Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

**Masteroppgave 2018 30 stp**

Fakultet for realfag og teknologi
Marit Irene Kvittem

# Design av ankerliner for flytende vindturbiner i mellomdypt vann ved hjelp av optimering

## Design of mooring line systems for floating wind turbines in intermediate water by optimization

Fariad Nemazi

Maskin, prosess og produktutvikling
Fakultet for realfag og teknologi

# Abstract

Because of an increased focus on sustainable energy, incentives for innovations has become important. Floating wind turbines has a great potential in contributing as a tool to reach the goals to reduce $CO_2$. Floating turbines has a high cost these days. It is known that the design and the repertoire of concepts for wind turbines in intermediate water depth is complicated. This raises the already high cost for floating wind turbines. The optimization of the different variables that attributed the cost is seen as an interesting topic when discussing how to reduce the costs of floating wind turbines.

This thesis studies a routine of optimization which designs a mooring line system. The routine of optimization is built with a SIMA workbench and uses an external algorithm of optimization called NLPQLP. The algorithm optimizes certain variables which contributes to the cost function for chains. The model is the OO-Star Wind Floater Semi 10MW made by Olav Olavsen. In the beginning, the routine of the optimization was built through a completely dynamic model. But because of some complexity and time-consuming simulations, there had to be made some simplifications. The model went from being a dynamic model to a quasistatic model. The turbine was removed and replaced by a rigid bode with mass-, inertia- and thrust force-coefficients.

The model was exposed to Ultimate Limit State (ULS) and Fatigue Limit State (FLS). There were three instances with ULS, where the turbine was parked in two of them. With the FLS, there were thirteen selected cases where the turbine produced completely in all of the instances. Every simulation was done with a water depth of 130 meters. One of the restrictions in this thesis is the lifetime of the lines. The fatigue analysis was done with an integrated fatigue damage software, that does rainflow counting in a timeline and calculates the partial damage with Miner-Palmgren rule.

The simulation from the FLS-cases showed high forces and accumulated partial damage on anchoring-line 1 at every case. The lifetime on anchoring-line 2, which was the line with the second least lifetime, showed sixteen times higher lifetime than anchoring-line 1. Therefore, the dimension of what would happen if the accumulated partial damage on anchoring-line 1 was neglected was interesting to investigate. The results showed a diameter reduction from 266.73 millimeters to 155.68 millimeters and a line length-reduction from 703.04 meters to 689.8 meters. The routine of optimization investigated the restrictions and showed results which were tested afterwards without optimization. The results showed that every demand was adhered to both instances.

# Sammendrag

Som resultat av økt fokus på bærekraftige løsninger blir insentiver for innovasjon viktig. Flytende vindturbiner har et stort potensial for å bidra til reduksjon av $CO_2$-utslipp. Kostnadene for flytende vindturbiner er i dag høye. Det er kjent at dimensjonering og konseptutvalg for flytende vindturbiner på mellomdypt vann er komplisert. Ved redusert kjettinglengde må ofte kjettingdiameteren økes. Dette øker et allerede høyt kostnadsbilde for flytende vindturbiner. Optimering av variabler som inngår i kostnadene blir sett på som et interessant emne for kostnadsreduksjon.

Denne oppgaven studerer en optimeringsrutine som dimensjonerer et forankringssystem. Optimeringsrutinen er bygd i SIMA workbench og bruker en ekstern optimeringsalgoritme kalt NLPQLP. Algoritmen optimerer utvalgte variabler i lys av en kostnadsfunksjon for kjetting.

Modellen er Olav Olavsen sin OO-Star Wind Floater Semi 10MW. Til å starte med ble optimeringsrutinen bygd ved en fullstendig dynamisk modell, men siden krevende simuleringer brukte lang tid ble det gjort noen forenklinger. Modellen gikk fra å være en dynamisk modell til en kvasi-statisk modell. Turbinen ble fjernet og erstattet med et stivlegeme med masse-, treghet- og vindkraftkoeffisienter.

Modellen ble utsatt for bruddgrensetilstand (ULS) og utmattingsgrensetilstand (FLS). Det var tre tilfeller av ULS, hvor turbinen var parkert i to av dem. For FLS var det full produksjon i turbin ved samtlige 13 utvalgte tilfeller. Alle simuleringene ble gjennomført ved vanndyp på 130 meter. En av restriksjonene i oppgaven var levetiden for linene. Utmattingsanalysen ble gjort ved et integrert utmattingsskadeberegningsprogram som gjør rainflow counting på en tidsserie og regner delskade med Miner-Palmgren.

Simuleringen av FLS-tilfellene viste høye krefter og akkumulert delskade på forankringsline 1 ved samtlige tilfeller. Levetiden for forankringsline 2, som var linen med nest kortest levetid, viste nesten 16 ganger høyere levetid enn forankringsline 1. Det ble derfor undersøkt hva dimensjonene ville bli dersom den akkumulerte delskaden på forankringsline 1 ble neglisjert. Resultatene viste en diameterreduksjon fra 266.73 millimeter til 155.68 millimeter, og linelengdereduksjon fra 703.04 meter til 689.8 meter. Optimeringsrutinen undersøkte restriksjonene og viste til resultater som ble testet i etterkant utenom optimeringsrutinen. Resultatene viste at alle krav var overholdt ved begge tilfeller.

# Forord

Denne oppgaven er skrevet ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, våren 2018. Oppgaven utgjør 30 studiepoeng og er utarbeidet som en avsluttende del i masterstudiet Sivilingeniør – maskin, prosess og produktutvikling ved fakultet for realfag og teknologi.

Tema for oppgaven er optimalisering av forankringssystemer for flytende vindturbiner. For at flytende vindturbiner skal være kostnadseffektive må kostnadsnivået reduseres. Her har forankringssystemet blitt sett på som en bidragsyter, og denne oppgaven ser på mulighetene for design av dette ved optimeringsalgoritmer.

Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder Marit Irene Kvittem. Marit har vært svært motiverende, inspirerende og ikke minst dyktig i veiledningen. Hennes kompetanse har vært uvurderlig i denne oppgaven. En stor takk til SINTEF Ocean som har gitt meg lisens til SIMA workbench og gitt meg opplæring i programmet. Jeg vil også takke min biveileder Tor Anders Nygaard for artikler og faglige diskusjoner gjennom semestret.

Jeg vil takke min mor for støtte og kjærlighet gjennom hele studiet. En stor takk til mine gode venner som har vært der med oppmuntrende ord og støtte. Ikke minst vil jeg takke Anne Helene for støtte, korrekturlesing og oppmuntring fra første dag. Oppgaven dediseres til min far.

Ås, 14.Mai 2018

Fariad Nemazi

# Innholdsfortegnelse

**Abstract** . . . . . **i**

**Sammendrag** . . . . . **ii**

**Figurliste** . . . . . **vii**

**Tabelliste** . . . . . **ix**

**Nomenklatur** . . . . . **xiii**

**1 Introduksjon** . . . . . **1**

1.1 Motivasjon . . . . . 2

1.2 Beskrivelse av prosjekt . . . . . 2

**2 Tidligere arbeid og anvendelser** . . . . . **3**

2.1 Utvikling offshore vindturbiner . . . . . 3

2.2 Flytende vindturbiner . . . . . 5

2.2.1 Klassifikasjon av flytende vindturbiner . . . . . 7

2.3 Potensielle vekstmuligheter . . . . . 8

2.4 Utfordringer mellomdypt vann . . . . . 9

2.5 Optimering . . . . . 10

2.6 OO-Star Wind Floater Semi 10MW . . . . . 11

**3 Teori** . . . . . **13**

3.1 Bevegelsesligning for plattform . . . . . 13

3.2 Hydrodynamiske laster . . . . . 13

3.2.1 Potensialteori . . . . . 13

3.2.2 Dragkrefter . . . . . 14
3.3 Modellering av miljøforhold . . . . . 16
3.3.1 Irregulære bølger og bølgespektrum . . . . . 16
3.3.2 Vind . . . . . 19
3.3.3 Havstrøm . . . . . 21
3.4 Forankring . . . . . 22
3.4.1 Respons på forankringsliner . . . . . 22
3.5 Utmattingsanalyse . . . . . 23
3.5.1 S-N-kurve . . . . . 23
3.5.2 Miner-Palmgren . . . . . 24
3.5.3 Rainflowcounting . . . . . 25

**4 Optimering . . . . . 26**
4.1 Formulering av et optimeringsproblem . . . . . 26
4.2 Optimeringsalgoritmer . . . . . 27
4.2.1 NLPQLP . . . . . 27
4.3 Gradientbaserte metoder for ikke-lineære problemer . . . . . 28
4.3.1 Penalty, barrier and augmented Langrangian methods . . . . . 28
4.3.2 Sequential quadratic programming . . . . . 29
4.4 Optimeringsparametere i denne oppgaven . . . . . 30

**5 Analysebeskrivelse . . . . . 31**
5.1 Simuleringsverktøyet . . . . . 31
5.2 Miljøforhold . . . . . 31
5.3 Grensetilstander . . . . . 32

**6 Oppbygning av modell . . . . . 33**
6.1 Simulering av lastkombinasjoner . . . . . 34
6.1.1 Simulering av ULS-tilfeller . . . . . 34
6.1.2 Simulering av FLS-tilfeller . . . . . 36
6.2 SIMO modell . . . . . 37

6.3 Post prosessor . . . . . 39
6.4 Optimering . . . . . 42

**7 Resultater og diskusjon . . . . . 44**
7.1 Optimerte verdier . . . . . 44
7.2 Resultater fra ULS-tilfellene . . . . . 48
7.3 Resultater fra FLS-tilfellene . . . . . 51
7.4 LIFE50+ som baseline . . . . . 53
7.5 Designoptimering . . . . . 53
7.6 Videre bruk av modell i SIMA workbench . . . . . 55

**8 Konklusjon . . . . . 56**
8.1 Forslag til videre arbeid . . . . . 58

**Referanser . . . . . 59**

**A Resultater fra optimeringsprosesser . . . . . 62**

# Figurliste


2.1 Typiske bunnfaste flyteturbiner [9] . . . . . 3
2.2 Fordeling av offshore vindturbiner i 2012[9] . . . . . 4
2.3 Fremtidige prosjekter for flytende vindturbiner. Orginalt fra [30] . . . 6
2.4 Ulike typer plattform- og forankringssystemer[24] . . . . . 7
2.5 Ulike havdybder ved de forskjellige havene[24] . . . . . 8
2.6 Plattformkostnader ved dybder[36] . . . . . 9
2.7 Utvikling i kostnader til forankringssystemer ved 60 til 800 meter. Orginalt fra [30] . . . . . 9
2.8 OO-Star plattform med koordinatsystem [38] . . . . . 11
2.9 OO-Star plattform dimensjoner [38] . . . . . 11
2.10 Forankringssystemet sett i fra to profiler [38] . . . . . 12

3.1 Illustrasjon av flytende vindturbin i et miljø med vind, bølger og strøm. Modell fra [24] . . . . . 16
3.2 Pierson-Moskowitz- og -JONSWAP spektrumet. Orginalt fra [21] . . 18
3.3 Gjennomsnittlig vindhastighet med turbulensspekter. Orginalt fra [19] 19
3.4 Fordelingsfunksjon for gjennomsnittelig vindhastighet 10 meter over middelvannstand [15] . . . . . 20
3.5 S-N kurve med sannsynlighetsverdier[37] . . . . . 23
3.6 Rainflow counting-illustrasjoner orginalt fra [31] . . . . . 25

6.1 Flytskjema av modellens oppbygging . . . . . 33
6.2 Eksempel på strømprofil fra ULS-tilfelle . . . . . 34
6.3 Energiproduksjon som funksjon av forskjellige vindhastigheter, orginalt fra [24] . . . . . 35
6.4 Grafen til vindkoeffisienter som funksjon av gjennomsnittlig vindhastigheter . . . . . 37
6.5 Modell illustrert i SIMA workbench før forenkling . . . . . 38
6.6 Forenklet modell illustrert i SIMA workbench . . . . . 38
6.7 SIMA-illustrasjon av post prosessoren for oppbygging av dimensjonerende last . . . . . 40
6.8 Oppsett av utmattingsanalyse i SIMA workbench . . . . . 41
6.9 Flytskjema over optimeringsprosessen . . . . . 43

7.1 Utvikling i offset under optimering . . . . . 45
7.2 Akkumulert delskade ved forankringsline 1 . . . . . 45
7.3 Akkumulert delskade ved forankringsline 2 og 3 . . . . . 46
7.4 Offsetverdier ved line 1 neglisjert . . . . . 47
7.5 Akkumulert delskade for line 3 fra optimeringsprosess med line 1 neglisjert . . . . . 47

7.6 Krefter i forankringsline 1 ved samtlige ULS-tilfeller . . . . . 48
7.7 Plattformbevegelse i x-retning . . . . . 49
7.8 Plattformbevegelse i y-retning . . . . . 49
7.9 Krefter i line 1 ved samtlige ULS-tilfeller under reduserte restriksjoner 50
7.10 Plattformbevegelse i ULS 67 ved reduserte restriksjoner i x-retning . . 50
7.11 Plattformbevegelse i ULS 67 ved reduserte restriksjoner i y-retning . . 50
7.12 Linekrefter på forankringsline 1 ved FLS-tilfeller . . . . . 51
7.13 Linekrefter på forankringsline 1 ved FLS-tilfeller . . . . . 52
7.14 Før og etter optimering. Orginalt fra [16] . . . . . 55

A.1 Optimeringsprosess av dimensjonerende laster mot MBL . . . . . 62
A.2 Akkumulert delskade for line 2 fra optimeringsprosess med line 1 neglisjert . . . . . 63
A.3 Optimeringsprosess av dimensjonerende laster mot MBL med akkumulert delskade for forankringsline 1 neglisjert . . . . . 64
A.4 Linekrefter ved ULS-tilfeller . . . . . 65
A.5 Linekrefter ved FLS-tilfelle 1 . . . . . 66
A.6 Linekrefter ved FLS-tilfelle 2 . . . . . 66
A.7 Linekrefter ved FLS-tilfelle 3 . . . . . 66
A.8 Linekrefter ved FLS-tilfelle 4 . . . . . 67
A.9 Linekrefter ved FLS-tilfelle 32 . . . . . 67
A.10 Linekrefter ved FLS-tilfelle 33 . . . . . 67
A.11 Linekrefter ved FLS-tilfelle 39 . . . . . 68
A.12 Linekrefter ved FLS-tilfelle 52 . . . . . 68
A.13 Linekrefter ved FLS-tilfelle 53.1 . . . . . 68
A.14 Linekrefter ved FLS-tilfelle 53.2 . . . . . 69
A.15 Linekrefter ved FLS-tilfelle 60 . . . . . 69
A.16 Linekrefter ved FLS-tilfelle 61 . . . . . 69
A.17 Linekrefter ved FLS-tilfelle 81 . . . . . 70
A.18 Linekrefter ved ULS-tilfeller under reduserte restriksjoner . . . . . 71

# Tabelliste


2.1 Egenskaper til LIFES50+ OO-Star Wind Floater Semi 10MW forankringssystem, verdier fra [38] . . . . . 12

3.1 Typiske vindhastigheter ved utvalgte områder. Orginalt fra [5]. . . . . 21

6.1 ULS-tilfeller som er implementert i SIMA workbench . . . . . 34
6.2 FLS-tilfeller som er implementert i SIMA workbench . . . . . 36
6.3 Gjennomsnittlige vindhastigheter og vindkraftkoeffisienter . . . . . 37
6.4 Sammenligning av designkriterier for DNV-OS-J103 og DNV-OS-E301 [24] . . . . . 39
6.5 Optimeringsvariabler i SIMA . . . . . 42
6.6 Restriksjoner for optimering i SIMA . . . . . 42

7.1 Optimerte verdier som tilfredstiller alle restriksjoner . . . . . 44
7.2 Krefter i forankringsliner ved dimensjoner fra optimeringsprosess med restriksjoner oppfylt . . . . . 46
7.3 Optimerte verdier fra optimering med akkumulert delskade for forankringsline 1 neglisjert . . . . . 47
7.4 Krefter i forankringsliner ved dimensjoner fra optimeringsprosess . . . 48
7.5 Levetid for forankringsliner ved FLS-tilfeller . . . . . 51
7.6 Levetid for forankringslinene under reduserte restriksjoner . . . . . 52

# Forkortelser

**ALS, FLS, SLS, ULS** Accidental, Fatigue, Serviceability, Ultimate Limit State

**DFF** Design fatigue factor

**DLC** Design Load Case

**DNV GL** Det Norske Veritas Germanischer Lloyd

**Fairlead** Kryssingspunkt mellom forankringslinene og plattformen

**Forankringssystem** Systemet for forankring av flytende vindturbiner, alle komponenter fra fairlead til havbunn

**JONSWAP** Joint North Sea Wave Project

**kW** Kilowatt

**MSL** Mean Sea Level

**NLPQLP** Ikke-lineær programmering (NLP) algoritme som bruker Sequential quadratic programming (SQP) algoritme som kjerne algoritme

**NLP** Nonlinear programming

**NMBU** Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

**OO Star** Olav Olsen Star Wind Floater

**Pagoda-tak** Karakteristisk takformasjon brukt på de fleste destillerier

**RENERGIX** Nytt stort program for energiforskning

**Re** Reynooldstall

**SIMO** Simulation of Marine Operations

**SPAR** Single Point Anchor Reservoir

**SQP** Sequential quadratic programming

**TLP** Tension Leg Platform

| | |
|---|---|
| **Twh** | Terrawattimer |
| **T** | Levetid |

# Nomenklatur

| | |
|---|---|
| $\bar{u_r}$ | Gjennomsnittelig vindhastighet ved referansehøyde |
| $\bar{u}(z)$ | Vindprofil for Turbulensspekteret |
| $\frac{\partial v_N}{\partial t}$ | Normalkomponent til bølgepartikkelens |
| $\mathcal{E}$ | Sett med ulikhetsrestriksjoner |
| $\mathcal{K}$ | Overflate dragkoeffisient |
| $\mathcal{L}_{\mathcal{A}}(x, \lambda; \mu)$ | Augmented Lagrangian |
| $\mathcal{L}_{\mathcal{A}}(x, \lambda; \mu)$ | Augmented Langrangian method |
| $\mathcal{V}$ | Kinematiske viskositet |
| $\triangle\sigma$ | Spenningsvidde |
| $A$ | Tillegsmasse matrise |
| $A_\gamma$ | Normaliseringsfaktor |
| $A_{ii}$ | Tillegsmassekoeffisient |
| $a_i$ | Partikkelakselrasjon |
| $A_{pi}$ | Areal av nedsenkbardel av objektet projisert på et horisontalt plan |
| $A_p$ | Projisert areal normalt på væskeretning |
| $B$ | Lineær-dempingsmatrise |
| $C$ | Restore matrise |
| $C_D$ | Dimensjonsløs dragkoeffisient |
| $c_i$ | Sett med restriksjoner |
| $C_{moor}(l, d)$ | Kostnadsfunksjon for kjetting |
| $D(z)$ | Diameter på sylinder |
| $d_i$ | Diameter $i$ |
| $F(\omega)$ | Eksterne krefter |

| | |
|---|---|
| $F(u)$ | Kumulativ sannsynlighetsfordeling |
| $F_{Drag}$ | Dragkraft |
| $F_{Dvind}$ | Dragkraft for vind |
| $F_{Dvisk}$ | Viskøs dragkraft |
| $H_s$ | Signifikant bølgehøyde |
| $L_i$ | Linelengde $i$ |
| $log\bar{a}$ | Avskjærer Log N aksen |
| $M$ | Massematrise |
| $m$ | Inverse negative stigningen til S-N kurven |
| $MBL_{kjetting}$ | MBLfunksjon for kjetting |
| $n_i$ | Antall sykler til utmatting ved en konstant spenningsvidde |
| $P(x;\mu)$ | Barrier funksjon |
| $p_i$ | Sannsynlighet for tilstand $i$ skal forekomme |
| $Q(x;\mu)$ | Penalty funksjon |
| $S_J(\omega)$ | JONSWAP-spektrum |
| $S_{PM}$ | Pierson-Moskowitz spektrum |
| $t_i$ | Antall timer tilstand $i$ forekommer |
| $T_p$ | Bølgetopp |
| $u(z)$ | Vindhastigheten langs sylinderhøyden |
| $U_{10}$ | Times gjennomsnittelig vindhastighet ved 10 meter over havet |
| $v_{ri}$ | Relativ hastighetskomponent i retning $i$ |
| $v_r$ | Karakteristisk relativhastighet i kraftretning mellom objekt og vannpartikler |
| $V_{strøm}$ | Vindgenerert havstrøm ved stillevann |
| $x, \dot{x}, \ddot{x}$ | Posisjon-, hastighet- og akselrasjonsvektor |
| $z_r$ | Referansehøyde |

| | |
|---|---|
| $F^{\text{Bølge}}$ | Bølgekraftvektor |
| $F^{D}$ | Diffraksjon kraftvektor |
| $F^{FK}$ | Froude Krylov kraftvektor |

## Greske symboler

| | |
|---|---|
| $\eta$ | Bruksfaktor |
| $\gamma$ | Spisshetsparameter |
| $\lambda$ | Lagrange multiplikator |
| $\mu$ | Penalty parameter |
| $\Omega$ | Gjennomførbare sett |
| $\omega$ | Vinkelfrekvens |
| $\omega_p$ | Spekterets toppfrekvens eller bølgefrekvensen |
| $\rho$ | Tetthet |
| $\zeta$ | Bølgeamplitude |

# Kapittel 1

# Introduksjon

Denne oppgaven studerer en optimeringsrutine som dimensjonerer et forankringssystem av kjetting til flytende vindturbiner. Nedenfor finner er en oversikt som viser hvordan avhandlingen er satt opp, med en kort beskrivelse.

## Del i: Bakgrunnn

**Kapittel 2** tar for seg utviklingen av offshore vindturbiner, spesielt de siste 20 årene. Kapittelet belyser viktigheten og behovet for utvikling av kostnadseffektive flytende vindturbiner.

## Del ii: Teori

**Kapittel 3** gjør rede for teori knyttet til analysen som SIMA workbench kjører. Kapittelet tar for seg miljølaster som turbinen utsettes for. Videre defineres teorien rundt utmattingsanalysen som blir gjort.

**Kapittel 4** viser til teori knyttet opp mot optimeringsprosessen, og hvordan optimeringen for denne avhandlingen tar form.

## Del iii: Metode

**Kapittel 5** beskriver hvordan analysen utføres i SIMA workbench. Her forklares også valg knyttet opp mot grensetilstander og miljøforhold.

**Kapittel 6** viser og forklarer oppbyggingen av modellen. Her blir også en forenkling av modellen presentert.

## Del iv: resultat, diskusjon og konklusjon

**Kapittel 7** Resultatene fra analysen er presentert og diskutert.

**Kapittel 8** konklusjon og forslag til videre arbeid

## 1.1 Motivasjon

Vindkraftteknologi har blitt en viktig bidragsyter til energimarkedet. Både som en kilde for energiforsyning, men ikke minst som et insentiv for bærekraftig utvikling hvor bærekraftige investeringer har fått et økt fokus. Teknologi som kan være med å redusere $CO_2$-utslippene bidrar til en bedre verden. Kostnadene knyttet til forankring bidrar til et høyt kostnadsnivå. For å kunne designe forankringssystemer optimalt har algoritmer for optimering blitt et interessant diskusjonsemne.

De store fordelene ved offshore vindturbiner er mulighetene for installasjon på større havdyp. Områdene som kan disponeres ved å installere disse turbinene på havet er store, samtidig som vindhastigheten og dermed strømproduksjonen høyere på havet enn på land. Dette potensialet kan benyttes ved flytende vindturbiner som er fleksible på lokalisering.

## 1.2 Beskrivelse av prosjekt

Dimensjonering og konseptvalg for slakkforankringsystemer for flytende vindturbiner på vanndyp rundt 100 meter er kjent for å være utfordrende, siden man ofte må kompensere for redusert kjettinglengde ved å gå opp i kjettingdimensjon. Økt kjettingdimensjon medfører ikke bare økte materialkostnader, men også økte installasjon- og håndteringskostnader. Oppgaven skal sette opp en optimeringsprosess for et ankerlinesystem bestående av ren kjetting. Valg av innputparametre til optimeringsprosessen skal vurderes i lys av resultatene som oppnås. Hovedmålet med optimeringen er å minimere kostnadene for forankringslinene med hensyn på variablene som undersøkes.

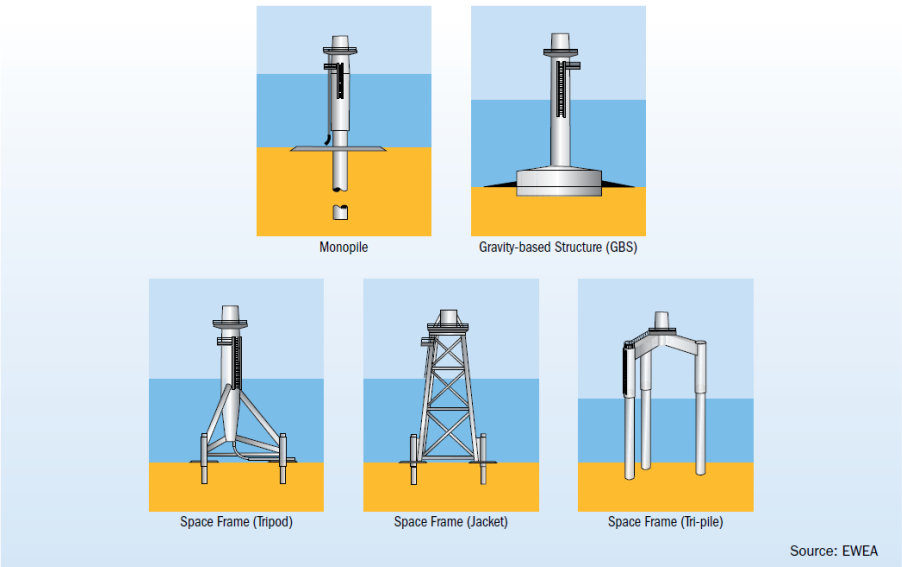
# Kapittel 2

# Tidligere arbeid og anvendelser

Flytende vindturbiner har de siste årene opplevd økt interesse og engasjement for å kunne bli en fullverdig energikilde. Studier viser at vindparker på havet vil kunne generere høyere elektrisitet enn vindparker på land[29]. Arealutnyttelse og andre faktorer slik som mer uniform vind og høyere vindkraft ut på havet, gjør flytende vindturbiner spesielt interessante. Dette kapittelet tar for seg tidligere arbeid og anvendelser av flytende vindturbiner og hvilket forbedringsbehov vi står ovenfor i lys av tidligere løsninger.

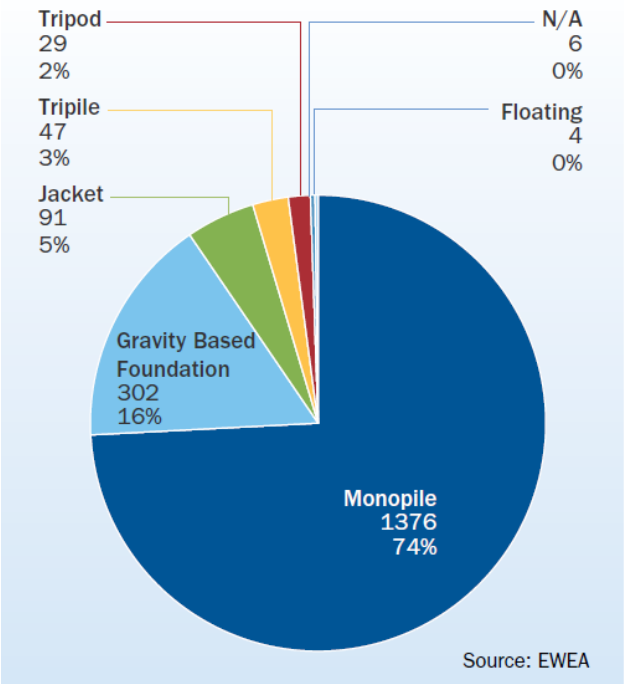
## 2.1 Utvikling offshore vindturbiner

Når det snakkes om offshore vindturbiner, er det i hovedsak to type teknologier det siktes til: Bunnfaste- og flytende vindturbiner. Bunnfaste vindturbiner blir gjerne brukt i grunt havdyp ned til rundt 50 til 60 meter. Figur 2.1 viser de typiske bunnfaste elementene. Figur 2.2 viser fordelingen mellom de forskjellig type bunnfaste vindturbinene og de flytende vindturbinene.




Figur 2.1: Typiske bunnfaste flyteturbiner [9]

Andelen flytende vindturbiner i 2012 var tilnærmet lik null, resten var bunnfaste turbiner. Av disse var det 1662 turbiner som til sammen utgjorde 5 GW offshore vind, fordelt utover 55 vindparker. De produserte 18 TWh, noe som kunne forsyne 5 millioner husholdninger[9]. For informasjon om bunnfaste vindturbiner anbefales oppgavene til Stald og Knudsen.[35][20].
Første konseptet om flytende vindturbiner kom rundt 1970, men forskningen innen industrien startet ikke før i midten av 1990-årene. For flytende vindturbiner maler dette et bilde over hvor ungt forskningsmiljø er innen flytende vindturbiner er i dag. Kunnskap og forståelse for dette feltet er derfor viktig for å kunne designe, utvikle og drifte fremtidige bærekraftige løsninger.




Figur 2.2: Fordeling av offshore vindturbiner i 2012[9]

## 2.2 Flytende vindturbiner

Innen flytende vindturbiner finnes flere teknologier. I hovedsak er det flytende plattformer, hvor det kan være én eller flere turbiner. Forankringen skjer ved ankersystemet til havbunnen. Til tross for relativt kort fartstid innen offshore vind, har det skjedd en del de siste 20 årene. I Norge har Statoil stått for en serie flytende vindturbiner kalt Hywind. Konseptet startet i 2001, men den første flytende vindturbinen stod ikke klar før i 2009. Den har en 2,3 MW Simens Turbin og ble dermed første fullskala flytende vindturbinen installert i verden. I august 2017 stod det fem flytende vindturbiner i Skottland og verdens første flytende vindpark var dermed på plass. De fem turbinene fra Simens yter 6 MW og total kapasitet på parken er 30 MW. Det er viktig å få frem at en rekke andre prosjekter i verden som ble lansert under samme periode.

Blue H technologies installerte I 2008 den første test flytende turbinen på den Italienske kysten. Turbinen hadde en ytelse på 80kW. [9]

I 2009 ble Poseidon 37, som hadde en teknologi som både konverterte energien i vind og bølger til elektrisitet. Den ble installert i det Baltiske hav. [6]

Sakiyama 2MW ble i 2010 installert med begrenset effekt i nærheten av Kabashima. I 2016 ble den forankret ved Fukue Island og kjørt på full effekt. [7][8]

I 2011 kom Windflow på den Portugisiske kysten. Den var utviklet av Principle Power og EDP og er utstyrt med en 2 MW turbin[9].

I August 2011 kom også Sea Twirl på vestkysten i Sverige. En prototype i 1:50 skala ble utviklet og testet med sterk vind. Det viste seg å være velykket.[3]

Det seneste prosjektet er fra Frankrike og heter FloatGen. Den kom i 2018 og er utviklet av IDEOL. Den har kapasitet på 2 MW.

Ved slutten av 2017 hadde prosjekter innen flytende vindturbiner blitt installert med en kapasitet på 50 MW ifølge Carbon Trust sin rapport [30].

## Fremtidige prosjekter

Fra Carbon Trust sin rapport blir det listet opp flere prosjekter. Majoriteten skal være lokalisert i Europa, men noen prosjekter er også i USA og Japan. Til 2021 forventes det at kapasiteten for flytende vindturbiner skal være mellom 200 og 260 MW. Figur 2.3 viser en liste over disse prosjektene.

| First power | Country | Project | Total capacity | Turbine rating | Project developer | Technology developer | Concept | Turbine supplier |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2018 | Japan | IDEOL Kitakyushu Demo | 3 MW | 3 MW | IDEOL & Hitachi Zosen | IDEOL | Damping Pool (Steel) | Aerodyn |
| 2019 | Portugal | WindFloat Atlantic: Phase 2 | 25 MW | 8.3 MW | EDPR, Repsol, Engie, Chiyoda, Mitsubishi | Principle Power | WindFloat | MHI-Vestas |
| 2018-2020 | UK | Kincardine* | 50 MW | 2 MW x1 8 MW x6 | Pilot Offshore, Cobra | Principle Power | WindFloat, plus other TBC | TBC |
| 2020 | USA (Maine) | Aqua Ventus I | 12 MW | 6 MW | University of Maine | University of Maine | VolturnUS | TBC |
| 2020/2021 | France | Groix Pilot Farm | 24 MW | 6 MW | Eolfi, China Guangdong Nuclear (CGN) | Naval Energies | Sea Reed | GE |
| 2020/2021 | France | Leucate Pilot Farm | 24 MW | 6 MW | Engie, EDPR, Caisse des Depots | Principle Power | WindFloat | GE |
| 2020/2021 | France | EolMed (Gruissan) Pilot Farm | 24 MW | 6 MW | Quadran | IDEOL | Damping Pool | Senvion |
| 2020/2021 | France | Provence Grand Large | 24 MW | 8 MW | EDF EN | SBM Offshore | TLP | Siemens |
| 2021 | Japan | Goto City | 22 MW | 2-5 MW | Toda Corporation | Toda Corporation | Hybrid Spar | TBC |

** From a recently filed variation order with the Scottish government, the Kincardine project will now consist of a total of seven turbines installed over two phases. A single 2MW turbine is expected to be installed in the first phase in 2018. Kincardine Offshore Wind Limited (KOWL) has stated that the second phase installation period will be "up to 2020".*

Figur 2.3: Fremtidige prosjekter for flytende vindturbiner. Orginalt fra [30]

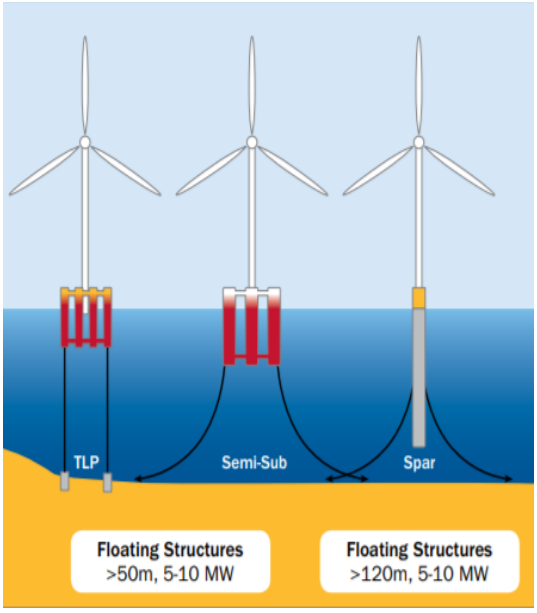
### 2.2.1 Klassifikasjon av flytende vindturbiner

Erfaring og kompetanse fra oljesektoren har vært viktig for forankring ved flytende vindturbiner. Det har vært mistanke om høy risiko ved forankring av plattformer til havbunnen. Denne risikoen har derimot vist seg å være lav, da linene opplever strekkrefter og samme oppførsel som forankringssystemer for flytende oljeplattformer [4]. Det er i hovedsak tre typer plattform- og forankringsløsninger:

**Tension-leg-platform** har lenge blitt benyttet i olje- og gassindustrien. Plattformen består av sylindrisk rør som forankres stramt mot havbunnen[20]. Uønsket forflytning vil dermed ikke oppstå. Dette er illustrert til venstre i figur 2.4a

**Halvt nedsenkbar plattform** er fokusområdet for denne avhandlingen. Flere detaljer om denne plattformen vil komme senere i kapittelet. Illustrert ved plattformen i midten på figur 2.4a

**Spar-plattform** har gravitasjonssenteret under oppdriftsenteret og stabiliseres på denne måten. Det lave gravitasjonssenteret oppnås ved å ha en tung ballast, gjerne i stål og/eller betong i nedre del av sylinderen. [35]

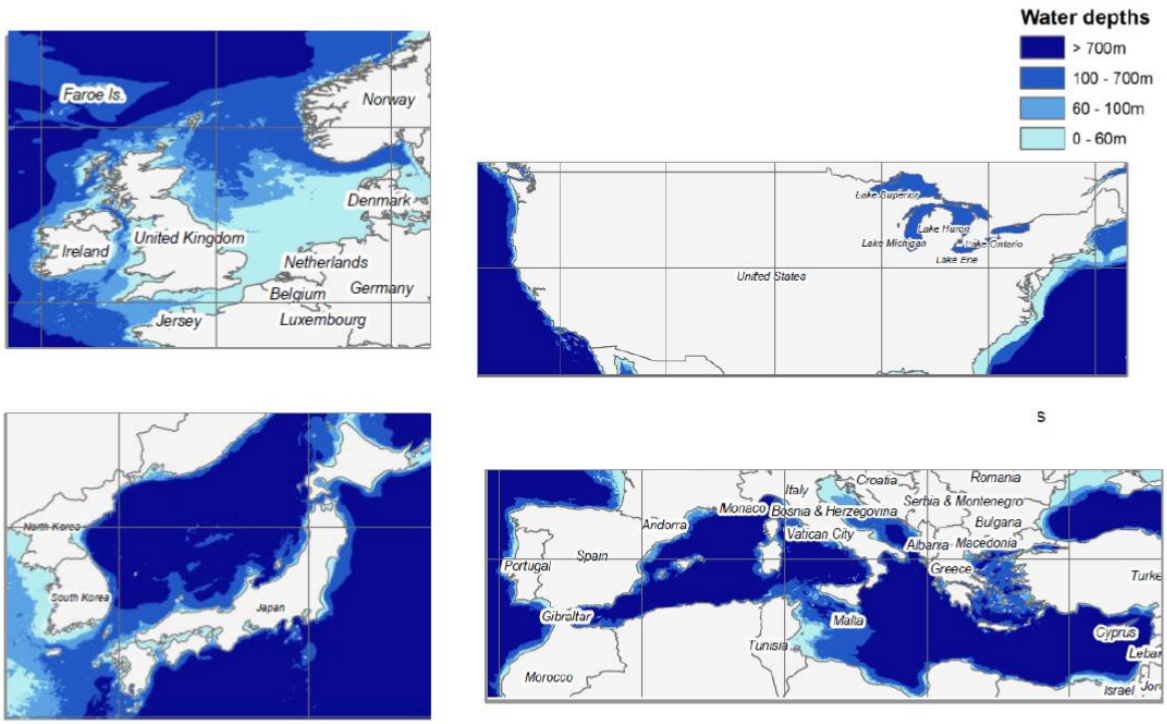



(a) Med beskrivelse

(b) Illustert i hav

Figur 2.4: Ulike typer plattform- og forankringssystemer[24]

Figur 2.4 Viser to forskjellige illustrasjonsbilder over plattform- og forankringsløsninger. Halvt nedsenkbar plattformen og Spar-plattformen har slakk forankring, slik som modellen som blir undersøkt i denne avhandlingen.



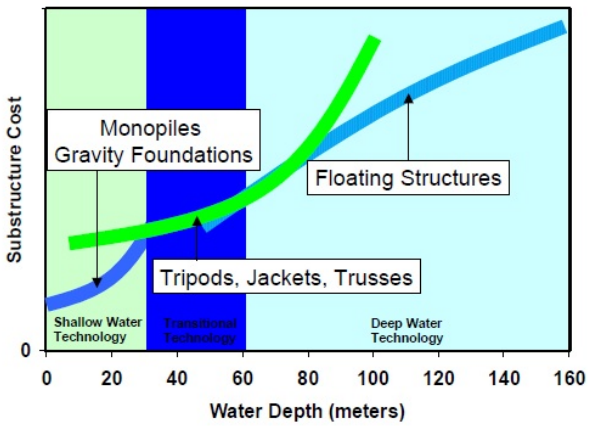

Figur 2.5: Ulike havdybder ved de forskjellige havene[24]

## 2.3 Potensielle vekstmuligheter

Utnyttelse av havet ved teknologiske løsninger som møter dagens behov åpner mange muligheter. Utfordringene til dette blir belyst senere i kapittelet. Spesielt vil økt fleksibilitet i lys av variable vanndybder åpne interessante muligheter. Nordsjøen er et godt eksempel. 66% av Nordsjøen består av vanndybder mellom 50 og 220 meter. Anta at 10 MW vindturbiner blir installert i disse områdene. I 2050 vil man da møte EU sitt estimerte forbruk med en faktor på fire [2]. Når Nordsjøen alene klarer å produsere slike mengder, sier dette en hel del om potensialet for Middelhavet og Atlanterhavet. Figur 2.5 viser hvilke vanndybder som finnes ved ulike lokaliseringer rundt Middelhavet (nederst til høyere), øst og vestkysen i USA (øverst til høyere), Japan og Korea (nederst til venstre) og Nordsjøen. Ulike forankringssystemer for disse dybdene kan gi energimarkedet en ny dimensjon.

## 2.4 Utfordringer mellomdypt vann

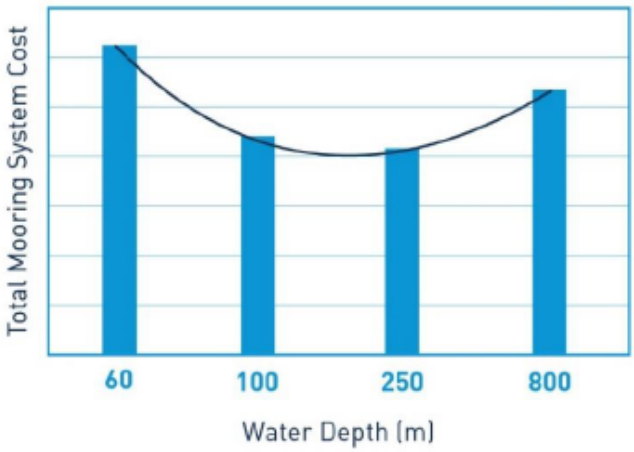
Ved vanndyp > 60 meter øker kostnadene knyttet til plattformen av vindturbinene. Figur 2.6 viser utviklingen i prisene som en funksjon av vanndybden. Konkurransedyktige kostnader knyttet til forankringssystemer ved mellomdypt og dypt vann vil derfor være helt nødvendig. For land som sliter med høye strømpriser fra før av, eksempelvis Japan som har som har dypt hav i (se figur 2.5) , vil kostnadseffektive løsninger kunne bidra til etablering av flytende vindturbiner. Syntetisk tau har blitt nevnt som en mulig suksessfaktor. Da materialet har egenskaper som kan tåle påkjente belastninger, og materialkostnadene kan bli rimeligere enn hva de er i dag. Mobile og fleksible løsninger for kobling av og på turbinen er noe som etterlyses ved flytende vindturbiner.




Figur 2.6: Plattformkostnader ved dybder[36]

### Forankring

En interessant side ved kostnadsutviklingen til forankringssystemet er ved dybder mellom 60 til 80 meter. Figur 2.7 viser at forankring til flytende vindturbiner mellom det dybdeintervallet er like dyrt som ved 800 meter. Stoplediagrammet viser at den ideelle dybden sett ut i fra et kostnadsperspektiv er ved 100 til 250 meter.



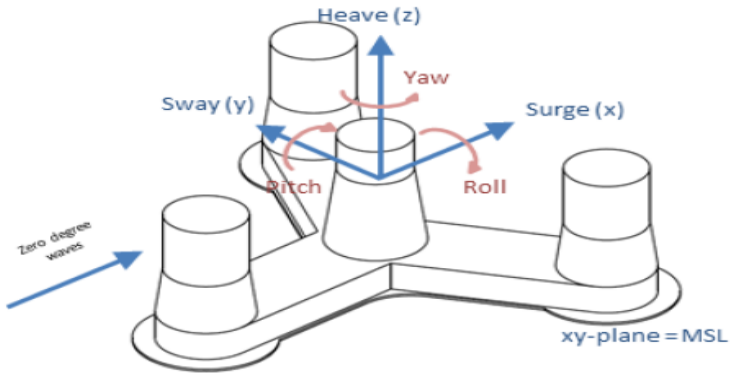

Figur 2.7: Utvikling i kostnader til forankringssystemer ved 60 til 800 meter. Orginalt fra [30]

## 2.5 Optimering

I denne oppgaven brukes en optimeringsalgoritme som kalles NLPQLP. Denne løser ikke lineære programmeringsproblemer ved en sequential quadratic programming (SQP) algoritme. Det er flere optimeringsalgoritmer som har blitt brukt ved optimering av forankringssystemer. Particle Swarm Optimisation (PSO) er en optimeringsalgoritme som har blitt brukt i en tidligere oppgave om flytende vindturbiner [36]. En annen algoritme som brukt er genetic algorithm. Den brukes vanligvis til løsning av optimeringsproblemer ved å bruke bio-inspirerte operatører. Optimering av forankringssystemer ved flytende vindturbiner ble også etterlyst i rapporten til Carbon Trust [30].

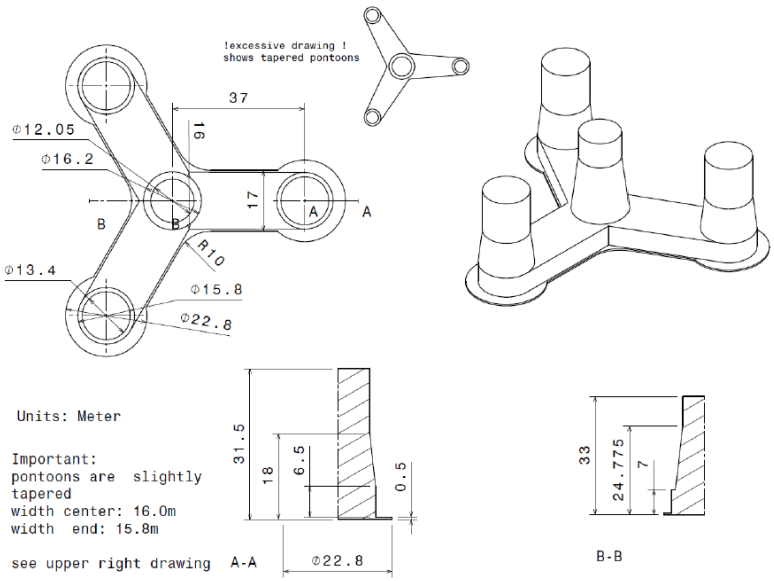
## 2.6 OO-Star Wind Floater Semi 10MW

Antallet eksisterende flytende vindturbiner er begrenset, og behovet for å utvikle nye kostnadseffektive løsninger er etterspurt. Som en respons på denne etterspørselen har Dr.tech Olav Olsen (OO) utviklet et nytt innovativt konsept for flytende vindturbiner. Dette er en halvt nedsenket plattform laget av betong eller stål, eller en kombinasjon av disse. Den er designet for å støtte store vindturbiner i krevende miljøforhold. Forankringssystemet består av tre slakke forankringsliner med klumpvekter på linene. Dette er modellen som ligger i SIMA og danner analysegrunnlaget. Figurene i dette delkapittelet er hentet fra LIFES50+ sin siste rapport [38].




Figur 2.8: OO-Star plattform med koordinatsystem [38]

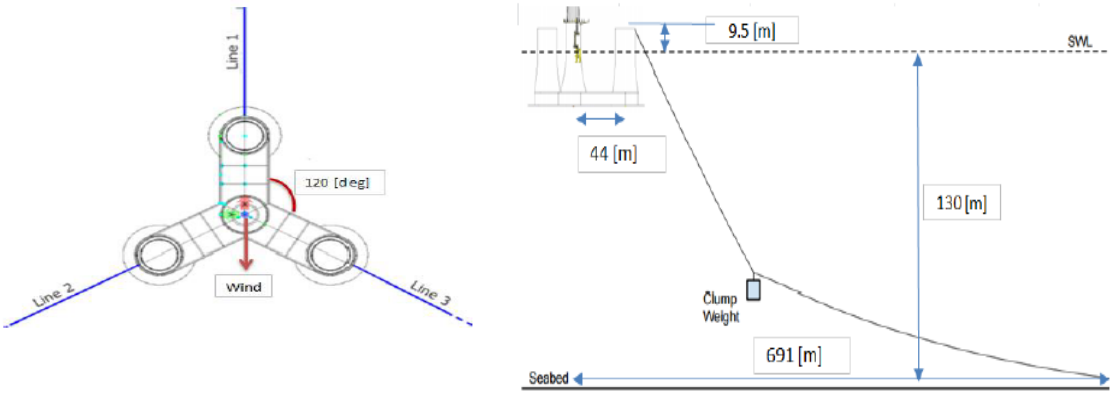
Figur 2.8 viser plattformen med koordinatsystemet og figur 2.9 viser dimensjonene for plattformen.




Figur 2.9: OO-Star plattform dimensjoner [38]

## Forankring

Figur 2.10 viser hvordan forankringssytemet er satt opp. Det består av tre kjettingliner som danner en horsiontal vinkel med hverandre på 120°. En klumpvekt deler kjettinglinen i to segmenter. Det øvre segmentet er 160 meter langt og er koplet til fairlead. Det nedre segmentet er 543 meter og utgjør det lengste segmentet. Det er viktig å merke seg at positiv x-akse i modellen under denne avhandlingen er med vinden. Dette er markert som Wind i 2.10a. SIMO bruker fire høyrehånds kartesisk koordinatsystem med positiv rotasjon mot klokken. Noen vesentlige forenklinger er gjort i modellen som har blitt simulert. Dette forklares i delkapittel 6.2.




(a) Sett ovenfra (b) Sett fra høyre

Figur 2.10: Forankringssystemet sett i fra to profiler [38]

Noen av egenskapene til forankringssystemet er lagt ved tabellen nedenfor. 2.1

Tabell 2.1: Egenskaper til LIFES50+ OO-Star Wind Floater Semi 10MW forankringssystem, verdier fra [38]

| Egenskap | Enhet | Verdi |
|---|---|---|
| Antall forankringsliner | [-] | 3 |
| Ustrakt forankringslengde øvre segment | [m] | 118 |
| Ustrakt forankringslengde nedre segment | [m] | 585 |
| Vertikal posisjon for fairlead over havoverflaten | [m] | 9,5 |
| Ankerposisjon over havoverflaten | [m] | 130 |
| Radius til fairlead fra senterlinjen til plattformen | [m] | 44 |
| Fysisk kjettingdiameter | [m] | 0,137 |
| Forspenning | [N] | 1.67E+06 |

# Kapittel 3

# Teori

## 3.1 Bevegelsesligning for plattform

Den lineære bevegelsesligningen for en halvt nedsenket plattform med seks frihetsgrader med eksterne krefter kan bli beskrevet i frekvensplanet. Ligning 3.1 viser $F(\omega)$ som kan representere bølgekrefter, linekrefter eller andre eksterne krefter.

$$(M + A(\omega))\ddot{x}(\omega) + B(\omega)\dot{x}(\omega) + Cx(\omega) = F(\omega) \tag{3.1}$$

Hvor $M$ er massematrise, $A$ er tillegsmasse matrise, $\omega$ er vinkelfrekvens, $x$ er legemets posisjonsvektor, $\dot{x}$ og $\ddot{x}$ er legemets henholdsvis hastighet- og akselerasjonsvektor, $B$ er lineære-dempingsmatrisen og $C$ er "restore" matrise. Dersom det gjelder ikke-lineære systemer, må løsninger av bevegelsesligningen skje ved iterasjon i tidsplanet.

## 3.2 Hydrodynamiske laster

### 3.2.1 Potensialteori

Hydrodynamiske laster fra overflatebølger på flytende strukturer er i denne avhandlingen beregnet ved potensialteorianalyse. Potensialteori referer til løsninger av hastighetspotensialet på et linearisert grenseverdiproblem, hvor bølgekreftene er funnet ved trykk-integrasjon rundt et stivt legeme [15]. Løsningen fra potensialteori har to komponenter og er på formen:

$$\mathbf{F}^{\text{Bølge}} = \mathbf{F}^{FK} + \mathbf{F}^{D} \tag{3.2}$$

Hvor $\mathbf{F}^{FK}$ er fra det uforstyrrede bølgefeltet, og for normalkomponenten av kraften på en sylinderform kan beskrives som:

$$\mathbf{F}^{FK} = \underbrace{\rho \frac{\pi D^2}{4} ds \frac{\partial v_N}{\partial t}}_{\text{Froude-Krylov kraft}} \tag{3.3}$$

Hvor $\rho$ er væsketetthet, $D$ Sylinderdiameter, $ds$ sylinderdel av lengde ds og $\frac{\partial v_N}{\partial t}$ er normalkomponent til bølgepartikkelens akselerasjon.

Den andre komponenten $\mathbf{F}^D$ er diffraksjonskomponent som tar høyde for strømningsforstyrrelsen for legemet. Den kan i følge Faltinsen[15] beskrives som:

$$F^D = A_{i1}a_1 + A_{i2}a_2 + A_{i3}a_3$$

Hvor $A_{ii}$ er tilleggsmassekoeffisient og $a_i$ partikkelakselrasjon i den aktuelle retningen. De totale bølgekreftene ved 6 frihetsgrader blir da en sum av Froude-Krylov, diffraksjonskrefter og dragkrefter. Det er viktig å påpeke at dragkreftene ikke er en del av potensiateoriløsningen.

### 3.2.2 Dragkrefter

Dragkrefter er en kraft som virker i motsatt retning av bevegelsen til objektet[1]. I følge DNV-GL [12] er den karakteristiske dragkraften på et objekt definert som:

$$F_{Drag} = \frac{1}{2}\rho C_D A_{pi} v_r^2 [N] \tag{3.4}$$

Hvor $\rho$ er vannets tetthet, typisk 1025$[\frac{kg}{m^3}]$, $C_D$ den dimensonsløse dragkoeffisienten som avhenger av Reynooldstallet og retningen, den har ingen fast verdi. $A_{pi}$ er areal av nedsenket del av objektet projisert på et horisontalt plan$[m^2]$ og $v_r$ er relativhastighet i kraftretning mellom objekt og vannpartikler$[\frac{m}{s}]$. Reynooldstallet er definert som:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\mathcal{V}}$$

Reynooldstallet er bestemt av den kinematiske viskositeten $\mathcal{V}$, hastigheten $v$ og diameteren $D$.

#### Viskøs dragkraft

Når et legeme beveger seg i væske, kan det oppleve to type krefter: krefter normalt på overflaten som kalles trykkrefter, og krefter tangentielt på overflaten som kalles skjærkrefter. Skjærkreftene kommer som et resultat av tiltrekning mellom molekylene på grunn av relativ hastighet mellom væsken og den solide overflaten. Slike skjærkrefter beskrives som viskøse effekter, og kreftene blir viskøse krefter. Den viskøse dragkraften i retning $i$ er definert som [12]:

$$F_{Dvisk} = \underbrace{\frac{1}{2}C_D \rho A_p |v_{ri}| v_{ri}}_{\text{Viskøs drag-kraft}}$$

Hvor $v_r$ er total relativ hastighet, $v_{ri}$ er relativ hastighetskomponent i retning $i$ og $A_p$ er prosjisert areal normalt på væskeretning.

### Dragkrefter for vind

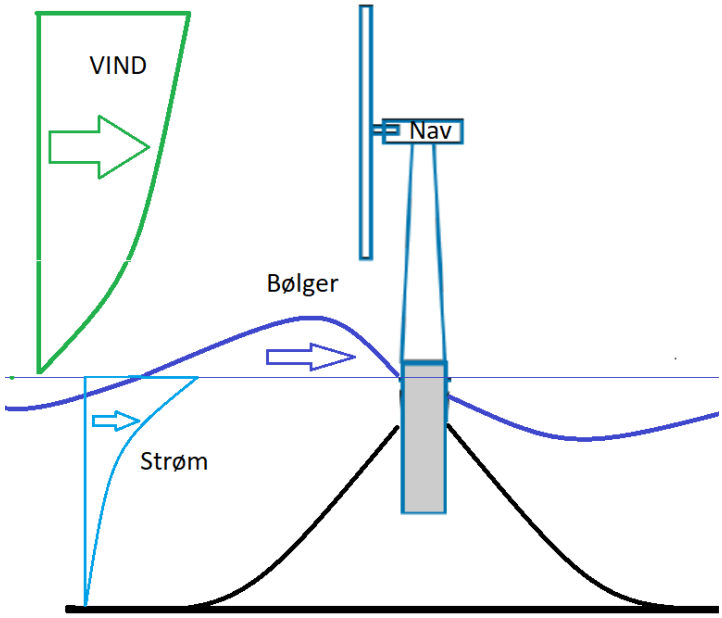
Noen av simuleringene, spesielt ved ULS-tilfellene, har høy vindhastighet som det må tas høyde for. Dragkreftene som virker på tårnet har et vesentlig bidrag til kreftene på hele vindturbinen. Generelt kan dragkreftene på en sylinder, slik som tårnet, beskrives som:

$$F_{Dvind} = \int_{tb}^{tt} \frac{1}{2} C_D \rho_a D(z) u(z)^2 dz$$

Hvor $tt$ og $tb$ står for henholdsvis tårntopp og tårnbunne, $\rho_a$ er tettheten på luften, $D(z)$ er diameteren på sylinderen og $u(z)$ er vindhastigheten langs sylinderhøyden $z$. Det er viktig å påpeke at kreftene fra vindturbinen i operasjon ved lave vindhastigheter kan være større enn bidraget fra dragkrefter ved høye hastigheter. Dette blir diskutert videre i delkapittel 6.2.

## 3.3 Modellering av miljøforhold

Hensikten med dette delkapittelet er å beskrive miljøforholdene som påvirker forankringssystemet til modellen i SIMA workbench. I denne oppgaven blir simuleringene kjørt med vind-, bølger- og strømlaster. Figur 3.1 viser en illustrasjon på en flytende vindturbin i et slikt miljø.




Figur 3.1: Illustrasjon av flytende vindturbin i et miljø med vind, bølger og strøm. Modell fra [24]

### 3.3.1 Irregulære bølger og bølgespektrum

Teorien om lineær bølgeteori er spesielt viktig for utmattingsanalysene i denne avhandlingen. Den klassiske teorien er utviklet av Airy og Laplace. Bølgeamplitude $\zeta$ er antatt å være liten relativt til bølgelengden og vanndybden at grensebetingelsene ved vannoverflaten $z = 0$ er tilfredsstilt ved vannlinjen $z = \zeta = 0$. Hvis bølgekonturene ikke forandrer seg i transvers retning(y), så kan bølgen beskrives som "long-crested" og bli behandlet etter todimensjonal strømteori [17].

Havbølger er irregulære og har tilfeldig form, høyde, lengde og hastighet. Irregulære bølger, eller tilfeldige bølger som det også kalles, er en sum av mange lineære bølgekomponenter med forskjellig amplitude, frekvens og retning. Fasene er tilfeldige med hensyn til hverandre. Sjøtilstander av signifikant bølgehøyde($H_s$) og bølgetopp($T_p$) kan antas å være stasjonære for tidsspenn mellom 30 minutter til 10 timer. Det er vanlig å bruke 3 timer og bruke data fra ($H_s$) og ($T_p$) fra målinger til en tilpasset 3-parameter Weibullfordeling [23]. Tilfeldig bølgemodell anses som den beste beskrivelsen av en reell sjøtilstand.

Det viktigste konseptet for tilfeldig bølger, er bølgespekteret. Sjøtilstanden er til-

standen til havoverflaten, betraktes som et stokastisk felt og er karakterisert av bølgespekteret. Kvadratroten av variansen til overflaten blir kalt standardavviket til overflaten. Standardavviket er en vanlig betegnelse for variansen om gjennomsnittet og er derfor en fornuftig skala for høydevariasjonene til overflaten. Av historiske årsaker har det blitt vanlig å multiplisere standardavviket med en faktor fire for å få den signifikante bølgehøyden $H_s$ [21]. Det mest kjente bølgespekteret er Pierson-Moskowitz spektrum. Dette spekteret har blitt utarbeidet, basert på målinger av overflatehevingen som skal gi en realistisk representasjon av sjøtilstanden [18]. Pierson-Moskowitz spektrum er definert som:

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \omega_p^4 \cdot \omega^{-5} exp(\frac{-5}{4}(\frac{\omega}{\omega_p})^{-4}) \tag{3.5}$$

Hvor $H_s$ er signifikant bølgehøyde i meter, Spekterets toppfrekvens $\omega_p$ er i hertz(Hz) og er en funksjon av bølgetopp-perioden $T_p$, beskrevet som $\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$. $\omega$ er bølgefrekvensen i Hz.

Av målinger gjort i Nordsjøen har har det blitt utarbeidet et mer nøyaktig spektrum som kalles JONSWAP-spektrum. JONSWAP-spektrum er definert som:

$$S_J(\omega) = A_\gamma S_{PM}(\omega) \gamma^{exp(-0.5(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p})^2)} \tag{3.6}$$

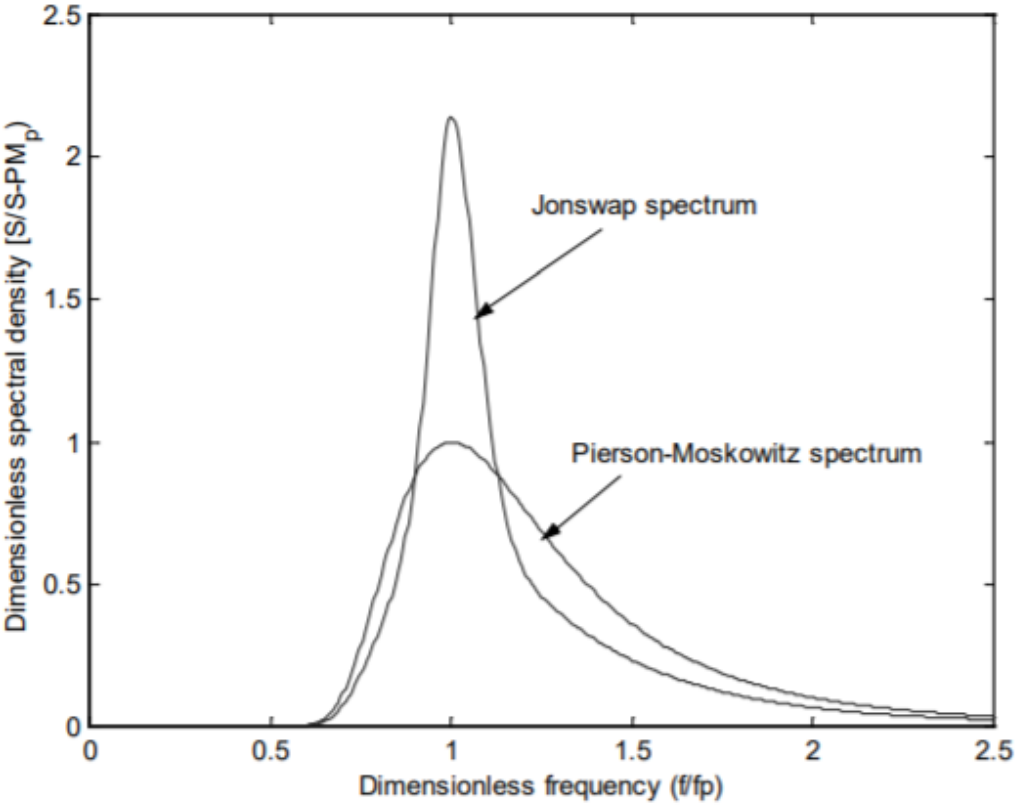
Hvor $\sigma$ er en spektralparameter for JONSWAP, $\gamma$ er spisshetsparameter og $A_\gamma$ er normaliseringsfaktor på formen $A_\gamma = 1 - 0.287LN(\gamma)$ Det forventes at JONSWAP-spektrumet er en fornuftig modell i intervallet[11]:

$$3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5$$

JONSWAP-spektrumet er således et spektrum slik som Pierson-Moskowitz, multiplisert med en forbedrings toppfaktor på:

$$A_\gamma \gamma^{exp(-0.5(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p})^2)} \tag{3.7}$$

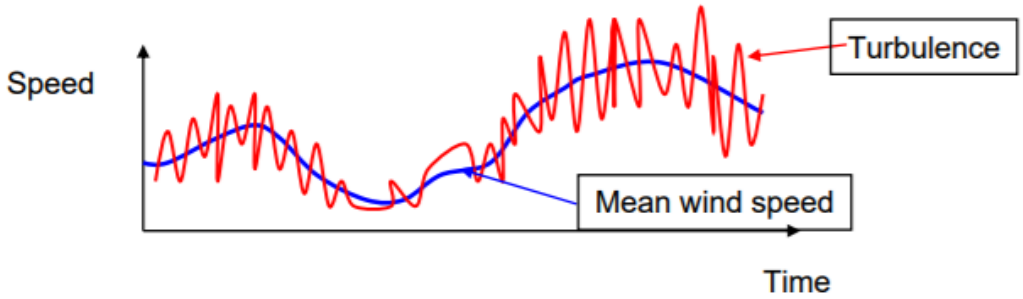
Figur 3.2 viser henholdsvis Pierson-Moskowitz- og JONSWAP-spektrumet.




Figur 3.2: Pierson-Moskowitz- og -JONSWAP spektrumet. Orginalt fra [21]

### 3.3.2 Vind

Vindhastigheten varierer med både tiden og høyden over havoverflaten. I lys av disse faktorene må alltid den gjennomsnittlige vindhastigheten og et referansepunkt for høyden over havoverflaten regnes med [11]. I SIMA er vindfeltet antatt å være tredimensjonalt, men det måles kun ved ett punkt med modellen i denne oppgaven. Modellen inkluderer vindspektre både i gjennomsnittlig retning, normalt på den gjennomsnittlige retningen og sideveis. Turbulensspektrum som er den varierende delen av vindhastigheten antas å være en gaussisk stokastisk prosess. Figur 3.3 viser "mean wind velocity" som er den gjennomsnittelige vindhastigheten, med påfølgende varierende turbulensspekter rundt denne kurven i rødt. Definert som turbulence i samme figur.




Figur 3.3: Gjennomsnittlig vindhastighet med turbulensspekter. Orginalt fra [19]

Generelt vil vindprofilen for vindspektrene brukt i denne analysen være beskrevet som:

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_r(\frac{z}{z_r})^{\alpha}$$

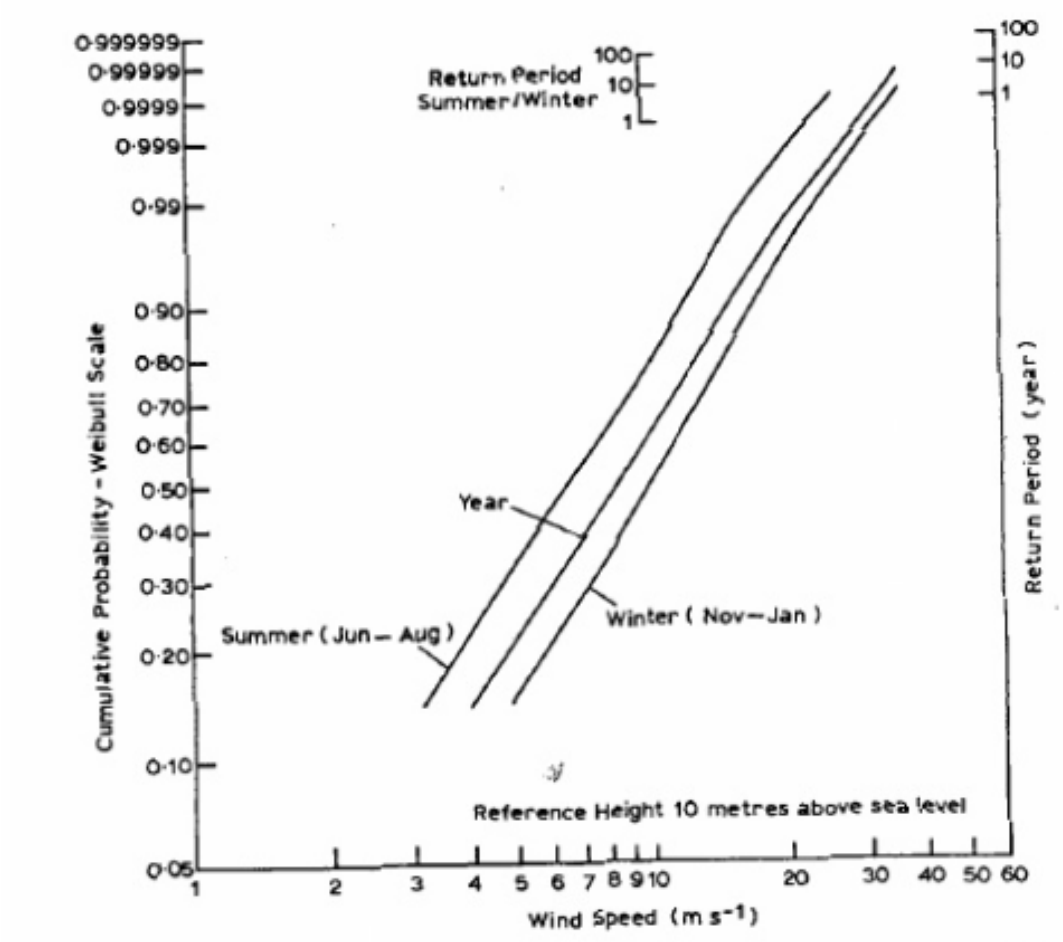
Hvor $z$ er høyde over vannplanet, $z_r$ referansehøyde(typisk 10m), $\bar{u_r}$ gjennomsnittelig vindhastighet ved referansehøyde, $\alpha$ høydekoeffisient(typisk 0.10-0.14) og $\bar{u}$ gjennomsnittelig vindhastighet ved høyde $z$.

Den marginale kumulative sannsynlighetsfordelingen for én times gjennomsnittelig vindhastighet ved 10 meter over vannoverflaten for alle årstidene kan forklares gjennom en 3-parameter Weibull fordeling. Den beskrives slik[14]:

$$F(u) = 1 - exp^{[-(\frac{u-\alpha}{\beta})^{\gamma}]} \tag{3.8}$$

Hvor $F(u)$ er den kumulative sannsynlighetsfordelingen, $\gamma$ er formen, $\beta$ er skalaen i meter per sekund og $\alpha$ er lokaliseringen i meter per sekund.
Figur 3.4 viser fordelingsfunksjonen for én times gjennomsnittelige vindhastighet ved en høyde på 10 meter over middelvannstand ved bruk av representativ data fra Nordsjøen. Tidsmessig vindhastighet over illustrerte tidsperioder brukes til å

beregne stabile vindkrefter på marinestrukturer. Det er viktig å få frem at svingende vindkrefter på grunn av vindkast også kan være av betydning. Ved noen tilfeller kan vindkastene spenne resonanssvinginger på turbinen.




Figur 3.4: Fordelingsfunksjon for gjennomsnittelig vindhastighet 10 meter over middelvannstand [15]

### 3.3.3 Havstrøm

Havstrømmer har egenskaper som bør tas høyde for ved design av flytende vindturbiner. Dette gjelder operasjonelt, men gjelder også konstruksjonen. Til forskjell fra vind og bølger blir ikke strøm representert gjennom spektrum. I SIMA vil man skape en profil for strømningen gjennom havdybde, strømretning og strømhastighet. Strømretning og strømhastighet er oppgitt for henholdsvis ULS- og FLS-tilstandene i tabell 6.1 og tabell 6.2. Verdiene blir plottet inn de respektive miljøene. I åpne områder med vindgenerert havstrøm ved stillevann kan strømhastigheten beskrives som [5] (dersom ikke statistikk foreligger):

$$V_{\text{strøm}} = 0.015 \cdot U_{10}$$

Hvor $U_{1time,10m}$ er den gjennomsnittelige vindhastigheten 10 meter over havet.

Tabell 3.1: Typiske vindhastigheter ved utvalgte områder. Orginalt fra [5].

| Området | Strømhastighet |
|---|---|
| Norwegian Sea (Haltenbanken) | 0.90 m/s |
| North Sea (Troll) | 1.50 m/s |
| North Sea (Greater Ekofisk area) | 0.55 m/s |

## 3.4 Forankring

Forankringssystemer er viktig i den forstand at de holder konstruksjonen mot miljøforhold slik som vind, bølger og strøm. Teorien i dette delkapittelet er hentet fra Faltinsen [15]. Et forankringssystem består en mengde kabler. Forankringssystemet er festet ved en øvre- og nedre del. Den øvre delen er festet til flyteren, og den nedre delen er festet til sjøbunnen via et anker. Under klassifikasjon av flytende vindturbiner i delkapittel 2.2.1 ble forskjellige type systemer illustrert ved figur 2.4. Flyteren i denne turbinen har som nevnt tre forankringsliner. Ankrene kan bevege på seg, og naturligvis vil ikke meningen med slakk forankring være å holde den flytende vindturbinen ved én posisjon. Det vil si at ankeret ikke kan bli utsatt for store vertikale krefter. For å forsikre at dette skjer, må et signifikant antall forankringsliner ligge på sjøbunnen. Kablene er som regel lagd av kjetting, tau eller kombinasjon av begge. Tauene kan ha flere materialer slik som stål, naturlig fibre eller syntetiske fibre. Ved kombinasjon av forskjellige materialer vil man typisk få tyngre kabler i sjøbunn og de lettere nærmere sjøoverflaten. Dette gir bedre stivhet, og lettere forankringsliner sammenligninget med kun kjetting. Strekkreftene i kablene kommer av vekten og de elastiske egenskapene til kablene, og avhenger av hvordan kablene er lagt. Forspenning i kablene kommer ofte av vinsjene på plattformen. Vinsjene trekker så på kablene for å få ønsket kabelkonfigurasjon. Ettersom den flytende vindturbinen beveger på seg i lys av miljøforholdene, vil strekkreftene i kablene variere på grunn av vekslende kabel-geometri. Forankringslinene har en effektiv stivhet komponert av geometrisk og elastisk stivhet, som i kombinasjon med den flytende vindturbinen introduserer krefter avhengig av karakteristikken til forankringskablene. Mean breaking load (MBL) er bruddstyrken til kjettingen. Denne må enhver tid være høyere enn de maksimale strekkreftene i samtlige liner. MBL som en funksjon av kjettingdiameter er hentet fra masteroppgaven til Krugerud [22], og kontrollert mot verdier i kataloger fra produsenter. Formelen viser akseptable verdier og er vurdert god nok for analysen.

$$MBL_{kjetting} = 516940 \cdot d^{1.72}[kN] \tag{3.9}$$

### 3.4.1 Respons på forankringsliner

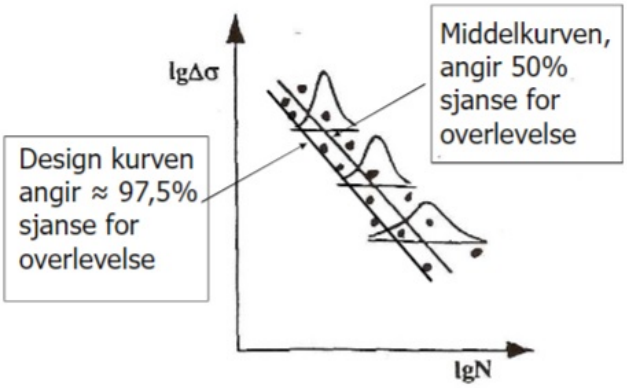
Kvasistatisk analyse er en enkel og praktisk metode for å determinere maksimale strekkrefter i forankringslinene på flytende vindturbiner i et miljø med vind, bølger og havstrøm. Denne metoden blir som regel brukt i startfasen ved design av forankringssystemer. De vertikale bevegelsene og dynamiske effektene assosiert med masse, demping og væskeakselerasjon på forankringslinene er neglisjerbar. Dynamisk analyse inkluderer de tidsvarierende effektene med hensyn til masse, demping og akselerasjon. Dynamiske modeller blir brukt som beregningsverktøy for forankringsresponsen ved fairlead.

## 3.5 Utmattingsanalyse

Utmatting er en skade i akkumuleringsprosessen på en komponent som følge av dynamisk belastning. Dette fører til dannelse og vekst av sprekker. Sima Workbench bruker et integrert utmattingsskadeberegningsprogram som gjør rainflow counting på en tidsserie og regner delskade med Miner-Palmgren. Dette delkapittelet tar for seg denne utmattingsprosessen.

### 3.5.1 S-N-kurve

Teorien SIMA workbench anvender er i fra DNV-GL sin anbefalte praksis [13]. Inputparameterne brukes for utmattingsanalyser. Verdiene som benyttes kommer fra S-N-kurven. Dette er verdier som kommer fra utmattingstester. Kurven beregnes ved statistisk regresjonsanalyse som bestemmes av linjen som minimerer de totale kvadratiske avvikene fra måledataen [32]. Denne linjen viser 50% sannsynlighet for overlevelse. Kurven på figur 3.5 nedenfor viser overlevelse på 97,5%. Dette kommer fra snittlinjen fra måledataen minus to standardavvik, ved antakelse om normalfordelt testdata ved logaritmisk form.




Figur 3.5: S-N kurve med sannsynlighetsverdier[37]

S-N-kurven er definert som:

$$logN = log\bar{a} - mlog\triangle\sigma, \tag{3.10}$$

Hvor

N= Antall predikerte sykler for utmatting ved spenningsvidde $\triangle\sigma$

$\triangle\sigma$ = Spenningsvidde

m = Inverse negative stigningen til S-N-kurven

$log\bar{a}$ = Avskjærer Log N-aksen

### 3.5.2 Miner-Palmgren

Utmattingslevetiden kan bli kalkulert basert på S-N-kurver sammen med Miner-Palmgrens regel, under antakelse om lineær kumulativ skade. Miner-Palmgrens regel går ut på at forventet utmatting skjer når den akkumulerte delskaden $D = 1$, og kan beskrives slik:

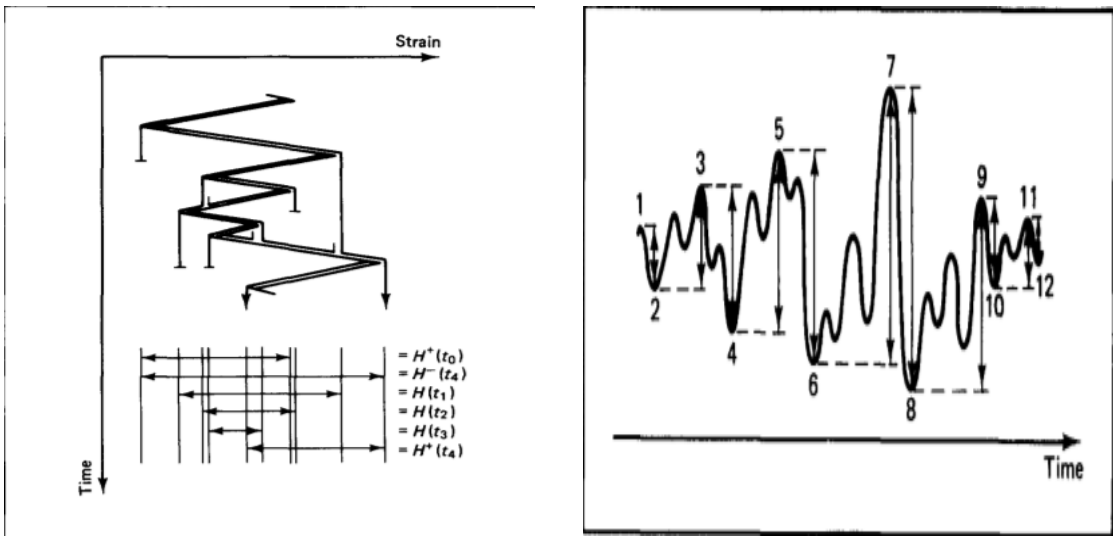
$$D = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i}{N_i} = \frac{1}{\bar{a}} \sum_{i=1}^{k} n_i (\triangle\sigma_i)^m \leq \eta \tag{3.11}$$

Hvor $k$ er antall spenningsblokker, $n_i$ er antall belastningssykler i blokk $i$, $N_i$ er antall sykler til utmatting ved en konstant spenningsvidde $\triangle\sigma_i$ og $\eta$ er bruksfaktor. De andre parameterne i ligning 3.11 er definert i ligning 3.10.

### 3.5.3 Rainflowcounting

Belastningssyklene er kvantifisert ved rainflow counting og utmattingsskadene er regnet ut ved Miner-Palmgren summasjon. Rainflowcounting estimerer antall spenningssykler og den forventede verdien på spenningsområdet fra tidshistorien til spenningene. Tidshistorien kan bli determinert direkte ved tidsplananalyse. I figur 3.6a blir tøyning-/tid- historikken plottet slik at tidsaksen går langs den vertikale aksen, og linjene som kobler tøyningstoppene er i illustrert som pagoda-tak. Flere regler er pålagt slik at regnet som drypper ned disse takene definerer halvsykluser. Rainflow begynner på innsiden av hver tøyningstopp. Rainflowen som starter ved hver topp får lov til å fortsette og dryppe, med mindre den initierer et minimum. Den stopper om den treffer et minimum som er mer negativt enn minimumet det initierte fra. Tilsvarende, dersom rainflowen initierer ved et maksimum, må den stoppe når den treffer et maksimum mer positivt enn maksimumet det initierte fra. Rainflowen må også stoppe om den møter på en dråpe fra taket over.

Når denne prosedyren er gjennomført for tøyningshistorikken blir det telt opp en halvsyklus mellom den mest positive maksimum og den mest negative minimum. I figur 3.6b blir det telt opp en halvsyklus mellom topp 7 opp bunn 8 (i samme figur). Av disse to antas det at den mest positive opptrer først. Halvsykluser blir også regnet med mellom den mest positive maksimale og den mest negative minimale som oppstår før i historikken. Det vil si at i figur 3.6b blir det også beregnet en halvsyklus mellom topp 5 og bunn 6, og topp 5 og bunn 4 osv [31].




(a) Vertikal tidsplan (b) Horisontalt tidsplan

Figur 3.6: Rainflow counting-illustrasjoner orginalt fra [31]

# Kapittel 4

# Optimering

## 4.1 Formulering av et optimeringsproblem

Et restrikert optimeringsproblem er satt sammen av følgende:

1. En funksjon som minimeres, ofte kalt objektfunksjon eller kostnadsfunksjon
2. Optimering- eller designvariabler
3. Restriksjoner

Matematisk uttrykt som:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad \text{Med hensyn på betingelsen:} \quad c_i(x) \geq 0, \; i \in \mathcal{I} \tag{4.1}$$

Ligning 4.1 viser funksjonen $f$ som skal minimeres, vektoren $x$ er optimeringsvariabelen , og $c_i$ med $i \in \mathcal{I}$ som er et sett med restriksjoner. Et punkt $x$ som tilfredsstiller restriksjonene kalles gjennomførbart punkt, og settet med alle gjennomførbare punkt kalles gjennomførbare sett $\Omega$.

$$\Omega = \{x \in \mathbf{R}^n \quad \text{slik at} \quad c_i(x) \geq 0, \; i \in \mathcal{I}\}\,. \tag{4.2}$$

Det gjennomførbare settet er hvor et minimum av $f$ er undersøkt. Optimeringsproblemer er ofte formulert med likhetsrestriksjoner med øvre og nedre grenser for optimeringsvariablene, i tillegg til ulikhetsrestriksjoner. Dette kan være fordelaktig for visse løsningsteknikker, men slike restriksjoner kan alltids bli omformulert til ulikhetsrestriksjoner for enkelhetens skyld [26].

Et enkelt og relevant eksempel for denne avhandlingen:
Det ønskes å minimere materialkostnadene for en enkel forankringsline etter visse retningslinjer. Optimeringsvariablene kunne da vært lengden $l$ og diameteren $d$ til forankringslinen. Nedre og øvre grenser for $l$ og $d$ kan sammen med begrensningene for strekkrefter utgjøre restriksjonene. Kostnadsfunksjonen ville da vært:

$$f(l, d) = ld^2$$

## 4.2 Optimeringsalgoritmer

Optimeringsalgoritmer er gjentakende. De starter med en gjetning av optimale verdier og generer en sekvens med estimater som treffer bedre, helt til de finner en løsning. Strategien algoritmene bruker for å finne den riktige løsningen skiller de forskjellige algoritmene. De fleste strategiene går ut på å bruke verdiene i objektfunksjonen/kostnadsfunksjonen $f$, restriksjoner $c$ og muligens den første- og andre deriverte av disse funksjonene. Noen algoritmer akkumulerer informasjon basert på tidligere gjentakelser, mens andre bruker kun den lokale informasjonen fra det nåværende punktet. Fellesnevneren for alle gode algoritmer, er at de fyller følgende punkt[26]:

**Robusthet** De burde prestere bra til tross for varierte problemer i klassen for alle rimelige valg av variabler.

**Effektivitet** Datatiden og lagringen skal være minimal.

**Nøyaktighet** De skal kunne identifisere en løsning med presisjon uten å være overfølsom for feil i dataene eller til de aritmetiske avrundingsfeilene som oppstår når algoritmen er implementert på en datamaskin.

Det kan hende at disse kravene ikke oppfylles samtidig. For eksempel ved at ikke-lineære programmer tar for mye lagringsplass. Eller at den mest robuste metoden bruker lengst tid.

### 4.2.1 NLPQLP

The Fortran subroutine NLPQLP løser ikke-lineær programmeringsproblemer ved Sequential quadratic programming (SQP) algoritme og er en utvidelse fra den tidligere versjonen kjent som NLPQL. Den oppdaterte versjonen er trimmet til å kjøre under mer krevende forhold. Dette er algoritmen som er implementert i SIMA workbench gjennom en ekstern programvare som heter SimOpt. NLPQLP kjører selve optimeringen som er utviklet av professor Klaus Schittkowski [34].

## 4.3 Gradientbaserte metoder for ikke-lineære problemer

Det er typisk to gradientbaserte metoder for ikke-lineære restrikerte problemer.

- Penalty, barrier and augmented Langrangian methods
- (SQP) methods

### 4.3.1 Penalty, barrier and augmented Langrangian methods

Tanken med penalty, barrier og augmented Langrangian methods er å erstatte optimeringsproblemer med restriksjoner, med sekvenser av restriksjonsløse problemer ved å introdusere penalty- og-barrier parametere. Dette er tre viktige algoritmer som har sine sterke bruksområder avhengig av restriksjonene.
Penalty methods passer best for problemer som kun har en likhetsrestriksjon. En kvadratisk penalty-funksjon $\mathbf{Q(x;\mu)}$ er definert som:

$$Q(x;\mu) = f(x) + \frac{1}{2\mu}\sum_{i\in\mathcal{E}} c_i^2(x), \tag{4.3}$$

Hvor $\mathcal{E}$ er sett av likhetsrestriksjoner og $\mu > 0$ er penalty-parameter. Den andre termen av ligning 4.3 er penalty-termen som øker hvis restriksjonene blir brutt. Det restriksjonsløse problemet har en løsning for reduserte sekvenser av penalty-parametere helt til det finnes en løsning på problemet med restriksjoner.

Barrier methods ligner på penalty methods, men passer bedre for problemer med kun en ulikhetsrestriksjon. En typisk logaritmisk barrier-funksjon er definert som:

$$P(x;\mu) = f(x) - \mu\sum_{i\in\mathcal{I}} \log c_i(x), \tag{4.4}$$

Hvor $\mathcal{I}$ er sett med ulikhetsrestriksjoner og $\mu > 0$ er barrier-parameter. Den andre termen er barrier-termen som blir veldig stor når $x$ nærmer seg grensen for det gjennomførbare settet. Slik som for penalty methods, så er målet å løse restriksjonsløse problemer for reduserte sekvenser av barriere-parametere $\mu$.
Ved løsning av generelle ikke-lineære problemer må penalty- og barrier metodene kombineres. Dette er for å kunne løse både likhetsrestriksjoner og ulikhetsrestriksjoner.
Den siste algoritmen er augmented Langrangian method. For likhetsrestriksjoner vil den være definert som:

$$\mathcal{L}_{\mathcal{A}}(x,\lambda;\mu) = f(x) - \sum_{i\in\mathcal{E}} \lambda_i c_i(x) + \frac{1}{2\mu}\sum_{i\in\mathcal{E}} c_i^2(x). \tag{4.5}$$

Augmented Langrangian method kan også formuleres for generelle problemer med både likhets- og ulikhetsrestriksjoner.

### 4.3.2 Sequential quadratic programming

Den grunnleggende tanken om Sequential quadratic programming er å formulere et kvadratisk delproblem og bruke løsningen av delproblemet, som en ny søkningsretning. Algoritmen løser så ligning 4.6 for å se om den oppfyller kravene for 4.7. Hvis vi betrakter ligning 4.1. Vil et typisk delproblem være definert:

$$\min_p \frac{1}{2} p^T W_k p + \nabla f_k^T p, \tag{4.6}$$

Med hensyn på betingelsen

$$\nabla c_i(x_k)^T p + c_i(x_k) \geq 0, \quad i \in \mathcal{I}, \tag{4.7}$$

Hvor restriksjonene har blitt linearisert. I ligning 4.6 er $W_k = W(x_k, \lambda_k)$ Hessianen av Langrangen av problemet. Det vil si:

$$W(x, \lambda) = \nabla^2_{xx} \mathcal{L}(x, \lambda) = \nabla^2_{xx} \left( f(x) - \sum_{i \in \mathcal{L}} \lambda_i c_i(x) \right). \tag{4.8}$$

SQP algoritmer, slik som active-set methods, blir brukt til å løse ligning 4.6

## 4.4 Optimeringsparametere i denne oppgaven

### Kostnadsfunksjon

Kostnadsfunksjonen som skal minimeres kan beskrives som en sum av alle kostnader knyttet til forankringslinene. Funksjonen er inspirert av Ryu [16] og modifisert i lys av avhandlingen. Funksjonen defineres slik:

$$\text{Kostnadsfunksjon} = \sum_{i=1}^{N} f(L_i, d_i) \tag{4.9}$$

Hvor $f(L_i, d_i)$ er kostnaden av forankringskomponent $i$ med lengde $Li$ og diameter $d_i$, og N er antallet forankringskomponenter i forankringssystemet.

### Optimeringsvariabler

Variablene som skal modifiseres defineres som optimeringsvariablene i denne avhandlingen. Fylling[16] foreslår tre type variabler som kan optimeres:

- Fartøyvariabler
- Linevariabler, bestående av retning og pre-tension eller distanse til ankeret
- Segmentvariabler, bestående av segment variabler og tverrsnitt parametere

I denne avhandlingen vil det siste punktet bli brukt, hvor diameter og lengde for hvert segment blir optimert. Når lengde brukes som optimeringsvariabel, bør den nedre lengde grensen være høyere enn vanndybden. Hvis ikke kan optimeringsprogrammet avslutte på grunn av feil forhold i forankringsanalysen. For diameter som optimeringsvariabel vil de andre tverrsnittparameterne: nedsenket vekt, masse og bruddstyrke være skalert proporsjonalt med den kvadrerte diameteren.

### Restriksjoner

Designet til konstruksjonen trenger å oppfylle krav. Det kan være krav ut i fra standarder, eller generelle krav som må være tatt i beregning for at eksempelvis ikke liner skal gå i brudd. Disse kravene skal defineres under restriksjoner. Kravene som blir brukt i denne avhandlingen blir utdypet videre i delkapittel 6.4. Generelt vil krav typisk være: Maksimal og minimal strekk i linesegmentene, maksimal oppløft ved anker og maksimal offset, minimum utmattingslevetid og maksimal forspenning i linene. Dette i følge Fyllingen [16].

# Kapittel 5

# Analysebeskrivelse

Analysen i denne oppgaven har blitt utført i SIMA workbench. SIMA workbench er et kraftfullt modellering- og analyseverktøy innen marinteknologi. Programvaren har en grafisk 3D-visning av modellen med mulighet for animasjon. SIMA workbench er utviklet av SINTEF Ocean og Statoil.

Programmeringsspråket Python har blitt brukt sammen med Mann-sim for å generere turbulensfiler for grensetilstandene som SIMA klarer å lese. Mann-sim er en stokastisk turbulent vind simulator.

## 5.1 Simuleringsverktøyet

SIMA Workbench inkluderer numeriske koder utviklet ved SINTEF Ocean, eksempelvis SIMO som brukes i denne oppgaven. SIMO kan determinere dynamisk oppførsel hos flytende plattformer, og er generelt et tidsplanprogram for modellering av havvindstrukturer. SIMA er kontinuerlig validert mot hydrodynamiske modelltester, og har blitt sammenlignet med andre simuleringsverktøy for flytende vindturbiner [10]. Før SIMA, måtte input til SIMO skje ved script. SIMA har en grafisk 3D- visualisering som nevnt innledningsvis i kapittel 5. Dette sparer tid ved at kontinuerlige tilbakemeldinger og assistanse blir gitt ved modellering.

## 5.2 Miljøforhold

Belastningseffekten er basert på predikasjoner om strekkreftene i forankringslinene, på grunnlag av beregninger. Analysen av linestrekket skal ta høyde for bevegelsen i flyteren som følge av miljøpåvirkningene, og responsen av forankringslinene i lys av disse bevegelsene [5]. De respektive verdiene til parameterne blir så plottet inn i ULS- og FLS-tilstandene. Disse utgjør da miljøforholdene for den dynamiske analysen SIMA simulerer. Alle verdiene for tilstandene ligger i tabell 6.2 og 6.1. For å få vind- og bølgeretninger riktig på vindturbinen, settes dette kun direkte inn. Det ligger et stivlegeme i modellen som automatisk vil rotere seg i riktig retning mot vinden og bølgene når den leseren inn variabelen som er definert for bølge og vind. Denne egenskapen har modellen fått etter forenklingen som er forklart i delkapittel 6.2. Både ULS og FLS tilstandene som har blitt brukt i oppgaven kommer fra Staald [35] sin masteroppgave. Begrunnelse for valg av de tilfellene er sitert:

*"I RENERGIX-prosjektet vart det blant anna analysert 81 FLS-tilfelle. Resultata fraprosjektet viste dei 13 FLS-tilfella med høgst delskade for line 1, 2 og 3. Utmattingstilfella som er analysert i dette prosjektet er valt pa bakgrunn av funna i RENERGIX-prosjektet. Det vart ogsa gjort ei parameterstudie pa OO Star i ekstremver i RENERGIX-prosjektet. Her vart det kombinert havtilstandar, vindforhold, havdjupn og straum for a finne den verste 100- ekstremtilfelle (ULS-tilfelle) i tillegg til dei 13 utmattingstilfella. Her er det valt a ta utgangspunkt i dei same tre ULS-tilfella som i Langeland Knudsen si masteroppgave (2016). Desse tilfella vart valt pa bakgrunn av høgst utilization ratio (UR-verdi) av dei sju tilfella som vart analysert i RENERGIX-prosjektet. UR-verdien sei noko om kor godt utnytta konstruksjonen er, det vil seie at den beskriv forholdet mellom lasta konstruksjonen utsettast for og lasta den taler"*
I lys av dette har det blitt valgt å la disse tilfellene bidra til 40% av utmattingslevetiden. Det er viktig å få frem at det heller ikke er brukt samme plattform. Modellen i denne oppgaven er 10MW, og modellen i Stald sin oppgave er på 6MW.

## 5.3 Grensetilstander

I følge DNV-GL standard [5], skal forankringssystem bli analysert etter designkriteriene gitt i de tre grensetilstander beskrevet nedenfor:

**Ultimate limit state (ULS)** Bruddgrensetilstand som skal sørge for at de individuelle forankringslinene har tilstrekkelig styrke slik at de tåler påkjenningen fra ekstreme værforhold.

**Accidental limit state (ALS)** Ulykkesgrensetilstand for å sikre at forankringssystemet har tilstrekkelig kapasitet mot svikt i forankringsliner, thruster eller kraftsystemer av ukjente årsaker.

**Fatigue limit state (FLS)** Utmattingsgrensetilstand for å sikre at de individuelle forankringslinene har tilstrekkelig kapasitet mot syklisk belastning. Flytende vindturbiner opplever miljøfaktorer som har syklisk belastning. Design for funksjonalitet og sikkerhet er derfor viktig.

I denne oppgaven blir kun ULS og FLS benyttet.

Hver grensetilstand er formulert som en designligning på formen:

$$Designkapasitet - Design\ lasteffekt \geq 0 \tag{5.1}$$

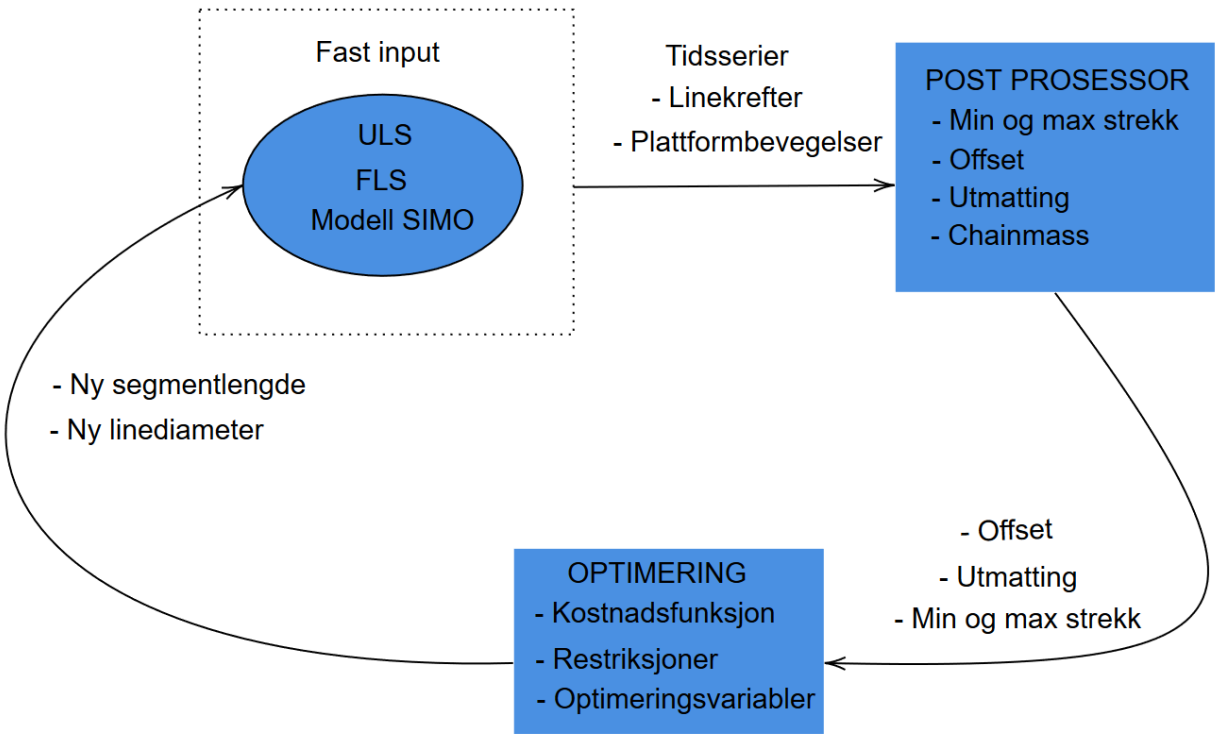
Hvor typisk

$$Designkapasitet = \frac{Karakteristisk\ kapasitet}{Delvis\ sikkerhetsfaktor\ på\ kapasitet}$$

De karakteristiske verdiene er beregnet oppskriftsmessig etter prosedyre. Ankerline designet for langsiktig forankring må tilfredsstille alle grensetilstandene.

# Kapittel 6

# Oppbygning av modell




Figur 6.1: Flytskjema av modellens oppbygging

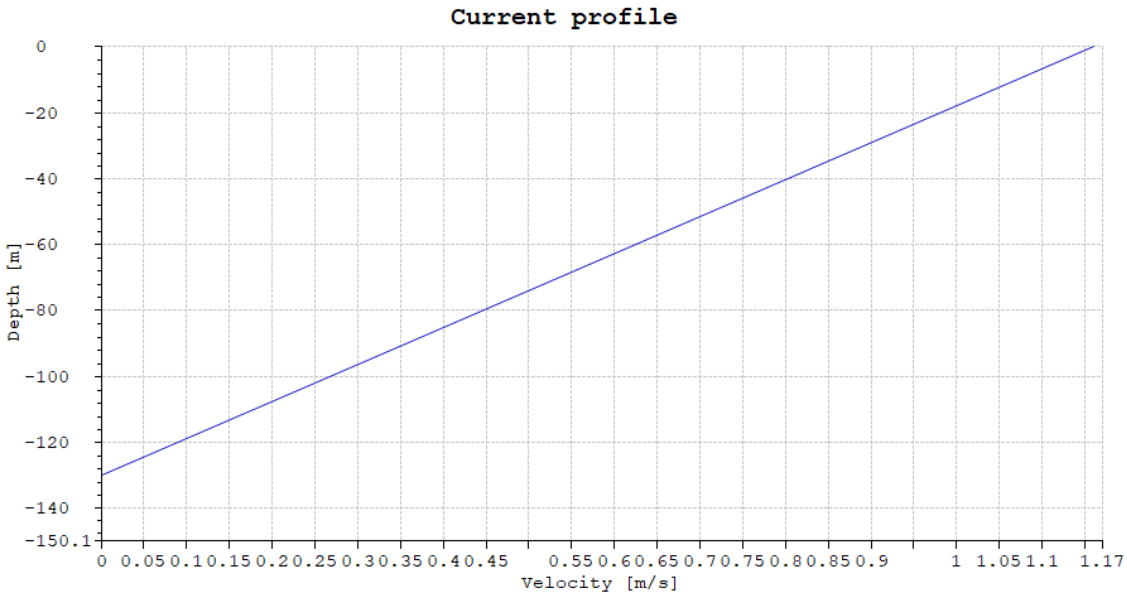
FLS og ULS er fast input og skal være lastkombinasjonene som turbinen utsettes for. Mellom modell SIMO og post prosessoren blir det kjørt tidsserier hvor utvalgte ankerlinekrefter og plattformbevegelser blir regnet ut. Disse verdiene får konkrete restriksjoner under optimering. Under optimering ligger også en kostnadsfunksjon med variabler som skal modifiseres for et optimalt resultat. Dette utdypes videre i dette kapittelet.

## 6.1 Simulering av lastkombinasjoner

Ved både ULS- og FLS-tilfellene foretas analysen for vanndyp på 130 meter. Som nevnt i delkapittel 5.2 er det de 13 FLS-tilfellene med høyest delskade for forankringlinene og de tre tilfellene av ULS som hadde de høyeste utilization ratio verdiene. Simuleringstiden for ULS-tilfellene er på 1950 sekunder, og 750 sekunder for FLS-tilfellene.

### Strøm

Ved både ULS- og FLS-tilfellene er strøm forenklet til å være på lineær form. Det er satt et referansepunkt ved havoverflaten $z = 0$ og ved havbunnen $z = -130$ meter. Ved havoverflaten er strømhastighetene de som ligger i tabellene, og ved havbunnen er den satt til 0. Figur 6.2 viser hvordan strømhastigheten øker konstant fra havbunnen til havoverflaten. Eksempelet kommer fra ULS-tilfelle 22.




Figur 6.2: Eksempel på strømprofil fra ULS-tilfelle

### 6.1.1 Simulering av ULS-tilfeller

Den bakomforliggende antakelsen om ULS-tilfellene er at disse vind-, bølge- og strømforholdene resulterer i en respons med 50 års returperiode.

| **DLC** | **ULS** | **Blader** | **Bølger(JONSWAP)** | | | | **Strøm** | | **Vind** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Run-id | $Pitch[°]$ | $H_s[m]$ | $T_p[m]$ | $\gamma$ | $Dir[°]$ | $V\frac{m}{s}$ | $Dir[°]$ | $U_{hub}[\frac{m}{s}]$ | $I_{eff}$ | $Dir[°]$ |
| Produksjon | 22 | 0 | 10.5 | 14.2 | 2.3 | 30 | 1.16 | 210 | 18 | 0.09 | 30 |
| Parkert | 67 | -90 | 10.5 | 14.2 | 2.3 | 30 | 1.35 | 210 | 40 | 0.12 | 30 |
| Parkert | 72 | -90 | 8.9 | 15.2 | 1.8 | 0 | 1.35 | 210 | 42.2 | 0.12 | 0 |

Tabell 6.1: ULS-tilfeller som er implementert i SIMA workbench

### Pitch control

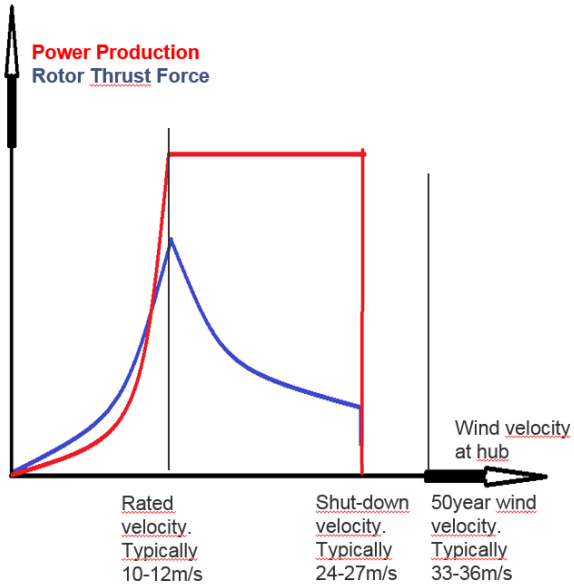
I tilfellet hvor turbinen blir parkert, vil bladene automatisk vri seg ut av vinden, for ikke å ta skade av de høye kreftene. I den forenklede modellen har ikke modellen blader, men for en fullstendig modell ville dette vært tilfelle. Det blir derfor tatt høyde for. Av forenklingen forekommer det at turbinen er modellert som et punkt av passive vindkoeffisienter. Dette er forklart nærmere i delkapittel 6.2.

### Bølgespekter

JONSWAP spektrumet blir vanligvis ved reduserte vindkraftkoeffisienter brukt for å beskrive ekstreme sjøtilstander forårsaket av vind, og det er spektrumet som blir benyttet under ULS tilfellene i analysen. Formulering av JONSWAP-spektrumet er beskrevet ved ligning 3.6. Signifikant bølgelengde, bølgetopp og spisshetsparameteren for hvert tilfelle ligger i tabellen.

### Vind

Den laveste gjennomsnittelige vindhastigheten $U_{hub}$ er ved 18 meter i sekundet og turbinen produserer energi som illustrert i figur 6.3. Figuren viser energiproduksjon og horisontal skyvekraft fra turbinen som en funksjon av gjennomsnittlig vindhastighet. Innenfor hastighetsintervallet som ligger under kurven markert i rødt vil det være produksjon av energi. For hastigheter høyere enn intervallet som er definert som "Shut-down velocity", vil det ikke være energiproduksjon. Turbinen vil da få betegnelsen "parkert" i tabell 6.1. Den blå kurven viser hvordan de horisontale skyvekreftene fra vindturbinen utvikler seg ved økende vindhastigheter frem til 11 meter i sekundet, og deretter avtar. De to andre tilfellene med Run-id 67 og 72 har for høye vindhastigheter og vil dermed ikke produsere energi. Retningen på vinden settes som nevnt kun direkte inn i miljøet under de respektive Rud-idene.




Figur 6.3: Energiproduksjon som funksjon av forskjellige vindhastigheter, orginalt fra [24]

### 6.1.2 Simulering av FLS-tilfeller

For å kunne gi et realistisk estimat på levetiden, er det viktig at spenningshistorikken predikeres for alle de relevante miljøtilfellene for hele turbinenes levetid. De forskjellige miljøtilstandene er definert under "Run-id". Det predikerte bidraget til utmatting for hvert tilfelle er oppgitt under "Timer", og er timer per år den tilstanden forekommer. Dette sier noe om sannsynligheten for tilfellet.

| **FLS** | **Bølger(PM-spekter)** | | | **strømning** | | **Vind** | | | | | **Tid** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Run-id | $H_s[m]$ | $T_p[m]$ | $Dir[°]$ | $V_{curr}[\frac{m}{s}]$ | $Dir[°]$ | $U_{hub}[\frac{m}{s}]$ | $I, amb[\%]$ | $I_{eff}$ | $Exp[-]$ | $Dir[°]$ | Timer |
| 02 | 1.65 | 7.67 | 0 | 0.315 | 0 | 10 | 0.06 | 0.190 | 0.080 | 0 | 224 |
| 03 | 1.95 | 7.90 | 0 | 0.420 | 0 | 11 | 0.05 | 0.190 | 0.080 | 0 | 97 |
| 04 | 2.72 | 8.49 | 0 | 0.525 | 0 | 12 | 0.06 | 0.180 | 0.090 | 0 | 119 |
| 32 | 2.72 | 8.49 | 240 | 0.525 | 180 | 12 | 0.06 | 0.180 | 0.090 | 240 | 101 |
| 33 | 6.26 | 11.21 | 240 | 0.840 | 180 | 16 | 0.06 | 0.168 | 0.090 | 240 | 53 |
| 39 | 2.72 | 8.49 | 210 | 0.525 | 180 | 12 | 0.06 | 0.180 | 0.090 | 210 | 162 |
| 52 | 1.95 | 7.90 | 150 | 0.420 | 180 | 11 | 0.05 | 0.190 | 0.080 | 150 | 209 |
| 53.1 | 2.31 | 8.17 | 150 | 0.695 | 180 | 12 | 0.06 | 0.180 | 0.090 | 150 | 138 |
| 53.2 | 2.72 | 8.49 | 150 | 0.719 | 180 | 14 | 0.06 | 0.175 | 0.090 | 150 | 205 |
| 59 | 1.95 | 7.90 | 120 | 0.420 | 180 | 11 | 0.05 | 0.190 | 0.080 | 120 | 138 |
| 60 | 2.72 | 8.49 | 120 | 0.695 | 180 | 12 | 0.06 | 0.180 | 0.090 | 120 | 225 |
| 61 | 4.70 | 10.01 | 120 | 0.743 | 180 | 16 | 0.06 | 0.168 | 0.090 | 120 | 98 |
| 81 | 2.72 | 8.49 | 30 | 0.695 | 0 | 12 | 0.06 | 0.180 | 0.090 | 30 | 215 |

Tabell 6.2: FLS-tilfeller som er implementert i SIMA workbench

#### Bølgespekter og vind

FLS-tilfellene bruker Pierson-Moskowitz-spektrum. Som beskrevet i ligning 3.7 gir en spisshetsparameter $\gamma = 1$ en reduksjon fra JONSWAP-spektrum til Pierson-Moskowitz-spektrum. Slik som ved ULS-tilfellene finnes kombinasjonene av signifikant bølgelengde, bølgetopp og retning på bølgene i tabellen. Det er disse verdiene som vil bli brukt gjennom hele analysen.

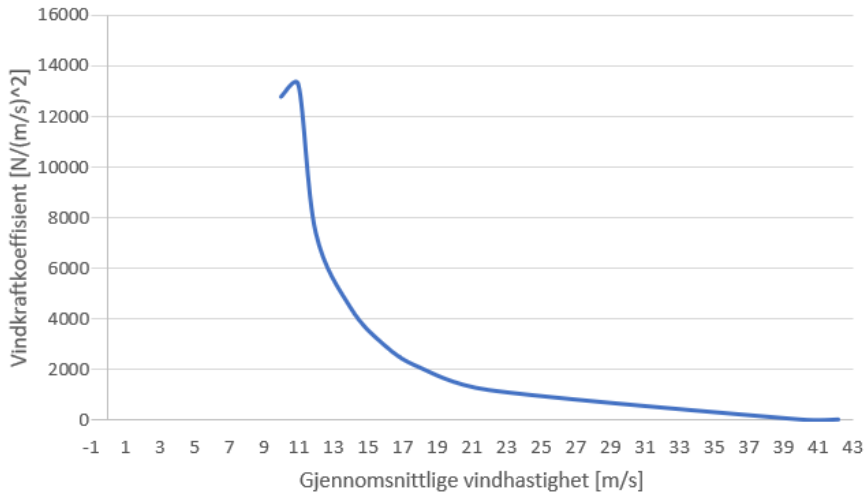
Til forskjell fra ULS-tilfellene er turbinen i produksjon ved hvert tilfelle. Tidshistorier med turbulent vind, beregnet fra en turbulensintensitet $I_{eff}$, er generert.

## 6.2 SIMO modell

### Forenkling av modell

Grunnet for lang simuleringstid ved OO-Star Wind Floater SEMI 10MW har det blitt gjort noen forenklinger av modellen. Før modifiseringen hadde modellen tårn og blader som linjer av bjelkeelementer mellom supernodene. Akslingen ble modellert som to bjelkeelementer med høy stivhet og var koplet sammen ved en rotasjonsfjær. Navet ble også modellert som et bjelkeelement med høy stivhet.

Denne forenklingen gikk ut på å fjerne turbinen og erstatte den med et stivlegeme med masse,- treghet- og vindkraftkoeffisienter. Vindkraftkoeffisientene er ulike fra vindhastighet til vindhastighet. Disse ble regnet ut ved å normalisere horisontal vindkraft og moment fra simuleringer med fullstendig turbin og konstant vindhastighet. Det vil si normalisere med hensyn på vindhastigheten kvadrert. Tabell 6.3 viser de forskjellige verdiene av gjennomsnittlig vindhastighetene og tilhørende vindkraftkoeffisient. Figur 6.4 viser hvordan grafen til tabellen ser ut.

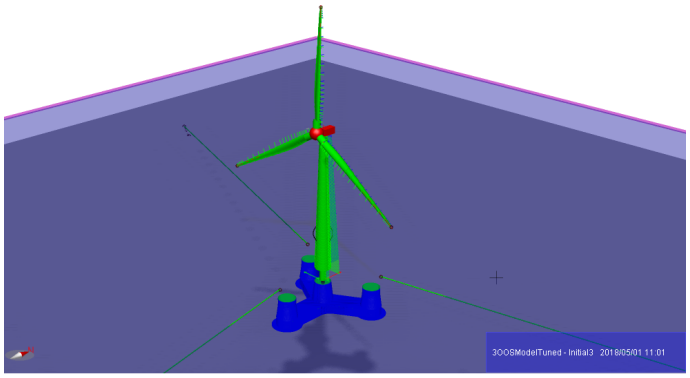



Figur 6.4: Grafen til vindkoeffisienter som funksjon av gjennomsnittlig vindhastigheter

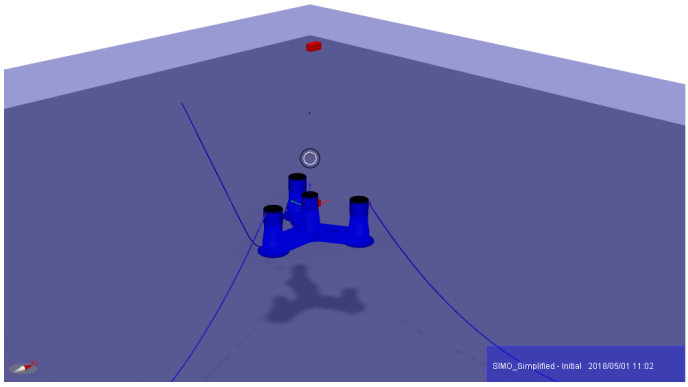
Tabell 6.3: Gjennomsnittlige vindhastigheter og vindkraftkoeffisienter

| Gjennomsnittlig vindhastighet $\frac{m}{s}$ | Vindkraftkoeffisient $\frac{N}{(m/s)^2}$ |
|---|---|
| 10 | 12798 |
| 11 | 13281.82 |
| 12 | 7446.53 |
| 14 | 4487.65 |
| 16 | 2977.46 |
| 18 | 2115.59 |
| 22 | 1220.87 |
| 40 | 57.54 |
| 42.2 | 57.16 |

Grafen viser hvordan vindkraftkoeffisienten øker frem til 11 meter i sekundet, og deretter avtar. De høyeste verdiene for gjennomsnittlig vindhastigheten er ved ULS-tilfellene. Figur 6.5 viser modellen i sin helhet før forenklingen. Etter forenklingen så modellen ut som illustrert i figur 6.6. Den forenklede modellen har kun ett linesegment, da det kun har blitt brukt kjetting uten klumpvekt som deler linene inn i flere segmenter.




Figur 6.5: Modell illustrert i SIMA workbench før forenkling




Figur 6.6: Forenklet modell illustrert i SIMA workbench

Forankringslinemodellen har også gått fra å være en dynamisk modell, til en kvasi-statisk modell. Det kan derfor forekomme glipp av dynamiske effekter. Implikasjoner av denne antakelsen kan sjekkes i etterkant av optimeringen. Forskjellen i dynamiske effekter har blitt studert i flere artikkler. I artikkelen til Nygaard [27] var målet å kvantifisere effekten av forankringslinedynamikk på flytende vindturbiner med hensyn på utmatting og ultimate laster med høy troskap til simuleringsverktøy. Simuleringene ble validert mot bølgetankforsøk. De testet tre forskjellige plattformer med en dynamisk og kvasi-statisk modell for å evaluere effekten. Generelt viste forsøkene at forankringsdynamikken på linene hadde en signifikant reduksjon jo nærmere elementene var plattformen. Fra artikkelen fremkom det at forankrings-dynamikken reduserer signifikant tårnbelastninger for halvt nedsenket plattformer og TLP-konsepter når de sammenlignes med resultater ved bruk av kvasi-statiske forankringsmodeller. I en artikkel skrevet av National Renewable Energy Laboratory og University of Maine [25] vises det til viktige funn. I fremkommer det at laster på forankringsliner beregnet ved en kvasi-statisk modell kan underpredikere

den dynamiske responsen til en line i ekstreme tilfeller så vel som i vanlige vindforhold. Det støttes også opp i en presentasjon holdt i årets deepwater konferanse [28] hvor det blir konkludert at beregning av utmatting i mellomdypt vann viser forskjellige resultater når det kommer til forankringslinekarakteristikk.

## 6.3 Post prosessor

I post prosessoren brukes dataene som blir kvantifisert ved simulering for å sette betingelsene for optimeringsalgoritmen. Under Post prosessor i figur 6.1 har det blitt satt opp noen punkter med respons som hentes ut. I post prosessoren hentes den akkumulerte skaden ved utmatting ut, og S-N-kurven som simuleringen skal bruke blir definert.

**Minimum strekk** i forankringslinene skal være høyere enn 0 N. Det vil i praksis si at ingen av linene opplever å være fullstendig fri for strekkrefter.

**Dimensjonerende last** er definert som:

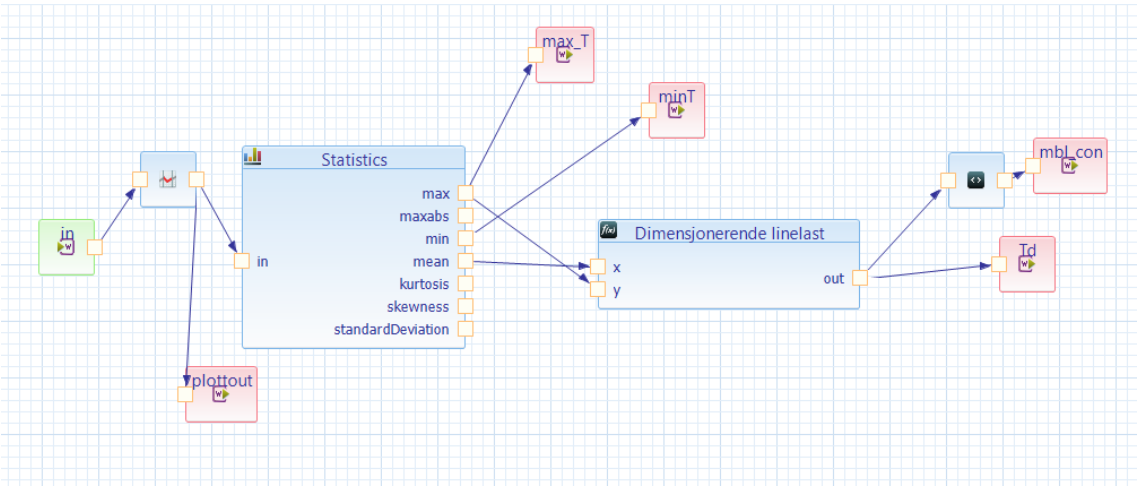
$$T_d = \gamma_{mean} \cdot T_{c,mean} + \gamma_{dyn} \cdot T_{c.dyn} \tag{6.1}$$

Hvor $T_d$ er dimensjonerende last, $T_{c,mean}$ er karakteristisk gjennomsnittlig strekkraft i linen, og $T_{c.dyn}$ er karakteristisk dynamisk strekkraft. Tabell 6.4 viser verdier for $\gamma_{mean}$ og $\gamma_{dyn}$. I analysen går vi ut i fra normal sikkerhetsklasse med verdier på 1.3 og 1.75. Tabellen sammenlignes designkriteriene for standardene DNV-OS-J103 [12] og DNV-OS-E301 [5].

| Item | DNV-OS-J103 | DNV-OS-E301 |
|---|---|---|
| Design class | Safety class Normal or high | Consequence Class I or II |
| Char. Weather | 50 years | 100 years |
| $\gamma_{mean}$ /$\gamma_{dyn}$ | Normal:1.3 / 1.75 High:1.5 / 2.2 | I: 1.1 / 1.5 II: 1.4 / 2.1 |
| Target prob. of failure (annual) | Normal: 10-4 High: 10-5 | I: 10-4 II: 10-5 |

Tabell 6.4: Sammenligning av designkriterier for DNV-OS-J103 og DNV-OS-E301 [24]

Figur 6.7 viser hvordan bruk av verktøy i SIMA workbench kombinert kan brukes for å kvantifisere verdier for dimensjonerende last. Ved bruk av en statistikk funksjon hentes gjennomsnittelig og maksimal linestrekk ut. Videre brukes det en parameterfunksjon for å definerer funksjonen beskrevet i ligning 6.1. Verdien som kommer ut av prosessen kalles for Td. Boksen som ser ut som to ulikhetstegn <> brukes for å sette restriksjonene. For minimum strekk hentes verdien ut rett i det som kalles minT i figuren.

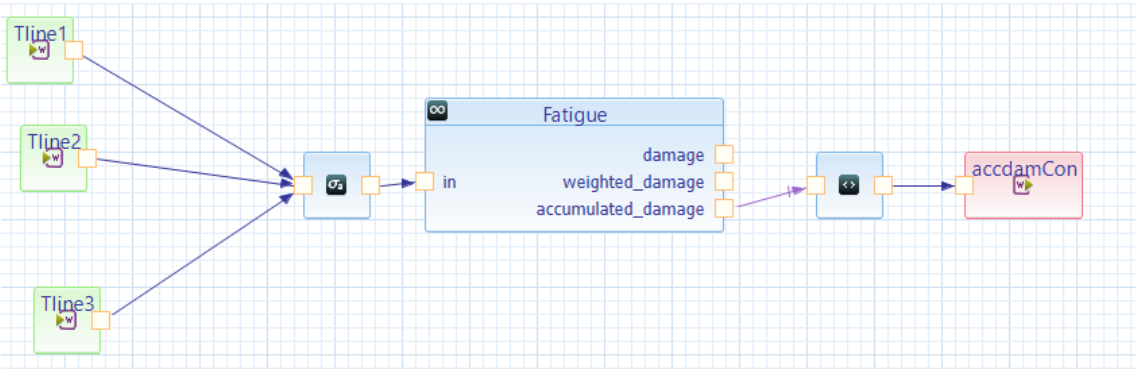



Figur 6.7: SIMA-illustrasjon av post prosessoren for oppbygging av dimensjonerende last

**Offset** sier noe om hvor mye bevegelse det er i plattformen oppgitt i meter. Det antas todimensjonalt plan hvor plattformen beveger seg i x-retning og y-retning. Funksjonen for offset blir da:

$$Offset(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{6.2}$$

**Utmatting** har en egen modul under post prosessoren, definert som fatigue. Der defineres tre forankringslinene som gir aksialspenning. Under aksialspenning defineres tversnittarealet som en funksjon av diameteren og beregnet aksialspenning går så videre til utmattingsanalysen som beregner akkumulert delskade. I denne modulen ligger også S-N-kurven som utmattingsanalysen skal bruke. Figur 6.8 viser hvordan dette er gjort i SIMA workbench. Boksen hvor det står $\sigma_a$ foretar spennings-




Figur 6.8: Oppsett av utmattingsanalyse i SIMA workbench

beregningene. Boksen som ser ut som to ulikhetstegn <> føres restriksjonene inn. Som nevnt i delkapittel 5.2 bidrar de 13 FLS-tilfellene til 40% av total utmatting. Formelen som settes inn i restriksjonene er da:

$$\frac{40\% \cdot k}{T \cdot DFF}$$

Hvor T er levetiden, DFF er design fatigue factor og k er en konstant definert som

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^{13} p_i}$$

Hvor $p_i$ er "Timer" for hvert tilfelle $i$ i tabell 6.2 delt på 24 timer ganger 365 dager. Det vil si:

$$\frac{t_i}{24 \cdot 365}$$

Resultatet blir en akkumulert delskade som ingen av de andre akkumulerte delskadene i de andre linene skal overstige. Verdien ligger i tabell 6.6. Minimum levetid for forankringslinene er satt til 20 år.

## 6.4 Optimering

Et hvert optimeringsproblem i SIMA må inneholde følgende punkter:

- En arbeidsflyt som skal optimaliseres med optimeringsvariabler som input, og en kostnadsfunksjon med restriksjonsverdier som output.
- En arbeidsflyt med en optimaliseringsnode som referer til arbeidsflyten ovenfor, og hvor brukeren spesifiserer de kalkulerte optimaliserte parameterne.
- En postprosessor med en kostnadsfunksjon som skal minimeres og restriksjoner som skal oppfylles.

### Kostnadsfunksjon

Kostnadsfunksjonen som skal minimeres er hentet fra Ryu 2008 [33]. Funksjonen gjelder for kjetting av typen studless chain. Kostnadsfunksjonen til forankringssystemet $C_{moor}$ er da:

$$C_{moor}(l, d) = 0.06320 \cdot d^2 \cdot l \tag{6.3}$$

Hvor $d$ er diameteren på kjettingen i mm og $l$ er lengden på kjettingen i meter og $C_{moor}$ er kostnaden for kjetting i USD.

### Optimeringsvariabler og restriksjoner

I Kapittel 4.4 blir variablene som optimeres presentert. Variablene til hvert segment er diameteren $d$ og lengden $l$ til forankringslinene. Nedre og øvre grenser er vist i tabell 6.5.

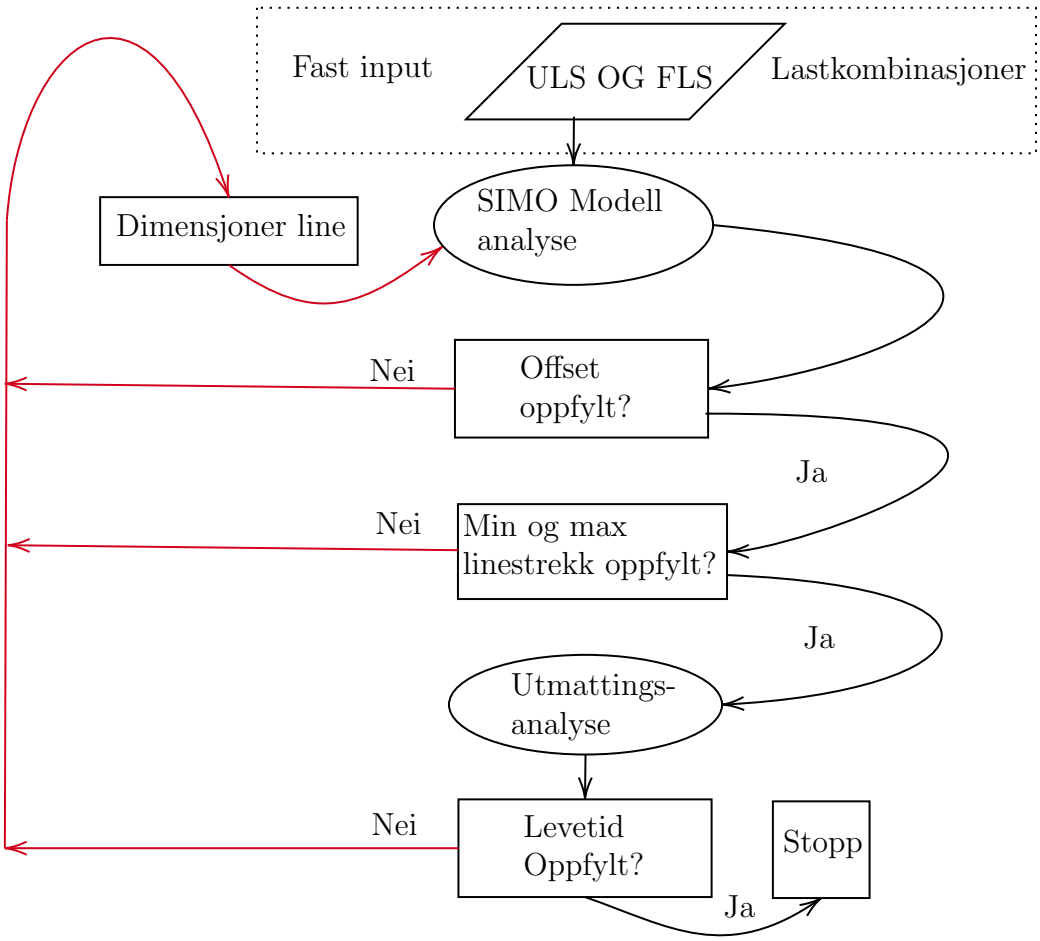
Tabell 6.5: Optimeringsvariabler i SIMA

| Variabel | Start | Min | Max | Delta |
|---|---|---|---|---|
| Lengde[m] | 690 | 690 | 710 | 0.01 |
| Diameter[m] | 0.260 | 0.260 | 0.285 | 0.01 |

Restriksjonene som er satt for optimeringen i SIMA. Verdier i tabell 6.6.

Tabell 6.6: Restriksjoner for optimering i SIMA

| Utvalgt restriksjon | Type | Verdi |
|---|---|---|
| Minimum strekk | $>$ | 0 |
| Maksimale strekkrefter og dimensjonerende last | $\leq$ | MBL |
| Offset | $\leq$ | 30 |
| Akkumulert delskade | $\leq$ | 0.01417 |




Figur 6.9: Flytskjema over optimeringsprosessen

Figur 6.9 viser hvordan modellen kjører simuleringer av ulike lastkombinasjoner, og kvantifiserer ulike responser som er nødvendig for restriksjonene. Etter at modellen har kvantifisert offset, sjekker den opp mot verdien i restriksjonen. Dersom den oppfyller kravet løper algoritmen videre til neste restriksjon. Hvis ikke dimensjonerer den optimeringsvariablene på nytt og prøver igjen. Slik gjør den til alle restriksjonene er oppfylt. Når alle restriksjonene er oppfylt stopper den prosessen og returnerer de optimale verdiene. For at intervallene slik det fremkommer i tabell 6.5 ikke skal bli for store, og dermed ta for lang tid, vil det testes med noen verdier. Dette går ut på å sette i gang simuleringer med verdier som anses fornuftige uten å bruke optimeringsrutinen for å se hvordan responsen er.

# Kapittel 7

# Resultater og diskusjon

Det har blitt kjørt simuleringer av til sammen 16 FLS- og ULS tilfeller. Disse tilfellene utgjør et miljø for lastkombinasjonene som den flytende vindturbinen har blitt utsatt for. I lys av disse lastene har det blitt satt opp ulike restriksjoner. Kostnadsfunksjonen beskriver kostnadene til et forankringssystem av kjetting ved dimensjoner av linelengde og linediameter. Funksjonen skal minimeres under nevnte restriksjoner. Dette har blitt gjort ved en optimeringsalgoritme. Dette kapittelet tar for seg resultatene fra denne prosessen. Kun illustrasjoner av de resultatene som anses som mest relevant vil bli presentert. Resterende er i vedlegg A.

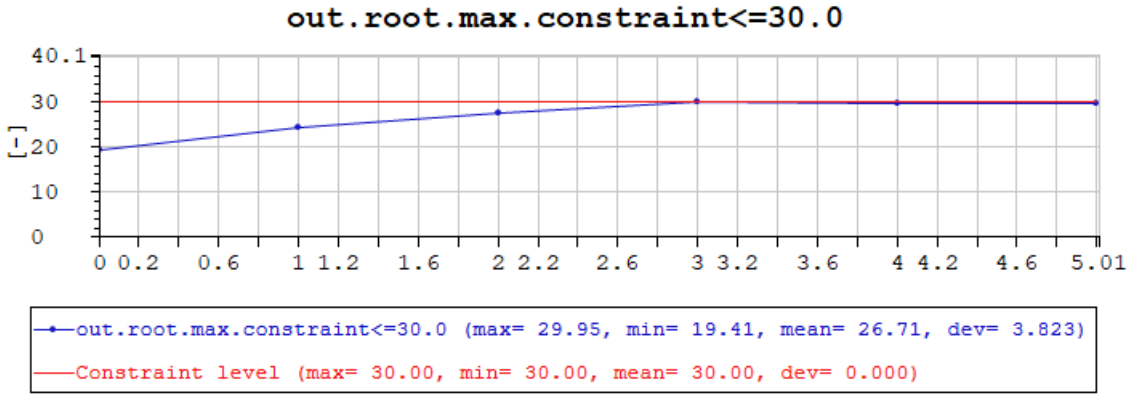
## 7.1 Optimerte verdier

Tabell 7.1 viser hvilke optimerte verdier som har blitt kvantifisert ved optimeringsprosessen. Tabellen viser hvordan optimeringsprosessen velger verdier for diameter og linelengde, undersøker og kontrollerer mot restriksjoner. Dersom restriksjonene er oppfylt, stopper prosessen og verdiene returneres. Hvis de ikke er oppfylt, fortsetter prosessen som illustrert ved figur 6.9 . I dette optimeringstilfelle foregår denne prosessen seks ganger før den stopper på verdiene $d = 266.73mm$ og $L = 703.04m$. Grafene i dette delkapittelet kommer fra optimeringsprosessen. Y-aksen viser verdiene for restriksjonen, og x-aksen viser antall steg optimeringsprosessen har. Tabell 7.1 viser eksempelvis seks steg hvor første verdi er i Y-aksen. Det blir derfor fem resterende steg. De blå punktene presiserer stegene.

Tabell 7.1: Optimerte verdier som tilfredstiller alle restriksjoner

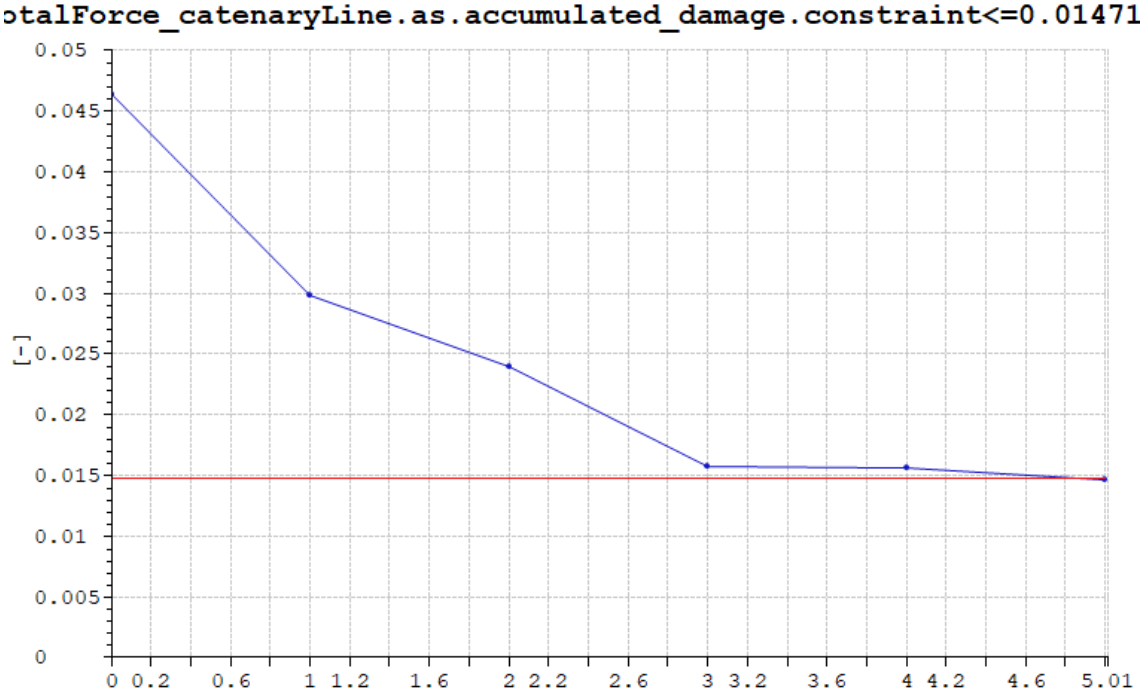
| Linediameter[m] | Linelengde[m] |
|---|---|
| 0.25 | 690 |
| 0.25 | 695.73 |
| 0.25 | 699.25 |
| 0.26287 | 703.11 |
| 0.26346 | 702.94 |
| 0.26673 | 703.04 |

De blå punktene i figur 7.1 viser hvordan verdiene for offset varierer når andre verdier for diameter og linelengde blir undersøkt. Offsetverdien starter på 20 meter da linelengden er på det korteste, og viser hvordan offseten blir høyere ved en økning i optimeringsvariablene. Den røde linjen viser verdien som offsetverdien skal være lik eller under.



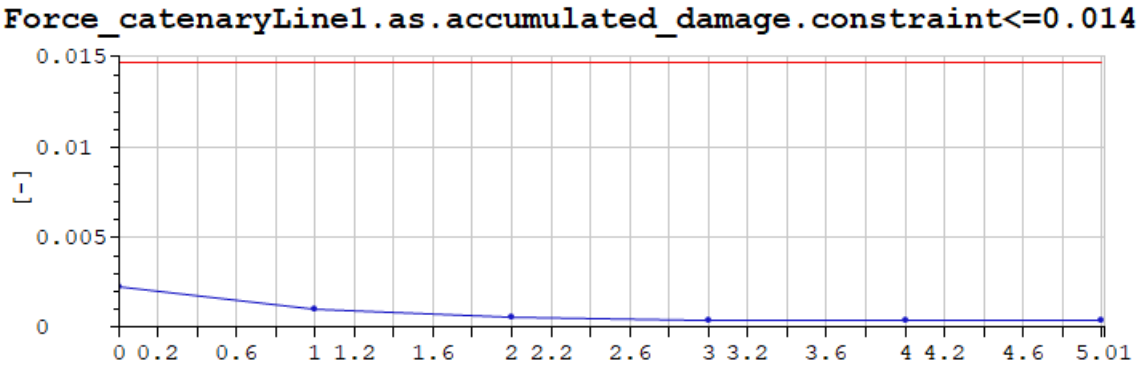

Figur 7.1: Utvikling i offset under optimering

Den akkumulerte delskaden var betraktelig høyere ved line 1 enn de andre linene. Figur 7.2 viser hvordan den akkumulerte delskaden avtar ved en endring i optimeringsvariablene. Den rød linjen er verdien på restriksjonen som den akkumulerte delskaden må være lavere enn.

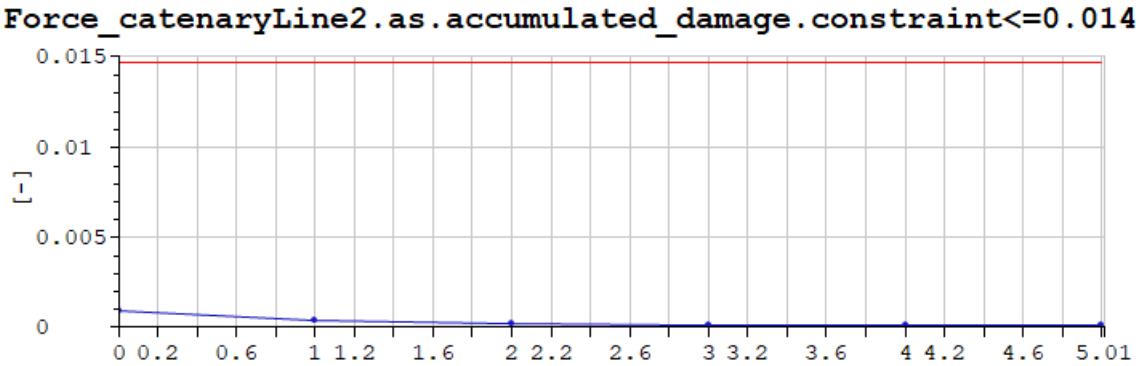



Figur 7.2: Akkumulert delskade ved forankringsline 1

Ved Forankringsline 2 og 3 var den akkumulerte delskaden som illustrert i figur 7.3. Verdiene for den akkumulerte skaden til de andre linene er aldri i nærheten av restriksjonene som er satt.




(a) Forankringsline 2




(b) Forankringsline 3

Figur 7.3: Akkumulert delskade ved forankringsline 2 og 3

Tabell 7.2 viser responsen fra forankringslinene hvor $d = 266.73mm$ er $MBL = 53.24e+06$ N. Verken dimensjonerende last eller maksimale strekkrefter i linene er i nærheten av MBL, samtidig som at minste linekraft er over 0 N. Figur A.1 illustrerer optimeringsprosessen av de dimensjonerende lastene.

Tabell 7.2: Krefter i forankringsliner ved dimensjoner fra optimeringsprosess med restriksjoner oppfylt

| Dimensjonerende last[N] | Max strekkraft[N] | Min strekkraft[N] |
|---|---|---|
| 8.9903e+06 | 5.575e+06 | 3.2799e+06 |

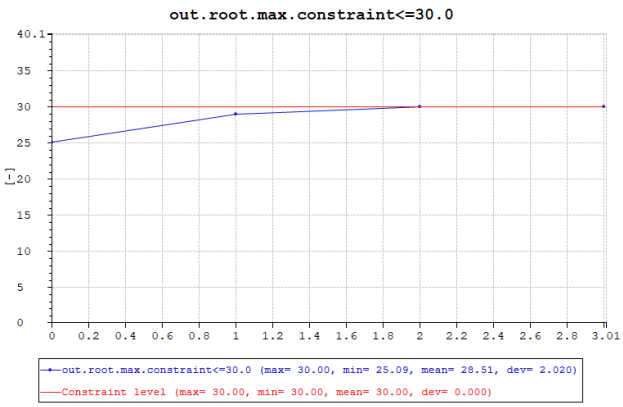
Ettersom forskjellen på de akkumulerte delskadene er så store mellom de tre linene, er det interessant å undersøke hvordan optimeringsprosessen ville tatt form dersom den akkumulerte delskaden for forankringsline 1 blir neglisjert. Det vil si at optimeringsrutinen foregår på samme måte, men under utmattingsanalysen vil den kun oppfylle restriksjonene for line 2 og 3. Alle andre restriksjoner forblir konstante. Det vil være fokus på å frem resultatene ved simuleringene som er å anse som viktigst for undersøkelsen. Identiske fremstillinger av simuleringer med alle restriksjoner og med reduserte restriksjoner, kan derfor utebli.

## Optimering med akkumulert delskade for forankringsline 1 neglisjert

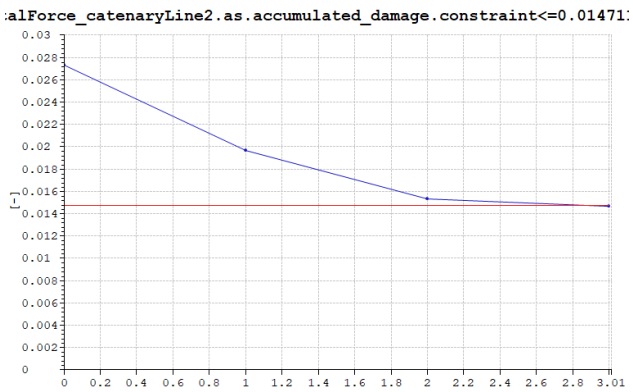
Tabell 7.3 viser de optimerte verdiene da den akkumulert delskadene i forankringsline 1 var neglisjert. Optimeringsprosessen sluttet ved en $l = 689.79m$ og $d = 155.68mm$. Intervallet for linelengden var mellom 685 og 710 meter, mens intervallet for linediameteren var mellom 150 og 180 mm. Disse verdiene ble valgt gjennom testing utenom optimeringsrutinen som beskrevet i delkapittel 6.4.

Tabell 7.3: Optimerte verdier fra optimering med akkumulert delskade for forankringsline 1 neglisjert

| Linediameter[m] | Linelengde[m] |
|---:|---:|
| 0.15 | 685 |
| 0.15 | 688.18 |
| 0.15457 | 689.65 |
| 0.15568 | 689.79 |




Figur 7.4: Offsetverdier ved line 1 neglisjert




Figur 7.5: Akkumulert delskade for line 3 fra optimeringsprosess med line 1 neglisjert

Figur 7.4 viser at verdiene for offset øker etterhvert som linelengden øker. Den røde linjen ved figur 7.4 og 7.5 angir verdien på restriksjonen. Figurene viser hvordan optimeringsalgoritmen tester verdier for å komme under den rød linjen, og dermed oppfylle restriksjonene. Resultatene viser at forankringsline 3 var den linen som fikk høyest akkumulert delskade etter line 1. Line 2 har lave verdier, og ligger som vedlegg i figur A.2.

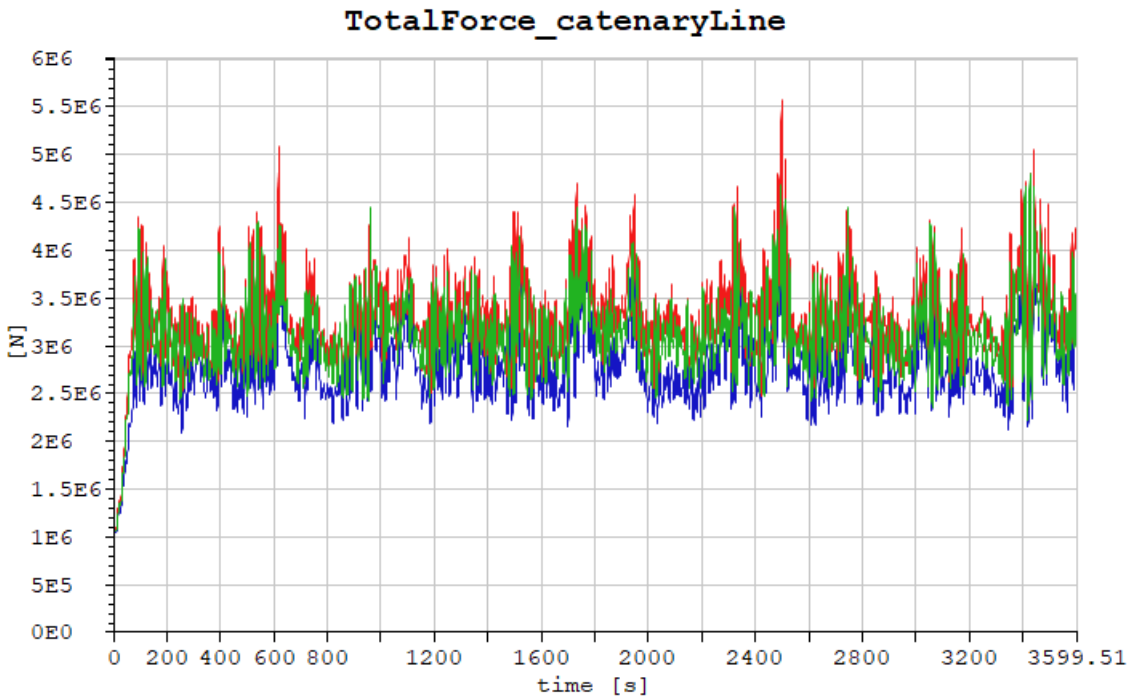
Tabell 7.4: Krefter i forankringsliner ved dimensjoner fra optimeringsprosess

| Dimensjonerende last[N] | Max strekkraft[N] | Min strekkraft[N] |
|---|---|---|
| 6.9112e+06 | 4.9789e+06 | 1.488e+06 |

Ved en $d = 155.68mm$ og $l = 689.79m$ vil $MBL = 21.09e{+}06$ N og minste strekkraft i linen $> 0$ N. Figur A.3 illustrerer optimeringsprosessen for dimensjonerende laster.

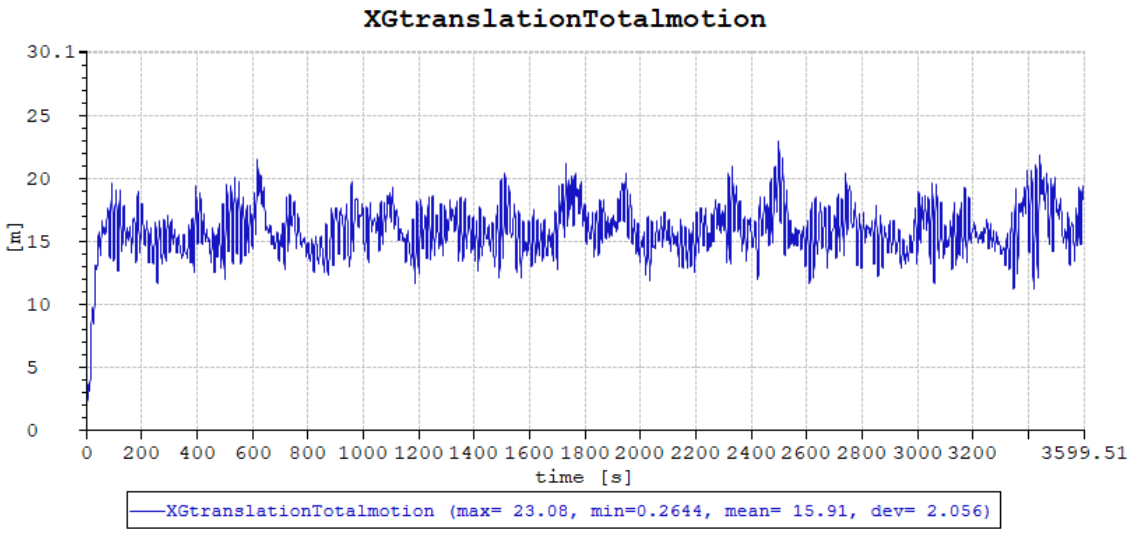
## 7.2 Resultater fra ULS-tilfellene

Simuleringstiden for ULS-tilfellene var på 3600 sekunder. De største kreftene oppstod ved tilfelle 67 på line 1, da turbinen var parkert. Figur 7.6 viser kreftene ved forankringsline 1 som funksjon av tiden ved samtlige ULS-tilfeller. ULS 22 vises ved blå farge, ULS 67 vises ved rød farge og ULS 72 vises ved grønn farge. Figur A.4 viser kreftene i samtlige liner. Rundt 2500 sekunder i simuleringen inntreffer maksimal linekraft på $5.575 + e06$ N slik tabell 7.2 viser.

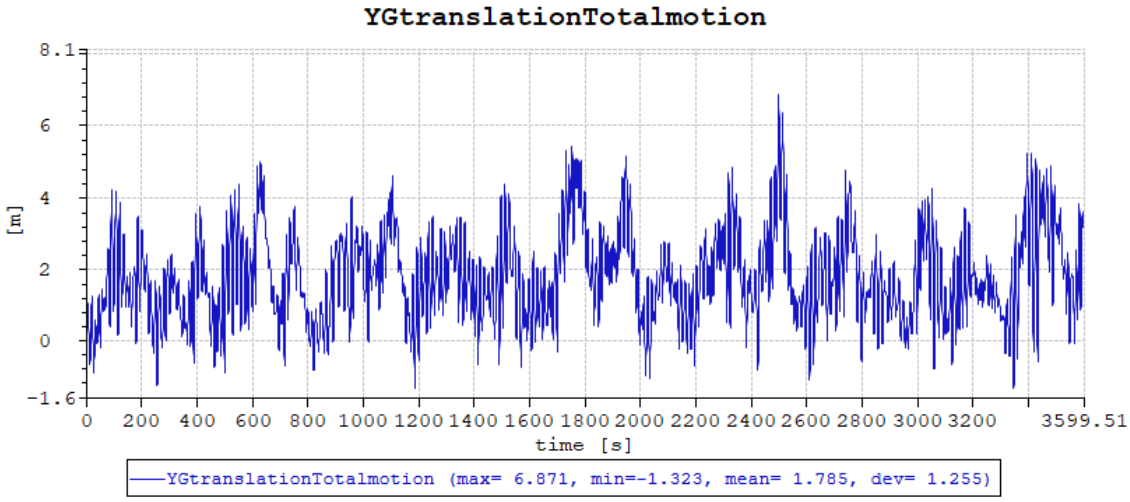



Figur 7.6: Krefter i forankringsline 1 ved samtlige ULS-tilfeller

Fra ULS-tilfelle 67 var det også størst bevegelse i plattformen. Figur 7.7 og 7.8 viser bevegelsen i henholdsvis x-retning og y-retning som funksjon av tiden ved tilfelle 67.



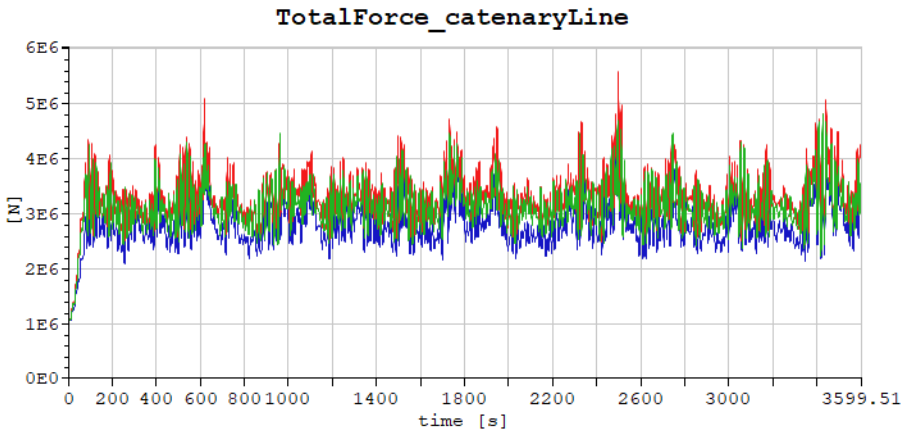

Figur 7.7: Plattformbevegelse i x-retning




Figur 7.8: Plattformbevegelse i y-retning

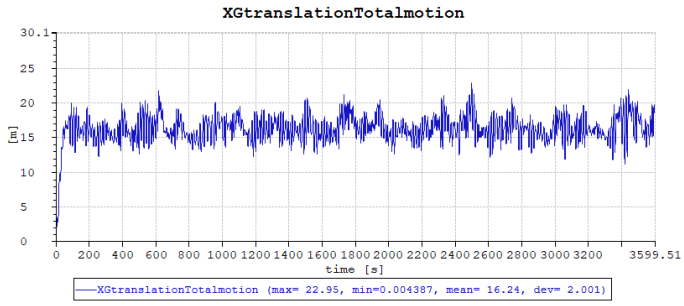
## ULS-tilfeller med verdier for diameter og linelengde når akkumulert delskade i line 1 er neglisjert

Figur 7.9 viser kreftene i line 1 ved samtlige ULS-tilfeller. Blå farge viser tilfelle 22, rød farge viser tilfelle 67 og grønn farge viser tilfelle 72. Tilfelle 67 viser fortsatt de høyeste verdiene for linestrekk. Figur A.18 viser kreftene for samtlige tilfeller.

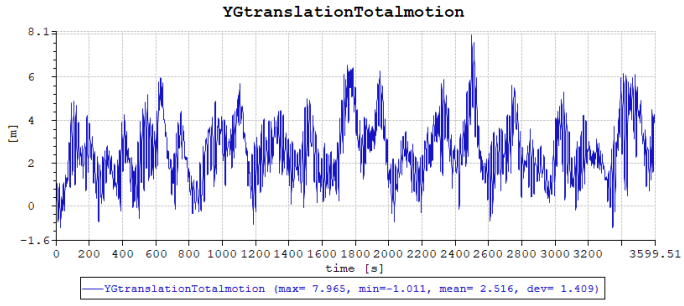



Figur 7.9: Krefter i line 1 ved samtlige ULS-tilfeller under reduserte restriksjoner

Figur 7.10 og 7.11 viser plattformbevegelsene i x-retning og y-retning for ULS-tilfelle 67. Dette er tilfellet som har de største verdiene.



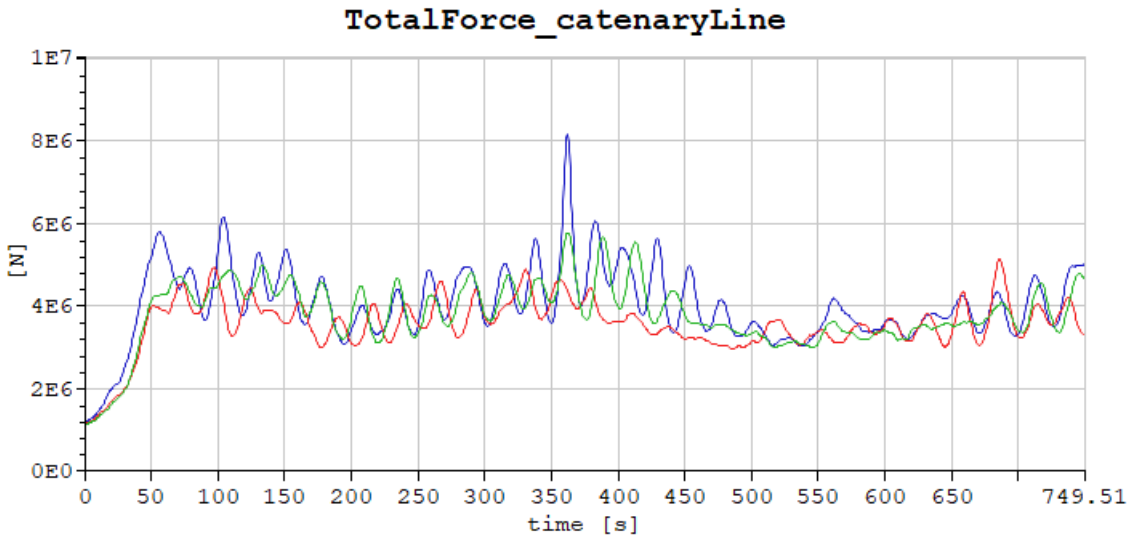

Figur 7.10: Plattformbevegelse i ULS 67 ved reduserte restriksjoner i x-retning




Figur 7.11: Plattformbevegelse i ULS 67 ved reduserte restriksjoner i y-retning

## 7.3 Resultater fra FLS-tilfellene

Av de 13 FLS-tilfellene som har blitt studert i denne oppgaven, viste tilfelle 52, 59 og 53.1 de høyeste verdiene for både maksimale linekrefter og gjennomsnittlig linekrefter, i den rekkefølgen de blir presentert. Som ved ULS-tilfellene, var det forankringsline 1 som viste høyeste verdier. Figur 7.12 viser de maksimale linekreftene av disse tilfellene på forankringsline 1. FLS 52 vises ved blå farge, 59 vises ved grønn farge og 53.1 vises ved rød farge.




Figur 7.12: Linekrefter på forankringsline 1 ved FLS-tilfeller

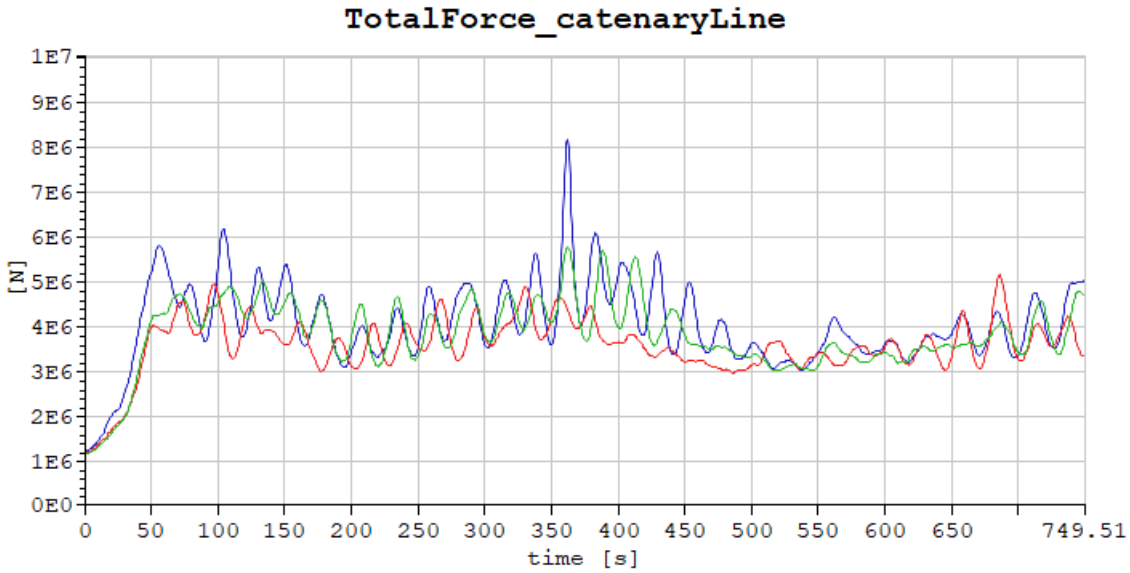
Tabell 7.5 viser levetiden til de forskjellige forankringslinene ved FLS-tilfellene. Som forventet var det forankringsline 1 som hadde de høyeste verdiene for akkumulert delskade og dermed kortest levetid.

Tabell 7.5: Levetid for forankringsliner ved FLS-tilfeller

| Forankringsline | Levetid[år] |
|---|---|
| Line 1 | 21 |
| Line 2 | 335 |
| Line 3 | 365 |

## FLS-tilfeller når akkumulert delskade i line 1 ignoreres

Figur 7.13 viser nærmest identisk respons sammenlignet med simuleringer som oppfyller alle restriksjoner. De andre linekreftene er også studert, men viser ingen vesentlig forskjell fra FLS-resultatene når alle restriksjoner er oppfylt.




Figur 7.13: Linekrefter på forankringsline 1 ved FLS-tilfeller

Tabell 7.6 viser levetiden på linene under denne prosessen. Ved disse dimensjonene vil ikke line 1 leve et helt år. Dette viser hvordan optimeringsrutinen kan ignorere beregninger for en av linene, men fremdeles tilfredstille alle andre.

Tabell 7.6: Levetid for forankringslinene under reduserte restriksjoner

| Forankringsline | Levetid[år] |
|---|---|
| Line 1 | 0.51 |
| Line 2 | 20 |
| Line 3 | 365 |

## 7.4 LIFE50+ som baseline

I LIFE50+ [38] sin rapport har det blitt lagt ved verdier for linelengde og diameter. Ettersom de bruker den samme modellen ved en havdybde på 130 meter, er det naturlig å bruke verdiene til en viss grad som referanse for hvilke verdier som blir bestemt av optimeringsalgoritmen i denne oppgaven. Den store forskjellen mellom modellen i rapporten og den som blir brukt i denne oppgaven, er at den forenklede modellen i denne oppgaven ikke har klumpvekt. Klumpvekt blir brukt for å øke den vertikale komponenten av forspenningskraften. Ved bruk av klumpvekt er hensikten å redusere de maksimale kreftene i linene. Det bør derfor forventes at det skal være høyere verdier for kreftene i linene, samtidig som at optimeringsalgoritmen bør dimensjonere diameteren høyere enn i LIFE50+ rapporten. I rapporten vises det til en diameter på 137 mm. Dette er godt under resultatet for denne oppgaven.

## 7.5 Designoptimering

### Evaluering av optimerte resultater

Linediameter på 267 mm er en høy verdi. Ut i fra resultatene er det tydelig at det skyldes høy akkumulert delskade på forankringsline 1. Hva som er årsaken til at den akkumulerte delskaden er så høy, er vanskelig å peke ut. Det kan være at et bidrag på 40 % på utmattingslevetiden er i underkant lite. I utgangspunktet skal det kjøres analyser av alle tilstander det er sannsynlig at plattformen opplever i løpet av levetiden. Dette er verdier som er hentet fra en annen oppgave med en annen plattform [35]. Det viste seg at verdiene på den akkumulerte delskaden var så høy ved lavere linediameter (tabell 7.6), at det ikke nødvendigvis ville hjulpet nevneverdig med restriksjoner for utmatting som var litt høyere. Dersom vind- og bølgeretningene blir veldig dominerende på linen, kan det være en mulighet å dimensjonere line 1 høyere enn de andre. Fra delkapittel 6.2 ble det vist til forskning som viser at kvasi-statiske modeller kan ha forankringsdynamikk som avviker fra dynamiske modeller. Det kan være dynamiske effekter som glipper i simuleringene. Dette kan prege FLS-tilfellene så vel som ULS-tilfellene. Optimeringsalgoritmen skulle dimensjonere for linediameter og linelengde ved å ignorere den akkumulerte delskaden av forankringsline 1. Dette mestret den godt da den optimerte variablene i lys av de resterende restriksjonene. Verdiene som blir returnert har ved optimering med alle restriksjoner, og optimering uten alle restriksjoner, blitt testet utenfor optimeringsprosessen. Resultatene viser at utvalgte restriksjoner har blitt holdt.

### Kostnadsfunksjon

Kostnadsfunksjonen er definert ved ligning 6.3. Formelen er fra 2007 og viser prisen i dollar det året. I denne oppgaven er ikke fokuset å finne den eksakte summen for hva det vil koste for et forankringssystem ved verdier for optimeringsvariablene. Formelen ses derfor på som god nok for denne oppgaven. Alternativt kunne kostnaden ved verdier for diameter og linelengde blitt diskontert med en akseptabel rente. Dette ville gitt en nåverdi i dollar som enkelt kunne konverteres til norske kroner eller euro, dersom det var ønskelig. Det er viktig å påpeke at funksjonen kun er gyldig for kjetting.

## ULS- og FLS tilfeller

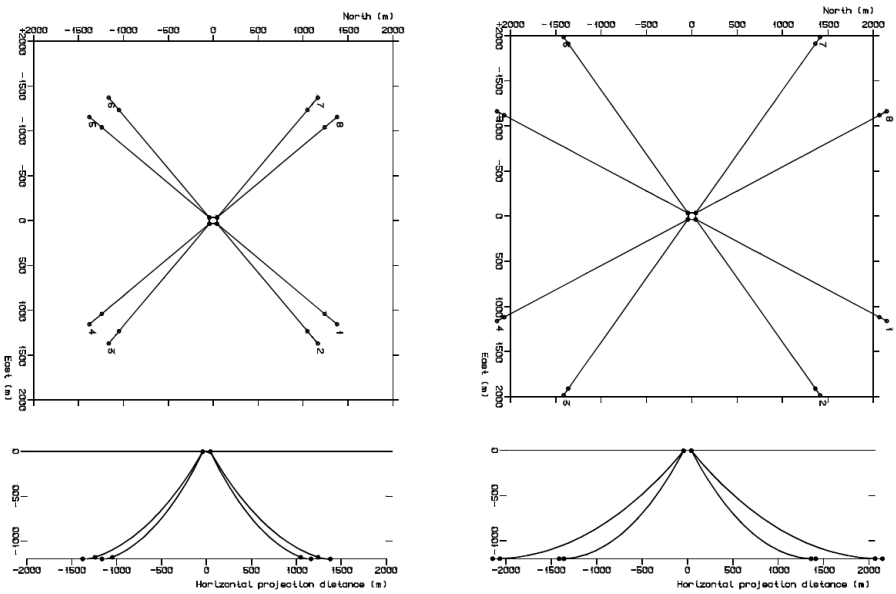
Ved simulering av ULS- og FLS-tilfellene fremkommer det at de maksimale strekkreftene inntrer ved FLS-tilfellene. Dette er bemerkelsesverdig siden hensikten med ULS er å utsette forankringslinene for ekstreme værhold, slik at det testes for tilstrekkelig styrke. Det er uten unntak denne responsen ved forankringsline 1. Dette kommer tydelig frem da line 1 ignoreres ved optimeringen. Det er interessant at diameteren går fra 266.67mm til 155.68 mm samtidig som at linelengden reduseres fra 703 meter til 689.8 meter. Dersom det er feil i modellen slik at linekreftene ved FLS-tilfellene får unormalt høye belastninger og dermed høy akkumulert delskade, er det viktig påpeke at andre konsekvenser slik som lavere linekrefter ved ULS-tilfellene, ikke skal utelukkes. Mulige årsaker er diskutert ovenfor.

## 7.6 Videre bruk av modell i SIMA workbench

Under arbeidet med denne oppgaven har det blitt brukt lang tid på å bygge en optimeringsrutine som designer et forankringssystem. Modellen med optimeringsrutinen kan fremtidige masterstudenter benytte seg av for å undersøke flere sider ved optimering av forankringssystemer. Til tross for at det har blitt brukt en forenklet modell i denne oppgaven, vil optimeringsrutinen fortsatt være tigjengelig for fullstendige modeller. Nedenfor er forslag til parametere som kan være interessante å studere nærmere.

**Andre materialer** Spesielt syntetisk tau har vært hyppig nevnt i debatten om gode substitutter for kjetting. Fra Carbon Trust sin rapport [30] nevnes polyester og nylon som mulige materialer for halvt nedsenkbare plattformer i mellomdype hav. De belyser mulighetene ved kostnadsbesparelse, høyere utmattingsterskel og lavere CO2-utslipp. Her er det mulig å dele forankringssystemet inn i flere segmenter og optimere ressursbruken av forskjellige materialer for de ulike segmentene, eventuelt for et system bestående av kun syntetisk tau. Dette er oppgaver fremdtidige masterstudenter kan se på ved den utviklede optimeringsrutinen.

**Flere optimeringsvariabler** I denne oppgaven har det kun blitt sett på optimeringsprosesser med diameter og linelengde som variabler. Det kan for eksempel være interessant å analysere variabler som forspenning og posisjoner for ankere nærmere. Figur 7.14 viser et før- og etterbilde ved en optimeringsprosess med hensyn på posisjoner, linelengde, forspenning og diameter. Det er viktig å få frem at i en hel vindpark vil posisjoneringene være kritiske og utfordrende. Det vil da ligge flere flytende vindturbiner ved siden av hverandre.




Figur 7.14: Før og etter optimering. Orginalt fra [16]

# Kapittel 8

# Konklusjon

Det overordnede målet med denne oppgaven var å undersøke mulighetene for optimering av forankringssystemer til halvt nedsenkede vindturbiner med slakk forankring. Problemstillingen tar for seg problematikken ved at en reduksjon i kjettinglengde ofte medfører økning i kjettingdiameter. I lys av dette er det bygd en modell med en optimeringsrutine som dimensjonerer kjettinglengde og kjettingdiameter under gitte restriksjoner. For å beskrive kostnadene til forankringssystemet har en funksjon av kjettingdiameter og kjettinglengde blitt konstruert. Denne funksjonen setter føringer for prioritering av de to dimensjonene ettersom målet er å minimere funksjonen.

OOStar-konseptet som har vært modellen under analysen har blitt forenklet ettersom simuleringstiden ble for lang. Klumpvekten som originalt var festet til forankringslinene ble fjernet ettersom fokuset primært var på optimeringsprosessen av forankringslinene. Verdiene som har blitt kvantifisert gjennom denne prosessen skal overholde krav som har blitt spesifisert.

### Restriksjoner og optimeringsvariabler

Som illustrert ved figur 7.1 under, vil ikke offset-kriteriet kunne overholde målet om $\leq$ 30 meter når lengden på linen øker for mye. Selv om diameteren øker vil det ikke finnes en løsning hvor målet for offset blir overholdt. Det viser seg at økning i linelengde gjør den akkumulerte delskaden lavere i lineintervallet det testes for. Her blir det en balanse mellom ikke å få for høye utmattingsskader, samtidig som at linelengden ikke blir for lang for offset-kriteriet. Linebrudd og maksimale strekkrefter i linene var aldri i nærheten av å være $\leq$ MBL.

### Optimeringsvariabler og lastkombinasjoner

Da alle restriksjoner skulle oppfylles, ble dimensjonene for diameteren til linen veldig stor. Etter en grundig undersøkelse av hva som skjer i FLS-tilfellene viste det seg at den akkumulerte delskaden ved line 1 var mye høyere enn de andre linene. Dette kan naturlig forklares ved at vind- og bølgeretningen ved flere tilfeller (se tabell 6.2) var rett på line 1, altså 0 grader. Uansett er det bemerkelsesverdig at verdiene var såpass høye. Det kan være flere grunner til det. Som nevnt i delkapittel 6.2 har det vist seg at karakteristikken på linene ved kvasi-statiske modeller kan avvike fra dynamiske modeller. Det ble så satt i gang en optimeringsprosess som neglisjerte line 1. Det var interessant å se hvor mye mindre dimensjonene for diameter og

linelengde nå ble bestemt. Det viste seg at dimensjonene til diameteren og lengden som ble kvantifisert var betydelig mindre.
Verdiene for diameteren og linelengden har blitt brukt under analyser av ULS- og FLS-tilfellene for å undersøke hva som skjer i forankringslinene og plattformbevegelsene. Selv da line 1 ble neglisjert og diameteren var lavest av de to tilfellene, viste det seg at ingen av ULS-tilfellene opplevde krefter som var høyere enn MBL. Linestrekket i FLS-tilfellene har som nevnt vært høyt i line 1 under simuleringene. Optimeringsrutinen fungerte som den skulle og optimerte variablene i lys av restriksjonene. At det er for høye linekrefter av ukjente årsaker vil uavhengig av optimeringsprosessen føre til høye verdier for design av forankringssytemet. Testing av verdier som er mindre og større enn verdiene optimeringsalgoritmen valgte som optimale viste seg enten ikke å oppfylle alle restriksjoner, eller være verdier som ikke gir de laveste kostnadene.

## 8.1 Forslag til videre arbeid

Basert på funn i denne oppgaven er følgende forslag til videre arbeid anbefalt.

- Å utføre simuleringer på fullstendig modell bør undersøkes. Resultatene som generes ved den ordinære modellen vil trolig være mer reelle. Her kan det også simuleres for flere grensetilstander enn de to som har blitt brukt i denne oppgaven. FLS-tilfellene utgjør kun 13 av de 81 tilfellene som ble testet i RENERGIX-prosjektet. Hva gjelder ULS-tilfellene vil flere tilstander også være naturlig å undersøke. Full analyse med alle tilfellene bør studeres nærmere for å se hvordan kreftene i linene oppfører seg for flere lastkombinasjoner

- Denne oppgaven har sett på forankringssystemer av kjetting. Løsninger ved andre materialer bør undersøkes nærmere. Som nevnt i delkapittel 7.6 vurderes syntetiske tau som et godt substitutt, enten det er i kombinasjon med kjetting i sin helhet eller med klumpvekt. Det er viktig å få frem at nye materialer med ulike egenskaper krever modifisering av kostnadsfunksjonen og materialegenskapene som ligger til grunn for all analyse.

- Å konstruere en kostnadsfunksjon som tar hensyn til frakt, installasjon og vedlikehold kan være interessant for det fullstendige kostnadsbilde til forankringssystemet. I denne oppgaven har det kun blitt brukt en kostnadsfunksjon for kjettingen til forankringslinene. Det er heller ikke blitt sett noe på optimering av "riser". En total kostnadsfunksjon av både forankringskostnader og "riser"-kostnader bør studeres nærmere. Dersom det vurderes å feste klumpvekter på forankringslinene, er det interessant å se hva optimal vekt hadde blitt. Dette ville da også blitt inkludert i den nye kostnadsfunksjonen.

- I denne oppgaven har det kun blitt sett på halvt nedsenkbare plattformer. Som nevnt innledningsvis i rapporten er det flere plattformer som burde analyseres nærmere. Spar-plattformen har eksempelvis blitt installert utenfor Skottland og vil være et naturlig referansetilfelle for denne typen plattform i Nordsjøen.

- Optimering av forankringssystemer har fått mer fokus. Å sammenligne flere optimeringsalgoritmer med hverandre mot et felles referansepunkt er interessant for å se hvordan de foretar dimensjonering av forankringssystemet. I innledningen ble algoritmen PSO nevnt. Dette er et eksempel på en annen optimeringsalgoritme som kan være interessant å sammenligne med.

# Referanser


[1] Reynoldstall. https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/r/reynoldstall.html[Accessed: 27. feb. 2017].

[2] Energy roadmap 2050. 2012. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2012_energy_roadmap_2050_en_0.pdf.

[3] Floating offshore wind foundations: Industry consortia and projects in the united states, europe and japan. 2013 (Updatet May, 2013). http://maine-intl-consulting.com/resources/Floating+Offshore+Wind+Platforms+Consortia+for+web.pdf.

[4] Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. 2014. https://aquaticbiosystems.biomedcentral.com/articles/10.1186/2046-9063-10-8.

[5] Offshore standard position mooring, dnvgl-os-e301. 2015. https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/os/2015-07/DNVGL-OS-E301.pdf.

[6] Poseidon floating power. 2015 (Info updatet November 15, 2016 ). https://tethys.pnnl.gov/annex-iv-sites/poseidon-floating-power-poseidon-37.

[7] Japanese float gets relocated. 2016 (accessed Thursday, 21 April 2016). www.4coffshore.com/windfarms/japanese-floater-gets-relocated-nid3670.html.

[8] Events on sakiyama 2mw floating wind turbine. 2016 (Updatet Mars 26, 2016). www.4coffshore.com/windfarms/project-dates-for-sakiyama-2mw-floating-wind-turbine-jp50.html.

[9] Athanasia Arapogianni and Anne-Bénédicte Genachte. Deep water the next step for offshore wind energy. 2013[Online; accessed JULY 2013]. http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf.

[10] Joao Cruz and Mairead Atcheson. Floating offshore wind energy. *Springer, Cham*, 2016.

[11] DNV-GL. Dnv-rp-c205:environmental conditions and environmental loads. 2010-10.

[12] DNV-GL. Dnv-rp-h103: Modelling and analysis of marine operations. 2014-02.

[13] DNV-GL. Rp-c203: Fatigue design of offshore steel structures. 2014-06.

[14] Kenneth J. Eik and Einar Nygaard. Statfjord late life metocean design basis. [Distribution date: 2003-10-22].

[15] Odd Magnus Faltinsen. Sea loads on ships and offshore structures. *CAMBRIDGE UNIVERRSITY PRESS*, 1990.

[16] Ivar Fylling. Optimization of mooring and riser system for deep water floating production systems including fatigue life requirements. September 2003. https://www.researchgate.net/publication/268369544_Optimization_of_Mooring_and_Riser_System_for_Deep_Water_Floating_Production_Systems_Including_Fatigue_Life_Requirements?enrichId=rgreq-eaa1c210f5c6652d550647b4a8efda93-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI2ODM2OTU0NDtBUzoxNjQ0MzU4ODQ3ODE1NjhAMTQxNjIxNTk3ODA4Mw%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf.

[17] Carsten Ostergaard Günther Clauss, Eike Lehmann. Offshore structures. *Springer London*, 2014-09-25.

[18] Vegar Klem Hafnor. Interaksjon mellom dønning og vindsjø. 2016. https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/51959/VegarKlemHafnor_masteroppgave.pdf?sequence=1.

[19] S. Haver. 3.5 wind loads 3.5.1 wind phenomenology. 2010.

[20] Eirik Langeland Knudsen. Innovativt forankringssystem for flytende vindturbiner. 2016.

[21] HARALD E. KROGSTAD and ØIVIND A. ARNTSEN. Linear wave theory part b random waves and wave statistics. February 2000. http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/.

[22] Christine Krugerud. Design and automated optimization of mooring systems for shallow water and harsh environments. June 2016.

[23] Marit Irene Kvittem. Modelling and response analysis for fatigue design of a semi-submersible wind turbine. 2014.

[24] Kjell Larsen. Mooring of floating wind turbines - challenges and opportunities. 2018.

[25] Jason Jonkmana Alexander Coullingb Marco Masciolaa, Amy Robertsona and Andrew Goupee. Assessment of the importance of mooring dynamics on the global respon. 2013.

[26] Jorge Nocedal and Stephen J. Wright. Numerical optimization. *Springer*, 1990.

[27] Tor Anders Nygaard and José Azcona. Mooring line dynamics experiments and computations. effects on floating wind turbine fatigue life and extreme loads. 2016.

[28] Tor Anders Nygaard and Jacobus de Vaal. Catenary mooring chain eigen modes and the effects on fatigue life. 2018.

[29] Anna Possner and Ken Caldeira. Open-ocean wind farms. 2017[Online; accessed 9-OCT-2017]. https://www.eurekalert.org/pub_releases/2017-10/potn-owf100417.php.

[30] Denis Matha Justin Jones Rhodri James, Wen-Yu Weng. Floating wind joint industry project phase i summary report. May 2018.

[31] I. Rychlik. A new definition of the rainflow cycle counting method. 1987. IntJ Fatigue9 No 2 (1987) pp 119-121.

[32] Toril Fjeldaas Rygg. Utvikling av ett dataprogram for design av s-n kurver til utmattingsberegninger. 2015.

[33] Caspar Heyl Sam Sangsoo Ryu and Arun Duggal. Mooring cost sensitivity study based on cost-optimum mooring design. 2008. http://www.sofec.com/whitePapers/2008%20KSOE%20Mooring%20Cost%20Sensitivity%20Study%20Based%20on%20Cost-Optimum%20Mooring%20Design.pdf.

[34] Prof. K. Schittkowski. Nlpqlp: A fortran implementation of a sequential quadratic programming algorithm with distributed and non-monotone line search. 2011 [Oct].

[35] Christina Stald. Teknisk analyse av forankringssystem for flytande vindturbinar. 2017.

[36] Alexander Steinert. Structural optimisation of floating wind turbines. 2015.

[37] Geir Terjesen. Tmp301: Utmatting 2. 2017.

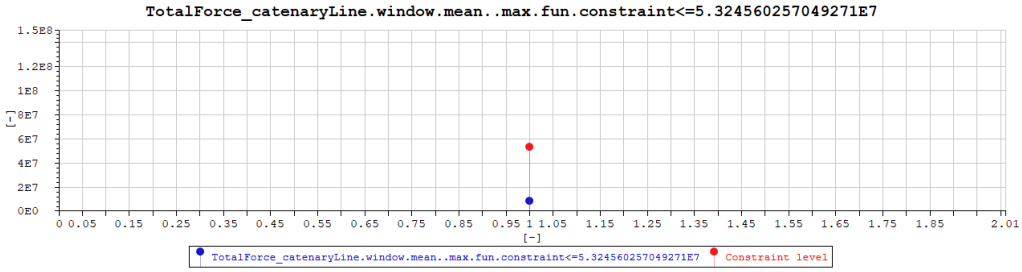
[38] Kolja Müller Wei Yu and Frank Lemmer. Qualification of innovative floating substructures for 10mw wind turbines and water depths greater than 50m. 2018-04-12.

# Appendix A

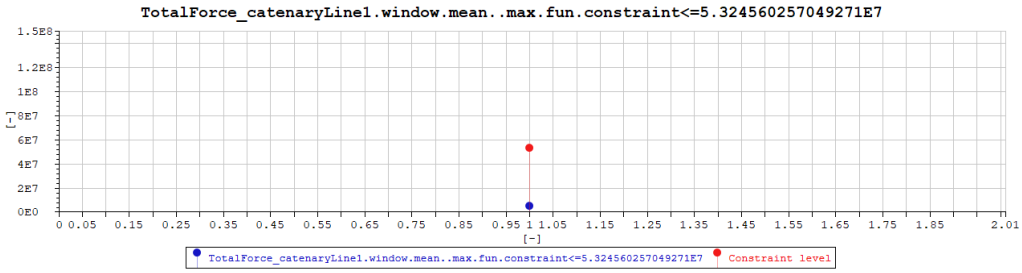
# Resultater fra optimeringsprosesser

## Optimeringsprosess med alle restriksjoner

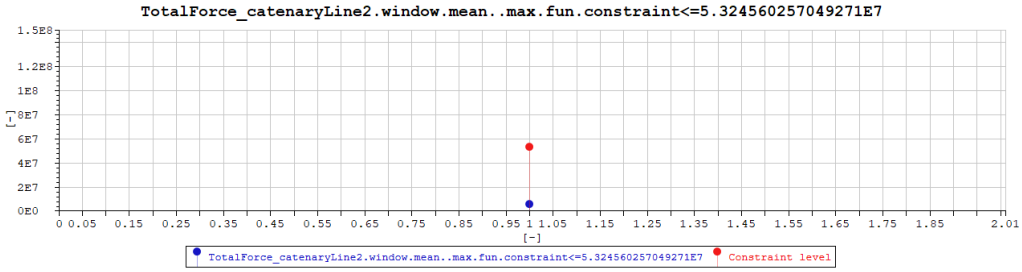
Det røde punktet i figur A.1 viser verdien for restriksjonen, og den blå viser den dimensjonerende lasten. Figur A.3 viser verdien på restriksjonen i rødt, og verdien på den dimensjonerende lasten i blått.




(a) Dimensjonerende last ved line 1




(b) Dimensjonerende last ved line 2

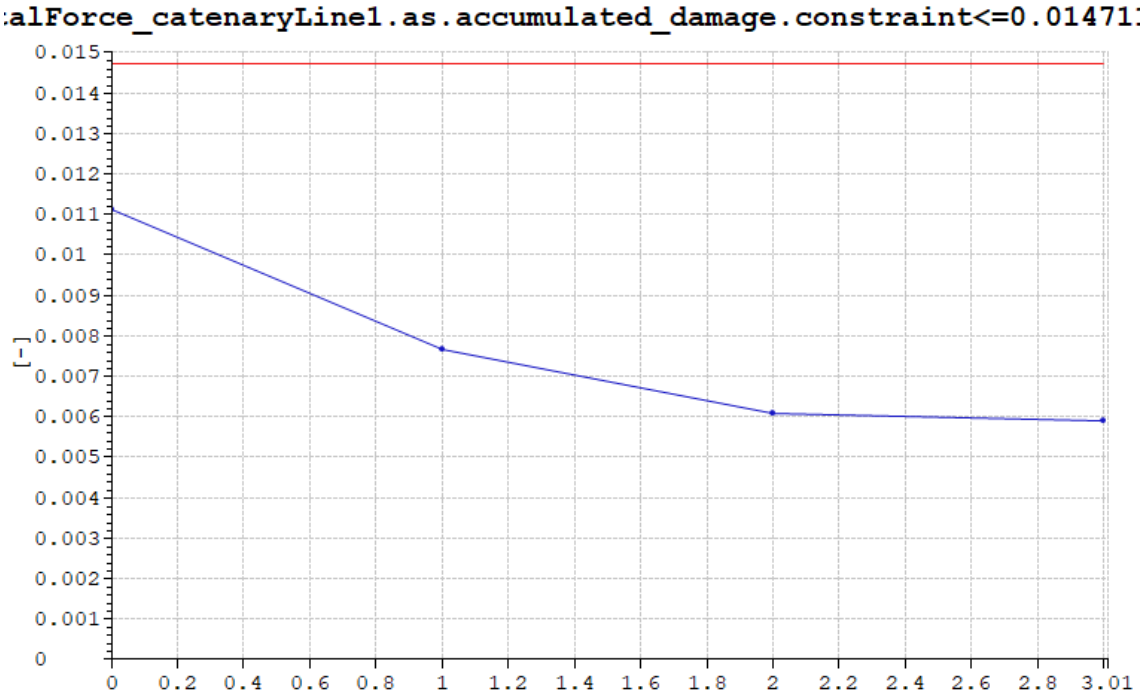



(c) Dimensjonerende last ved line 3

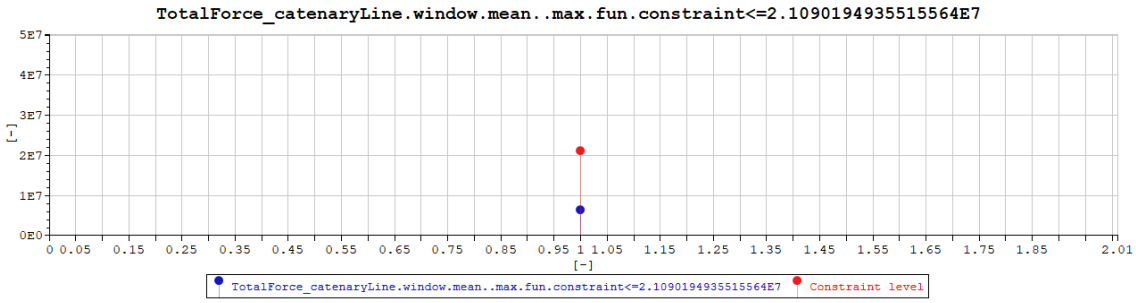
Figur A.1: Optimeringsprosess av dimensjonerende laster mot MBL

## Optimeringsprosess med line 1 neglisjert

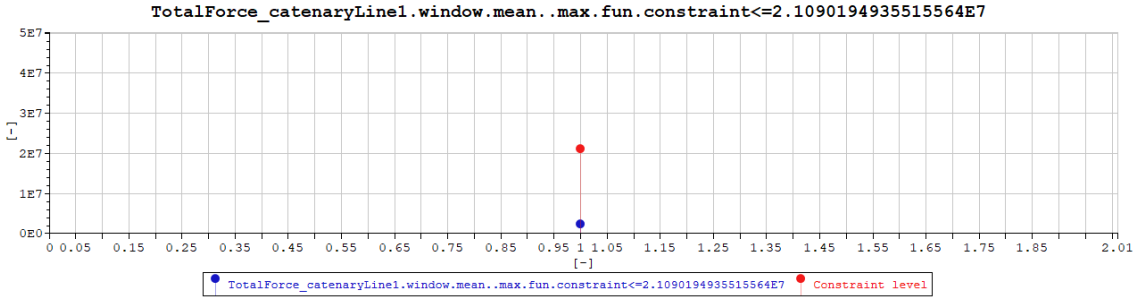
Rød linje viser verdien på restriksjonen, og blå linje viser den akkumulerte delskaden ved verdier for diameter og linelengde.



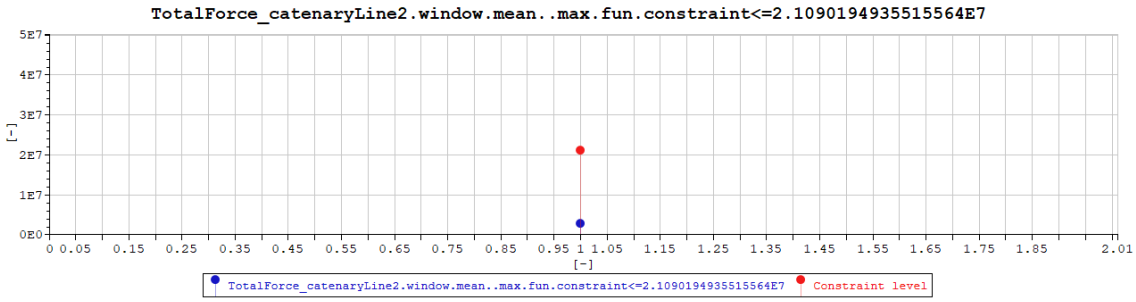

Figur A.2: Akkumulert delskade for line 2 fra optimeringsprosess med line 1 neglisjert




(a) Dimensjonerende last ved line 1




(b) Dimensjonerende last ved line 2

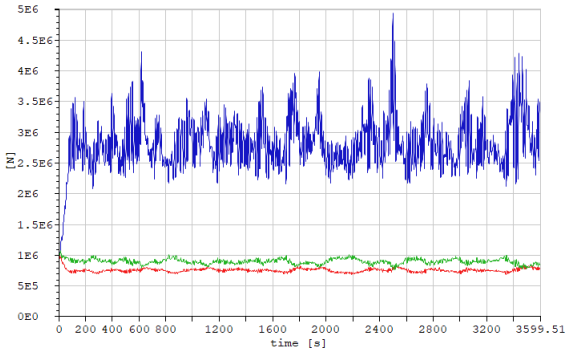



(c) Dimensjonerende last ved line 3

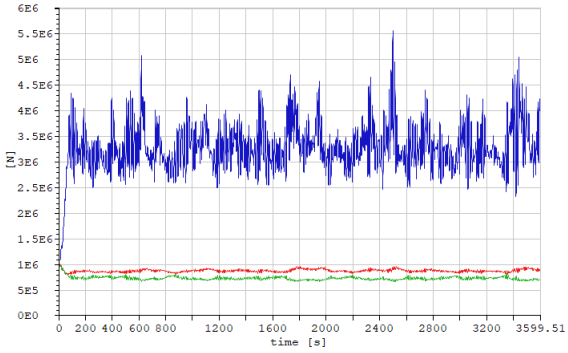
Figur A.3: Optimeringsprosess av dimensjonerende laster mot MBL med akkumulert delskade for forankringsline 1 neglisjert

## Resultater fra ULS-tilfeller ved alle restriksjoner

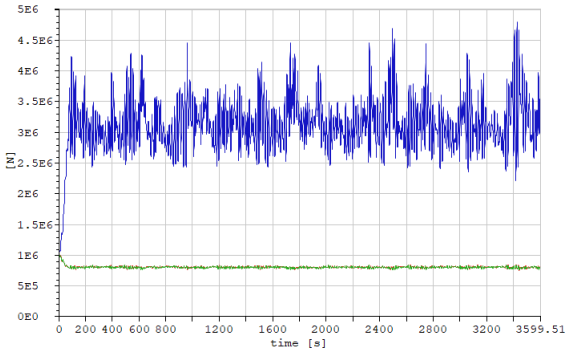
Blå farge viser ULS-tilfelle 67, rød farge viser ULS-tilfelle 72 og grønn farge viser ULS-tilfelle 22. Grafene viser krafter i linene som en funksjon av tiden.




(a) Krefter ved line 1




(b) Krefter ved line 2

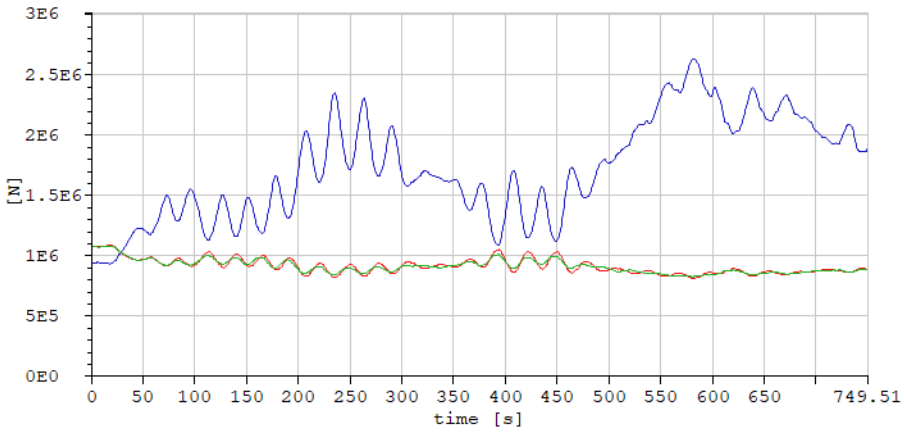



(c) Krefter ved line 3

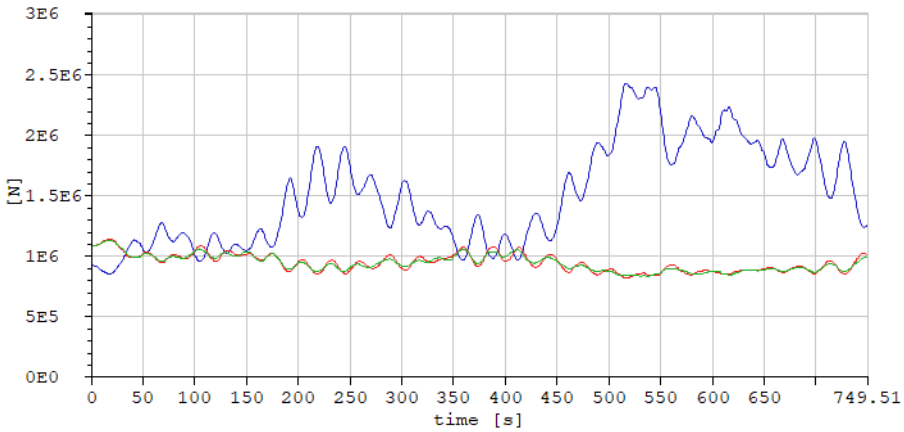
Figur A.4: Linekrefter ved ULS-tilfeller

## Resultater fra FLS-tilfeller

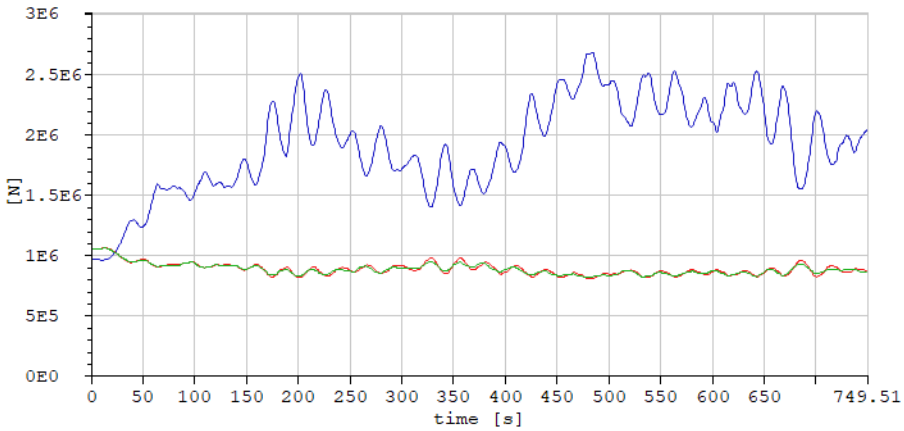
Grafene viser linekrefter ved samtlige FLS-tilfeller. Simuleringene varte i 750 sekunder. Blå farge er for line 1, rød farge for line 2 og grønn farge for line 3.



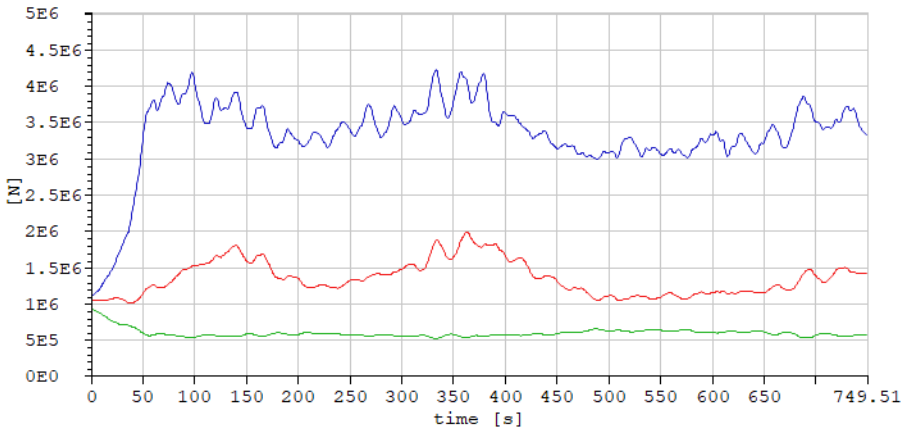

Figur A.5: Linekrefter ved FLS-tilfelle 1



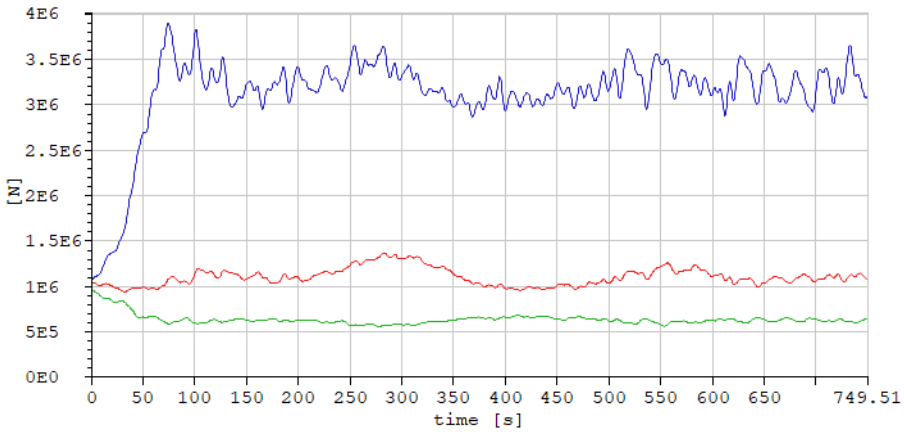

Figur A.6: Linekrefter ved FLS-tilfelle 2



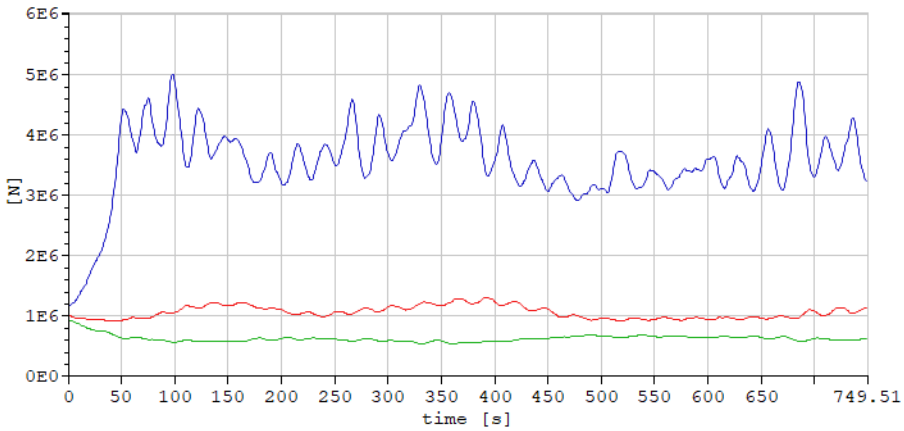

Figur A.7: Linekrefter ved FLS-tilfelle 3



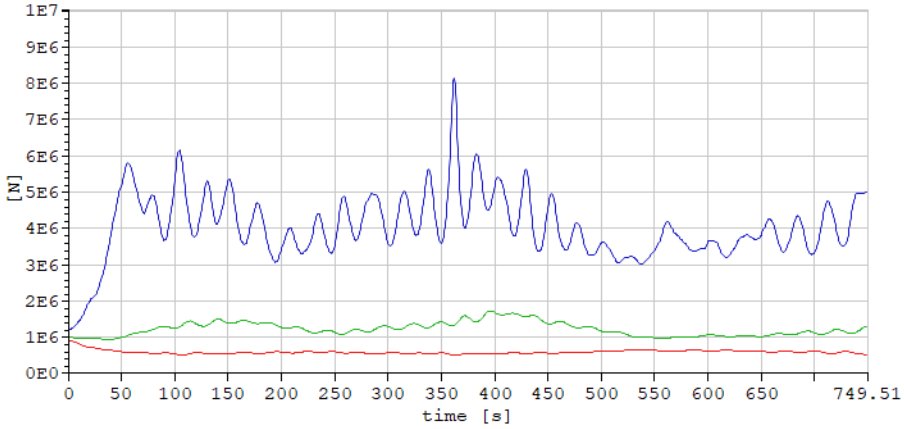

Figur A.8: Linekrefter ved FLS-tilfelle 4



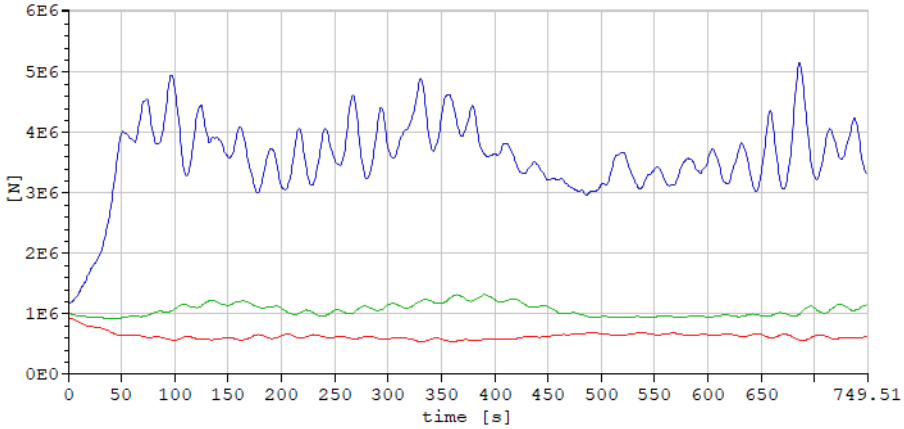

Figur A.9: Linekrefter ved FLS-tilfelle 32



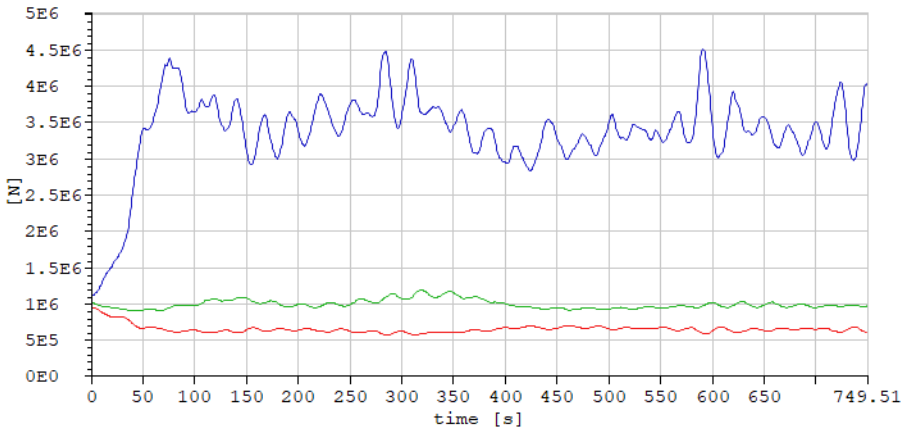

Figur A.10: Linekrefter ved FLS-tilfelle 33



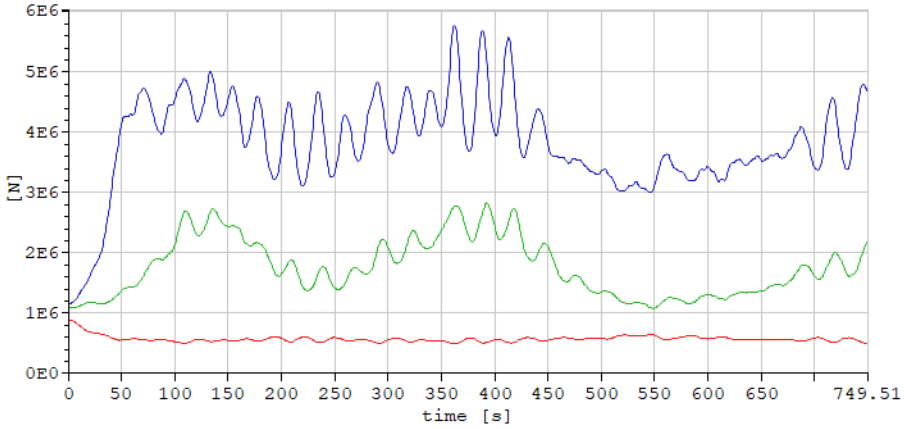

Figur A.11: Linekrefter ved FLS-tilfelle 39



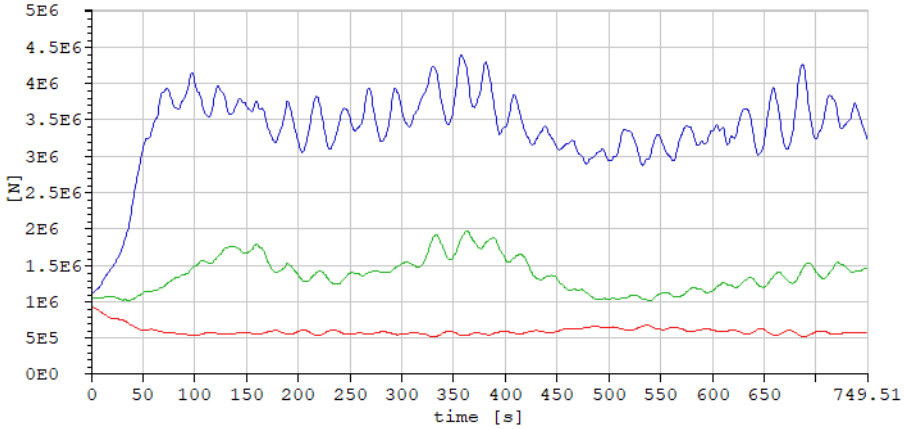

Figur A.12: Linekrefter ved FLS-tilfelle 52



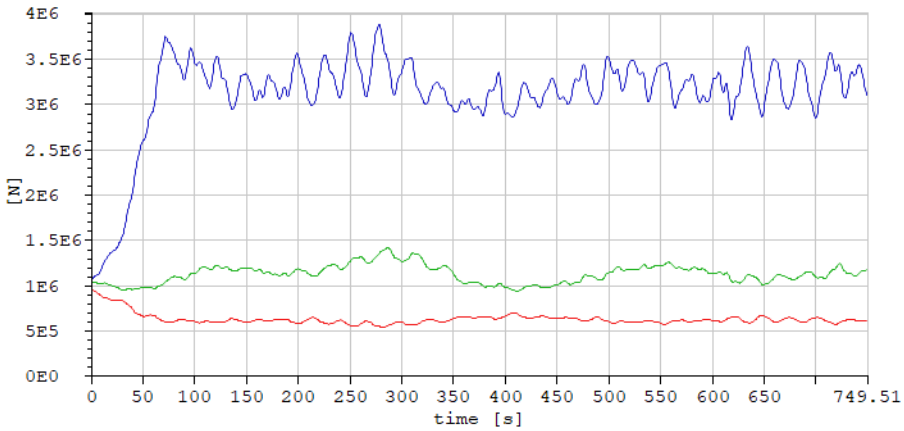

Figur A.13: Linekrefter ved FLS-tilfelle 53.1



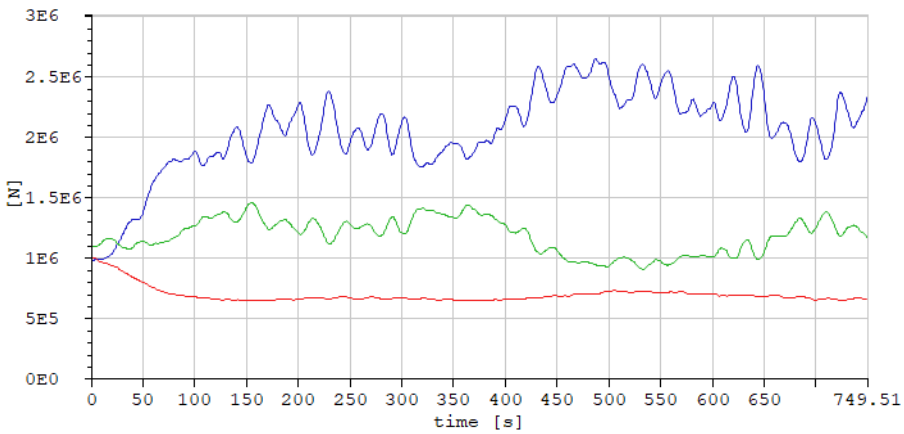

Figur A.14: Linekrefter ved FLS-tilfelle 53.2




Figur A.15: Linekrefter ved FLS-tilfelle 60



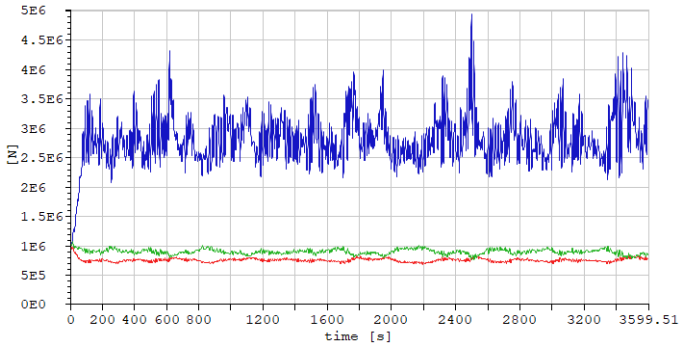

Figur A.16: Linekrefter ved FLS-tilfelle 61



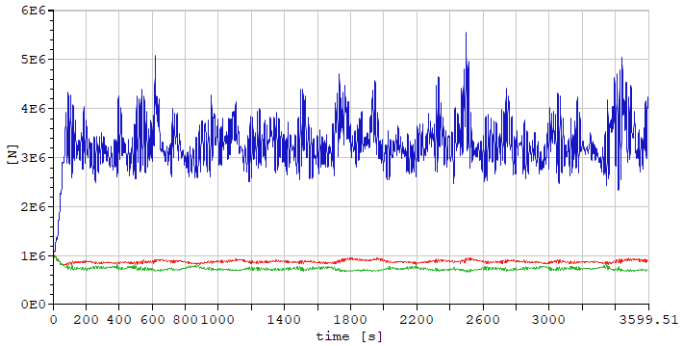

Figur A.17: Linekrefter ved FLS-tilfelle 81

## ULS-tilfeller under reduserte restriksjoner

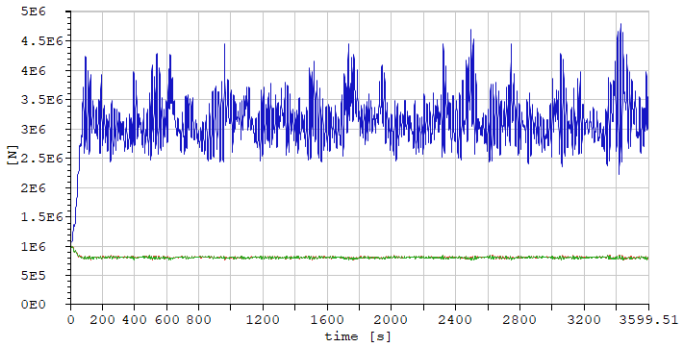
Grafene viser kreftene i samtlige ULS tilfeller med dimensjoner som er funnet ved optimeringsrutinen når akkumulert delskade i forankringsline 1 er ignorert. Blå farge for line 1, rød farge for line 2 og grønn farge for line 3.




(a) Krefter ved line 1




(b) Krefter ved line 2




(c) Krefter ved line 3

Figur A.18: Linekrefter ved ULS-tilfeller under reduserte restriksjoner

**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**
Noregs miljø- og biovitskapelege universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway