

# Sammendrag

---

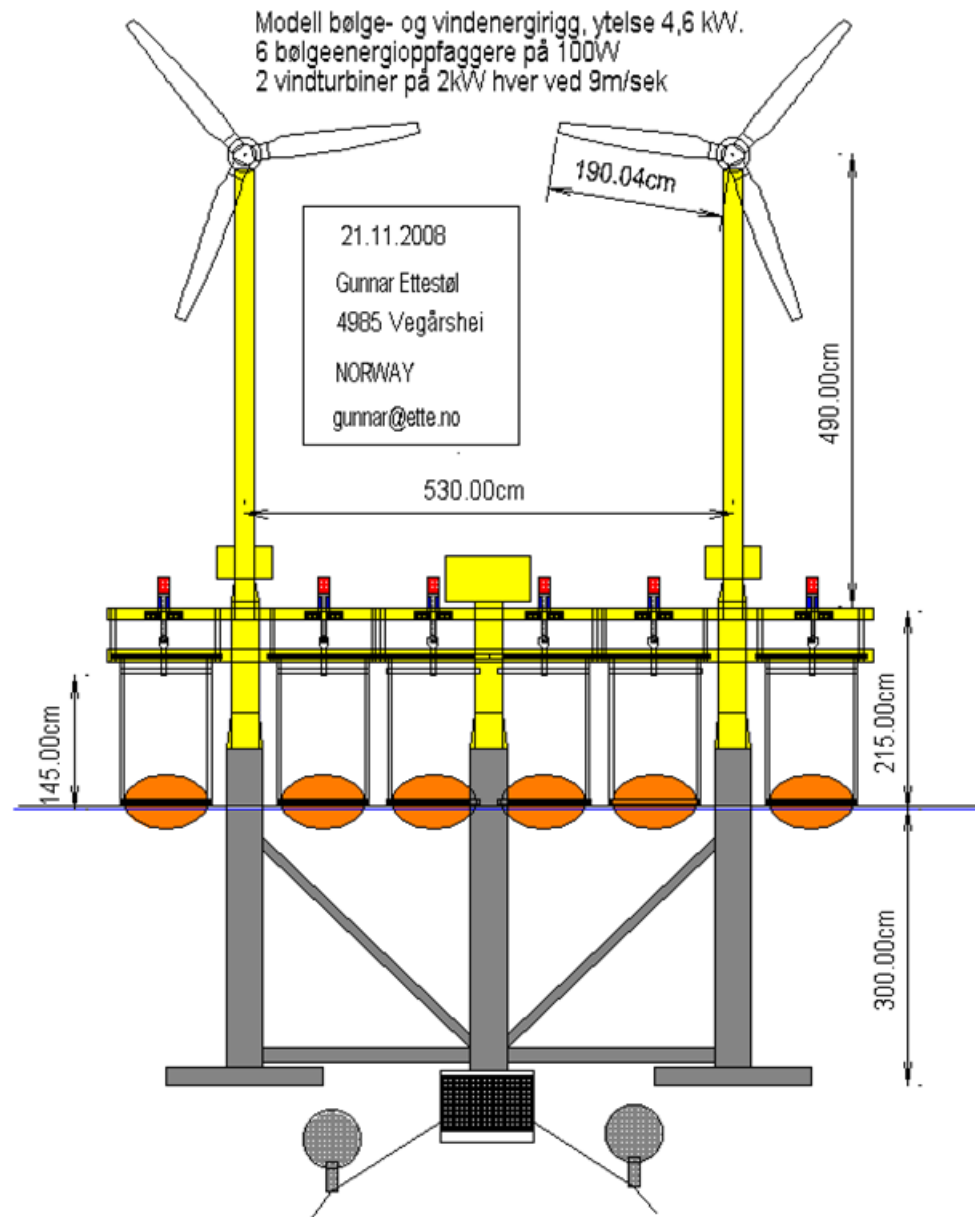
|                  |  |
|------------------|--|
| Tittel:          | 4,6 kW flytende vind- og bølgekriftrigg  |
| Dato:            | 25. mai 2009   |
| Forfattere:      | Pål Erik Ruen, Sondre Hustveit og Ingunn Langødegård   |
| Veileder:        | Førsteamanuensis Terje Bokalrud, TØL, Høgskolen i Gjøvik   |
| Oppdragsgiver:   | Ette Elektro, sivilingeniør Gunnar Ettestøl  |
| Kontaktperson:   | Gunnar Ettestøl  |
| Nøkkelord:       | Vind- og bølgekraft rigg, dimensjonering, modell, Ette Elektro.  |
| Antall sider:    | 39 + 59  |
| Antall vedlegg:  | 14   |
| Tilgjengelighet: | Åpen   |
| Sammendrag:      | <p>Prosjektet er gjennomført på oppdrag fra Ette Elektro. Ette Elektro har blant annet utviklet et idégrunnlag for en 4,6 kW flytende vind- og bølgekriftrigg. Dette idégrunnlaget skal videreutvikles for å bygge en modell av riggen, til testing i innsjøen Mjøsa.</p> <p>Prosjektet skal fastsette ytre relevante påkjenninger, og dimensjonere riggens hovedkomponenter – med unntak av oppankringen og vindturbinen.</p> <p>Gruppen har jobbet med konstruksjon og dimensjonering av hovedkomponentene til testriggen slik at den skal kunne produsere 4,6 kW under gitte forhold, og at den skal være stabil hva angår torsjonskrefter på riggen under disse forhold.</p> <p>Gruppen har strevd etter å bruke standard komponenter, og funnet at prosjektet er praktisk gjennomførbart.</p> <p>Ved kommersiell drift av riggen må beregninger gjøres på grunnlag av nye/andre forutsetninger.</p> <p>Med bakgrunn i beregningene kan en flytende vind- og bølgekriftrigg for testing i innsjø designes.</p> |



Industriell design og teknologiledelse

**ETTE**

# 4,6 kW flytende vind- og bølgekraft rigg



Bacheloroppgave våren 2009

Pål Erik Ruen  
Sondre Hustveit  
Ingunn Langødegård



Industriell design og teknologiledelse

**ETTE**



# Forord

---

Denne rapporten er utarbeidet i forbindelse med bachelor prosjektet som avslutning til ingeniørstudiet, industriell design og teknologiledelse, ved Høgskolen i Gjøvik våren 2009. Rapporten tar for seg prosjektet, helt fra oppstarten med problemstilling og målsetning, gjennom de ulike fasene og på vei mot prosjektets mål, samt grundige beskrivelser og vurdering/ drøfting av resultater.

Prosjektets oppdragsgiver er Gunnar Etestøl, Ette Elektro.

Vi ønsker å takke Gunnar Etestøl for veldig god oppfølging og hjelp ved forskjellige utfordringer underveis. Vi vil også takke vår veileder Terje Bokalrud for god hjelp underveis. En stor takk rettes også til Henning Johansen for oppklarende hjelp.

Gjøvik, den 25. mai 2009

Pål Erik Ruen

Sondre Hustveit

Ingunn Langødegård

---



Industriell design og teknologiledelse

**ETTE**

## Innhold

|   |    |
|---|----|
| Kapittel 1 - Innledning .....                 | 1  |
| 1.1    Organisering av rapport.....           | 1  |
| 1.2    Presentasjon av oppdragsgiver.....     | 1  |
| 1.3    Definisjon av oppgaven.....            | 1  |
| 1.3.1    Bakgrunn.....                        | 1  |
| 1.3.2    Beskrivelse .....                    | 1  |
| 1.3.3    Problemformulering.....              | 2  |
| 1.3.4    Forutsetninger og avgrensninger..... | 2  |
| 1.3.5    Prosjekt mål .....                   | 4  |
| 1.4    Rapportens målgruppe.....              | 4  |
| 1.5    Valgte arbeidsformer .....             | 4  |
| 1.6    Faglig bakgrunn .....                  | 5  |
| 1.7    Terminologi.....                       | 5  |
| Kapittel 2 - Teoretisk grunnlag .....         | 7  |
| Kapittel 3 - Gjennomføring.....               | 9  |
| 3.1    Tårn.....                              | 11 |
| Beskrivelse .....                             | 11 |
| Problemstillinger/mål.....                    | 11 |
| Forutsetninger.....                           | 12 |
| Metoder.....                                  | 12 |
| Gjennomføring .....                           | 12 |
| Resultater.....                               | 16 |
| Konklusjon/diskusjon .....                    | 16 |
| 3.2    Bølgekraftam.....                      | 17 |
| Beskrivelse .....                             | 17 |
| Problemstillinger/mål.....                    | 17 |
| Forutsetninger.....                           | 17 |
| Metoder.....                                  | 17 |
| Gjennomføring .....                           | 17 |
| Resultat.....                                 | 20 |



Industriell design og teknologiledelse

**ETTE**





|  |    |
|--|----|
| Konklusjon .....                           | 21 |
| 3.3 Dekk.....                              | 22 |
| Beskrivelse .....                          | 22 |
| Forutsetninger.....                        | 23 |
| Metode.....                                | 23 |
| Gjennomføring .....                        | 24 |
| Resultat, jf vedlegg B.....                | 24 |
| Diskusjon/ konklusjon .....                | 25 |
| 3.4 Bein.....                              | 26 |
| Beskrivelse .....                          | 26 |
| Problemstillinger/mål.....                 | 26 |
| Forutsetninger.....                        | 26 |
| Metoder.....                               | 26 |
| Gjennomføring .....                        | 27 |
| Resultater.....                            | 27 |
| Konklusjon/diskusjon .....                 | 28 |
| 3.5 Moment .....                           | 29 |
| Problemstilling/målsetning.....            | 29 |
| Forutsetninger.....                        | 29 |
| Metoder.....                               | 29 |
| Gjennomføring .....                        | 29 |
| Resultater.....                            | 30 |
| Diskusjon/konklusjon .....                 | 30 |
| Kapittel 4 - Resultat.....                 | 31 |
| Kapittel 5 - Vurdering av resultat.....    | 33 |
| Relevans av resultat.....                  | 33 |
| Forhold ved kommersiell drift.....         | 34 |
| Nødvendighet av nye/andre beregninger..... | 35 |
| Kapittel 6 - Konklusjon.....               | 37 |
| Referanser/ litteraturliste .....          | 39 |
| Kompendier.....                            | 39 |
| Standarder.....                            | 39 |



Industriell design og teknologiledelse

**ETTE**



|                |    |
|----------------|----|
| Bøker.....     | 39 |
| Internett..... | 39 |



Industriell design og teknologiledelse

**ETTE**

# Kapittel 1 - Innledning

---

## 1.1 Organisering av rapport

Rapporten er bygd opp av seks kapitler, og tilhørende vedlegg. Kapittel 1 tar i hovedsak for seg bakgrunnen for prosjektet, problemstilling og målsetninger. Kapittel 2 forteller om teorien som er lagt til grunne for gjennomførelsen av prosjektet. Kapittel 3 - Gjennomføring, er hovedkapitelet, som er delt inn i fem hoveddeler som tar for seg riggens hovedkomponenter. I kapittel 4 kommer resultatene. Og i kapittel 5 blir resultatene diskutert for å trekke en konklusjon i kapittel 6. Det er viktig å påpeke at vedleggene er viktig i denne rapporten. Spesielt vedleggene i forbindelse med gjennomføringskapitelet, som inneholder beregninger og skisser, som hjelper til å gi en bedre forståelse av kapitelet.

## 1.2 Presentasjon av oppdragsgiver

Ette Elektro – Miljøturbin Teknologitvikling av Gunnar Ettestøl – er et enkeltpersonsforetak drevet av Gunnar Ettestøl. Han er sivilingeniør – elektro, og har utviklet flere idégrunnlag for nye løsninger innen fornybar energi, solenergi, avsaltning og vanning. Han har kommet så langt at han vil sette ideene ut i live, og til det trenger han økonomisk støtte. For å søke om midler er det fordelaktig med en modell som kan testes for å vise til resultater.

Gunnar Ettestøl er svært engasjert i prosjektene sine, og har tro på at han kan skaffe investorer.

## 1.3 Definisjon av oppgaven

### 1.3.1 Bakgrunn

Vår oppdragsgiver, Gunnar Ettestøl / ETTE Elektro, har utviklet et idegrunnlag for kombinerte vind- og bølgekrafttriggere. I full skala er riggene planlagt plassert i åpent hav, og kan ha en produksjonskapasitet fra 6MW til 24MW.

I forbindelse med utviklingsarbeidet/ arbeidet med å skaffe investormidler til prosjektet, ønskes det å bygge en småskala testrigg for å kunne demonstrere virkemåten og effektiviteten til en slik rigg. Riggene ønskes utplassert i Mjøsa, ved Nordlia, for testing i løpet av våren/sommeren 2010. Ønsket effekt på testriggen er 4,6 kW.

Det har også kommet fram at en rigg i denne størrelsesorden (5-10kW) kan være kommersielt interessant til bruk i oppdrettsanlegg som per dags dato opererer med diesellaggregat. En slik rigg kunne da gi anleggene "gratis" tilleggsenergi, og føre til store besparelser i dieselforbruket.

### 1.3.2 Beskrivelse

Testriggen skal ha to kontraroterende, pitchregulerte vindturbiner, hver på 2kW, og seks bølgefangerarmer, hver på 100W. Denne løsningen kan også brukes på store konstruksjoner for

offshore bruk, med ytelse inntil 8MW per rigg, da med 2 vindturbiner på 3MW og 8 bølgefangerarmer på 250kW hver. Riggeren flyter på 5 bein, hvor det fremste beinet er brukt til oppankring. Riggeren skal kunne rotere om det oppankrede beinet, slik at den til en hver tid rettes inn mot vinden. Denne rotasjonen vil under kommersielle forhold kontrolleres av en thruster montert på bakerste bein, men på testriggeren vil denne ikke monteres, både av kostnadshensyn, og fordi man ønsker å se i hvilken grad riggeren er selvjusterende.

### 1.3.3 Problemformulering

#### Tema med avgrensninger

Prosjektets tema er vind- og bølgekraftrigg, nærmere bestemt en 4,6 kW flytende vind- og bølgekraftrigg. Prosjektet skal omhandle dimensjonering av komponenter til riggeren.

#### Problemstilling

*Planlegging av konstruksjon for en 4,6 kW flytende vind- og bølgekraftrigg.*

Med planlegging menes i denne sammenhengen, dimensjonering av komponenter til riggeren, med tanke på konstruksjonens pålitelighet i en produksjonssituasjon.

### 1.3.4 Forutsetninger og avgrensninger

#### Vær data

Det finnes svært lite tilgjengelige målingsdata, og beregningene er derfor gjort på grunnlag av oppdragsgivers egne observasjoner. Vindturbinene skal begynne å redusere uttakseffekten ved pitchregulering ved vindhastigheter høyere enn 9,5m/s.

Da ingen observasjoner er gjort av bølgeformen, antas bølgene sinusformet. Videre forutsettes det at vindretning og bølgeretning er sammenfallende (som er rimelig i Mjøsa der bølgene nærmest utelukkende er vinddrevet), samt at riggeren roterer som den skal, og derfor til en hver tid står (tilnærmet) rett mot bølgeretningen. Dette vil gjøre eventuelle sideveis belastninger på bølgefangerarmene neglisjerbare.

Det er også forutsatt at testriggeren plasseres slik at den ikke påvirkes av strømningsforhold, innfrysing i/ løsning fra is og lignende. Dette er også en rimelig antagelse for forholdene ved Nordlia i sommerhalvåret, som er testens årstid.

I samråd med oppdragsgiver er det også forutsatt at direkte vindtrykk mot konstruksjonen og bølgenes horisontale drag på konstruksjonen er neglisjerbart. Dette vil også være en av faktorene som det er naturlig å verifisere/kvantifisere i forbindelse med testingen. (Eksempelvis ved hjelp av kraftmåler på fortøyningslinjene.)

Tilgjengelig vind og bølgedata gitt av oppdragsgiver, ved optimale forhold:

- Vindstyrke: 9 m/s
- Bølgehøyde: 0,50 m
- Bølgelengde: 4 m
- Bølgenes periodetid: 3 sek

### **Beregnings grunnlag**

Av kapasitetshensyn er arbeidet i hovedsak utført ved bruk av kvasistatisk analyse, der det intuitivt antas størst belastning ved maksimale produksjonsforhold. Ved værforhold utover dette vil vindturbinbladene pitchreguleres, og til slutt nullstilles/stoppes. Samt at bølgefangerarmene vil heises ut av vannet og låses til dekket. Dette vil i vesentlig grad redusere belastningene på konstruksjonen.

### **Utmattingsberegninger**

Grundige utmattingsberegninger er ikke foretatt fordi dette er en modellrigg, og vi kjenner ikke det fullstendige lastbilde. Det er likevel forsøkt å ta hensyn til utmattingsproblematikk ved punkter som anses spesielt kritiske.

### **Fortøyning/ oppankring**

Forutsetter stram fortøyning. Det vil si at fortøyningspunktet antas å være fullstendig fastholdt, noe som drastisk forenkler beregningene, da dette blir en forutsetning for å bruke kvasistatisk analyse. Ved slakk fortøyning, kan belastningene på konstruksjonen ventes å synke noe, samtidig som stabiliteten kan økes ved en riktig justering av fortøyningslinenes vinkel med horisontalplanet. Det er av praktiske hensyn sannsynlig at den virkelige riggen, plassert i Mjøsa vil ha en slik slakk fortøyning.

### **Turbin**

Bruke standard turbin og propell, kontraroterende med pitchstyring

### **Materialer**

Det er av praktiske og kostnadmessige hensyn forutsatt at riggen i sin helhet skal bygges i standard tilgjengelige profiler av vanlig sveisbart konstruksjonsstål. Vi har i forbindelse med dette støttet oss til Norsk Stål AS sin produktkatalog på nett (ref 4.3). På grunn av materialvalget, og miljøet riggen skal brukes i, må det påregnes egnet overflatebehandling av riggen i sin helhet, etter montering, for å hindre korrosjon. (Det naturlige valget ville være skipsmaling). Det er i oppgaven ikke tatt hensyn til eventuell ekstra vekt som ville følge av slik behandling

### **Hydraulisk anlegg**

Det hydrauliske anlegget om bord ikke er ferdig planlagt, men det er i beregningene anslått en vekt på 200 kilogram, som en forutsetning. Dette fordi det må tas hensyn til ekstra vekt på dekket, ved dimensjonering av oppdriften i beina. Det er planlagt justert med ballastvann som fylles/lenses ved eksempelvis en billig pantrypumpe. Vi forutsetter at det tas hensyn til den fysiske belastningen, og effekten på oppdriften, av konstruksjonen ved plassering av komponenter til det hydrauliske anlegget.

### Sammenføyning

I våre beregninger fokuseres det ikke på sammenføyningsmetoder. Der dette er relevant for beregninger er det antatt sveiste forbindelser. Dersom man under bygging av den faktiske riggen ønsker å bruke f. eks. skrueforbindelser, grunnet mulighet for demontering eller lignende, må belastningen på og rundt disse vurderes.

### 1.3.5 Prosjektmål

#### Mål

Bacheloroppgaven skal bli et forprosjekt til oppdragsgiver, eller til en evt. senere bacheloroppgave, der bygging av denne modell riggen kan inngå. I prosjektet inngår dimensjonering av riggens hovedkomponenter – utenom oppankring og vindturbin.

#### Resultatmål:

En rapport bestående av dimensjoneringer til vind- og bølgekraft rigg.

#### Udermål/delmål:

Fastsetting av ytre relevante påkjenninger på riggen.

#### Effektmål:

Danne grunnlag for videre prosjektering av testrigg.

### 1.3.6 Henvisning til tidligere arbeid om samme emne

Gruppen har ikke klart å finne andre arbeider om samme emne, flytende vind- og bølgekrafttrigg.

## 1.4 Rapportens målgruppe

Rapportens målgruppe er i hovedsak oppdragsgiver, Gunnar Ettestøl/ Ette Elektro. Men også Høgskolen i Gjøvik som er samarbeidspartner og lærested for bacheloroppgaven.

## 1.5 Valgte arbeidsformer

### Arbeidsformer

Gruppen har prosjekt arbeid som arbeidsform. I denne sammenhengen innebærer det problemstilling, prosjektplanlegging, gjennomførelse og presentasjon i form av rapport. Alle deltakerne, oppdragsgiver og veileder har rett til å fremme forslag. Samarbeid med veileder og metode er viktig. Prosjektgruppen har valgt å samarbeide i gruppe, men også drive individuelt arbeid der gruppen har funnet det naturlig. Gruppen har tilegnet seg ny kunnskap gjennom de første fasene i prosjektet, og arbeidet med dataprogrammer. Videre har gruppen jobbet med beregninger og utforming av rapport.

### Kontakt med oppdragsgiver

Gruppen har hatt et løpende og godt samarbeid med oppdragsgiver Gunnar Ettestøl, for å være sikre på at prosjektet går i riktig retning, og at prosjektresultatet blir tilfredsstillende for oppdragsgiver.





### Utstyr

Programvare ved Høgskolen i Gjøvik:

Ansys - elementmetoden

Solid Works - skisse

## 1.6 Faglig bakgrunn

De tre gruppe medlemmene fullfører sin utdanning på Høgskolen i Gjøvik denne våren, etter tre år på Høgskolen i Gjøvik, bachelor i ingeniørfag – industriell design og teknologiledelse (IDT).

## 1.7 Terminologi

Pitch

Vingeprofilens vinkel med rotasjonsretningen

Thrust

Vingenes skyvekraft i vindretningen

PMG

Permanent Magnet Generator, en type elektrisk generator

Nav

Sentrum for vindturbinens vinger, delen der vingene knyttes sammen

Dyptgående

Hvor dypt en konstruksjon stikker i vannet



## Kapittel 2 - Teoretisk grunnlag

---

Her følger en forklaring av analysemetoden elementmetoden, og en beskrivelse av teori vi har brukt gjennom prosjektet. I tillegg har vi brukt noe vindmølle teori, blant annet for å sette avstanden mellom vindmøllene, med gitte diametre.

### Elementmetoden

Elementmetoden gir oss fantastiske muligheter til å finne spenninger i konstruksjonsdetaljer det er vanskelig eller umulig å beregne ved klassisk mekanikk. Metoden baserer seg på en oppdeling av konstruksjonen i mindre "klosser" - kalt elementer. Hvert av disse elementene tillegges et sett av beregningspunkter, for eksempel i hjørnene eller midt på sidekantene. Disse punktene kalles noder. Detaljen deles opp slik at nodene blir koplingspunkter mellom de ulike elementene. Jo flere elementer/noder man deler detaljen i, jo nærmere blir resultatet til virkeligheten (man nærmer seg en infinitesimal oppdeling, altså en integrasjon, som ville bli helt korrekt). Etter å ha definert ytre laster og fastholdelser kan man nå beregne spenninger/belastninger i konstruksjonen ved å overføre lastene fra element til element, via nodene, gjennom hele detaljen. Disse beregningene er i utgangspunktet ikke avanserte, men på grunn av et, vanligvis, stort antall noder, får man problemer med å håndtere størrelsen på beregningsmatrisene. En datamaskin derimot, håndterer lett matriser av denne størrelsen. Derfor brukes ulike dataprogrammer for å gjennomføre analysene. Ved HiG brukes programmet ANSYS, i en studentversjon som er begrenset oppad i kapasitet til 32000 noder.

### S-N analyse

S-N analyse er en metode for å bestemme utmattingslevetider, hovedsakelig for sveiste forbindelser. I S-N står S for spenninger, og N for antall sykler. Metoden går altså ut på å sammenligne påførte spenninger i en konstruksjon med et antall lastsykler til utmattingsbrudd, eller omvendt. Man benytter i analysen norsk standard, NS 3472, for å plassere aktuelle forbindelser i ulike klasser, ved å sammenligne med standardtilfeller. Hver slik klasse har sin egen S-N kurve, der man kan lese ut tillatte spenninger i forhold til en levetid, eller omvendt.

### Kvasistatisk analyse

I prosjektet er det ved beregninger brukt såkalt kvasistatisk analyse. Det betyr at man beregner som om beregningsobjektet er i statisk likevekt, selv om det i realiteten ikke er det. Dersom en komponent er utsatt for varierende laster, beregnes det etter et "worst case" scenario, der man setter inn de største mulige belastninger på konstruksjonen. I forhold til ekte dynamiske beregninger, blir en kvasistatisk analyse oftest lite misvisende, samtidig som kompleksiteten i beregningene blir dramatisk redusert.

### Om vindturbiner

Moderne vindmøller lages med vingeformede blader. Selv om det finnes turbiner med ett eller to blad (og også med flere), er det mest vanlige å ha tre blader. Dette gir den nødvendige balansen i systemet uten at bladene blir for tynne og bøyes for mye. De aktuelle turbinene i denne oppgaven vil også være av trebladstypen. Det er viktig at man har et system for å regulere vingenes energioptak, ellers ville turbinen, i høye vindhastigheter, etter hvert rotere så fort at den går i stykker. De vanligste måtene å regulere dette opptaket på er ved pitch- eller stallregulering. Vingeprofilen opplever en relativ vindhastighet som er lik den ytre vindhastigheten pluss rotasjonshastigheten. Ved stallregulering er vingeprofilen utformet slik at når den når en viss vindhastighet dannes det turbulens rundt bladet, som får det til å tape effekt. Ved pitchregulering har man en mer aktiv styring, der man vrir bladene slik at de til en hver tid peker riktig i forhold til den relative vindhastigheten. Når man ønsker å redusere effekten, vrir man bladene ut av optimal posisjon. Den aktuelle turbinen i oppgaven skal være pitchregulert.

Generatorene i turbinene her vil være enten av typen Permanent Magnet Generator (PMG), eller hydrauliske pumper. Å, eventuelt, bruke hydrauliske pumper, vil være praktisk med tanke på en testrigg da det likevel vil være et hydraulisk anlegg om bord. Man vil da kunne forenkle det elektriske anlegget kraftig uten å komplisere det hydrauliske anlegget nevneverdig. Til riggen i kommersielt bruk, vil det benyttes PMG.

### Om bølgeenergifangere

Teknologien som skal brukes til å fange bølgeenergi i denne riggen er prinsipielt svært enkel. Det brukes et flyteelement festet til en arm. Etersom bølgene passerer flyteelementet vil dette heve og senke seg i takt med bølgene. Denne opp- og ned bevegelsen vil sette armen i bevegelse, og via den også en lineær hydraulisk pumpe, som leverer vann/olje under trykk til en turbin/hydraulisk motor via en trykktank.

# Kapittel 3 - Gjennomføring

## Riggens funksjon

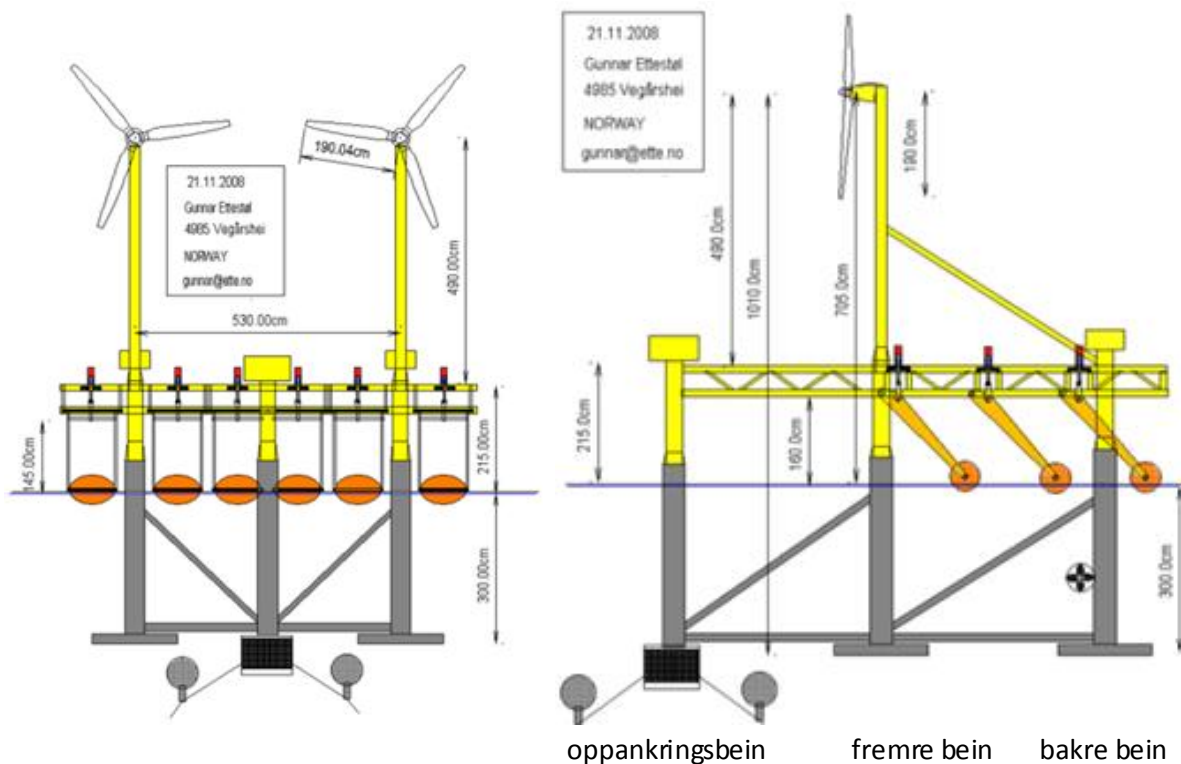
Modellriggen skal være til testing av funksjon og stabilitet. Det skal kunne foretas målinger og forbedrings potensialer skal kunne avdekkes. Riggens skal kunne produsere strøm. Den skal testes på innsjøen Mjøsa.



Figur 3.1: Skisse av mulig vind- og bølgekrafttrigg i Mjøsa

## Om riggen

Riggen er nyskapende og spennende, og den byr på store muligheter og utfordringer. Noen av utfordringene er å dimensjonere og å regne på stabiliteten, dette er noe som også vil testes av modellen.



Figur 3.2 a) Riggens sett forfra

3.2. b) Riggens sett fra siden

I stedet for å se på hele riggen under ett ved beregninger, har vi valgt å dele riggen i fire hoveddeler; tårn, dekk, bølgekraftarmer og bein.

Vi har definert tårnet som søyla fra dekket og opp, med eventuell avstiver. Vindturbinen festes øverst på tårnet. Dekket er definert som plattformen der alt er festet, det er i to plan. Bølgekraft armene er festet til nederste plan i dekket, og går ned til vannoverflaten. Bølgekraftarmene har forbindelse til sylindere som er festet i øverste plan av dekket. Beina skal holde riggen flytende, og er definert som konstruksjonen fra dekket og ned.

Vi har satt navn på beina. Det beinet som er fremst (ved oppankringspunktet) kaller vi oppankringsbein. Beina under tårnet kaller vi fremre bein. Og beina bakerst, ved eventuell avstivning til tårnet, kaller vi bakre bein (se figur 3.2. b)).

### **Standardverk**

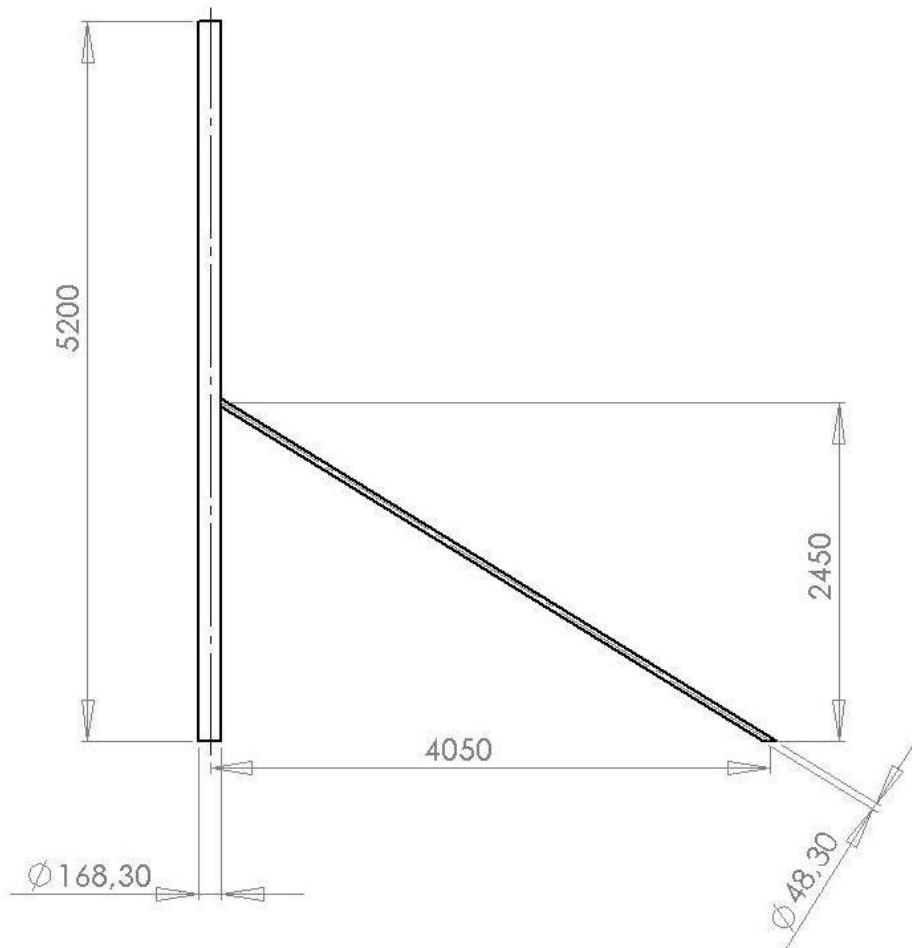
I forbindelse med oppstarten av prosjektet ble det skaffet til veie og lest ulike aktuelle standarder fra DNV (se litteraturliste). Felles for disse standardene er at de er beregnet for bruk ved design og bygging av "ferdige" konstruksjoner. På slike konstruksjoner er det gjerne lange levetider, og også alvorlige konsekvenser ved kollaps. Det er blant annet tatt høyde for permanent bemanning om bord i konstruksjonene. De forutsetter derfor betraktelig grundigere kjennskap til belastninger og værforhold enn de data vi har tilgjengelig. Disse standardene har det derfor blitt umulig for oss å benytte. Likevel mener vi at våre resultater tjener sitt formål, da verken sannsynligheten for, eller konsekvensene av belastninger som fører til brudd er like store på en testrigg, som for en konstruksjon i faktisk drift.

## 3.1 Tårn

### Beskrivelse

Tårnets oppgave er å bære vindturbinene, som er avhengig av å plasseres i en viss høyde over vannflata for å unngå effekttap. Det vil bestå av to rørprofiler, et hovedtårn og et skråstag. Det blir to slike tårn på riggen. Hovedrøret festes til fremre bein på riggen. Stagets innfestning til hoverrøret er plassert i en høyde slik at det ikke kommer i konflikt med turbinen ved å skape eventuell ekstra turbulens i luftstrømmingene bak rotoren. (altså lavere enn rotorens laveste punkt). I den andre enden er staget festet til bakre bein på riggen, på denne måten vil ikke belastninger fra vindturbinene/tårnet føres via dekkkonstruksjonen, men direkte til beina.

Skråstagets oppgave er å forflytte strekkspenninger(dynamiske) bort fra sveisen der hovedrøret festes i den øvrige konstruksjonen. Selv om spenningene her uansett ville bli små i forhold til materialets belastningskapasitet, vil det kunne være fare for utmattingsprekker på grunn av en dynamisk belastning med et enormt antall sykler.



Figur 3.1.1: Tårn, målsatt

### Problemstillinger/mål

Det skal velges fysiske dimensjoner for rørene i tårnkonstruksjonen, og nødvendigheten av skråstaget skal vurderes. For at dette skal være mulig, må vi først fastsette hvilke belastninger tårnet utsettes for å deretter beregne hvilke spenninger disse belastningene vil påføre konstruksjonen. Det skal også beregnes hvilke krefter som overføres videre til den øvrige konstruksjonen.

## Forutsetninger

- Effekten av direkte vindtrykk mot konstruksjonen antas neglisjerbar
- Konstruksjonen belastes maksimalt ved en vindhastighet på 9 m/s, ved høyere vindhastigheter reduseres turbinens effekt ved pitchregulering
- Vindturbinenes anordning for festing til tårnet er beregnet for festing til en rørdiameter på minimum 16cm.
- Skråstagets innfestingshøyde settes til 245cm over dekkshøyde, denne høyden gjør at staget festes i en høyde midt mellom dekket og turbinens navhøyde.
- Tårnet skal bygges av rør i standarddimensjoner fra Norsk Stål A/S sin produktkatalog på nett (ref.4.3)

## Metoder

Før det kan gjøres valg av rørdimensjoner, må de ytre påkjenningene fastsettes. I dette tilfellet blir de interessante størrelsene rotorens skyvekraft (Thrust), og omdreiningshastighet/omdreiningstall.

Det er først valgt dimensjon for hovedrøret, da det er her de kritiske spenningene oppstår, og deretter for skråstaget. En vilkårlig dimensjon velges fra produktkatalogen, og det beregnes hvordan spenningene vil bli dersom tårnet bygges i denne dimensjonen. Det utføres beregninger både med og uten skråstag. Dersom spenningsbildet for denne dimensjonen blir uakseptabelt, velges en annen dimensjon og prosessen gjentas til man oppnår ønsket resultat

Det er valgt å gjøre beregninger ved hjelp av klassisk mekanikk, på grunn av metodens enkelhet og hurtighet. Da vi formelt har en statisk overdefinert konstruksjon (fordi både hovedrør og stag er sveist fast), er det besluttet også å gjennomføre elementanalyse av konstruksjonen for å verifisere riktigheten av de klassiske beregningene.

## Gjennomføring

For å begrunne konstruksjonsvalgene i tårnet, må vi kjenne en del kritiske data omkring vindturbinene. Fra oppdragsgiver er det opplyst at turbinene vil ha en vekt på 75kg og en vingeradie på 1.8m. Vingeprofilene er oppgitt til å ha en «tip speed ratio» (forholdet mellom vindhastigheten og vingetuppens hastighet) på 7. Ut ifra disse data kan vi beregne de kritiske verdiene thrust (skyvkraft) og omdreiningstall.

Ved maksimal belastning blir omdreiningstallet f:

$$\text{Vindhastighet: } v_v = 9\text{m/s}$$

$$\text{Tip speed ratio: } \lambda = 7$$

$$\text{Tupphastighet: } v_t = v_v * \lambda$$

$$\text{Vingelengde: } r = 1,8\text{m}$$

$$\text{Rotoromkrets: } O = 2\pi r$$



$$f = \frac{v_t}{O} = \frac{v_v * \lambda}{2 * \pi * r} = \frac{9 * 7}{2 * \pi * 1.8} = 5,57 \left[ \frac{1}{s} \right]$$

Som tilsvarer 334 omdreininger pr minutt.

Vi vet at det er stor sannsynlighet for at vingene mister løft i det de passerer tårnets projeksjon i vindretningen, på grunn av turbulens. (ref 3.2). Hvor stor del av løftet som mistes har vi ikke mulighet til å fastsette, men vi går ut ifra at det er lite. Likevel kan dette tapet, på grunn av det enorme antallet sykler (1058 per minutt), tenkes å føre til utmatting. Dette er grunnlaget for det eventuelle tillegget av et stag til konstruksjonen.

Thrust kan beregnes ved denne formelen (ref.4.1 og vedlegg L):

$$\text{Maximum Thrust} = \rho \cdot A \cdot (V^2) \cdot \frac{4}{9}$$

Der  $\rho$  er luftas massetetthet, A er arealet vingene sveiper over (sirkelskiva) og V er vindhastigheten. thrust ved 9 m/s (maksimal belastning) blir da 500N.

### Valgte dimensjoner

Til hovedrøret er det valgt å bruke rør med ytterdiameter 168.3mm og godstykkelse 6mm, staget oppføres i 1 1/2 " rør med ytterdiameter 48.3mm og godstykkelse 2.9 mm.

### Spenninger i konstruksjonen

#### - Spenninger dersom konstruert uten stag

Thrust = 500N.

Turbinenes egenvekt = 75kg = 735N, turbinenes tyngdepunkt befinner seg 44 cm foran midtaks en jf brev 2 i vedlegg G. Turbinens navhøyde er 4,9m over innfestinga.

Rørets egenvekt = 24,02kg/m \* 5,20m = 124,9kg = 1224N

Kritisk punkt blir på forsida av røret ved innfesting til øvrig konstruksjon.

Moment om punktet: 500N \* 4,9m - 735N \* 0.44m = 2126.6Nm

Rørtverrsnittets treghetsmoment:  $(t < r) I = \pi r^3 t = 11232165 \text{mm}^4$  (ref 3.4)

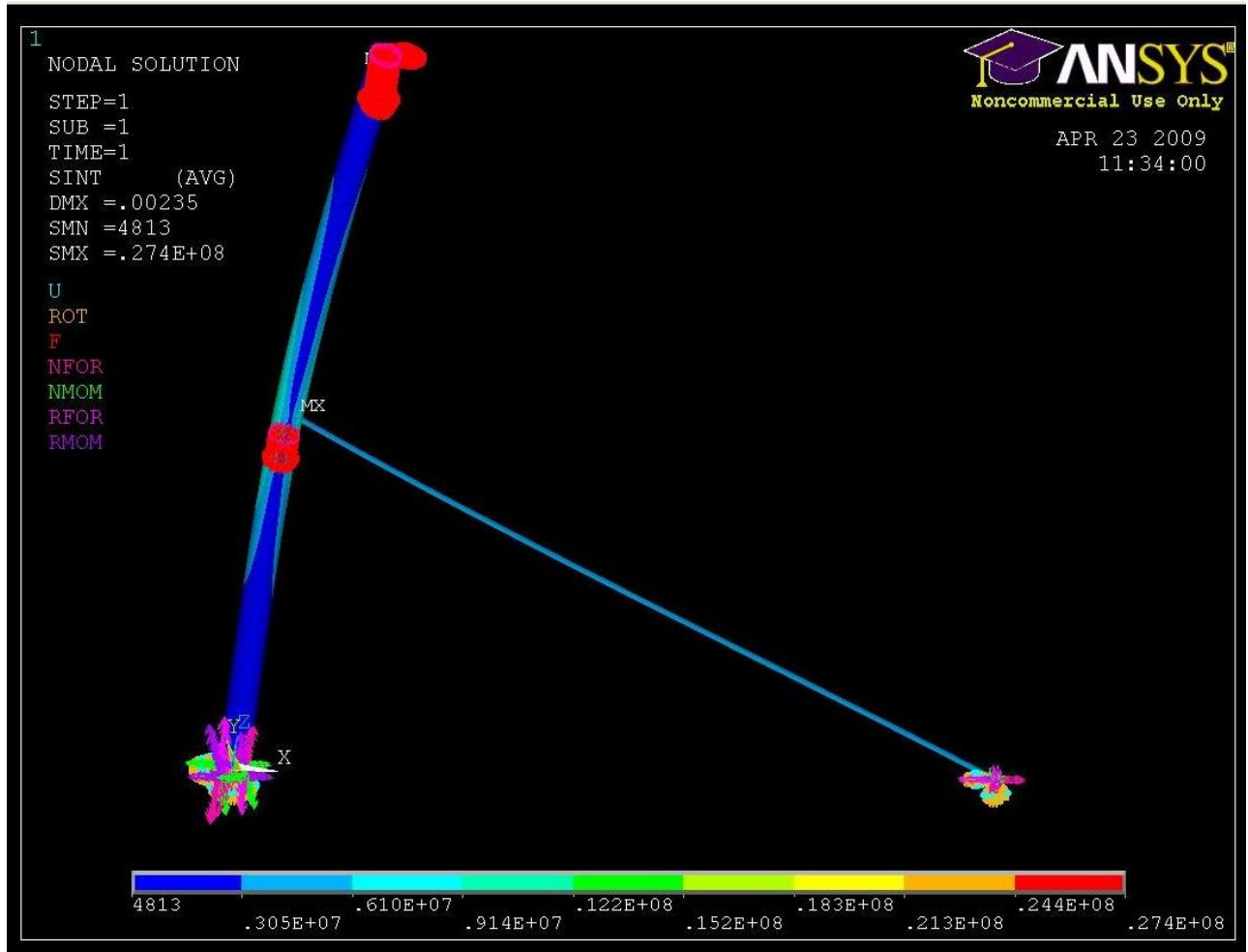
Som gir bøyespenninger i framkant av røret på:  $\sigma_{b\phi y} = \frac{M * y}{I} = \frac{2126,6 * 10^3 * \frac{168,3}{2}}{11232165} = 15,9 \text{ N/mm}^2$

Trykkspenninger grunna vekt:  $\sigma_t = \frac{1224 + 735}{2\pi * \frac{168,3}{2} * 6} = 0,62 \text{ N/mm}^2$

Totale spenninger:  $\sigma_{tot} = \sigma_{b\phi y} - \sigma_t = 15,3 \text{ N/mm}^2$

### Spenninger med stag

Det antas at hele den horisontale kraften møtes av en tilsvarende motkraft i staget. (verifisert ved elementanalyse).



Figur 3.1.1: Tårn med stag og påkjente laster, horisontale opplagerkrefter kun i stag

Krefter i staget: på grunn av sagets retning vil det ved en horisontal kraft på 500N også oppstå en vertikal kraft lik  $500 * 2,45 / 4,05 = 303\text{N}$

Spenninger ved innfesting stag: Med denne konstruksjonsmåten får vi de største bøyespenningene i hovedrøret ved innfestingen til staget. Bøyemomentet blir:  $500 * 2,45 - 735 * 0,44 = 901,6\text{Nm}$ , som gir

$$\text{spenningene: } \sigma_{bøy} = \frac{M_{xy}}{I} = \frac{901,6 * 10^3 * \frac{168,8}{2}}{11232165} = 6,75\text{N/mm}^2.$$

$$\text{Trykkspenningene i punktet blir i dette tilfellet: } \sigma_t = \frac{2,75 * 24,02 * 9,81 + 735}{2\pi * \frac{168,8}{2} * 6} = 0,44\text{N/mm}^2.$$

$$\text{Som gir: } \sigma_{tot} = \sigma_{bøy} + \sigma_t = 6,31\text{N/mm}^2$$

Vi har nå fått redusert spenningsene betydelig i forhold til alternativet uten stag. I tillegg oppstår nå strekkspenningene i et område uten sveis eller andre defekter som gir grobunn for utmattingssprekker.

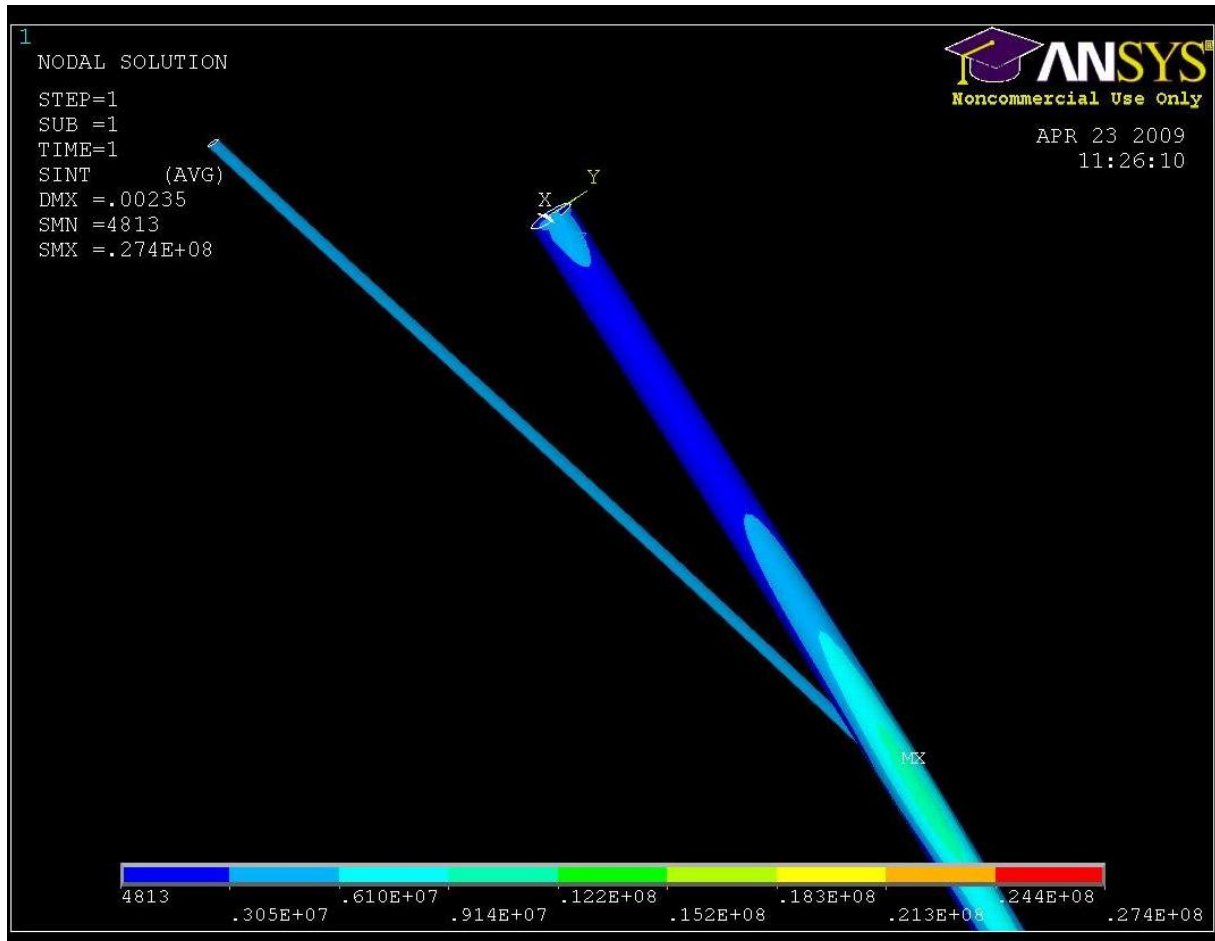
Spenninger ved hovedrørets innfesting til riggen:

Her blir nå bøyemomentet:  $500 * 4,9 - 735 * 0,44 - 303 * 4,05 = 899,5 \text{ Nm}$ , som gir spenningsene:  $\sigma_{bøy} =$

$$\frac{M * y}{I} = \frac{899,5 * 10^3 * \frac{168,8}{2}}{11232165} = 6,74 \text{ N/mm}^2. \text{ Trykkspenningsene blir her: } \sigma_t = \frac{5,2 * 24,02 * 9,81 + 735 - 303}{2\pi * \frac{168,8}{2} * 6} = 0,52 \text{ N/mm}^2.$$

Totalspenningene i punktet blir dermed:  $\sigma_{tot} = \sigma_{bøy} + \sigma_t = \underline{6,22 \text{ N/mm}^2}$ .

Som er en reduksjon på 60 % i forhold til alternativet uten stag



Figur 3.1.2: strekkspenninger i tårnets hovedrør

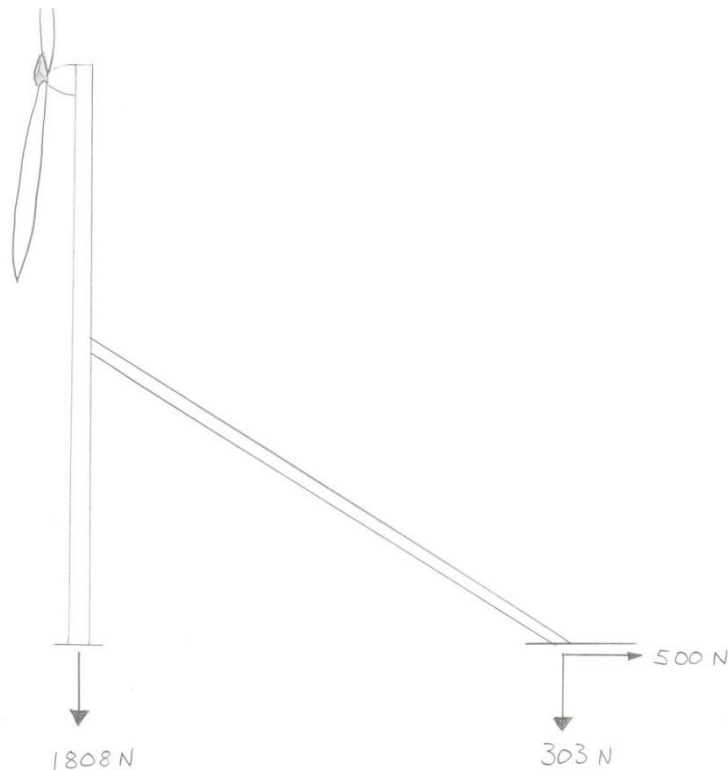
### Krefter overført til den øvrige konstruksjonen

Opplagringskrefter ved stagets innfesting:

Som beskrevet ovenfor får vi her opplagringskrefter på 500N i horisontal retning og 303N i vertikal retning

Opplagringskrefter ved hovedrørets innfesting:

For å oppfylle kriteriene for statisk likevekt blir da opplagringskreftene i horisontal retning lik 0 og i vertikal retning lik:  $735 + 5,2 * 24,02 * 9,81 + 4,73 * 3,25 * 9,81 - 303 = 1808 \text{ N}$  (stagets lengde er 4,73m og har en vekt på 3,25kg/m)



Figur 3.1.3: Tårn og opplagerkrefter

### Resultater

Med hovedrør på 168,3\*6mm og skråstag på 48,3\*2,9mm får vi maksimale strekkspenninger ved hovedrørets innfesting på 6,2N/mm<sup>2</sup>

Kreftene som overføres til den øvrige konstruksjonen blir i vertikal retning nedover 303N fra skråstaket og 1808N fra hovedrøret. Det blir også overført en kraft i horisontal retning bakover på 500N fra skråstaket.

### Konklusjon/diskusjon

Vi får meget lave spenninger, men det er nødvendig å holde dem så lave, på grunn av belastningenes dynamiske natur, og utmattingsproblematikken dette fører med seg.

Det anbefales at variasjonene i last måles ved hjelp av den ferdige testriggen, slik at man kan beregne levetid og utmattingsfare med større sikkerhet for en eventuell kommersiell rigg.

## 3.2 Bølgekraftarm

### Beskrivelse

Bølgekraftamenes oppgave er å overføre energi fra bølger til en sylinder for å produsere energi. Sylinderne som skal overføre energien er satt til å produsere 100W i to retninger. Armene skal bære kraften som oppstår av motkraften i sylinderen og vekten av armen i seg selv under produksjon, og den bør være stiv nok til å tåle kryssbølger. Oppdriften til armen vil foregå med en flyter som må tåle den totale kraften av motkraft i sylinderen og vekt på armen uten at den blir overbelastet.

Selve rammen armen er bygd på er laget med 2 vanger og 4 tverrliggere, dette for å få den stiv nok, samt at den blir mest mulig symmetrisk. Den øverste tverrliggeren er fastsatt av sylindrefestet, og de andre er spredt utover mest mulig symmetrisk i armens konstruksjon.

### Problemstillinger/mål

Det skal velges dimensjoner for firkantrørene i vangene og tverrliggere, og disse skal vurderes. Det skal også velges en flyter som må ha passende fysiske dimensjoner, og tilstrekkelig oppdrift. For at dette er mulig, må nødvendig oppdrift, og opptredende krefter i armen beregnes.

### Forutsetninger

- Vi ser bort fra kryssbølger i beregningene
- Bølgehøyden er satt til 0,5m, med en bølgelengde på 4 meter, og 3 sekunder intervall.
- Rammen konstrueres i firkantrør i standarddimensjoner fra Norsk Stål A/S (ref 4.3)

### Metoder

For å finne riktig dimensjon på armene må de mest fremtredende kreftene beregnes. Disse kreftene opptrer i begge endene av armen, samt i sylindrefestet og i tyngdepunktet av armen.

En dimensjon velges ut fra skjønn fra et standardutvalg av firkantrør til vangene og tverrliggere. For enkelhets skyld velges samme dimensjon på vangene og tverrliggerne. Den valgte dimensjonen brukes for å beregne de opptredende kreftene og spenningene som opptrer i armen. Dersom den valgte dimensjonen ikke er tilfredsstillende, gjentas beregningene med en annen dimensjon til ønsket resultat er oppnådd.

Alle beregningene er beregnet med klassisk mekanikk, og de opptredende spenningene i armen er sjekket mot NS3472 for å kontrollere utmatting.

### Gjennomføring

Riggen skal ta opp 100W på tur opp, og ned, på hver arm, som vil gi en total på 400W kontinuerlig effekt fra alle 6 armene, ved de forutsatte bølgeforhold.

### Utforming

Armen er designet som en stige, og sveist sammen av rektangulære firkanttrør i dimensjonene 100\*50\*4mm



Figur 3.2.1: Stige

Ettersom det er valgt Cipax [se avsnittet om oppdrift s.xx] bøyer er det laget en enkel festeanordning for disse bøylene nederst på armen .

### Effektuttak

Det skal tas ut 100W av hver bølgefanger på vei opp og ned. Vi har valgt denne løsningen ettersom uttaket blir mer stabilt på denne måten, enn dersom man bare henter ut energi på veien opp. Vi vil da bruke dobbelvirkende sylindere, med tilhørende ventiler.

Maks nominell bølgehøyde er 0,5m, med et antatt utbytte på 0,35m effektivt bølgeopptak

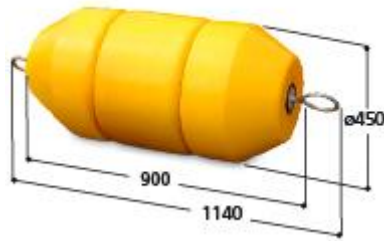
Bølgelengde er 4 meter med en frekvens på 3 sekunder. Ettersom vi har 3 takter på hver bølge vil effektopptak på tur opp og ned ta  $\frac{1}{3} 3s = 1s$

$$\frac{mgh}{t} = 100W \rightarrow mg = \frac{100W * 1s}{0,35m} = 285,7N$$

Effektuttaket 100W gis av en kraft på 285,7N ved effektiv bølgehøyde på 0.35m over en periode på 1s.

### Oppdrift

Vi har valgt en ferdig bøye fra Cipax som oppdriftselement for armene. Dette er en Cipax UB-110 bøye på 110L. Bøyen har et ytterskall av slagfast polyetylenplast og er fylt med ekspandert polystyren(EPS). Dette gjør at den ved kollisjon eller annet slag beholder full oppdrift selv om bøyen er skadet.



Figur 3.2.2: bilde av bøye, hentet fra [www.cipax.no](http://www.cipax.no)

Bøyen har 110L volum, og egenvekt på 14Kg.

Den totale oppdriften til flyteren er 940N, og ettersom vi setter effektuttaket i opp retning til å være 110W, vil den minste belastningen bøyen bli utsatt for være 599N. Jf vedlegg A.2

### Momenter på armene ved effektuttak

Vinkelen på armen i nedre posisjon er  $60^\circ$  med horisontalplanet, og vinkelen i øvre posisjon er  $67,5^\circ$ . Dette sammen med at sylindrefestet er satt til å være 0,5m inn på armen gir en slaglengde på 0.06m som sylinderen har som arbeidsområde. Jf vedlegg A.3

Momentet som vekten gir på armen kan ikke overstige 1656Nm for at bøya ikke skal overbelastes, men momentet må være større enn 866Nm for at sylinderen skal produsere 110W på tur ned. Disse tallene er regnet med minimum moment når flyteren er i øvre posisjon, og gir størst tyngde, og maksimum moment i nedre der den gir minst tyngde. Jf vedlegg A.4

Momentet fra vekta på armen er 1295Nm, jf vedlegg A.5. Dette tallet faller veldig fint mellom de 866Nm og 1656Nm som armen må falle mellom. Dette tallet bør gi en stabil armbevegelse da den ikke er så tung at flyteren risikerer full neddykning, og tung nok til at armen bør falle fort nok selv med bølger med kortere bølgelengde.

### Spenninger i armen

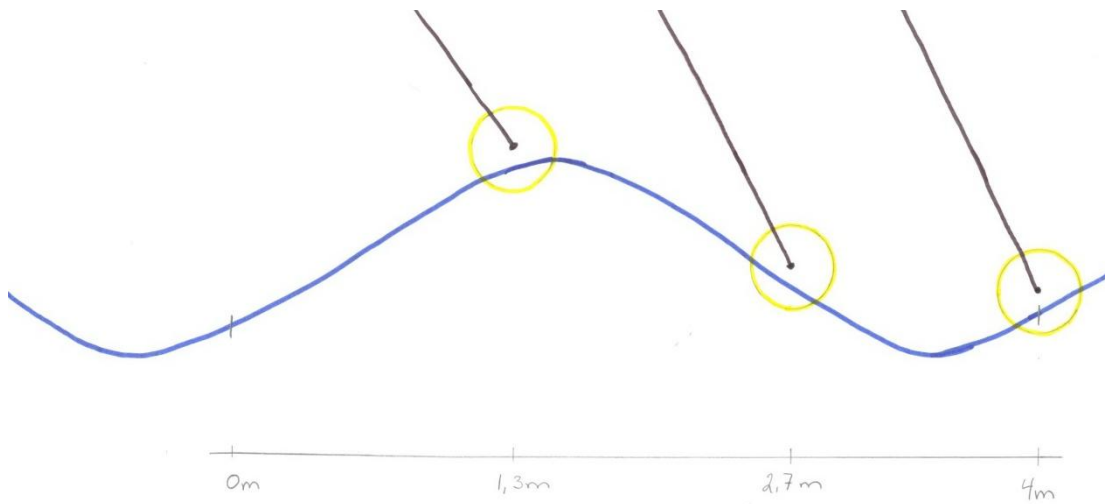
Tregghetsmomentet til firkantrøret er  $1,44 * 10^6 mm^4$ , og arealet er  $1136 mm^2$ . Dette sammen med de opptredende kreftene når armen beveger seg opp og ned under normal drift gir en maksimal spenning på  $33,4 N/mm^2$ , jf vedlegg A.6.

Dette er godt innenfor  $235 N/mm^2$  som stålet er sertifisert som.  $33,4 N/mm^2$  opptrer som strekk under armen, og opptrer i området med sveisen mellom vangene på stigen, og tverrstaget mellom vangene. Dette vil intuitivt føre til problemer med utmatting.

Sveisen i konstruksjonen i punkt A vi har regnet om kan klassifiseres som F2 ifølge kompendium "Dimensjonering av sveiste konstruksjoner mot utmatting av brudd" og de spenningene som opptrer i konstruksjonen vår vil i følge tabell gi en levetid på mellom  $2 * 10^7$  og  $10^8$  sykler.

### Plassering

Plasseringen av flyterne er satt slik at vi skal få et mest mulig stabilt energioptak ved 4 meters bølgefrequens. Vi har valgt å spre bølgefangerne slik at en fanger begynner å ta effekt oppover, mens den neste mister effektopptak på toppen, og den siste begynner effektopptak nedover. Se fig.



Figur 3.2.3: Bølge med armer

Lengde mellom armene, og lengde fra første arm til siste

$$\frac{1}{3} 4m = 1,33m$$

$$\frac{2}{3} 4m = 2,67m$$

Det blir 1.33m mellom armene, og 2.67m fra første til siste arm.

### Nedsynking av flyter

Forskjellen på  $F_1$  (effektive krefter på flyteren) når armen er på vei opp, ned og i nullpunkt setter parameterne for hvor dypt flyteren synker i vannet. Forskjellen på dybden mellom nullpunkt og opp, mellom nullpunkt og ned skal stemme overens, og være samsvarende med 0,15m som vi har forutsatt. Hver gang en arm går i kraftinngrep mister den henholdsvis differansen mellom  $F_{1_{opp}}$  og  $F_{1_{0-punkt}}$ , og differansen mellom  $F_{1_{ned}}$  og  $F_{1_{0-punkt}}$  ettersom den går opp og ned.

Denne differansen er på henholdsvis  $(0,34-0,225)=0,115$  og  $(0,225-0,079)=0,13m$ . Avrundinger er muligens årsak til differansen. Jf vedlegg A.7.

### Resultat

De største opptredende spenningene i armen blir  $33,4N/mm^2$  og opptrer i underkant av vangen i punktet ved sylindrefestet. Dette tallet gir i følge NS3472 en antatt levetid på mellom  $2 \cdot 10^7$  og  $10^8$  sykler.

Den totale neddykkingen av flyteren blir 0,079m på vei ned, 0,225m i nullpunktet og 0,34m på vei opp. Disse tallene gir en differanse mellom ned og nullpunkt på 0,13m, og mellom opp og nullpunkt på 0,115m



## Konklusjon

Levetiden til armen er tilfredsstillende. Dette er en testrigg og vil ikke under noen omstendigheter kunne i nærheten av dette antall sykler.

Neddynkingen av flyteren er godt innenfor arbeidsområdet til flyteren, og tallene 0,115m og 0,13m burde vært like, men er muligens ikke samsvarende grunnet avrundingsfeil. Differansen er likevel liten nok til at svarene er relevante. Disse tallene sammen med friksjon i oppheng og sylindere gir bekreftelse på at 0,35m effektiv bølgehøyde er et godt anslag.

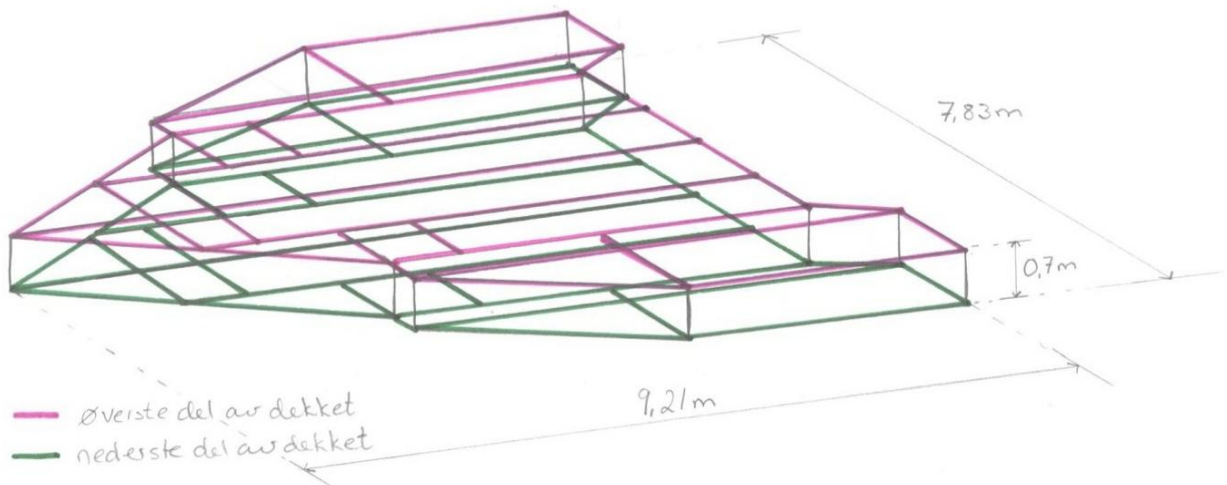
### 3.3 Dekk

#### Beskrivelse

I dag finnes det vindmøller som skal settes i drift på havet, Statoil Hydro sitt Hywind prosjekt, men disse består bare av et høyt og dypt tårn, som er oppankret på tre punkt på havdypet. Denne vindmøllen vil derfor lett vippe frem og tilbake under hardt vær. Hensikten med dekket, i tillegg til at den holder alt sammen, er å gjøre konstruksjonen stabil, for å få mer stabil energi opptak/produksjon, også når den er utsatt for hardt vær. Modellen, som er til testing, blir ikke utsatt for hardt vær som finnes i Norskehavet, men roligere vær og vind som vi har i innsjøen Mjøsa.

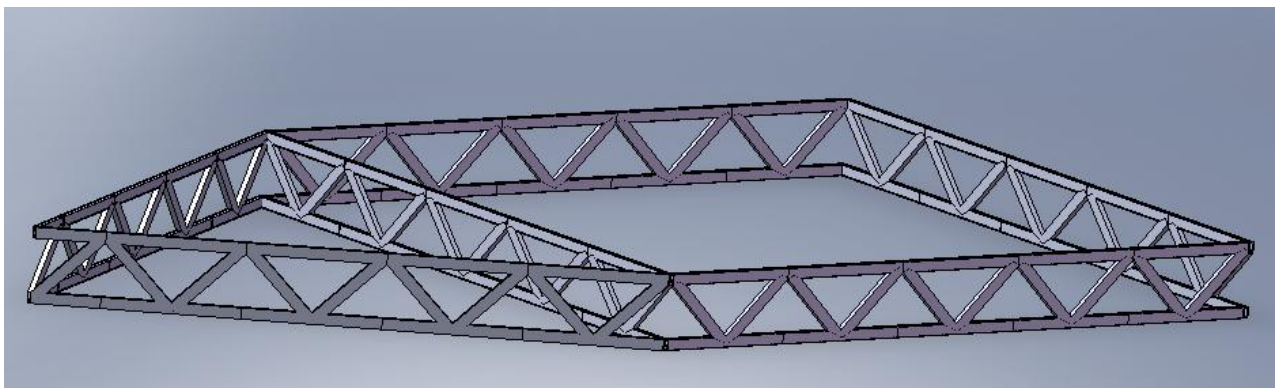
På dekket skal bølgekraft armene med tilbehør, vindmølle tårnene og beina med ballast være montert.

Dekket er definert som rammen og avstiverne i begge planene med skråstagene i mellom. Se figur 3.3.1. Figuren har ikke skråstagene med.



Figur 3.3.1: Skisse av dekket

Den neste figuren, Figur 3.2 er også av dekket. Den er en SolidWorks skisse der skråstagene er med. Her har vi den fremre trekanten og firkantrammen. Figuren er fra tidlig i prosjektet, og dimensjonene er noe endret, men dette viser prinsippet med skråstagene.



Figur 3.3.2: Skisse av dekket med skråstag

Dekket skal være rammen i konstruksjonen og holde den sammen. Dekket skal være festepunktet for de andre komponentene i riggen. Det er 70 cm fra nederst til øverst på dekket. (Se figur 3.1.) På det øverste planet i plattformdekket skal sylindrene festes, og på den nederste skal bølgekraftarmene festes. Beina og vindmøllertårnene skal også festes (sveises) til dekket. Vindmøllertåmene skal stå direkte oppå beina, en på hver av de to midterste beina. I tillegg skal et trykkammer og forskjellige ledninger og slanger til energiproduksjonen stå oppå dekket.

Alt dette er faktorer som vi må ta hensyn til ved dimensjoneringen av riggen. I tillegg kommer alle de dynamiske kreftene riggen blir utsatt for og utmattning kan også bli et spørsmål ved en rigg som dette. Siden riggen vi regner på er en modell som skal brukes til testing, og det skal ikke være folk om bord, er ikke utmattingsberegninger foretatt.

Det er ingen store krefter direkte på dekket, de store kreftene kommer fra bølgekraftarmene, det er også noe fra belastningene av tyngden til utstyret på dekk.

## Problemstilling

Det skal velges fysiske dimensjoner for dekk konstruksjonen, og plasseringen av bølgekraft armene må bestemmes. Egenvekten til dekket skal vi også finne.

## Forutsetninger

Dekket skal bygges av profil i standarddimensjoner fra Norsk Stål A/S sin produktkatalog på nett (ref 4.3)

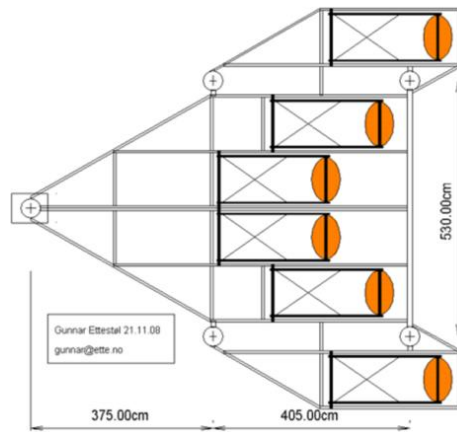
Dimensjonene i dekket må være store nok til at det er mulig å feste de andre komponentene til dekket.

## Metode

Ved dimensjonering av dekket legges det vekt på praktiske hensyn.

Bølgekraft armenes plassering bestemmes av bølgelengden ved optimale forhold. Og avstanden må settes i dekket, slik at bølgekraftarmene skal kunne monteres på i riktig avstander fra hverandre. Bølgekraftarmene må stå i en avstand som er gunstig på bølgene ved optimale forhold (se mer i kapitlet om bølgekraftarmer). Avstanden får noe å si for stabiliteten til riggen.

Det er seks armer på dekket, tre på hver sin side av midten, riggen er symmetrisk om midten. Se figur 3.3.3. De tre armene må ikke være på vei opp på en bølgetopp på samme tid. Da dette vil gjøre riggen mindre stabil. Men dersom de derimot er på forskjellig fase i bølgen vil bølgekraftarmene heller være med å stabilisere riggen.



Figur 3.3.3: Dekket med bølgekraftarmer. De to midterste armene vil bli trukket noe lengre framover.

For å finne dekkets egenvekt finner vi først vekten pr løpeter dekkskonstruksjon. En meter bestående av både den øverste rammen, skråstagene og den nederste rammen. Deretter summeres de ulike lengdene.

### Gjennomføring

Valg av profildimensjoner til dekket er gjort på bakgrunn av satte forutsetninger og praktiske hensyn.

Firkantstålrør er sterkt og lett i forhold til dimensjonene. Det er en fordel med tanke på at riggen skal flyte, og at det er enkelt å feste komponenter til dekket.

Vi tar ut 70 cm fra konstruksjonen. Deler opp og tar først de tyngste profilene,  $70\text{ cm} + 70\text{ cm} = 1,40\text{ m}$ . Og skråstaget mellom dem som er 0,99 m (se vedlegg B). Deretter summeres lengdene.

#### Plassering av bølgekraftarmene

Først satte vi den bakerste bølgekraftarmen, på vingen. Deretter målte vi opp 1.3m framover (ref bølgekraftarm, kapittel 3.2) og fikk avstanden til arm nummer to, som er den midterste armen. Så gjorde vi det samme frem til den første armen. Den ble derfor noe lengre fram enn i den opprinnelige skissen.

### Resultat, jf vedlegg B

På dekket har vi valgt firkant stålrør, med dimensjonene  $80 \cdot 40 \cdot 4\text{ mm}$ , for den øverste og nederste rammen for hele dekket. Vekten av dette er  $7,11\text{ kg/m}$ . For skråstagene har vi valgt flattstål, med dimensjonene  $40 \cdot 5\text{ mm}$ , og vekten av dette er  $1,6\text{ kg/m}$ .

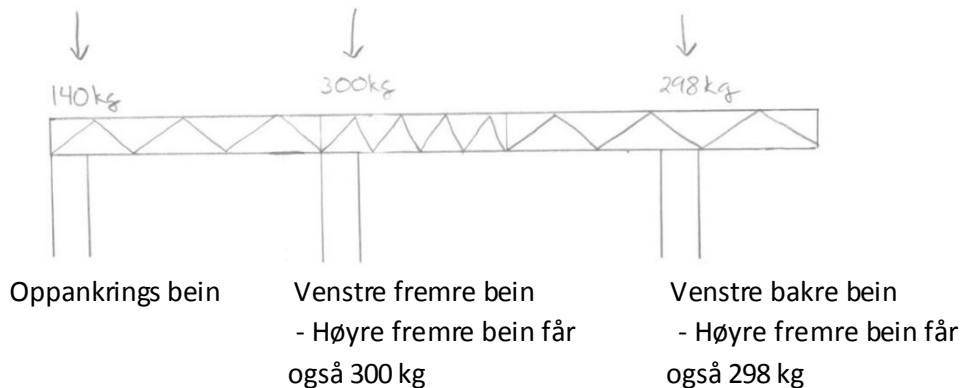
Materialet i konstruksjonen veier  $16,48\text{ kg/m}$ .

Det blir 1.33m mellom de to første armene, og 2.67m fra første til siste arm, (se bølge del).

Den fullstendige beregningen for egenvekten til dekket ligger i vedlegg E. Her er en kort oppsummering:

Dekk, total egenvekten fordelt på beina:

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1. bein: $70,04 \cdot 2 =$        | 140,08 kg                                 |
| <i>Fremre<sub>venstre</sub></i> : | 300,33 kg                                 |
| <i>Fremre<sub>høyre</sub></i> :   | 300,33 kg                                 |
| <i>Bakre<sub>venstre</sub></i> :  | 298,19 kg                                 |
| <i>Bakre<sub>høyre</sub></i> :    | <u>298,19 kg</u>                          |
| Total:                            | 1337,12 kg $\approx$ <b>13 100 Newton</b> |



Figur 3.4: Oppsummering av dekkets egenvekt på beina.

## Diskusjon/ konklusjon

Vi har valgt en større og kraftigere dimensjonering på dekket enn det som er styrkemessig nødvendig. Vi har ikke gjort styrkemessige beregninger, men ser intuitivt at det ikke er noen fare i denne sammenhengen, fordi dekket i utgangspunktet bare skal bære sin egen vekt.

Grunnen til at vi har valgt en såpass stor og kraftig dimensjon er også at det av praktiske grunner, som oppfesting av armer, sveising og festing av annet utstyr, er hensiktsmessig med en større konstruksjon.

Krefter vi har ansett som neglisjerbare kan hå større effekt på riggen i praksis. Dette vil testingen av modellen gi mer kunnskap om.

Plasseringen av bølgekraftarmene er valgt slik fordi man med en tredjedels bølgelengde avstand aldri vil få to bølgekraftarmer på vei opp en bølgetopp på samme tidspunkt. Det gjør at bølgekraft armene ikke trenger å gjøre riggen mer ustabil, men heller mer stabil. Dette er noe av det modellen skal teste.

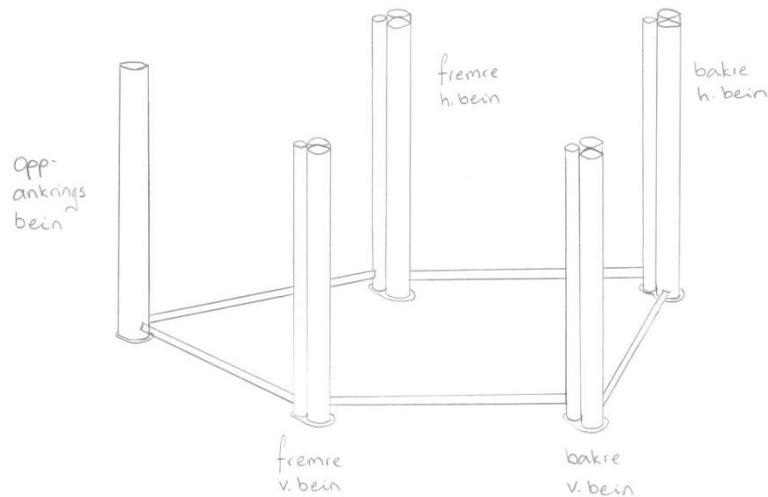
Plasseringen av bølgekraftarmene er gunstig ved optimale værforhold.

Vekten av dekket er avhengig av designen og vekten på materialet.

## 3.4 Bein

### Beskrivelse

Riggen har fem bein, hvorav det ene skal forankres til bunnen og de fire andre flyter fritt i vannet slik at hele riggen kan svinge rundt det oppankrede beinet. Beinas hovedoppgave er å bære den øvrige konstruksjonen. Beina lages i to deler, den øvre delen har kun som oppgave å bære konstruksjonen over, den nedre delen skal også gi tilstrekkelig oppdrift til at riggen holder seg flytende. Riggen må ha noe ekstra oppdriftskapasitet, da den skal utstyres med et hydraulisk anlegg. Det hydrauliske anlegget er ikke per dags dato ferdig planlagt, men vi har anslått en total vekt på 200 kg.



Figur 3.4.1: Bein med avstivere

### Problemstillinger/mål

Det skal velges fysiske dimensjoner for både den øvre og nedre delen av beina. Det må også vurderes en avstivende konstruksjon i bunnen for å hindre beina i å sprike.

### Forutsetninger

- Krefter av direkte vindpåvirkning på beina antas neglisjerbare.
- Krefter fra direkte bølgepåvirkning antas også neglisjerbare.
- Det forutsettes at riggen utplasseres på et sted uten sterke vannstrømninger.
- Testperioden antas å forløpe i sommerhalvåret, slik at påvirkning av is/isløsning ikke blir et problem.
- Det skal benyttes stålrør/profiler av standard tilgjengelige dimensjoner. (ref 4.3)
- Det må tas hensyn til oppdriftsegenskapene ved planlegging av det hydrauliske anlegget ombord.

### Metoder

Først beregnes vekten av den overliggende konstruksjonen, og hvor mye av denne som bæres av de ulike beina.

Dimensjonene vurderes styrkemessig ved klassisk mekanikk. I tillegg til det styrkemessige behovet, vil det også tas praktiske hensyn ved valg av dimensjoner.

For oppdriftskapasitet beregnes vekten av fortrent vannvolum minus den aktuelle profildimensjonens egenvekt. Det beregnes nødvendig dyptgående for det aktuelle dimensjonsvalget på oppankringsbein, fremre- og bakre bein hver for seg, deretter velges et totalt dyptgående ved å også vurdere praktiske hensyn.

## Gjennomføring

Vekten av den overliggende konstruksjonen fordeler seg slik (jf vedlegg C): Oppankringsbeinet belastes med 1570N, de fremre beina med 6605N hver og de bakre beina med 5266N hver.

Av praktiske hensyn er det ønskelig å benytte samme dimensjoner i beinas øvre del som i tårnkonstruksjonens hovedrør, så lenge dette er styrkemessig holdbart. På denne måten kan hovedrørene og de fremre beina lages av ett stykke uten skjøt.

De største trykkspenningene ved valg av denne dimensjonen blir  $\frac{6605}{\pi * (\frac{168,3}{2})^2} = 0,3N/mm^2$ , som ikke

representerer en styrkemessig utfordring.

Det viser seg at standarddimensjonen med størst oppdrift pr. meter er et rør med ytterdiameter lik 355,6mm og godstykkelse 6mm. Med denne dimensjonen er det nødvendig med en neddykket lengde på 3,37 meter for oppankringsbeinet, 14,2 meter for hvert av de fremre beina og 11,3 meter for hvert av de bakre beina.(jf vedlegg C).

På grunn av de store lengdene som er nødvendig for fremre og bakre bein, er det besluttet å lage en sammenstilling av tre rør for oppdriften på disse beina. Rørene plasseres i et triangel med "spissen" forover for best mulig bryting av bølgene. På denne måten blir største nødvendige dyptgående 4,72 m (for fremre bein).

Av praktiske årsaker er det gunstig at alle beina er like lange, og at man har noe overskuddsoppdrift tilgjengelig. Det er derfor besluttet å konstruere alle beina for et dyptgående på 5 meter. Som gir en total oppdrift på 30295N, som er 4983N (508,5kg) mer enn det som er absolutt nødvendig for å holde riggen flytende. Dette er tilstrekkelig til også å holde 200kg hydraulisk anlegg og diverse måleutstyr.

Ettersom det kommer til å oppstå flere ukjente laster (om enn små), finner vi det for risikabelt å lage beina uten noen form for avstiving. Det er derfor valgt å konstruere en enkel avstivning i form av rør som danner en ramme rundt bunnen av beina. Til rammen er det valgt en rørdimensjon på 108\*3,6mm. Denne dimensjonen har tilnærmet lik egenvekt og brutto oppdrift, slik at den ikke belaster beina med ekstra vekt.

## Resultater

Beinas øvre del konstrueres av rør med dimensjonen 168,3\*6mm. Den nedre delen konstrueres med rør av dimensjon 355,3\*6mm, ett enkelt rør for oppankringsbeinet og en sammenstilling av tre for bakre og fremre bein. Avstiving legges til som en enkel ramme mellom beina av rør med dimensjon 108\*3,6mm.

### Konklusjon/diskusjon

Det er fastsatt dimensjoner for de ulike delene av beina, som styrkemessig og oppdriftsmessig oppfyller sin misjon. Likevel anbefales det å vurdere spesiellagde dimensjoner for oppdriftselementene, på tross av forutsetningene for prosjektet, på grunn av det store dyptgående som blir nødvendig med standard tilgjengelige dimensjoner. Det ville også gi en følelse av trygghet å kunne lage elementer med rikelige mengder ekstra oppdrift, for heller å justere riggens dyptgående ved hjelp av ballast.

Ved videreutvikling til en rigg for kommersiell bruk, anbefales det å vurdere belastningen av direkte vind- og bølgepåvirkning, med tanke på å optimalisere avstivningen. Dette vil kreve grundige målinger av værdata for aktuelle lokasjoner.



## 3.5 Moment

### Totalmoment, stram fortøyning

Vindtrykket mot turbinene skaper et moment om fortøyningspunktet, som kompenseres ved at riggen vil tippe bakover. Dette skaper et tilsvarende motmoment fra økt nedsenkning av beina, og dermed økte oppdriftskrefter.

Det er ytret ønske fra oppdragsgiver om at størrelsen av denne nedsynkingen beregnes.

### Problemstilling/målsetning

Det ønskes å vurdere hvor mye riggen vil roteres om oppankringspunktet når den påføres vindtrykk. Både antall grader vridning og endringen i beinas nedsynkingshøyde er av interesse.

### Forutsetninger

- Direkte vind og bølgepåvirkning av konstruksjonen antas neglisjerbart
- Det sees bort ifra påvirkningen fra bølgefangerarmene, da denne vil endres kontinuerlig
- Det forutsettes stram fortøyning (oppankringspunktet flyttes ikke som følge av påvirkningen)

### Metoder

Det settes opp et forhold mellom ekstra oppdriftskrefter fra hhv. Fremre og bakre bein. Kraftene relateres til sine respektive momentarmer om oppankringspunktet og settes lik momentet gitt av vindtrykket mot turbinene. Dette gir oss det nødvendige tillegget i oppdriftskreftene for å møte det påførte momentet.

Videre blir denne endringen i oppdriftskrefter relatert til et tillegg i nedsynking, som også kan beskrives som en endring i riggens vinkel med horisontalplanet

### Gjennomføring

Kraften på vindturbinen er 500N på hver turbin, og virker i turbinens navhøyde. Med navhøyden 10,05m over oppankringspunktet gir det et moment på:

$$M_r = 500N * 2 * 10,05m = 10050Nm$$

Jf. kapittel 3.2.1 Tårn

Det virker en kraft på 500N fra vindturbinene, og den gir et moment om oppankringen som slår ut ved de 2 midterste og 2 bakerste beina. Dette blir kompensert i økt oppdrift de fire bakerste beina. Vi forutsetter at oppankringsbeinet ikke beveger seg fordi vi har fast oppankring. Ettersom summen av FO blir 0 over tid har vi også sett bort fra den.

Dette gir et utslag ved at riggen tilter 2.74° nedover fra det fremre benet, og at de midterste synker 0.179m og de bakerste synker 0.374m, jf Vedlegg D.

## Resultater

Riggen vil roteres 2,74 grader bakover som følge av momentet fra vindturbinene. De bakerste beina vil få en ekstra nedsynking på 0.374m som et resultat av dette.

## Diskusjon/konklusjon

Tallene er en god indikator på hvor mye riggen synker i bakkant under produksjon, og må tas med i prosjekteringen av hvor lange beina skal være.

Nedsynkingen vil til dels motvirkes av oppdrift fra bølgefangere, denne kraften vil være variabel og kan ikke bestemmes nøyaktig uten videre arbeid.

Dette kan også indikere at riggen bør være trimmet slik at den luter litt forover/ har noe ekstra høyde bak ved stille forhold. Resultatet kan benyttes for å sammenligne denne riggens stabilitet, med andre konsepter for flytende vindkraftproduksjonsheter.

## Kapittel 4 - Resultat

---

Det er fastsatt dimensjoner for hovedkomponentene til konstruksjonen, som definert i målsetningene.

Selv om det er framsatt en løsning med standard dimensjoner anbefales det å vurdere spesialtilvirkede dimensjoner til beinas nedre del, for å oppnå bedre oppdriftsegenskaper.

Det er også, etter ønske fra oppdragsgiver, gjennomført en beregning av hvordan momentet fra vindturbinene påvirker riggens plassering i vannlinjen.



# Kapittel 5 - Vurdering av resultat

---

## Relevans av resultat

- Relevant for en innsjø  
Riggen er dimensjonert for bruk på innsjø der været aldri eller sjeldent blir såpass voldsomme forhold som på havet. Dette må derfor tas hensyn til hvis riggen skal brukes på havet. Slik riggen er dimensjonert vil den muligens kunne gjøre seg bra som ekstra strømforsyning til oppdrettsanlegg som ligger lunt til i havet.
- Værdata må dokumenteres  
De værdata som er lagt i grunn for dimensjoneringen er ikke veldig sikre. Det må måles typiske bølgehøyder og lengder for normal kraftproduksjon for å få det beste resultatet, dette gjelder også for vind. Bølgeformer kan også ha betydning. Ettersom vi har såpass usikre værdata er resultatet også noe usikkert. Dette har derimot ikke så stor betydning for testriggen da den blir bygget for å teste hvordan den faktiske riggen oppfører seg uansett vær.
- Andre laster  
I våre beregninger er en rekke laster antatt neglisjerbare. Selv om dette er rimelige antagelser under gode forhold, kan man ikke forvente å ha slike forhold i et reelt produksjonsmiljø til en hver tid.
- Oppdrift i bein  
Det anbefales å vurdere spesialproduserte dimensjoner til beina for bedre oppdriftsegenskaper
- Levetid  
Testriggen er beregnet med en svært kort operativ tid som testrigg, og vi har ikke lagt vekt på korrosjon som en betydelig faktor.

## Forhold ved kommersiell drift

- **Materialer**

I oppgaven har vi forutsatt vanlig konstruksjonsstål, som i de aller fleste installasjoner offshore. I en rigg som skal benyttes kommersielt må riggen beskyttes mot korrosjon på en bedre måte enn ved en testrigg i innsjø. Det kan også være en tanke å produsere bein i betong for bedre oppdriftsegenskaper.
- **Stabilitet**

Stabilisatorer under beina er påtenkt i den første skissen fra Ettestøl, men ikke tatt med i beregningene, fordi det vil være enklere å bruke testtriggen for å finne ut hva som er nødvendig av stabilisatorer for ønsket stabilitet.

Hva angår bølgekraftproduksjon så vil det i en oppskalert versjon kunne være ønskelig å ha armer som kan flyttes fremover eller bakover for å kompensere for forskjellige bølgelengder. Dette er viktig i en stor rigg der bølgelengder som er mye kortere enn de i normalkraftproduksjon fortsatt er såpass store at de kan gi uønsket mye ustabilitet i riggen hvis alle armene treffer bølgetoppene samtidig. Dessuten vil dette gi mer stabil kraftproduksjon.
- **Levetid**

Levetiden er vurdert god nok for en testrigg, men det må vurderes om den er god nok for en kommersiell rigg. Det vil være nødvendig å beregne et bedre anslag på levetiden ved en kommersiell rigg som skal produsere i tilstrekkelig mange år. Kritiske punkter kan være: Armfeste, sylindrefeste på arm, sylindrefeste på dekk, tårnfeste, bein.
- **Helårs drift**

Testtriggen er ment for testing i sommerhalvåret. En rigg til kommersiell drift vil i vinterhalvåret kunne utsettes for påvirkning av isdannelse/isløsning og lave temperaturer. Effektene av dette må vurderes.
- **Avstiving**

Det er mulig at avstiving på tårnet kan sløyfes når informasjon om vibrasjoner og andre spenninger i tårnet er bedre kartlagt. Det kan også vurderes å endre beinas nedre avstiving, når man får grundigere dokumenterte belastninger fra vind og bølger/strømninger inn i beregningene, fra testrigg og værdata.
- **Dekk, ving**

På større rigger kan det bli et problem med en bølgefangerarm plassert på en ving utenfor beina, på grunn av stor nedbøying dersom overhenget blir stort.
- **Oppdrift i bølgefangere**

I testtriggen har vi brukt en kommersiell flyter, men det kan være en tanke å få produsert egne ellipseformede bøyer som blir minst mulig påvirket av kryssbølger. Da vil nye beregninger på hvor langt den synker, og høyden av effektivt bølgeopptak være nødvendig.

## Nødvendighet av nye/andre beregninger

- **Armer – kryssbølger**  
Det kan være nødvendig å finne dokumentasjon på hvor mye bølgeretningen kan avvike fra vindretningen og beregne den totale sidebelastningen på armene.
- **Stabilisatorer**  
Det kan være nødvendig å beregne hvor mye stabilisatorer påvirker riggen både med tanke på vekt og stabilitet.
- **Oppankring**  
Det vil være nødvendig å beregne den totale belastningen på oppankringen i praksis. Det vil si i oppankring med slakk. Det kan også være nødvendig i en oppskalert rigg å beregne hvordan riggen oppfører seg når oppankringen strammes, spesielt i ekstremværsituasjoner.
- **Avstiving, dekk**  
Dekkskonstruksjonen for testriggen er svært stiv på grunn av skråstagene mellom øvre og nedre plan. Med bedre kjennskap til belastningene dekket blir utsatt for (oppnådd ved datainnsamling på aktuell lokasjon), særlig fra kreftene som er neglisjert i denne oppgaven, kan det være mulig å redusere denne avstivingen og dermed vekten/prisen på hele konstruksjonen.
- **Avstiving, tårn**  
Det kan være nødvendig å beregne/måle de reelle vibrasjonene for å finne ut om det er mulig å sløyfe avstivingsstaget i tårnet. Dersom vibrasjonene er tilstrekkelig små kan man dempe dem vekk med gummidoringer eller lignende. Antallet sykler for belastningene på tårnet vil da falle dramatisk, og avstivningen kan vise seg å være unødvendig.





## Kapittel 6 - Konklusjon

---

Vi er godt fornøyd med resultatet av prosjektet og føler vi har nådd målene våre. Vi har levert et forprosjekt for en rigg med beregninger som er relevante for bruk i en innsjø, men ikke nødvendigvis for tøff sjø. Ettersom dette er en testrigg der levetiden er av begrenset omfang, og lastdata er svært usikre, har det ikke blitt lagt mye vekt på eksakte utmattingsberegninger, men anslått at levetiden er god nok for en testrigg.

Et delmål for prosjektet er fastsetting av relevante ytre påkjenninger på riggen, og disse er fastsatt tilstrekkelig. Gjennom beregninger gjort på grunnlag av de forutsetningene vi har satt har vi fastsatt de vesentligste ytre påkjenningene.

Prosjektets effektmål er oppnådd. Vi har beregnet fysiske dimensjoner på riggen, samt materialvekt, oppdrift og relevante påkjenninger. Prosjektet er et godt utgangspunkt for videre designarbeid, ved eventuell utskifting av komponenter er formelverket på plass slik at det er enkelt å redimensjonere.

Vi har fokusert på testrigg i innsjø, og har derfor ikke fokusert på korrosjon og ekstremvær. Det er heller ikke beregnet hvor stabil riggen vil være, ettersom dette er en av de tingene som testriggen blir bygget for å finne ut av.

Det er mulig det lar seg gjøre å neddimensjonere deler av konstruksjonen når en ser hvordan den oppfører seg under kraftproduksjon.



# Referanser/ litteraturliste

---

## Kompendier

- 1.1 ENE 104 Fornybar energi, Harald Næser
- 1.2 Dimensjonering av sveiste konstruksjoner mot utmatting og brudd, Stig Berge

## Standarder

- 2.1 DNV-OS-J101 Design of offshore wind turbine structures – Det Norske Veritas
- 2.2 DNV-OS-C201 Structural design of offshore units (WSD method) – Det Norske Veritas
- 2.3 DNV-OS-C101 Design of offshore steel structures, general (LRFD method) – Det Norske Veritas
- 2.4 DNV-OS-E301 Position mooring – Det Norske Veritas

## Bøker

- 3.1 Electricity from offshore wind, Danish Energy Agency & IEA CADDET
- 3.2 Wind energy conversion systems, L. L. Freris
- 3.3 Strømningsmaskiner bind 1, grunnlag – Jan M. Øverli
- 3.4 Formler og tabeller, John Haugan

## Internett

- 4.1 <http://emweb.unl.edu/Mechanics-Pages/Mitch-Minarick/Statics%20Web%20Page.html>
- 4.2 <http://www.cipax.no/Templates/ProductCatalogProduct1.aspx?PageID=68481ace-bcbe-4fc2-b65a-01ae2e22a440&ProductID=567b6a2a-4ab7-4c1d-ba93-d65e960e2051>
- 4.3 <http://www2.norskstaal.no/varekatalog/>
- 4.4 <http://www.ette.no>