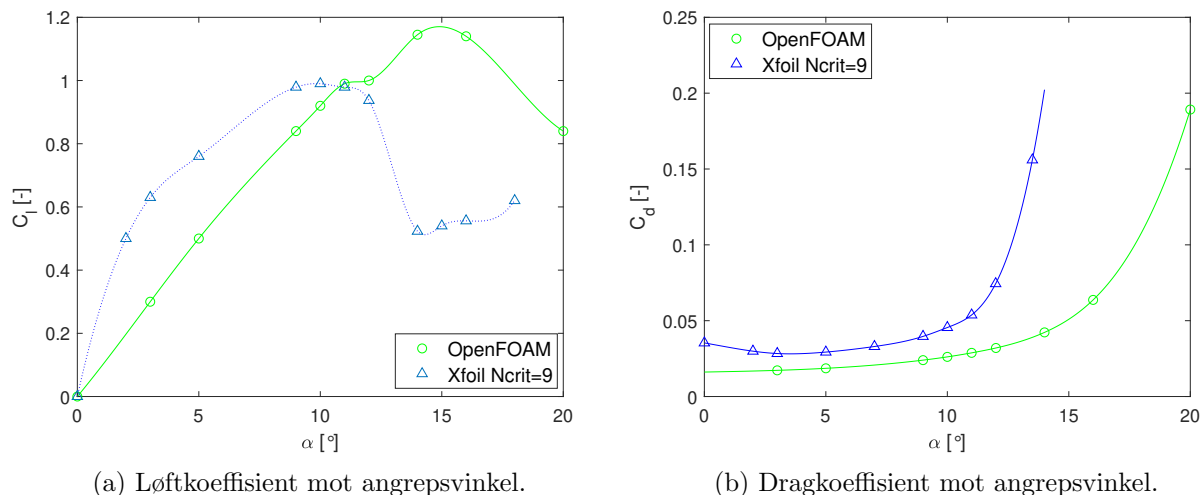
	Løftkoeffisient [-]
<b>Grov</b>	0,295
<b>Medium</b>	0,306
<b>Fin</b>	0,303

Tabellen viser at det ikke er store forskjeller mellom løftkoeffisienten for de ulike simuleringene.  
 Det observeres en økning på omtrent 2,6% fra grov til fin mesh, noe som er en større  
 endring enn ønskelig. Fra medium til fin mesh observeres den kun en endring på 1%, noe  
 som er tilstrekkelig lite til å kunne konkludere med at resultatene er uavhengig av meshen.  
 Grunnet økt beregningstid med økende celleantall og på bakgrunn av den neglisjerbare end-  
 ringen i resultatene fra medium til fin mesh besluttet det å benytte den mellomste meshen  
 ved videre numeriske forsøk utført i arbeidet med denne oppgaven.

## 3.2 Numeriske resultater

I dette kapittelet presenteres numeriske resultater fra CFD-analyser i OpenFOAM og Xfoil. Analysene er utført i henhold til testplanen vist i Tabell 6 ved forskjellige angrepsvinkler for ulike Reynolds tall. Resultatene vil i de tilfelle det foreligger valideringsdata sammenlignes med eksperimentelle data fra en studie utført av NACA fra 1937 [4]. I denne studien er det utført vindtunelltester av flere seksjoner fra NACA, deriblant NACA0018. Da det ikke er referert til hvilken turbulensintensitet som opptrådte i vindtunellen benyttet under NACA-studiet er det utført forsøk i Xfoil ved å undersøke dataene opp mot ulike  $N_{crit}$  verdier. Disse forsøkene viser at turbulensintensiteten i studien sannsynligvis hadde en verdi på 3%, noe som tilsvarer en  $N_{crit}$  på 0,01 som følge av Formel 20. Dermed vil det videre i oppgaven benyttes en  $N_{crit}$  på 0,01 for å sammenligne med resultatene fra denne studien. Ved de eksperimentelle testene utført i forbindelse med dette prosjektet vil en turbulensintensitet på 0,07% antas. Dette er grunnet at testene utføres i stillestående vann og turbulensen dermed vil være betraktelig mindre enn ved tester i en vindtunell. En  $N_{crit}$  verdi på 9 vil derfor brukes i Xfoil for å sammenligne med forsøk utført i MarinLab.

Resultatene for løft- og dragkoeffisient ved Reynolds tall på 60000 vises i Figur 43 .

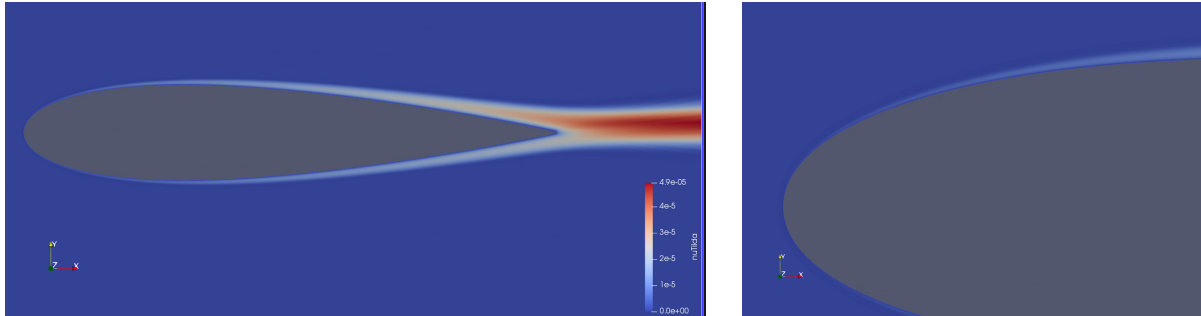


Figur 43: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=60000$ .

Det foreligger ikke eksperimentelle resultater fra NACA-studien ved  $Re=60000$ , dermed vises kun resultater fra OpenFOAM og Xfoil. Resultatene viser at simuleringene i OpenFOAM predikerer høyere løft enn Xfoil etter det lineære området og samtidig lavere drag. I tillegg forekommer  $C_{l_{maks}}$  ved en høyere  $\alpha$ , samt når en høyere verdi ved OpenFOAM i forhold til



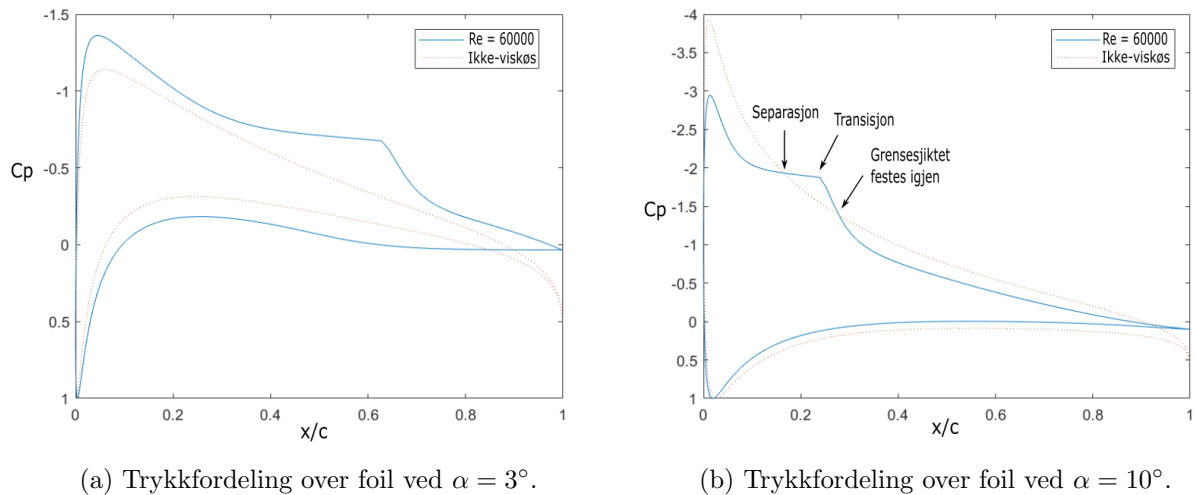
Xfoil. Figurene viser at det ved lavt  $Re$  er relativt stor spredning i resultatene fra OpenFOAM og Xfoil ved  $N_{crit}=9$ . Det observeres økt løft i det lineære området for resultatene fra Xfoil slik at stigningstallet til kurven ikke er lineært i dette området. Dette kan ha sammenheng med at turbulensmodellen benyttet i OpenFOAM antar et fullt turbulent grensesjikt, og dermed ikke tar hensyn til transisjon. Dette illustreres i figuren under som viser resultater fra en simulering i OpenFOAM ved  $Re=60000$  og en angrepsvinkel på  $3^\circ$ .



Figur 44: Grensesjiktet langs overflaten ved  $Re=60000$  og  $\alpha = 3^\circ$ .

Figuren visualiserer grensesjiktet langs foilens overflate, og man kan se at grensesjiktet er turbulent allerede fra foilens ledende ende noe som sannsynligvis ikke vil være tilfelle i virkeligheten ved  $Re$  i dette området. Når det antas turbulens fra start, vil det følgelig ikke tas hensyn til transisjon da strømmingen aldri er laminær. Dermed vil ikke Spalart-Allmaras simulere laminære transisjonsbobler, som nettopp fører til økt dragkraft og her en økning i løftet, og det kan være en naturlig forklaring på hvorfor man ser avvik mellom resultatene fra OpenFOAM og Xfoil med  $N_{crit}=9$  etter det lineære området.

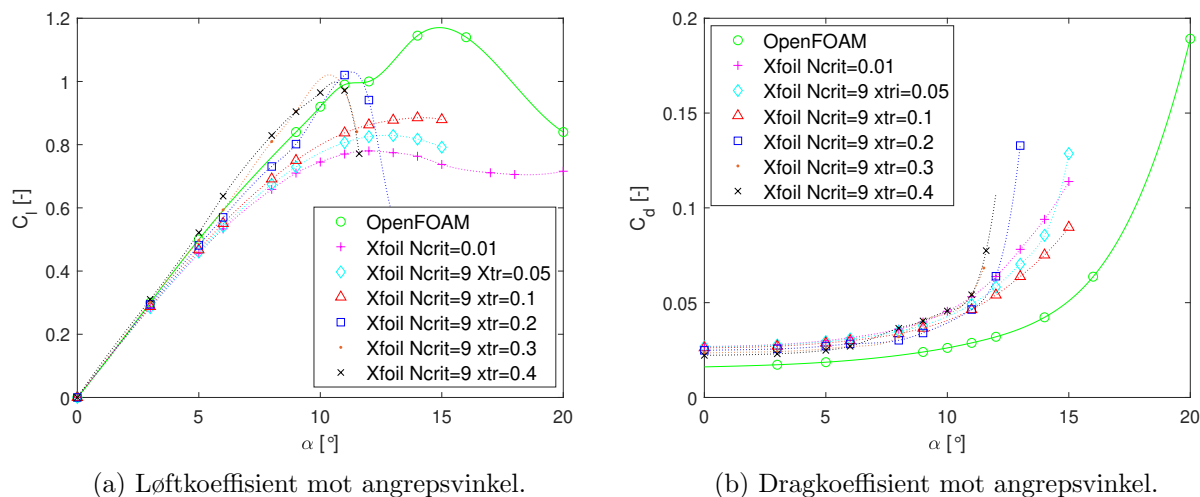
Koden i Xfoil tar derimot hensyn til transisjon og fanger opp laminære transisjonsbobler. Dette illustreres i Figur 45, som viser trykkfordelingen over foilen ved  $Re=60000$  hentet fra Xfoil.



Figur 45: Trykkfordeling over foil ved  $Re=60000$ .

Figuren viser trykkfordelingen over foilens over- og underside, samt forskjellen mellom en viskøs og ikke-viskøs løsning. Ved den ikke-viskøse løsningen tas det ikke hensyn til skjærkrefte mellom lagene i grensesjiktet, det tas utgangspunkt i et fluid med neglisjerbar viskositet. Dette er ikke tilfelle ved strømning over en foil, da sjiktet nærmest overflaten, det viskøse grensesjiktet må tas hensyn til, og man dermed må benytte en viskøs løsning. I figuren representerer x-aksen prosent av kordelengden og y-aksen trykkoeffisienten  $C_p$ . For å bedre visualisere resultatene er y-aksen invertert, slik at den øverste linjen viser foilens overside og den nedeste viser undersiden. Grafen viser som forventet at trykket er større på undersiden enn oversiden av foilen. Ved å sammenligne den viskøse og ikke-viskøse løsningen kan man tydelig observere separasjonspunktet, og hvor grensesjiktet festes til overflaten igjen. Det er dette området som defineres som en laminær separasjonsboble. Punktet hvor transisjon fra laminær til turbulent grensesjikt oppstår kan også observeres hvor man har en tydelig trykkøkning, som man ser ved begge angrepsvinkler i figuren. I tillegg ser man at området hvor separasjonsboblen opptrer endres for ulike angrepsvinkler, boblen vil opptre lenger mot foilens ledende ende ved økende angrepsvinkler.

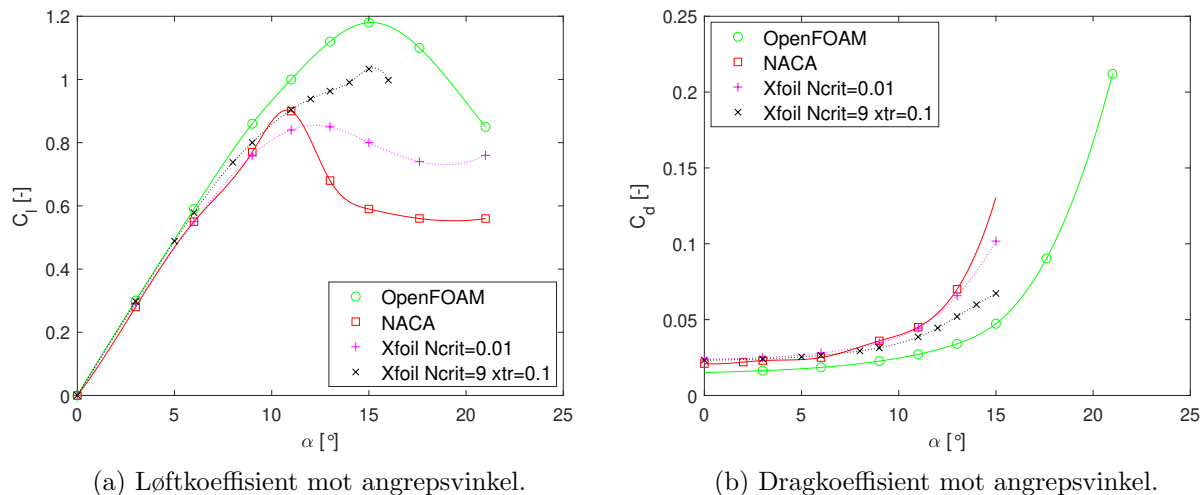
For å undersøke om ulineariteten før steilingsområdet skyldes laminære separasjonsbobler utføres det analyser i Xfoil med trigget turbulens ved ulike punkter langs foilens overflate. På den måten vil det være enklere å sammenligne resultatene med OpenFOAM som antar turbulent grensesjikt. Resultatene fra analyser utført med trigget turbulens for  $Re = 60000$  vises i Figur 46. Punktet hvor det trigges til turbulent grensesjikt oppgis i figuren som  $x_{tr}$ , hvor sifrene som etterfølger tilsvarer triggpunktet som prosent av kordelengden.



Figur 46: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=60000$ .

Av Figur 46 a) ser man at resultatene fra Xfoil med trigget turbulens ved 20, 30 og 40% av kordelengden sammenfaller betydelig bedre med OpenFOAM i det lineære området enn observert i Figur 43. Også ved triggpunkt nært fremkanten er vises god linearitet før steilingsområdet. Det kan dermed konkluderes med at laminære separasjonsbobler sannsynligvis er grunnen til det økte løftet i det lineære området når det ikke trigges til turbulens for  $N_{crit}=9$ . Ved for eksempel  $x_{tr}=0,4$  vil grensesjiktet være laminært over en relativt stor del av foilen. På grunn av at turbulensmodellen i OpenFOAM antar turbulens fra start vil resultater fra Xfoil med  $x_{tr}=0,1$  brukes til sammenligning av resultater videre i rapporten. Dersom det trigges til turbulens ved 5 eller 10% av kordelengden kan man av figuren se at resultatene samsvarer bedre med kurven for  $N_{crit}=0,01$  som tilsvarende en høyere turbulens i fristrømmen. Angrepsvinkelen  $C_{l_{maks}}$  forekommer ved samsvarer bedre mellom OpenFOAM og trigget turbulens nært den ledende enden av foilen. Det observeres også at verdien av  $C_{l_{maks}}$  totalt sett predikeres lavere for Xfoil enn for OpenFOAM. Det antas at  $C_{l_{maks}}$  predikeres bedre av Navier-Stokes og applikert turbulensmodell i OpenFOAM enn Xfoil, grunnet bedre viskøs modellering i steilingsområdet.

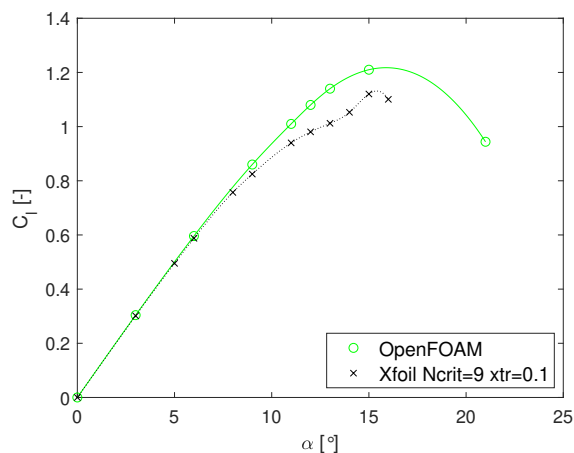
Resultater fra analyser ved  $Re = 81000$  vises i Figur 47.



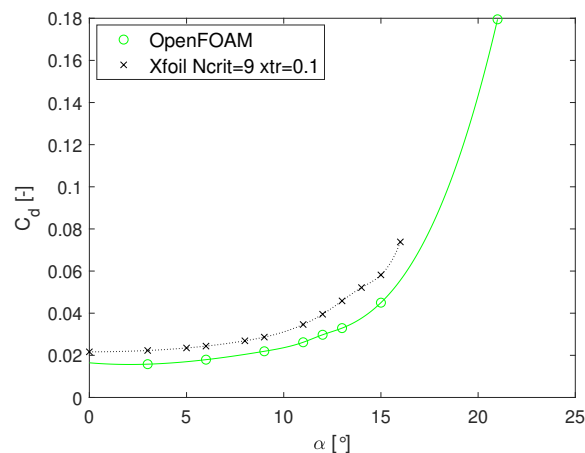
Figur 47: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=81000$ .

Av Figur 47 a) ser man at resultater fra OpenFOAM og Xfoil med  $N_{crit}=9$  følger samme linje i det lineære området, men det oppstår forskjeller i steilingsområdet. OpenFOAM oppnår en høyere  $C_{l_{maks}}$  samt at denne oppnås ved en høyere  $\alpha$ . Data fra NACA og Xfoil ved  $N_{crit}=0,01$  viser relativt god overensstemmelse, både for løft- og dragkoeffisienten. Dette indikerer at den antatte turbulensintensitet fra NACA-studien stemmer. Da resultatene fra NACA-studien og CFD-analysene er utført ved ulike turbulensintensiteter kan de ikke direkte sammenlignes. Likevel er det som forventet at analysene utført ved høyere  $N_{crit}$  og dermed en lavere turbulens i strømmingen oppnår høyere løftkoeffisienter og at  $C_{l_{maks}}$  opptrer ved en større angrepsvinkel. Ved  $N_{crit}=0,01$  er turbulensen i strømmingen relativt høy, og det er sannsynligvis ikke er laminære separasjonsbobler til stede. Dermed er det også naturlig at resultatene fra Xfoil med  $N_{crit}=0,01$  også stemmer bra med OpenFOAM i det lineære området.

Resultater fra CFD-analyser ved Reynolds tall på 100000 og 140000 vises i Figur 48 og Figur 49.

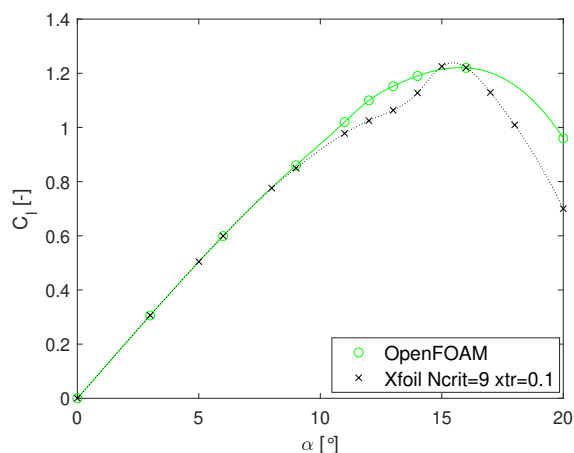


(a) Løftkoeffisient mot angrepsvinkel.

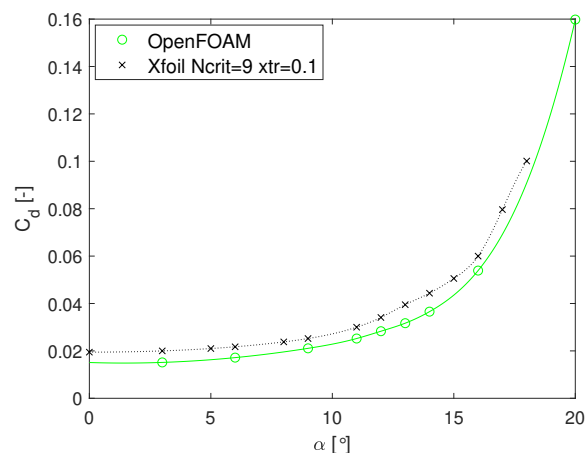


(b) Dragkoeffisient mot angrepsvinkel.

Figur 48: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=100000$ .



(a) Løftkoeffisient mot angrepsvinkel.



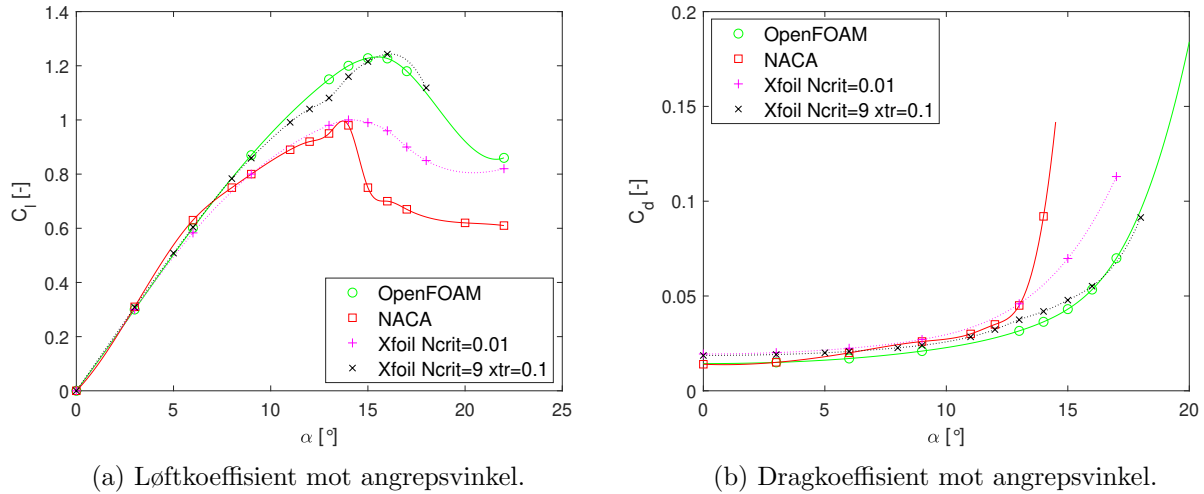
(b) Dragkoeffisient mot angrepsvinkel.

Figur 49: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=140000$ .

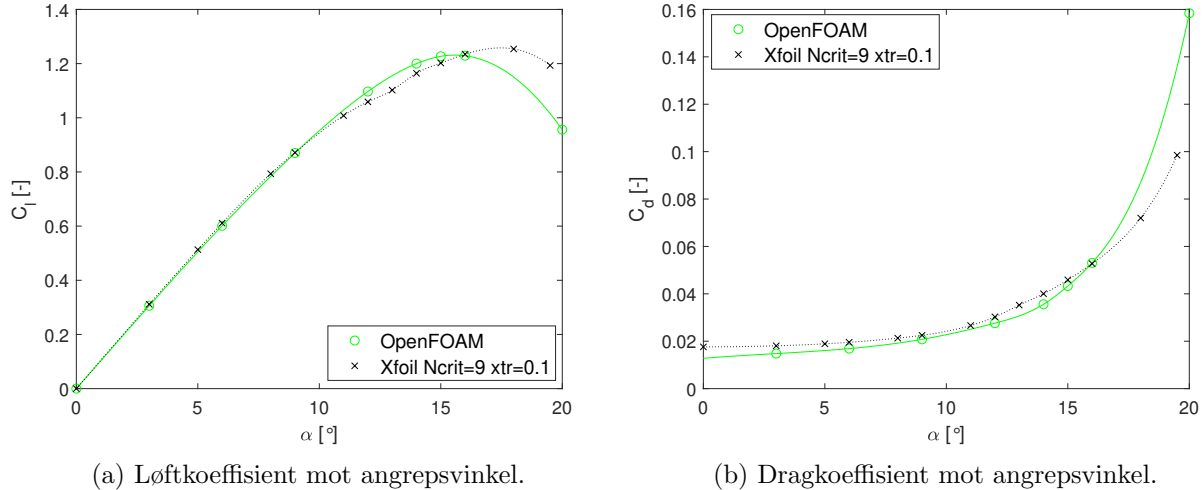
Av figurene ser man at det ved disse Reynoldstallene er bedre overenstemmelse mellom resultatene fra OpenFOAM og Xfoil. Når det gjelder løftkoeffisienten følger resultater fra OpenFOAM og Xfoil den samme linjen frem til steilingsområdet for begge  $Re$ . Den maksimale løftkoeffisienten for  $Re = 10^4$  er opptrer ved samme angrepsvinkel for OpenFOAM enn for Xfoil, men det oppnås en høyere verdi for OpenFOAM. Dette gjenspeiles også i  $C_d - \alpha$ -kurven hvor man kan observere større dragkrefter for resultatene fra Xfoil enn for OpenFOAM. For  $Re = 1,4 \cdot 10^5$  opptrer  $C_{l_{maks}}$  ved samme  $\alpha$  ved begge analyser og når omtrent samme verdi. Her ser man i tillegg en god overensstemmelse mellom dragkreftene. Ved økende  $Re$  vil treghetskreftene ha større betydning som følger av Formel 1, og Xfoil

predikterer løft- og dragkoeffisienten mer pålitelig noe som gjenspeiles i resultatene.

Figur 50 og 51 viser løft- og dragkoeffisient som funksjon av angrepsvinkel for henholdsvis  $Re=163000$  og  $Re=200000$ .



Figur 50: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=163000$ .

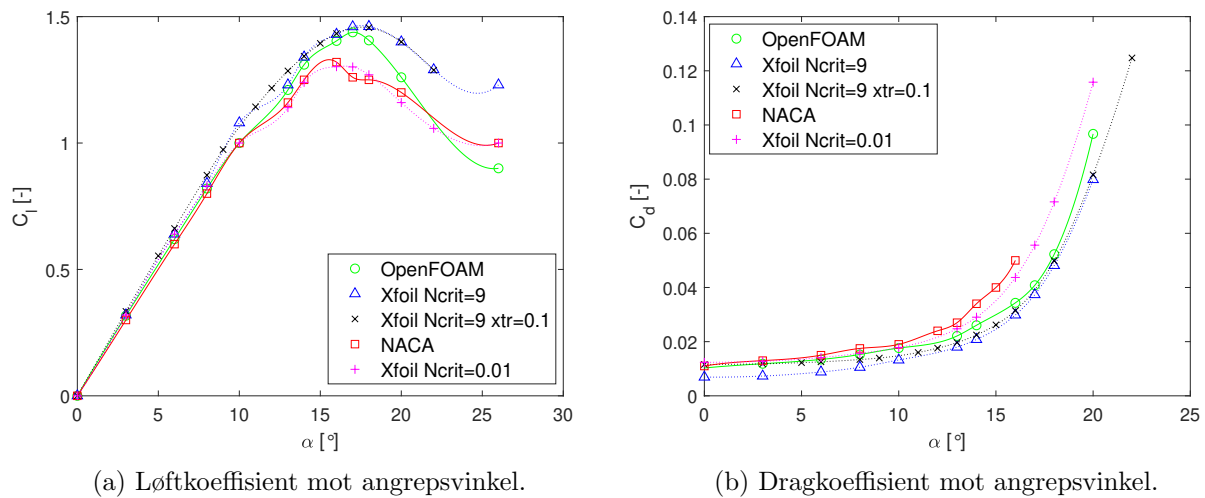


Figur 51: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=200000$ .

I Figur 50 ser man at resultatene fra NACA-studien og Xfoil med  $N_{crit}=0,01$  stemmer godt overens både for løft- og dragkoeffisienten frem til steilingsområdet. Etter steiling vises det større forskjeller i resultatene. Det er også som forventet at  $C_{l_{maks}}$  opptrer ved en lavere angrepsvinkel for NACA-studien enn for OpenFOAM og Xfoil med  $N_{crit}=9$  grunnet større

turbulensintensitet i strømmingen. Resultatene fra OpenFOAM og Xfoil med  $N_{crit}=9$  viser også god overensstemmelse ved begge  $Re$  både ved løft- og dragkoeffisienten. For  $Re=163000$  var det vanskelig å konvergere en løsning for  $\alpha > 18^\circ$ , derfor vises det ikke resultater for angrepsvinkler større enn  $18^\circ$ . Av Figur 51 observeres det at  $C_{l_{maks}}$  for Xfoil når er noe høyere verdi og opptrer ved en større angrepsvinkel enn resultatene fra OpenFOAM.

Som en referansesjekk utføres det i tillegg numeriske analyser ved et relativt høyt Reynolds tall. Resultatene fra analyser ved  $Re=1251000$  vises i Figur 52. Her vises resultater fra Xfoil med  $N_{crit}=9$  både med og uten trigget turbulens.



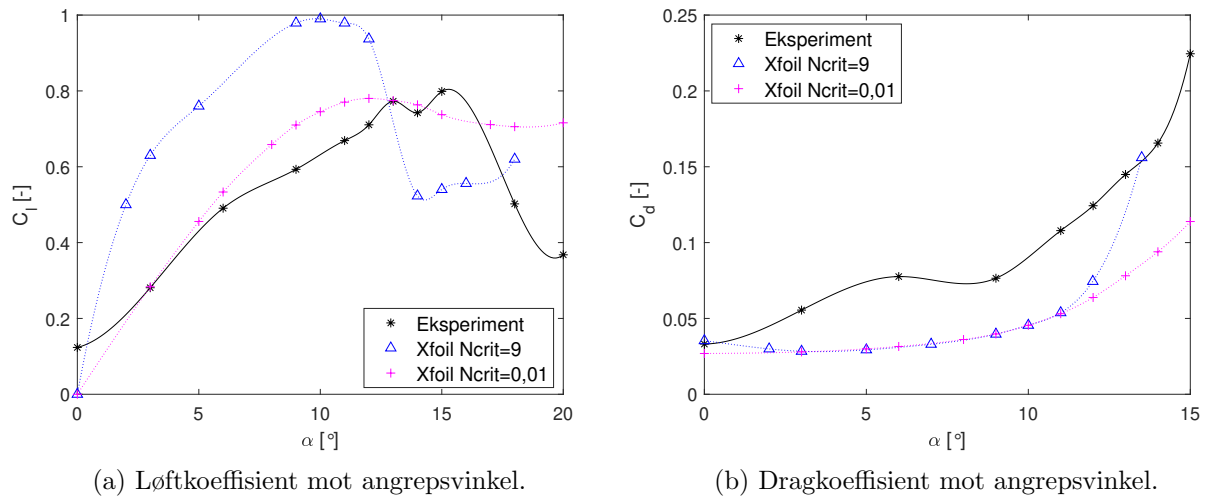
Figur 52: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=1251000$ .

Figurene viser et godt samsvar mellom de ulike analysene. Alle kurvene følger den samme lineære linjen frem til steilingsområdet i løftkurven. Også i steilingsområdet observeres det at kurvene sammenfaller i større grad enn ved lavere  $Re$ . Dette kan ha sammenheng med at det ved høye  $Re$  sannsynligvis er mer turbulent strømming, slik at fenomener som laminære separasjonsbobler ikke er til stede. Som forventet har  $C_{l_{maks}}$  en lavere verdi for NACA-studien og Xfoil ved  $N_{crit}=0,01$ . I tillegg forventes en høyere dragkoeffisient ved disse analysene, noe som også vises i Figur 52 (b).

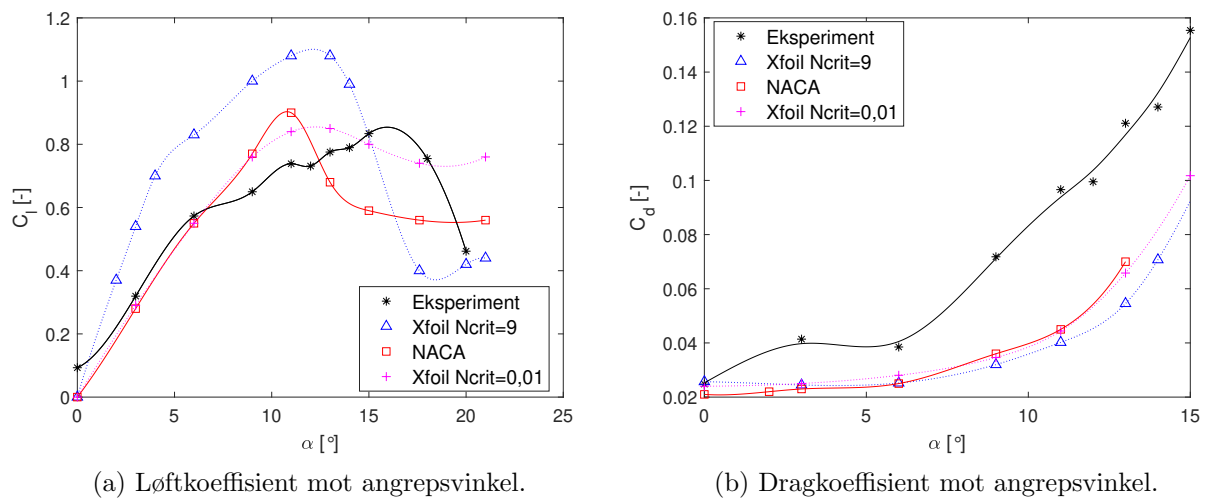
### 3.3 Eksperimentelle resultater

I dette kapittelet vil preliminnære resultater fra de eksperimentelle forsøkene utført i henhold til testplanen presenteres. Resultatene vil i de tilfellene det foreligger data sammenlignes med eksperimentelle resultater fra NACA-studien samt CFD-analyser fra Xfoil. Grunnet at turbulensintensiteten i MarinLab er relativt lav, benyttes resultater fra CFD-analyser ved en Ncrit-verdi på 9 til sammenligning.

Resultater fra forsøk ved  $Re=60000$  og  $Re=81000$  vises i Figur 53 og 54.



Figur 53: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=60000$ .

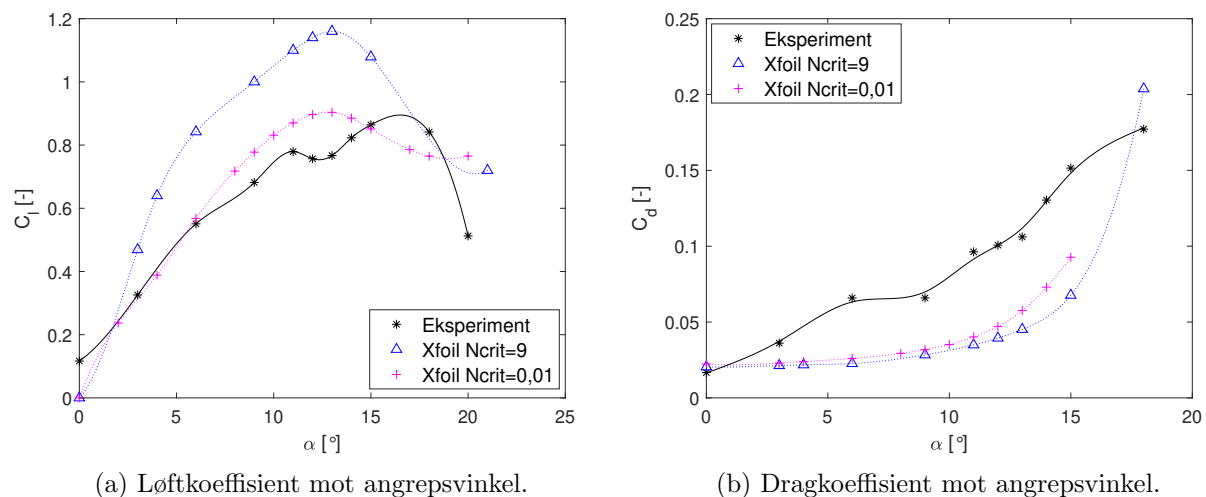


Figur 54: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=81000$ .

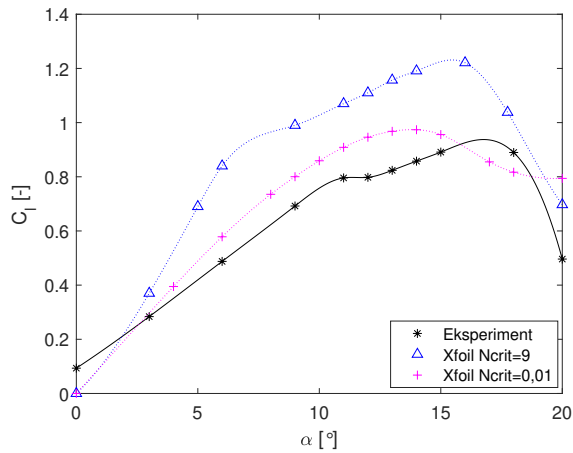


Av figurene ser man at det er relativt stor spredning i resultatene. De eksperimentelle resultatene viser lavere løftekraft og samtidig høyere dragkraft enn CFD-analysen. I tillegg oppnås  $C_{l_{maks}}$  ved en høyere  $\alpha$  for eksperimentelle forsøk enn ved numeriske for begge  $Re$ . Når man ser på resultatene ser det ikke ut som det foreligger en laminær separasjonsboble under forsøkene grunnet lavt løft i den lineære delen av løftkurven, derfor er det valgt å også vise kurven for Xfoil med  $N_{crit}=0,01$  for sammenligning. Årsaken til at det ikke forekommer laminære separasjonsbobler kan være flere, hvor en kan være at det likevel dannes 3D-strømning grunnet endeplatene. Dersom 3D-strømning er til stede fører det generelt til at stigningstallet i den lineære delen av kurven minker, dermed kan det være en naturlig forklaring på avviket i resultatene. Dette har det ikke vært tid til å undersøke nærmere med strømningsvisualisering i denne oppgaven. Det fremkommer at kurven med  $N_{crit}=0,01$  samsvarer bedre med de eksperimentelle resultatene i den lineære delen av løftkurven for begge  $Re$ . Dette kan også tyde på at det har vært mer turbulens i strømmingen under forsøk enn antatt. Dragkurvene viser en brattere stigning for de eksperimentelle forsøkene enn for CFD-analysene ved alle undersøkte  $\alpha$  for begge  $Re$ . Av Figur 54 vises det at løftekoeffisienten fra de eksperimentelle forsøkene følger samme kurve som NACA-studien frem til steilingsområdet hvor resultatene avviker. Stigningstallet til dragkurven er også her høyere enn for NACA-studien og Xfoil.

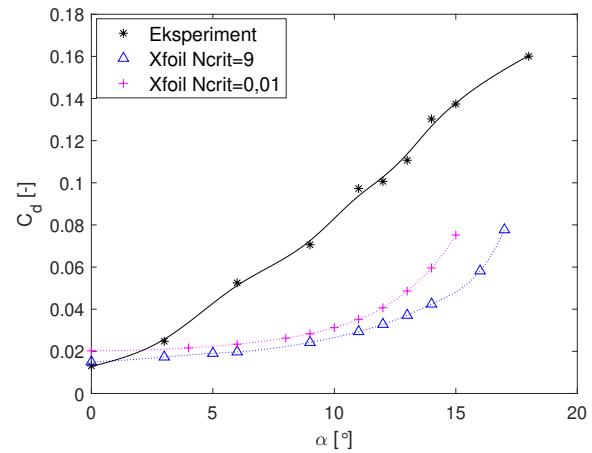
Resultater fra forsøk ved  $Re=100000$  og  $Re=140000$  vises i Figur 55 og 56.



Figur 55: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=100000$ .



(a) Løftkoeffisient mot angrepsvinkel.

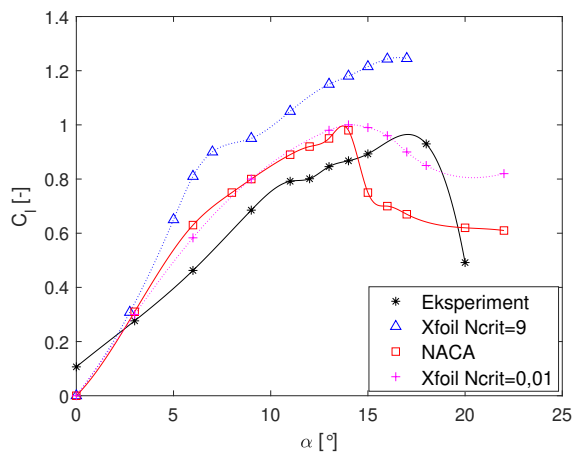


(b) Dragkoeffisient mot angrepsvinkel.

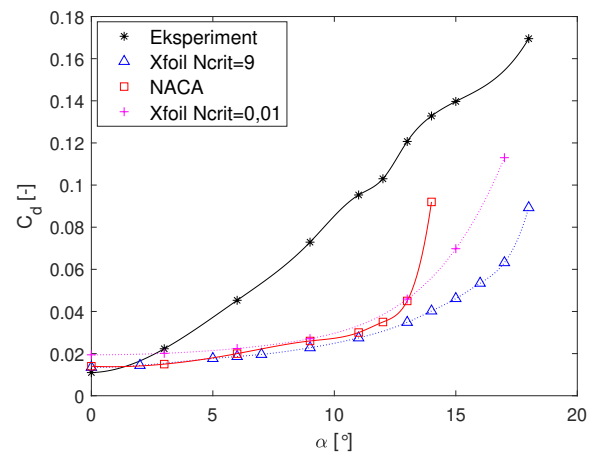
Figur 56: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=140000$ .

Også ved disse Reynolds tallene viser figurene spredning i resultatene. Løftkoeffisientene målt under eksperimentelle forsøkene er lavere og  $C_{l_{maks}}$  forekommer ved en høyere  $\alpha$  enn ved de numeriske resultatene. Samtidig vises brattere stigningstall og høyere dragkoeffisient for de eksperimentelle forsøkene. Det fremkommer at løftkurvene sammenfaller bedre med Xfoil Ncrit=9 for økende  $Re$  enn ved de laveste  $Re$  som er undersøkt. Også her er det likevel bedre samsvar mellom eksperiment og Xfoil Ncrit=0,01 frem til steilingsområdet. Forskjellen i dragkoeffisient ser også ut til å øke ved høyere Reynolds tall.

Figur 57 og 58 viser resultater fra forsøk ved  $Re=163000$  og  $Re=200000$ .

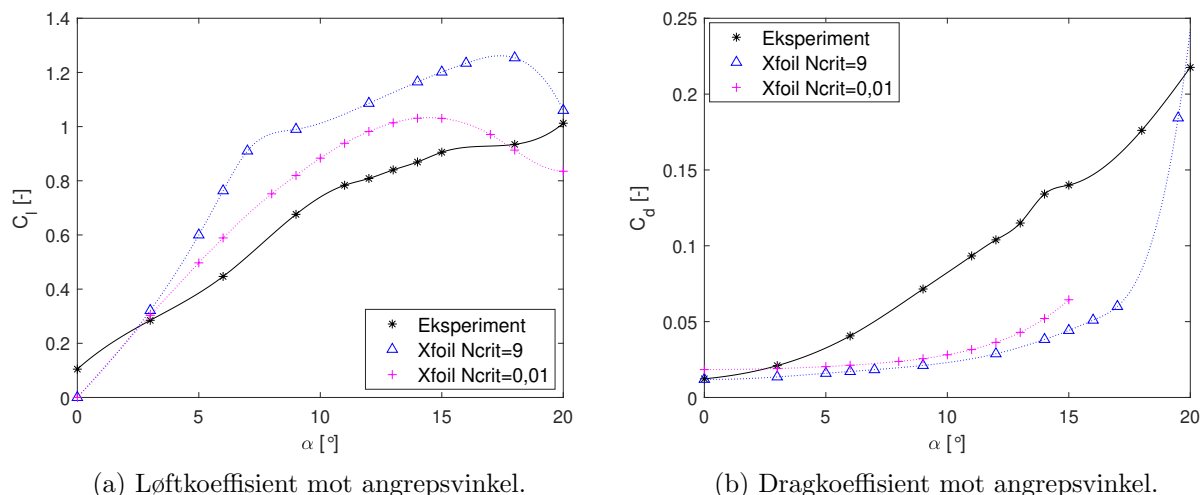


(a) Løftkoeffisient mot angrepsvinkel.



(b) Dragkoeffisient mot angrepsvinkel.

Figur 57: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=163000$ .

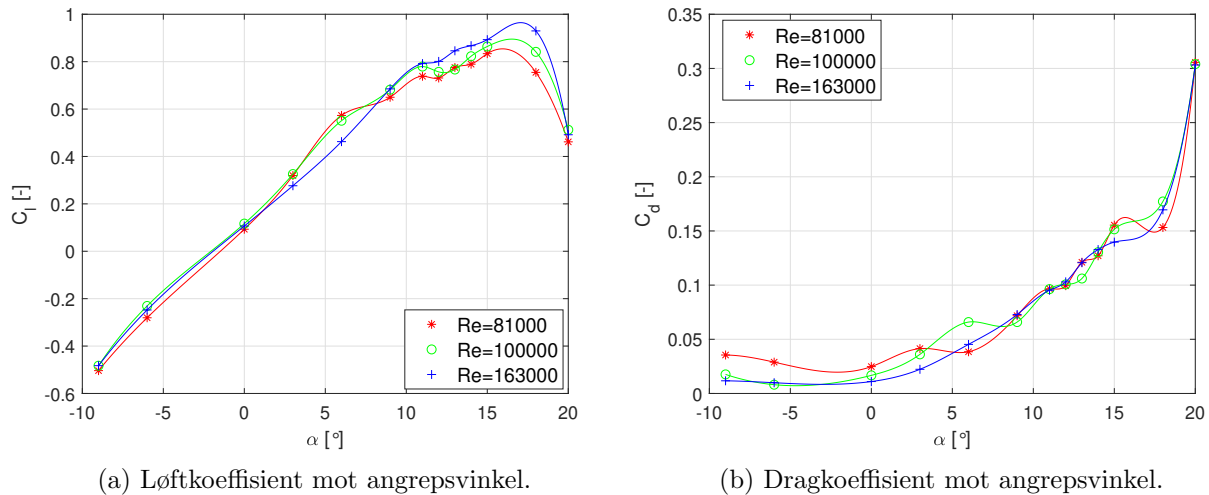


Figur 58: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=200000$ .

Av Figur 57 a) fremkommer det at resultater fra Xfoil Ncrit=9 overpredikerer løftekraften for angrepsvinkler over  $3^\circ$ . Løftkoeffisienten fra de eksperimentelle forsøkene følger omtrent samme linje som NACA-studien frem til steiling opptrer. Ved NACA-studien opptrer  $C_{l_{maks}}$  ved  $\alpha = 14^\circ$ , mens ved eksperimentet opptrer maksimal løftekraft ved omtrent  $\alpha = 17^\circ$ . Da det var vanskelig å konvergere en løsning i Xfoil Ncrit=9 for angrepsvinkler høyere enn  $16^\circ$  vises ikke resultater for vinkler høyere enn dette, men det kan av trenden på kurven se ut som  $C_{l_{maks}}$  for Xfoil opptrer ved samme  $\alpha$  som de eksperimentelle forsøkene. Av dragkurvene observeres det betraktelig høyere dragkoeffisienter ved hele spennet av undersøkte angrepsvinkler for de eksperimentelle forsøkene enn ved Xfoil og NACA-studien, noe som også vises for  $Re=200000$ . Av Figur 58 a) ser man at de eksperimentelle forsøkene ikke ble utført ved høye nok angrepsvinkler til at foilen oppnådde maksimal løftekraft. De numeriske resultatene viser høyere løftkoeffisienter enn de eksperimentelle og  $C_{l_{maks}}$  opptrer for Xfoil Ncrit=9 ved  $\alpha = 18^\circ$ .

### 3.3.1 Undersøkelse av symmetri

Grunnet at NACA0018 er en symmetrisk foil betyr det at løftekraften foilen generer vil være like stor ved samme positive og negative angrepsvinkel. Derfor utføres det forsøk ved  $\alpha = -6^\circ$  og  $\alpha = -9^\circ$  ved tre ulike Reynolds tall for å sammenligne med resultater ved  $\alpha = 6^\circ$  og  $\alpha = 9^\circ$ . Resultatet fra forsøkene vises i Figur 59. Tabell 10 viser en oversikt over verdiene fra kurvene i figurene.



Figur 59: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved ulike  $Re$ .

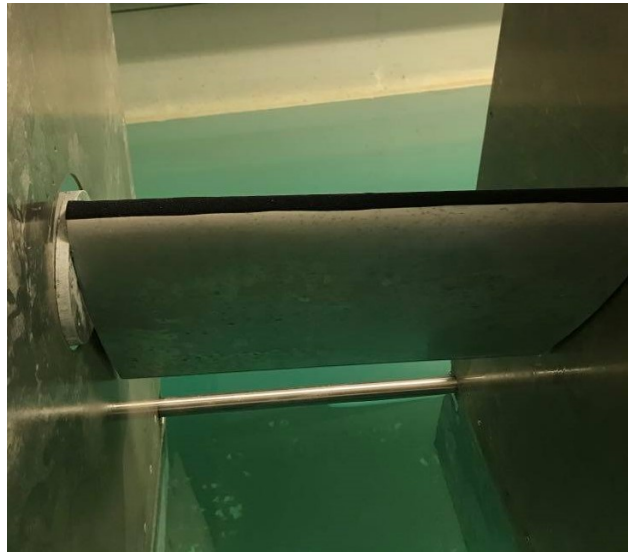
Tabell 10: Løftkoeffisienter ved korresponderende negative og positive angrepsvinkler.

Reynolds tall [-]	$C_l$ ved $\alpha = -9^\circ$	$C_l$ ved $\alpha = 9^\circ$	$C_l$ ved $\alpha = -6^\circ$	$C_l$ ved $\alpha = 6^\circ$
<b>81000</b>	0,51	0,65	0,28	0,57
<b>100000</b>	0,48	0,68	0,23	0,55
<b>163000</b>	0,48	0,69	0,25	0,46

Av Figur 59 a) ser man at alle kurvene følger den samme tilnærmet lineære linjen frem til steilingsområdet. Det observeres at løftkoeffisienten som forventet er større ved økende  $Re$ . Dersom man ser på tabellverdiene viser det et avvik mellom de korresponderende negative og positive angrepsvinklene for alle  $Re$  som er undersøkt. Det observeres også at foilen genererer løft ved  $\alpha = 0^\circ$ , noe en symmetrisk foil i teorien ikke gjør. Dette kan ha sammenheng med usikkerheten i innstilt nullvinkel, hvor det kan bety at vinkelen ikke er helt nøyaktig innstilt under forsøkene. Avviket i innstilt nullvinkel estimeres av figurene hvor man ser at kurvene treffer  $y = 0$  ved omtrent  $\alpha = 1.5^\circ$ . Det antas at endring av vinkel etter første innstilte vinkel ikke bidrar stort til feilkilder. Testobjektets geometri undersøkes som forklart i Seksjon 2.3.2 og resultatene viser et svært lite avvik fra opprinnelig 3D-modell, altså at geometrien er symmetrisk. Dermed er testobjektets geometri et svært lite bidrag til feilkilder under forsøkene. Derfor kan resultatene tyde på at det er noe ved testtriggens konstruksjon som gjør at resultatene er usymmetriske.

### 3.3.2 Undersøkelse av trigget transisjon

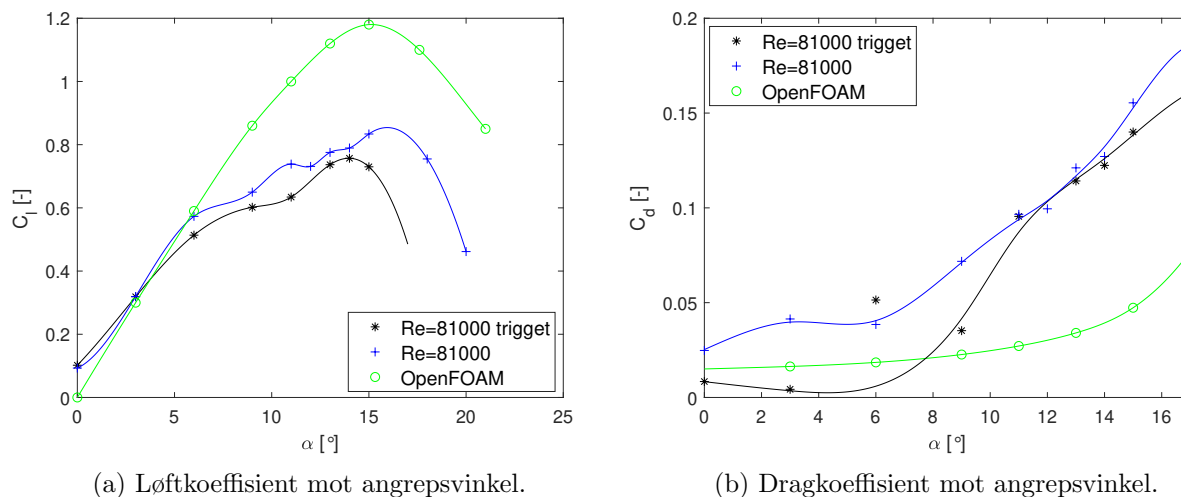
Grunnet at turbulensmodellen benyttet under de numeriske analysene antar turbulent strømming fra start, tas det ikke hensyn til transisjon og eventuelle laminære separasjonsbobler. Derfor utføres det i tillegg eksperimentelle forsøk med trigget transisjonspunkt i foilens ledende ende. Dette gjøres ved å feste sandpapir langs hele fremkanten på foilen som vist i Figur 60.



Figur 60: Testoppsett med trigget transisjonspunkt langs foilens fremkant.

Ved å feste sandpapir i fremkanten vil det føre til at grensesjiktet trigges til å overgå fra laminært til turbulent, som vil forhindre en laminær separasjonsbølge i å opptre. Ved å trigge til turbulens helt i fremkanten er det likevel en mulighet for at grensesjiktet festes til overflaten på et punkt lengre bak langs foilen og går over til et laminært grensesjikt igjen. Testene utføres etter samme testplan som uten trigging for to utvalgte Reynolds tall. Tidsbegrensninger i MarinLab gjorde at flere tester med trigget transisjonspunkt ikke kunne utføres i tillegg. For å være sikker på at grensesjiktet ikke overgår til laminært igjen bør det også undersøkes med triggpunkt lengre bak på foilen, ved et punkt rett foran forventet laminær separasjonsbølge. Av tidligere fremviste resultater kan det se ut som at det likevel ikke er noen bobler til stede under eksperimentelle forsøk, dermed forventes det ikke store forskjeller i resultater med og uten trigging i fremkant.

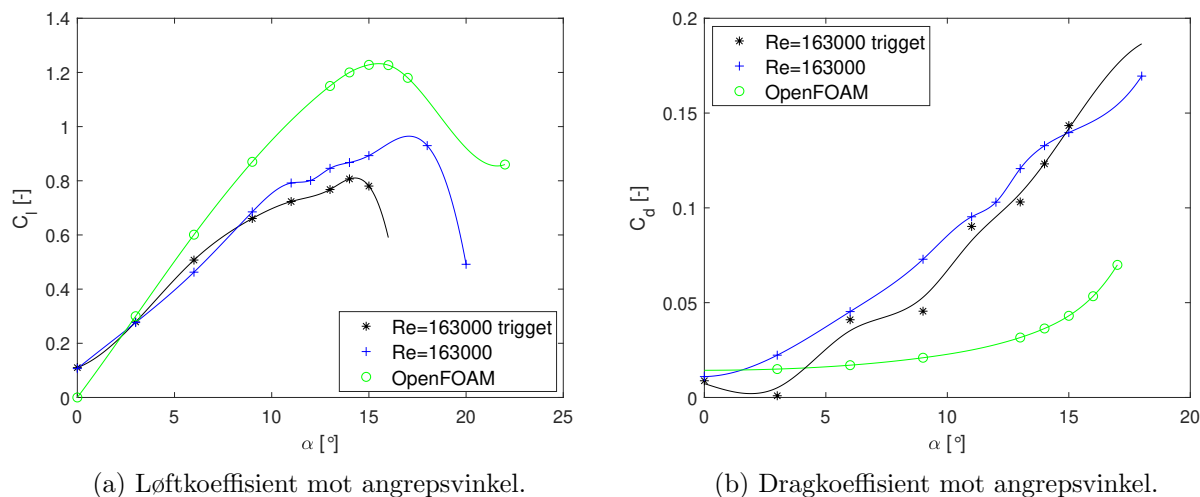
Figur 61 viser resultater for løft- og dragkoeffisienten fra CFD-analyse i OpenFOAM og eksperimentelle forsøk med og uten trigget transisjon for  $Re=81000$ .



Figur 61: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=81000$ .

Av Figur 61 a) ser man at resultatene med trigget transisjon gir en lavere løftkoeffisient og at steilingsområdet opptrer ved en lavere angrepsvinkel enn uten trigging. Som nevnt tyder tidligere fremviste resultater på mer turbulens i strømmingen under forsøk enn antatt, dermed var det ikke forventet store forskjeller i resultater med og uten trigging i fremkant. Resultatene viser at det likevel fremkommer lavere løft ved trigget transisjon. En forklaring på dette kan være at påførelsen av sandpapir i fremkanten fører til et tillegg i turbulensen på grunn av den jevne fordelingen, som dermed fører til mindre løft. Alle resultatene følger den samme linjen i det lineære området, men ved en angrepsvinkel på omtrent  $6^\circ$  avtar løftet for de eksperimentelle forsøkene. De numeriske analysene predikerer høyere løft etter det lineære området, men det observeres at  $C_{l_{maks}}$  for OpenFOAM og trigget transisjon opptrer ved omtrent samme angrepsvinkel. Dette gjenspeiles også i Figur 61 b) hvor OpenFOAM predikerer lavere dragkrefter. Dragkurvene med og uten trigging er nokså like, men avviker noe ved de laveste angrepsvinklene. I kurven som viser trigget transisjon er det ikke tatt hensyn til dragmålingen ved  $\alpha = 6^\circ$  grunnet at punktet avviker fra de resterende målingene. Denne målingen bør derfor gjentas på et senere tidspunkt.

Resultater fra CFD-analyse og eksperimentelle forsøk med og uten trigget transisjon for  $Re=163000$  vises i Figur 62.



Figur 62: Løft- og dragkoeffisient mot angrepsvinkel ved  $Re=163000$ .

Av Figur 62 a) ser man samme trend som ved  $Re=81000$ . Kurvene viser lavere løft med trigget transisjon enn uten, samt at  $C_{l_{maks}}$  opptrer ved en lavere  $\alpha$ . Likevel vises det at  $C_{l_{maks}}$  opptrer ved omtrent samme  $\alpha$  for trigget transisjon og resultater fra OpenFOAM. CFD-analysen predikerer høyere løft og samtidig lavere drag. Også her vises en økt dragkraft ved trigget transisjon når foilen er innstilt med en angrepsvinkel på  $6^\circ$ . Dette kan tyde på at det ved denne vinkelen fremkommer et økt drag-bidrag enten fra selve testtriggen eller et fysikalsk bidrag fra fluidstrømmen som det ikke kompenseres for i MATLAB-skriptet.

### 3.3.3 Ventetid mellom forsøk

De eksperimentelle testene skal utføres i stillestående vann for å minimere turbulensen i vannet. For å oppnå stillestående vann må en viss ventetid mellom hvert forsøk påregnes. For å undersøke hvor lang ventetiden bør være utføres det syv forsøk med  $Re=140000$  og  $\alpha = 11^\circ$  med ventetid mellom 15 sekunder og 15 timer. Tabell 11 viser en oversikt over resultater i form av løft- og dragkoeffisienter samt prosentvis endring i koeffisienten i forhold til en ventetid på 15 timer hvor det forventes stillestående vann. Grunnet at dragkoeffisientene målt under forsøkene er relativt små, oppgis disse med tre desimalers nøyaktighet i tabellen, selv om usikkerheten i målingene er vist å være på det andre desimalet.

Tabell 11: Sammenligning av resultater ved ulike ventetid mellom forsøk.

Ventetid	Løftkoeffisient [-]	Dragkoeffisient [-]	Endring løftkoeffisient	Endring dragkoeffisient
<b>15 timer</b>	0,76	0,091	-	-
<b>30 min</b>	0,76	0,091	0%	0%
<b>10 min</b>	0,76	0,088	0%	3%
<b>5 min</b>	0,75	0,091	1%	0%
<b>2 min</b>	0,76	0,091	0%	0%
<b>15 sek</b>	0,82	0,10	8%	10%

Tabellen viser at ventetiden har en påvirkning på resultatene. Dersom det ikke ventes i det hele tatt, her estimert til 15 sekunder, vises en endring i løftkoeffisienten på omtrent 8% og dragkoeffisienten på 10% noe som vil være en klar feilkilde i resultatene. Ventetiden i 30 min vises det derimot ingen endring koeffisientene. Ved 10 minutters ventetid vises en endring i  $C_d$  på 3%, men forskjellen fra lengst ventetid er fortsatt innenfor lastcellenes usikkerhet i dragkoeffisienten. Ventetiden vil forøvrig også variere mellom hvilket Reynolds tall og dermed hastighet forsøket utføres ved, da høyere hastigheter vil føre til mer bevegelse i vannet. Likevel vil det være et estimat for alle de eksperimentelle forsøkene som utføres under arbeidet med dette prosjektet da den midterste hastigheten og angrepsvinkelen benyttes i undersøkelsen. Det konkluderes av resultatene fremvist i tabellen med at en ventetid mellom 5 og 10 minutter bør påregnes mellom hvert forsøk for å sikre at vannet er stillestående og dermed pålitelige resultater.



## 4 Konklusjon

I dette prosjektet er en eksperimentell testrigg for hydrofoiler designet og konstruert. Eksperimentelle og numeriske undersøkelser av testobjektet NACA0018 sine hydrodynamiske egenskaper ved lave Reynolds tall er utført. Prosjektet muliggjør fremtidig utvikling og forskning på foiler ved HVL. Optimalisering og videreutvikling av foilteknologi kan ha betydning for energiøkonomien i en verden med økende energibehov.

Resultater fra numeriske analyser viser godt samsvar i det lineære området av løftkurven mellom OpenFOAM og Xfoil med trigget turbulens. I steilingsområdet vises større grad av spredning ved de laveste  $Re$ , som belyser utfordringen med å oppnå pålitelige resultater i denne regionen. Det er sannsynligvis OpenFOAM som predikerer kreftene mest pålitelig i steilingsområdet grunnet bedre turbulensmodell. Det er totalt sett observert lavere løftprediksjon og høyere dragprediksjon fra Xfoil enn fra OpenFOAM. Ved økende  $Re$  viser resultatene bedre overensstemmelse mellom OpenFOAM og Xfoil både i form av løft- og dragkoeffisienten. Xfoil med  $N_{crit}=0,01$  samsvarer godt med valideringsdata fra NACA-studien, noe som tyder på at den antatte turbulensintensiteten fra studien stemmer.

Eksperimentelle resultater viser lavere løft enn forventet, og kan tyde på mer turbulens enn antatt i forkant av forsøkene, samt at 3D-effekter kan ha oppstått i strømmingen. Resultatene viser betydelig økt drag sammenlignet med CFD-analyser og valideringsdata fra NACA, noe som kan tyde på et drag-bidrag fra testriggen. Det er derfor behov for videre utprøving av riggen. Eksperimentelle forsøk utført i masterprosjektet kan ikke direkte sammenlignes med data fra NACA-studien grunnet forskjellen i turbulensintensitet. Det har vist seg å være utfordrende å finne valideringsdata ved lave  $Re$  og tilsvarende turbulensintensitet da de fleste tidligere studier er utført i vindtunnel hvor turbulensen er høyere enn i stillestående vann.

Arbeidet som beskrives i denne masteroppgaven representerer første trinn i prosessen mot en optimalisert testrigg for hydrofoiler. Foreliggende prosjekt har sett på foilens grunnleggende hydrodynamiske egenskaper med utarbeidet testoppsett. Arbeidet danner et grunnlag for videre optimalisering og kan anvendes innenfor en rekke andre områder innen hydrodynamikk i kommende studier. Riggen kan også brukes til å undersøke egenskaper av nye foildesign, blant annet til bruk i forbindelse med vannturbiner, hydrofoilibåter og kjøler på skip.

## 5 Forslag til videre arbeid

Situasjonen rundt Covid19-viruset har ført til at arbeidet med oppgaven til tider er blitt noe forsinket. Dermed er det flere aspekter ved oppgaven hvor planlagt aktivitet er blitt justert. Det må utføres flere tester for å undersøke årsaker til avvikene i resultatene. Det er flere punkter hvor testriggens utforming kan forbedres, og i tillegg kan riggen benyttes til å utforske andre relevante områder. Forslag til videre arbeid vises i listen som følger:

- Det anbefales å tidlig undersøke om 3D-effekter likevel er til stede under forsøk med gitt testoppsett. Dersom 3D-effekter er til stede er det sannsynligvis endeplatene som må designes med bedre strømmingsegenskaper, slik at strømmingen ikke separeres ved fremkanten.
- Etablere en automatisk metode for innstilling av angrepsvinkel, for eksempel ved hjelp av en stepper-motor og potensiometer. En slik løsning kan redusere feilkilden ved innstilt vinkel i tillegg til å effektivisere utførelsen av forsøkene.
- Riggen er utformet på en slik måte at det enkelt kan monteres ulike sensorer etter hva man ønsker å undersøke. Det hadde for eksempel vært interessant å undersøke vaken av ulike foileksjoner ved forskjellige Reynolds tall. Det kan freses ut ganger i testobjektet slik at kontrastvæske kan benyttes for å visualisere vaken og turbulens i vannet. I tillegg kan denne metoden benyttes for å visualisere 3D-effekter.
- Forbedring av CFD-analyser i OpenFOAM med en turbulensmodell som tar hensyn til separasjon og transient strømming.
- Forsterke endeplatene slik at forsøk ved høyere Reynolds tall og dermed hastigheter kan utføres uten vibrasjonsbidrag fra platene.
- Forbedre oppsett for å forsikre at riggen plasseres på samme punkt mellom hver gang den vippes ut av vannflaten, for eksempel ved hjelp av en laser som skal peke på et spesifikt punkt. Dette kan sikre en bedre repeterbarhet.

## Referanser

- [1] International Energy Agency (IEA). Global energy review 2020.  
<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/renewables>. Besøkt september 2020.
- [2] P. Garrison. Airfoils a short history.  
<https://www.flyingmag.com/technicalities/technicalities-short-history-airfoils/>.  
Besøkt Juli 2020.
- [3] R. E. Sheldahl and P. C. Klimas. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections trough 180-degrees angle of attack for use in aerodynamical analysis of vertical axis vind turbines. Technical report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1981.
- [4] E. N. Jacobs and A. Sherman. Airfoil section characteristics as effected by variations of the reynolds number. Technical report, National advisory committee for aeronautics (NACA), 1937.
- [5] G. E. Hassan, A. Hassan and M. E. Yousef. Numerical investigation of medium range re number aerodynamics characteristics for naca0018 airfoil. *CFD letters*, 6, 2014.
- [6] G. R. Srinivasan, J. A Ekaterinaris and W. J McCroskey. Evaluation of turbulence models for unsteady flows over an oscillating airfoil. *Computers and fluids*, 24, 1995.
- [7] I. Karasi M. S Genc and H. H Acikel. Numerical study on low reynolds number flows over an aerofoil. *Journal of Applied Mechanical Engineering*, 2, 2013.
- [8] J. Amdahl et al. *Havromsteknologi*. NTNU Institutt for marinnteknikk og Fagbokforlaget Vigmostad og Bjørke AS, Kanalveien 51, 5068 Bergen, 2014.
- [9] J. D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill, Avenue of the Americas, New York, 5th edition, 2001.
- [10] D. Ogelsby. *Aerofoil data*. Traplet publications Ltd., Willow cottage, Crowcroft, Malvern WR136NN, Storbritannia, 2002.
- [11] NASA Glenn Research Center. Reynolds number.  
<https://www.grc.nasa.gov/WWW/BGH/reynolds.html>. Besøkt April 2020.
- [12] B. Pettersen. *Hydrodynamikk 3*. Akademika, Kanalveien 51, 5068 Bergen, 2018.

- [13] NASA Glenn Research Center. Boundary layer.  
<https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boundlay.html>. Besøkt April 2020.
- [14] J. Winslow, H. Otsuka, B. Govindarajan and I. Chopra. Basic understanding of airfoil characteristics at low reynolds numbers. *Journal of aircraft*, 55, December 2018.
- [15] T. Hansen. *Aerodynamic Optimisation of Airfoils and Winglets for Wind Turbine Application*. PhD thesis, Norwegian Institute of Science and Technology, Januar 2017.
- [16] K. M. Swift. An Experimental Analysis of the Laminar Separation Bubble At Low Reynolds Numbers. Master's thesis, Univeristy of Tennessee - Knoxville, December 2009.
- [17] C. Patricia. Turbulence.  
<https://www.fp7-restarts.eu/index.php/home/root/state-of-the-art/objectives/2012-02-15-11-58-37/72-book-video/environmental-aspects-of-the-air-transport/133-3-turbulences.html>.  
 Besøkt Mai 2020.
- [18] R.F. Mudde, L. Deutz, V.A Nievaart and H.R.E van Maanen. Lda-measurements of the turbulence in and around a venturi. *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*, 2005.
- [19] S. Wang, Y. Zhou, Md. Mahbub Alam and H. Yang. Turbulent intensity and reynolds number effects on an airfoil at low reynolds numbers. *Physics of fluids*, 26, 2014.
- [20] J. D. Anderson Jr. *Introduction to flight*. McGraw-Hill, Avenue of the Americas, New York, 1989.
- [21] SKYbrary. Friction drag.  
[https://www.skybrary.aero/index.php/Friction\\_Drag](https://www.skybrary.aero/index.php/Friction_Drag). Besøkt Mars 2020.
- [22] J. B. Barlow, W. H. Rae Jr. and A. Pope. *Low-speed wind tunnel testing*. John Wiled and sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, 3rd edition, 1999.
- [23] Syed. What is downwash and upwash in airfoil.  
<https://www.quora.com/What-is-downwash-and-upwash-in-airfoil>.  
 Besøkt August 2020.
- [24] E. J. Shaugnessy, I. M. Katz and J. P. Schaffer. *Introduction to fluid mechanics*. Oxford University Press, 198 Madison Avenue, New York, New York 10016, 2005.

- [25] Dr. C. Sert. Governing equations of fluid flow and heat transfer.  
<http://users.metu.edu.tr/csert/me582/ME582%20Ch%2001.pdf>. Besøkt Juli 2020.
- [26] P. Cardiff. Introduction to meshing in openfoam.  
[https://www.researchgate.net/publication/325218270\\_Introduction\\_to\\_Meshing\\_in\\_OpenFOAM](https://www.researchgate.net/publication/325218270_Introduction_to_Meshing_in_OpenFOAM).  
Besøkt Februar 2020.
- [27] H. Djojodihardjo and A. Khairul. Two-dimensional cfd simulation for visualization of flapping wing ornithopter studies. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 10, November 2015.
- [28] R. Gullberg. Computational fluid dynamics in openfoam. Technical report, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Desember 2017.
- [29] Leap CFD team. Tips and tricks: Turbulence part 2 - wall functions and y+ requirements.  
<https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-turbulence-wall-functions-and-y-requirements/>.  
Besøkt Februar 2020.
- [30] The OpenFOAM foundation. Openfoam v8 user guide.  
<https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>. Besøkt Februar 2020.
- [31] F. Moukalled, L. Mangani and M. Darwish. *The finite volume method in computational fluid dynamics*. Springer Nature, Heidelberg Pl. 3, 14197 Berlin, Tyskland, 2016.
- [32] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Pearson education limited”, Edinburgh Gate Harlow, Essex CM20 2JE England, 2007.
- [33] NASA Langley Research Center. The spalart-allmaras turbulence model.  
<https://turbmodels.larc.nasa.gov/spalart.html>. Besøkt September 2020.
- [34] P.R Spalart and S.R Allmaras. A one-equation turbulence model for turbulent aerodynamis flows. *La Recherche Aerospatiale*, 1, 1994.
- [35] S. Bogos, A. Dumitrache and F. Frunzulica. Turbulence models in cfd simulation of low reynolds number airfoils flow. AIP Publishing, 2015.
- [36] OpenCFD Ltd. k-epsilon.

- <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-epsilon.html>.  
Besøkt September 2020.
- [37] Simscale. K-omega and k-omega sst.  
<https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>.  
Besøkt September 2020.
- [38] J. Puig. Aerodynamics of 2d airfoil naca 23012.  
[http://files.the-foam-house5.webnode.es/200000364-d0c58d1c20/Chapter5\\_Airfoil.pdf](http://files.the-foam-house5.webnode.es/200000364-d0c58d1c20/Chapter5_Airfoil.pdf).  
Besøkt Mars 2020.
- [39] M. Drela and H. Youngren. Xfoil 6.9 user primer.  
<http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>. Massachusetts Institute of Technology, November 2001.
- [40] M. Hepperle. The panel method.  
[https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/jf\\_analysis\\_panel.htm](https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/jf_analysis_panel.htm). Besøkt September 2020.
- [41] J. Morgado, R. Vizhino, M.A.R Silvestre and J.C Pascoa. Xfoil vs cfd performance predictions for high lift low reynolds number airfoils. *Aerospace science and technology*, 52:207–214, 2016.
- [42] Academic library. Panel method solvers-xfoil and xflr5.  
[https://ebrary.net/59615/engineering/panel\\_method\\_solvers\\_xfoil\\_xflr5](https://ebrary.net/59615/engineering/panel_method_solvers_xfoil_xflr5).  
Besøkt August 2020.
- [43] D. Prosser. *Construct2D User Manual*, 2014. Version 2.1, November.
- [44] V. F. Lunestad. Ulike meshprosedyrer for cfd-analyse av 2d foil. Intern rapport i emnet MOM270, Høgskulen på Vestlandet, Institutt for Maskin- og Marinfag, 2019.
- [45] MarinLab. Høgskulen på vestlandet (hvl), bergen.  
[https://www.hvl.no/contentassets/5ce9f905a2d6438d8da41b263024c016/marinlab\\_info\\_sheet\\_006.pdf](https://www.hvl.no/contentassets/5ce9f905a2d6438d8da41b263024c016/marinlab_info_sheet_006.pdf). Besøkt Mai 2020.
- [46] Item Industrietechnik. Mb building kit system.  
<https://product.item24.de/en/products/product-catalogue/products/mb-building-kit-system-1001009411/>.  
Besøkt September 2020.

- [47] Wilcox Associates Inc. *PC-DMIS CMM Manual*, 2012. For PC-DMIS 2012 MR1.
- [48] H. B. Rabbås. Egenfrekvens.  
<https://snl.no/egenfrekvens>. Besøkt August 2020.





## A.2 : Lastcellekalibrering etter forsøk

Rekalibrering 16/11:											
Feil rttning		Rett vei									
2020-#4 [mV]	2020-#4 [mV]	2020-#7 [mV]	diff [mV/V]	Utregnet gammel #4		diff	Utregnet gammel #7		diff		
-0,261883	0,0164719	-0,0458267		-0,9168409	-0,1599402	-0,7569007	-2,9377591	-0,039662	-2,8980971		
-0,369286	0,126111	0,0658183		12,1297624	12,9004354	-0,770673	10,0106049	12,9295405	-2,9189356		
-0,623869	0,382458	0,327612		42,6340042	43,4368782	-0,8028741	40,3729151	43,3407142	-2,9677991		
-0,865641	0,62559	0,576658		71,5657151	72,3991302	-0,8334151	69,2567726	72,2710559	-3,0142833		
-0,979214	0,739797	0,694095		85,1558797	86,003641	-0,8477612	82,8768812	85,913084	-3,0362028		
-1,10426	0,865795	0,824173		100,149125	101,012714	-0,8635885	97,9630678	101,02355	-3,0604817		
-1,22721	0,989526	0,951712		114,872607	115,751738	-0,879131	112,754786	115,839073	-3,0842868		
	0,866739	0,825593		100,261457	101,125164	-0,8637071	98,1277565	101,188503	-3,0607468		
	0,741337	0,696864		85,3391334	86,1870881	-0,8479547	83,1980243	86,234744	-3,0367196		
	0,627594	0,579876		71,8041829	72,6378497	-0,8336669	69,6299898	72,6448738	-3,0148839		
	0,384612	0,330475		42,8903213	43,693466	-0,8031446	40,7049602	43,6732936	-2,9683335		
	0,128767	0,0679457		12,4458155	13,2168222	-0,7710066	10,2573365	13,1766691	-2,9193326		
	0,0189362	-0,0442529		-0,6235993	0,13361096	-0,7572102	-2,7552329	0,14315793	-2,8983909		
							0,12223032				0,18618965
<b>Gain</b>	119,121514	116,164651									0,00160731
<b>Offset</b>	-2,1220979	5,28378061									

## A.3 : Undersøkelse av usikkerhet i lastceller

Kjøring	Løft [N]	Løftkoeffisient [-]	Drag [N]	Dragkoeffisient [-]
1	1,79	0,294	0,345	0,0567
2	1,82	0,299	0,395	0,0649
3	1,45	0,238	0,484	0,0796
4	1,59	0,262	0,302	0,0497
5	1,83	0,312	0,312	0,0512
<b>Gennomsnitt</b>	1,70	0,279	0,368	0,0604
<b>Standardavvik</b>	0,169	0,0277	0,0746	0,0123



# B : MATLAB skript

## B.1 Skript for prosessering av eksperimentelle data

```
clear all
close all

path = ('C:\Users\Vilde\Documents\Masteroppgave\Matlab figurer\');
filename = [path,'alfallrel40000_8.txt'];
fid = fopen(filename,'rt'); %Åpner valgt fil
indata = textscan(fid, '%f ', 'HeaderLines',23); %Leser inn fra rad 23
fclose(fid);
data_onecolumn = indata{1};

v = 0.497; % hastighet, endre for hver Re

fs=2000; % sampling-frekvens
nr_cols=3; % Antall kolonner i tekstfil
frames_check=length(data_onecolumn)/(nr_cols);
data = reshape(data_onecolumn',nr_cols,frames_check)';
samples=data(:,1);
time=[1/fs:1/fs:length(samples)/fs]'; %Kolonne med tidsserien

drag=data(:,2); %Kolonne med dragkrefter
lift=data(:,3); % Kolonne med løftekrefter

plot1 = plot(time,lift) %Visualiserer løftekraften over tidsserien
hold on
xlabel('Tid [s]')
ylabel('Løft [N]')

plot2 = plot(time,drag) %Visualiserer dragkraften over tidsserien
hold on
xlabel('Tid [s]')
ylabel('Drag [N]')
legend('Løft','Drag')

%Fjerne start og slutt av signalet

time_short=time(60001:80000);
drag_short=drag(60001:80000);
lift_short=lift(60001:80000);

%Drag-bidrag fra nedsenket del av sylinder
d = 0.038; %diameter [m]
h = 0.2385; %nedsenket lengde [m]
Cd_s = 1.15; %dragkoeffisient sylinder

D_s = 0.5*1000*(v^2)*Cd_s*d*h %Dragkraft fra sylinder
%Gjennomsnittsverdi av utvalgte verdier

lift_mean = mean(lift_short) /0.5 %Omgjør til 2D
drag_mean = (mean(drag_short) +D_s) /0.5 % Omgjør til 2D og kompensere for drag fra sylinder

%Finne offset fra start av en kjøring, antar 5 sekunder i start før vogn
%kjører
offset_drag=drag(1:10000);
offset_lift=lift(1:10000);

offset_drag=mean(offset_drag) /0.5
offset_lift=mean(offset_lift) /0.5

%Korrigerer for offset

if offset_drag>0
    drag_mean_korr = drag_mean+offset_drag
else
    drag_mean_korr = drag_mean-offset_drag
end

if offset_lift>0
    lift_mean_korr = lift_mean+offset_lift
else
    lift_mean_korr = lift_mean-offset_lift
end

%Beregne koeffisientene

rho = 1000; % tetthet ferskvann [kg/m^3]
c = 0.32; %kordelengde [m]

Cl = lift_mean/(0.5*rho*(v^2)*c)
Cd = drag_mean/(0.5*rho*(v^2)*c)

Cl_korr = lift_mean_korr/(0.5*rho*(v^2)*c)
Cd_korr = drag_mean_korr/(0.5*rho*(v^2)*c)
```



# C : OpenFOAM skript

## C.1 ControlDict

```
/*----- C++ -----*/
=====
\ \ \ F i e l d           | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\ \ \ O p e r a t i o n   | Website: https://openfoam.org
\ \ \ A n d               | Version: 6
\ \ \ M a n i p u l a t i o n
/*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       controlDict;
}
// ***** //

application    simpleFoam;

startFrom      startTime;

startTime      0;

stopAt         endTime;

endTime        4000;

deltaT         1;

writeControl   timeStep;

writeInterval  100;

purgeWrite     0;

writeFormat    ascii;

writePrecision 7;

writeCompression off;

timeFormat     general;

timePrecision  6;

runTimeModifiable true;

functions
{
  forces
  {
    type forces;
    functionObjectLibs ("libforces.so");
    patches (airfoil);
    ..
    pName p;
    Uname U;
    rho rhoInf;
    rhoInf 1000;
    CofR (0.2704 -0.0012 4.0128);
    outputControl timeStep;
    outputInterval 100;
  }
  forceCoeffs
  {
    type forceCoeffs;
    functionObjectLibs ("libforces.so");
    patches (airfoil);
    pName p;
    Uname U;
    rho rhoInf;
    rhoInf 1000;
    CofR (0 0 0);
    liftDir (0 1 0);
    dragDir (1 0 0);
    pitchAxis (0 0 1);
    magUInf 0.3245; //
    lRef 1; //
    Aref 1; //
    outputControl timeStep;
    outputInterval 100;
  }
};
// ***** //
```





## C.3 fvSolution

```
/*-----*\
|          |          |          |          |
| \ \ \ \ | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| / / / / | O p e r a t i o n | Website: https://openfoam.org
| / / / / | A n d | Version: 6
| / / / / | M a n i p u l a t i o n |
|          |          |          |          |
\*-----*/
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       fvSolution;
}
// ..... //

solvers
{
  p
  {
    solver      GAMG;
    tolerance   1e-06;
    relTol      0.1;
    smoother    GaussSeidel;
    nPreSweeps  0;
    nPostSweeps 2;
    cacheAgglomeration true;
    nCellsInCoarsestLevel 10;
    agglomerator faceAreaPair;
    mergeLevel  1;
  }

  U
  {
    solver      smoothSolver;
    smoother    GaussSeidel;
    nSweeps     2;
    tolerance   1e-08;
    relTol      0.1;
  }

  nuTilda
  {
    solver      smoothSolver;
    smoother    GaussSeidel;
    nSweeps     2;
    tolerance   1e-08;
    relTol      0.1;
  }
}

SIMPLE
{
  nCorrectors      1;
  nNonOrthogonalCorrectors 2;
  pRefCell         0;
  pRefValue        0;
  residualControl
  {
    p              1e-5;
    Ux             1e-5;
    Uy             1e-5;
    nuTilda        1e-5;
  }
}

relaxationFactors
{
  fields
  {
    p              0.3;
  }
  equations
  {
    U              0.7;
    nuTilda        0.7;
  }
}
// ..... //
```



## C.4 RASproperties

```
/*-----* C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ / / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / / | O p e r a t i o n | Version: 2.2.0
| \ \ / / | A n d | Web: www.OpenFOAM.org
| \ \ / / | M a n i p u l a t i o n |
|-----|
FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "constant";
  object       RASProperties;
}
// ***** //

RASModel      SpalartAllmaras;

turbulence    on;

printCoeffs   on;

// ***** //
```

## C.5 p

```
/*-----*- C++ -*-----*/
=====
\\      /   F i e l d       |   OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      /   O p e r a t i o n   |   Website: https://openfoam.org
\\      /   A n d               |   Version: 6
\\      /   M a n i p u l a t i o n   |
-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p;
}
// ***** //

dimensions      [0 2 -2 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    airfoil
    {
        type      zeroGradient;
    }

    frontAndBack
    {
        type      empty;
    }

    topAndBottom
    {
        type      symmetry;
    }

    farfield
    {
        type      freestreamPressure;
        freestreamValue $internalField;
    }
}
// ***** //
```



## C.7 Nut

```
/*-----*- C++ -*-----*/
=====
\ \ \ Field | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
 \ \ \ O peration | Website: https://openfoam.org
  \ \ \ A nd | Version: 6
   \ \ \ M anipulation |
/*-----*- C++ -*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       nut;
}
// ***** //

dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform 0.000001;

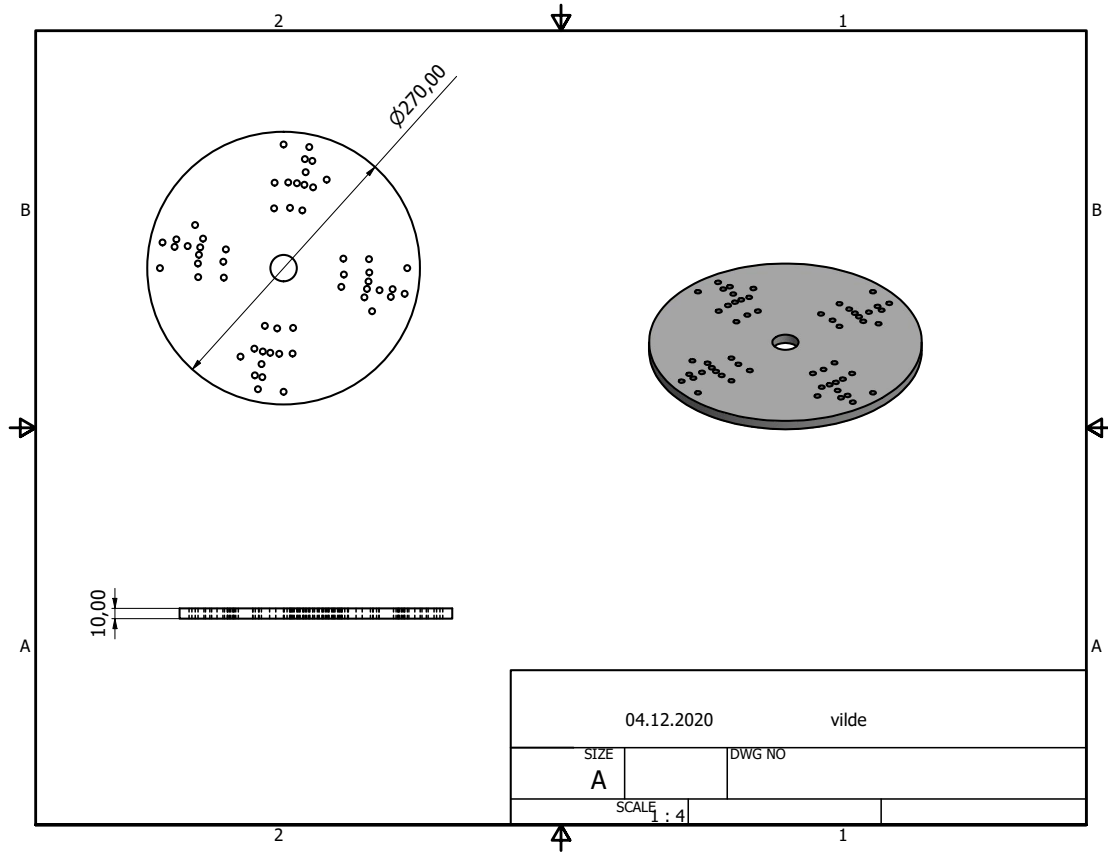
boundaryField
{
    frontAndBack
    {
        type      empty;
    }
    airfoil
    {
        type      nutUSpaldingWallFunction;
        value     uniform 0;
    }
    topAndBottom
    {
        type      symmetry;
    }
    farfield
    {
        type      freestream;
        freestreamValue uniform 0.000001;
        value     uniform 0.000001;
    }
}

// ***** //
```

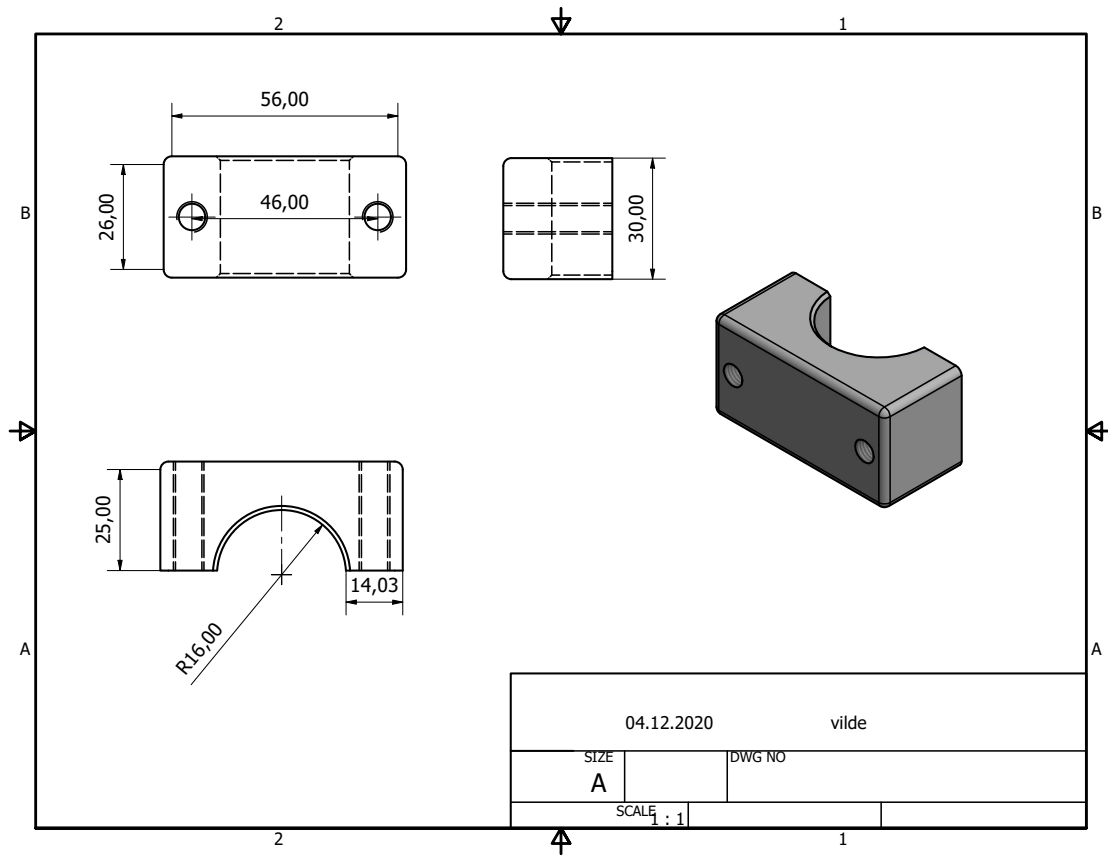


# D : Tekniske tegninger og 3D-modeller

## D.1 Toppfeste underdel



## D.2 Klemme til Aluflex profil 6



**D.3 3D-modell av ferdigstilt testrigg**

