

# ADDED MASS FORSKYVNING AV EGENFREKVENSER

ADDED MASS EFFECT ON THE NATURAL FREQUENCY

OLE PETTER DIRDAL MOXNES

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP

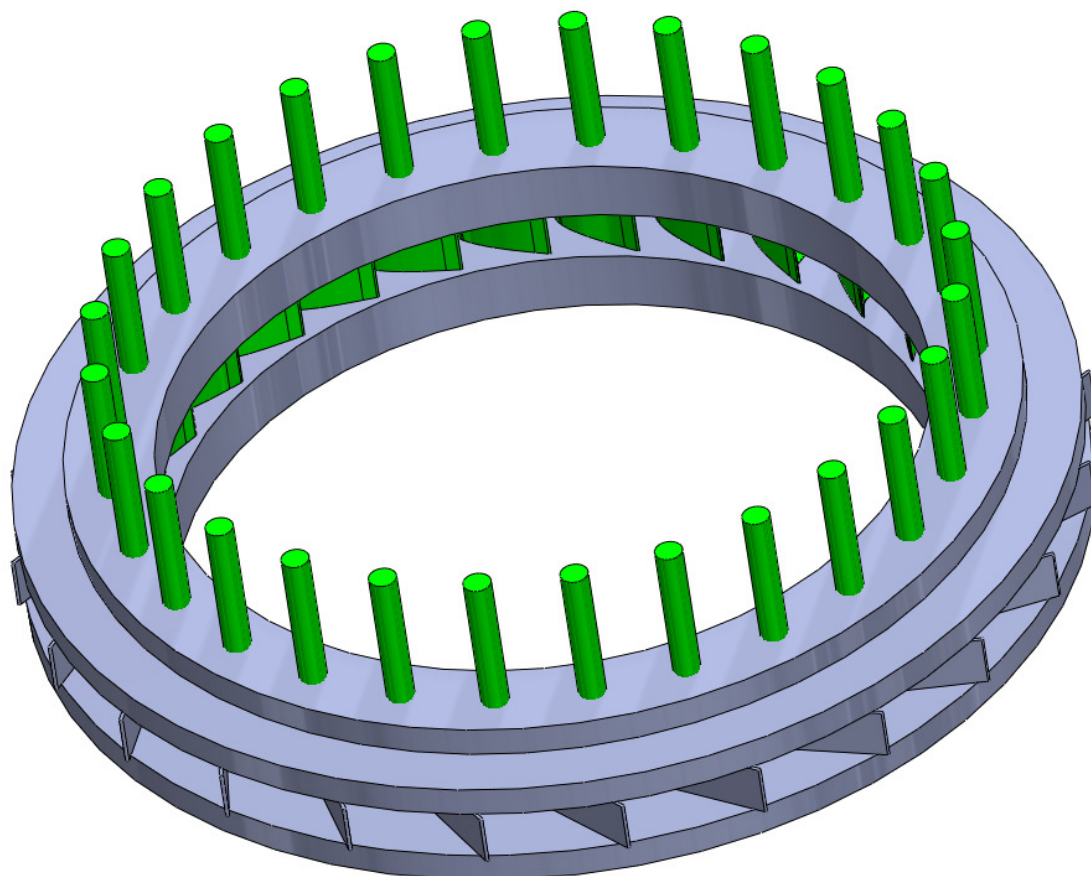
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI (IMT)  
MAS TEROPPGAVE 30 STP. 2011



# Added mass forskyvning av egenfrekvenser

Av.

**Ole Petter Dirdal Moxnes**



**Masteroppgave**

**Institutt for matematiske realfag og teknologi, UMB**

**Våren 2011**



## FORORD

---

Denne masteroppgaven er skrevet ved Universitet for Miljø og Biovitenskap (UMB), ved avdeling, Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT). Oppgaven har et omfang på 30 Studiepoeng, og er skrevet våren 2011 av Ole Petter Dirdal Moxnes.

Oppgaven har innslag av både hydrodynamikk og strukturberegninger. Oppgaven har fotfeste innenfor fornybar energi og problemstillinger knyttet til ledeskovlen i Francis-turbiner. Oppgaven handler spesifikt om forskjellen mellom egenfrekvensene til ledeskovlen i luft og vann. Beregningene er gjort ved hjelp av sammenkoblinger mellom ANSYS Transient structural og ANSYS CFX.

Koblinger mellom væske og struktur har lenge vært et problematisk område, men det har i det siste kommet beregningsprogrammer som gjør disse problemene lettere å løse. Noen av områdene som har disse problemene er; offshore vindturbiner, skip, oljeplattformer undervannsanlegg for olje og gass samt innenfor vannkraft. Det er derfor en problemstilling som man kan komme til å møte i mange forskjellige fagfelt. Dette gjelder spesielt i Norge hvor veldig mange av jobbene nettopp er knyttet opp mot disse fagfeltene. Det hadde derfor vært interessant å kunne lære mer om disse problemstillingene for og lettere kunne bli forberedt til arbeidslivet.

Jeg ønsker å takke mine eksterne veiledere på Rainpower ASA på Kjeller, Sverre Dahl Knutsen og Herbjørn Stenberg, for bra tilbakemelding på mine spørsmål og for å ha gitt meg initialbetingelser for å kunne gjennomføre oppgaven i henhold til deres og mine ønsker. Jeg ønsker også å takke min interne veileder på UMB, Jan Kåre Bøe for innspill på rapporten og generelle spørsmål underveis i prosjektet. Det rettes også en takk til datatjenesten på UMB for å kunne la krevende simuleringer stå på om natten.

Ås, den 14. Mai 2011

---

Ole Petter Dirdal Moxnes



## SAMMENDRAG

---

Denne masteroppgaven omhandler problemer knyttet til resonans i ledeskovlen i Francis-turbiner. Resonans er et problematisk område innenfor vannkraft, da det kan føre til store ødeleggelser i turbinen.

Det har blitt skrevet en del om tidligere arbeid som er gjort innenfor dette fagfeltet, og sentrale artikler i oppgaven er blant annet forskning gjort ved NTNU i Trondheim og ved universitet i Lausanne i Sveits.

I denne masteroppgaven er det sett på fem forskjellige lastsituasjoner. Disse er; ledeskovlen i stillestående luft, stillestående vann, stillestående vann med ekstra trykk på skovlen, strømmende vann og strømmende vann med spesifisert volumstrøm. Trykkamplitudene ble satt til å være på fire % av trykkehøyden i oppgaven. Dette ga synlige forskjeller mellom de ulike situasjonene. Den pulserende kraften ble satt på som en sinusamplitude på bladet til skovlen og det ble kjørt sju sykluser på hver frekvens i de ulike tilfellene.

Egenfrekvensen til ledeskovlen ble først funnet ved hjelp av modal modulen i ANSYS, til å være på cirka 291 Hz i luft. Ved hjelp av CFX ble egenfrekvensen funnet til å ligge mellom 280 og 295 Hz i luft. Når skovlen så ble satt i stillestående vann ble egenfrekvensen funnet å være rundt 267 Hz. Når skovlen fikk en ekstra konstant last ble det ikke funnet noen spesielle tegn som kan tyde på resonans. Når skovlen ble satt i vann fikk skovlen større deformasjon jo større hastigheten på vannet var. Det ble heller ikke her funnet noen spesielle tegn til at det kunne ble resonansproblemer i ledeskovlen.

I det siste forsøket ble det satt på en volumstrøm på  $0,45 \text{ m}^3/\text{sek}$ , og det ble spesifisert korrekte størrelser på domene. Det ble funnet en maks deformasjon på cirka 2,5 mm etter at den syvende syklusen ble kjørt det var størst deformasjon når frekvensen var i nærheten av 267 Hz. Dette kan være litt farlig siden det er den frekvensen som blir generert fra løpehjulet. Det virker som om ledeskovlen blir stående å oscillere rundt en deformasjon på 2 mm men deformasjonen viser ingen synlige tegn til å øke etter som om det blir kjørt flere sykluser.

Det virker derfor ikke som om det er noen spesielle grunner til at resonans skal oppstå ved bruk av denne ledeskovlen.



## SUMMARY

---

This Master Thesis involves problems attributed to resonance in the guided vanes of The Francis Turbine. Resonance is a problematic area in hydropower because it can cause major damage to the turbine.

This thesis has documented previous work done in this field. Key articles exhibited in this thesis include the research done at NTNU in Trondheim and The University of Lausanne in Switzerland.

Five different load situations have been analyzed in this thesis. These situations include: guided vane in stagnant air, guided vane in stagnant water, guided vane in stagnant water with extra pressure on the guided vane blade, guided vane in flowing water and guided vane in flowing water with specified mass flow rate. The pressure amplitudes in this thesis were set to four percent of the total available head. This resulted in visible differences between the five situations. The pulsating force was placed on as sinus amplitudes on the guided vane blade. Seven cycles were calculated for each frequency in the five different cases.

The Natural Frequency of the guided vane was first found by using the “modal module” setup in ANSYS. This module calculated the natural frequency to be approximately 291 Hz in air. By using ANSYS CFX the natural frequency was found to be between 280 and 295 Hz. When the guided vane was placed in stagnant water, the natural frequency was found to be around 267 Hz. When the guided vane was subjected to an extra constant load, no detailed indication of resonance was detected. Whilst the guided vane was subjected to water flow it deformed and increased in size as water velocity increased. No sign of resonance was detected here, in the guided vane either.

A mass flow rate of  $0,45 \text{ m}^3/\text{s}$  was used in the final experiment with the correct sizes of The Fluid Domain. A maximum deformation of approximately 2,5 mm was detected after the seventh cycle. The maximum deformation found on the guided vane was close to a frequency of 267 Hz. This can be a slightly dangerous since it is the same frequency which is generated from the runner. It seems that the guided vane oscillated around a deformation of 2 mm. The guided vane shows no visible signs of increasing in deformation whilst the number of cycles increases.

It seems therefore to be no visible signs that resonance will occur when using this guided vane.



# INNHALDSFORTEGNELSE

|                                           | Side |
|-------------------------------------------|------|
| FORORD .....                              | i    |
| SAMMENDRAG.....                           | ii   |
| SUMMARY .....                             | iii  |
| INNHALDSFORTEGNELSE .....                 | iv   |
| 1. INNLEDNING .....                       | 1    |
| 1.1. Vannkraft i Norge og verden.....     | 1    |
| 1.2. Problemområder ved turbiner.....     | 3    |
| 1.3. Problemstilling .....                | 4    |
| 1.4. Målsettinger og Begrensninger .....  | 5    |
| 1.4.1. Hovedmål.....                      | 5    |
| 1.4.2. Delmål.....                        | 5    |
| 1.4.3. Begrensninger .....                | 6    |
| 1.5. Arbeidsplan .....                    | 7    |
| 1.6. Om Rainpower .....                   | 8    |
| 2. SYMBOLER OG TERMINOLOGI.....           | 9    |
| 2.1. Symboler .....                       | 9    |
| 2.2. Forkortelser .....                   | 10   |
| 2.3. Ordforklaringer.....                 | 11   |
| 2.4. Formler.....                         | 12   |
| 3. BAKGRUNNSTEORI .....                   | 13   |
| 3.1. Virkemåte.....                       | 13   |
| 3.1.1. Virkemåte vannkraftanlegg.....     | 13   |
| 3.1.2. Virkemåte Francis-turbin.....      | 16   |
| 3.2. Forklaring av viktige likninger..... | 18   |
| 3.2.1. Bernoullis likning.....            | 18   |
| 3.2.2. Kontinuitetsligningen.....         | 19   |
| 3.3. Trykkpulsasjoner.....                | 20   |
| 3.4. Tidligere arbeid .....               | 21   |
| 3.5. Resonans.....                        | 27   |
| 3.6. Forklaring av FSI-analyser.....      | 29   |
| 4. ANALYSEMETODE OG BEREGNINGSTID .....   | 30   |
| 4.1. Valg av løsningsverktøy.....         | 30   |
| 4.2. Transient Structural .....           | 31   |





|        |                                                        |    |
|--------|--------------------------------------------------------|----|
| 4.3.   | Modal .....                                            | 32 |
| 4.4.   | Fluid Flow (CFX).....                                  | 33 |
| 4.5.   | Komplett Oppsett .....                                 | 34 |
| 4.6.   | Beregningstid .....                                    | 35 |
| 5.     | BEREGNINGSMETODER OG INNSTILLINGER .....               | 36 |
| 5.1.   | Navnsetting av ledeskovl .....                         | 36 |
| 5.2.   | Forutsetninger.....                                    | 36 |
| 5.3.   | Initialbetingelser.....                                | 37 |
| 5.4.1. | Innspenninger og lastpåkjenninger .....                | 38 |
| 5.4.2. | Innstillinger i mesh .....                             | 41 |
| 5.4.3. | Inputvariabler i ANSYS CFX.....                        | 42 |
| 5.4.4. | Input i Modal-analyse .....                            | 45 |
| 5.4.5. | CFX-mesh.....                                          | 45 |
| 5.5.   | Spesifikke innstillinger.....                          | 46 |
| 5.5.1. | Ledeskovl i stillestående luft .....                   | 46 |
| 5.5.2. | Ledeskovl i stillestående vann .....                   | 49 |
| 5.5.3. | Ledeskovl i vann med $2 \cdot 10^6$ Pa på skovlen..... | 50 |
| 5.5.4. | Ledeskovl i vann med volumstrøm.....                   | 50 |
| 5.5.5. | Ledeskovl i vann med riktige randbetingelser .....     | 52 |
| 6.     | RESULTATER.....                                        | 54 |
| 6.1.   | Tolkning av resultater.....                            | 54 |
| 6.2.   | Resultater av egenfrekvensen til ledeskovlen .....     | 55 |
| 6.3.   | Deformasjoner i luft .....                             | 56 |
| 6.4.   | Plot av skovl i vann uten volumstrøm.....              | 59 |
| 6.5.   | Plot av skovl i vann med trykk på skovl .....          | 60 |
| 6.6.   | Plot av skovl i vann med volumstrøm.....               | 61 |
| 6.7.   | Skovl i vann med randbetingelser fra Rainpower. ....   | 62 |
| 7.     | PROSESSDISKUSJON .....                                 | 65 |
| 8.     | KONKLUSJON.....                                        | 68 |
| 8.1.   | Konklusjon av resultater.....                          | 68 |
| 8.2.   | Videre arbeid.....                                     | 70 |
| 9.     | KILDER .....                                           | 71 |
| 9.1.   | Skriftlige kilder .....                                | 71 |
| 9.2.   | Nettkilder.....                                        | 72 |
| 10.    | VEDLEGG.....                                           | 74 |

# 1. INNLEDNING

## 1.1. Vannkraft i Norge og verden

Vannkraft er en energikilde med et stort kraftpotensialet. Et vært land og samfunn er totalt avhengig av energi for å kunne gjøre sine dagligdagse gjøremål og oppgaver. Viktige energibrukere er industri, landbruk, transport samt alle husholdninger gjennom oppvarming varmtvann osv. Av alle fornybare energikilder er vannkraft sett på som en ren industri da den ikke slipper ut forurensning under produksjon av elektrisitet. Vannkraft er også den energikilden som har høyest virkningsgrad under produksjon av elektrisitet [19]. Vannkraftverk blir også bygd robust og et vannkraftverk holder stand i mange år, uten spesielle forbedringer eller store utbedringer[19]. Vannkraft har også den fordelen at den kan produsere energi når andre fornybare kilder ikke kan gjøre det. Eksempler er at vindkraft som bare fungerer på plasser med mye vind, eller solenergi som trenger mye sol. Vannkraft kan dermed brukes som en back-up for disse energikildene [19]. Problemet innenfor vannkraft er at mange av de store utbyggingene i Norge allerede er utbygd. Det gjør at det først og fremst blir snakk om oppgraderinger for å oppnå en høyere virkningsgrad på allerede eksisterende vannkraft. Siden vannet ofte blir lagret i store dammer før det går igjennom turbinen, kan disse dammene virke som en buffer mot store flommer ved at de sakte men sikkert slipper ut vannet igjennom turbinen i stedet for å slippe ut store mengder vann på en gang.

a)



b)



**Figur 1; a) Rørledning fra fjellet og ned til Wilmot power Station [20],**

**b) Damanlegg på fjellet viser hvordan daler blir demt opp for å lagre vann [21]**



Det er også mange miljøvernere som mener at vannkraft ødelegger naturen rundt kraftverket. Eksempler på naturinngrep er; legge fossefall i rør, demmer opp daler, utbygging av veier inn til kraftverket for å komme til med maskiner utstyr osv, ustabile isforhold om vinteren da det kan være store nivåforskjeller på vannet i løpet av vinteren. Fisk kan få ødelagt sine områder for eksempel laks som stopper opp ved kraftstasjoner og demninger.

Den siste store utbyggingen til Statkraft var Svartisen kraftverk i Nordland i 1993 [19]. I den siste tiden har Statkraft kjøpt opp mange utenlandske kraftverk blant annet 58 i Sverige og 11 i Tyskland [19].

Vannkraft har blitt brukt som energikilde i Norge i over 100 år. Norges eldste Francis-turbin med en effekt på over 1 MW, som fremdeles er i bruk befinner seg i Dalsfoss i Telemark. Den ble bygget i 1907 [2]. Francis-turbinen som ble oppfunnet av James B. Francis i USA i 1849[2], har den dag i dag den noenlunde samme virkemåten som den hadde for 100 år siden. Det største vannkraftanlegget i Norge befinner seg i Ulla-førrekraftverket i Suldal kommune i Rogaland, navnet på kraftverket er Kvilldal. Kraftverket har installert totalt fire Francis-turbiner med en samlet effekt på 1480 MW. Årsproduksjonen er på 3000 GWh.

a)



b)



**Figur 2; a) Dalsfoss kraftstasjon [3],**

**b) Fire Francis-turbiner i Kvilldal kraftverk[5]**

Det er et stort press på å redusere verdens CO<sub>2</sub> utslipp. Vannkraft er godt egnet til dette formålet da selve produksjonen av energi skjer uten utslipp av miljøskadelige gasser som for eksempel CO<sub>2</sub>, CO osv. Stadig flere land bygger ut vannkraft og det har i den siste tiden vært store utbygninger i Kina. Kina har et stort prosjekt pågående med navn Three Gorges (tre kløfter). Elva Yangtze skal demmes opp med en 2300 meter lang og 185 meter høy demning. 26 Francis-turbiner ble satt i drift i oktober 2008 og ytterligere 6 turbiner skal settes i drift i 2011. Når alle turbinene er satt i drift kommer kraftverket til å produsere 22 500 MW. Det er nesten like stort som Norges totale produksjon som ligger på cirka 29 500 MW [4].



## 1.2. Problemområder ved turbiner

Turbiner i vannkraftverk får et stadig større press på å kunne produsere mest mulig effekt på en så liten turbin som mulig. Dette på grunn av at en liten turbin bruker mindre materialer og turbinen får dermed en lavere pris. Kunder som bestiller turbiner har også flere produsenter å velge i nå enn før, noe som gjør de mer prisbeviste. Det er også sånn at ved å bruke tynnere og billigere materialer vil prisen på turbinen synke. Men det gjør turbinen mer utsatt for belastninger utenfor optimal volumstrøm. Før i tiden var det mer vanlig at turbinen gikk ved den volumstrømmen som ga høyest mulig virkningsgrad, mens det nå også er ønskelig at den kan produsere strøm langt utenfor området hvor den har høy virkningsgrad. Dette på grunn av at det er ønskelig å produsere mer kraft når prisen er høy og dette tjener man mer penger på selv om virkningsgraden blir lavere. Disse operasjonene utenfor bestpunkt gjør at turbinen blir mer utsatt for interaksjon mellom vannet og strukturen.

Ved en høyere volumstrøm gjennom ledeskovlene vil rotoren bli utsatt for større belastninger og sprekkdannelser i materialet kan bli dannet. Selv ved små påkjenninger kan dette skje da antall belastninger er mange, og det kan dermed bli utmattingsproblemer i løpehjulet eller på ledeskovlen. Francis-turbiner blir blant annet utsatt for trykkpulsasjoner når løpehjulet går rundt, dette på grunn av at rett bak ledeskovlen får vannet en lavere hastighet og dermed ett høyere trykk i følge Bernoullis ligning. Når løpeskovlene passerer igjennom dette trykkfeltet får løpehjulet en større kraft på seg. Dette forårsaker trykkpulsasjoner i turbinen. Amplitudene og frekvensen til disse pulsasjonene varierer etter antall ledeskovler og antall blader, samt rotasjonsfrekvensen til løpehjulet. Det kan også oppstå andre vibrasjoner, disse kan blant annet komme fra Vortex shedding som skjer ved at turbulensen bak ledeskovlen kommer i konflikt med egenfrekvensen til ledeskovlen.

Det er også viktig at turbinen har et langt inspeksjonsintervall, da inspeksjoner og vedlikehold ofte gjør at turbinen må stenges og store inntekter kan gå tapt. Det er også ønskelig å bygge turbiner som kan startes og stoppes raskt, og dermed kunne endre produksjonseffekten, etter strømprisen. Ved vedlikehold og oppgraderinger ønsker man gjerne en større volumstrøm og en større utgående effekt med den samme tilmålte plassen. [13]. Ved ingen forbedring av disse to variablene er det jo ingen grunn til å oppgradere hvis det verken øker effekt, volumstrøm eller minsker faren for ødeleggelse.



### 1.3. Problemstilling

I denne masteroppgaven er det spesielt resonans problemet i Francis-turbiner som skal undersøkes. Hvordan egenfrekvensen til ledeskovlen forandrer seg i vann i forhold til luft. Det kan være at frekvenser som ligger utenfor området til resonansområdet til ledeskovlen kan komme inn i resonansområdet ved hjelp av vannet rundt skovlen.

Vann har en større tetthet enn luft og vannet rundt skovlen kan dermed gjøre at skovlen får en lavere egenfrekvens. Det er ønskelig å se hvor mye vannet sin ekstra masse utgjør på frekvensen til ledeskovlen. Slike analyser kalles for "added mass" da ledeskovlen får en ekstra masse rundt seg som den må flytte på. Da denne massen er vann i stedet for luft kan man si på bakgrunn av tettheten til luft og vann, at denne massen er 1000 ganger større i vann enn den er i luft og det har utvilsomt noe å si på frekvensene.

En annen viktig del av prosjektet er hvordan hastighetene på vannet kan innvirke på egenfrekvensene. Det kan være at når vannet strømmer rundt skovlen så stabiliserer vannet skovlen slik at den likevel ikke kommer i konflikt med egenfrekvensene. Dette skal sjekkes ut nærmere. Disse frekvensene kan på sikt ødelegge turbinen da de forårsaker store vibrasjoner i hele anlegget. Dette kan føre til utmatting av viktige deler i turbinen, eller så kan ødeleggelsene skje mye forttere hvis egenfrekvensen treffes helt nøyaktig.

Støyen i anlegget blir også merkbart høyere. Det kan i ekstreme tilfeller av vibrasjoner på ledeskovlen forårsake en mindre gunstig strømning. Denne strømningen kan redusere virkningsgraden på turbinen.

Ved en viss rotasjonsfrekvens på løpehjulet kan frekvensene forårsaket av løpehjulet kunne komme i nærheten av egenfrekvensen til ledeskovlen. Dette kalles for resonans. Hvis dette skjer kan ledeskovlen få stadig større deformasjoner noe som forandrer strømningen inn mot løpehjulet, og ledeskovlen kan også i det verste tilfelle bli ødelagt av resonansen som kan oppstå.



## 1.4. Målsettinger og Begrensninger

### 1.4.1. Hovedmål

Følgende hovedmål inngår settes for arbeidet i prosjektet

- **Mastergradsarbeidet skal undersøke forskjellen på egenfrekvensen til ledeskovlen hos en Francis-turbin i vann og luft. Dette skal kartlegges og undersøkes ved hjelp av CFD-analyser. Tekniske data og beregningsgrunnlag for ledeskovlen blir gitt av bedriften Rainpower på Kjeller.**

### 1.4.2. Delmål

Følgende delmål inngår i arbeidet med å nå hovedmålsettingen for prosjektet.

- Sette seg grundig inn i resonanspåkjenninger i vannkraftverk.
- Sette seg inn i ny programvare, ANSYS CFX.
- Sette opp koblingene mellom struktur og væske, og få de til å fungere i ANSYS CFX.
- Beregne deformasjoner ved forskjellige frekvenser både i luft og i vann uten volumstrøm.
- Sette på en inngangshastighet på vannet mot skovlen med riktige strømningsvinkler.
- Lage oversiktlig tabell over arbeidet som skal gjøres.
- Skrive et kort sammendrag om Rainpower.
- Forklare viktige ord og uttrykk som inngår i oppgaven.
- Forklare viktige ligninger som inngår i oppgaven.
- Forklare hva resonans er.
- Forklare om FSI-analyser
- Forklare om oppsettet i ANSYS.
- Finne trykkpulsasjoner med bakgrunn i tidligere prosjekter.
- Konstruere figurer og tegninger i SolidWorks.
- Ta ut strømningsplot ved forskjellige tidspunkter for å illustrere deformasjonen.
- Konkludere fra resultatene og finne forskjellen mellom frekvensen i luft og vann.
- Forklare om forbedringer i analysene.
- Skrive om tidligere arbeider innenfor resonanser og added- mass.
- Komme med videre anbefalinger og videre arbeid i prosjektet.
- Konstruksjonstegning av ledeskovlen med viktige mål.



### 1.4.3. Begrensninger

- Det blir ikke sett noe på materialvalg i ledeskovlen, og det forutsettes at skovlen har de samme materialegenskapene som vanlig konstruksjonsstål.
- Det blir ikke definert noen maks godkjent deformasjon, i forhold til standarder betingelser osv.
- CFD-analysene blir ikke kontrollert ved hjelp av håndberegninger da det sees på som veldig vanskelig i denne oppgaven.
- Det blir ikke foreslått noen konstruksjonsoptimalisering da ledeskovlen må passe sammen med mange andre deler i Francis-turbinen og dette blir dermed vanskelig å foreslå noen forandring.
- Det blir ikke sett noe på erosjon i oppgaven da dette ligger utenfor målene i oppgaven oppgaveforfatteren har heller ingen info om størrelse på sandpartikler i vannet osv.
- Det blir heller ikke sett noe på kavitasjon da dette ligger utenfor målsetningen til oppgaven.
- For å kunne få kjørt analysene er det valgt å forenkle oppgaven med å si at volumstrømmen er jevn gjennom turbinen uavhengig av trykkpulsasjonene.
- Det blir verken plottet eller regnet ut deformasjoner i andre retninger enn total deformasjon.
- Det blir ikke tatt hensyn til om skovlen har en utsvingende frekvens eller om den har en vekslende frekvens.
- Det blir bare plottet maks deformasjon ved hvert toppunkt og ikke hele bevegelsen til skovlen.
- Det blir ikke sett noe på hvordan vannet blir fordelt inn mot ledeskovlen fra stagskovlene. Dette fordi at oppgaveforfatteren ikke har tilgang til noen annen geometri enn ledeskovlen. Det blir regnet med at vannet blir fordelt helt jevn rundt hele turbinen og at det blir 1/28 del av vannstrømmen inn mot en ledeskovl.
- Det blir bare målsatt de viktigste målene på ledeskovlen. Formen på bladet til ledeskovlen blir ikke målsatt.



## 1.5. Arbeidsplan

I prosjekter er det viktig å ha en god plan for arbeidet som må gjøres. Har man en god og oversiktlig arbeidsplan går alt mye lettere og det er lettere å disponere tiden riktig. Det er valgt å dele de forskjellige delene som skal skrives i prosjektet inn i ulike delmål i arbeidsplanen. Grønt felt indikerer at gjøremålet pågår og rødt felt indikerer at gjøremålet blir avsluttet den inneværende uken.

Nedenfor er det vist arbeidsplanen som er laget for denne oppgaven. Arbeidsplanen er laget i Excel og deretter limt inn.

**Tabell 1;      Arbeidsplan til prosjektet.**

| Uke nr.                        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
|--------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|
| Gjøremål                       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |   |
| Oppdatering av prosjektrapport |   | █ | █ | █ | █ | █ | █ | █ | █ | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █ |
| Samtale med Rainpower          |   | █ |   |   |   |   | █ |   |   |    |    | █  |    |    |    |    | █  |    |    |   |
| Sette seg inn i ANSYS CFX      |   |   | █ | █ | █ | █ | █ | █ | █ | █  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Beregninger av egen-frekvenser |   |   |   |   |   |   |   | █ | █ | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █ |
| Konkludere fra resultater      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █ |
| Ta ut bilder av deformasjoner  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | █  | █  | █  | █  | █  | █ |
| Konkludere over resultatene    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | █  | █  | █ |
| Renskrive rapport              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | █  | █ |
| Skrive om Resonans-problemer   |   |   |   |   |   |   |   | █ | █ | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █  | █ |
| Skrive om tidligere arbeid     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Lage 2-D tegninger av skovlen  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Møter med veileder på UMB      |   | █ | █ |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Forklare viktige ligninger     |   |   |   | █ | █ | █ | █ | █ | █ |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Forklare FSI-analyser          |   |   |   |   |   |   |   | █ | █ | █  | █  | █  |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Skrive prosessdiskusjon        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Skrive konklusjon              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Videre arbeid                  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |
| Renskrive kilder               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |   |

## 1.6. Om Rainpower

Rainpower er en bedrift med hovedkontor på Kjeller i Akershus. Rainpower driver med virksomheter innenfor fornybar energi og da spesielt vannkraft. Rainpower produserer både Francis-turbiner og Pelton-turbiner. Rainpower har en lang tradisjon i Norge som går helt tilbake til 1853 da Kværner Brug AS ble etablert av Oluf A. Onsum[22]. Den første virksomheten ble etablert i Lodalen i Oslo og var i lang tid eid av Kværner. Den første vannkraftmaskinen ble satt i loelva og leverte blant annet støpte deler til byggeindustrien. Den første turbinen ble tatt i bruk i 1873 og leverte 230 hester med et vannfall på 11 m. De første Pelton og Francis-turbinene ble levert i henholdsvis 1895 og i 1898. I Norge er det vanlig med relativt høye fallhøyder gjerne på mellom 200 og 600 m. Dette resulterte i at Norge ble en stor vannkraft leverandør også internasjonalt. Særlig etter andre verdenskrig ble mange fossefall utbygd da landet skulle reises og optimismen var stor. I den siste tiden har det blitt færre store utbygginger men det kan nevnes blant annet Svartisen kraftverk i Nordland. Der bygger Rainpower komplett turbin, hovedventil og turbinregulator. Turbinens effekt er på 250 MW, noe som gjør det til en av de største vannkraft-utbyggingene i Norge de siste årene. Internasjonalt har de blant annet vært med å bygge ut Courbaisse kraftverket i Frankrike, Binga kraftverket på Filippinene [24], samt tre kløfter-prosjektet i Kina og Guri-prosjektet i Venezuela [23]. Selskapet ble i 2007 kjøpt opp av det norske selskapet NLI, som er eid av investor Børre Nordheim-Larsen. Etter hvert ble vannkraftkompetansen som innebefatter teknologiutvikling, konstruksjon, regulering, med mer samlet under navnet Rainpower ASA. Rainpower har for tiden cirka 300 ansatte. De ansatte er fordelt over Sørumsand, Kjeller, Trondheim og Kina.[22].

a)



b)



**Figur 3;** a) Rainpower sin bygning på Kjeller [25],  
b) Binga kraftverket på Filippinene [24]

## 2. SYMBOLER OG TERMINOLOGI

### 2.1. Symboler

I Tabell 2 blir det listet opp de forskjellige symboler og enheter som er brukt i denne oppgaven.

Tabell 2; Symboler brukt i oppgaven.

| Symbol    | Betydning                     | Enhet             |
|-----------|-------------------------------|-------------------|
| $f$       | Frekvens                      | Hz                |
| $f_n$     | Løpehjulsfrekvens             | Hz                |
| $F_l$     | Løpeskovlfrekvens             | Hz                |
| $F_{led}$ | Ledeskovlfrekvens             | Hz                |
| L,B,H,r   | Lengde, Bredde, Høyde, Radius | mm                |
| $Z_D$     | Deformasjon                   | mm                |
| Q         | Volumstrøm                    | $m^3/s$           |
| P         | Trykk                         | Pa                |
| F         | Kraft                         | N                 |
| -         | Effekt                        | MW                |
| $\rho$    | Tetthet                       | $kg/m^3$          |
| $Z_r$     | Antall løpehjulsskovler       | Stk               |
| n         | Omdreiningshastighet          | o/min             |
| H         | Trykkehøyde                   | m                 |
| t         | Tid                           | Sek               |
| v         | Hastighet                     | m/s               |
| E         | Energi                        | GWh               |
| $L_D$     | Lydtrykk                      | dB                |
| $\alpha$  | Vinkelmål                     | grader            |
| M         | Molarmasse                    | $\frac{kg}{kmol}$ |
| i         | Antall ledeskovl passasjer    | stk               |
| A         | Areal                         | $mm^2$            |
| $\omega$  | Vinkelhastighet               | Rad/sek           |

## 2.2. Forkortelser

I Tabell 3 blir det listet opp forskjellige forkortelser som blir brukt i oppgaven.

**Tabell 3; Forkortelser som blir brukt i oppgaven**

|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>UMB</b>   | Universitetet for Miljø og Biovitenskap, studiestedet hvor denne oppgaven er levert.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>IMT</b>   | Institutt for Matematiske realfag og Teknologi, en avdeling på UMB som oppgaveforfatteren tilhører.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>NTNU</b>  | Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet. Norges største studiested for ingeniører og teknologiske fag, beliggenhet i Trondheim.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>FEM</b>   | Står for Fenite Element Method og er en numerisk metode for å finne deformasjoner og spenninger i materialet ved hjelp av datamaskiner. Dette gjør at man ofte slipper å teste modellen fysisk og dermed kan spare produksjonskostnader. Man har også muligheter til å definere områder i strukturen hvor man vil at programmet skal regne mer nøye. Ved å spesifisere slike områder sparer man tid om man skulle ha regnet nøye over hele strukturen. |
| <b>ANSYS</b> | Beregningsprogram som blant annet beregner krefter og spenninger og baserer seg på FEM metoden. Beregner alt fra statiske, transiente og varme beregninger samt egenfrekvenser.                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>CFD</b>   | Står for Computational Fluid Dynamics, og betyr strømningsanalyse ved hjelp av dataverktøy.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>CSD</b>   | Står for Computational Structural Dynamics og er dermed en forkortelse for vanlig struktur analyse                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>CTD</b>   | Står for Computational Thermal Dynamics og er dermed en forkortelse for analyser hvor det er inkludert varme. Det kan være at strukturen blir varm og dermed blir utvidet dette fører til vame-spenninger i materialet                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>CFX</b>   | Er et CFD program utgitt av ANSYS, Inc. Er at av de mest brukte programmene til CFD-analyser på grunn av sin gode kompabilitet med andre moduler hos ANSYS. Programmet blir brukt til alt fra; gassturbiner, vannkraftverk, flysimuleringer, pumper, vifter og forbrenningsprosesser.                                                                                                                                                                  |
| <b>FSI</b>   | Står for Fluid-Structure Interaction, altså en interaksjon mellom strømming og struktur. Blir forklart mer senere i oppgaven.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |


**Table 3; forts.**

|            |                                                                                                                                                                                                             |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>WB</b>  | Står for <b>WorkBench</b> . WorkBench er der hvor alle de forskjellige ANSYS modulene kobles sammen til et stort prosjekt.                                                                                  |
| <b>NVE</b> | Noregs vassdrag-og energidirektorat. Ble grunnlagt i 1921 og er underlagt Olje- og energidepartementet. NVE har som oppgave å forvalte vann og energiressursjene i Norge.                                   |
| <b>DM</b>  | Står for <b>DesignModeler</b> . Denne operasjonen brukes av ANSYS for å forbrede delene til analysen. Det kan for eksempel være at man vil fylle rør med væske eller at man vil trekke en del fra en annen. |
| <b>RMS</b> | Står for <b>Root Mean Square</b> , betyr at det er en middelvei i ANSYS løsningsmodulen som blir plottet.                                                                                                   |
| <b>NTH</b> | Det gamle navnet til NTNU, ble til NTNU i 1996.                                                                                                                                                             |

## 2.3. Ordforklaringer

Nedenfor blir det forklart viktige ord som man kommer til å lese om i oppgaven

**Tabell 4; Ordforklaringer som blir brukt i oppgaven**

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Mesh</b>      | Her definerer man ved hvilke punkter ANSYS skal regne mer nøye. Et finere mesh vil gi en mer nøyaktig løsning men krever også lengre beregningstid. Det blir dermed et kompromiss mellom løsningstid og nøyaktighet. Et mesh ser ut som et rutenett og består av mange elementer og noder. Det finnes mange forskjellige mesh ettersom hva man skal beregne. Noen eksempler er firkant eller tetraeder mesh. |
| <b>Modal:</b>    | Er det samme som en egenfrekvensanalyse.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Transient</b> | Laster som varierer med tiden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Bestpunkt</b> | Punktet hvor turbinen har høyest virkningsgrad.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>TimeStep</b>  | Punkter som ANSYS regner ut. i CFX analysen. Det er i denne oppgaven definert 100 slike punkter.                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>K-epsilon</b> | En av de mest brukte variablene for å kunne plote turbulens i væskestrømmer.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Plot</b>      | En figur som for eksempel viser spenninger eller deformasjoner som er funnet i ANSYS.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |



**Tabell 4; forts.**

|                      |                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Domene</b>        | En avgrensning av beregningsområdet til CFX analysen. Et domene kan være en firkant formet kasse som omgir ledeskovlen med væske på alle kanter. Et stort domene gir ofte mer nøyaktige resultater men analysen tar lenger tid. |
| <b>Hydrodynamikk</b> | Er læren om væsker og gassers bevegelse. Kontinuitetslikningen og Bernoullis ligning er den grunnleggende teorien.                                                                                                              |
| <b>added-mass</b>    | Er et uttrykk for at vannet har en større masse enn luft noe som kan ha en innvirkning på egenfrekvensen til ledeskovlen.                                                                                                       |

## 2.4. Formler

Nedenfor følger viktige formler som blir brukt i oppgaven.

**Tabell 5; Viktige former som blir brukt i oppgaven**

| Navn                     | Formel                                                                                                                | Indeksnummer |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Rotasjonsfrekvens        | $f_b = \frac{z_r \cdot n_r}{60}$                                                                                      | (3.4.1)      |
| Von Karman frekvens      | $f = 0,19 \cdot \frac{B}{100} \cdot \frac{c}{(t + 0,56)} \text{ Hz}$                                                  | (3.4.2)      |
| Bernoullis ligning       | $\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + Z_2$ | (3.2.1.1)    |
| Kontinuitetslikningen    | $Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$                                                                                   | (3.2.2.1)    |
| Volumstrøm per ledeskovl | $Q^*_k = \frac{Q^*}{i}$                                                                                               | (5.5.5.1)    |
| Størrelse på domene      | $s = \frac{360^0}{i}$                                                                                                 | (5.5.5.2)    |
| Løpehjulsfrekvensen      | $f_n = \frac{n_r}{60}$                                                                                                | (3.3.1)      |
| Ledeskovlfrekvensen      | $f_{led} = f_n \cdot Z$                                                                                               | (3.3.2)      |
| Sugerørsvirvelfrekvens   | $\frac{f_n}{3,6} \leq f_r \leq \frac{f_n}{3}$                                                                         | (3.3.3)      |

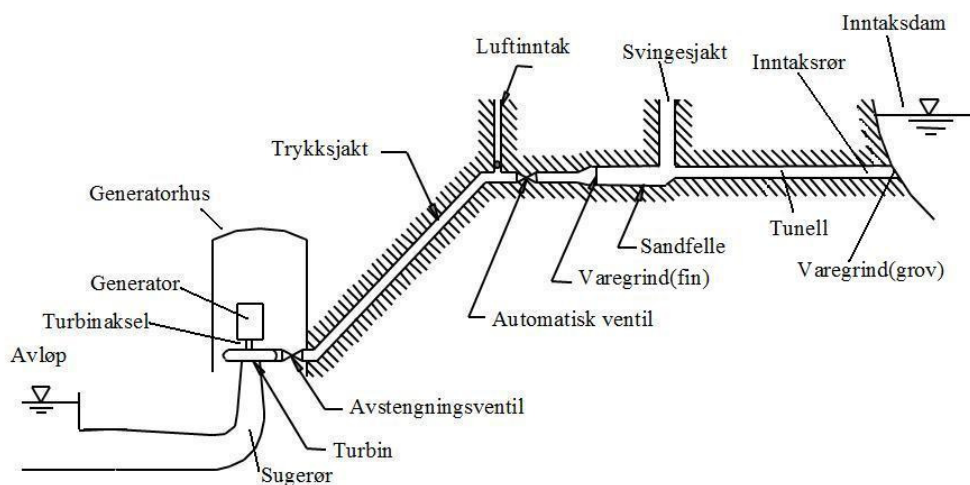
## 3. BAKGRUNNSTEORI

### 3.1. Virkemåte

I de påfølgende to underkapitlene blir det forklart hvordan en Francis-turbin fungerer. Det blir først forklart generelt om hele kraftverket fra inntaksdam til avløpet, før det i det neste avsnittet blir forklart mer spesifikt om hvordan selve turbinen i kraftverket fungerer.

#### 3.1.1. Virkemåte vannkraftanlegg

For og lettere kunne forstå hva som skjer videre i oppgaven er det valgt å gi en liten innføring i generelle deler i et vannkraftanlegg. For de som vet litt om vannkraft fra før anbefales det å gå rett til kapittelet; Virkemåte Francis-turbin. Nedenfor ser man et tverrsnitt av et vanlig vannkraftanlegg. Det finns mange forskjellige typer anlegg og mange anlegg har forskjellige løsninger, spesielt på hvordan man får bort uønskete ting som flyter i vannet, før det går ned i trykksjakten. På Figur 4 følger en forklaring på de forskjellige delene i et vanlig vannkraftanlegg.



**Figur 4;**      **Navn på viktige deler i et vannkraftanlegg**

#### - **Inntaksdam;**

Her blir vannet demmet opp og lagret før det går gjennom vannkraftanlegget. Da det i Norge og ellers i verden er store forskjeller i hvilke måneder det er mest nedbør bidrar dammen til at det kan genereres strøm hele året. I Norge har man typisk mest vann i inntaksdammen om høsten når det har regnet mye og da det i Norge er mindre bruk for strøm om sommeren. Deretter kan man tappe ned inntaksdammen gjennom vinteren når man har behov for mye strøm. Dette kalles sesongregulering.



- **Varegrind;**

Her blir det filtrert bort ting som ligger i vannet som man ikke ønsker at skal komme ned i turbinen. Det kan være trær, planker avfall, is, fisk osv. Det er to forskjellige grinder, først en grov der det groveste søppelet blir filtrert ut, så en finere litt lenger inn i tunellen. Når varegrinda er full, bruker man ofte spesialmonterte skuffer som drar ut det uønskede avfallet og tømmer det på land.

- **Inntaksrør;**

Har som oppgave å frakte alt vann som skal brukes i vannkraftanlegget inn mot sandfella og den finere varegrinda. Inntaksrøret har en grov varegrind i front for å få bort de store tingene som kan skade turbinen alvorlig.

- **Tunell;**

Frakter vannet til et sted som trykksjakten kan starte fra. Det er ikke ved alle anlegg at starten på trykksjakten ligger helt ved inntaksdammen.

- **Sandfelle;**

Har som oppgave å filtrere ut sand som kommer innblandet i vannet. Det gjøres ved at vannet får et lite opphold i sandfella slik at sanden faller til bunns i fella. Det kan deretter hentes ut med jevne mellomrom. Norge har mindre problemer med sand enn andre land da Norge ikke har monsunregn som fører med seg enorme mengder med sandpartikler i vannet.

- **Automatisk ventil;**

Skal lukke seg automatisk hvis farten på vannet går over en viss grense. Det kan være ved for eksempel brudd på enten trykksjakten eller inntaksrøret. Turbinen tåler ikke en for stor omdreiningshastighet i forhold til det som den er laget for. Ventilen skal derfor forhindre at turbinen kommer ut av kontroll. Ventilen sitter like etter svingesjakten.

- **Svingesjakt;**

Ved hurtig lukking av ventilene i anlegget, vil det forekomme en økning av trykket. Dette kalles ofte for trykkstøt. Trykkstøtene kan være meget kraftige, så det er det svingesjakten skal forhindre. Trykkstøtet blir redusert ved at vannet svinger opp og ned i svingesjakten etter at ventilen har blitt lukket. Etter en stund vil friksjonen i røret til svingesjakten stoppe sjokkbølgen som har forplantet seg i systemet.



- **Luftinntak;**

Brukes ved tømning av trykksjakten, hvis det skulle være behov for reparasjoner i sjakten eller i turbinen.

- **Trykksjakt;**

Vannet strømmer i trykksjakten ned mot turbinen. Dette er en viktig del av et vannkraftanlegg. Sjakten sprenges ut inne i fjellet før det blir lagt inn rør som ofte er laget av sveisete stålplater. I mellom stålrøret og fjellet blir det ofte lagt et tjukt lag med betong. Sjakten kan også bli lagt i åpent terreng på utsiden av fjellsiden. Dette gir en billigere løsning, men ser ikke så pent ut i naturen.

- **Avstengningsventil;**

Avstengningsventilen stenger av vannstrømmen hvis det skal utføres reparasjoner på turbinen. Er ofte utført som en "butterfly" ventil. En butterfly ventil vil si en ventil som er formet som en plate og roterer 90 grader for helt avstenging i forhold til å være helt åpen. Avstengningsventilen sitter like før selve turbinen. Hvis turbinen er satt under vannoverflaten til avløpsvannet, må det også monteres en ventil på avløpssiden av turbinen.

- **Turbin;**

Er der hvor vannet sin hastighet og trykkenalergi går over til mekanisk energi ved å drive en rotor rundt. Turbinen er en svært viktig del av et vannkraftverk. Det finns i hovedsak to ulike turbiner til bruk i slike anlegg, de er; Francis-turbiner eller Pelton-turbiner. Pelton ved store høyder og liten volumstrøm, og Francis ved lavere høyder og høyere volumstrøm.

- **Generatorhus;**

Huset som generatoren står i, for å beskytte mot vær og vind.

- **Generator;**

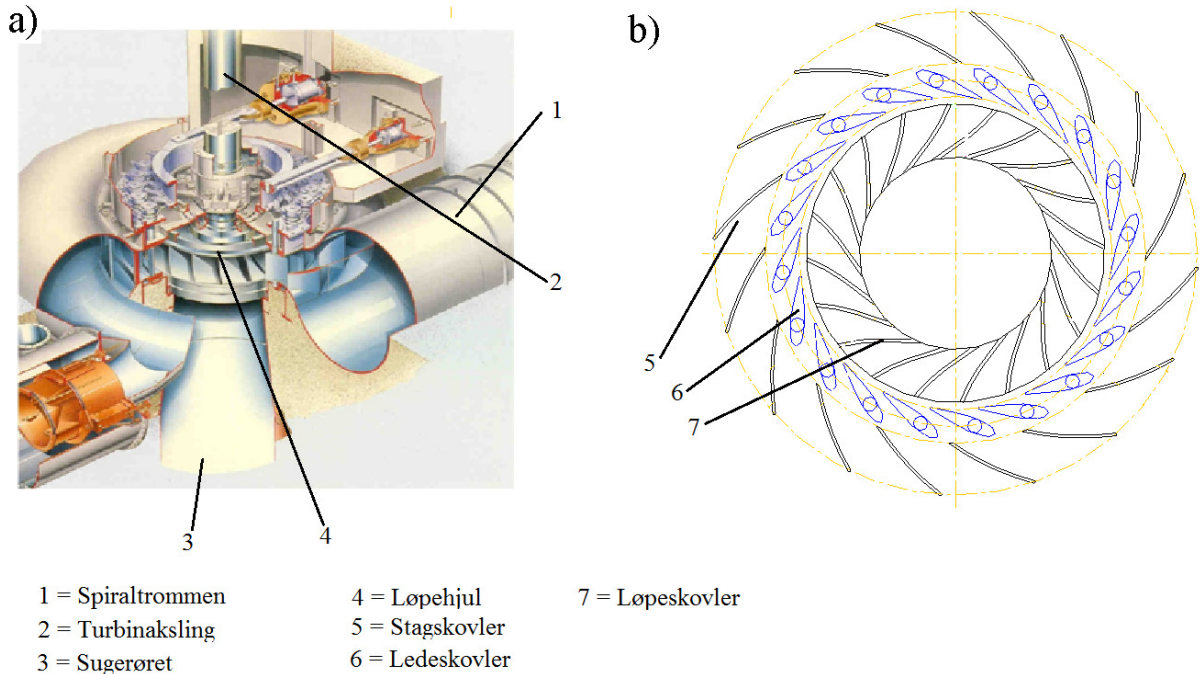
Delen som genererer strøm ut av den mekaniske energien til turbinen. Generatoren sender så strømmen ut på ledningsnettet. Generatoren roterer med et fast omdreiningstall som er avhengig av antall polpar generatoren har, og med hvilken frekvens strømmen skal leveres med

- **Avløp;**

Vannet strømmer ut i avløpet etter at det har vært igjennom sugerøret i turbinen.

### 3.1.2. Virkemåte Francis-turbin

Det er valgt å gi en kort innføring i hvordan Francis-turbinen virker for at det skal bli lettere å skjønne hva som blir gjort videre i oppgaven. De viktigste delene i en Francis-turbin blir gjennomgått nedenfor.



**Figur 5;**      a) Snitt av Francis-turbin, [8]

b) Snitt av skovler i en Francis-turbin. [8]

- **Spiraltrommen;**

Spiraltrommen er en fortsettelse av trykksjakten. Spiraltrommen har som oppgave å lede vannet med like stor volumstrøm rundt hele turbinen. Da det stadig er noe av vannet som går ut av spiraltrommen og gjennom stagskovlene, blir tverrsnittet i trommen stadig mindre, etter hvert som vannet blir ledet rundt turbinen. Det gjør at vannet treffer løpehjulsskovlene med lik hastighet fra alle steder i spiraltrommen. Dette er viktig for å oppnå maksimal virkningsgrad i turbinen.

- **Turbinaksel;**

Turbinakselen er koblet sammen med løpehjulet og overfører dreiemomentet fra løpehjulet og inn i generatoren. Slik at det kan produseres elektrisitet i generatoren.

- **Sugerør;**

Sugerøret har som oppgave å lede bort vannet fra undersiden av løpehjulet og ut fra vannkraftanlegget.



- **Stagskovler;**

Disse skovlene sitter på innsiden av spiralrommet og bidrar til å fordele vannet jevnt utover turbinen. På grunn av utformingen på skovlene får vannet en akselerasjon gjennom passasjen mellom to skovler.

- **Lederskovler;**

Lederskovlene kan reguleres slik at man kan kjøre vannkraftverket med ulike volumstrømmer. Når lederskovlene er helt lukket får ikke vannet noen forbindelse med løpehjulet og det produseres dermed ingen strøm. Typiske åpningsvinkler er mellom 0 og 40 grader. Der 0 grader vil si at skovlene stenger vannet ute. Lederskovlen i denne oppgaven har en maksimal virkningsgrad ved cirka 11 graders åpningsvinkel [10].

- **Løpeskovler;**

Løpeskovlene er skovlene som sitter på selve løpehjulet. Disse er faste og kan ikke justeres. Vinkelen på skovlene er meget viktig for å kunne få ut en så stor virkningsgrad som overhodet mulig. Det er utformingen på disse skovlene som har mest å si for å få en så stor virkningsgrad som mulig.

- **Løpehjulet;**

Løpehjulet spinner rundt inne i midten av turbinen. Løpehjulet blir truffet av vannet dermed blir løpehjulet dratt rundt ved hjelp av trykkforskjellen på hver side av løpeskovlen. Det er derfor ikke kraften fra vannet som forårsaker et moment på skovlen men mer som et "flyvingeprinsipp". På Figur 6 er det vist et nærbilde av løpehjulet til Francis-turbinen. Vannet kommer inn radielt på toppen av turbinen og kommer ut på nedsiden av løpehjulsbladene.



**Figur 6;**

**Nærbilde av Løpehjulet til Francis-turbinen sett fra undersiden [9]**



## 3.2. Forklaring av viktige likninger

Nedenfor følger en forklaring av to viktige ligninger innenfor hydrodynamikken. De kalles for Bernoullis ligning og for kontinuitetsligningen.

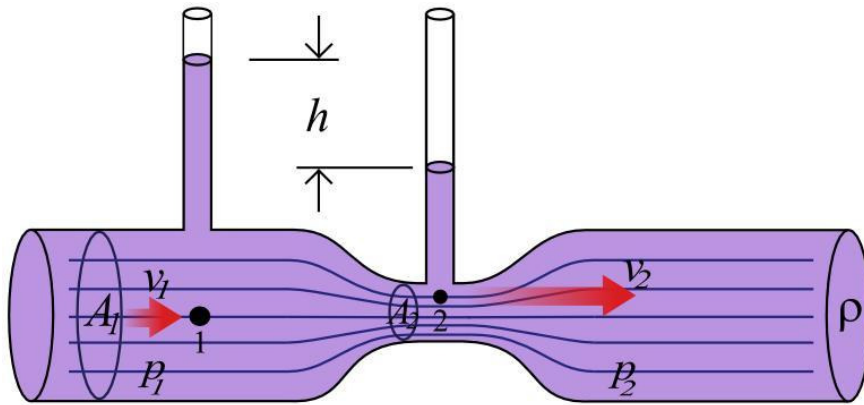
### 3.2.1. Bernoullis likning

Bernoullis likning sier at summen av energi i en gitt masse vil være konstant hele tiden. Det vil si at hvis trykket i væsken øker vil hastigheten minke, og omvendt. Dette er en likning som er veldig mye brukt innenfor hydrodynamikken. Selve prinsippet er oppkalt etter den sveitiske vitenskapsmannen, Daniel Bernoulli. Likningen kan skrives på tre forskjellige former, de er; trykkform, hastighetsform eller energiform. I vannkraftverk hvor man ofte har en gitt fallhøyde vil det være lettest å skrive den på høydeform. Dette er gjort i ligning (3.2.1.1) nedenfor.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + Z_2 \quad (3.2.1.1)$$

Der;  $P$  er trykket i væsken,  $\rho$  massetettheten til væsken,  $g$  er tyngdens akselerasjon,  $v$  er hastigheten til vannet og  $Z$  er høyden til vannet over referansepunktet. Indeks 1 og 2 representerer henholdsvis ved punkt 1 og 2 i væsken.

Det første leddet blir kalt for trykkhøyden, det andre leddet blir kalt for hastighetshøyde og det tredje leddet blir kalt for stedshøyde. Bernoullis likning kan også brukes til å måle trykket eller hastigheten i væske eller luftstrømmer. Hvis man har behov for å måle hastigheten ved et punkt kan man strupe arealet, dermed synker trykket. Deretter kan man regne seg frem til hastigheten. Dette kalles for et venturimeter, og er mye i bruk innenfor flyindustrien. Innenfor flyindustrien er bernoullis effekt med på å gi en vinge oppdrift. Dette skjer fordi at en flyvinge er formet som et dråpeprofil slik at oversiden på vingen er mer buet enn på undersiden. Dette fører til at luften på oversiden av vingen får en høyere hastighet på grunn av at luften må ta en lenger vei enn på undersiden av vingen. En høyere hastighet fører igjen til et lavere trykk. På undersiden blir det en relativt lavere hastighet og dermed et høyere trykk dette gjør at flyvingen blir presset oppover. Se Figur 7 nedenfor for en illustrasjon av prinsippet bak et venturimeter.



**Figur 7;** Venturimeter der vannet kommer inn fra venstre mot høyre. Ved punkt 1 er det større tverrsnittsareal og lavere hastighet det gir ett høyere trykk enn i innsnevringen ved punkt 2, der tverrsnittsarealet er betydelig mindre noe som gir en høyere hastighet og et lavere trykk i væsken. [26]

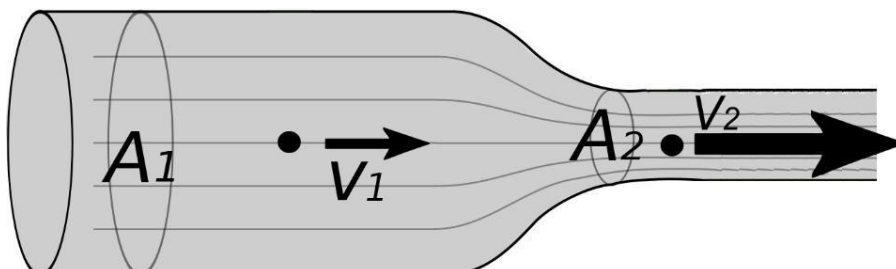
### 3.2.2. Kontinuitetsligningen

Kontinuitetsligningen sier at i en gitt væskestrøm i et gitt volum kan bare volumet endre seg ved at væske går inn eller ut av domene. Dette forutsetter at væsken er inkompressibel slik som væsker blir regnet for å være. Dette fører til at volumstrømmen i for eksempel et rør er konstant. Dette gjør at man kan finne hastigheter hvor som helst i røret bare man vet volumstrømmen eller tverrsnittsarealet. Se kontinuitetsligningen nedenfor.

$$Q = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (3.2.2.1)$$

Der;  $Q$  er volumstrømmen,  $v$  er hastigheten på væsken,  $A$  er tverrsnittsarealet i væskestrømmen, indeks 1 og 2 representerer ulike målesteder i væskestrømmen.

Se Figur 8 for en illustrasjon av ligningen.



**Figur 8;** Kontinuitetsligningen, Væsken kommer fra venstre mot høyre og tverrsnittet blir så strupet ned ved punkt 2. Volumstrømmen er den samme noe som fører til høyere hastighet [27]



### 3.3. Trykkpulsasjoner

Nedenfor blir det forklart tre viktige frekvenser som gir trykkpulsasjoner som kan være farlige for turbinen. De er i følge Haugen [29], løpehjulsfrekvensen, ledeskovlfrekvensen og sugerørsvirvelfrekvensen. Disse frekvensene blir forklart i detalj nedenfor.

#### - Løpehjulsfrekvensen

Løpehjulet kan bli skadet under drift. Det kan blant annet komme uønskete ting nedover i trykksjakten eller det kan løsne ting i turbinen som kan ødelegge løpehjulsbladene, eller at akselen til generatoren er blitt skjev slik at løpehjulet får kast i seg. Siden denne skaden skjer ved kun ett punkt på løpehjulet vil frekvensen til denne trykkpulsasjonen skje en gang for hver omdreining av løpehjulet. Denne ligning (3.3.1) nedenfor.

$$f_n = \frac{n_r}{60} \quad (3.3.1)$$

Der;  $f_n$  er løpehjulsfrekvensen, og  $n_r$  er omdreiningshastigheten til løpehjulet

#### - Ledeskovlfrekvensen

Disse frekvensene blir dannet ved at ledeskovlene får en trykkvake bak tuppen på skovlen på grunn av vannstrømmen. For hver ledeskovl vil det være en trykkvake. Løpehjulsbladene roterer inn i denne vaken for hver gang de passerer en skovl. Det er denne frekvensen som blir analysert nærmere i oppgaven. Se formel (3.3.2)

$$f_{led} = f_n \cdot Z \quad (3.3.2)$$

Der,  $f_{led}$  er ledeskovlfrekvensen,  $f_n$  er løpehjulsfrekvensen, og  $z$  er antall ledeskovler

#### - Sugørsvirvelfrekvensen

Frekvensen oppstår i sugerøret i turbinen, altså etter at vannet har gått igjennom løpehjulet. Det dannes ved at vannet har en for stor hastighet etter at det har forlatt turbinen, og dermed et lavere trykk. Det fører til undertrykk i vannet og det blir dannet bobler. Disse boblene kan danne en virvelform som igjen kan slå bort i veggene i sugerøret. Frekvensen ligger ofte rundt en tredjedel av omdreiningshastigheten i følge [17]. Se likning (3.3.3) nedenfor.

$$\frac{f_n}{3,6} \leq f_r \leq \frac{f_n}{3} \quad (3.3.3)$$

Der;  $f_n$  er løpehjulsfrekvensen og  $f_r$  er sugerørsvirvelfrekvensen.



### 3.4. Tidligere arbeid

**Ø. Antonsen, T. K. Nielsen, O. G. Dahlhaug og J. T. Billdal. Pressure pulses in francis turbines vs. Guide vane design. [1].**

I denne oppgaven forsøker de å finne størrelsen på trykkpulsasjonene som skapes ved utgangen av ledeskovlene og inngangen til løpehjulet, i en modell som er laget i vannkraftlaboratoriet til NTNU i Trondheim. Resultatene fra testene viste at i dette området var den dominante frekvensen fra løpehjulet som forårsaket trykkpulsasjonene bak ledeskovlen.

Ved små endringer på ledeskovlen eller stagskovler ble ikke resultatene endret i noe særlig stor grad. Eksperimentet ble gjort på en Francis-turbin med 23 stagskovler, 23 ledeskovler og med et løpehjul med 15 løpeskovler. Piezoelektriske sensorer ble montert mellom utløpet ved løpeskovlen og innløpet til løpehjulet. Disse sensorene er små og fungerer ved at de genererer en elektrisk spenning når de blir deformert. Ved å kunne se når de ble deformert vet man dermed frekvensen til trykkpulsasjonene. Frekvensen som kommer fra bladene på løpehjulet får følgende frekvens;

$$f_b = \frac{z_r \cdot n_r}{60} \quad (3.4.1)$$

Hvor;

$F_b$  er frekvensen fra bladene i Hertz,  $z_r$  er antall løpehjulsblad og  $n_r$  er rotasjonshastigheten til rotoren i o/min

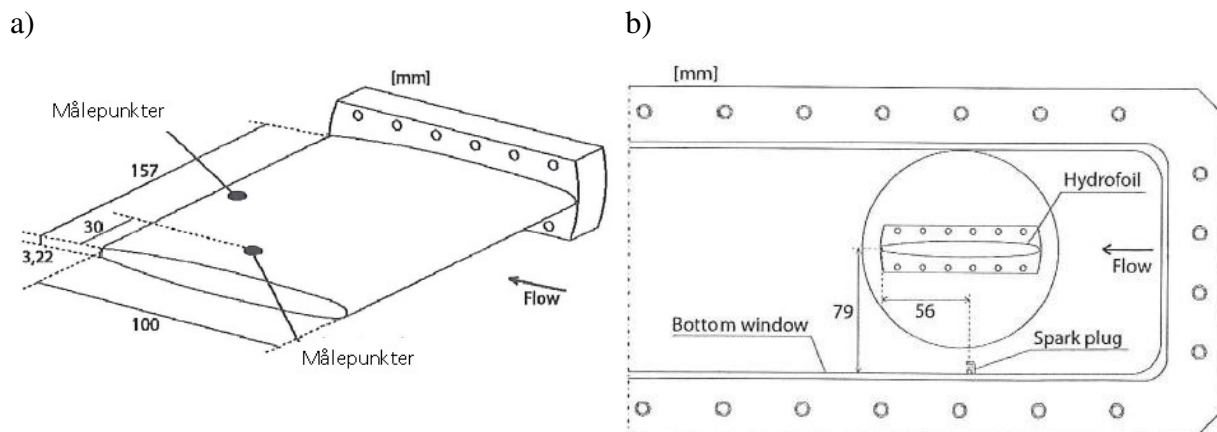
Signalene ble loggført med 6000 ganger i sekundet og med en varighet på 10 sekunder. Det ble altså loggført 60 000 punkter. Endringen av innløpsvinkelen til ledeskovlen hadde ingen innvirkning på resultatet, og det ble kjørt med den samme avstanden mellom løpehjulet og ledeskovlene gjennom hele forsøket. De fant ut at deres turbin hadde relativt små trykkpulsasjoner og konkluderte dermed med at deres turbin hadde et godt design. Ved å forandre på hvordan bladene på løpehjulet så ut, fikk trykkpulsasjonene høyere amplituder. Det forklarer at løpehjulsutformingen har en god del å si på hvor store trykkpulsasjonene blir.

De refererer også til Jernsletten [28]. Jernsletten har i doktorgradsoppgaven sin sett på trykkpulsasjoner i Francis-turbiner. Der kom han frem til at ved å måle kraften på løpehjulet før og etter at han kappet bort litt av løpehjulet slik at det fikk en mindre diameter, ble kraften redusert med 1/3. Jernsletten økte avstanden mellom løpehjulet og ledeskovlen med 5,1 mm.



**S. Roth, M. Calmon, M. Farhat, C. Münch, H. Bjoern, and F. Avellan. Hydrodynamic Damping Identification from an Impulse Response of a Vibrating Blade. [6]**

I denne artikkelen tester de den hydrodynamiske dempningen. Testmetoden går ut på å plassere et flyvingeprofil i en tunell hvor man kjører vann med høy hastighet igjennom. Tunellen har en størrelse på 150 x 150 x 750 mm. Bladet som blir brukt i analysen er 100 mm langt, og er fast innspent i den ene enden og er fritt opplagret i den andre enden, og med et materiale av stål. Innspenningen og en oversikt over hvordan dette er satt opp er vist i Figur 9 nedenfor.



**Figur 9; a) Innspenningene slik de er satt i oppgaven sett på skrått forfra, b) Oppsett av testbenken sett fra siden. Vannet kommer inn fra høyre og går ut mot venstre**

Ved hjelp av en tennplugg som er festet 79 mm under flyvingeprofilet, lages trykkbølgene. De lages ved at tennpluggen genererer en gnist noe som gjør at temperaturen i vannet rundt tennpluggen øker dramatisk. Det begynner å koke og boblen stiger opp med flyvingeprofilet og kollapser der. Tennpluggen kan generere luftbobler med ulike frekvenser og egenfrekvensen kan dermed bli funnet. Responsen til flyvingeprofilet blir målt ved hjelp av digitalt Laser Doppler vibrometer. Testene ble kjørt med vannhastigheter opp til 15 m/s. Det første som ble funnet var de to første egenfrekvensene til flyvingen. Den første frekvensen var en bøyefrekvens og den andre en torsjonsfrekvens. Disse ble funnet ved henholdsvis 194 og 880 Hz. Det ble funnet en lineær sammenheng mellom den hydrodynamiske dempningen og hastigheten på vannet. Det vil si at det er en sammenheng mellom hastigheten på vannet og hvor mye vannet demper deformasjonen til strukturen. Dempningsfaktoren ble funnet til å være på  $6,3 \cdot 10^{-3}$  ved bøyefrekvensen og  $1,7 \cdot 10^{-3}$  ved torsjonsfrekvensen.



### **H. Keck, W. Michler, T. Weiss og M. Sick. Recent Developments in the Dynamic Analysis of Water Turbines. [13]**

I denne artikkelen går forfatterne igjennom den siste tids forskning og analyser av både Pelton og Francis-turbin. De tar for seg de dynamiske kreftene som påvirker vannkraftanlegg og spesielt den ustabile trykkøkningen som kommer av en interaksjon mellom ledeskovlen og rotoren. Det blir også sett på en added-mass effekt og hvordan den påvirker egenfrekvensen til løpehjulet. De bruker CFD-programmer til beregningene. De kommer fram til at selve formen på egenfrekvensen er den samme. Det vil si at det er ingen frekvenser som går over fra for eksempel en bøyefrekvens til en torsjonsfrekvens, når rotoren blir satt i vann. Det de derimot så var at egenfrekvensen ble redusert når rotoren sto i vann.

Egenfrekvensen ble redusert med en faktor på mellom 0,4 og 0,9 avhengig av om det var bøye eller torsjonsfrekvens. Analysene ble gjort i stille vann og de har dermed ikke kjørt analyser mens rotoren går rundt, slik den vil gjøre i en virkelig situasjon. De nevner også at med begrensninger i CFD-programmene lar det seg ikke gjøre å sette på en volumstrøm inn i turbinen som endrer seg med tiden. Det vil at hvis trykkpulsasjonene skaper et trykk utover i løpehjulet kan volumstrømmen inn i turbinen endre seg. Dette har man ingen mulighet til å kunne ta med i beregningene. De fant også egenfrekvensen til en Pelton-turbin. Dette er lettere da en pelton-turbin står i luft og det blir dermed ingen added-mass effekt. Disse frekvensene blir ikke gått nærmere inn på her.

### **B. Hübner, U. Seidel, S.Roth, Application of fluid-structure coupling to predict the dynamic behavior of turbine components [16]**

Denne artikkelen foretar seg problematikken rundt FSI problemer i vannkraftverk. De ser spesielt på hvordan rotoren i et pumpe-turbin oppfører seg. Det tas opp at det er store forskjeller fra å regne med en added-mass effekt og uten added-mass.. Turbinen de skal beregne på har 15 løpehjulsskovler og 24 ledeskovler. Turtallet til rotoren er på 150 o/min, og hele rotoren ble fullstendig dekket av vann. For å gjøre det hele litt mindre tidkrevende i forhold til beregningstid, bruker den en forenklet versjon av et blad som skal være sammenlignbart med et blad til en Francis-turbin. Denne hydrofoilen blir så satt i midten av en vannstrøm hvor det er en inngang og en utgang. Resten av flatene er definert som vegger. Veggene samt inn og utgang er satt et godt stykke i fra profilet for å unngå at de kan virke inn på resultatet til målingene. De bruker to regnemetoder, den første er ANSYS hvor CFX er koblet sammen med en mekanisk analyse, den andre metoden er en kode som er utviklet ved

et universitet i Lausanne i Sveits. I artikkelen har de en hypotese om at det blir en reduksjon i egenfrekvensen på mellom 0,5 og 0,8 i forhold til om rotoren hadde stått i luft. Det er i midlertidig stor forskjell i reduksjon i forhold til hvordan frekvensen ser ut, om det er en bøye eller torsjonsfrekvens. Resultatene som de har funnet i både luft og vann er også blitt sammenliknet med praktiske eksperimenter.

**Ongoing research work on nonstationary flow problems at Norwegian University of Science and Technology Hermod Brekke. 1996 7<sup>th</sup> international conference on pressure**

I denne artikkelen tar Brekke for seg generell teori og hva de har funnet ut om trykkpulsasjoner så langt. Han nevner at man i det siste har fått bedre stål med bedre styrkeegenskaper noe som gjør at man kan bruke tynnere materialer. Dermed blir turbinen blir mer sårbar på grunn av vibrasjoner. Dette er problemer som vannkraftlaboratoriet ved NTNU har satt i gang forskning på. Det forklares også at det kan være en tilnærming å finne egenfrekvensen til utsatte deler i luft, men at disse frekvensene forandrer seg når delene står i vann. De skadelige frekvensene blir delt opp i lavfrekvent og høyfrekvent området. Videre forklarer Brekke at man rett bak ledeskovlen får en trykkvake og når løpehjulet kommer inn i vaken for løpehjulet en trykkpulsasjon.

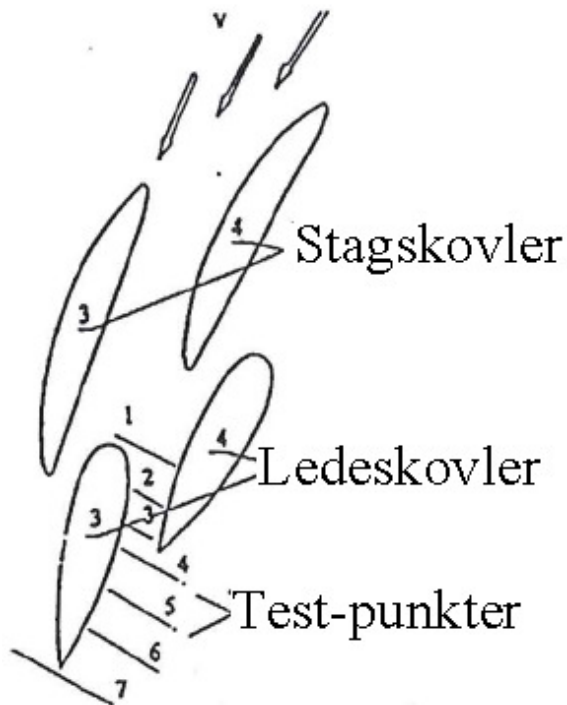
|  | A            | B   |  | A            | B   |
|--|--------------|-----|--|--------------|-----|
|  | 100<br>(100) | 100 |  | (0)          |     |
|  | (48)         |     |  | (0)          |     |
|  | 38 (20)      | 112 |  | 190<br>(230) | 96  |
|  | 3 (0)        | 131 |  | 380<br>(360) | 83  |
|  | 0            | 149 |  | 43           | 117 |
|  |              |     |  |              |     |

**Figur 10;** Forklaring på vinkler på hjørnet av løpehjulet, hjørnet vil være det punktet som kommer nærmest ledeskovlene når rotoren roterer rundt.

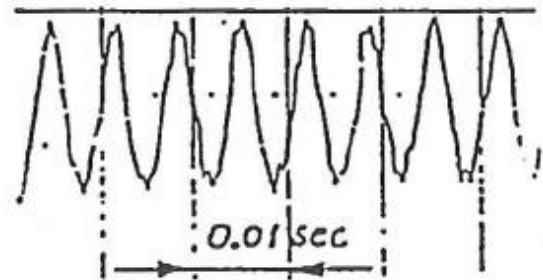
Han forklarer også at det kan forårsake en ikke stasjonær strømning i løpehjulet. Dette kan føre til at det blir dannet sprekker i løpehjulet og at det kan bli utmattingsproblemer over tid.

Det er vist en Francis-turbin med 180 MW og 420 m trykkhøyde. Turtallet til rotoren er 375 o/min. Man ser av Figur 11 at det er cirka en svingning på 0,1 sekund. Det vil si at disse trykkpulsasjonene i dette tilfelle er på cirka 100 Hz.

a)



b)



**Figur 11;** a) Hvordan målepunktene er definert sett som et radial snitt gjennom turbinen,

b) Trykkpulsasjoner fra løpehjulet ved et bestemt målepunkt.

Hovedfrekvensen som skaper trykkpulsasjoner i Francis-turbinen er rotasjonsfrekvensen ganget med antall ledeskovler, som det er forklart før. En annen frekvens er von Karman vortex shedding. Brekke oppgir også en formel for å kunne regne ut frekvensen som oppstår i turbinen denne er vist nedenfor.

$$f = 0,19 \cdot \frac{B}{100} \cdot \frac{v}{(t + 0,56)} \text{ Hz} \quad (3.4.2)$$

Der;  $f$  er frekvensen,  $B$  er en konstant avhengig av formen på hjørnet av løpehjulet,  $t$  er tykkelsen på materialet og  $v$  er vannhastigheten inn mot løpehjulet.

I formelen tas det hensyn til tykkelsen i materialet til løpehjulet og vannhastigheten inn mot løpehjulet. Det blir også sett på hvordan hjørnet på løpehjulet bør se ut for at det skal skape minst mulig trykkpulsasjoner i turbinen. Det viser seg etter mange forsøk at en skarp avrunding er det beste. Det bør være en skarpere vinkel enn 60 grader, helst så skarp som 45 grader hvis det er mulig. Den verste formen hjørnet kan ha er en form som en halvkule. For å se hvilke vinkler det er snakk om se Figur 10. Den originale rotoren hadde et lydnivå på 120 dB. Med en modifikasjon av hjørnet klarte Brekke å redusere lydnivået til 88 dB. Dette er identisk med bakgrunnsstøyen til generatoren. De lave frekvensene som kan gi trykkpulsasjoner er særlig Rheingans-frekvensen Strømningen i avløpsrøret er kompleks fordi turbinen skal operere utenfor sitt område med best virkningsgrad. Det første punktet for problemer er en spiral i avløpet som oppstår ved 60 % av best virkningsgrad for Francis-turbiner[18]. Rheinmanns-frekvensen kommer av at luftstrålen kommer i kontakt med røret i avløpet. Dette skaper en trykkpulsasjon i systemet med en frekvens på cirka 1/3 av rotasjonsfrekvensen til løpehjulet. [17]. Hvis dellast-frekvensen er i nærheten av frekvensen til generatoren eller andre deler kan det oppstå resonans i turbinen.

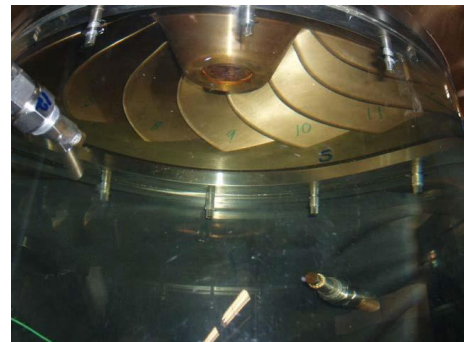
a)



b)



c)



**Figur 12;** a) Rheinmannsfrekvens,  
 b) Dellast der man ser at rotoren får for lite vann slik at det skapes luftbobler i sugerøret.  
 c) Nært området for best virkningsgrad. [18]

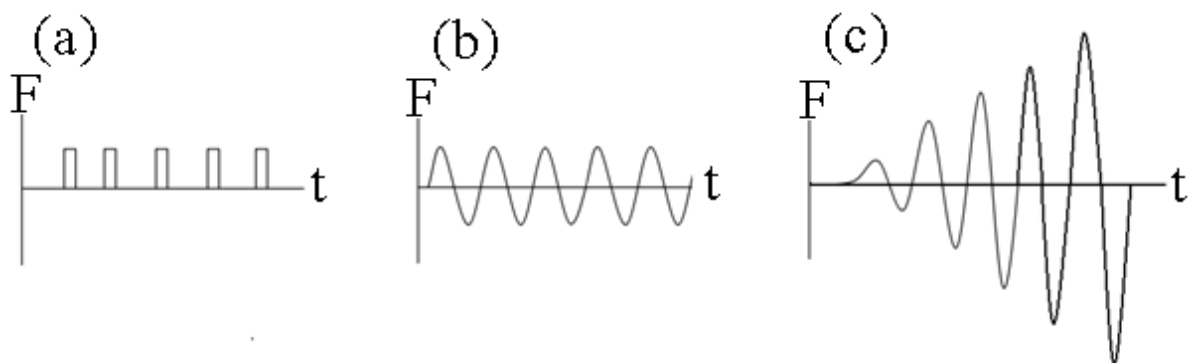


### 3.5. Resonans

Når Resonansfrekvensen oppstår vil svingningene ha en stadig større amplitude selv om kraften som blir pådyttet er den samme hele tiden. Det trenger ikke å være en stor kraft, selv ved små krefter vil systemet lagre energien og gi en stadig større amplitude. Ved frekvenser utenfor resonansområdet vil ikke systemet få en større deformasjon.

Et eksempel er å dytte en huske. Når man dytter en huske med den samme frekvensen som egsvingningen vil huska få en stadig større fart. Dytter man for eksempel til huska når huska er på vei mot der hvor du står vil ikke huska få en større fart, men kraften som du påfører vil heller virke som en demping.

Kraften som funksjon av tiden vil bli seende ut som på Figur 13a når man skal regne på frekvenser er det mer vanlig å definere lasten som en sinusfunksjon dette er vist i Figur 13b. Når lasten blir satt på med den samme frekvensen som egenfrekvensen vil utslaget bli som vist på Figur 13c. Der ser man at deformasjonen øker for hver gang lasten settes på selv om lasten er den samme hele tiden.



**Figur 13;** Skisse av hvordan resonans påvirker deformasjonen.

Andre eksempler er Tacoma Narrows Bridge. Tacoma var den tredje lengste hengebroen i verden da Byggingen av broen begynte i september 1938. Brua ble åpnet for trafikk den åpnet 1.juli 1940. Under byggingen av brua oppdaget arbeiderne på brua at ved sterk vind beveget brua seg vertikalt. Dette så man også når brua var åpnet for publikum. 7. november 1940 kollapset brua og falt ned i elva som gikk under. Vindhastigheten var denne dagen på cirka 18 m/s.

Eksemplet blir ofte brukt som et eksempel på resonans i konstruksjoner. I etterkant har det vist seg at den egentlige årsaken var et fenomen som kalles for ”aeroelastic flutter”.



Aeroelastic flutter oppstår når luft eller væske ved stor fart passerer en struktur som ikke er helt stiv og som dermed kan ta opp en deformasjon. Eksempler fra virkeligheten er når et flagg blåser i vinden vil det i bakkant av flagget oppstå vibrasjoner noe som gjør at flagget blarfrer i vinden.

Andre strukturer som er særlig utsatt er flyvinger. Ved en gitt hastighet som er sterkt avhengig av utforming og materialegenskaper vil en flyvinge starte og vibrere. Ved en gitt hastighet kan disse vibrasjonene ligge i nærheten av egenfrekvensen til vingen og dermed forårsake at vingen går i stykker. [12]

a)



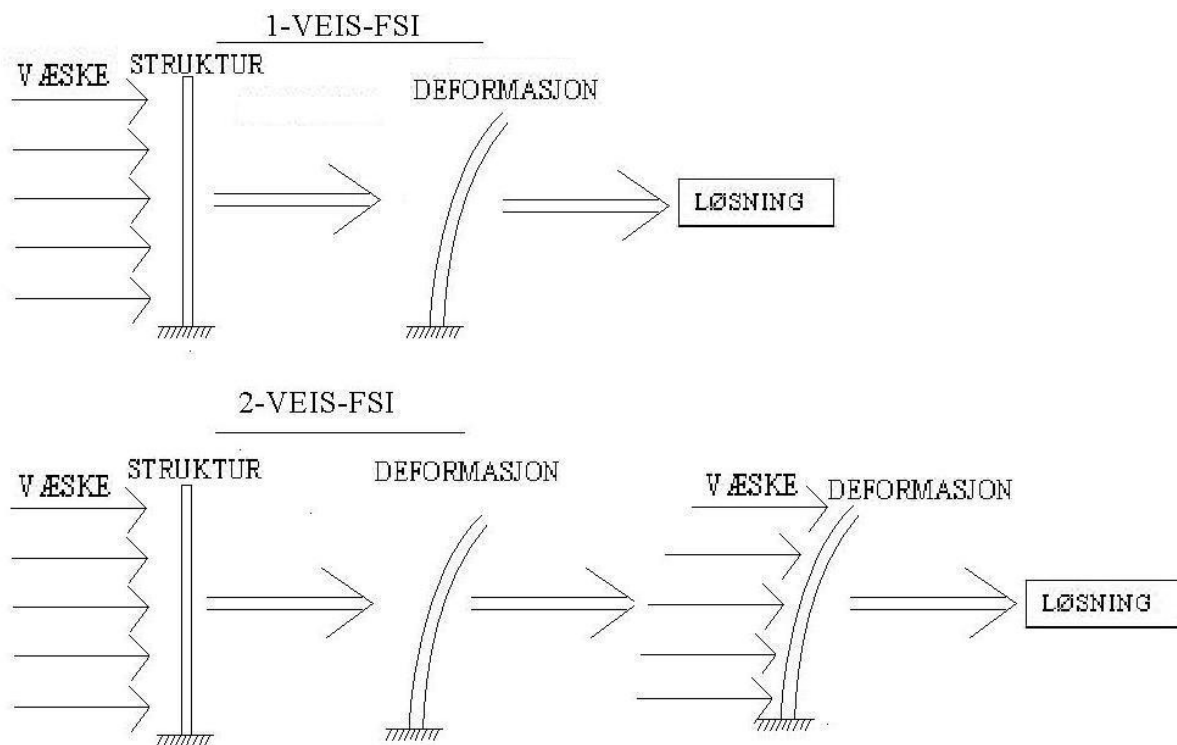
b)



**Figur 14;**      a) Tacoma Bridge før kollapsen sett fra undersiden [14],  
                   b) Tacoma Bridge etter kollapsen sett fra undersiden [15]

### 3.6. Forklaring av FSI-analyser

FSI-analyser er en viktig del av denne oppgaven og et forholdsvis nytt tema innenfor CFD-analyser. FSI-analyser vil si å koble sammen struktur og CFD beregninger slik at de tar hensyn til hverandre når de beregner. En 1-veis FSI tar ikke hensynt til at strukturen får en deformasjon når væskestrømmen settes på. Dette vil ikke ha så stor betydning hvis deformasjonene er små, men ved store deformasjoner vil dette ha mye å si. En stor deformasjon vil gi en endring av væskestrømmen rundt strukturen. Dette er vist nedenfor på Figur 15.



**Figur 15; Forklaring av prinsipp- forskjeller på 1-veis og 2-veis FSI analyser**

Eksemplet er vist ved hjelp av en myk plate som er fast innspent i den ene enden og fritt opplagret i den andre. I en 1-veis FSI analyse vil væsken strømme mot plata. Dette gir en deformasjon på plata på grunn av væsken. Denne deformasjonen blir så funnet og en løsning blir så gitt. Ved en 2-veis FSI vil først væsken gi en deformasjon i plata og så i forskjell fra 1-veis FSI vil nå strømmingen bli satt på den deformerte plata. Dette vil forårsake en endring av strømningsbilde. Jo større deformasjon på plata jo større vil forskjellen mellom en 1-veis FSI og en 2-veis FSI være. Når strømmingen og deformasjonen har stabilisert seg får man en løsning ut av ANSYS. Det er i denne oppgaven kjørt en 2-veis FSI analyse da denne metoden blir mest nøyaktig selv om deformasjonene i ledeskovlen blir forholdsvis små.



## 4. ANALYSEMETODE OG BEREGNINGSTID

---

### 4.1. Valg av løsningsverktøy

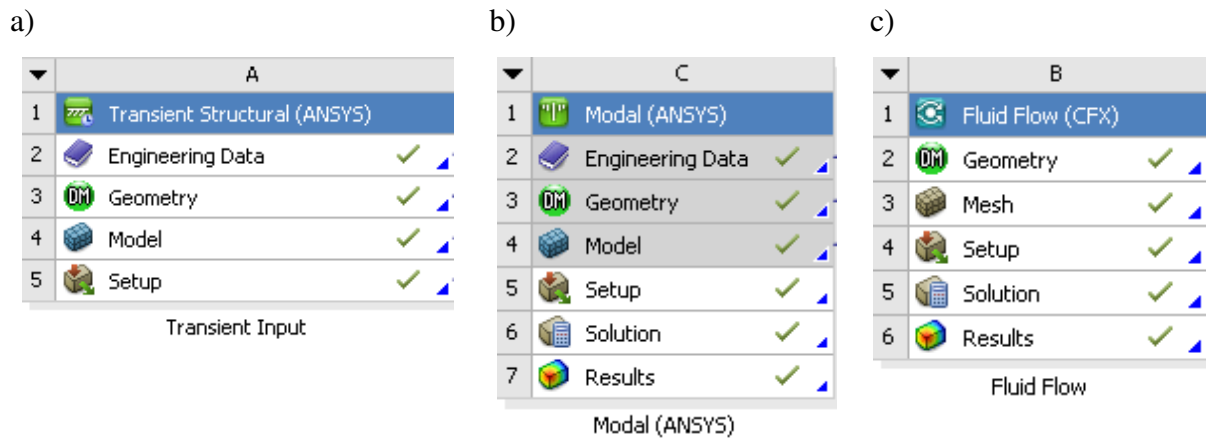
Vannkraftanlegg kan ha forholdsvis kompliserte beregninger da det ofte er store dimensjoner med resonanser, dynamiske påkjenninger koblinger mellom struktur og væske osv. For å kunne klare å løse disse problemene har man bruk for kraftige beregningsverktøy. En del kjente programmer som kan løse slike oppgaver kan være COSMOSWorks, Abaqus eller ANSYS. Ved UMB har man tilgang til enten COSMOSWorks eller ANSYS. Nedenfor blir det forklart i detalj fordeler og ulemper mellom de to forskjellige programmene.

- COSMOSWorks er godt integrert med SolidWorks og har dermed gode egenskaper hvis det er store behov for å kunne endre strukturen mange ganger eller ved optimalisering av struktur. COSMOSWorks er også litt enklere å bruke hvis man ikke har så stor erfaring med FEM-programmer fra før av. COSMOSWorks mangler de mest avanserte funksjonene særlig ved avanserte koblinger mellom strømming og struktur. Dette er mest på grunn av at COSMOSWorks sitt mekaniske analyse verktøy ikke er så godt som for eksempel det mekanisk analyse programmet til ANSYS.
- ANSYS er et mer avansert og litt tyngre og sette seg inn i enn COSMOSWorks. ANSYS har store muligheter til å sette på forskjellige laster og flere ulike moduler kan lett kobles sammen slik at man kan kjøre avanserte beregninger med både væske og struktur inkludert. I CFD-beregninger er det særlig de kjente programmene som CFX og Fluent som kan brukes. CFX og Fluent er programmer som ikke likner så veldig mye på de statiske modulene og det går dermed med mye tid til å sette seg inn i de ulike valgene man har. CFX kan lettest kobles sammen med struktur i Workbench noe som vil være fordelaktig i denne oppgaven.

På bakgrunn av de gitte opplysninger vil det i denne oppgaven bli brukt FEM-programmet ANSYS, da dette programmet passer best til problemstillingene i denne oppgaven.

ANSYS har to forskjellige CFD-programmer de er CFX og Fluent. Hva man velger av disse er litt opp til en selv, men i denne oppgaven er det valgt å bruke CFX. CFX er valgt på grunnlag av den er bedre tilpasset resten av de andre modulene i ANSYS Workbench. Dette blir sett på som svært viktig i denne oppgaven.

Nedenfor følger en bildeoversikt over hvilke moduler som er brukt i ANSYS Workbench. Alle modulene blir forklart i detalj i de påfølgende avsnittene.

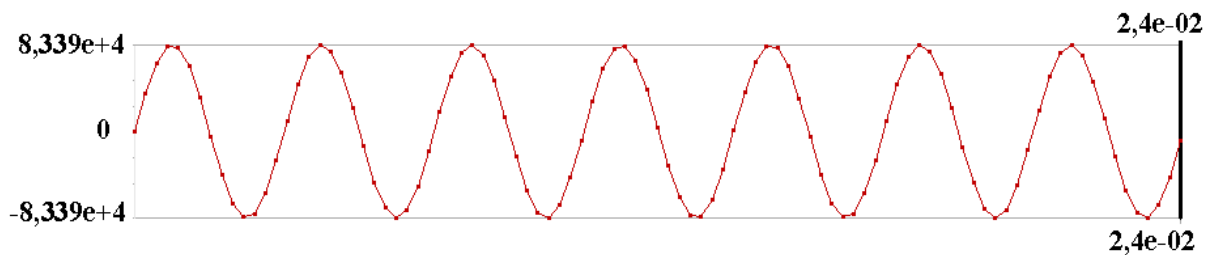


**Figur 16;** a) Transient-modul med de forskjellige innstillingene som må settes opp.  
 b) Modal-modul. Gråfelter indikerer at de har blitt satt til det samme som Transient modulen.  
 c) CFX-modul med oversikt over det som må defineres for å kunne få ut verdier av analysen.

## 4.2. Transient Structural

I Transient Structural har man mulighet til å sette på en last som varierer med hensyn på tiden eller med hensyn på avstander fra et visst punkt på strukturen. Man definerer først materialegenskapene i "Engineering Data" før man importerer både struktur og væske som skal være med i prosjektet i "Geometry". I "Model" tar man bort væsken og mesher strukturen slik man vil ha den. Til slutt i "Setup" legger man på lastene og innspenningene til strukturen, samt og spesifiserer hvilke flater som skal være i kontakt med væsken. For å se de ulike modulene som det er snakk om her se Figur 16a

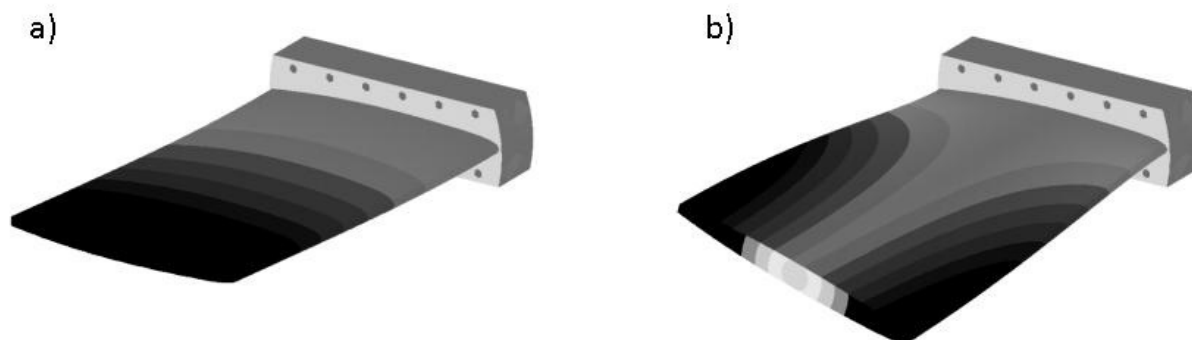
I denne analysen er det valgt en tidsavhengig last. Lastspekteret er satt på som en sinus amplitude som er importert som punkter i fra Excel. Antall punkter det er laget for at ANSYS skal skissere opp linja varierer fra frekvens til frekvens. Punktene er satt slik at kurven som ANSYS tegner blir rund uten for mange spisse kanter. I hovedsak er det definert mellom 70 og 130 punkter. Et eksempel på hvordan ANSYS tegner opp grafen er vist i Figur 17.



**Figur 17;** Eksempel på variabel last i ANSYS

### 4.3. Modal

Her beregner man egenfrekvensene til skovlen. Denne frekvensen finnes i luft, og det er ingen mulighet for å kunne beregne en frekvens til skovlen i vann. Det er derfor man må ta den tunge veien om en FSI-analyse for å beregne egenfrekvenser i vann. "Engineering Data", "Geometry" og "Model" er det samme som er definert tidligere i analysen. I "Setup" blir modellen spent fast med de gitte forutsetningene. For at resultatet skal bli mest mulig realistisk må man definere innspenningene på den samme måten som i FSI-analysen. Man velger også hvor mange resonanser som man skal løse. Jo flere resonanser jo lenger tid tar simuleringen, denne tiden er imidlertid liten i forhold til tiden det tar å løse en FSI-analyse. I "Solution" løser man oppgaven og i "Results" får man løsningene ved hvilke frekvenser det oppstår resonans og hva slags type deformasjon det blir. Det kan for eksempel være en vridningsdeformasjon eller en bøyedeforimasjon. Dette er illustrert i Figur 18. Det er to plot av egenfrekvenser av et vibrerende blad. Første bøyedeforimasjon er vist til venstre og første vridningsfrekvens er vist til høyre.



**Figur 18;** a) Første bøyefrekvens, b) Første torsjonsfrekvens. [6]



## 4.4. Fluid Flow (CFX)

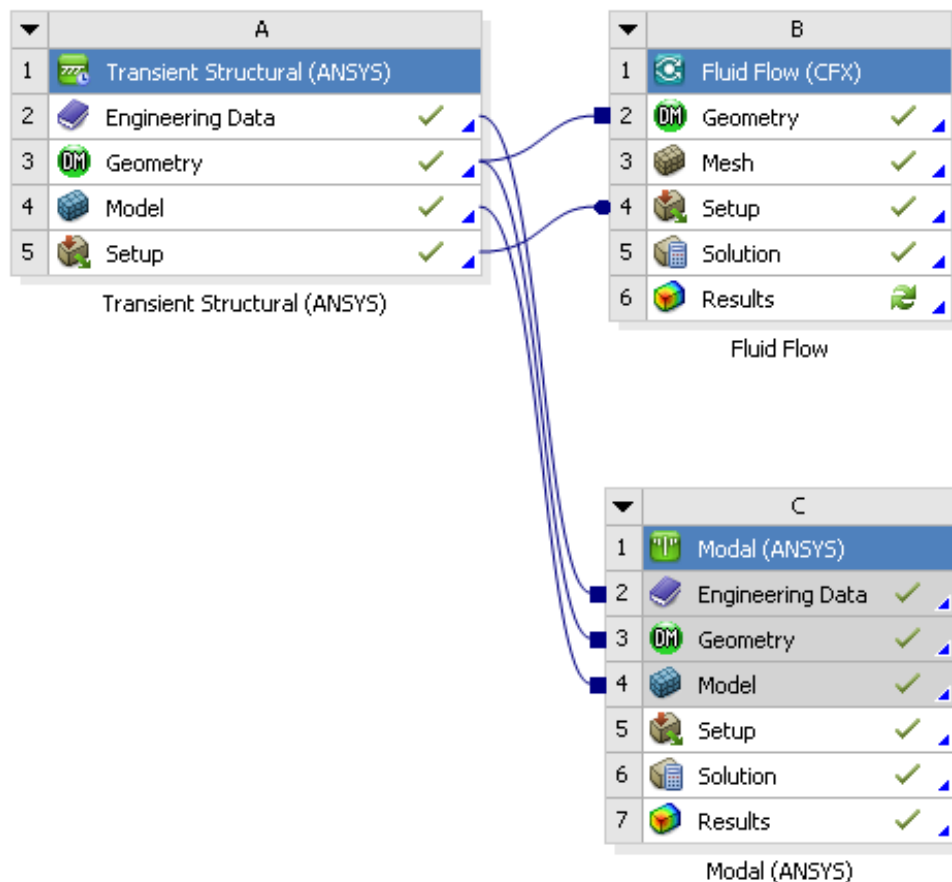
I CFX gjør man selve CFD-analysen, og det er dermed den delen av analysen som er mest tidkrevende og få satt opp, og få til å fungere. Geometrien er den samme gjennom hele analysen og det vil dermed ikke være noen endringer her. I ”Mesh” tar man bort strukturen og mesher kun væsken rundt ved hjelp av et CFX-mesh. I ”Setup” importerer man endringene fra Transient analysen. Etter å ha definert ”setup” må man definere de andre variablene i CFD-analysen. Dette er variabler som er standard for de fleste CFD-programmer, der bare navnet på variablene kan variere mens funksjonen er den samme.

- Boundary conditions; Her spesifiserer man hva slags grensebetingelser man har. Det kan være vegger med forskjellig ruhet, symmetriplan, innløp/utløp av væske samt kontaktflate mellom væske og struktur.
- Analysis Type; Her definerer man hva slags analyse man skal kjøre, om det er transient eller stasjoner strømming om det er koblinger til andre moduler osv.
- Global Initialisation; Her definerer man de globale betingelsene i analysen som for eksempel kan være koordinatsystemer og starttrykk.
- Solution Units; Her bestemmer man seg for grunnleggende enheter som masse, lengde, tid temperatur og vinkelmål. Standardinnstillinger i CFX er SI-enheter, men det er mulig å forandre disse.
- Solver Control; Her bestemmer man seg for hvor nøyaktig løsning man har behov for og om det er retninger man ikke har behov for å løse. Kjører man en 2-D simulering har man ikke noe behov for en løsning i Z-retningen.
- Output Control; Her definerer man hva man skal måle og hvor man skal måle det i løsningen. Det kan være at man vil måle deformasjonen til meshet et spesielt sted i strømmingen.



## 4.5. Komplette Oppsett

Nedenfor ser man hvordan oppsettet er satt opp i ANSYS Workbench. Hele prosjektet starter med en transient analyse. De blå linjene illustrerer at det er en overføring mellom de respektive modulene. For eksempel er det en kobling mellom setup i transient analysen og setup i CFX analysen. Det vil si at en kraft i transientanalysen som vil gi en deformasjon av strukturen vil gi en input i CFX analysen slik at CFX tar hensyn til en deformasjon av strukturen. Det er en overføring fra "model" i transient analysen til "model" i Modal analysen dette er riktig på grunn av at begge disse modulene gjør beregninger på strukturen, mens det i CFX modulen gjøres beregninger på væsken. Derfor er det ingen overføring mellom "Model" i transient og "modell" i Fluid Flow. Blokker som er riktig satt opp og fått en løsning får en grønn hake ved seg. Alle blokkene har grønne haker, noe som vil si at modulene er riktig satt opp, og koblingen mellom dem fungerer. Moduler som ikke blir satt opp riktig får et rødt kryss der hvor det nå er en grønn hake.



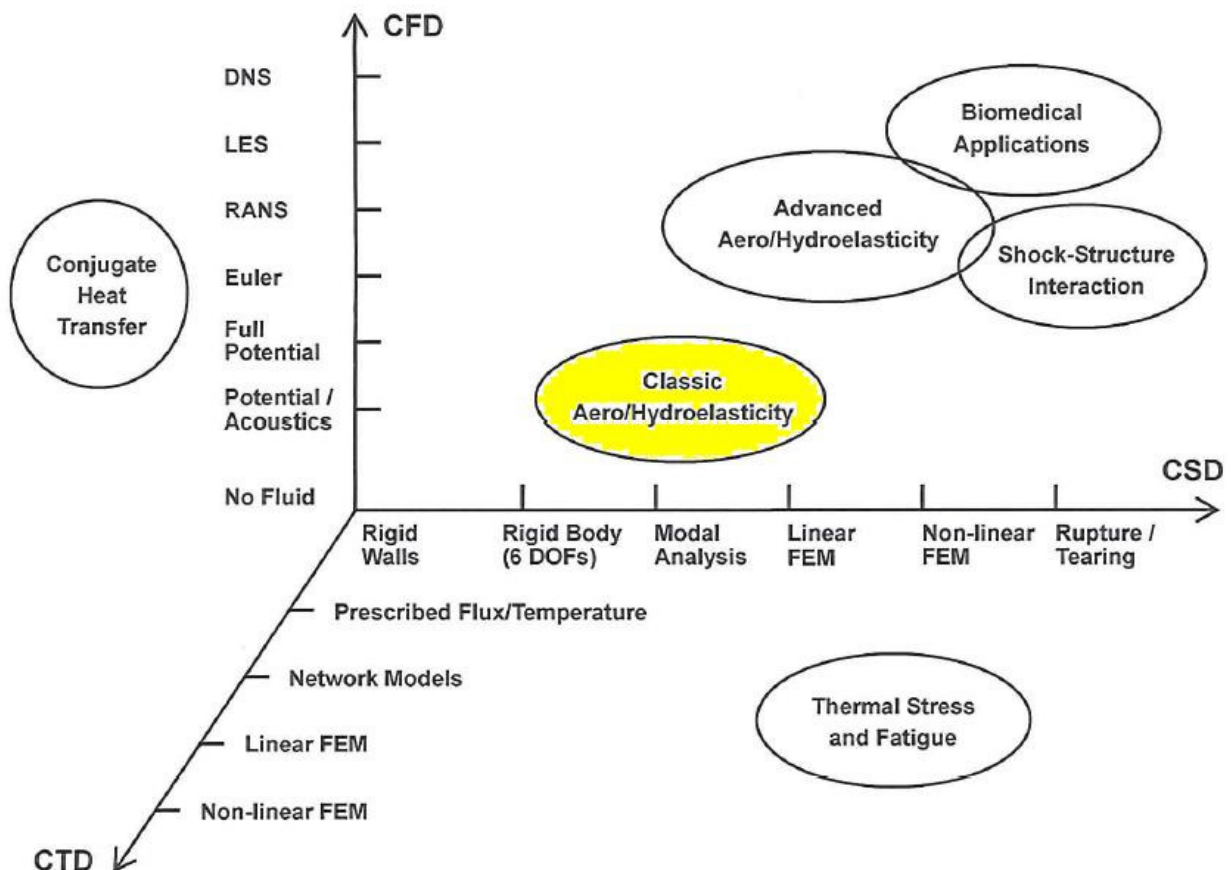
**Figur 19;** Oversiktsbilde av oppsettet i ANSYS Workbench med transient Structural, Fluid Flow og Modal modulene.

## 4.6. Beregningstid

Beregningstiden ved ulike simuleringer er illustrert i Figur 20. det er vist en sammenheng mellom CSD, CFD og CTD. En FSI analyse vil være en kobling mellom CFD og CSD og vil dermed være ganske ressurskrevende. Men som man ser av Figur 20 finnes det analyser som tar betraktelig mer tid og få løst. Det er merket med gult i den rubrikken som heter "Classic Aero/Hydroelasticity".

Dette vil si vanlige analyser, hvor luft og vann simuleringer er innblandet. Ser man på CSD aksene ser man at dette er vanlig egenfrekvens analyser. På CFD aksene tilsvarer dette akustiske simuleringer.

Analyser som tar lang tid er blant annet spenninger som blir forårsaket av varme og ikke lineære struktur analyser der hvor man kjører beregninger på strukturer som får en varig deformasjon etter at lasten blir tatt av.

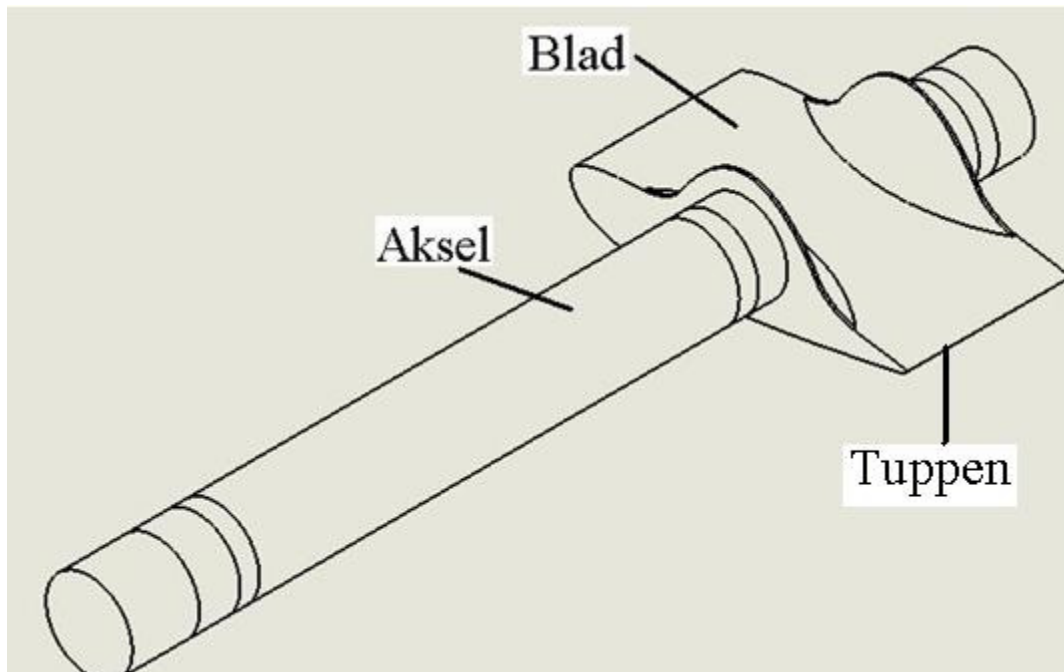


Figur 20; Løsningsstid for ulike analyse metoder [7]

## 5. BEREGNINGSMETODER OG INNSTILLINGER

### 5.1. Navnsetting av ledeskovl

I beregningsmetoden er det brukt to spesifikke navn på ledeskovlen for og lettere kunne beskrive hvor vannet treffer skovlen. Det er akselen og bladet. Disse to definisjonene er vist på Figur 21 nedenfor. Når det nevnes ledeskovl menes det hele skovlen, altså både bladet og akselen. Når det refereres til tuppen av ledeskovlen er også dette vist på tegningen.



Figur 21; Skisse av forskjellige deler på ledeskovlen.

### 5.2. Forutsetninger

For at analysene skal kunne gi en løsning må det settes en del forutsetninger i oppgaven. Disse blir oppgitt her.

- Det forutsettes at det punktet som deformasjonen defineres ut fra, gir et riktig bilde og verdier av den virkelige deformasjonen.
- Det vil bli kjørt sju sykluser på hver frekvens. Det blir ikke kjørt flere på grunn av løsnings tiden vil bli uforholdsmessig lang.
- Det forutsettes at de frekvensene som får størst deformasjon ved sju sykluser også får det hvis det hadde blitt kjørt med flere sykluser.
- Det forutsettes at vannet på skovlen når opp dit hvor det er definert i oppgaven.

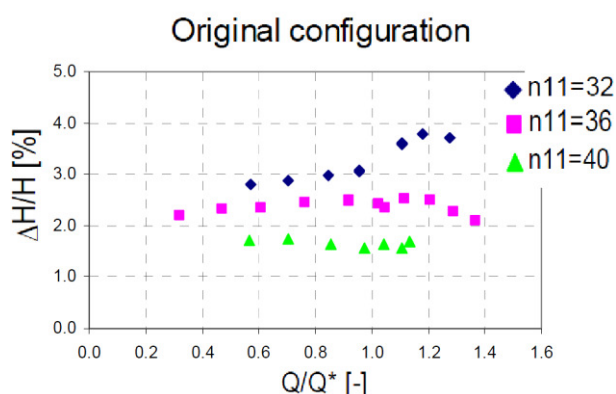
### 5.3. Initialbetingelser

Det er viktig å sette på riktige trykkamplituder for å få et så realistisk resultat som mulig. Disse pulsasjonene varierer mye etter som hvordan løpehjulet og ledeskovlen er utformet. Det er generelt slik at jo nærmere løpehjulet passerer skovlen jo større blir trykkamplitudene.

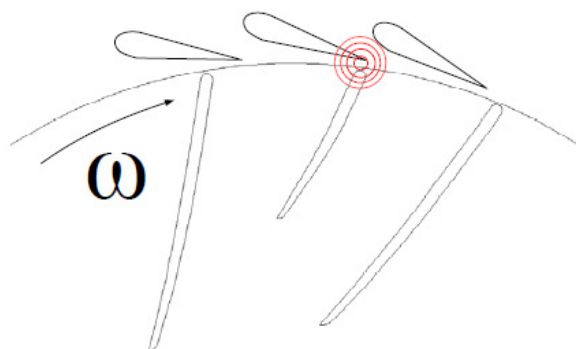
Oppgaveforfatteren har ikke tilgang til å kunne måle amplitudene selv. Dette på grunn av at Rainpower har strenge krav til bedriftshemmeligheter og forfatteren får derfor ikke tilgang til geometrien til løpehjulet. Det blir dermed tatt en beslutning om å prøve å finne ut hvor store spenningene er ved hjelp av målinger som andre har gjort.

Det er flere som har prøvd å måle disse situasjonene blant annet en del doktorgradstudenter fra NTNU og andre internasjonale institutter. Dette blir sett på som en god tilnærming da Rainpower har et tett samarbeid med NTNU i Trondheim.

a)



b)



**Figur 22; a) Størrelse på trykkpulsasjoner [1],**

**b) Trykkpulsasjoner ved ledeskovlen [11]**

Figuren over er hentet fra [1]. På figuren over ser man hvor store trykkpulsasjonene har blitt målt til, i deres forsøk. På X-aksen er det forholdet mellom volumstrøm ( $Q$ ) og volumstrømmen ved størst virkningsgrad ( $Q^*$ ), på Y-aksen er det forholdet mellom trykkpulsasjonene ( $\Delta H$ ) og den totale trykkhøyden ( $H$ ). Trykkhøyden i denne oppgaven er gitt som en initialbetingelse fra Rainpower [10] og er på  $2,086 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ . Ved å ta utgangspunkt i det verste tenkelige tilfelle vil det gi en trykkøkning på cirka fire prosent i forhold til trykkhøyden.

Trykkamplitudene vil ha en størrelse på;  $2,086 \cdot 10^6 \cdot 0,04 = \underline{83400 \text{ Pa}}$ .

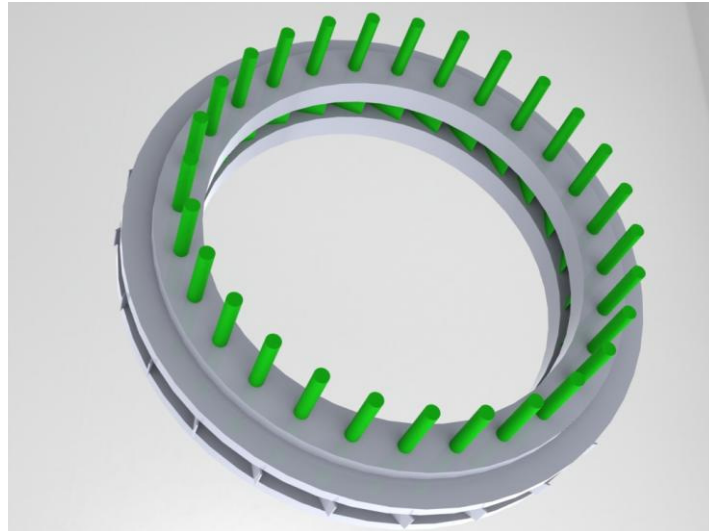


Dette trykket blir så satt på ledeskovlen som en sinusfunksjon med en vekslende belastning på 83400 Pa, med forskjellige frekvenser. Trykkpulsasjonene i denne oppgaven kommer med en frekvens på 266,7 Hz[10]. Det er mange forskjellige frekvenser som kan oppstå i et vannkraftanlegg og det er derfor ønskelig å finne deformasjonen ved andre frekvenser også. Amplituden vil bli satt til å være den samme gjennom alle de forskjellige deloppgavene.

## 5.4. Generelle innstillinger

### 5.4.1. Innspenninger og lastpåkjenninger

For å kunne kjøre en added-mass analyse må ledeskovlen settes fast med riktige innspenninger og krefter som skovlen får i de virkelige situasjonene. Ledeskovlen får en fast innspenning øverst på akselen. Dette vil simulere en situasjon der skovlen blir vridd rundt for å kunne justere innløpsvinkelen og dermed volumstrømmen på turbinen. Skovlen har videre tre friksjonsfrie opplagere som simulerer at skovlen er festet ved hjelp av kulelagre. Det kan være en mulighet med denne innspenningen at skovlen kan oscillere i aksiell-retning. Det vil mest sannsynlig bare ha innvirkning på de frekvensene med høyest frekvens. I en virkelig situasjon vil nok ikke skovlen kunne bevege seg så mye i aksiell-retning. Dette på grunn av at når skovlen står i turbinen vil det være svært begrenset plass og den vil fort kunne komme til å støte opp i kanten på vanngaten inn mot løpehjulet. Dette er ikke så lett å vite hvordan dette opptrer og det vil dermed bli kjørt i analysen at bladet fritt kan bevege seg litt opp mot kanten av passasjen. Dette er uansett små deformasjoner i forhold til den som oppstår ved tuppen av ledeskovlen. Hvordan passasjen fungerer, er vist nedenfor. Vannet kommer inn i passasjene som er fordelt langs utsiden av hele ringen. Ytterst er de skovlene som kalles for stagskovler og innerst er ledeskovlene. Ledeskovlene er her vist i grønt. Det er totalt 28 stk ledeskovler og disse er plassert rundt i en ring med en diameter på 2750 mm den samme avstanden i mellom seg rundt hele. Stagskovlene er her vist med en cirka vinkel og er dermed bare ment som en illustrasjon. Og ingen eksakte tykkelser eller vinkler er definert. Dette er vist på Figur 23 på neste side.



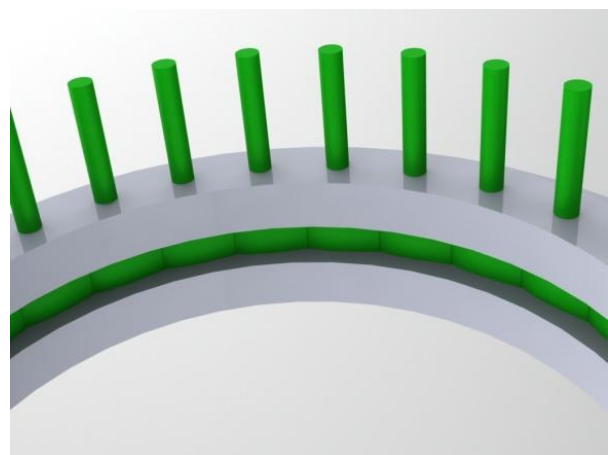
**Figur 23;** Oversiktsbilde av hvordan ledeskivene er plassert. Det er her vist en litt overdrevet åpningsvinkel for å illustrere selve prinsippet ved ledeskivene. Vannet går inn i de åpne kanalene på yttersiden av turbinen, for så å gå mot ledeskivene som er satt til å være grønne i denne oppgaven, stålmaterialer rundt skivene er bare vist for en grov illustrasjon

På Figur 24a nedenfor er det vist et nærbilde av passasjen som vannet strømmer igjennom. Vannet blir ledet inn i alle de forskjellige lukene ved hjelp av stagskovler som er de ytterste skivene. Disse er markert med en lys farge på Figur 24a nedenfor. På Figur 24b er det vist et nærbilde av hvordan det ser ut når skivene er lukket og det ikke strømmer vann igjennom turbinen.

a)



b)

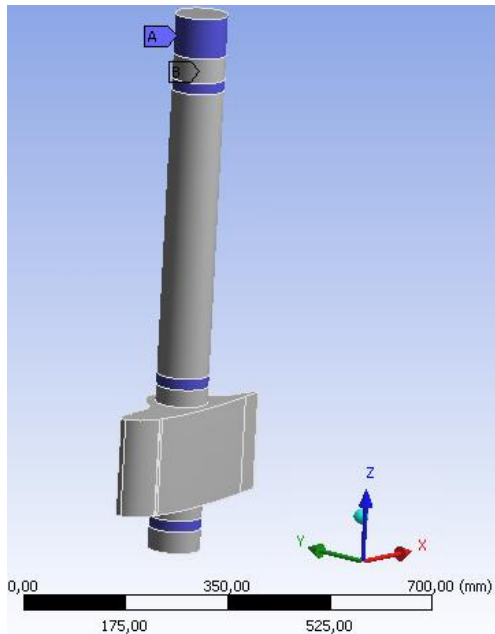


**Figur 24;** a) Nærbilde av gaten som leder vannet inn mot løpehjulet,  
b) Nærbilde av slik det er når turbinen er lukket. Skivene overlapper hverandre og det går dermed ingen volumstrøm gjennom turbinen.

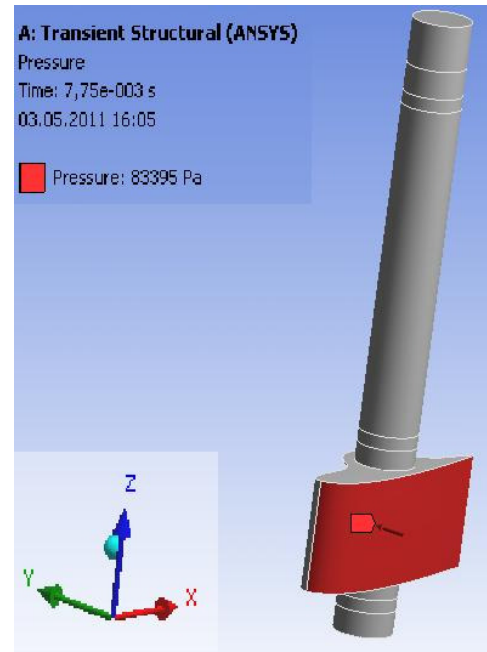


Kreftene fra vannet er satt på som et trykk på forsiden av skovlen som varierer med tiden. Amplituden er her satt til en viss prosent av netto trykkehøyde. Frekvensene varierer ettersom hvilke frekvenser som skal analyseres. På Figur 25b er det vist hvordan kraften er satt på. Og i Figur 25a er det vist hvordan innspenningene er satt på.

a)



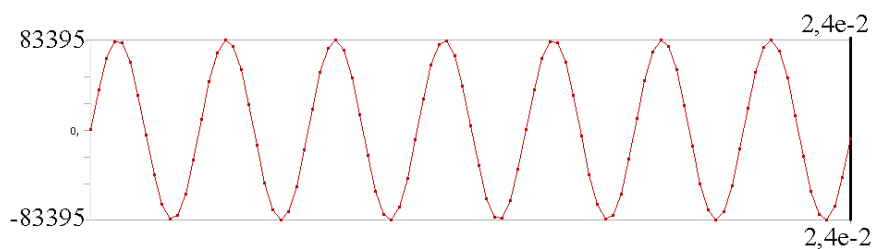
b)



**Figur 25; a) Innspenninger som er brukt i analysen, øverst er fastinnspenningen, og de tre andre er friksjonsfritt opplager.**

**b) Det røde feltet viser hvordan kreftene er satt på. Kraften varierer med tiden.**

På Figur 26 er det vist et skjermbilde av hvordan kraften er satt på skovlbladet. Det er kraft langs Y-aksen og tid langs X-aksen. Punktene er generert i Excel før de er kopiert og limt inn i ANSYS Transient. På Figur 26 er det vist en spenningsamplitude på cirka 83440 Pa og med en varighet på 7 sykluser.

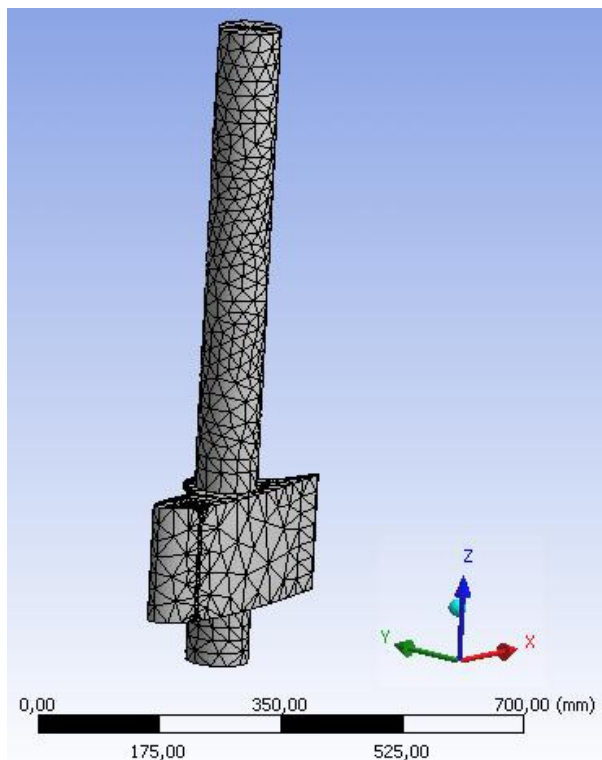


**Figur 26; Plot av frekvenser ved start til venstre og avslutning til høyre. De røde prikkene er punktene som er definert i Excel**

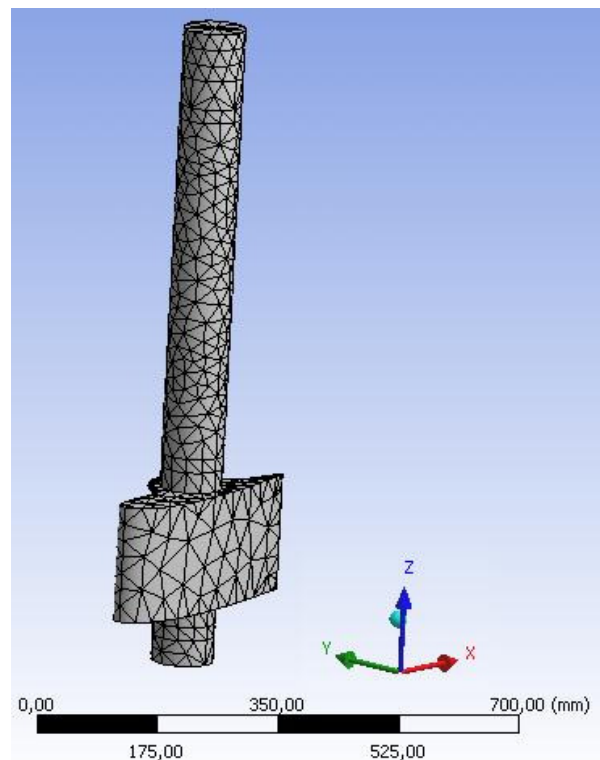
### 5.4.2. Innstillinger i mesh

Det første steget i analysen var og ”glatte” ut skarpe kanter på skovelbladet ved hjelp av ”Virtual Topology” og ”Virtual Cell”, slik at man får et glattere og finere mesh, med færre små og skarpe kanter. Den tydelige forskjellen kan ses i Figur 27. Legg spesielt merke til den skarpe loddrette kanten i forkant av ledeskovlbladet, som blir helt borte ved en utglatting av skovlen. På selve akselen er det ikke foretatt noen utglatting, da den hadde et fint mesh i utgangspunktet. Ved å gjøre slike utglattinger vil analysen ta mindre tid. Det vil ofte skape problemer ved slike skarpe kanter i analysen og det er derfor greit å få bort kantene før analysen blir kjørt.

a)



b)



**Figur 27; a) Mesh uten ”Virtual Topology”. Legg merke til den markerte loddrette linjen.**

**b) Mesh med ”Virtual Topology”. Her er den loddrette streken borte og Mehet har blitt mye bedre.**

Det er valgt å bruke et vanlig mechanical mesh på ledeskovlen. Det er meshet med totalt 5293 noder og 2733 elementer. Med en oppløsning på medium. Det ble vurdert å lage et finere mesh men på grunn av en dobling av løsnings tiden uten at løsningen ble nevneverdig forandret, ble ikke dette sett på som nødvendig.

### 5.4.3. Inputvariabler i ANSYS CFX

Det blir kjørt analyser av egenfrekvenser i vann og i luft. Samt med forskjellige hastigheter på vannet mot ledeskovlen. Mange av innstillingene vil være de samme gjennom hele prosessen. En del av disse innstillingene er listet opp nedenfor. De viktigste variablene blir forklart mer presist, etter hver tabell.

**Tabell 6; Analyseinnstillinger til strømningsanalyse**

| Variabel                                                              | Verdi                  |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|
| External Solver Coupling > Option                                     | ANSYS MultiField       |
| Coupling Time Control > Coupling Time Duration > Total Time<br>Option | Total Time             |
| Coupling Time Control > Coupling Time Duration > Total Time           | 0,024*                 |
| Coupling Time Control > Coupling Time Steps > Option                  | Timesteps              |
| Coupling Time Control > Coupling Time Steps > Timesteps               | 0,00024*               |
| Analysis Type > Option                                                | Transient              |
| Analysis Type > Time Duration > Option                                | Coupling Time Duration |
| Analysis Type > Time Steps > Option                                   | Coupling Timesteps     |
| Analysis Type > Initial Time > Option                                 | Coupling Initial Time  |

\* Disse verdiene har forskjellig verdi avhengig av hva slags frekvens som analyseres.

Her defineres det hvor lang tid analysen skal kjøre. Denne tiden må være den samme tiden som blir definert i ANSYS Transient. Det er her vist eksempler på hvordan tiden blir satt ved 291 Hz. Ved en annen frekvens vil "Total Time", "Option" og "Timesteps" bli forandret. Resten av innstillingene blir uforandret. Det blir i denne oppgaven definert at ANSYS skal regne ut 100 forskjellige "TimeStep".

Et "Timestep" er 1/100 del av den totale analyse tiden. I denne oppgaven er den totale analyse tiden forskjellig da det er valgt å kjøre syv svingninger. Disse syklusene vil gå over ulike tidsperioder da det er forskjellige frekvenser i analysene. Ved for eksempel 100 Hz vil analysen gå over cirka 0,07 sekunder, da 100 Hz har 100 svingninger per sekund. Et timestep vil da være på  $7 \cdot 10^{-4}$  sekunder. Ved en frekvens på 300 Hz vil analysen gå over 0,023 sekunder og et timestep vil da være på  $2,3 \cdot 10^{-4}$  sekunder.

**Tabell 7; Variabler for strømningsmediet**

| Variabel                                  | Verdi          |
|-------------------------------------------|----------------|
| Option                                    | Pure Substance |
| Thermodynamic State > Thermodynamic State | Liquid         |
| Equation of State > Molar Mass            | 1              |

Her blir det definert hva slags type medium som blir kjørt i analysene. Det blir her sagt at mediet skal være væske. Molarmassen blir bare satt til en tilfeldig verdi da ANSYS trenger en verdi for å kunne kjøre analysene. Denne verdien har ingen betydning på løsningsutfallet.

**Tabell 8; Variabler for domene innstillinger**

| Variabel                      | Verdi                       |
|-------------------------------|-----------------------------|
| Material                      | Fluid                       |
| Pressure > Reference Pressure | $1,01325 \cdot 10^5$        |
| Mesh Deformation > Option     | Regions of Motion Specified |
| Heat Transfer                 | none                        |
| Turbulence > Option           | K-epsilon                   |

Her blir det sagt at referanse trykket i løsningen er på cirka 1 bar. Dette er atmosfæretrykket og vil dermed si at vannet står uten et trykk på seg mot skovlen. Videre er det kjørt analyse uten overføring av varme, og det er definert at turbulensen skal regnes som K-epsilon.

**Tabell 9; FSI-innstillinger**

| Variabel                         | Verdi                   |
|----------------------------------|-------------------------|
| Boundary Type                    | Wall                    |
| Mesh Motion > Option             | ANSYS MultiField        |
| Mesh Motion > Receive From ANSYS | Total Mesh Displacement |
| Mesh Motion > ANSYS Interface    | FSIN_1                  |
| Mesh Motion > Send to ANSYS      | Total Force             |

Her blir det forklart hvordan koblingene mellom væske og strukturen skal være. Det blir sagt at kontaktflaten skal være en vegg, hvor CFX mottar en deformasjon av strukturen fra

ANSYS Transient og sender tilbake en kraft som virker på skovlen i ANSYS Transient. Dette vil stemme godt med virkeligheten.

**Tabell 10; Globale innstillinger**

| Variabel                                                 | Verdi |
|----------------------------------------------------------|-------|
| Initial Conditions > Cartesian Velocity Components > U   | 0     |
| Initial Conditions > Cartesian Velocity Components > V   | 0     |
| Initial Conditions > Cartesian Velocity Components > Z   | 0     |
| Initial Conditions > Static Pressure > Relative Pressure | 0     |

Globale innstillinger vil si hvordan domene står i forhold til strukturen. Slik som det er definert nå sier det at væsken og skovlen står i ro i analysen. Men det vil fremdeles være slik at hele deformasjon skapes av vibrasjonene fra Transient modulen.

**Table 11; Konvergeringskriterier og nøyaktighet.**

| Variabel                                                               | Verdi                       |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Transient Scheme                                                       | Second Order Backward Euler |
| Convergence Control > Max. Coeff. Loops                                | 3                           |
| Coupling Step Control > Solution Sequence Control > Solve ANSYS Fields | Before CFX Fields           |
| Residual Type                                                          | RMS                         |
| Convergence Criteria                                                   | $1 \cdot 10^{-4}$           |

Jo oftere ANSYS skal regne seg frem til en verdi jo lenger tid tar analysen. Andre viktige definisjoner er ved hvilke verdier løsningen skal konvergere. Jo mindre denne verdien er jo lenger tid tar analysen. Det er i denne oppgaven valgt å kjøre med en verdi på  $1 \cdot 10^{-4}$ . Dette er standardinnstilling i CFX og det bør dermed gi en god nok nøyaktighet. RMS vil si noe om hvilken verdi ANSYS plotter når løsningen har konverget. Det er to forskjellige valg; MAX eller RMS. RMS blir en slags gjennomsnittsverdi og det er dermed den som blir valgt.

**Tabell 12; Utkjøringsverdier**

| Variabel                  | Verdi                                       |
|---------------------------|---------------------------------------------|
| Output Variable List      | Pressure, Total Mesh Displacement, Velocity |
| Output Frequency > Option | Every Coupling Step                         |
| Output Variables List     | Total Mesh Displacement                     |
| Cartesian Coordinates     | 0,060288 0,177432 0,127075 (X,Y,Z)*         |

\* vil variere litt ettersom hvordan koordinatsystemet er lagt i forhold til skovlen. Dette punktet vil kunne ha andre koordinater men plasseringen vil være den samme gjennom alle analysene.

Det blir her definert hvilke verdier som skal tas ut i løsningsmodulen til ANSYS. Det blir her tatt ut trykk, total deformasjon til meshet og hastigheten til mediumet. Det blir videre definert at ANSYS skal regne ut hvert eneste Coupling step og gi en verdi på mesh deformasjonen ved hvert coupling step. Denne verdien er den som blir tatt ut og blir definert som deformasjonen i rapporten under løsningsdelen. "Cartesian Coordinates" sier ved hvilket punkt deformasjonen skal måles. Dette punktet blir funnet ved å zoome sterkt inn på punktet bak ledeskovlen, og blir dermed en slags tilnærmet verdi. Da det er zoomet kraftig inn vil dette punktet bli sett på som nøyaktig nok.

#### 5.4.4. Input i Modal-analyse

Her finner man egenfrekvensen til skovlen. Skovlen blir spent fast på vanlig måte. Med en fastinnspenning på toppen og så tre andre friksjonsfrie opplagere nedover akselen på skovlen. Dette er vist i Figur 25. Man definerer hvor mange "kritiske turtall" man vil ha beregnet. Det er i denne oppgaven valgt å beregne de 10 første egenfrekvensene. En Modal analyse beregner egenfrekvensene til skovlen i luft og det er ingen mulighet for å kunne finne egenfrekvenser når skovlen står i vann. Det er valgt å se på den totale deformasjonen. Ved resonansfrekvensen vil skovlen få en tilnærmet uendelig stor deformasjonen så disse verdiene vil ikke bli sett på som interessante, for denne oppgaven.

#### 5.4.5. CFX-mesh

I denne oppgaven er det valgt å meshe væsken med et CFX-mesh. Et CFX-mesh er et kraftig mesh til bruk i CFD-beregninger. Det er valgt å meshe med et vanlig standard CFX mesh. Et CFX mesh produserer tetraeder prismer og pyramider i standard meshing modul.



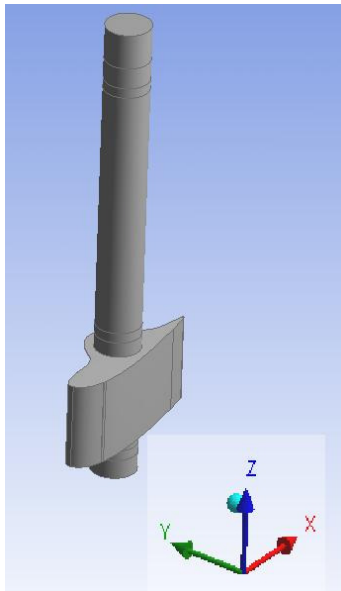
## 5.5. Spesifikke innstillinger

Nedenfor blir det listet opp de forskjellige innstillingene for hvert enkelt tilfelle. En del av de forskjellige analysene har mye til felles med hverandre, og ting som allerede er gjennomgått i tidligere simuleringer, blir ikke gjennomgått på nytt her.

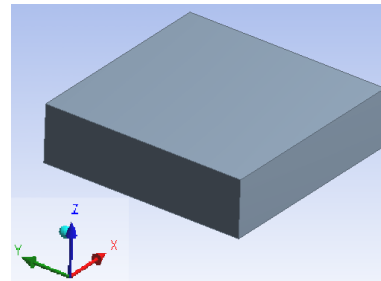
### 5.5.1. Ledeskovl i stillestående luft

For å kunne verifisere at beregningene er gjort korrekt blir det først kjørt en analyse hvor skovlen står omringet av luft. Dette på grunn av at en modal analyse lar skovlen stå i luft. Ved å sjekke om svarene man får av CFX stemmer med svarene som er kommet ut av ANSYS Modal får man en test om skovlen er satt opp riktig og at koblingen mellom væske og struktur er riktig. Når skovlen skal settes i vann er det bare behov for å forandre på tettheten og den dynamiske viskositeten. Det gjør at mange feilkilder elimineres og det er dermed større sjans for at resultatene er riktige. Det blir spesifisert et strømningsdomene slik at ledeskovlen får nok plass til å kunne bevege seg fritt uten at veggene i domene spiller inn på løsningen. På Figur 28 er det vist hvordan domene er laget. En forklaring følger etter Figur 28

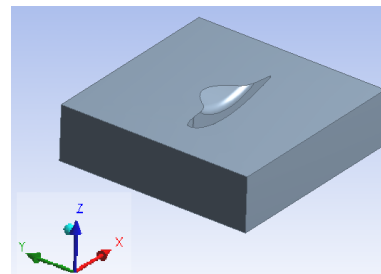
a)



b)



c)



**Figur 28;** a) Ledeskovlen som er gitt av bedriften Rainpower,  
 b) Bilde av domene som er tegnet i SolidWorks  
 c) Det endelige domene som blir laget ved hjelp av en "Boolean operation"  
 i ANSYS Design Modeller.

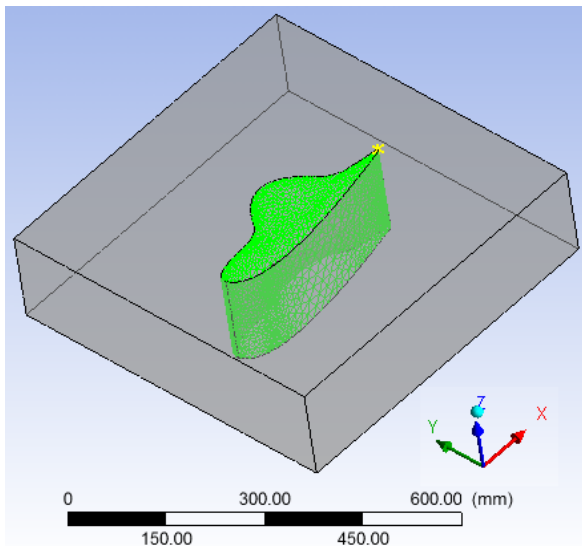
Strømningsdomene blir definert slik at det omkranser bladet på ledeskovlen fullstendig. Det er viktig at skovlen blir dekket på riktig måte ellers blir det fort feilbeskjeder i analysen.

Strømningsdomene er laget ved hjelp av SolidWorks og verktøy i ANSYS DesignModeler. Domene blir først tegnet opp ved hjelp av enkle funksjoner i SolidWorks før det blir tatt bort et materiale som tilsvarer skovlen. Dette blir gjort ved hjelp av en "boolean operation". I denne funksjonen kan trekke eller legge til en del fra en annen. I denne oppgaven blir selve domene valgt som utgangspunkt og så blir skovlen trukket i fra domene. Dette gjør at åpningen i domene blir som en støpeform i forhold til ledeskovlen.

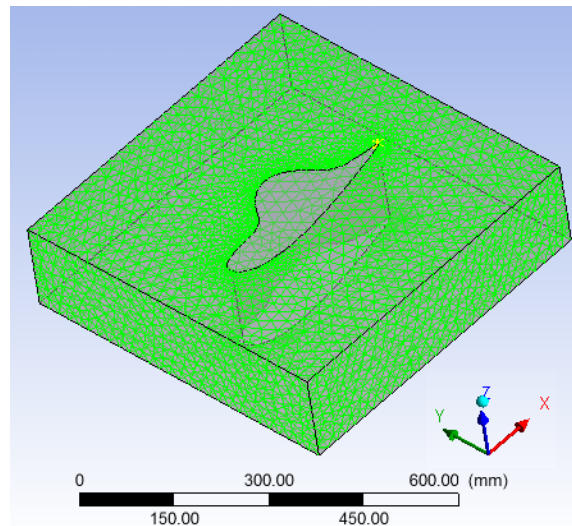
I CFX må man definere hva slags vegger som skal settes i analysen. Det kan for eksempel være innløp, utløp, symmetri, vegger eller kontaktflater mellom væske og struktur. I denne analysen vil det være vegger og kontaktflate mellom væsker og struktur.

Vegger vil si flater hvor det ikke er noen form for gjennomtrengning av væske. Overflaten blir satt til å være glatt da det ikke foreligger noen dokumentasjon på ruhet på overflaten. Det blir også sagt at det skal være en "No Slip Wall" det vil si at væskestrømmen har null fart, helt inn mot veggen i materialet. Kontaktflaten og de andre veggene kan ses i Figur 29.

a)



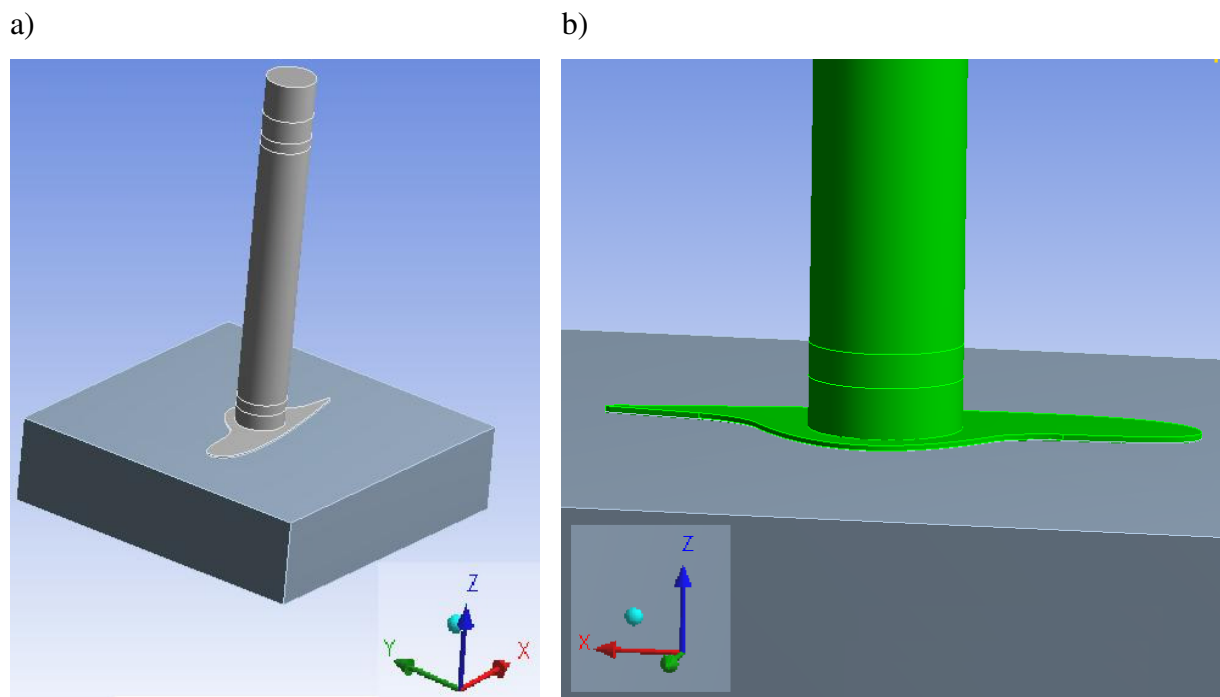
b)



**Figur 29;** a) Kontaktflate mellom strømming og struktur illustrert ved grønn merking,  
b) Andre vegger i CFX-analysen, illustrert ved grønn merking

Mediumet blir også satt til å være inkompressibelt. Kontaktflaten blir definert som nesten hele bladet på ledeskovlen. Bladet på ledeskovlen har en høyde på 170 mm og vannet blir satt slik at det har en klaring på 3,5 mm øverst og nederst på skovlen. Dette vil si at vannet får en høyde på 163 mm.

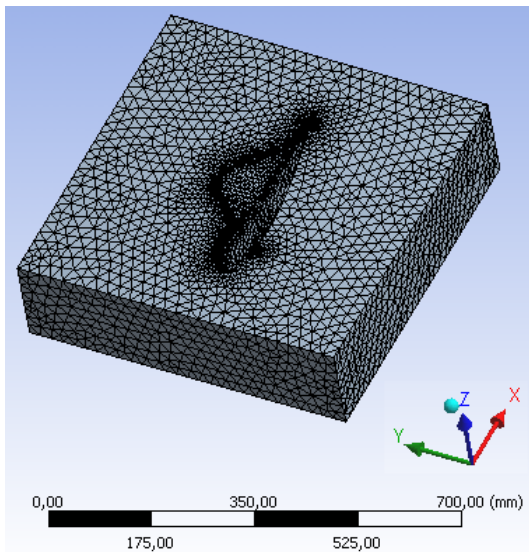
Dette er vanskelig å si hvordan blir i virkeligheten, men uansett kan ikke skovlen bli satt helt under vann. Hvis dette skjer vil ikke bladet på skovlen kunne dekke hele kanalen og turbinen vil da begynne å lekke vann når den ikke skal produsere elektrisitet. Nærbilde av hvordan det er tenkt at skovlen i denne oppgaven blir dekket av vann er vist på Figur 30 nedenfor.



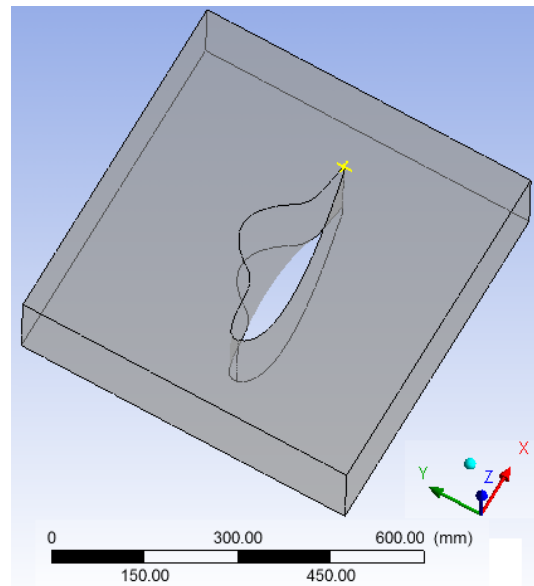
**Figur 30;** a) Bilde av hvordan luften omkranser skovlen, hele den lyseblåe boksen er luft,  
 b) nærbilde av hvordan luften omkranser ledeskovlen. Skovlen er sett fra bakkant det vil si at hvis skovlen hadde stått i turbinen ville vannet ha truffet på den skulte siden av bladet og kommet fra høyre mot venstre.

Bilde av meshet er vist nedenfor på Figur 31a og punktet hvor maks deformasjon tas ut er vist på Figur 31b som en gul prikk.

a)



b)


**Figur 31; a) Mesh til CFX-analysen,**
**b) Monitorpoint, punkt der deformasjonen blir målt er vist med en gul prikk.**

Det er meshet med totalt 21554 noder og 111662 elementer. Det er mulig å se at rett bak tuppen på bladet til ledeskovlen er det et finere mesh. Dette på grunn av at det er her man måler deformasjonen og det er dermed bruk for et fint og nøyaktig mesh der. Helt til høyre kan man se punktet hvor maksimal deformasjon blir målt. Det blir i denne analysen sett bort i fra deformasjon i Z-retning da denne vil være svært liten i forhold til deformasjonen i X og Y retning. En annen grunn er også at slike simuleringer stiller store krav til prosessor og RAM på datamaskinen. Ved å se bort fra deformasjon i Z-retning får man et 2-D system i stedet for et 3-D system. Dette sparer man en god del regnetid på.

### 5.5.2. Ledeskovl i stillestående vann

I denne analysen er oppsettet helt likt som i simuleringen uten vann. Forskjellen er på noen variabler i CFX analysen. Det er forandret på væsken slik at det nå er vann og ikke luft som omgir skovlen. Variabler som er forandret på kan ses i Tabell 13.

**Tabell 13; Forskjeller mellom analyser i vann og luft**

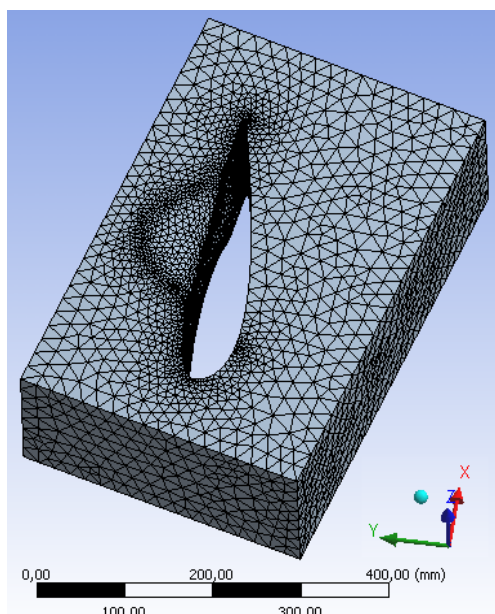
| Variabel                                           | Luft               | Vann              |
|----------------------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]                       | 1                  | 1000              |
| Dynamisk viskositet [ $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ] | $18 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-3}$ |

### 5.5.3. Ledeskovl i vann med $2 \cdot 10^6$ Pa på skovlen

Det er også her det samme oppsettet som i de foregående analysene. Forskjellen er at her blir det satt på et ekstra trykk på skovlen på  $2 \cdot 10^6$  Pa. Dette skal illustrere et maks trykk på skovlen som kommer fra den totale trykkehøyden på cirka  $2,083 \cdot 10^6$  Pa. Dette vil være makstrykket på skovlen når ledeskovlene stenger helt for volumstrømmen igjennom turbinen. Ved en liten økning av åpningsvinkelen vil trykket synke og det blir derfor satt et tilnærmet trykk på 2 000 000 Pa på ledeskovlen. Trykkpulsasjonene vil være de samme som før.

### 5.5.4. Ledeskovl i vann med volumstrøm

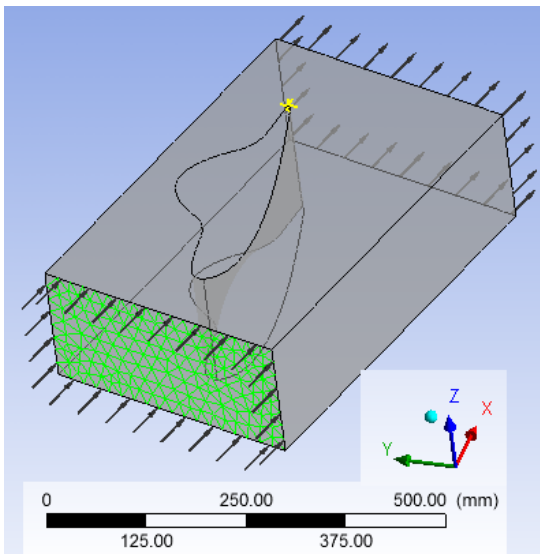
For å kunne se på mulige forskjeller mellom egenfrekvensene i vann og i strømmende vann blir det også kjørt en analyse der hvor vannet kommer inn mot skovlen med en hvis hastighet. Det vil bli kjørt forskjellige hastighet for å kunne se om det kan bli forskjellige deformasjoner på skovlen, eller om strømmingen kan stabilisere ledeskovlen. Siden det er hastigheter på vannstrømmen blir domene lagd litt lenger og litt smalere enn i de foregående analysene, for å kunne sjekke om det ble dannet en trykkvake bak ledeskovlen. Dette reduserer også faren for feilbeskjeder i analysen, da et kort domene bak ledeskovlen ofte blir problematisk for å kunne få en konvergerende løsning.



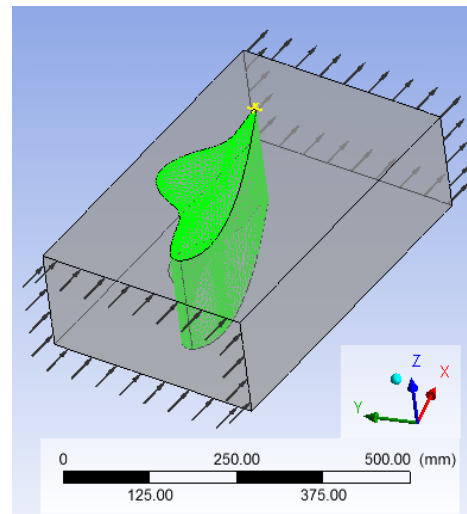
**Figur 32; Meshet til skovel med vann. Vannet kommer inn nærmest den runde formen på ledeskovlen og går rett igjennom domene før vannet går ut på den motstående siden. Det er valgt et CFX mesh med en medium oppløsning på 89145 elementer og 17307 noder.**

Oppsette er noenlunde det samme som i de foregående analysene men veggene i CFX blir litt forandret. To av veggene blir nå satt til innganger og utganger i stedet for vegger. Dette kan ses på Figur 33.

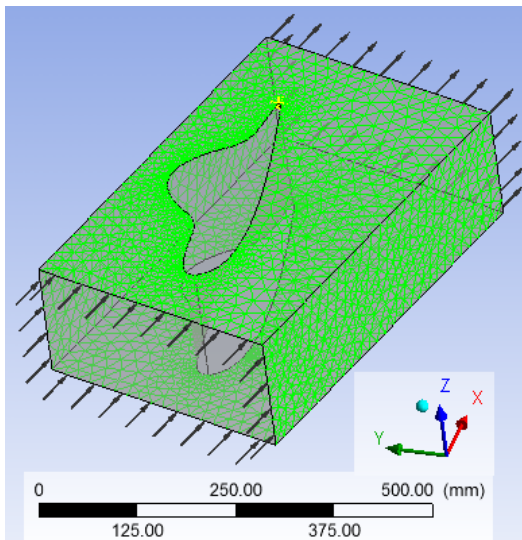
a)



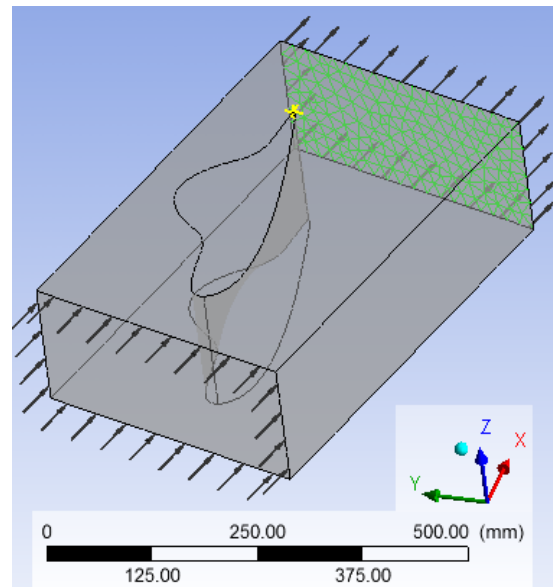
b)



c)



d)



**Figur 33;**

- a) Grønn flate er definert som inngangsflaten til vannet og vannet har den samme retningen som pilene på figuren.,
- b) Den grønne flaten viser kontaktflaten mellom struktur og væske,
- c) De grønne flatene viser vegger som blir igjen. Det er nå totalt fire vegger i stedet for tidligere seks vegger,
- d) Den grønne flata viser utgangen til vannet.





### 5.5.5. Ledeskovl i vann med riktige randbetingelser

Til slutt er det også valgt å kjøre en analyse der hvor det er tatt med riktige grensebetingelser som for eksempel utgangstrykk og volumstrøm. Dette er viktig da dette er den mest riktige analysen å kjøre. Det er i alle de foregående oppgavene kjørt med et atmosfærisk trykk på utgangen.

I en Francis-turbin vil forholdet mellom trykk og hastighetsenergi være rundt 1. Det vil si at det er like mye hastighet som det er trykkenergi som gjør at løpehjulet går rundt, og bidrar til at turbinen produserer strøm. Det vil derfor bli satt på halve trykkhøyden i trykk på utgangen. Det vil si at blir satt på et trykk på  $1,0415 \cdot 10^6$  Pa på utgangen.

Fra før i oppgaven er det oppgitt en volumstrøm, trykk, vinkler lengdemål osv fra Rainpower. Da det bare blir analysert frekvenser over en skovl må disse verdiene tilpasses til en skovl. Det første som må gjøres er å finne volumstrømmen som virker på en ledeskovl. Det er denne volumstrømmen som også går inn i kanalen.

$$Q^*_k = \frac{Q^*}{i} \quad (5.5.5.1)$$

Der  $Q^*_k$  er volumstrømmen ved bestpunkt igjennom en kanal,  $i$  er antall løpeskovler og  $Q^*$  er den totale volumstrømmen gjennom hele turbinen, ved bestpunkt.

$$Q^*_k = \frac{12,6 \text{ m}^3 / \text{sek}}{28} = \underline{\underline{0,45 \text{ m}^3 / \text{sek}}} \quad (5.5.5.1)$$

Det er også viktig å finne en riktig størrelse på domene siden det er volumstrøm som er oppgitt. Et for lite domene vil gi en for høy hastighet på vannet rundt skovlen. størrelsen på domene blir en 28 del av en hel sirkel.

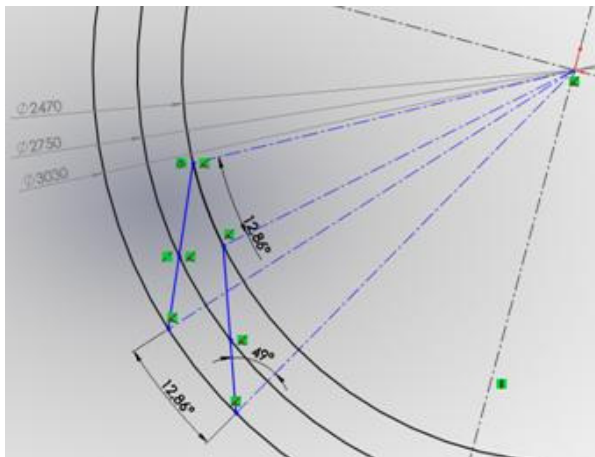
$$s = \frac{360^0}{i} \quad (5.5.5.2)$$

Der  $s$  er vinkelen som bestemmer domene og  $i$  er antall ledeskovler

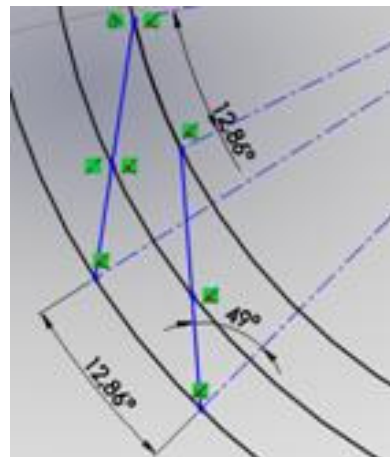
$$s = \frac{360}{28} = \underline{\underline{12,86^0}} \quad (5.5.5.2)$$

Denne vinkelen er vist på Figur 34.

a)



b)



**Figur 34;** a og b) Skjermbilder fra SolidWorks. Vannet kommer inn mellom de to blå strekene på skrått inn mot turbinen. Alle de blå strekene går inn mot midten. Dette punktet er midten av turbinen. Alle vinkler er dermed definert ut fra dette punktet. Vinklene blir som regnet ut eller gitt er på 12,86 og 49 grader.

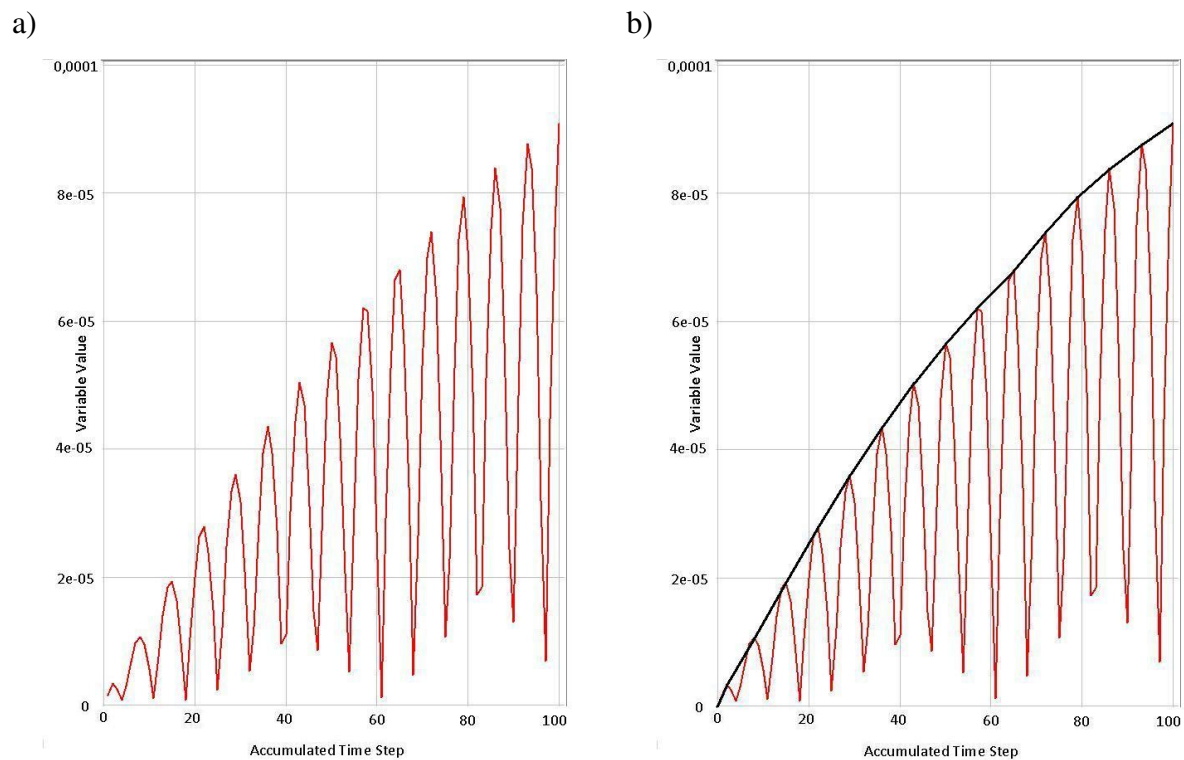
Vinkelen på 49 grader er gitt av Rainpower som en initialbetingelse. Det er retningen på vannstrømmen inn mot turbinen som er på  $49^{\circ}$ . for å gjøre det lettere å finne riktig inngangsvinkel på vannstrømmen blir domene avskjært slik. Da kan væskestrømmen settes parallelt med den ene sideflaten til domene.

Å sette på vannretningen på denne måten vil være en forenkling. Dette på grunn av at i en virkelig situasjon vil vannet kunne strømme friere når det er på vei mot ledeskovlen. Da ledeskovlene er mindre avskilt fra hverandre enn de er satt i analysen.

## 6. RESULTATER

### 6.1. Tolkning av resultater

I oppsettet til ANSYS CFX og Transient er det sagt at det skal beregnes 100 punkter i løpet av analysetiden. Det er viktig at CFX og Transient er innstilt til å beregne like mange punkter. Analysetiden er sju sykluser og det vil dermed bli beregnet cirka 15 punkter per svingning. Dette regnes som er tilstrekkelig nøyaktighet for å kunne se forskjellen mellom de forskjellige frekvensene. Ved flere punkter øker også beregningstiden til analysen. Nedenfor er det vist hvordan CFX skriver ut resultatene. Det er tatt ut maks deformasjon. Det vil dermed si at all deformasjon vil få en positiv verdi. Selv om ledeskovlen oscillerer om nøytralaksen.



**Figur 35;**     **a) Resultatene til ANSYS,**  
                   **b) Linja som er plottet som resultat i analysene.**

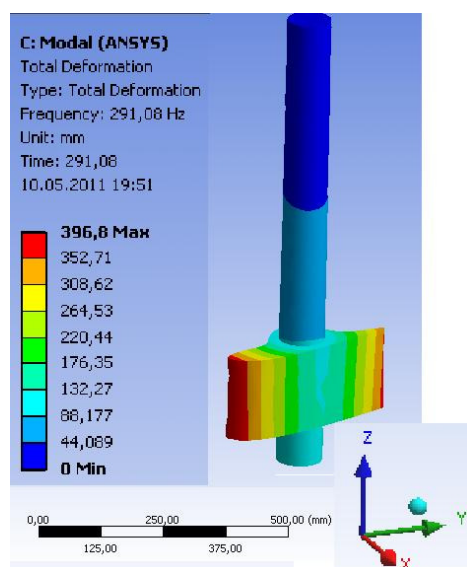
## 6.2. Resultater av egenfrekvensen til ledeskovlen

Nedenfor følger resultatene fra Modal-analysen. Det er tatt ut 10 frekvenser. Frekvensene blir rundet av til nærmeste heltall. Hvordan den deformerte formen blir seende ut blir forklart i Tabell 14 nedenfor.

**Tabell 14; Frekvenser fra modal analyse**

| Frekvens nummer | Deformasjon/form                                  | Frekvens |
|-----------------|---------------------------------------------------|----------|
| 1               | Torsjon av aksel, nedbøyning av bladet            | 291      |
| 2               | Bøyning av aksel, sammentrykning av skovlen       | 1042     |
| 3               | Bøyning av aksel                                  | 1140     |
| 4               | Bøyning av aksel                                  | 1147     |
| 5               | Bøyning og sammentrekning av bladet               | 1810     |
| 6               | Torsjon av ledeskovlbladet.                       | 2288     |
| 7               | Torsjon av ledeskovlbladet                        | 2780     |
| 8               | Bøyning av aksel, vridning og bøyning av skovlen, | 2830     |
| 9               | Bøyning av aksel, vridning og bøyning av skovlen, | 2945     |
| 10              | Bøyning av aksel, vridning og bøyning av skovlen, | 3124     |

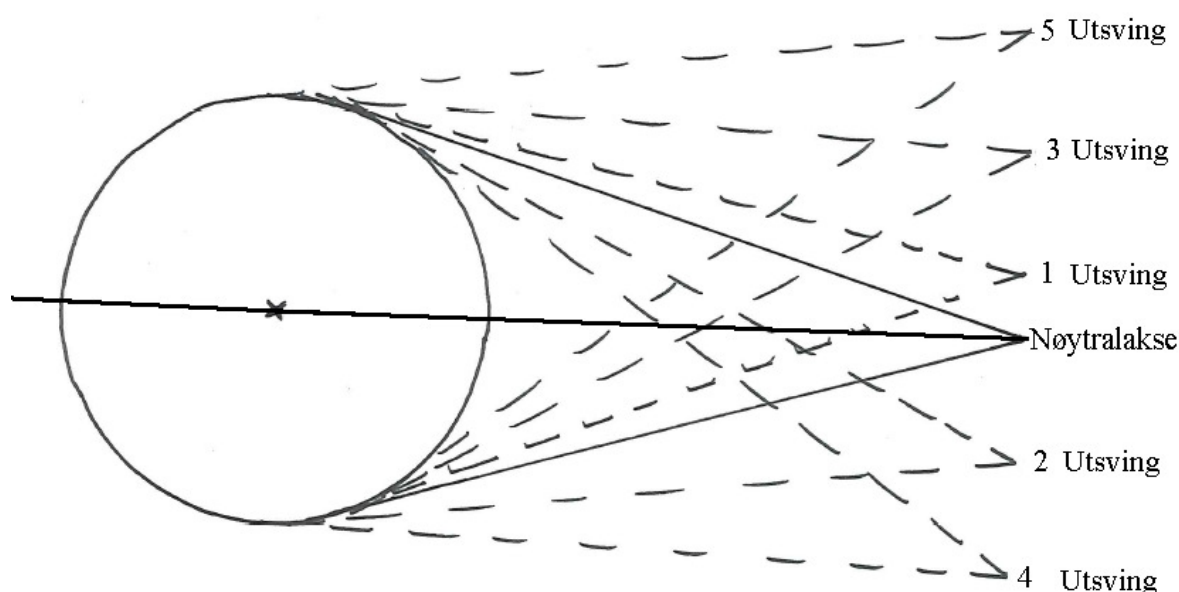
Siden det kun er en frekvens som ligger i nærheten av frekvensen til løpehjulet blir det sett bort fra de ni andre. Frekvensen som blir sett på er 291 Hz. De andre frekvensene blir sett på som lite nyttige. Dette på grunn av at de forekommer ved veldig høye frekvenser, disse er ikke funnet i vannkraftverk, og kan dermed ikke gi noen egenfrekvenser i systemet.



**Figur 36; Viser første bøyefrekvens som befinner seg på cirka 291 Hz. Der blir maks deformasjon på cirka 397 mm. Dette er en veldig stor deformasjon og har egentlig ingen annen verdi enn at det viser at resonanser gir store ukontrollerbare deformasjoner. Man ser på formen til deformasjonen at det er en bøyefrekvens siden det er kantene på bladet som blir mest deformert.**

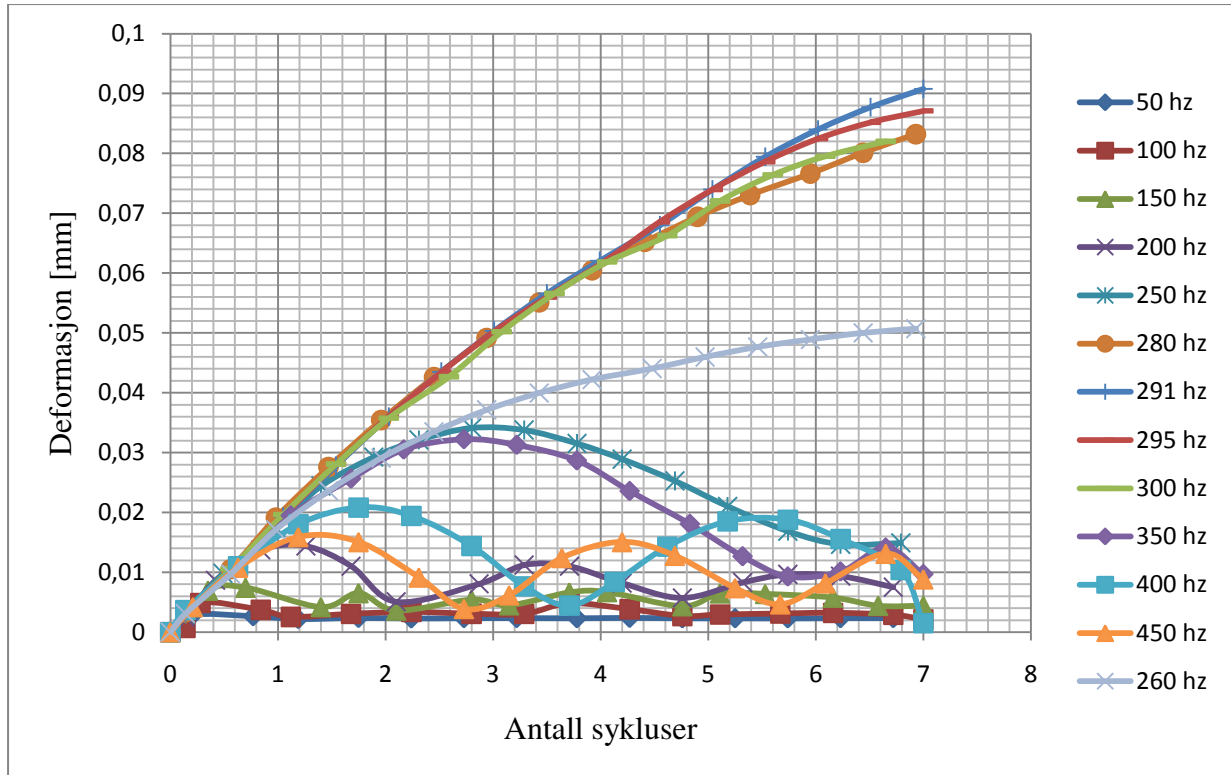
### 6.3. Deformasjoner i luft

For å kunne plote resultatene slik at informasjonen blir lettlest, er det valgt å plote maks deformasjon ved hver gang skovlen skifter retning. Skovlen skifter retning på grunn av den pulserende kraften. Nøytralaksen vil si punktet som skovlen har før kraften blir påsatt. Koordinatene til første utsving blir punkt nr 1 og koordinatene til andre utsving blir punkt nr 2 osv. Alle punktene er plottet med positiv verdi selv om tuppen på skovlen ofte svinger mellom positiv og negativ verdi. Dette på grunn av at ANSYS alltid definerer total deformasjon som en positiv verdi. Ledeskovlen roterer om senteret til akselen. På skissen nedenfor er det vist de fem første punktene som blir plottet.



**Figur 37;** Skisse av hvordan deformasjonen blir plottet. Skovlen roterer om punktet "x" midt i akselen. Skovlen er sett fra oversiden normalt på tverrsnittet til akselen. Tallene representerer de ulike syklusene som blir satt på. Her er det vist slik deformasjonen blir når kraften på ledeskovlen fører til resonans.

Langs X-aksen er det plottet antall sykluser. Hver analyse består av sju sykluser. Det vil dermed være slik at for en høyere frekvens som har flere svingninger per sekund vil det ta kortere tid før maks deformasjon oppstår. Men siden det er rundt visse frekvenser deformasjonen blir størst vil resultatene være sammenlignbare. Nedenfor er resultatene fra når ledeskovlen står i luft. Punktene er tatt ut av løsningsmodulen til CFX og er deretter plottet i Excel. Det er trukket linjer mellom de forskjellige punktene for og lettere kunne se trenden i analysene.



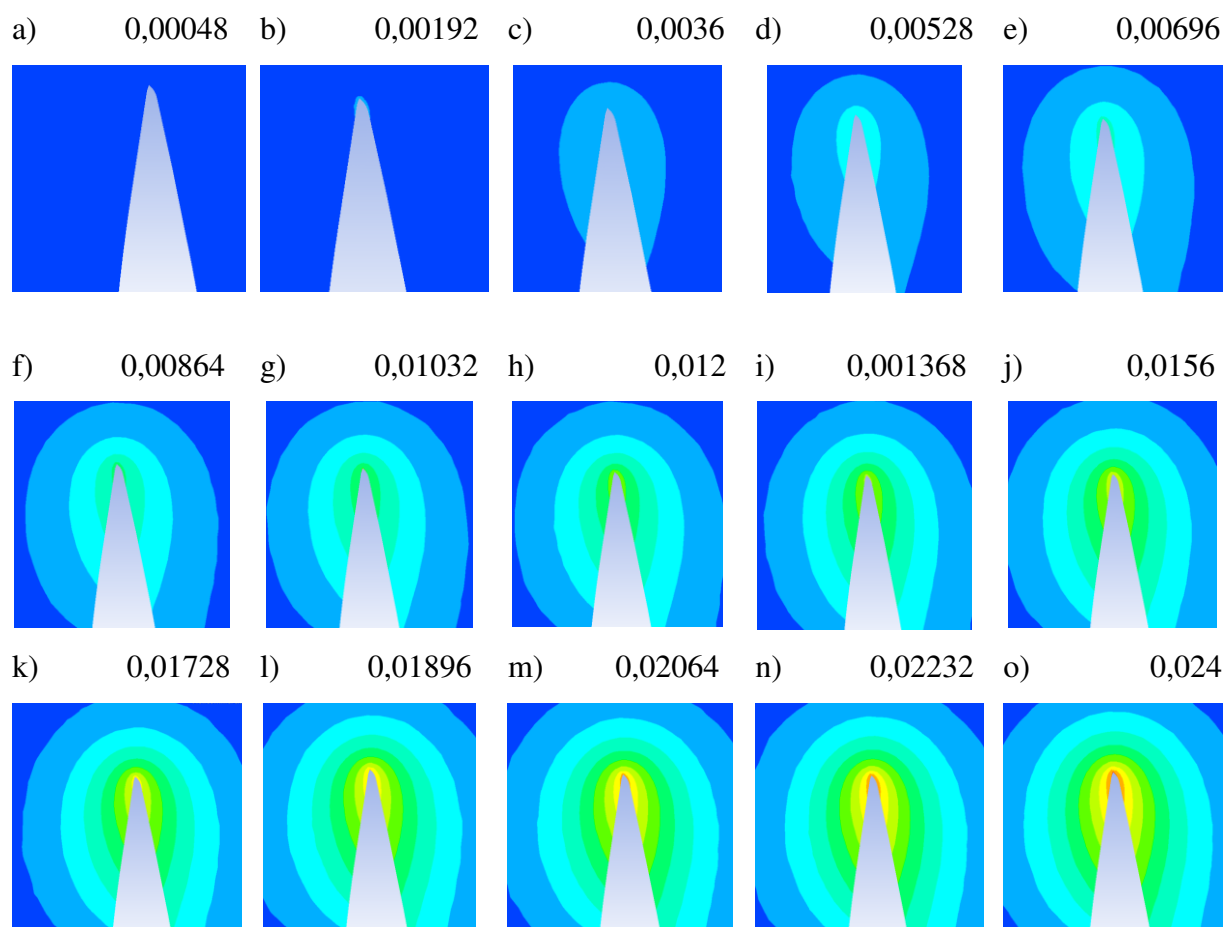
**Figur 38;** Plot av deformasjon av ledeskovl i luft i mm, som funksjon av antall sykluser. Fire frekvenser skiller seg ut dem er; 280, 291, 295 og 300 Hz. Av disse igjen er det maks deformasjon ved en frekvens på 291 Hz, ved den syvende syklusen. Der er deformasjonen 0,09 mm.

Som man ser av Figur 38 skjer det mest interessante rundt en frekvens på cirka 300 Hz. Ved en frekvens på 295 Hz og 280 Hz er deformasjonen mindre enn den er ved 291 Hz. Det vil si at egenfrekvensen mest sannsynlig ligger i mellom 280 Hz og 295 Hz. 291 Hz er regnet ut fra Modal analysen. Dette oppsettet stemmer derfor bra med det som er regnet ut. Ser at verken en veldig høy frekvens som 450 Hz eller en veldig lav frekvens som 50 Hz gir noen store utslag.

Siden disse koblingene stemmer ganske bra med det som er kommet frem i Modal analysen blir det valgt å fortsette med dette oppsettet. Siden disse koblingene fungerte såpass bra i luft blir det vurdert til at det også vil passe bra i en analyse hvor man har vann som mediet og ikke luft slik det er gjort her.

På Figur 39 nedenfor er det vist deformasjon ved de punktene som ANSYS CFX har tatt ut. Disse punktene beskriver maks deformasjon i hver syklus. Skovlene er sett fra oversiden og normalt på toppen av ledeskovlen, der det er zoomet inn på tuppen av skovlen. En mer detaljert forklaring følger etter Figur 39.



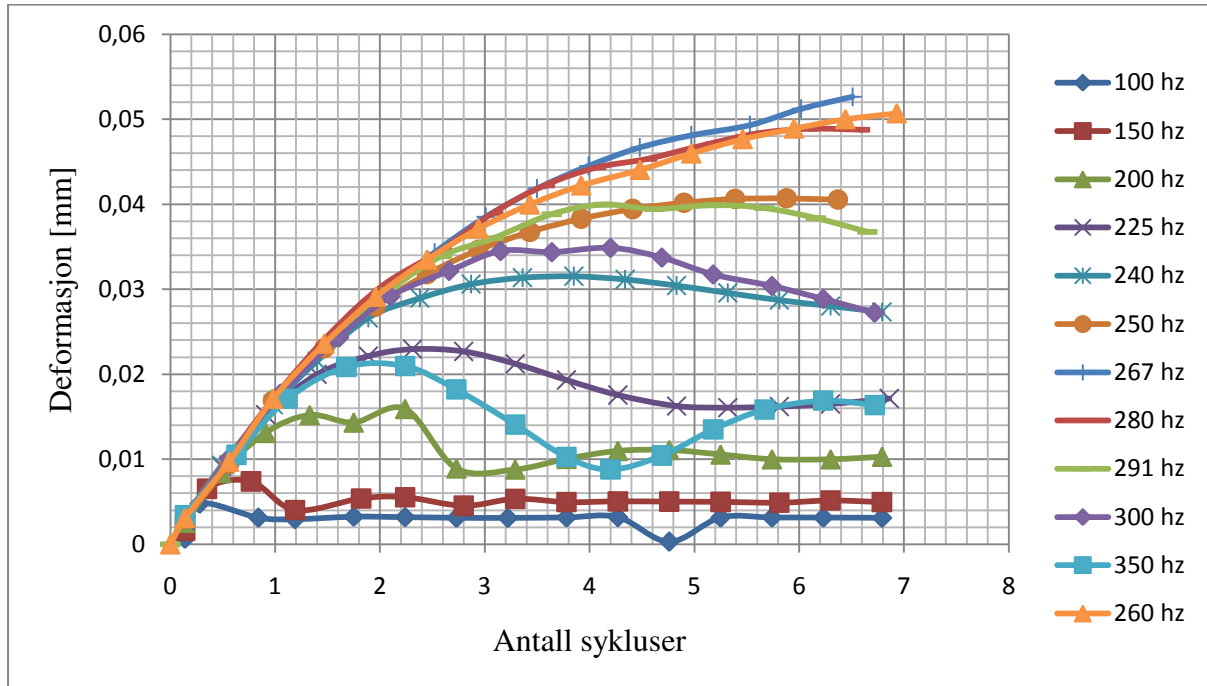


**Figur 39;** Total deformasjon med 291 Hz, ved punkter som er funnet med ANSYS CFX, utgangspunktet er i figur a) og etter 7 sykluser er deformasjonen i vannet blitt slik den er i figur o). Tallet øverst til høyre for hvert bilde er ved hvilket tidspunkt plottet er tatt ut.

Det er tydelig å se at fargespekteret rundt ledeskovlen øker for hver syklus. Dette er tydelig tegn på at det oppstår resonans i ledeskovlen. Ved sju sykluser vil det bli 15 punkter som er plottet fra CFX. Det er tydelig å se at for hver syklus vil deformasjonen bare bli større og større, da en sterkere farge illustrerer en stor deformasjon. Legg spesielt merke til det lille røde feltet som oppstår ved bilde o). Ved en frekvens som ikke er i nærheten av egenfrekvensen vil ikke deformasjonen øke som den gjør ved en frekvens på 291 Hz. Det er kjørt analyser over en tid på 0,024 sekunder. Det er et ganske lite tidsrom men på bakgrunn av begrenset kapasitet på maskiner og begrenset med tid i oppgaven blir det ikke kjørt over en lengre tid.

## 6.4. Plot av skovl i vann uten volumstrøm

Da ledeskovlen i Francis-turbinen er fullstendig dekket av vann når turbinene er under drift, er det også viktig å tenke på hvordan deformasjonen blir i vann. Nedenfor er det plottet deformasjonen som oppstår når skovlen er omgitt av vann. Skovlen står og oscillerer i et lukket område og det er ingen volumstrøm som kommer inn eller ut av domenet.

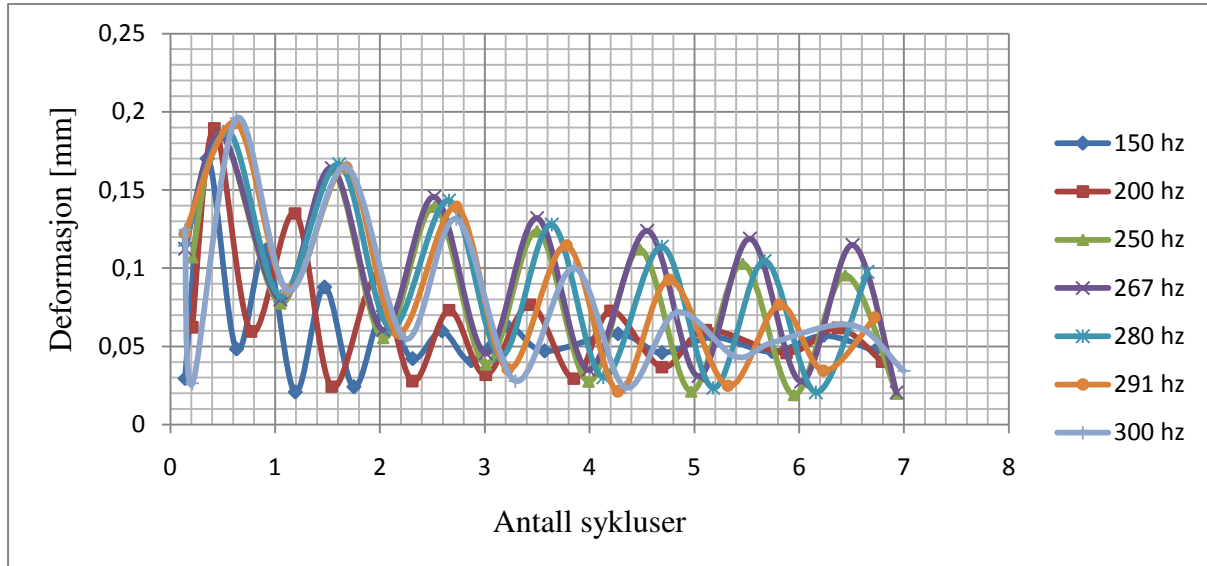


**Figur 40;** Plot av deformasjoner når ledeskovlen står i vann. Maks utsving er på 0,052 mm og etter syklus nummer sju med en frekvens på 267 Hz.

Ved de første syklusene er det liten forskjell på frekvensene. Etter litt stiger ikke de aller laveste frekvensene noe mer. Etter enda litt lenger tid vil heller ikke deformasjonen ved de høyeste frekvensene stige noe mer, da de begynner å flate ut og noen av frekvensene går også nedover i diagrammet. Maks deformasjon skjer ved en frekvens på 267 Hz og har da en deformasjon på cirka 0,052 mm. Dette er en liten deformasjon og kan kanskje virke neglisjerbar men det er viktig å huske på at deformasjonen skjer i løpet av 7 sykluser noe som i dette tilfelle vil si i løpet av 0,026 sekunder. Resonansfrekvensen i skovlen når den står i vann blir også lavere enn resonansfrekvensen blir i luft. Det stemmer med at vannet gjør det tyngre for skovlen å flytte på seg. Det oppstår dermed en added-mass effekt i systemet. Deformasjonene blir cirka det halve av det den er i luft og legg spesielt merke til at egenfrekvensen funnet i luft ikke skaper en resonans når skovlen står i vann. Det er også oppsiktsvekkende at skovlen får størst deformasjon ved 267 Hz da dette er frekvensen som skapes i systemet fra løpehjulet.

## 6.5. Plot av skovl i vann med trykk på skovl

Nedenfor blir det presentert deformasjonene ved forskjellige frekvenser når skovlen står i vann med et konstant trykk på  $2 \cdot 10^6$  Pa i tillegg til den variable lasten, på bladet på ledeskovlen.



**Figur 41;** Deformasjoner i mm på ledeskovlen med  $2 \cdot 10^6$  Pa i trykk på skovlen. Maks deformasjon blir i løpet av den første syklusen med en deformasjon på 0,2 mm, og en frekvens på 300 Hz. Det er dermed ikke så lett å skille de forskjellige frekvensene, og det er vanskelig å trekke noen fullstendig konklusjon.

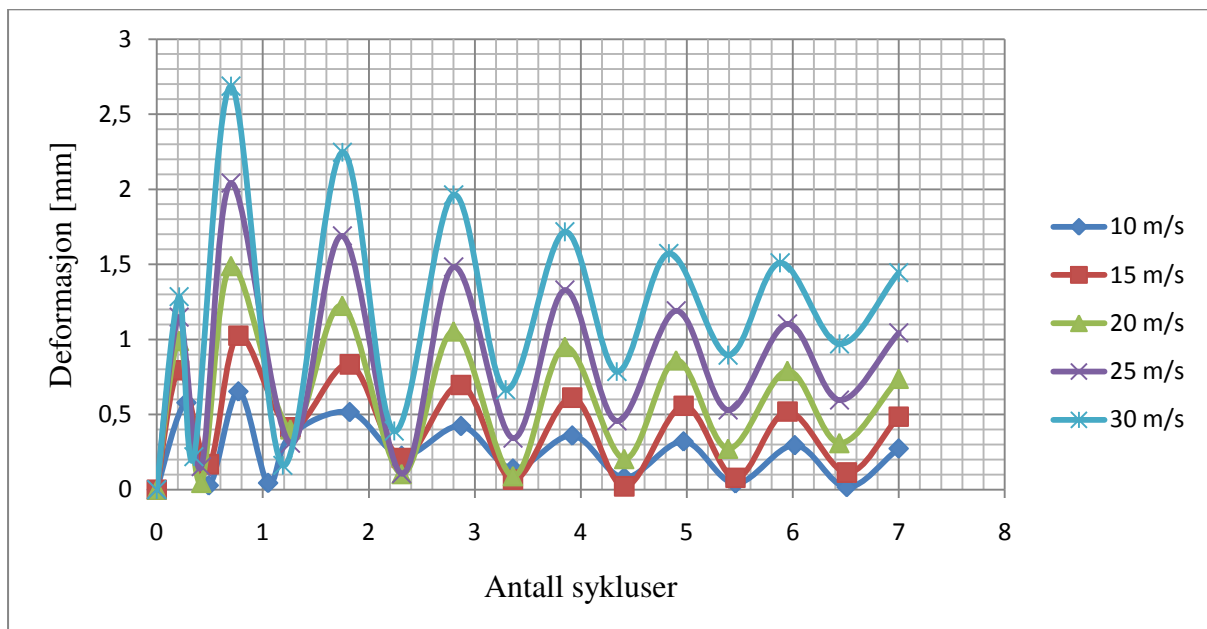
Etter en syklus er det veldig liten forskjell på frekvensene og det er ikke så stor forskjell senere heller det har nok med at  $2 \cdot 10^6$  Pa er et mye høyere trykk enn det som blir satt på fra trykkpulsasjonene. Og trykkpulsasjonene har dermed ikke så mye å si på deformasjonene. Det virker som om alle frekvensene pendler om en hvis verdi og at det ikke blir noen resonanser i noen av tilfellene.

Grunnen til at deformasjonen ikke stabiliserer seg er nok at utslaget blir større når trykkpulsasjonen går i samme retning som det konstante trykket mot skovlen. De aller laveste frekvensene skiller seg litt ut med en mindre deformasjon enn de som har en litt høyere frekvens etter som tiden går.

Det virker som om 267 Hz har den høyeste amplituden etter som sju sykluser har blitt kjørt, men den er ikke høyere enn den er etter en syklus. Det virker dermed som om det ikke er noen fare for resonans når den konstante kraften blir satt på.

## 6.6. Plot av skovl i vann med volumstrøm.

For å kunne kjøre en analyse med forskjellig hastighet på vannet er det valgt å forandre litt på væske domene rundt skovlen. Når hastigheten på vannet skal settes på er det viktig at vannet treffer skovlen med riktig vinkel. Skovlen er satt med en 11 graders åpningsvinkel, der null graders åpningsvinkel vil si at turbinen er helt lukket. 11 grader er likt med punktet hvor turbinen har maks virkningsgrad. Det er valgt og sette på en frekvens på 267 Hz på skovlen og variere inngangshastigheten. Denne frekvensen er valgt da det var den som ga størst utslag når skovlen stod i vann uten volumstrøm, og det er også denne frekvensen som er oppgitt fra Rainpower som frekvens fra løpehjulet. Vannet har da en vinkel på 49 grader der null grader er radielt inn mot turbinen. Nedenfor er det tatt ut resultatene fra CFX analysen. Ved fem forskjellige hastigheter på vannet.

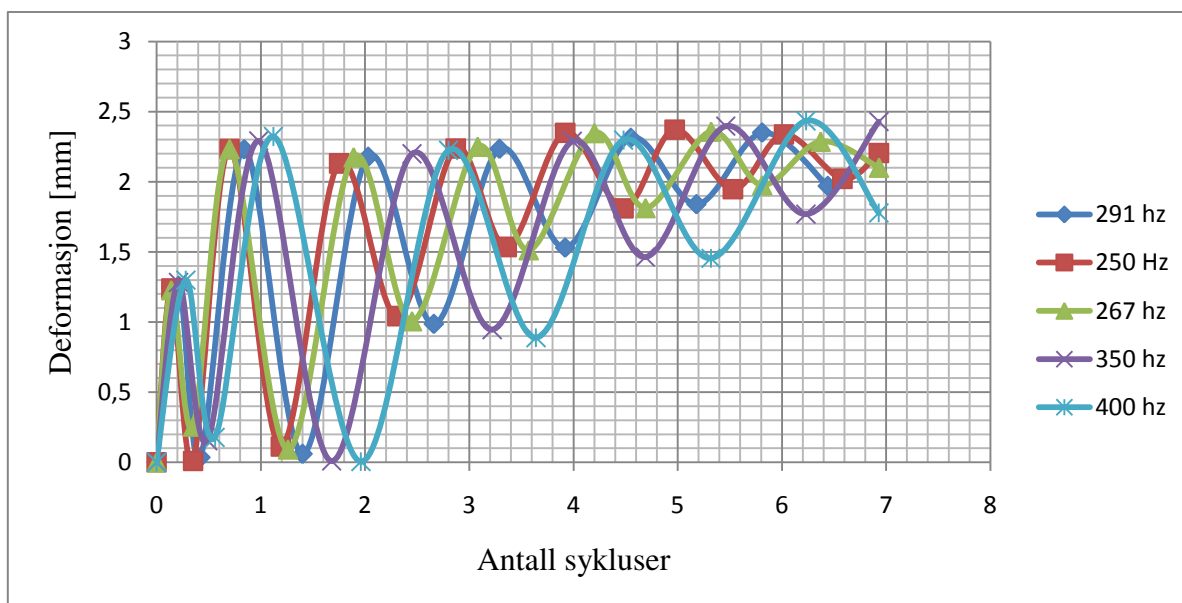


**Figur 42; Deformasjoner i vann med volumstrøm. Maks deformasjon skjer ved en hastighet på 30 m/s i løpet av den andre syklusen. Der er deformasjonen på cirka 2,6 mm.**

Når hastigheten på vannet øker vil skovlen stå og oscillere om en stadig større utbøyning. Dette stemmer godt med virkeligheten, da en større hastighet vil gi en større kraft på skovlen som igjen vil gi en større deformasjon. Etter det oscillerer skovlen mellom forskjellige verdier avhengig av hastighet på vannet. Det virker ikke som om det er noen fare for resonans da amplitudene ikke blir noe større, ettersom det blir kjørt flere sykluser.

## 6.7. Skovl i vann med randbetingelser fra Rainpower.

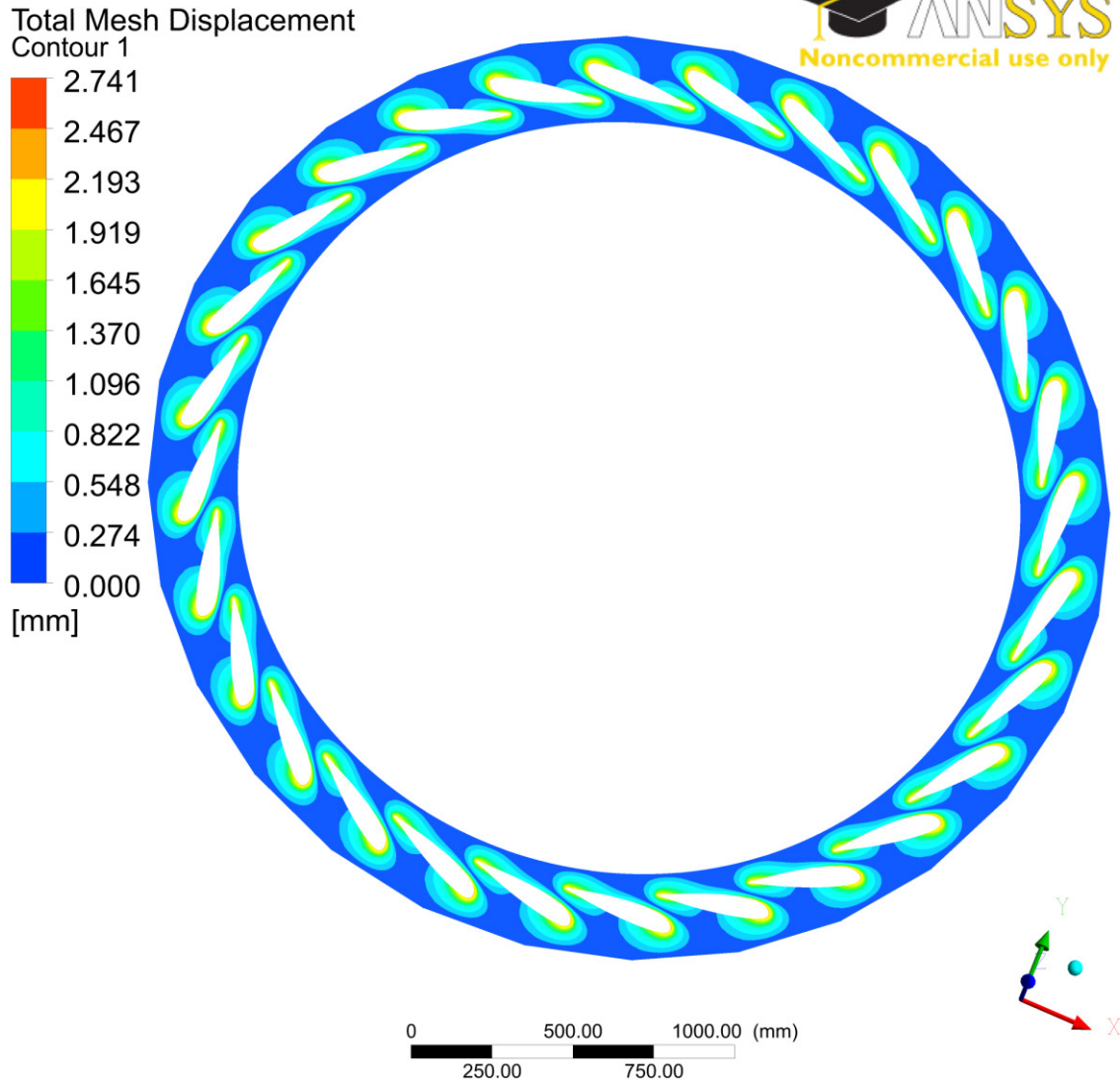
Her er det igjen valgt å forandre litt på domene størrelser og vinkler er forklart tidligere i oppgaven under kapittelet; Ledeskovl i vann med riktige randbetingelser. Nedenfor følger en oversikt over resultatene fra analysene.



**Figur 43; Oversikt over deformasjoner i forhold til antall sykluser hvor det er tatt hensyn til riktige randbetingelser. Maks deformasjon er på cirka 2,5 mm etter cirka 6 sykluser.**

Det er ikke så lett å se forskjellen mellom de forskjellige frekvensene. Det virker som om de stabiliserer seg om noenlunde det samme punktet, på cirka 2 mm. Det er også forståelig da hastigheten til vannet vil presse bladet på skovlen utover. Det virker derfor også som at vannstrømmen bidrar til å stabilisere bladet til skovlen slik at det ikke er noen fare for resonans likevel, slik det kunne virke som i de tidligere analysene.

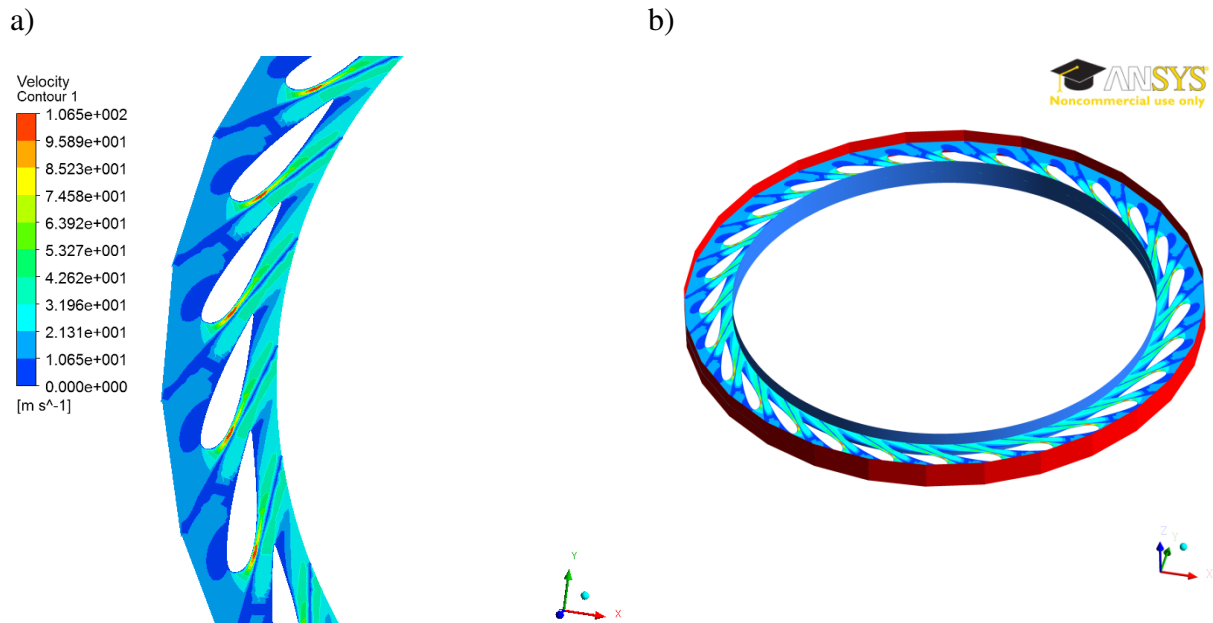
På Figur 44 nedenfor er det plottet total deformasjon i en komplett turbin med 28 ledeskovler. Det er kopiert det samme resultatet som er funnet i analysene 28 ganger rundt om Z-aksen. Siden det er kopiert rundt aksene 28 ganger vil det ikke være synlig om vibrasjonene på skovlene også vil virke inn på den skovlen som står ved siden av. Dette vil nok uansett være en veldig liten påvirkning i forhold til den pulserende kraften. Frekvensen som er vist er på 267 Hz, som er den samme som kommer i fra løpehjulet i turbinen.



**Figur 44;** En komplett turbin med 28 ledeskovler. Ser av figuren at det er maksimalt 2,725 mm i deformasjon. Det er her plottet ved en frekvens på 267 Hz. Altså den frekvensen som kommer i fra løpehjulet. Volumstrømmen blir på totalt 12,6 m<sup>3</sup>/sek gjennom alle skovlene. Turbinen har en radius på 1235 mm ved avløpet. Det vil si på innsiden av sirkelen.

Z-aksen som deformasjonsplottet er rotert om er den blå aksene som kan ses til høyre i Figur 44. Det er et 2-D plott som er tatt cirka på midten av bladet. Tidspunktet figuren er tatt er ved slutten på analysen. Det vil si når deformasjonen er størst. Nedenfor på Figur 45 er det vist et hastighetsplot av hva som skjer når vannet kommer inn mot skovlen. Det er zoomet inn på bare noen skovler på grunn av at det skal være lettere å se detaljene i figuren.





**Figur 45;** a) Hastighetsplot rundt ledeskivlene. Vannet kommer inn fra venstre i figuren og passerer på hver side av ledeskivlen, før det går ut i avløpet, b) Avløpet er markert som et blått bånd på innsiden av sirkelen, mens inngangen er markert som et rødt bånd på utsiden av sirkelen.

Den er vist rett bak ledeskivlene hvor man ser at hastigheten er mye lavere enn den er i resten av strømmingen. En lav hastighet vil gi et høyt trykk i følge Bernoullis likning. Ser man nøye etter ser man trykkvaken som skaper trykkpulsasjonene. Trykkvaken er markert som et blått felt bak tuppen til skivlen. Ved et finere mesh ville denne trykkvaken ha blitt mer synlig og ikke så kantete. Men på grunn av løsningsstider og kapasitet på datamaskiner blir ikke dette sett mer nøyaktig på.



## 7. PROSESSDISKUSJON

---

Erfaringene som har kommet gjennom dette prosjektet har vært mange. Ettersom oppgaven gikk igjennom var det kanskje ting man skulle ønske at man gjorde med en gang og ikke først fant ut etter mye arbeid. Det var også en bratt læringskurve i starten med å lære seg et helt nytt program som ANSYS CFX. Oppgaveforfatteren hadde ingen erfaring med dette programmet før oppgaven startet. Etter hvert som man ble kjent med programmet gikk simuleringene lettere. Etter en stund sluttet plutselig programmet og fungere, men etter en del samtaler med datatjenesten på UMB samt opprettelse av en ny brukerkonto ble problemet fikset. Dette var problemer som kostet en god del tid og som man gjerne skulle ha vært foruten.

Erfaringer med å gjøre prosjektet for en bedrift var også spennende da man får en konkret arbeidsoppgave som viser seg å være et problem i det virkelige liv. Dette gjør prosjektet lettere å gjennomføre da ditt arbeid kan være med på å begrense resonansproblematikken i Francis-turbiner.

Tidsperspektivet i store oppgaver som denne kan være vanskelig å forholde seg til. Ting tar som oftest lenger tid enn det man tror noe som kan gjøre hverdagen litt stressende på slutten av prosjektet. Det kunne nok ha vært lurt og kommet tidligere i gang med oppgaven slik at den totale arbeidstiden ble fordelt utover flere arbeidsdager.

I begynnelsen var det også vanskelig å finne litteratur som omhandlet disse problemene. Litt av grunnen var at mange av tidsskriftene er sperret for åpen nedlastning og må derfor bestilles gjennom bibliotek. Dette kan være ganske dyrt og det er ikke alltid artikkelen omhandler det man er ute etter. Men etter en del leting i databaser var det til slutt noen databaser som hadde gratis artikler. Dette sammen med doktorgradsarbeid fra NTNU gjorde at man fikk tilgang til interessante artikler.

Blant de faglige erfaringene som ble kjent i denne oppgaven var det at det ble en ”added mass” effekt når skovlen ble satt i vann. På grunn av at ledeskovlen er en forholdsvis stiv struktur ble ikke resonansfrekvensen redusert med like mye som den ble i de andre tidsskriftene. De andre tidsskriftene så mye på forskjellige vingeprofil. Vingeprofil har en mye mykere struktur enn en ledeskovl, og noe av forklaringen kan nok ligge der.



Usikkerhetsmomentene gjennom oppgaven kan være at det er gjort en hel del forenklinger for å kunne få analysen til å fungere ved hjelp av de ressursene som skolen har tilgang til. Det blir spesielt at det i analysene bare er kjørt sju sykluser. Med data-ressursene på UMB tok disse analysene cirka 3,5 timer hvor hver eneste frekvens som er blitt kjørt. Det kunne med fordel ha blitt kjørt flere sykluser for og lettere kunne komme frem til en konklusjon men det hadde tatt uforholdsmessig lang tid.

Domene kunne med fordel ha vært litt større men det hadde igjen gjort så analysen hadde tatt lenger tid da det ville ha blitt flere elementer og noder. I denne oppgaven ble det bare antatt en størrelse på domene som så stor nok ut. En annen feilkilde er hvor langt opp på skovlen vannet står. I denne oppgaven ble vannet satt nesten helt opp til over-og undersiden på bladet til ledeskovlen. Dette kan vise seg å være forskjellig fra virkeligheten. Hvis vannet står enda lenger opp på skovlen vil det mest sannsynlig medføre at resonansfrekvensen synker enda mer, enn den ble funnet til her. Da mer vann vil gjøre added mass påvirkningen enda større.

Svakheter gjennom denne analysen var at det ikke er gjort noen håndberegninger for å kunne verifisere de resultatene som ANSYS har kommet frem til. Det er ikke håndberegnet noe særlig i denne oppgaven på grunn av at de analysene som er kjørt i denne oppgaven lar seg vanskelig beregne for hånd. Det kunne alternativt ha blitt regnet på egenfrekvensen til ledeskovlen men dette er sjekket ved hjelp av to forskjellige moduler i ANSYS og disse resultatene bør derfor gi en nokså riktig verdi. Det er uansett slik at frekvenser som ligger i nærheten av egenfrekvensen bør man unngås med ganske stor margin. Så om egenfrekvensen egentlig er noen få Hz lavere eller høyere bør ikke dette spille noen stor rolle.

Når det gjelder analysene med trykk på utgangen og med randbetingelser fra Rainpower kunne domene ha vært bedre tilpasset skovlen. Domene ble litt trangt slik at hastigheten på den ene siden av skovlen ble en god del høyere enn det nok er i virkeligheten. Dette kunne ha blitt forhindre ved og kjørt en domene som hadde gått over tre skovler i stedet for en. Da kunne man sett på hvordan strømmingen ble på begge sider av skovlen uten at veggene på domene hadde forandret på hastigheten til vannet i mellom skovlene.

Innspenningene i oppgaven bør også ses nærmere på. Det er i denne oppgaven lagt til grunn av skovlen regnes som fast innspent øverst på akselen og med 3 friksjonsfrie opplagere ved



flater som er definert fra Rainpower. Hvordan dette blir i forhold til virkeligheten er vanskelig å si. Innspenninger er ofte et vanskelig tema da det i de virkelige situasjonene er vanskelig å vite hva man skal definere det som. Dette er ofte svært avgjørende for hvordan resultatet av analysen blir. Et eksempel på denne problematikken er om bladet på skovlen kan bevege seg i aksiell retning. I denne oppgaven er det definert at den kan bevege seg slik.

Denne oppgaven har fortsatt mye ugjort ved seg. Og mye arbeid kan gjøres videre. En oppgave som det kan forbedres mye på er og kjøre mange flere sykluser for å se hvordan skovlen oppfører seg over et mye lengre tidsperspektiv. I denne analysen er det valgt å kjøre sju sykluser og det hadde vært spennende å kunne kjørt opp mot 100 sykluser og kanskje enda flere. For og virkelig kunne ha sett hvordan trykkpulsasjonene hadde virket inn på egenfrekvensene.

Svakhetene slik det er satt nå er at løpehjulet forårsaker like høye prosentvise trykkamplituder som løpehjulet til Antonsen [1]. Dette behøver ikke å være riktig da disse trykkamplitudene er funnet fra modeller i vannkraftlaboratoriet til NTNU og ikke løpehjul i fullskala ved store vannkraftanlegg. Det kunne derfor ha vært interessant og prøvd å måle trykkamplituder selv ved hjelp av CFX. For å kunne gjøre dette er det selvsagt nødvendig å få tilgang til geometrien til løpehjulet. I denne oppgaven er ikke det mulig på grunn av bedriftshemmeligheter hos Rainpower. Det er også slik at å analysere roterende ting i CFX er mye mer komplisert enn å analysere ting som står i ro.

Det kunne med fordel ha blitt sett mer på et optimalt mesh. Det er blant annet mulig å definere mesh slik at finheten på meshet følger tuppen på ledeskovlen. Det vil si at ANSYS hele tiden mesher finest rett bak tuppen på ledeskovlen uavhengig av hvor ledeskovlen befinner seg. Dette kalles for "sweep mesh" i ANSYS. Dette kunne nok ha spart analysene for litt regnetid samtidig med at løsningen muligens hadde blitt mer nøyaktig. Grunnen til at dette ikke ble gjort er at dette er vanskelig å få definert riktig, og det ble derfor valgt å utelate dette meshet.

En annen viktig oppgave er hvordan disse resonansfrekvensene kan bli forhindret. Kan det være lurt å forandre litt på geometrien til ledeskovlen eller kanskje lage skovlen av andre metaller, med en annen stivhet? Alle disse forskjellige variablene er ting som har blitt drøftet igjennom prosessen.



## 8. KONKLUSJON

---

**Konklusjonen blir i denne oppgaven delt opp i to ulike deler. Det er konklusjon av resultater, og videre arbeid. Anbefalinger er det som er kommet frem til i oppgaven, og videre arbeid er problemstillinger som må ses mer nøye på ved senere anledninger.**

### 8.1. Konklusjon av resultater

Nedenfor blir det som er kommet fram til i rapporten listet opp i forskjellige punkter. Det blir tatt hvert tilfelle hver for seg slik at det blir lettere å se de ulike resultatene som er funnet hver for seg. Til slutt blir det et sammendrag av konklusjonen der hovedmålet blir drøftet.

#### **Egenfrekvens med Modal modulen i Workbench;**

- Modalanalysen ga de ti første egenfrekvensene den første er mest interessant og den ble funnet til å være på cirka 291 Hz.
- Formen på frekvensen er en ren torsjon av akselen noe som medfører en bøyning av bladet på ledeskovlen.

#### **Deformasjoner i stillestående luft;**

- Koblingene mellom væske og struktur i ANSYS fungerte bra og ga rimelige resultater.
- Ved koblinger mellom ANSYS transient og CFX ble egenfrekvensen til ledeskovlen i luft beregnet til å være mellom 280 og 295 Hz i stille luft.
- Deformasjonen til ledeskovlen i luft ble beregnet til å være på cirka 0,09 mm, etter 7 sykluser noe som vil si etter 0,024 sekunder.

#### **Deformasjoner i stillestående vann;**

- I stillestående vann ble egenfrekvensen til ledeskovlen beregnet til å være i nærheten av 267 Hz.
- Deformasjonen til ledeskovlen i stillestående vann ble beregnet til å være på cirka 0,052 mm, etter sju sykluser. Det vil si etter 0,026 sekunder.



### **Deformasjoner i stillestående vann med $2 \cdot 10^6$ Pa i trykk på skovlen.**

- Med et trykk på  $2 \cdot 10^6$  Pa på bladet til ledeskovlen blir maks utslag på 0,2 mm, i løpet av den første syklusen.
- Maks utslag ble gitt ved en frekvens på 300 Hz, men det var liten forskjell mellom de ulike frekvensene.
- Det er ikke funnet noen grunn til at det kan bli dannet resonans med denne lasten på skovlen.

### **Deformasjoner i vann med forskjellige hastigheter på vannet mot skovlen;**

- Med en skovl i vann med volumstrøm og en åpningsvinkel på  $11^0$  ble det ikke funnet noen grunn til at det skulle bli større utslag med noen av de fem forskjellige hastighetene på ledeskovlen.
- Maks utslaget ble på 2,6 mm ved en hastighet på 30 m/s mot skovlen. Det ble ikke funnet noen fare for resonans ved dette tilfellet.

### **Deformasjoner i vann med betingelser fra Rainpower;**

- Med randbetingelser fra Rainpower ble maks deformasjon funnet på 2,5 mm etter den sjette syklusen. Det ble maks deformasjon når det ble satt på 267 Hz på ledeskovlen.
- Det ble ikke funnet noen fare for at det kan oppstå resonans i ledeskovlen.
- Vannet har mest sannsynlig en stabiliserende effekt på skovlen da en sterk vannstrøm vil forhindre at bladet på skovlen får for store deformasjoner, da deformasjonene må gå på tvers av vannstrømmen.

### **Generell Konklusjon;**

Trykkpulsasjonene ble funnet til å være på cirka fire prosent av den total trykkhøyden. Det ble som forklart tidligere i oppgaven funnet en egenfrekvens i luft på 291 Hz, og en egenfrekvens på 267 Hz i stillestående vann. Det gir et forhold mellom egenfrekvensen i vann og i luft på 0,918. Det er et høyere forhold enn det er kommet frem i de artiklene som det er skrevet sammendrag om. Det kan nok ha med at ledeskovlen er en mye stivere konstruksjon enn det et vingeprofil er. Dermed vil nok ikke vannet ha fullt så mye å si på egenfrekvensene som det ellers ville hatt.





## 8.2. Videre arbeid

Da det i denne oppgaven ikke er tid til å gå igjennom alt som må analyseres eller sjekkes ut nøyere må en del ting settes som videre arbeid. Disse tingene blir listet opp nedenfor.

- Lage et bedre mesh i CFX analysen, slik at man kanskje kan få redusert regnetiden drastisk
- Kunne kjøre analysene over et mye lengre tidsrom for og lettere kunne se utviklingen over mye lengre tid.
- Det kunne også ha vært interessant og fått tilgang til løpehjulet slik at man kunne ha beregnet trykkpulsasjonene nøyaktig.
- Teste beregningene som er funnet ved hjelp av CFX i virkeligheten. Dette er nok ikke mulig ved forfatterens studiested da det krever ganske avanserte målinger, utstyr og væskestrømmer.
- Beregne egenfrekvensene mer nøyaktig både i "Modal modulen" og i CFX slik at resonans frekvensene kan bli funnet mer nøyaktig.
- Det bør også foreslås ved hvilke nedre og øvre grense for frekvensene som bør utelukkes for at det ikke skal være noen fare for resonans overhodet.
- Undersøke om ledeskovlen kan bevege seg i aksiell retning. Dette vil i tilfelle medføre en liten endring av resonansfrekvensen til ledeskovlen.
- Finne en bedre måte å få ut resultatpunktene fra ANSYS CFX. De er i denne oppgaven tatt ut manuelt, men det bør være muligheter for å kunne få de kopiert til for eksempel Excel.
- Her er det bare kjørt over en skovl og det bør gå an å kjøre analysene over flere skovler. Dette stiller større krav til hvordan væskestrømmen blir satt på i analysene.



## 9. KILDER

---

Kildene blir delt opp to forskjellige deler det er nettkilder og skriftlige kilder. I skriftlige kilder menes det; bøker, internasjonale tidsskrifter, doktorgrader eller mastergradsoppgaver ved andre universiteter. Ved nettkilder menes det kilder som kun er å få tak i på nettet.

### 9.1. Skriftlige kilder

- [1] Ø. Antonsen, T. K. Nielsen, O. G. Dahlhaug og J. T. Billdal. **Pressure pulses in francis turbines vs. Guide vane design.** In 23<sup>th</sup> IAHR Symposium, Yokohama, 2006, 7 sider
- [6] S. Roth, M. Calmon, M. Farhat, C. Münch, H. Bjoern, og F. Avellan. **Hydrodynamic Damping Identification from an Impulse Response of a Vibrating Blade.** In P. Rudolf, editor, Proceedings of the 3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, volume 1, Brno , Oktober 14-16 2009, sider 253-260
- [7] Löhner R, Baum J D og Soto O, **On some open problems in Fluid-structure Interaction,** Fluid-Structure Interaction: Theory, Numerics and Application, Herrsching, am Ammersee (2008), side 179-188,
- [10] Samtale med Herbjørn Stenberg og Sverre Dahl Knutsen, Rainpower ASA, Kjeller, (23.02.11)
- [11] Einar Kobro , **Measurement of Pressure Pulsations in Francis Turbines,** Trondheim, 2010, ISBN: 978-82-2240-2, 75 sider
- [13] H. Keck, W. Michler, T. Weiss og M. Sick. **Recent Developments in the Dynamic Analysis of Water Turbines.** 2<sup>nd</sup> IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara, Romania, 2007, Side 9-20.
- [16] B. Hübner, U. Seidel, S. Roth, **Application of fluid-structure coupling to predict the dynamic behavior of turbine components,** 25<sup>th</sup> IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Timisoara Romania, 2009, Side 1-10
- [17] H. Brekke, **Ongoing research work on nonstationary flow problems at Norwegian University of Science and Technology,** Pressure Surges and Fluid Transients ,

England,1996, Side 399-415

- [18] K.Haugan, **Trykkpulsasjoner i Francisturbiner**, Institutt for miljø og prosesssteknikk, Trondheim, 2007, 184 sider
- [28] J.Jernsletten, **Analysis of non-stationary flow in a Francis reversible pump turbine runner**, NTH. Trondheim,1995
- [29] J. O. Haugen, **Typiske frekvenser i strømningsmaskiner**. Internt notat fra GE turbinlaboratoriet, 1998,

## 9.2. Nettkilder

- [2] **Dalsfoss kraftstasjon**, NVE og Norsk Vasskraft-og Industristadmuseum, <http://vasskrafta.no/turbinar/francis-turbin-article78-160.html> (Sist sjekket 01.05.11)
- [3] **Dalsfos kraftstasjon**, Bildedatabase ved Kjetil V, [http://foto.origo.no/-/image/show/985150\\_dalsfoss](http://foto.origo.no/-/image/show/985150_dalsfoss) (Sist sjekket 01.05.11)
- [4] **Vannkraftpotensial i Norge og verden**, NVE, Norges forskningsrad og Innovasjon Norge,<http://www.fornybar.no/sitepageview.aspx?sitePageID=1948> (Sist sjekket 01.05.11)
- [5] **Kvilldal Kraftverk**, Teknisk Ukeblad Media AS, [http://energilink.tu.no/leksikon/kvilldal\\_kraftverk.aspx](http://energilink.tu.no/leksikon/kvilldal_kraftverk.aspx) (Sist sjekket 01.05.11)
- [8] **Oversikt over Francis-turbin**, Forelesning fra TEP4195 kurs fra NTNU <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4195/> (Sist sjekket 01.05.11)
- [9] **Nærbilde av løpehjulet**, Turbosquid, <http://www.turbosquid.com/HDView/index.cfm/ID/361030/r/3/i/2> (Sist sjekket 01.05.11)
- [12] **Aeroelastic flutter**, Wikipedia,[http://en.wikipedia.org/wiki/Braniff\\_Flight\\_542](http://en.wikipedia.org/wiki/Braniff_Flight_542) (Sist sjekket 01.05.11)
- [14] **Tacoma Bridge før kollaps**, Answers Corporation, <http://www.answers.com/topic/galloping-gertie-large-image> Sist sjekket (26.04.11)
- [15] **Tacoma Bridge etter kollaps**, University of Washington, libraries, <http://www.lib.washington.edu/specialcoll/exhibits/tnb/fall7b.jpg> Sist sjekket (26.04.11)
- [19] **Vannkraft I Norge**, Statkraft [http://www.statkraft.no/Images/Vannkraft%2009%20NO\\_tcm10-4585\\_tcm10-](http://www.statkraft.no/Images/Vannkraft%2009%20NO_tcm10-4585_tcm10-)



- [11472.pdf](#) Sist sjekket (02.05.11)
- [20] **Wilmot Power Station**, flickr.com  
[http://www.flickr.com/photos/darkside\\_lemming/3441226832/in/photostream](http://www.flickr.com/photos/darkside_lemming/3441226832/in/photostream)  
Sist sjekket (01.05.11)
- [21] **Damanlegg**, Byggeindustrien  
[http://www.flickr.com/photos/darkside\\_lemming/3441226832/in/photostream](http://www.flickr.com/photos/darkside_lemming/3441226832/in/photostream)  
Sist sjekket (02.05.11)
- [22] **Om Rainpower**, Wikipedia <http://no.wikipedia.org/wiki/Rainpower>  
Sist sjekket (05.05.11)
- [23] **Om Rainpower**, rainpower <http://www.rainpower.no/nb/om-rainpower/oversikt>  
Sist sjekket (05.05.11)
- [24] **Referanse prosjekter**, Rainpower  
<http://www.rainpower.no/nb/virksomhet/store-prosjekter/store-referanseprosjekt>  
Sist sjekket (05.05.11)
- [25] **Rainpower avdeling Kjeller**, Rainpower  
<http://www.rainpower.no/nb/om-rainpower/oversikt> Sist sjekket (05.05.11)
- [26] **Venturieffekten**, Wikipedia <http://no.wikipedia.org/wiki/Venturi-effekten>  
Sist sjekket (09.05.11)
- [27] **Kontinuitetsligningen**, bitbok.no  
<http://www.bitbok.no/kjemiprosess/boka/5-kjemiteknikk/stromning-i-ror/>  
Sist sjekket (09.05.11)



## 10. VEDLEGG

---

**Her følger en liste over viktige vedlegg i rapporten:**

- |                  |                                                                   |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|
| <b>Vedlegg A</b> | Figurliste                                                        |
| <b>Vedlegg B</b> | Tabelliste                                                        |
| <b>Vedlegg C</b> | 2-D tegning av ledeskovlen                                        |
| <b>Vedlegg D</b> | Generert rapport fra ANSYS CFX med ledeskovlen ved 291 Hz i luft. |

# Vedlegg A:

## Figurliste:

|           |                                                                             |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figur 1;  | a) Rørledning fra fjellet og ned til Wilmot power Station .....             | 1  |
| Figur 2;  | a)Dalsfoss kraftstasjon .....                                               | 2  |
| Figur 3;  | a) Rainpower sin bygning på Kjeller .....                                   | 8  |
| Figur 4;  | Navn på viktige deler i et vannkraftanlegg.....                             | 13 |
| Figur 5;  | a)Snitt av Francis-turbin.....                                              | 16 |
| Figur 6;  | Nærbilde av Løpehjulet til Francis-turbinen .....                           | 17 |
| Figur 7;  | Venturimeter .....                                                          | 19 |
| Figur 8;  | Kontinuitetsligningen.....                                                  | 19 |
| Figur 9;  | a) Innspenningene .....                                                     | 22 |
| Figur 10; | Forklaring på vinkler på hjørnet av løpehjulet.....                         | 24 |
| Figur 11; | a) Hvordan målepunktene er definert.....                                    | 25 |
| Figur 12; | a) Rheinmannsfrekvens, .....                                                | 26 |
| Figur 13; | Skisse av hvordan resonans påvirker deformasjonen. ....                     | 27 |
| Figur 14; | a) Tacoma Bridge før kollapsen .....                                        | 28 |
| Figur 15; | Forklaring av prinsipp- forskjeller på 1-veis og 2-veis FSI analyser.....   | 29 |
| Figur 16; | a)Transient-modul med de forskjellige innstillingene.....                   | 31 |
| Figur 17; | Eksempel på variable last i ANSYS .....                                     | 32 |
| Figur 18; | a) Første bøyefrekvens, b) Første torsjonsfrekvens .....                    | 32 |
| Figur 19; | Oversiktsbilde av oppsettet i ANSYS Workbench med transient Structural..... | 34 |
| Figur 20; | Løsningstid for ulike analyse metoder .....                                 | 35 |
| Figur 21; | Skisse av forskjellige deler på ledeskovlen. ....                           | 36 |
| Figur 22; | a) Størrelse på trykkpulsasjoner .....                                      | 37 |
| Figur 23; | Oversiktsbilde av hvordan ledeskovlene er plassert .....                    | 39 |
| Figur 24; | a) Nærbilde av gaten som leder vannet inn mot løpehjulet.....               | 39 |
| Figur 25; | a)Innspenninger som er brukt i analysen .....                               | 40 |
| Figur 26; | Plot av frekvenser .....                                                    | 40 |
| Figur 27; | a) Mesh uten “Virtual Topology .....                                        | 41 |
| Figur 28; | a) Ledeskovlen som er gitt av bedriften Rainpower, .....                    | 46 |
| Figur 29; | a) Kontaktflate mellom strømning og struktur.....                           | 47 |
| Figur 30; | a) Bilde av hvordan luften omkranser skovlen .....                          | 48 |

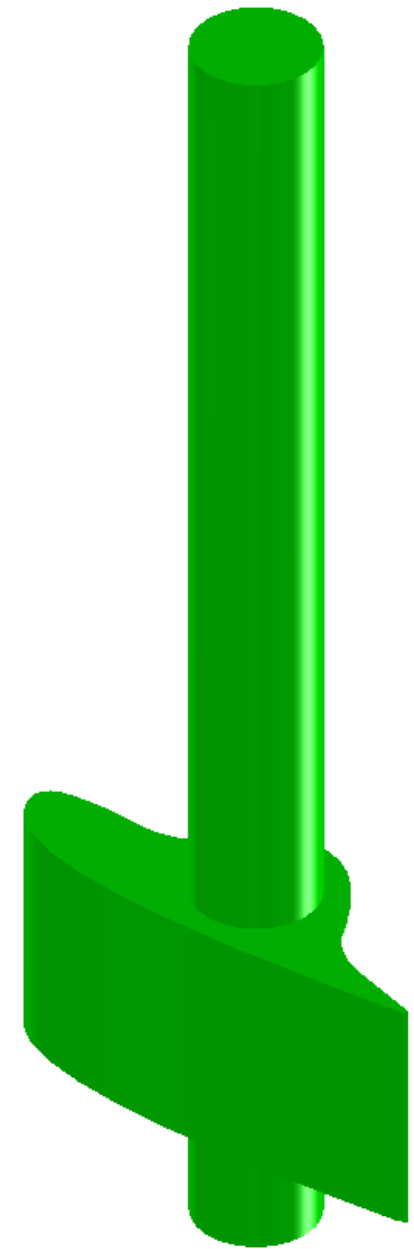
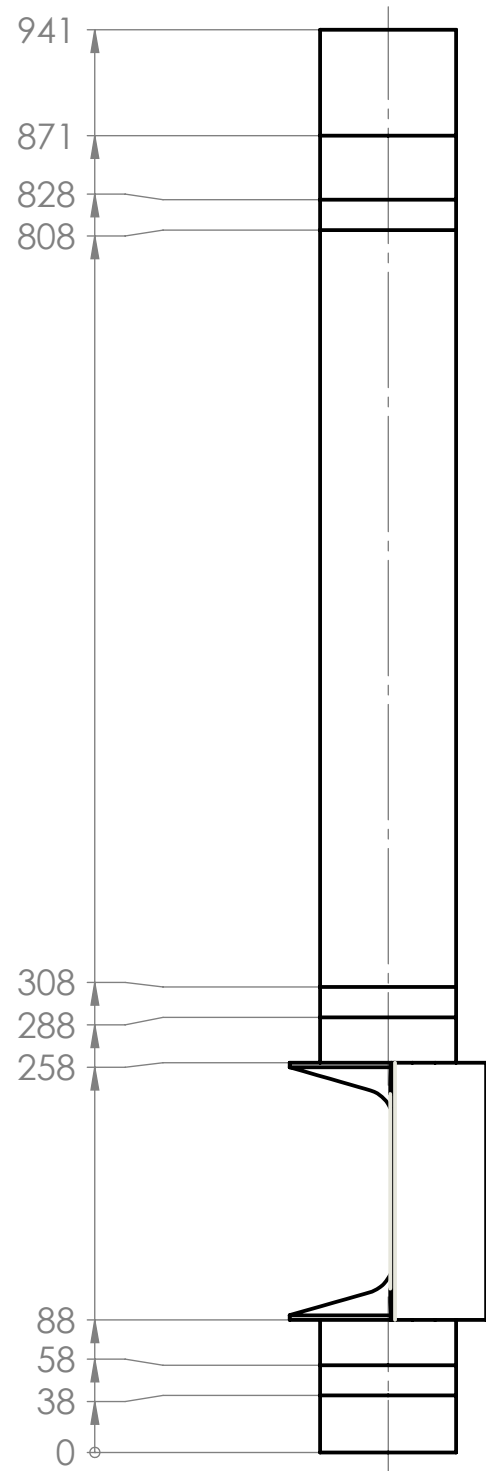
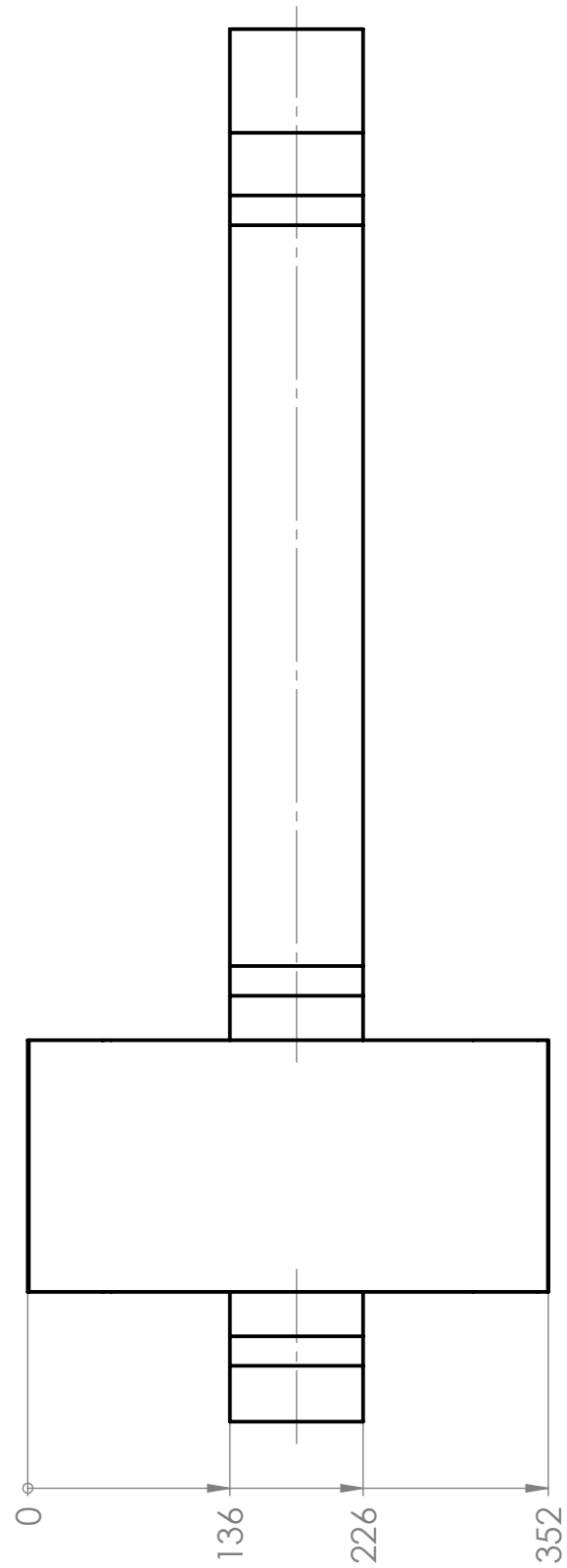


|           |                                                                                  |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figur 31; | a) Mesh til CFX-analysen, .....                                                  | 49 |
| Figur 32; | Meshet til skovel med vann.....                                                  | 50 |
| Figur 33; | a) Grønn flate er definert som inngangsflaten.....                               | 51 |
| Figur 34; | a og b) Skjermbilder fra SolidWorks. ....                                        | 53 |
| Figur 35; | a) Resultatene til ANSYS,.....                                                   | 54 |
| Figur 36; | Viser første bøyefrekvens som befinner seg på cirka 291 Hz.....                  | 55 |
| Figur 37; | Skisse av hvordan deformasjonen blir plottet .....                               | 56 |
| Figur 38; | Plot av deformasjon av ledeskovl i luft i mm .....                               | 57 |
| Figur 39; | Total deformasjon med 291 Hz, ved punkter som er funnet med ANSYS.....           | 58 |
| Figur 40; | Plot av deformasjoner når ledeskovlen står i vann .....                          | 59 |
| Figur 41; | Deformasjoner i mm på ledeskovlen med $2 \cdot 10^6$ Pa i trykk på skovlen ..... | 60 |
| Figur 42; | Deformasjoner i vann med volumstrøm .....                                        | 61 |
| Figur 43; | Oversikt over deformasjoner i forhold til antall sykluser .....                  | 62 |
| Figur 44; | En komplett turbin med 28 ledeskovler. ....                                      | 63 |
| Figur 45; | a)Hastighetsplot rundt ledeskovlene. ....                                        | 64 |

## **Vedlegg B:**

### **Tabelliste**

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Tabell 1; Arbeidsplan til prosjektet.....                   | 7  |
| Tabell 2; Symboler brukt i oppgaven.....                    | 9  |
| Tabell 3; Forkortelser som blir brukt i oppgaven .....      | 10 |
| Tabell 4; Ordforklaringer som blir brukt i oppgaven .....   | 11 |
| Tabell 5; Viktige former som blir brukt i oppgaven .....    | 12 |
| Tabell 6; Analyseinnstillinger til strømningsanalyse.....   | 42 |
| Tabell 7; Variabler for strømningsmediet.....               | 43 |
| Tabell 8; Variabler for domene innstillinger .....          | 43 |
| Tabell 9; FSI-innstillinger.....                            | 43 |
| Tabell 10; Globale innstillinger.....                       | 44 |
| Table 11; Konvergeringskriterier og nøyaktighet.....        | 44 |
| Tabell 12; Utkjøringsverdier .....                          | 45 |
| Tabell 13; Forskjeller mellom analyser i vann og luft ..... | 49 |
| Tabell 14; Frekvenser fra modal analyse .....               | 55 |



Kommentarer til arbeidstegningen:

|                          |                          |                     |                                           |
|--------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| <b>Dato:</b>             | <b>Konstr./Tegnet:</b>   | <b>Målestokk:</b>   | <b>Masteroppgave</b>                      |
| 01.05.11                 | Ole Petter Dirdal Moxnes | 1:5                 |                                           |
| <b>Tittel: Ledeskovi</b> |                          |                     | Alle mål er i mm om ikke annet er oppgitt |
| Vedlegg nr. C            |                          | Materialet: S-235JR | <b>Tegning nr. T-001</b>                  |
|                          |                          |                     | Antall 28                                 |

# Vedlegg D:

## 1. File Report

**Table 1.** File Information for ANSYS

|                     |                                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Case</b>         | ANSYS                                                                               |
| <b>File Path</b>    | D:\Luft_7_291hz\examples\ledeskovl_files\dp0\CFX\CFX\Fluid Flow_001.ansys\ANSYS.rst |
| <b>File Date</b>    | 13 april 2011                                                                       |
| <b>File Time</b>    | 07:42:37                                                                            |
| <b>File Type</b>    | ANSYS                                                                               |
| <b>File Version</b> | --                                                                                  |

**Table 2.** File Information for CFX

|                     |                                                                         |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Case</b>         | CFX                                                                     |
| <b>File Path</b>    | D:\Luft_7_291hz\examples\ledeskovl_files\dp0\CFX\CFX\Fluid Flow_001.res |
| <b>File Date</b>    | 11 mai 2011                                                             |
| <b>File Time</b>    | 12:39:03                                                                |
| <b>File Type</b>    | CFX5                                                                    |
| <b>File Version</b> | 12.1                                                                    |

## 2. Mesh Report

**Table 3.** Mesh Information for CFX

| <b>Domain</b>  | <b>Nodes</b> | <b>Elements</b> |
|----------------|--------------|-----------------|
| Default Domain | 21554        | 111662          |

## 3. Physics Report

**Table 4.** Domain Physics for CFX

| <b>Domain - Default Domain</b> |                             |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Type                           | Fluid                       |
| Location                       | B225                        |
| <i>Materials</i>               |                             |
| Material 1                     |                             |
| Fluid Definition               | Material Library            |
| Morphology                     | Continuous Fluid            |
| <i>Settings</i>                |                             |
| Buoyancy Model                 | Non Buoyant                 |
| Domain Motion                  | Stationary                  |
| Mesh Deformation               | Regions of Motion Specified |
| Mesh Motion Model              | Displacement Diffusion      |
| Mesh Stiffness                 | Increase near Small Volumes |
| Stiffness Model Exponent       | 1.0000e+01                  |
| Reference Pressure             | 1.0000e+00 [atm]            |
| Turbulence Model               | k epsilon                   |
| Turbulent Wall Functions       | Scalable                    |

**Table 5.** Boundary Physics for CFX

| Domain         | Boundaries                               |                                                            |
|----------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Default Domain | <b>Boundary - Default Domain Default</b> |                                                            |
|                | Type                                     | WALL                                                       |
|                | Location                                 | F226.225, F227.225, F228.225, F229.225, F230.225, F231.225 |
|                | <i>Settings</i>                          |                                                            |
|                | Mass And Momentum                        | No Slip Wall                                               |
|                | Mesh Motion                              | Stationary                                                 |
|                | Wall Roughness                           | Smooth Wall                                                |
|                | <b>Boundary - Interface</b>              |                                                            |
|                | Type                                     | WALL                                                       |
|                | Location                                 | F293.225, F309.225                                         |
|                | <i>Settings</i>                          |                                                            |
|                | Mass And Momentum                        | No Slip Wall                                               |
|                | Mesh Motion                              | ANSYS MultiField                                           |
|                | ANSYS Interface                          | FSIN_1                                                     |
|                | Receive from ANSYS                       | Total Mesh Displacement                                    |
|                | Send to ANSYS                            | Total Force                                                |
|                | Wall Roughness                           | Smooth Wall                                                |

## 4. Solution Report

**Table 6.** Boundary Flows for CFX

| Location               | Type     | Mass Flow  | Momentum    |             |             |
|------------------------|----------|------------|-------------|-------------|-------------|
|                        |          |            | X           | Y           | Z           |
| Default Domain Default | Boundary | 0.0000e+00 | 1.6973e-01  | -4.4083e-01 | -2.0896e-04 |
| Interface              | Boundary | 0.0000e+00 | -2.9132e-02 | 3.0485e-01  | -2.8934e-04 |