



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi
Professor Tor Anders Nygaard

Utvikling av et forankringssystem basert på polyester og nylon

Development of a mooring system based on
polyester and nylon

Heming Smedsrud Aldrin

Maskin, prosess- og produktutvikling
Fakultet for realfag og teknologi

Forord

Denne Masteroppgaven er skrevet våren 2018 ved Fakultetet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven er avsluttende for et masterstudium i Maskin, prosess- og produktutvikling og har et omfang på 30 studiepoeng.

Med et økende behov for energi blir verdenssamfunnet nødt til å utvikle fornybare energikilder som er konkurransedyktige. Hvis ikke vil miljøkonsekvensene fra dagens energiproduksjon kunne bli umulige å reversere. Et lovende alternativ er flytende vindkraft som har nesten ubegrenset med arealet å ta av, men er i dag holdt tilbake av store kostnader.

For å gjøre *offshore* vindkraft mer konkurransedyktig omhandler denne oppgaven utviklingen av et innovativt forankringssystem som ser på muligheten til å redusere kostnadene til forankringssystemet. Dette gjøres ved å etterligne effekten *catenary*-effekten fra at tradisjonell kjettingforankring, med de billigere materialene: polyester og nylon.

Jeg vil gjerne takke min hovedveileder, professor Tor Anders Nygaard, for god veiledning rundt oppgaven og diskusjoner til mulige løsningsalternativer. Jeg må også takke biveileder Marit Irene Kvittem for innspill og råd til oppgaveskriving. I tillegg må jeg takke Dr. Techn. Olav Olsen som inviterte på idemyldring tidlig i prosessen og som har gitt estimater brukt i denne oppgaven.

Ås, 15. mai 2018

Heming Smedsrud Aldrin

Sammendrag

For å nå målene som nesten alle verdens land har blitt enige om gjennom Parisavtalen, må jobben intensiveres rundt fornybare energikilder. Vindkraft har pekt seg ut som en av de ledende alternativene til fossilt brensel og flytende *offshore* vindkraft gir mulighet for å nå store uberørte vindresurser som ikke var mulig tidligere.

Denne oppgaven tar for seg oppgaven å utvikle et forankringssystem basert på polyester og nylon. Da materialene er relativt billige kan dette redusere kostnadene og gjøre flytende vindkraft mer konkurransedyktig. Den halvt-nedsenkbar-plattformen OO Star, utviklet av Dr. Techn. Olav Olsen, er valgt til evalueringen på 100 meters dyp for et bruddgrensetilfelle (ULS) og en utmattingstilstand (FLS).

Som referansetilfellet ble et tradisjonelt kjettingssystem med kjettingløkker på 147 mm og en ankerradius på 744 meter valgt. Simuleringer ble så kjørt i programmet 3DFloat for å gi et estimat på kreftene det innovative forankringssystemet måtte tåle.

Systemet består av en polyesterline mellom *fairlead* og ankeret som blir strammet opp av et nylontau festet i en anker rett under plattformen. Ved å dra i polyestertauet endres vinkelen ved *fairlead* som påvirker den horisontale kraften på plattformen.

For å kunne utvikle et best mulig system ble en manuell optimaliseringsprosess utarbeidet. Ved å fjerne alle ytre påvirkninger og se på kun en av forankringslinene ble de ulike parameterne gjennomgått systematisk for å evaluere effekten de hadde på *fairlead*. Ut fra dette ble et oppsett bestemt.

Det innovative lineoppsettet og baseline ble simulert under like omstendigheter for å gi best mulig sammenligningsgrunnlag. Før resultatene ble sammenlignet for å kunne vurdere polyester-nylon-systemet opp mot baseline.

Resultatene viste seg vanskelige å tolke og en grundigere evaluering er å anbefale. Likevel tyder resultatet på at systemet kan gjøre det like bra, hvis ikke bedre, ved et ULS. I tillegg til at nylonlinene, og det ekstra ankeret under plattformen, ikke blir utsatt for store krefter.

Abstract

To reach the goals that almost every country has agreed on through the Paris agreement, must the development of renewable energy sources be intensified. Wind power has become one of the most competitive energy sources to fossil fuels and floating offshore wind power makes it possible to harvest vast unused resources previously not obtainable.

This thesis addresses the task of developing a mooring system based up on polyester and nylon. As the materials are relatively cheap, this can reduce costs and make floating wind power more competitive. The semi-submersible platform OO Star, developed by Dr. Techn. Olav Olsen, has been chosen for evaluation on the depth of 100m. These evaluations contain ULS and FLS

As a reference case, a traditional mooring system consisting of 144mm chains and an anchor radius of 744 meter were chosen. Simulations were then run with the software 3DFloat to provide an estimate for the forces the innovative mooring system had to withstand.

The innovative system consists of a polyester rope between the fairlead and the anchor, which is then kept in tension by a nylon rope attached to an anchor just below the platform. By pulling the polyester rope, the angle changes at the fairlead that affects the horizontal force on the platform.

To develop the best possible system, a manual optimization process was developed. By removing all external forces and look at only one of the anchor lines, the various parameters were reviewed systematically to evaluate the effect they had on fairlead. Based on this study a configuration was specified.

The innovative line setup and baseline were simulated under the same circumstances to provide the best possible comparison basis. Then the results were compared to evaluate the polyester nylon system against baseline.

The results proved difficult to interpret and a more thorough evaluation is recommended. Nevertheless, the results indicate that the innovative system can do as well, if not better, as baseline under the circumstances of ULS conditions. In addition to the fact that the nylon ropes and the extra anchor underneath the platform are not exposed to great forces.

Innholdsfortegnelse

Forord	II
Sammendrag	IV
Abstract	VI
Figurliste.....	XI
Tabelliste	XIII
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Prosjektbeskrivelse	2
1.2.1 Problemstilling	2
1.2.2 Mål og begrensinger.....	2
1.3 Fornybar energi og vindkraft.....	3
1.3.1 Offshore vindkraft.....	3
1.4 Olav Olsen Wind Star Floater	5
1.5 3DFloat	5
2 Teori	6
2.1 Koordinatsystem.....	6
2.2 Fluider og Bernoulliligningen	7
2.3 Laminær og turbulent bevegelse.....	7
2.4 Svingning, oscillasjon og vibrasjon.....	7
2.5 Vind	7
2.6 Bølger	8
2.7 Bølgespekter – JONSWAP.....	8
2.8 Morisons ligning.....	8
2.9 Aksiell stivhet.....	9
2.10 Catenary effekt.....	10
2.11 Utmatting	10
3 Metodikk	11
3.1 Programvare.....	11
3.2 Simulering	11

3.3	Antagelser.....	11
4	Forankringssystemet og materialvalg.....	12
4.1	Forankringssystemet.....	12
4.1.1	Baseline	12
4.1.2	Nytt forankringssystem	12
4.1.3	Linelengde og ankerradius	13
4.2	Materialvalg.....	13
4.2.1	Stivhet.....	13
4.2.2	Polyester	14
4.2.3	Nylon.....	15
5	Baselinestudier	18
5.1	Input data	18
5.1.1	Vind.....	18
5.1.2	Bølger	18
5.2	Presentasjon av analysetilfeller og resultater.....	18
5.2.1	FLS	18
5.2.2	ULS	20
6	Optimaliseringsprosedyre.....	24
6.1	Simuleringsoppsett	24
6.2	Variabler og begrensninger	26
6.3	Ankerradien	26
6.4	Tilkoblingspunkt.....	27
6.5	Linelengde og oppstramming	27
7	Optimaliseringsresultater	28
7.1	Polyesterline - Initial ankerradius.....	28
7.2	Polyester-nylon studie	30
7.2.1	Tilkoblingsstudie.....	30
7.2.2	<i>Pre Strain Long</i> -studie	31
7.2.3	Studie av ankerradie	32
7.2.4	Nylonrepdiameter	34
7.3	Fintuning.....	35
7.4	Begroing	36

7.5	Oppstramming	38
8	Resultater og diskusjon	44
8.1	Oppsett for fullskalasilulering	44
8.2	ULS.....	44
8.2.1	Bevegelse av plattform.....	44
8.2.2	Spenninger ved fairlead.....	46
8.2.3	Spenninger ved ankeret	47
8.2.4	Nylon og midtanker.....	48
8.3	FLS	50
8.3.1	Bevegelse av plattform.....	50
8.3.2	Spenninger ved fairlead.....	51
8.3.3	Spenninger ved ankeret	52
8.3.4	Nylon og midtanker.....	53
8.3.5	Utmatting.....	54
9	Konklusjon og videre arbeid	57
9.1	Konklusjon.....	57
9.2	Videre arbeid	58
10	Referanser.....	61
11	Appendix	64
11.1	Enlinede simuleringresultater.....	64
11.2	Fullskala testing	67
11.2.1	ULS	67
11.2.2	FLS	72

Figurliste

Figur 2-1: Plattformen OO Star med forflytning og rotasjon navngitt	6
Figur 4-1: Forholdet mellom linelengde og ankerradius ved stram line. Det er her plottet mot hverandre og ankerradien mot forholdstallet	13
Figur 4-2: Forlengelse av flere materialer[1]	15
Figur 4-3: Prosentvist forhold mellom forlengelse og breaking load [2].....	15
Figur 4-4: E-modul plottet mot diameter og MBL for DB12	16
Figur 5-1: Bølgespekter for FLS tilfellet.....	19
Figur 5-2: Krefter i line 1	20
Figur 5-3: Krefter ved fairlead i henholdsvis line 2 og 3	20
Figur 5-4: Spenningen i lina som går parallelt med vindretningen.....	22
Figur 5-5: Krefter ved fairlead i line 2 og 3	22
Figur 5-6: Krefter i line en ved fairlead og ankeret. Simuleringen er gjort for de første 2300 sekundene og turbulens er skrudd på.	23
Figur 6-1: Plotting av oppsett for polyesterrep alene og med nylon	24
Figur 6-2: Posisjon til fairlead. Utgangsposisjonen er 37,9 m og amplituden til bevegelsen er 30 meter.....	25
Figur 7-1: Stivhetsplott for kun polyesterrep med en ankerradius på 100 og 744 meter. Her er den aktuelle stivheten til polyester plottet i svart mot kjettingen i baseline sin stivhet i grått. 29	
Figur 7-2: Stivhetsplott opp til 20 000 kN for 20 og 60 %. 150m og PLS20.	31
Figur 7-3: PSL 10 for 20 og 60 %.....	32
Figur 7-4: 200m PLS20.....	33
Figur 7-5: Stivhetsplot for studiet	34
Figur 7-6: Plottene til de oppsettene som er best og som tilfredsstiller kravene	36
Figur 7-7: Stivhet og horisontal kraft i fairlead for de to beste oppsettene.....	37
Figur 7-8: Den globale kraften i fairlead for polyester og baseline ut fra posisjon. 37.9 er nullpunktet.....	38
Figur 7-9: Samme oppsett som fungerte i forrige test, men forlengelsen av polyester fører til av stivhetsplottet ikke er mykt nok.	39
Figur 7-10: PSL 30 for nylon gir et stivhetsplott som er akseptabels, men kraften som virker i utgangsposisjonen for platformen er nå for høy	40
Figur 7-11: Stivhet- og kraft-posisjon-plott som består kravene.	40

Figur 7-12: Polyesterrepet er forlenger 1.5%. Denne konfigurasjonen har de klart laveste kreftene ved 37.9 meter, men yter aldri nok krefter på plattformen innenfor dens kriterium på maksimalt 30 meters forskyvning	41
Figur 7-13: 20% tilkoblingspunkt	41
Figur 7-14: Kraften horisontalt i fairlead mot bevegelsen av fairlead. Nullpunktet er satt til 2000 kN horisontalt og en negativ forflytning gir oppstramming av lina.....	42
Figur 8-1: Bevegelse i x og y-retning.....	45
Figur 8-2: Total avstand mellom plattformens posisjon og dens utgangsposisjon	45
Figur 8-3: Aksial kraft i fairlead 1 og 2 for baseline og polyester-nylon-systemet	46
Figur 8-4: Krefter i ankeret	48
Figur 8-5: Kreftene i midtankeret i z og x-retning globalt.....	49
Figur 8-6: Forflytning av plattformen i x-y-planet.....	50
Figur 8-7: Avstand mellom plattformens og dens utgangsposisjon.....	51
Figur 8-8: Aksialkraft i baseline og polyester ved fairlead.....	52
Figur 8-9: Krefter ved ankeret.....	53
Figur 8-10: Krefter i nylonline 1 og 2	54
Figur 8-11: Kraften i midtankeret i den globale x og z-retning	54
Figur 8-12: Histogram av aksialkreftene.....	55

Tabelliste

Tabell 2-1: Navn på forflytning langs og rotasjon om de forskjellige aksene	6
Tabell 2-2: Symbolforklaring	9
Tabell 3-1: Programvare og bruksområde	11
Tabell 4-1: Data for nylonrep av typen DB12 fra Bexco	16
Tabell 5-1: Laster ved FLS	19
Tabell 5-2: Krefter i ULS	22
Tabell 7-1: Data fra tester utført på kun et polyesterrep mellom fairlead og ankeret. *Baseline har en catenary effekt som sørger for at kjettingen aldri blir stram.	28
Tabell 7-2: Testparametere	30
Tabell 7-3: Krefter ved ulike konfigurasjoner når den globale stivheten er 9500 kN. Målingene er gjort i polyesterlina ved fairlead og hovedankeret i tillegg til nylonlina sitt anker.	30
Tabell 7-4: Parametere for studiet	31
Tabell 7-5: Resultater fra PSL-studiet	31
Tabell 7-6: Verdiene på parametrene ved studie av ankerradius på polyester-nylon-systemet	32
Tabell 7-7: Resultater fra simuleringen	33
Tabell 7-8: Parametere for studiet	33
Tabell 7-9: Resultater fra diameterstudiet	34
Tabell 7-10: Parametere for en fungerende line	35
Tabell 7-11: Verdier for kreftene i de tre linesegmentene samt forflytning av fairlead fra utgangsposisjonen. Prosent representerer utnyttelsen av tillat linekraft. Konfigurasjoner som det presenteres stivhetsplott for er merket med fet skrift	35
Tabell 7-12: Parametere ved begroing	36
Tabell 7-13: Krefter i linesegmentene når nylon er med begroing	37
Tabell 7-14: Resultater med forlenging av polyesterlina	39
Tabell 7-15: Endelige spesifikasjoner for polyester- og nylonliner	42
Tabell 8-1: Verdier for Baseline. Da line to og tre er så like er kun verdier for line en og to presentert.	55
Tabell 8-2: Verdier for det innovative forankringssystemet. Da line to og tre er så like er kun verdier for line en og to presentert.	56

1 Introduksjon

Her presenteres bakgrunnen for og beskrivelsen av masteroppgaven. Deretter kommer en kortere introduksjon av fornybar energi med spesielt fokus på vindkraft, før en grundigere innføring i flytende offshore vindkraft blir beskrevet. Til slutt blir plattformen denne oppgaven omhandler beskrevet, før simuleringsverktøyet 3DFloat blir forklart nærmere.

1.1 Bakgrunn

Jordens befolkning får bedre helse og forventet levealder stiger. Det er forventet at verdens befolkning vil flate og nå en verdi rundt 11 milliarder i år 2100 [3]. I tillegg øker kjøpekraften til mange og energiinfrastrukturen blir bedre som gir en ytterligere økning i etterspørsel av energi. Dette har skjedd i mange år nå og utvinningen av forurensende energikilder som olje, gass og kull stått for store deler av tilbudssiden. Selv om det har vært snakk om miljøkonsekvensene av fossilt brensel i flere tiår, har ikke energisammensetningen endret seg nevneverdig frem til i dag [4]. Etter at Parisavtalen ble signert har det derimot skjedd et skifte med økt fokus på fornybare energikilder.

Vannkraft er den største fornybare energikilden i dag og har vært bygd i lang tid, da dette er en billig og forutsigbar kilde til strøm. Problemet er begrensningen på vann og høydeforskjell og setter et tak på antallet vannkraftverk som kan bygges. Mange egnede steder er allerede bygget ut i dag slik at en økning i produksjon er ganske begrenset. For å dekke behovet for fornybar energi er derfor et godt alternativ: vindkraft. Vindkraft kan produsere store mengder strøm relativt billig, men det har vært motstand mot utbygging på grunn av støy, utseende og påvirkning på dyreliv. En løsning til denne motstanden er vindturbiner til havs der ingen mennesker blir berørt.

Vindparker til havs har mange fordeler som taler for seg. Strømproduksjonen kan være svært stor fordi vinden blåser jevnere og med større styrke grunnet det flate landskapet. I tillegg til er det ingen begrensning på plass som gjør det mulig å bruke større turbiner og bygge parker over større områder. *Offshore* vindkraft er for det meste bunnfast og kan brukes på opptil 50 meters dyp. Er det dypere enn dette kan det brukes flytende vindturbiner i stedet, som åpner for vindkraft der det ikke før var mulig. I Europa skal hele 80% av alle vindkraftresurser ligge på dyp over 60 meter [5] må høstes ved bruk av flytende plattformer. Ulempen med flytende turbiner er høye kostnader på grunn av konstruksjon, installasjon og tøffe værforhold.

Utviklingen for *offshore* vindkraft har beveget seg raskt de siste årene med kraftig reduksjon i pris og kan bli et konkurransedyktig alternativ i mange markeder [6]. For å få dette til må det arbeides videre med kostnadsreduksjon og en stor utgiftspost er forankringssystemene som består av store mengder stål som ligger på havbunnen. Det er estimert å utgjøre mellom 10 og 15% av den totale kostnaden for den flytende vindparken Hywind Scotland [7].

1.2 Prosjektbeskrivelse

Tema for oppgaven ble vurdert siden september 2017 gjennom samtaler med veileder professor Tor Anders Nygaard. Høsten 2017 ble det gjennomført et prosjekt på temaet rundt bruk av kjettingforankring på flytende vindturbiner og fungerte som et forprosjekt til denne oppgaven. På bakgrunn av erfaringer med arbeidet gjort i det prosjektet ble temaet for denne masteroppgaven bestemt og arbeid påbegynt i januar 2018.

1.2.1 Problemstilling

Det er høye kostnader ved forankring av flytende vindturbiner, mye på grunn av kjettingen som brukes. Fiberrep er et billigere materiale og det skal vurderes om et system basert på dette vil overleve de tøffe forholdene en slik plattform kan oppleve på havet.

1.2.2 Mål og begrensninger

Hovedmål

Hovedmålet med oppgaven er å redusere kostnadene til forankring ved å lage et forankringssystem basert på fiberrep.

Delmål

1. Øke forståelse for problemet ved å lese seg opp på teori og tidligere gjennomførte prosjekter.
2. Forbedre forståelsen for programvaren 3DFloat.
3. Øke kunnskapen til python for enkel datahåndtering.
4. Kartlegge kreftene i et fungerende forankringssystem basert på kjetting.
5. Utvikle et fiberrepsystem
6. Optimalisere fiberrepsystemet
7. Simulere systemet i fullskala og analyse resultater mot kjettingsystemet.

Begrensninger

1. Det vil kjøres analyser for to evalueringstilstander.
2. Det skal kun gjøres antagelser rundt utmatting.
3. Ingen økonomiske analyser
4. Manuell optimalisering

1.3 Fornybar energi og vindkraft

Parisavtalen ble vedtatt i 2015 av 175 land med det formål å holde økningen i global gjennomsnittstemperaturen godt under 2°C og at fra andre halvdel av århundret skal menneskeskapt utslipp ikke være større enn naturens opptak av klimagasser [8]. Dette har gjort at fokuset på klimaendringer og reduksjon av klimagasser har økt drastisk.

Frem til 2020 er det forventet at over halvparten av den økte kapasiteten til fornybare energikilder i Europa vil komme fra vindkraft med solenergi som nummer to på 37% [9]. Dette vil føre til at vindkraft kan dekke hele 16.5% av det elektriske kraftbehovet og overta rollen til vannkraft som den største fornybare energikilden i Europa. Det er forventninger til at installert vindkraft skal tredobles frem til 2030 hvor offshore vindkraft står for ca. 21% av denne økningen [10]. Dette vil si at vindkraft på land skal dobles, mens til havs skal kapasiteten øke til fem ganger dagens produksjon. Da kan dekningsgraden av EUs elektriske behov øke fra dagens 10% til rundt 30%, og vil også kunne skape rundt 600 000 jobber i EU.

En tydelig trend for vindkraft er at størrelsen på generatorene som blir bestilt er økende, som øker energien som kan genereres per vindturbin. For landbaserte turbiner har kapasiteten økt med 1 MW i 2017, fra 2.5 MW i 2014. Den samme trenden er tydelig for *offshore* vind, men her er generatorene omtrent dobbelt så store. [10]

1.3.1 Offshore vindkraft

Organisasjonen «Wind Europe» anslår at offshore vindkraft vil øke sin utbyggingskapasitet og stå for 25% av ny vindkraftproduksjon innen 2020 hvor Storbritannia er den største aktøren. De anslår også at den klart største utbyggingen av offshore vindkraft vil bygges ut i Nordsjøen, som har en gjennomsnittlig dybde på 95 meter og ligger nært denne oppgavens tilstand. [10]

1.3.1.1 Bunnfaste konstruksjoner

Bunnfaste vindturbiner er det som er vanligst og har vært i bruk i mange år. Dette er konstruksjoner som fundamenteres til havbunnen på dyp opp til 70 meter. Det finnes forskjellige måter å gjøre dette på: monopæl, gravitasjonsfundament, trefotsfundament og jacketfundament.

Den vanligste av dem er i dag monopæler på grunn av deres enkle design og installering. Monopæler er en forlengelse av tårnet som er presset opp til 20 meter ned i havbunnen og egner seg best på grunt vann opp til 30 meters dyp.

Trefotsfundament er en struktur som plasseres på bunnen og som på hver av sine tre ben presser en pel ned i grunnen. Denne strukturen egner seg for større dyp og krever lite forberedelser på stedet den skal plasseres.

Gravitasjonsfundament holdes på plass på grunn av sin egen vekt eller ved å legge til ekstra vekt for å holde tårnet stabilt ved ytre påkjenninger. Fordi det ikke er festet til noe passer det best der vind, bølger og strømninger ikke er for store.

Jacketstrukturer er tre eller firebente tårn hvor benene er koblet sammen for økt styrke. Pelere penetrerer havbunnen i enden av hvert ben og holder strukturen stabil. Denne strukturen får mindre påkjenninger fra bølger grunnet sin utforming og egner seg best på 20 til 50 meters dyp.

1.3.1.2 Flytende konstruksjoner

Når dybden vindturbinene skal plasseres på passerer 50 meter, begynner flytende konstruksjoner å bli mer gunstige og det er spådd en reduksjon i energikostnaden på mellom 38 og 50 % innen år 2050 [5]. De tre hovedteknologiene for flytende vindturbiner i dag er: *tension-leg-bouy*-plattformer, *spar* og halvt-nedsenkbare plattformer også kaldt *semi submersible*.

Tension-leg-bouy-plattformer er den eneste av teknologiene som bruker stramforankring. Dette gjør at oppdriften i plattformen og liene virker mot hverandre og gjør konstruksjonen mer stabil. Til gjengjeld må linene ta opp store krefter og må derfor tåle mye.

En *spar*-plattform er et sylindrisk rør som flyter og holder vindturbintårnet over vann. Ved å ha mye last i bunn av cylinderen vil tyngdepunktet være under oppdriftspunktet som motvirker rotasjon og holder tårnet stabilt.

En halvt-nedsenkbar plattform har fordelen av at den ikke går like dypt i vannet som en *spar* og kan derfor monteres billigere ved land for så å fraktes ut til monteringsstedet. De kan også taues inn til land for vedlikeholdsarbeid i stedet for å gjøre det ute på åpen sjø med bruk av dyre båter.

1.3.1.3 Slakk forankring

Dette er et forankringssystem som består av gjerne tre kjettingliner som står 120 grader på hverandre. På hundre meters dyp kan de da komme opp i 900 meter og er festes i et anker på havbunnen. Et slakt system kalles *catenary* som betyr at kjettingens egenvekt sørger for at linene aldri skal bli stramme. Ved å dra i en line heves kjettingen fra havbunnen og den ekstra vekten vil øke kraften forankringslina drar tilbake med. På den måten øker kraften jo lenger plattformen er ute av posisjon og gjør at den beveger seg rundt sin likevektsposisjon.

1.3.1.4 Utvikling og forbedringspotensial

Flytende vindparker har kun blitt en realitet det siste året gjennom Statoil sitt Hywind Skottland prosjekt som er den første i verden av sitt slag. Derfor er dette fortsatt veldig ny teknologi som trenger videre utvikling før det kan være konkurransedyktig med dagens energikilder. Det må

derfor reduseres kostnader ved konstruksjon, installasjon og drift og øke levetid for å få dette til.

Kjettingløkkene som brukes i dag koster svært mye. Det er to grunner til dette. For det første koster kjettingene veldig mye, fordi de er såpass store. De må være en viss størrelse for å tåle påkjeningene, men også for å gi den *catenary*-effekten som er nødvendig. Det andre er installasjonskostnadene som er høye på grunn av den høye dagraten til nødvendige spesialbåter. Den store massen og størrelsen på kjettingen begrenser mengden båtene kan ta med seg per tur som gjør at installasjonen tar lang tid.

1.4 Olav Olsen Wind Star Floater

Denne oppgaven omhandler simuleringer på den halvt nedsenkbare plattformen Olav Olsen Wind Star Floater forkortet OO Star utviklet av Dr.techn. Olav Olsen AS. Den er roterende symmetrisk med tre armer, som står 120 grader på hverandre, ut fra tårnet. I enden av hver arm er hule sylindere, som kalles bøtter, som gir oppdrift. Designet motvirker svai i tårnet og holder plattformen stabil selv i dårlig vær. Siden den har tre flytere i stedet for en, slik en spar plattform, går den ikke like dypt i vannet som gjør det mulig å montere vindturbinen ferdig ved kai. Ferdigmontert tårn, generator og rotor kan så bli tauet ut til montering. Når den er kommet ut til posisjon kan den da enkelt festes til forankringslinene og være klar til bruk. Dette er en stor fordel ved installasjon og kan være svært kostnadsbesparende da man slipper å leie inn dyre spesialbåter til store løft til sjøs hvor dårlig vær kan gjøre oppgaven vanskelig. [11] [12]

1.5 3DFloat

3DFloat er brukt til alle simuleringer gjennomført til denne oppgaven. Det er et modelleringsverktøy som er utviklet ved IFE og NMBU (tidligere UMB) spesielt for flytende vindturbiner, som kalkulerer dynamiske respons i tidsdomenet. Programmet har blitt validert gjennom bølgetanktesting og ved sammenligning med andre simuleringverktøy.

Simuleringsverktøyet er av typen aero-hydro-servo-elastisk som betyr:

Aero: Aerodynamiske laster i form av vind og turbulens

Hydro: Laster fra bølger og strømminger

Servo: Kontrollsystem som styrer driften av rotorblader og generator

Elastisk: Baserer seg på ikke-lineær elementmetode

[13] [14]

2 Teori

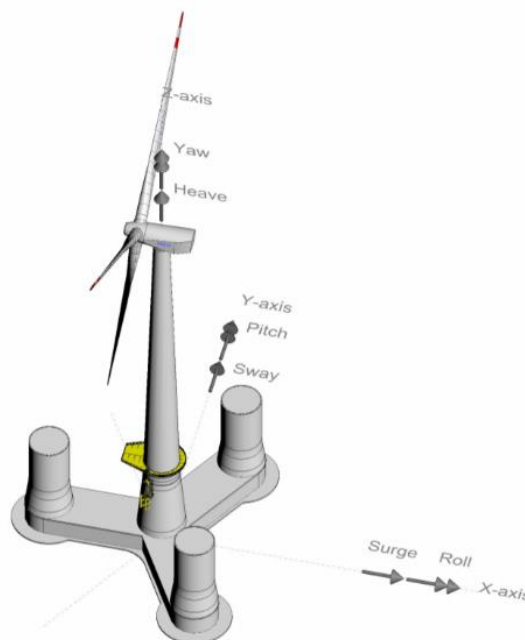
I dette kapittelet skal teorien bak simuleringene i 3DFloat beskrives. Det forklares også hvordan fenomenene vind, bølger og annet påvirker en flytende vindturbin, for å gi økt forståelse for de endelige resultatene.

2.1 Koordinatsystem

For å enkelt kunne beskrive vindturbinens bevegelse og posisjon er OO Star definert ut fra et kartesisk koordinatsystem. De ulike frihetsgradene er satt etter praktiske forhold i tillegg til å være navngitt. Origo er satt til senter av konstruksjonen i høyden til vannlinjen med x- og y-aksen som utgjør et plan gjennom havflaten. X-aksen er satt positiv i motsatt retning av der turbinen peker for å være positiv i retning av vinden. Z-aksen går normalt på havflaten med positiv retning oppover, gjennom tårnet på vindturbinen. Navnene på forflytning langs, og rotasjon om, de ulike aksene er gitt av Tabell 2-1 og er illustrert på Figur 2-1.

Tabell 2-1: Navn på forflytning langs og rotasjon om de forskjellige aksene

Akse	Forflytning	Rotasjon
x	<i>Surge</i>	<i>Roll</i>
y	<i>Sway</i>	<i>Pitch</i>
z	<i>Heave</i>	<i>Yaw</i>



Figur 2-1: Plattformen OO Star med forflytning og rotasjon navngitt

2.2 Fluider og Bernoulliligningen

Fluid er en samlebetegnelse på væsker og gasser fordi de har svært like egenskaper. Bernoullis ligning er en forenklet måte å beskrive deres oppførsel på under forutsetning om at fluidet er inkompressibelt, ikke viskøst og ikke turbulent. Ligningen brukes til å beskrive sammenhengen mellom trykk i , og hastigheten v , en strømning og er som følger:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g \times z = \text{konstant} \quad (1)$$

Her er p trykket, ρ tettheten, v hastigheten, g tyngdekraften og z høyden til væsken.

Dette vil si at hvis hastigheten stiger vil trykket eller den potensielle energien synke. [15] [16]

2.3 Laminær og turbulent bevegelse

Laminær bevegelse er når partikler i fluider beveger seg som strømlinjer som aldri krysser hverandre. Det motsatte av laminær bevegelse er turbulent bevegelse, som vil si at det er uregelmessige variasjoner i fluidet og skyldes at den kinetiske energien overstiger dempingseffekten fra viskositeten og det dannes virvler. Dette kommer av variasjoner i trykk, temperatur og tetthet, som når fluidet beveger seg rundt forankringslinene, plattformen og vindturbinen. ed og har innvirkning på en flytende vindturbin gjennom påvirkning fra vind og vann. [16] [17]

2.4 Svingning, oscillasjon og vibrasjon

Dette er tre begreper som i fysikken definerer gjentakende bevegelser rundt et likevektspunkt. Harmoniske svingninger er den enkleste formen og vil si at kraften ved forskyvning er proporsjonal med avviket fra likevektsposisjonen. Slike bevegelser kan da beskrives av sinuskurver med konstant periode. [18] [19]

2.5 Vind

Når luftmasser blir varmet opp minker tettheten og luften stiger, slik at det dannes ett undertrykk. Da vil nærliggende luftmasser strømme til for å utjevne trykket og det dannes vind. Hastigheten på vinden avhenger av trykkforskjellen, men også av topografien som beskriver terrengforhold. Hvis det høy topografi, som i en by, øker friksjonen mellom vinden og jordoverflaten som forårsaker turbulens og hastigheten blir redusert. På grunn av dette er vindstyrken lavere nær jordoverflaten, enn høyere opp i luften. Den lave topografien på havet er grunnen til at vinden er jevnere og vindstyrken sterkere, som gir *offshore* vindturbiner en fordel.

2.6 Bølger

Overflatebølger kommer på havet kommer av at vinden påfører bevegelse på vannet som forplanter seg til bølger. Hvor store bølgene bli er det tre faktorene som bestemmer: vindhastighet, varighet og avstand den vinden blåser over. Høyere verdier på parameterne gir da større bølger, men ikke i det uendelige. Blåser vinden lenge nok oppstår det likevekt og bølgene slutter å vokse. [kilde]

Hvis vanndybden er mye større enn bølgehøyden og bølgekrappheten er liten kan Airys bølge teori brukes til å beskrive regulære bølger ved å se på dem som todimensjonale. Vannet defineres da som homogent og ikke-kompressibelt og overflatetrykker anses å være konstant. Airys ligning er som følger:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(\omega t - kx) \quad (2)$$

Her er H bølgehøyden, ω bølgefrequensen i radianer, t tiden, k bølgetallet i radianer og x posisjonen i meter. [20]

På havet kan det virke som om bølgene er tilfeldige og skyldes at det er mange kilder til bølger som gjør at det oppstår en superposisjon av alle bølgene. Dette er da en sammenslåing av bølger med ulik bølgehøyde, bølgelengde og periode og kalles irregulære bølger. For å beskrive slike bølger må man ta i bruk statistiske verktøy og målinger. Et begrep som da brukes er signifikant bølgehøyde som vil si middelveidien til den største tredjedelen av bølgene.

2.7 Bølgespekter – JONSWAP

Et bølgespekter er et spekter som beskriver en samling av bølger. Et bølgespekter som er godt egnet for Nordsjøen er JONSWAP som står for Joint North Sea Wave Project. Dette var et prosjekt som gikk ut på å beskrive havbølger ut fra vindmålinger gjort i Nordsjøen. Det baserer seg på en Pierson-Moskowitz spekter som ble utviklet tidligere, men med antagelsen om at vinden og bølgene aldri kommer i likevekt. JONSWAP spekteret kan derfor representeres som et PM spekter. [21] [22] [23]

2.8 Morisons ligning

Morisons ligning beskriver krefter som virker på elementer i vann. Det er en empirisk ligning som trenger data om Keulegan-Carpenter tallet, Reynolds tall og overflateruheten for å bestemme treghetskoeffisienten og dragkoeffisienten. Ligningen består av to deler, en for treghetskraft og en for drag-kraft. Når man ser på tilfeller der også elementet er i bevegelse ser ligningen slik ut:

$$F_{TOT} = F_{FK} + F_{AM} + F_D \quad (3)$$

Der første del er Froude-Kryvlov kraft, andre er addert masse og siste ledd er dragkraften. Ved å skrive ligningen helt blir den:

$$F = \rho V \dot{u} + \rho C_a V (\dot{u} - \dot{v}) + \frac{1}{2} \rho C_d A (u - v) |u - v| \quad (4)$$

Parameterne er forklart i Tabell 2-2

Tabell 2-2: Symbolforklaring

Symbol	Forklaring	Enhet
F	Kraft	N
ρ	Massetetthet	kg/m ³
V	Volumet til objektet	m ³
\dot{u}	Akselerasjonen til fluidet	m/s
C_a	Koeffisient for tilleggs masse grunnet treghet ved akselerasjon av fluidet	-
\dot{v}	Strukturens akselerasjon	m/s ²
C_d	Drag koeffisienten	-
A	Arealet	m ²
u	Fluidets hastighet	m/s
v	Strukturens hastighet	m/s

[24]

2.9 Aksiell stivhet

Stivheten til en plattform fra en stram ankerline langs dens retning beskrives av formelen:

$$k = \frac{E \times A}{L} \quad (5)$$

Her er E e-modulen til materialet, A er tvernsnittarealet og L er lengden på lina.

Denne ligningen kan altså beskrive stivheten på en stram line som igjen kan brukes til å forklare hele plattformens stivhet. Stivheten til en plattform forankret med stramme liner er avhengig av

forankringslinenes materiale, form og grensebetingelser og beskriver da kraften som kreves for å forflytte plattformen en gitt lengde.

For slakke forankring vil ikke materialets egenskaper være av stor betydning. Det er her den geometriske stivheten ved heving av forankringslina fra havbunnen som oppstår. [25]

2.10 Catenary effekt

Catenary er navnet på kurven en line festet i hver ende danner grunnet sin egen vekt. Det dannes da et spenn i lina som er større enn vekten skulle tilsi på grunn av geometrien lina danner. Denne effekten virker inn på kjettingen i baseline og fører til en lavere angrepsvinkel på ankeret, som gjør det mulig å bruke drag-anker som gjerne er billigere. Den fører også til at når plattformen beveger seg vil kjettingen, på motsatt side av bevegelsesretningen, strammes opp og løftes fra havbunnen slik at den fritthengende massen øker som gir økt motkraft på plattformen. [26]

2.11 Utmattning

Utmattingsbrudd er sprekkdannelse og vekst grunnet dynamisk påkjenning og fører til brudd. Det kan inntreffe ved spenninger langt under materialets fasthetsverdier hvis antall belastningsvekslinger er stort. Spenningsvidden, altså lengden toppunkt og bunnpunkt, er den viktigste parameteren for å beregne utmattingslevetiden. [27]

3 Metodikk

Her presenteres programvare og deres formål i denne oppgaven samt hvordan modellering er satt opp og simuleringer gjennomført. Det er gjennomført flere hundre mindre simuleringer for å forsikre seg om at alt stemmer før lengre analyser er blitt kjørt gjennom og analysert resultatet av.

3.1 Programvare

Her presenteres programvaren som er brukt i arbeidet med oppgaven og deres rolle.

Tabell 3-1: Programvare og bruksområde

Programvare	Formål
3DFloat	Simulere OO Star sin respons på laster fra vind, bølger og strømninger
ParaView	Animasjonsverktøy som gjør det mulig å se oppsettet til simuleringene i 3D og som sekvens av flere stillbilder
Notepad++	Redigering av <i>input</i> -filer kjørt i 3DFloat
Python(spyder)	Programmeringsverktøy brukt til postprosessering av <i>output</i> -filer fra 3DFloat. Organiserer data for enklere datahåndtering.
Excel	Organisering av og grafisk presentasjon av data.
TurbSim	Generere turbulensfiler

3.2 Simulering

Simuleringene som er gjennomført til denne oppgaven har vært gjort stegvis med fokus på å endre en ting om gangen. Dette for å redusere feilkilder samt å systematisk jobbe seg gjennom mulige problemer som måtte oppstå. Det har derfor blitt gjennomført mange mindre simuleringer før hver større simulering for å forsikre seg om at ønsket effekt skal kunne måles.

3.3 Antagelser

For å slippe større analyser for repenes styrke holdes spenningene i linene under 70 % av MBL for alle rep. [28]

4 Forankringssystemet og materialvalg

I dette kapitlet skal *baseline* og konsepter for forankringssystemer presenteres og redegjøres.

4.1 Forankringssystemet

Forankringssystemet til flytende vindturbiner består av liner som er trukket mellom ankeret og plattformen for å holde den på plass. Det er vanlig med 3 slike liner som står 120 grader på hverandre da dette gir stabilitet i alle retninger med den laveste kostnaden. På mellomdybden rundt 100 meter er det for dypt for bunnfaste konstruksjoner og samtidig for grunt til at et tradisjonelt *catenarysystem* fungerer godt.

For konstruksjoner til havs vil det oppstå begroing i form av tang og annet som legger seg på utsiden av konstruksjoner. Dette utgjør en betydning for rep som får økt sin diameter betraktelig og dermed endret oppførsel i vann. Begroingen varierer med havdybden, men for at dette ikke skal bli for mye arbeid velges det å bruke en midlere begroing over hele lengden til alle liner.

4.1.1 Baseline

Baseline er referansetilfellet i denne oppgaven og utgangspunktet for et nytt system forankringssystem. Det er en tradisjonelt trelinet *catenarysystem* bestående av kjettingliner ned til drag-anker. Kjettingen består av løkker på 147 mm i diameter og er festet mellom *fairlead* som er 12 meter over vannlinja og 37,9 meter fra senter av konstruksjonen til et anker på 744,4 meters avstand. Dette er verdier for plattformen OO Star og en typisk ankerlengde for 100 meters dyp.

4.1.2 Nytt forankringssystem

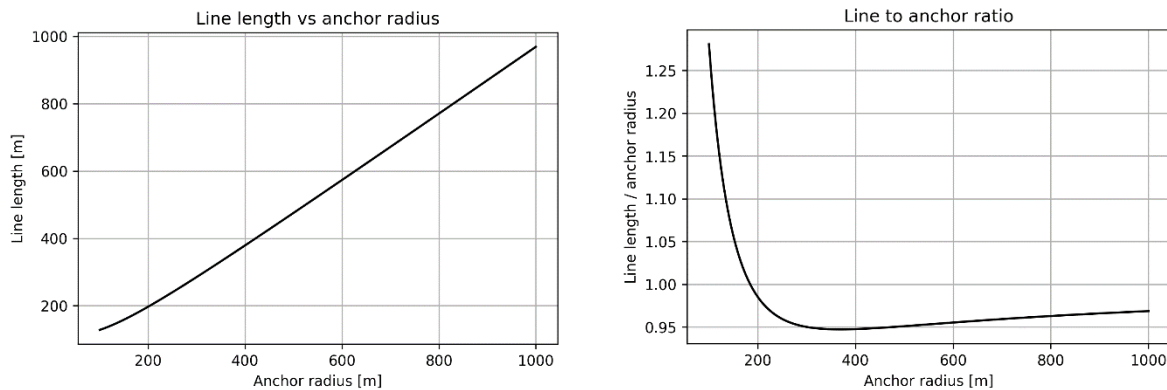
Kjettingssystemet i baseline har vist seg å fungere og vil derfor fungere som et referansepunkt. Hvis det er mulig å skape et system med samme kraft-forskyvningkarakteristikken som kjetting vil plattformen bevege seg likt og vil holde. Hvis dette er mulig uten å overskride tillatt spenning i repene er dette et godt utgangspunkt til design av et forankringssystem.

Det nye forankringssystemet som skal testes er et system som er en blanding av et *catenary* og er *tauntsystem*. Det kan gjerne kalles et halvt-*taunt* system og består av to stramme liner som er festet sammen for å gi en dempende effekt som skal etterligne den fra et *mooringsystem*. En stram line erstatter den originale kjettingen som går mellom plattform og anker. Deretter plasseres et ekstra anker på havbunnen rett under plattformens utgangsposisjon og et mykt tau trekkes så fra det nye ankeret til et punkt ute på hovedlina. Dette gjentas for alle de tre linene som dermed kan dele på ett felles anker i midten.

For innfestingen av fiberrep til ankeret og fairlead er det nødvendig med noen meter kjetting på grunn av usikkerheten for installasjonsmuligheter med fibertau. Denne lengden er høyst usikker og for denne oppgaven vil modellen ikke bestå av slike kjettingdeler.

4.1.3 Linelengde og ankerradius

Ankerradien er avstanden mellom z-aksen og ankerets posisjon, mens linelengden til en stramm line er fairlead og ankeret. Dette danner er forhold mellom de to som er avhengig av vinkelen og utgangsposisjonen til fairlead på 37.9 meter fra z aksen og 12 meter over havflaten. Ved å se på Figur 4-1 ser man at forholdet mellom de to er omtrent 1 etter passerte 200 meter og som forenkling antas derfor ankerradien og linelengden å være like etter 200 meter.



Figur 4-1: Forholdet mellom linelengde og ankerradius ved stram line. Det er her plottet mot hverandre og ankerradien mot forholdstallet

4.2 Materialvalg

For å få ønsket respons fra forankringssystemet må materialegenskapene være riktige. Det er tatt utgangspunkt i materialene polyester og nylon.

4.2.1 Stivhet

Stivheten til plattformen er hvor mye krefter som kreves for å forflytte den en gitt lengde. For stramme liner er den materielle stivheten som nevnt tidligere:

$$\frac{E \times A}{L} \quad (6)$$

Da denne er lineær vil et system med tre stramme liner, som et taunt system, ha stivheten tilnærmet to ganger linestivheten. Hvis plattformen blir påvirket av krefter fra samme retning som line en, vil stivheten da øke lineært med oppstrammingen av den ene lina og de to linene på motsatt side vil da slakkes og gi tilnærmet samme kraft redusert. Derfor blir stivheten tilnærmet to ganger den enlinede stivheten.

For de tradisjonelle kjettinglinene er dette aldri tilfellet da vekten av kjettingen sørger for kjettingen aldri er stram, men har kjettingen hengende i en catenary-kurve mellom fairlead og havbunnen. Det er dette som gir den økende stivheten etter hvert som kjettingen strammes opp. Da stivheten er eksponentiell kan stivheten antas å være avhengig av kun en line fordi linene på motsatt side varierer veldig lite i forhold til den stramme lina.

4.2.2 Polyester

Polyesterliner til forankringssystemer er relativt lite brukt, men har flere fordeler ovenfor kjetting med tanke på kostnader på materiale og installasjon og er derfor et godt valg [29]. Da materiale tåler store påkjenninger er dette et naturlig valg for hovedlina.

Polyesterrep	
MBL	20 000 kN
Diameter	200 mm
Diameter - begroing	320 mm

For å bestemme polyesterrepets egenskaper er det tatt utgangspunkt i at MBL for baseline på 20 000 kN. For dimensjonering [28] gjelder det at hvis man ikke overskrider 70% av MBL trengs ikke nærmere dimensjonering gjennomføres som vil si at største kraft i polyesterlina ikke skal overstige 14 000 kN.

For å gjøre arbeidet med polyesterspesifikasjoner enklere ble noen verdier og sammenhenger bestemt på bakgrunn av hva som er brukt i lignende prosjekter tidligere [12]. For polyesterrep ble forholdet mellom e-modulen, tverrsnittsarealer og MBL sagt å være omtrent som følger:

$$\frac{E \times A}{MBL} = 20 \quad (7)$$

I tillegg ble det også gitt tidligere brukte verdier til en polyesterline som har MBL på 20 000 kN. En slik line er oppgitt å ha en diameter på 200 mm og med middels begroing kan denne verdien øke til 320 mm. Dette gir forholdstallet for diameteren med og uten begroing på:

$$\frac{d(uten)}{d(begroing)} = \frac{200}{320} = 0.625 \quad (8)$$

Et tverrsnittsareal på:

$$A(poly, begroing) = \frac{\pi(d^2)}{4} = \frac{\pi(320^2)}{4} = 0.0804 \text{ m}^2 \quad (9)$$

Og et forhold mellom arealet med og uten begroing på:

$$\frac{A(uten)}{A(begroing)} = \frac{\pi(200^2)}{\pi(320^2)} = \frac{0.0314}{0.0804} = 0.39 \quad (10)$$

Fordi begroingen ikke påvirker linas stivhet må en modell hvor begroing er implementert bruke en lavere e-modul som tar hensyn til den økte diameteren. Derfor blir e-modulen til det kombinerte elementet bestående av polyesterline og begroing være:

$$E = \frac{20 * MBL}{A(poly, begroing)} = \frac{20 \times 20\,000\text{ kN}}{0.0804\text{ m}^2} \approx 4.98 \times 10^9\text{ N/m}^2 \quad (11)$$

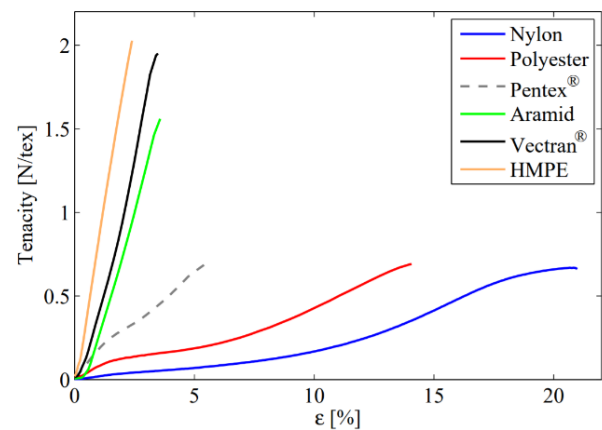
Den gjennomsnittlige tettheten er også bestemt til å være 1352 kg/m³

4.2.3 Nylon

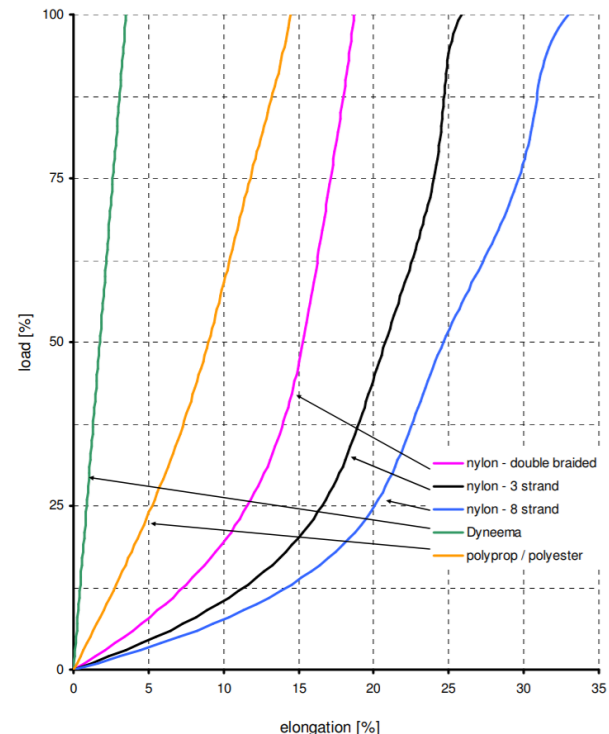
For tilleggslina var det grunn til å tro at en myk line ville være å foretrekke. Dette fordi tilleggslina skal sørge for at hovedlina ikke går i slakk og må derfor kunne endre lengde ettersom hovedlina strammes og slakkes. Det ble derfor valgt å se på egenskapene til nylon på grunn av dets evne til å forlenge seg før den ryker Figur 4-2. Slike rep er satt sammen av flere tynnere tråder og ut fra Figur 4-3 er det en økende trend mellom antall tråder og forlengelse. Denne trenden ser ut til å konvergerende med økende antall tråder.

For å finne gode tall er det tatt utgangspunkt fra produsenten Bexco sine to nylontau; BL3 og DB12. Da de to reptyene har veldig like verdier for diameter, vekt og styrke gir det et inntrykk av at et nylontau som kan brukes i praksis ikke vil ligge så langt unna disse verdiene. DB12 oppgis å være et tolv trådet rep og antas derfor å kunne forlenges seg minst like mye som den 8 trådede nylontauet som er vist i Figur 4-3. Med tanke på at kreftene ikke skal overstige 0.7 prosent av MBL blir maksimalt forlengelse for nylon satt til 25%.

Bexco oppgir at deres tau tåler en del mer hvis de brukes med kauser og de er våte. Dette antas å være sant og i Tabell 4-1 er verdier for DB12 oppgitt sammen med utregning av den maksimale tillatte lasten og diameter med begroing. Det antas samme med begroing som på polyester på 0.63.



Figur 4-2: Forlengelse av flere materialer[1]



Figur 4-3: Prosentvist forhold mellom forlengelse og breaking load [2]

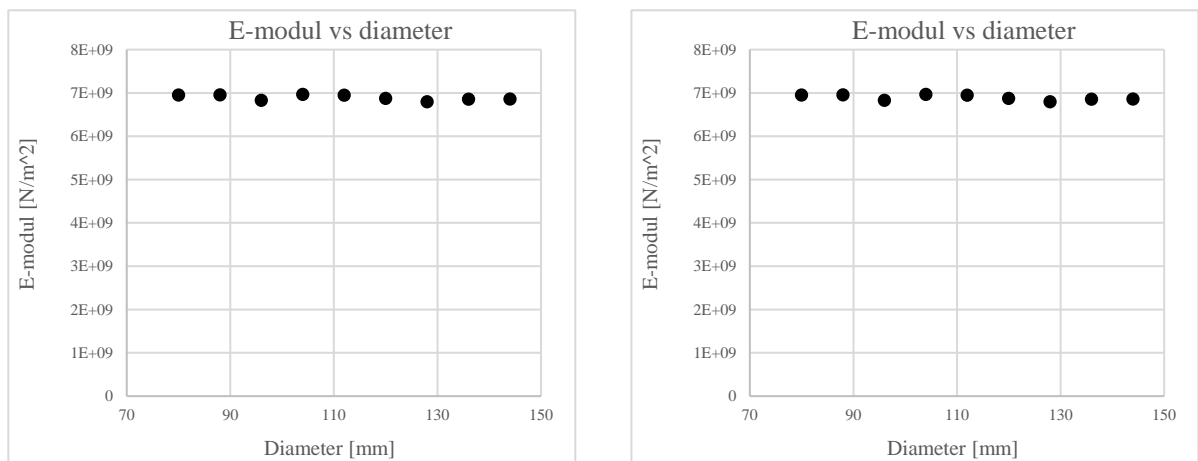
Tabell 4-1: Data for nylonrep av typen DB12 fra Bexco

Diameter [mm]	Diameter [mm] begroing	MBL [kN] (med kauser)	Maks last [kN]
80	128	2329	1630
88	141	2820	1974
96	154	3295	2307
104	166	3945	2762
112	179	4563	3194
120	192	5181	3627
128	205	5830	4081
136	218	6638	4647
144	230	7446	5212

Forholdstallet for som brukes for å bestemme e-modulen for nylon er [12]:

$$\frac{E \times A}{MBL} = 15 \quad (12)$$

Ved å bruke diameteren uten begroing og MBL oppgitt av Bexco er e-modulen for nylon regnet ut for alle de ulike diameterne. For å få oversikt over e-modulen sin endring ble e-modulen plottet mot diameteren og MBL som vist i Figur 4-4. Plottene viser at e-modulen ligger jevnt rundt 7 GN/m² og denne verdien blir derfor brukt.



Figur 4-4: E-modul plottet mot diameter og MBL for DB12

Tettheten til nylon regnes ut ved hjelp av data fra Bexco, som sier at vekten per 100. meter for 144 mm i diameter er 1280 kg.

$$\rho(\text{nylon}) = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{\pi(d)^2}{4} \times L} = \frac{1280\text{kg}}{\frac{\pi(0.144\text{m})^2}{4} * 100\text{m}} = 786\text{kg/m}^3 \quad (13)$$

Den gjennomsnittlige tettheten med begroing tar utgangspunkt i at begroingen har lik tetthet som vann på 997 kg/m^3 og forhold mellom tverrsnitt likt som for polyester: 0.39.

$$\rho(\text{nylon, begroing}) = \rho(\text{nylon}) \times x + \rho(\text{vann}) \times y \quad (14)$$

Hvor x og y er henholdsvis delen av nylon og vann. Da blir tettheten som følger:

$$\rho(\text{nylon, begroing}) = 786 \times 0.39 + 997 \times 0.61 = 1214 \text{ kg/m}^3 \quad (15)$$

5 Baselinestudier

For å vite hvilke laster som virker på en flytende *offshore* vindturbin ble det nødvendig å simulere et FLS og ULS tilfelle for sammenligningsgrunnlag. Dette ble gjort ved hjelp av ferdige *input*-filer gitt av veileder.

5.1 Bølger

Bølgene som brukes i simuleringene blir generert fra et JONSWAP spektrum basert på blant annet signifikant bølgehøyde og periodetoppen: *peak period*. Signifikant bølgehøyde vil si gjennomsnittshøyden av de tredjedels største bølger og varierer med testtilfellet. Periodetoppen derimot blir satt til 9.2 sekunder som vil si den bølgeperioden som gir størst energi. For å velge hvilke bølgespekter som skulle brukes ble det generert ti tilfeller. Så ble alle plottet og visuelt inspisert før en av de midlere spektrene ble valgt for hvert simuleringstilfelle.

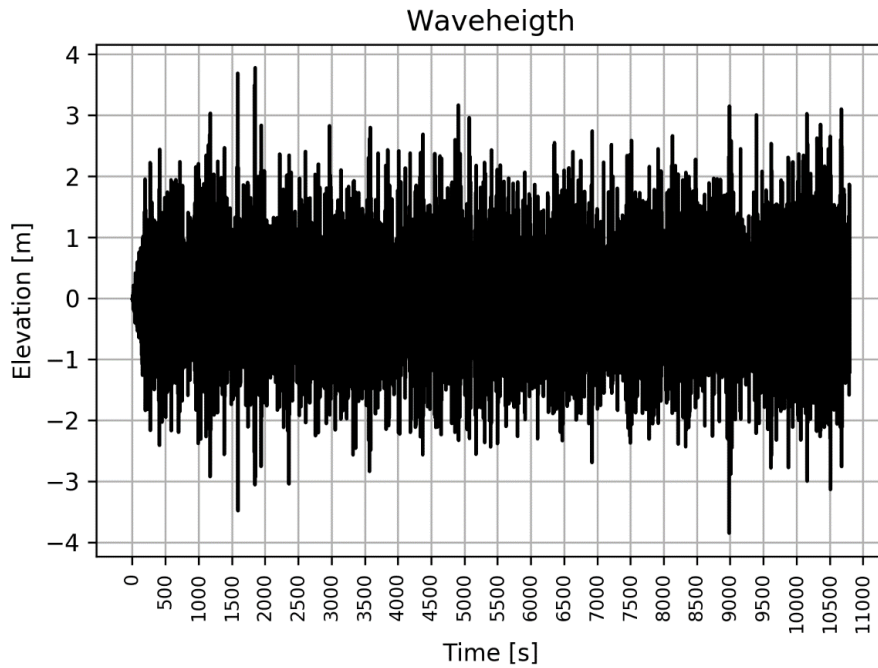
5.2 Presentasjon av analysetilfeller og resultater

5.2.1 FLS

FLS, *Fatigue Limit State*, er en tilstand som fører til en betydelig del av utmattingen til tradisjonelle kjettingsforankringer, som navnet tilsier. Selv om det alternative forankringssystemet består av polyester og nylon som antas å ha mye lavere påvirkning av utmatting, vil det kunne oppstå utmatting i kjettingtilkoblingen, fairlead og anker som gjør tilstanden interessant å studere.

5.2.1.1 Bølgespekter

Bølgespekter for dette tilfellet er generert på grunnlag av en signifikant bølgehøyde på 3.7 meter og er presentert i Figur 5-1: Bølgespekter for FLS tilfellet. De fleste bølgene holder seg mellom +/- 3 meter, med et fåtall som overstiger de verdiene. Spesielt utslagsgivende er de høye bølgene mellom 1500 og 2000 sekunder i tillegg til den store bølgedalen ved 9000 sekunder. Det er forventet at dype bølgedaler har begrenset effekt på linekrefter i forhold til høye bølgetopper, men dette skal analyseres nærmere.



Figur 5-1: Bølgespekter for FLS tilfellet

5.2.1.2 Laster

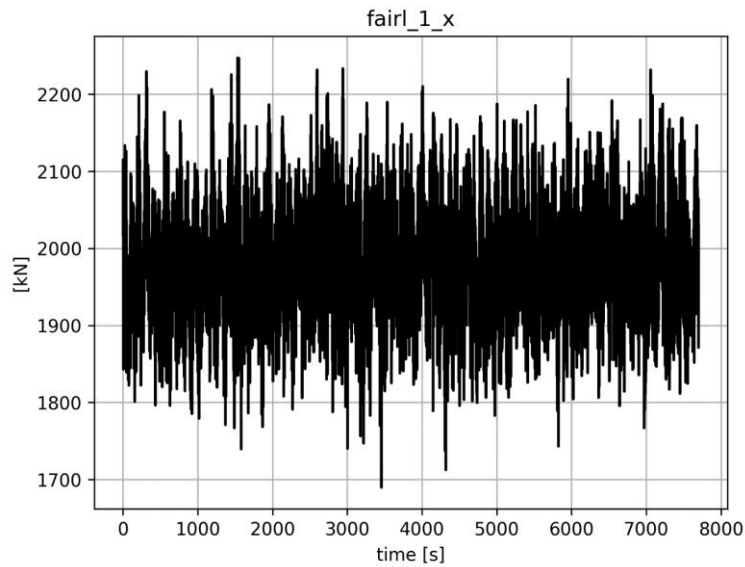
Når simuleringene skal gjennomføres bestemmes retningen til vind, strømning og bølger i tillegg til deres størrelser som er presentert i Tabell 5-1. For FLS virker alle disse kreftene fra samme side, som gjør at utslaget blir maksimalt. De angriper alle fra 180 grader som betyr at line 1 må ta opp all belastningen i x-retning.

Tabell 5-1: Laster ved FLS

Egenskap	Hastighet	Angrepsvinkel i grader
Bølger	-	180
Strømninger	0.15 m/s	180
Vind	16 m/s	180

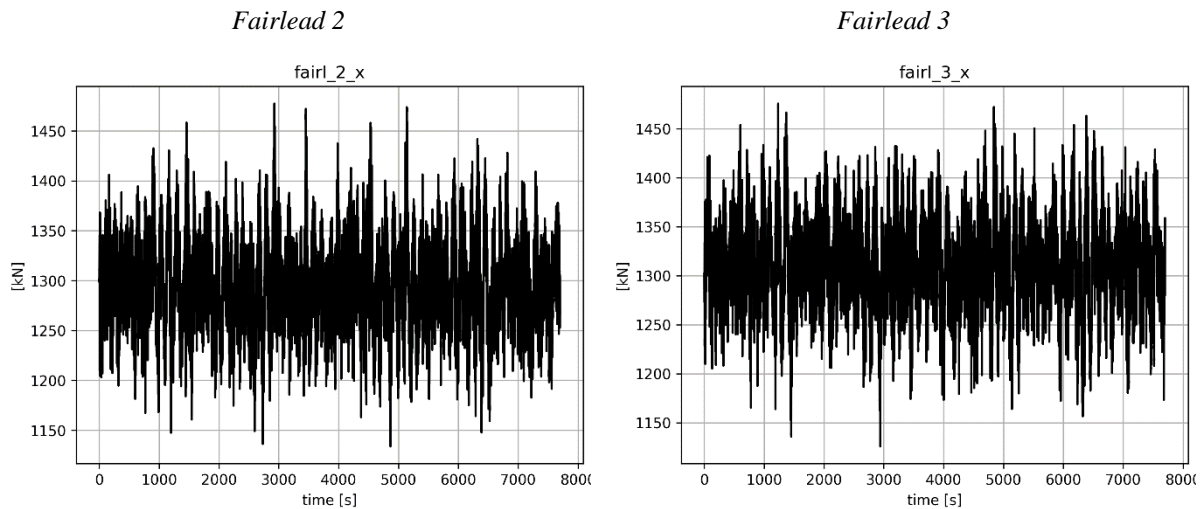
5.2.1.3 Resultat

I Figur 5-2 er kreftene som oppstår i den utsatte line en, plottet mot tiden i en simulering over tre timer. Kraftene er hentet fra det elementet av kjettingen som er nærmest lina fordi her vil egenvekten til kjettingen gjøre at spenningen er størst. Ut fra plottet kan man se en midlere spenning på omtrent 2000 kN og en amplitude på 250 kN.



Figur 5-2: Krefter i line 1

På motsatt side av plattformen er line to og tre som skal oppføre seg tilnærmet likt fordi de er symmetriske om angrepsvinkelen til kreftene. Ut fra Figur 5-3 ser dette ut til å stemme godt med en middelværdi på 1300 kN og amplitude på opp mot 200 kN. Den ulikheten som oppstår mellom linene skyldes da mest sannsynlig vridninger på plattformen.



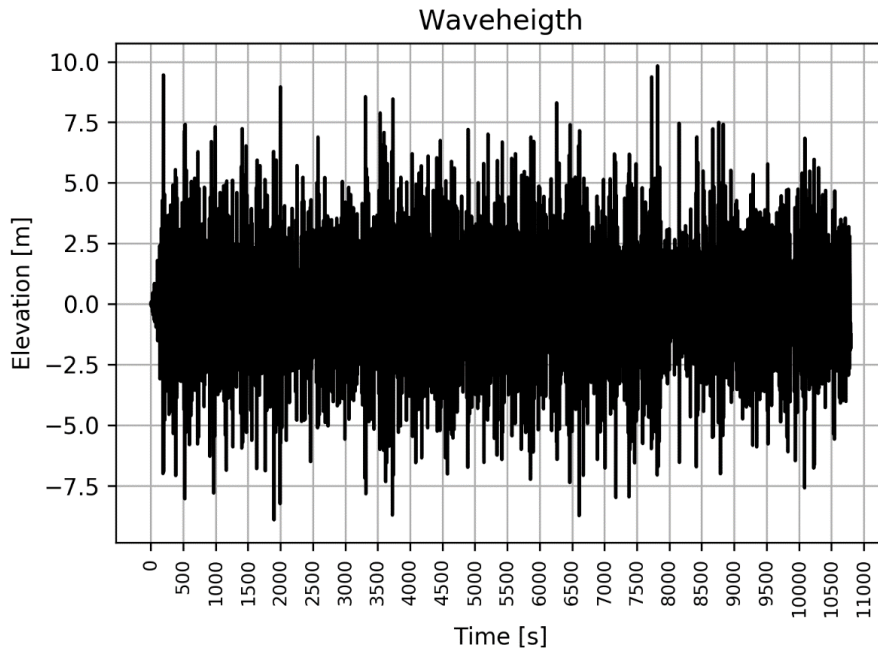
Figur 5-3: Krefter ved fairlead i henholdsvis line 2 og 3

5.2.2 ULS

ULS står for *Ultimate Limite State* som betyr et simuleringstilfelle hvor plattformen utsettes for krefter som kan oppstå ved sterkt uvær. Ved denne tilstanden er det så store krefter i spill at det ikke er meningen at turbinen skal generere strøm, men kun overleve. I et slikt tilfelle blir derfor generatoren koblet fra for å redusere påkjenningene fra omgivelsene.

5.2.2.1 Bølgespekter

Genereringen av bølgespekteret for ULS hadde en signifikant bølgehøyde på 10.02 meter, nesten tre ganger høyere enn ved FLS. På Figur 5-4 kan en se at dette førte til at de største bølgene kryper rett under 10 meter over havnivået. De største bølgetoppene ser også ut til å skille seg litt mer ut fra resten enn ved FLS tilfellet.



Figur 5-4: Bølgespekter for ULS tilfellet.

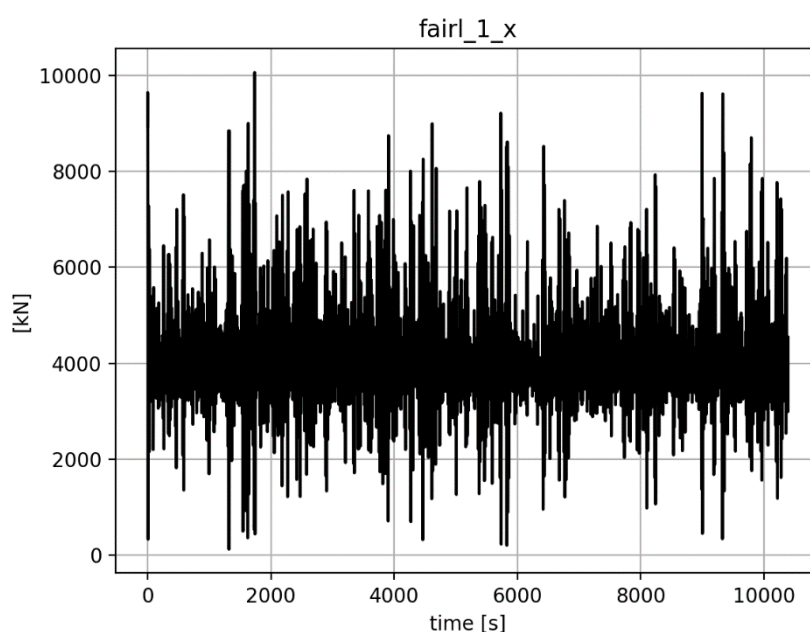
5.2.2.2 Laster

Ved ULS tilfellet virker bølgene og vinden i samme retning som før, men strømrretningen virker nå med en vinkel på 150 grader som vist i Tabell 5-2 sammen med størrelsene. Dette er fordi at slike store stormer inntreffer så sjeldent at det er svært usannsynlig at alle kreftene angriper med samme vinkel. Dette fører til at line 2 og 3 skiller seg mer fra hverandre enn tidligere, som kommer frem i Figur 5-5, med line 2 slakkere enn line 3. Fordi systemet er *catenary* som gjør stigningstallet til kjettingens stivhet ikke-lineært, øker spenningen i line 1 mer enn reduksjonen i line 2 og 3.

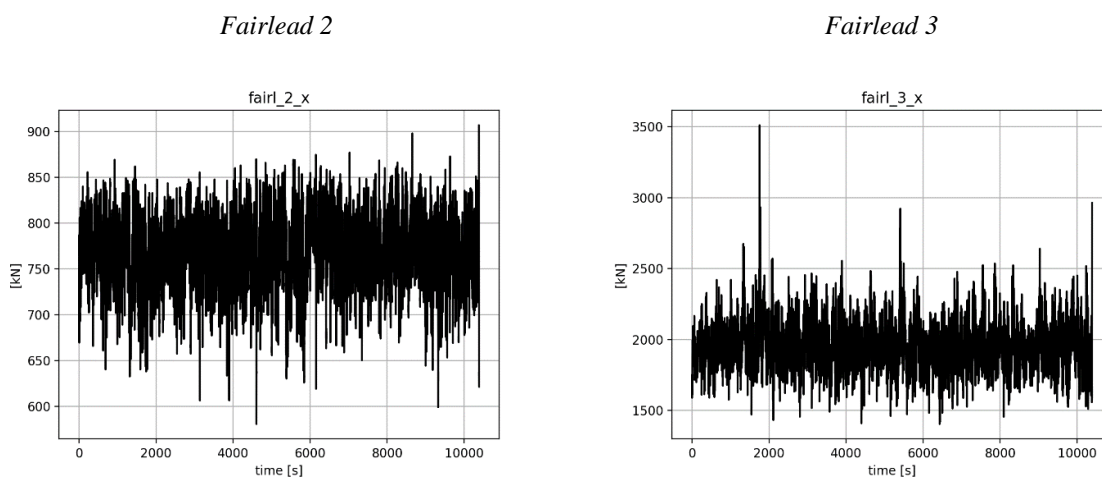
Tabell 5-2: Krefter i ULS

Egenskap	Størrelse	Angrepsvinkel i grader
Bølger	-	180
Strømninger	1.64 m/s	150
Vind	39 m/s	180

De dimensjonerende kreftene kommer fra den meste utsatte line 1. Ut fra Figur 5-5 er den midlere kraften 4000 kN, med en nedre kraft tilnærmet null og en øvre verdi på 10 000 kN. To interessante tidspunkter er ved starten og 9000 sekunder, men det største utslaget er ved 1800 sekunder som også gir et markant hopp i line tre.

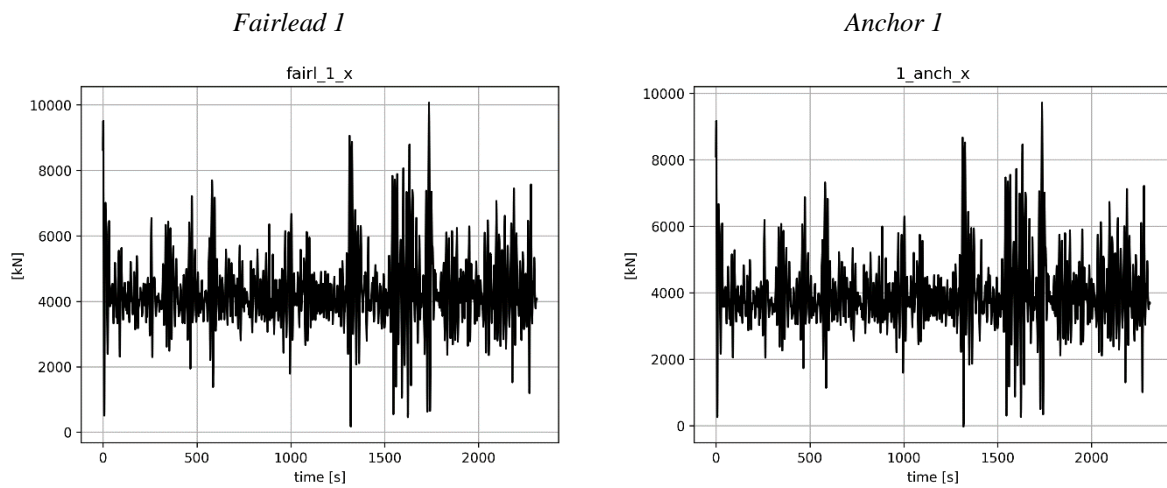


Figur 5-4: Spenningen i lina som går parallelt med vindretningen.



Figur 5-5: Krefter ved fairlead i line 2 og 3

Etter at den lange analysen var gjennomført ble det funnet ut at turbulens var skrudd av for simuleringen og en nærmere analyse for de første 2300 sekundene ble gjennomført. Krefte ved fairlead er tilnærmet like som vist i Figur 5-6, og ankeret ser veldig likt ut med litt mindre krefter. Dette skyldes mest sannsynlig at vekten av kjettingen ikke spiller inn her.



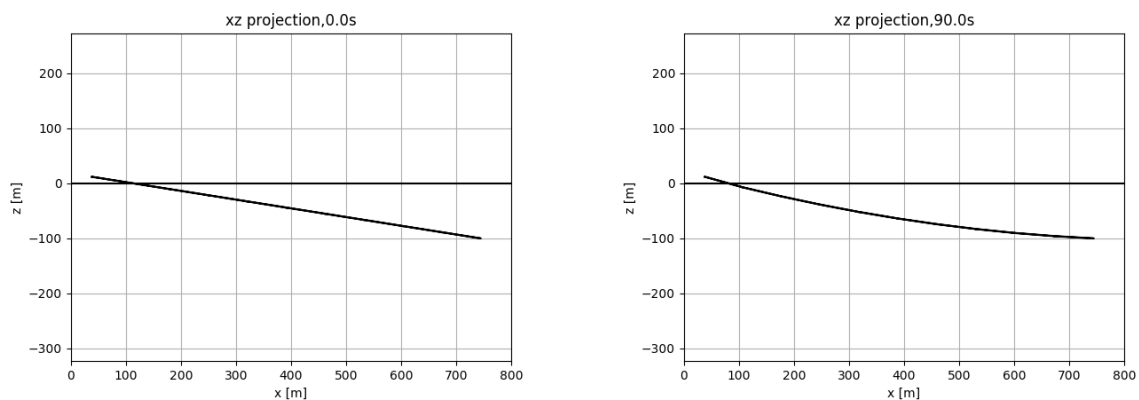
Figur 5-6: Krefte i line en ved fairlead og ankeret. Simuleringen er gjort for de første 2300 sekundene og turbulens er skrudd på.

6 Optimaliseringsprosedyre

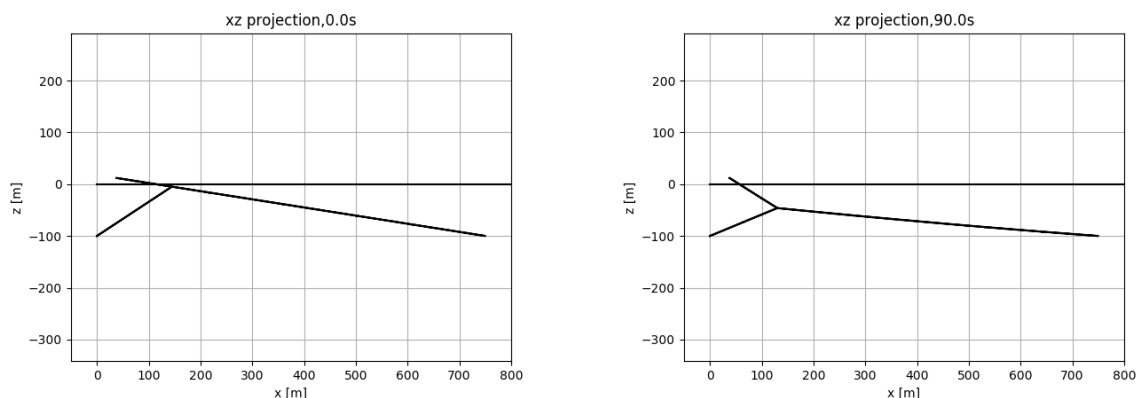
Optimaliseringsprosedyren går ut på å finne et oppsett av polyester og nylon som gir plattformen en mindre stiv oppførsel. Altså at kreftene ikke stiger for raskt i forankringslinene. Baseline har nemlig en veldig bratt stigning på stivheten når den rettes ut som fører til kraftige napp. Ved å kun se på hvordan en line i baseline påvirker plattformen skal et polyester-nylon-system, heretter også kalt PNS, som er mykere utvikles. Dette skal gjøres med tanke på å lage et billigst mulig system, som er bakgrunnen for oppgaven.

6.1 Simuleringsoppsett

Kun polyesterline



Polyester-nylon-system



Figur 6-1: Plotting av oppsett for polyesterrep alene og med nylon

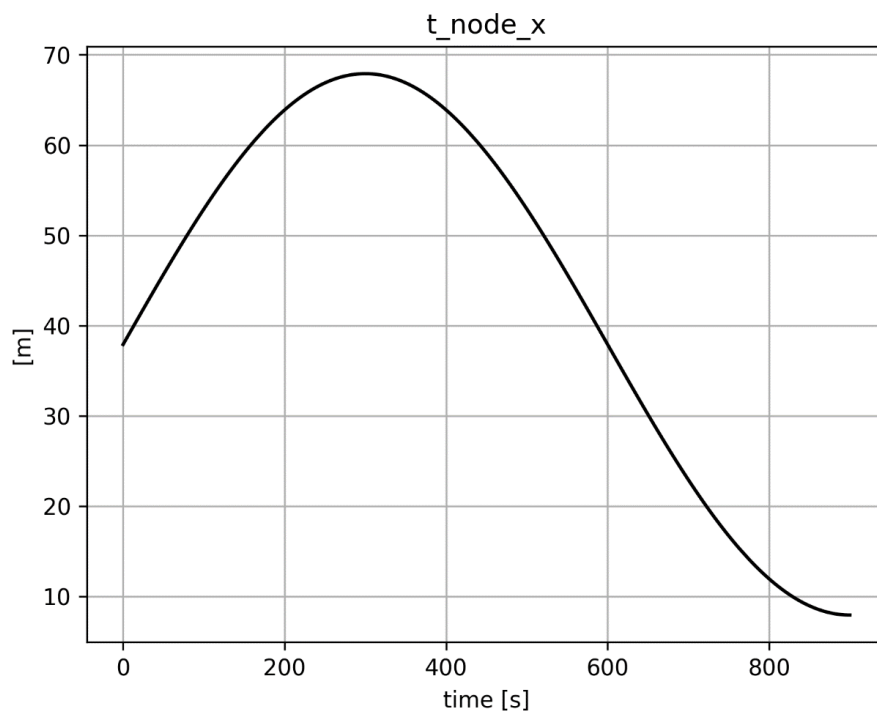
Systemet er tenkt slik som vist i Figur 6-1. For å kunne bestemme hvordan et fullstendig system skal bli, må flere parametere bestemmes. For å redusere variabler og simuleringstid er det derfor valgt å se på kun en av de tre forankringslinene i første omgang. For å gjennomføre så like tester som mulig ble det satt opp en standardisert test. Til denne testen var vind, bølge og strømningslaster skrudd av og oppsettet satt sammen som følger:

- Fairlead (37.9,0,12)

- Hovedanker (x,0,-100) – ankerradien varierer med testtilfellet
- Et anker til nylonlina settes ved 100 meters dyp langs z-aksen (0,0,-100)
- Polyesterline festes rett mellom fairlead og hovedanker
- Nylon festes mellom sitt nye anker og et tilkoblingspunkt på lina

Oppsettet blir satt opp slik at det ved simulering går til likevekt før krefter blir påført slik som vist i figur. Dette gjøres ved å sette på full demping i de første 50 sekundene, for så å skru av demping og la det falle helt til ro.

Deretter påføres tvungen bevegelse til systemet ved å dra fairlead frem og tilbake parallelt langs x-aksen. Denne kraften drar fairlead frem og tilbake slik at posisjonen til fairlead blir en sinusfunksjon over en periode på 20 minutter som vist i Figur 6-2. Dette skal være lenge nok til at påkjenningen fra treghet er neglisjerbar.



Figur 6-2: Posisjon til fairlead. Utgangsposisjonen er 37,9 m og amplituden til bevegelsen er 30 meter.

Som vist i baselinestudiene har kjettingsystemet den største kraften i lina ved fairlead på tilnærmet 10 000 kN. Med denne kraften i kjettingen oppfatter plattformen en global påkjenning på 9500 kN grunnet vinkelen kjettingen danner med havbunnen. Det er ved denne globale kraften det nye polyester-nylon-systemet skal gjøre det like bra eller bedre uten å ryke.

6.2 Variabler og begrensninger

Det enlinede systemet er avhengig av flere parametere som alle påvirker plattformpåkjenningen. Å optimalisere alle parameterne manuelt krever mye prøving, justering og feiling og for å forenkle prosessen er følgende forutsetninger og begrensninger satt.

Forutsetninger:

- Den globale stivheten skal være lik som for baseline
- Stivheten til PNS skal være mykere en baseline etter 2000 kN
- Polyesterlina skal ha en diameter på 320 mm med begroing
- E-modulen til polyesterlina er satt til $7.9 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

Begrensninger:

- Maksimal linekraft er $0.7 \times \text{MBL}$ for polyester som gir en verdi på 14 000 kN.
- Maksimal kraft for nylon er $0.7 \times \text{MBL}$
- Plattformen kan ikke bevege seg lenger en 30% av havdybden på grunn av strømløsningen.

De variable komponentene var:

- Ankerradien
- Tilkoblingspunkt og da tilhørende nylonlengde
- Nylondiameter

6.3 Ankerradien

Målet for oppgaven er å få det billigste systemet. Kostnaden øker med ankerradien på grunn av lengden på polyesterrepet, ankerstørrelsen og nylondiameteren samt lengden. Kostnaden ved ankerstørrelsen er avhengig av kreftene i lina som er vanskelige å forutsi og det samme gjelder for nylon. Derfor tas det utgangspunkt i at kortest mulig ankerradius blir optimalt.

Testen gjennomføres ved å ta data for kreftene i de tre forskjellige linesegmentene: fairlead, anker og nylon. Kreftene kan ikke overstige satte verdier bestemt av MBL for repene. I tillegg må stivheten til oppsettet være lavere enn for kjettingen. Dette evalueres ved å plote stigningstallet til den globale x-komponenten i fairlead mot kraften den yter. Her skal altså stivheten for polyester-nylon-systemet ligge under kjetting sin fra den midlere verdien ved FLS tilfeller: 2000 kN. Ved å plote det valgte polyester-nylon-oppsettet mot kjettingen er dette enkelt å sammenligne. Da stigningstallet plottes mot kraften vil et konstant stigningstall bety at kraften stiger konstant og et lineær stigende stigningstall vil si at kraften øker kvadratisk.

6.4 Tilkoblingspunkt

For å finne det optimale tilkoblingspunktet til nylonlina er forskjellige lengder vurdert. Når nylonlina kobles på, vil strekket i polyesterlina bli forskjellig på hver side av tilkoblingspunktet og gjør at systemet fungerer som om det har tre liner. Kravet som stilles om en maksimal kraft i polyesterlina er på 14000 kN og kan derfor verken overstiges i segmentet nærmest fairlead eller ankeret. Evalueringen er gjort på grunnlag av at tilkoblingen er bestemt ut fra den prosentvise lengden ut på polyesterlina. Dette fordi denne metoden virker som den mest konsekvente måten å sammenligne på.

Modelleringen er satt opp ved å feste polyester i en rett linje mellom ankeret og fairlead, for så å feste på nylonrepet. Da nylon kan forlenge seg 25% modelleres nylonlina med en forspenning på -20% som i 3DFloat bestemmes av en parameter som heter *Pre Strain Long*, heretter kalt PSL. Dette betyr at lina trekker seg sammen og da i realiteten er 20% kortere enn den lengden den har ved starten av simuleringen. Dette betyr ikke at lina kommer til å variere mellom 0 og 25 % forlengelse. Den vil aldri bli helt slakk på grunn av polyesterlina.

6.5 Linelengde og oppstramming

Systemet skal være mykt nok og forstrammingen må bestemmes. Hvis systemet er for stramt vil de tre linene oppfatte ekstra store krefter fordi de må utjevne den horisontale kraften til hverandre på toppen av kraften fra omgivelsene. For slakke line er heller ikke å foretrekke da det fører til økt forskyvning av plattformen. I tillegg vil en forlengelse av polyesterlina derimot gjøre at plattformen og tilkoblingspunktet forflyttes lenger før lina bli stram nok. Dette gjør at angrepsvinkelen mellom nylonlina og polyesterlina endres og systemet må stilles til på nytt.

Strømledningen som fører strømmen til fastlandet har også en begrensning på å ikke bevege seg lenger enn 30% av havdybden. Med en havdybde på 100 meter vil dette gi en maksimal forflytning på 30 meter fra nullpunktet.

7 Optimaliseringsresultater

Resultatene fra optimaliseringen av et enlinet system er her presentert.

7.1 Polyesterline - Initial ankerradius

Først ble kun polyesterrepets testet alene og da for endring i ankerradius. Det er antatt at hovedlina vil være tilnærmet rett når den er utsatt for maksimal kraft og dette vil da gi en pekepinn på hva den stivheten vil være etter at nylonrepet er festet på.

Linestivheten kan regnes ut som nevnt tidligere etter formelen:

$$stifffness = \frac{E \times A}{L} \quad (16)$$

Men for plattformen vil stivheten linene yter også være avhengig av angrepsvinkelen. Det er kun den horisontale stivheten som er interessant for denne oppgaven og den blir da:

$$stifffness (horisontal) = \frac{E \times A}{L} \times \cos(\alpha) \quad (17)$$

Hvor α er vinkelen mellom lina og havbunnen. Dette ble regnet ut for utvalgte ankerradier som også skulle simuleres.

Fra simuleringene ble verdier målt når de horisontale kreftene er like i fairlead som de var på det meste i baselinestudiene: 9500 kN. Dataen fra simuleringene sammen med de utførte beregningene er presentert i Tabell 7-1 og viser at kraften i fairlead stiger eksponentielt ettersom ankerradien minker. Den globale horisontalkraften og aksialkraften i lina er avhengig av Pytagoras og med en lang line er derfor den aksielle stivheten og den horisontale stivheten tilnærmet like. For ankerradier som danner en vinkel nært 45% eller mer vil derfor den vertikale kraftkomponenten i lina overstige den horisontale som kommer tydelig frem for 100 meters ankerradius som skiller seg ut med over 17 000 kN i aksialkraft.

Tabellen viser også lina til baseline som sammenligning hvis kjettingen hadde vært stram. Her vises det at den aksielle stivheten i kjettingen er på 2550 kN som er den samme som polyester får med en ankerradius på 200 meter. Endringen i angrepsvinkelen på fairlead gjør at den horisontale stivheten i polyester aldri når opp til kjettingen sin, men kjettingsystemet er et *catenary* system som sørger for at dette aldri oppstår. Den stivheten lina yter på plattformen endres med vinkelen som gjør at simuleringer har et overtak med å kunne plote denne endringen mens fairlead forskyves.

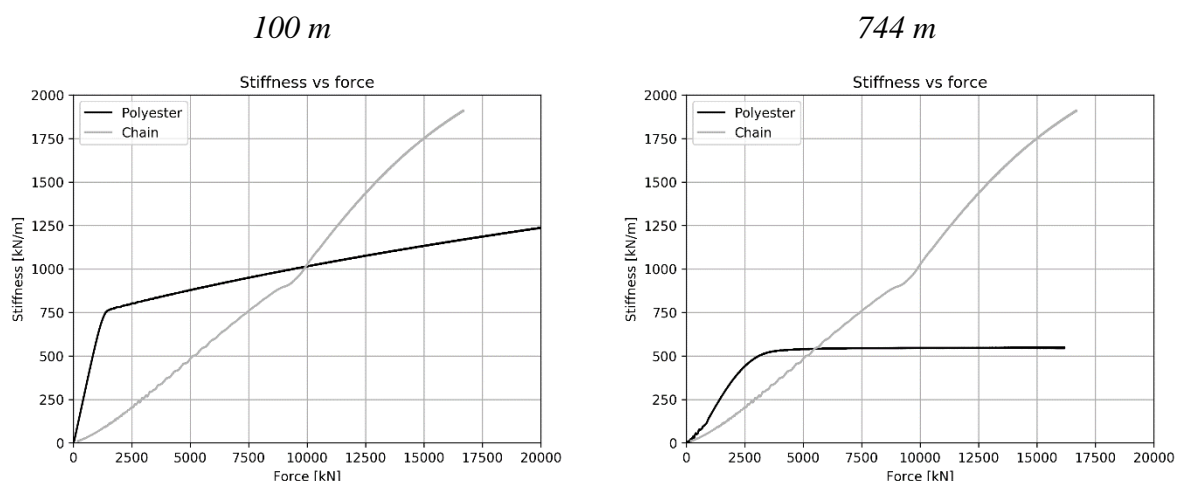
*Tabell 7-1: Data fra tester utført på kun et polyesterrep mellom fairlead og ankeret. *Baseline har en catenary effekt som sørger for at kjettingen aldri blir stram.*

Ankerradius	Aksiell stivhet	Horisontal stivhet	Fairlead	Bevegelse
	[kN/m]	[kN/m]	[kN]	[m]

Baseline	2550	2550*	10 000	24.9
744	700	700	9600	17.4
500	1050	1000	9800	11.9
200	2550	2100	11400	6.8
150	3150	2250	13000	7.2
100	3900	1900	17400	10.8

Ved å måle kraften en line yter horisontalt på fairlead mot fairleads bevegelse kan man finne stivheten lina vil yte på plattformen. Altså endringen i kraft per forflytning. Ved å plote denne stivheten mot den samme kraften får man et plot som beskriver stivheten ved endring av kraft. I Figur 7-1 er dette plottet for hvert tilfelle i svart mot baseline sin kjetting i grått. Den jevne stigningen til baseline vil si at stivheten øker med økt kraft, mens for polyester, på 744 meter, er stivheten konstant etter at en kraft på 4000 kN oppstår.

For polyesterlinene er plottet delt opp i to segmenter, før og etter knekkpunktet, som er stivheten før og etter at lina er stram. Etter at lina er stram oppnås den horisontale komponenten til den aksielle stivheten til lina. Dette stemmer relativt godt med simuleringene, men den utregnede stivheten ligger noe høyere. Før lina er stram øker stivheten raskt i takt med at lina strammes opp og skyldes vinkelen lina danner med havbunnen ved fairlead. Plottet for en ankerradius på 100 meter viser en mye skarpere stigning i linekreftene og får en veldig bratt overgang mellom slakk og stram tilstand. I tillegg flater ikke stivheten ut, den forsetter å stige, bare saktere. Denne stigningen skyldes at x-komponenten og hypotenusen er såpass forskjellige og stigningen vil flate ut når fairlead har flyttet seg veldig langt. Dette vil aldri være mulig da lina vil ryke lenge før det skjer.



Figur 7-1: Stivhetsplott for kun polyesterrep med en ankerradius på 100 og 744 meter. Her er den aktuelle stivheten til polyester plottet i svart mot kjettingen i baseline sin stivhet i grått.

Ved evaluering av plottene og verdiene fra Tabell 7-1 blir 150 meters ankerradius valgt å gå videre med. Her er verdien rett under det som er tillatt som kraft og siden ekstralina vil yte krefter på hovedlina er det ikke nødvendig å finne den absolutte grensen.

7.2 Polyester-nylon studie

Når et utgangspunkt til ankerradien er bestemt må systemet evalueres med den påsatte nylonlina. Forankringssystemet skal bli mykere ved å forlenge tilstanden før lina er helt stram. Parameterne som blir vurdert er ankerradien, PSL og diameteren til nylonlina i tillegg til tilkoblingspunktet.

7.2.1 Tilkoblingsstudie

Tabell 7-2: Testparametere

Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
150	20	80

Den første testen ble gjennomført med parameterne som er gitt i Tabell 7-2. Denne testen skulle gi et utgangspunkt for videre evaluering og se hvor mye nylonlina påvirket hovedlina. Hovedlina vil nemlig endre kraften og dermed også stivheten den påføre. For polyesterlina er den høyeste tillatte verdien 14 000 kN som nevnt tidligere og for nylonlina med denne diameteren kan kraften komme opp i 1 600 kN. Ulike tilkoblingspunkter ble så simulert for hver tiende prosent ut på polyesterlina fra 10 til 60%. Verdiene fra simuleringene er presentert i Tabell 7-3 gjennom konfigurasjon i form av tilkoblingspunkter i prosent, kraften i polyesterrepet ved fairlead og anker, kraften i nylonlina og ved hvilken forskyvning verdiene oppstår. Målingene er tatt i det den horisontale kraftkomponenten er 9500 kN.

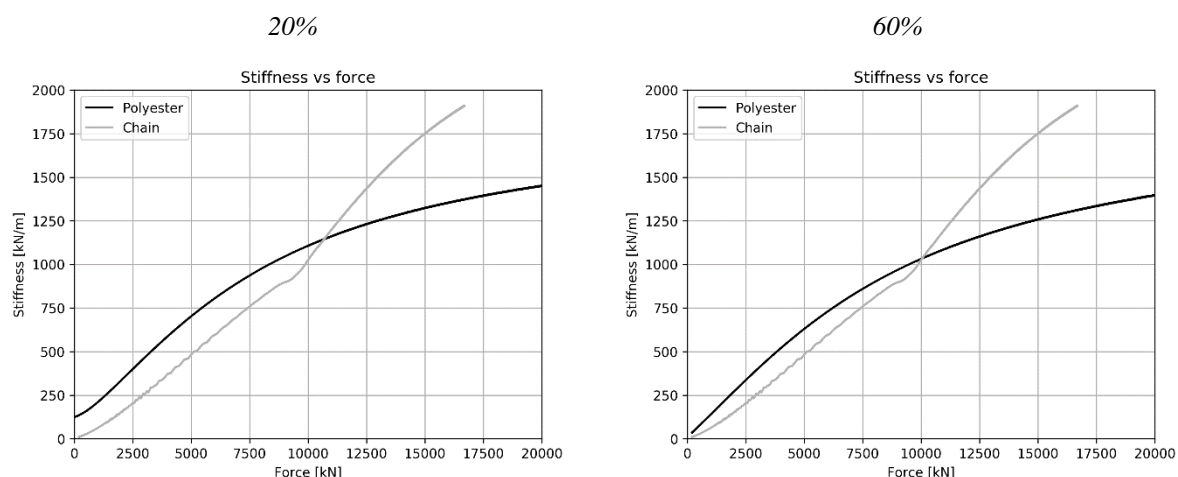
Verdiene viser at alle linesegmentene overskrider den tillatte spenningen. Kreftene ved fairlead og ankeret forskyves fra en overvekt på fairlead ved tilkoblinger kort ut på hovedlina, til det motsatte nærme ankeret. Kreftene som oppstår i nylonlina er lavest ved tilkobling på 40% og de nærliggende verdiene er også de med lavest sum av krefter i de to segmentene av polyester.

Tabell 7-3: Krefter ved ulike konfigurasjoner når den globale stivheten er 9500 kN. Målingene er gjort i polyesterlina ved fairlead og hovedankeret i tillegg til nylonlina sitt anker.

Konfigurasjon [%]	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]	Forskyvning [m]
10	18600	15600	6000	7.7
20	17000	15500	4700	7.3
30	15900	15400	3900	7.1
40	15200	15500	3600	7.0
50	14800	15900	3800	6.8
60	14500	16500	4400	6.7

Ut fra stivhetsplottene ligger stivheten litt over kjetting sin for store deler av det interessante område på mellom 0 og 10 000 kN. For å få en forståelse for påvirkningen av denne stivheten fra tilkoblingspunktet er plottene for tilkoblinger i hver enda av skalaen vist i Figur 7-2. Her ser 60% ut til å gi den beste etterligning av stivheten til kjetting, men blir ikke mykere før ved

10 000 kN, som er for sent. Ved 20% ligger ikke bare verdiene over, men går heller ikke i null ved null kraft. Dette skyldes at oppsettet er forenklet med få elementer og at det dermed oppstår trykk i fairlead-segmentet. Et av kravene til systemet er at det skal være strekk i alle linene til enhver tid og siden dette ikke er et fungerende system kan den nedre delen av denne grafen sees bort fra.



Figur 7-2: Stivhetsplott opp til 20 000 kN for 20 og 60 %. 150m og PLS20.

Ut fra alt dette ser det ut til at tilkoblingspunktet har mest påvirkning på forholdet mellom kreftene i de to linesegmentene nær fairlead. Dette igjen fører til hvor mye kraft nylonlina må overføre til hovedlina for å oppnå den horisontale kraften som målingene blir gjort ved. Det blir ikke nødvendig å teste like mange tilkoblingspunkter før forankringen er innenfor flere av de satte kravene samtidig.

7.2.2 Pre Strain Long-studie

Tabell 7-4: Parametere for studiet

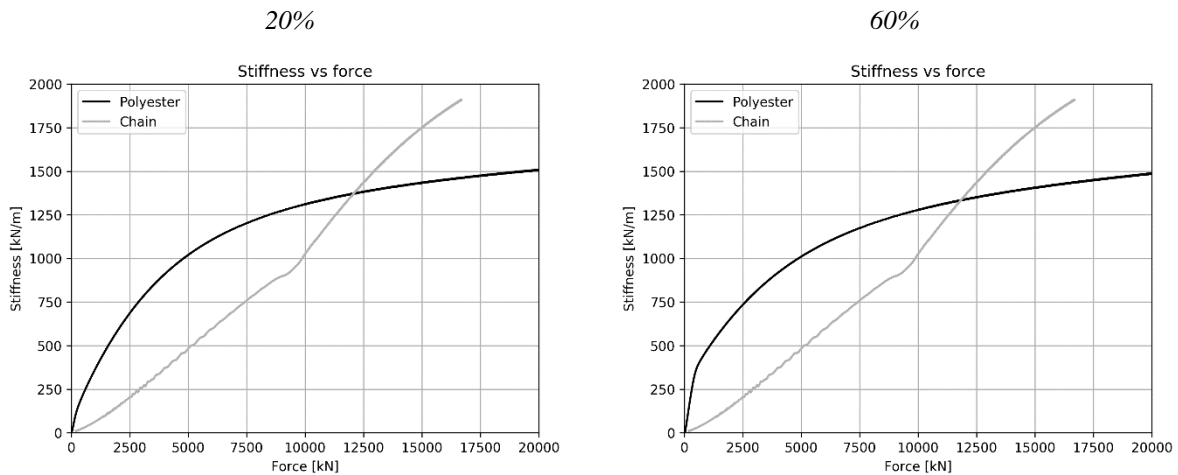
Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
150	10	80

For å forstå hvordan strammingen av nylon påvirker forankringslina ble PSL justert, mens de andre variablene ble holdt konstante, som kommer frem i Tabell 7-4. Simuleringene viser at kreftene i alle linesegmenter blir redusert og at størrelsen på reduksjonen samsvarer godt med reduksjonen i nylonlina. Kravet på maksimal kraft i nylon og polyester er nå tilfredsstillt for 40% som man kan se ut av Tabell 7-5.

Tabell 7-5: Resultater fra PSL-studiet.

Konfigurasjon	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]	Forskyvning [m]
20	14300	13900	1700	7.5
40	13800	13900	1300	7.4
60	13600	14300	1600	7.3

Ved å se på stivhetsplottene i Figur 7-3 kan denne konfigurasjonen forkastes med en gang, da baseline er mye mykere over hele det interessante området mellom 2 000 kN og 10 000 kN. Krysningpunktet mellom baseline og det innovative PNS er også forskjøvet mot 12 000 kN som er langt over ønsket.



Figur 7-3: PSL 10 for 20 og 60 %.

Når nylonlina blir lenger, yter den mindre kraft på polyestertauet og endrer derfor vinkelen ved fairlead i mindre grad. Denne vinkelen ser ut til å være veldig avgjørende for å få ned stivheten ved lavere spenninger. En lavere PSL fører til både forskyvning av krysningpunktet og en kurve som går lenger over kjetting sin og bør nok holdes ganske stram så lenge ikke kreftene i nylonlina blir for store. For å ikke overstige tillatte spenninger i de ulike linesegmentene, eller ved motsatt tilfelle, å ikke utnytter all kraft lina kan ta opp, kan PSL stilles for å passe dette. Men dette er ikke nødvendig før et oppsett som er nært å lykkes skal vurderes da dette er den enkleste parameteren å stille på.

7.2.3 Studie av ankerradius

Tabell 7-6: Verdiene på parametrene ved studie av ankerradius på polyester-nylon-systemet

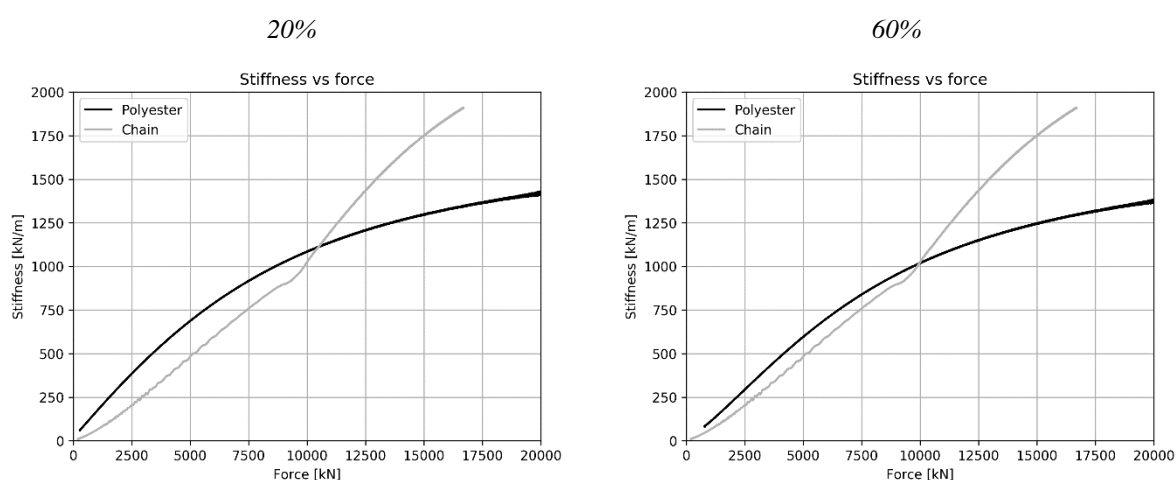
Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
200	20	80

Så skal ankerradiens påvirkning på det innovative forankringssystemet vurderes. Ankerradien ble derfor økt litt før en vurdering ble gjennomført. Endringene kan ses i Tabell 7-6. Her overstiges polyesterlina i de fleste tilfeller, men i mye mindre grad enn ved 150 meter som vist i Tabell 7-7. Kreftene i nylonlina er dessverre for høye for alle tilfellene. Da differansen mellom kreftene i polyestertauet nærmest ankeret og fairlead er blitt jevnere ble det gjort et forsøk på 80%, men dette forsøket viste seg å gi en kraftig økning i både anker og nylon som ikke er ønskelig.

Tabell 7-7: Resultater fra simuleringen

Tilkoblingspunkt [%]	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]	Forskyvning [m]
20	13900	13700	4000	6.5
40	12800	14200	3600	6.3
60	12400	15700	5000	6.1
80	11900	17800	7000	6.3

Figur 7-4 viser stivhetsplottene som igjen begynner å ligne på den til kjetting. Endringer fra 150 meter er minimal, men kan tyde på at kryssningspunktet er forskjøvet minimalt mot venstre. For å få en endring må nok ankerradien økes drastisk.



Figur 7-4: 200m PLS20

Ved forlenging av ankerradien og samme prosentvise tilkobling, blir tilkoblingspunktet lenger unna midtankeret i meter og vinkelen nylontauet danner med havbunnen veldig liten. Dette gjør at nylonlina motvirker ankersegmentet mer og gir lavere spenning ved fairlead som da må bevege seg lenger for å få en horisontalkraft på 9500 kN. Dette fremstår også i tester som ikke er presentert her og økt ankerradius vil favorisere nærmere tilkoblingspunkt. For å optimalisere tilkoblingen på lange ankerradier blir det nødvendig med mindre intervaller mellom de prosentvise tilkoblingspunktene.

7.2.4 Diameter på nylonrep

Tabell 7-8: Parametere for studiet

Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
200	20	144

I Tabell 7-8 er verdiene som er brukt på studiet med en endring på nyldiameteren fra den minste av typen DB12 fra Bexco, til den største på 144 mm i diameter. Økning i diameteren på nylon gir økt tillatt spenning i repet på opptil 5200 kN og skal derfor vurderes. Dette øker

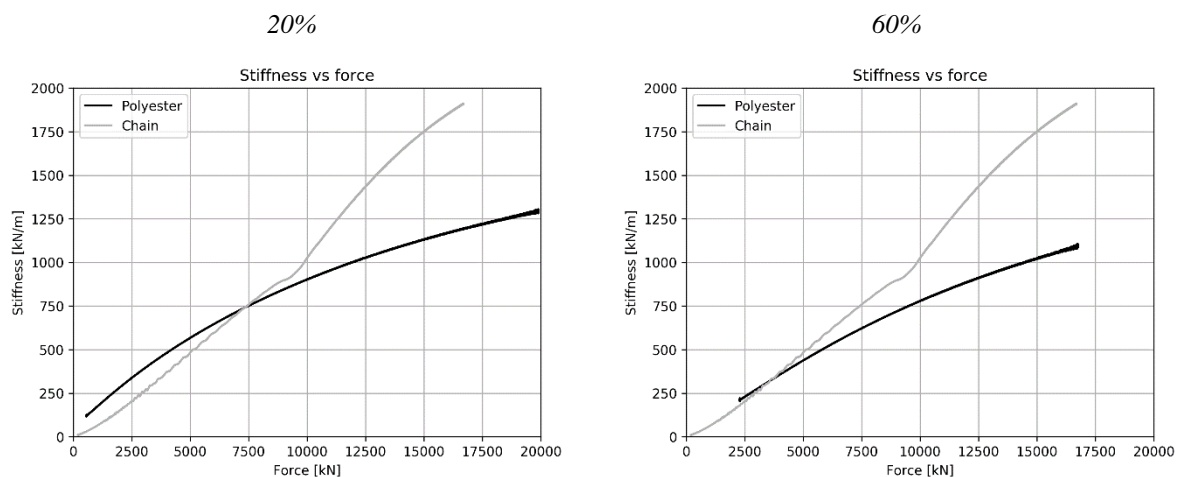
stivheten til nylonlina og gjør at den kan ta opp større kraft før den ryker. Denne kraften må utjevnes av hovedlina og bør derfor gi større krefter her. Denne antagelsen stemmer godt overens med resultatene presentert i Tabell 7-9.

Den nye diameteren gjør at nylonlina tar opp veldig store krefter og gjør linekreftene i polyester alt for høye. Selve verdiene i nylonrepet er også for høye, men overgår den tillatte verdien med en lavere faktor enn tidligere.

Tabell 7-9: Resultater fra diameterstudiet

Konfigurasjon	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]
20	16300	15500	7100
40	13800	16200	6000
60	13200	21000	10600

Krysningspunktet mellom stivheten til baseline og PNS ble forskjøvet kraftig til venstre. For 60% er denne krysningsen nede i 3000 kN, som er nærme den nødvendige verdien på 2000 kN. Verdiene for stivheten går knapt lavere enn 2 500 kN for denne tilkoblingen, det skyldes at stivheten i nylon holder hovedlina ganske stram hele tiden. Dette kan enkelt justeres på ved behov og er ikke et problem.



Figur 7-5: Stivhetsplot for studiet

Diameteren stiver opp nylonlina og gir mye jevnere stigning for den globale stivheten mot horisontal kraft, men har samtidig alt for store spenninger. Likevel ser det ut som nylonlina må være ganske stiv for å gi myk nok stivhet over på plattformen viser Figur 7-5.

7.3 Fintuning

Etter at alle parameterne og deres effekt var kartlagt kunne et fungerende system utvikles. Etter mange forsøk på å oppnå kortest mulig ankerradius ble et fungerende system utviklet for

700 meters ankerradius. Veldig nærme baseline sin lengde. Verdiene som da ble bruk er presentert i Tabell 7-10.

Tabell 7-10: Parametere for en fungerende line

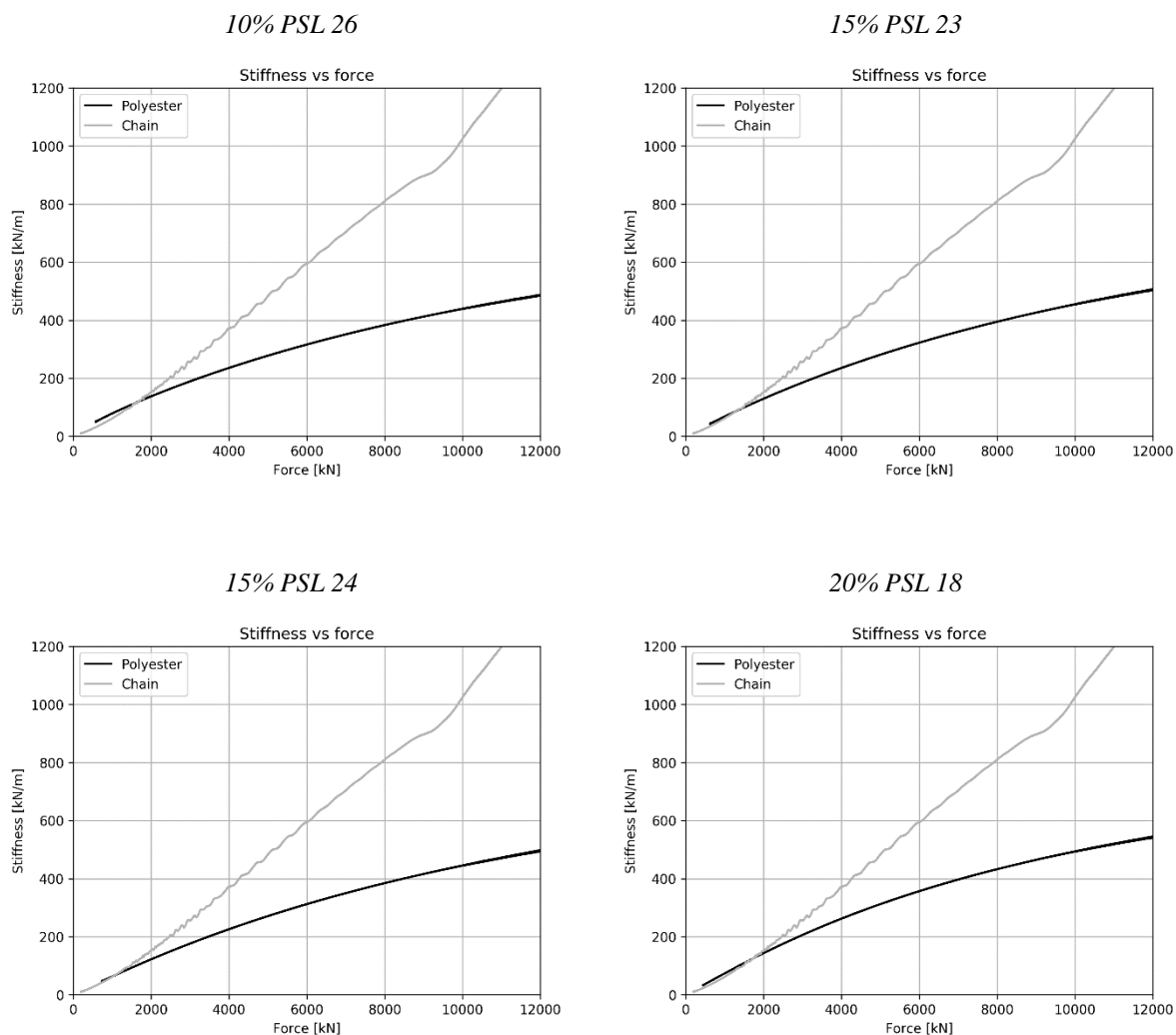
Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
700	20	144

Ved denne ankerradien var det tydelig at et oppsett som besto alle kravene vær nært. Flere konfigurasjoner oversteg et eller flere parametere med litt, men hold seg under på andre. Det gjorde at PSL ble stilt inn for hver individuelle konfigurasjon og er derfor markert med PSL verdi hvis ikke 20 er brukt. Resultatene vises i Tabell 7-11, med prosentvis utnyttelse av kraft i noen av lineoppsettene som tilfredsstilte kravet til stivhetsplottet.

Tabell 7-11: Verdier for kreftene i de tre linesegmentene samt forflytning av fairlead fra utgangsposisjonen. Prosent representerer utnyttelsen av tillat linekraft. Konfigurasjoner som det presenteres stivhetsplott for er merket med fet skrift

Konfigurasjon	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]	Forskyvning [m]
5	11100	11800	4600	17.3
(PSL 21) 5	11400	12000	5000	17.2
10	10300	11900	3200	17.8
(PSL 23) 10	10600	12600	4200	17.7
(PSL 25) 10	10800(77%)	13000(93%)	4800(92%)	17.6
(PSL 26) 10	10900(78%)	13300(95%)	5200(100%)	17.5
15	10200(73%)	12700(91%)	3600(69%)	18.3
(PSL 23) 15	10400(74%)	13500(96%)	4700(90%)	18.5
(PSL 24) 15	10500(75%)	13900(99%)	5100(98%)	18.5
(PSL 18) 20	10100(72%)	13200(94%)	3600(88%)	18.9
20	10200(73%)	14000(100%)	4800(92%)	19.1

De beste konfigurasjonene er markert med fet skrift og har sine stivhetsplott i Figur 7-6. Alle plottene holder seg under kjettingen etter 2000 kN og er nesten identiske. Det er mulig å se at tilkoblingen ved 10% er stivere enn de andre før kjettingens stivhet krysses og at 15% krysser tidligst.



Figur 7-6: Plottene til de oppsettene som er best og som tilfredsstillter kravene

Ut fra dette er det flere muligheter å velge mellom. Fordi forankringssystemene så vidt er myke nok ved 2000 kN og at over 90 % av kapasiteten til linene utnyttes samt usikkerheten ved hvor overførbart dette er for et fullskala oppsett velges det å gå opp til 750 meter ankerradius. Dette er nesten samme lengde som baseline.

7.4 Begroing

Da begroing ble antatt å ha liten påvirkning på systemet og det at den er avhengig av valg av nylondiameter ble dette ventet med til slutt. Med begroing ble diameteren 230 mm og e-modulen justert for å beholde lik stivhet i lina. Tettheten måtte også endres. Denne gjennomkjøringen ble kjørt som Tabell 7-12 viser.

Tabell 7-12: Parametere ved begroing

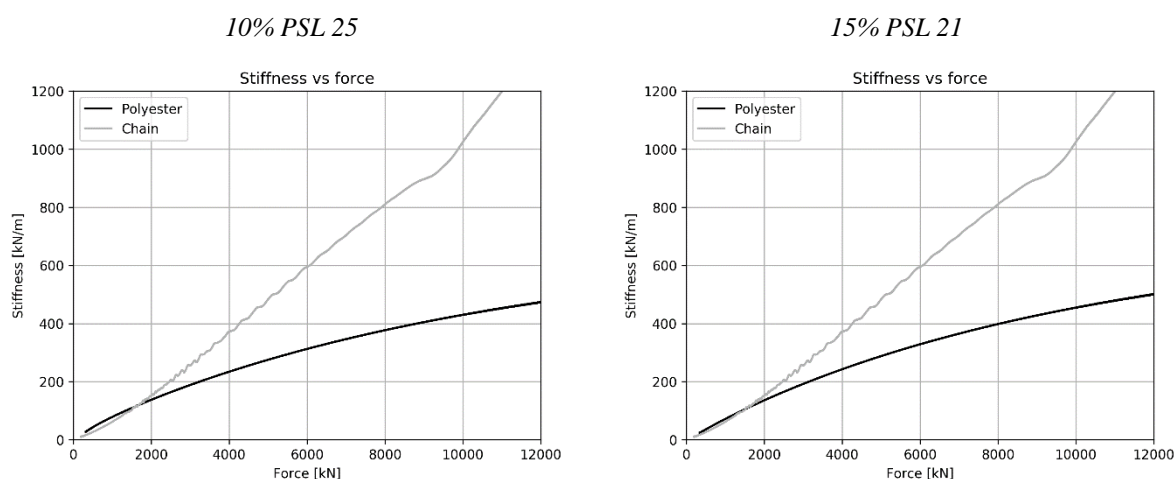
Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
750	20	144 (230)

Etter litt justering av PSL ble resultatene som i Tabell 7-13. Kraftene i fairlead er ikke et problem da ankeret hovedsakelig øker kraften på ankeret. Kortere tilkobling medfører en mindre endring mellom de to, selv med høy spenning i nylontauet som vist for 10% og PSL 25. Det negative er så klart den høyere spenningen i nylontauet.

Tabell 7-13: Krefter i linesegmentene når nylon er med begroing

Konfigurasjon	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]	Forskyvning [m]
(PSL 25) 10	10600(75%)	12900(92%)	4600(88%)	19.2
(PSL 21) 15	10200(73%)	13000(93%)	3900(75%)	20.0
(PSL 22) 15	10200(73%)	13300(95%)	4300(83%)	20.1

Plottene for de to beste oppsettene i Figur 7-7 viser seg å være nesten like, med noe variasjon ved 1000kN og 12000kN.



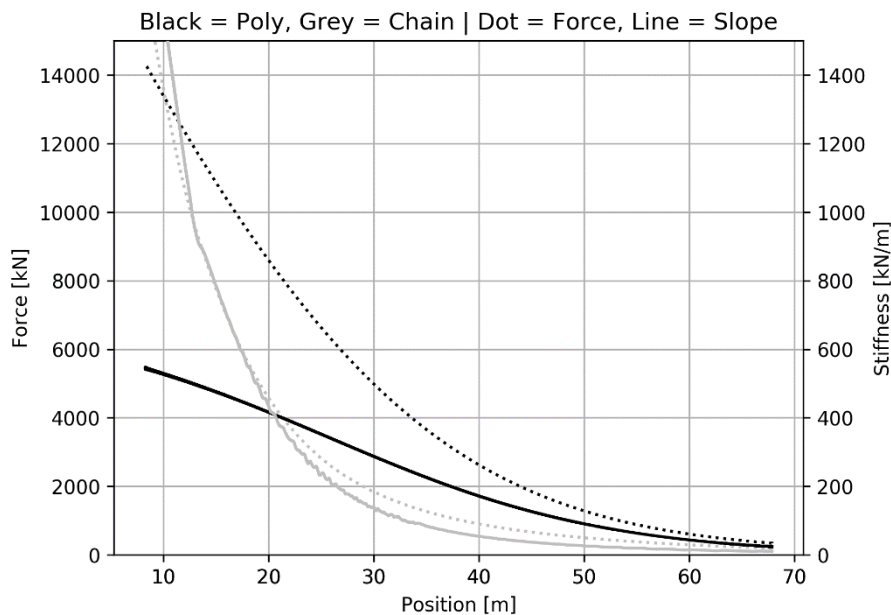
Figur 7-7: Stivhet og horisontal kraft i fairlead for de to beste oppsettene

Ved å se på kreftene i linesegmentene i sammenheng med stivhetsplottene ser tilkoblingen ved 15% og PSL 21 ut som det beste alternativet og velges derfor. Dette oppsettet slår de andre på kraft i alle linene, spesielt nylon som det er antatt å ha størst usikkerhet ved.

7.5 Oppstramming

Plattformen kan som nevnt tidligere ikke flytte seg lenger enn 30 meter fra utgangsposisjonen sin på grunn av strømledningen på 100 meters dyp. Ved å se på den horisontale kraften polyesterlina påfører plattformen i sammenheng med fairleads bevegelse, kan oppstrammingen bestemmes. For den utvalgte konfigurasjonen som ble utviklet ser denne sammenhengen ut som på Figur 7-8. Her er kraften ca. 3000 kN i plattformens utgangsposisjon med fairlead på 37.9 meter. Dette er høyere enn middelveiden for FLS studiene og er ønskelig å få lavere. Ved å

bestemme en PSL for polyesterlina kan den slakkes og flytte kraftplottet mot venstre etter ønske. Eneste kravet er at linene ikke skal være slakke.



Figur 7-8: Den globale kraften i fairlead for polyester og baseline ut fra posisjon. 37.9 er nullpunktet

For å oppnå samme kraft ved 37.9 meter må plottet flyttes omtrent 15 meter mot venstre. Dette gjør at maksimal horisontalkraft ser ut til å komme under 9500 kN, som betyr at forflytningen blir større enn 30 meter. Siden systemet er mykere skal plattformbevegelse dempes bedre og føre til mindre topper. Med dette utgangspunktet kan det tenkes at systemet ikke trenger å være fullt så mykt ved sin nullposisjon. Derfor velges en forskyvning mot vestre på 10 meter og som tidligere nevnt er forholdet mellom ankerradien og polyesterlina omtrent lik 1 ved denne lengden. Det gjør at forlengelsen på lina bør være omtrent:

$$\frac{10 \text{ m}}{750 \text{ m}} = 0.013 \quad (18)$$

På grunnlag av dette ønskes det å simulere med en forlengelse på polyesterlina med henholdsvis 1% og 1.5%.

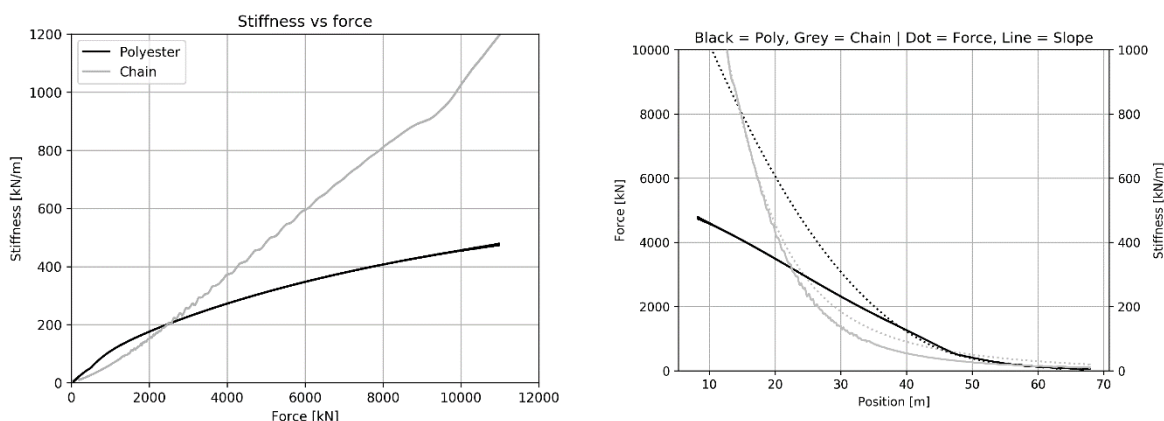
Oppsettet var følsomt for endringen og mange iterasjoner var nødvendig for å få et tilfredsstillende resultat som er lagt frem i Tabell 7-14. PLS for polyesterlina på 1.5% viste seg å være for mye da simuleringen ikke nådde den horisontale kraftkomponenten ved forflytning av fairlead 30 meter. Derfor ble 1% forlengelse brukt for de fleste testene. Forlengelsen av hovedlina gjør at nylonrepet ikke får samme påkjenning før fairlead, og da også tilkoblingspunktet, har beveget seg lenger. Dette gjør at vinkelen nylon danner med hovedlina blir nærmere 90 grader og mer av kraften overføres til fairlead. Kreftene ble generelt lavere da systemet nå var slappere og beveget seg mer som det ville gjort uten nylonlina. Derfor måtte slakket i polyesterlina veies opp for med en innstramning av nylon. Denne kombinasjonen ser ut til å gi økt påkjenningen i favør av ankersegmentet.

Tabell 7-14: Resultater med forlenging av polyesterlina

Konfigurasjon	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]	Forskyvning [m]
10 % PSL -0.010 PSL 0.25	10400	12000	3500	26.4
10 % PSL -0.010 PSL 0.30	10800	13200	5100	
15 % PSL -0.010 PSL 0.21	10 000	12 000	2 900	27.0
15 % PSL -0.010 PSL 0.23	10100	12500	3500	27.2
15 % PSL -0.010 PSL 0.25	10200	13200	4200	27.3
15 % PSL -0.010 PSL 0.30	10600	14900	6100	27.6
15 % PSL -0.015 PSL 0.21	9700*	11300*	2000*	30.0*
20 % PSL -0.010 PSL 0.20	10000	13000	3700	27.7

Som Figur 7-9 viser, er systemet som var mykt nok før forlengelsen av polyester, nå ikke det. Når det gjelder kraften i nullpunktet er denne nå lavere enn 2000 kN og akseptabel.

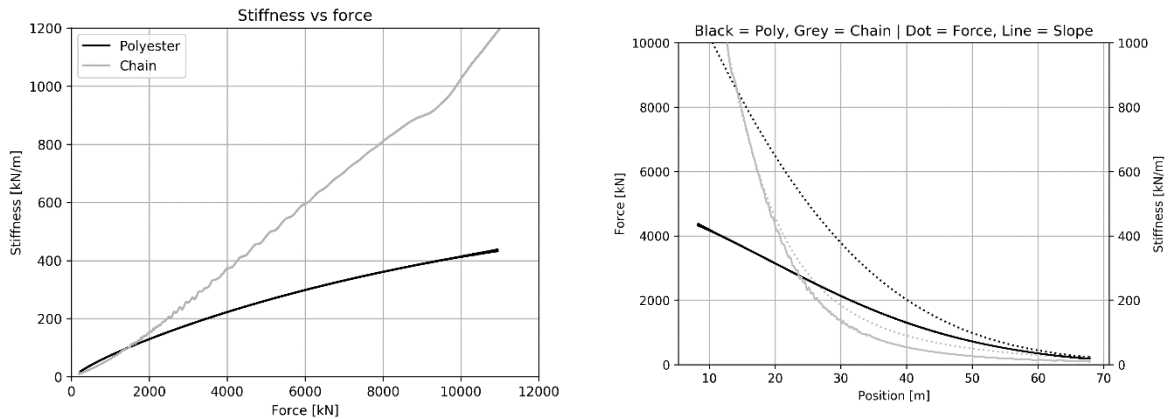
10 % PSL -0.10 PSL 0.25



Figur 7-9: Samme oppsett som fungerte i forrige test, men forlengelsen av polyester fører til av stivhetsplottet ikke er mykt nok.

For å gjøre systemet fungerende igjen, måtte PSL for nylon settes til 30. viser Figur 7-10 hvordan dette endret stivheten, når kreftene inntreffer. Selv om stivheten er god er kraften på plattformen nesten tilbake på nivået før forlengelsen av polyesterrepet.

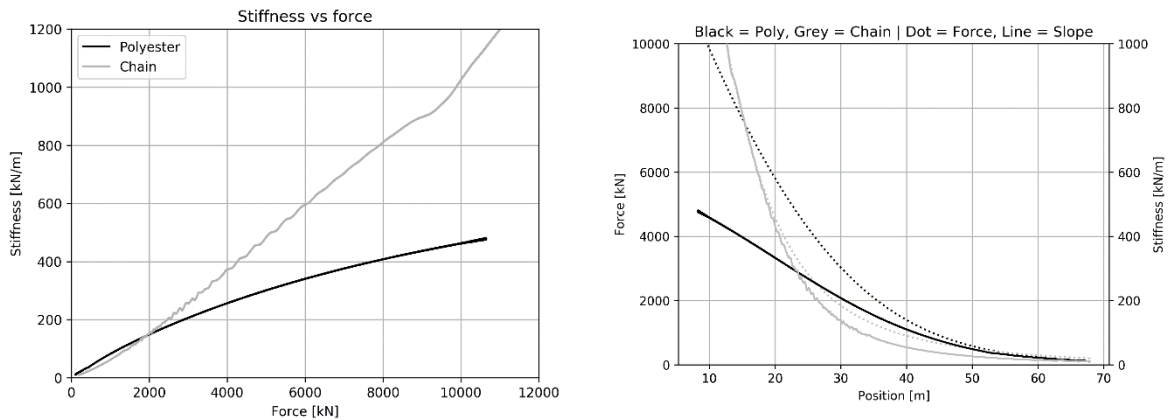
10 % PSL -0.10 PSL 30



Figur 7-10: PSL 30 for nylon gir et stivhetsplott som er akseptabels, men kraften som virker i utgangsposisjonen for plattformen er nå for høy

For tilkobling ved 15% ble stivheten så vidt tilfredsstillt ved PSL for nylon på 0.23. Da er også kraften under 2000 kN for fairlead på 37.9 meter som er vist i Figur 7-11.

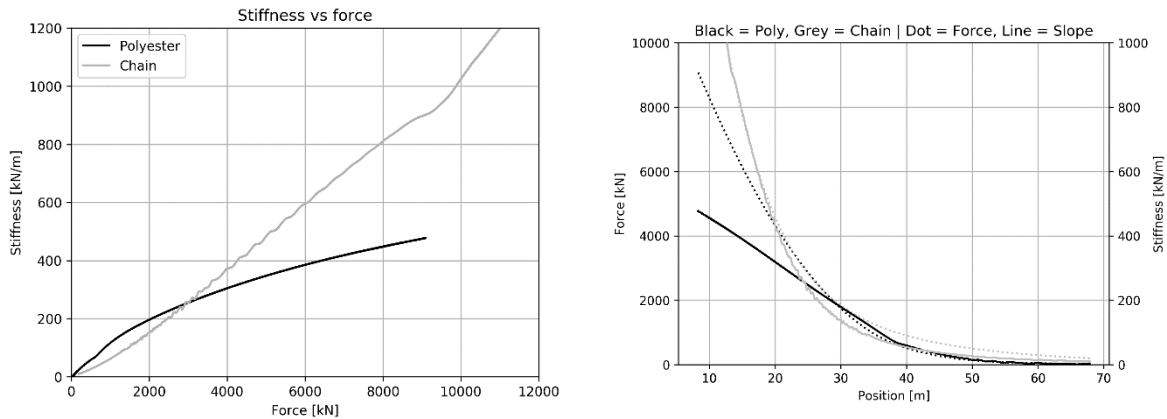
15 % PSL -0.010 PSL 23



Figur 7-11: Stivhet- og kraft-posisjon-plott som består kravene.

Et forsøk på å forlenge polyester med 1.5% var ikke vellykket med tanke på bevegelse av plattformen, men hadde klart lavest krefter når plattformen står i startposisjonen sin. Figur 7-12 viser dette og et stivhetsplott som ikke er godt nok. PSL for nylon kunne prøvd å økes å holde bevegelsene innenfor det som er tillatt, men på grunn av at denne enlinede testen kanskje ikke ville gi et perfekt bilde av situasjonen til en full plattform er det valgt å være på den sikre siden og holde forlengelsen til det minimale.

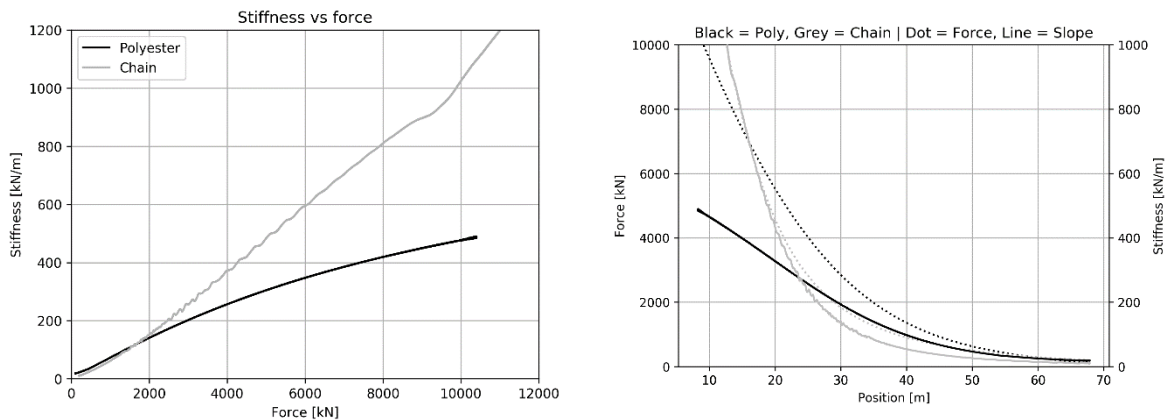
15 % PSL -0.015 PSL 21



Figur 7-12: Polyesterrepet er forlenger 1.5%. Denne konfigurasjonen har de klart laveste kreftene ved 37.9 meter, men yter aldri nok krefter på plattformen innenfor dens kriterium på maksimalt 30 meters forskyvning

Tilkobling på 20% ble også prøvd fordi når plattformen beveger seg lenger vil nylonlina mer på fairleadsegmentet. Figur 7-13 viser resultatet for denne løsningen og ser veldig bra ut.

20 % PSL -0.010 PSL 20

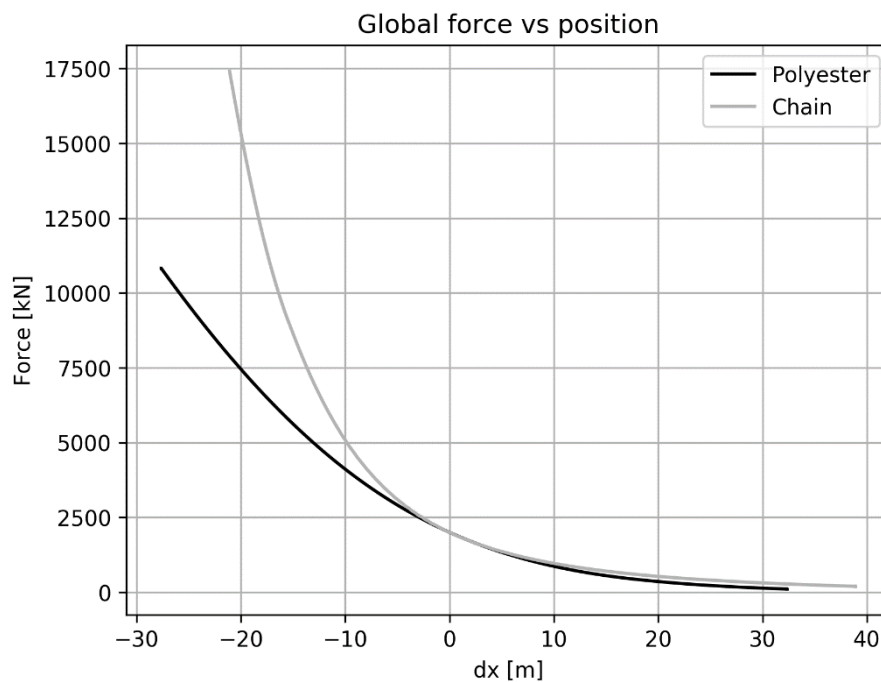


Figur 7-13: 20% tilkoblingspunkt

Av de analyserte tilfellene med 1% forlengelse av polyesterlina var 15 % PSL 23 og 20 % PSL 20 de som bestod alle kravene. Fordi tilkoblingen ved 15% hadde lavere verdier ved ankeret og i nylonlina var denne å foretrekke. Dette gjør at løsningen er valgt.

For å se på hvordan stivheten er for baseline og polyester ble deres krefter plottet mot hverandre med 2000 kN horisontalkraft i fairlead som nullpunkt. Som Figur 7-14 viser øker forskjellen

mellom polyester og baseline når tauet blir strammet opp med klart størst krefter i kjetting. Når det slakkes derimot er det minimal forskjell, med polyester hakket lavere.



Figur 7-14: Kraften horisontalt i fairlead mot bevegelsen av fairlead. Nullpunktet er satt til 2000 kN horisontalt og en negativ forflytning gir oppstramning av lina.

Utregning av lengder og størrelser:

$$L_0 = L(1 - PSL) \quad (19)$$

$$L(\text{poly}) = \sqrt{(750 - 38)^2 + (12 + 100)^2} = 721 \text{ m} \quad (20)$$

$$L(\text{Poly}, PSL) = L(1 - PSL) = 721(1 + 0.01) = 727 \text{ m} \quad (21)$$

$$L(\text{nylon}) = \sqrt{(145 - 0)^2 + (-5 + 100)^2} = 173 \text{ m} \quad (22)$$

$$L(\text{nylon}, PSL) = L(1 - PSL) = 173(1 - 0.23) = 133 \text{ m} \quad (23)$$

Dette gir at systemet før størrelsen som vist i Tabell 7-15.

Tabell 7-15: Endelige spesifikasjoner for polyester- og nylonliner

Polyester-nylon-system		
Ankerradius	750	m
Polyester:		
Diameter	200	mm
Diameter med begroing	320	mm
Lengde	727	m
Nylon:		
Diameter	144	mm

Diameter med begroing	230	mm
Lengde	133	m

8 Resultater og diskusjon

I dette kapitlet presenteres resultatene fra simulering av FLS og ULS. Da dette handler om baseline som er et system som skal fungere, mot et nytt konsept, er resultatene for det meste gjengitt side om side for enkel sammenligning. For å ikke overvelde leser med grafer er kun de resultater som viser større forskjeller presentert i dette kapitlet og resten er å finne i vedlegg

8.1 Oppsett for fullskalasilulering

Etter at PNS var utviklet ble det testet opp mot baseline. For å gi mest mulig sammenlignbare resultater ble simuleringene kjørt over en halv time, altså 1800 sekunder. Kjøringen ble da gjort for den første delen av bølgespekteret, som er vist i baselinestudiene. Det var også her den største bølgetoppen oppstod. Selve simuleringen varte 400 sekunder lenger, men dette legges inn som en buffer før resultatet leses av for å forsikre at laster og konstruksjon har nådd tilstanden til simuleringstilfellet.

For ULS tilfellet vris rotorbladene 90 grader slik at vinden ikke får tak i konstruksjonen og rotorbladene snurrer sakte. Generatoren kobles også fra for å redusere innvendig skade.

Ved FLS simuleringen skal vindturbinen generere strøm og fungerer derfor som normalt.

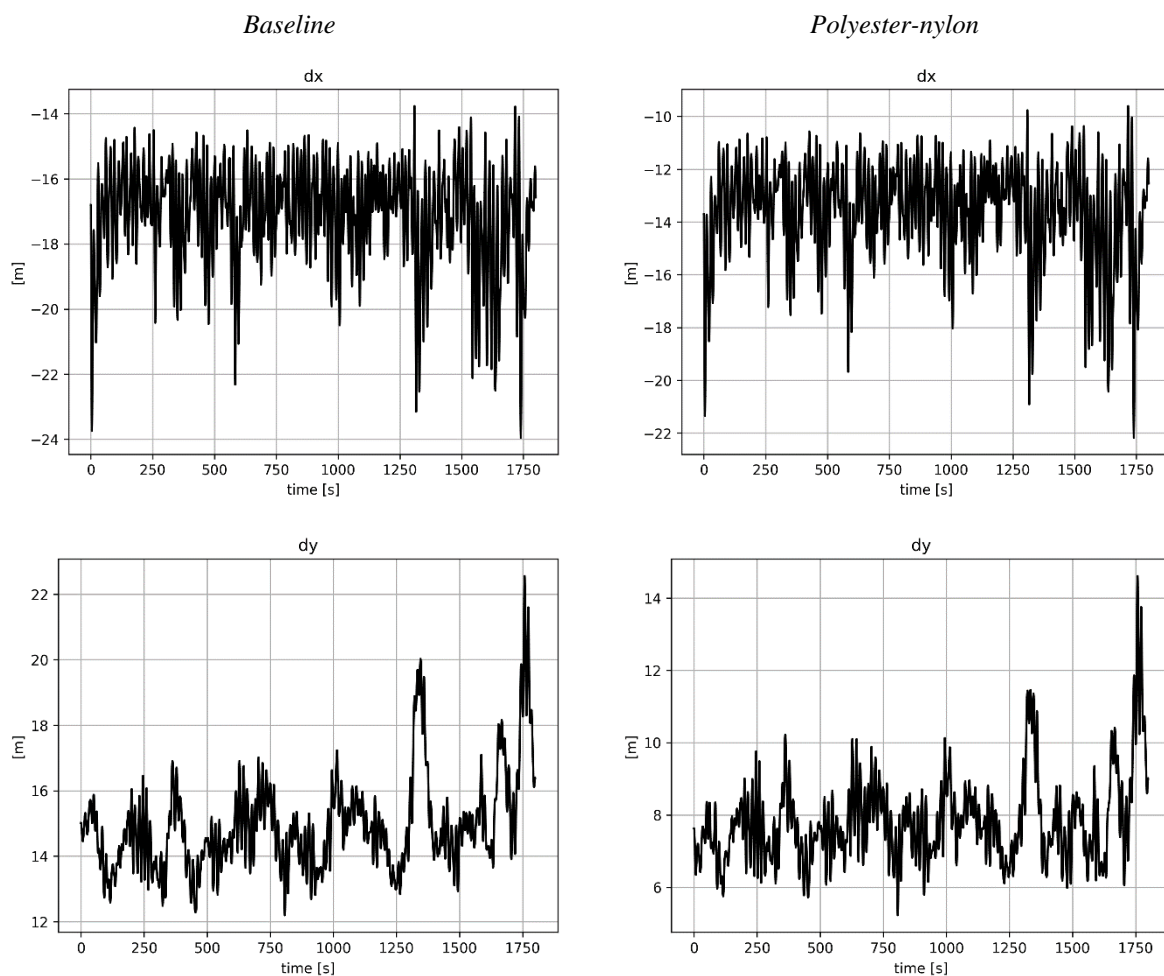
8.2 ULS

Konstruksjonen må overleve ULS tilfellet og ble derfor evaluert først. For å være godt nok må kravene på 14000 kN i polyesterlinene og 5200 kN i nylonlinene være opprettholdt.

8.2.1 Bevegelse av plattform

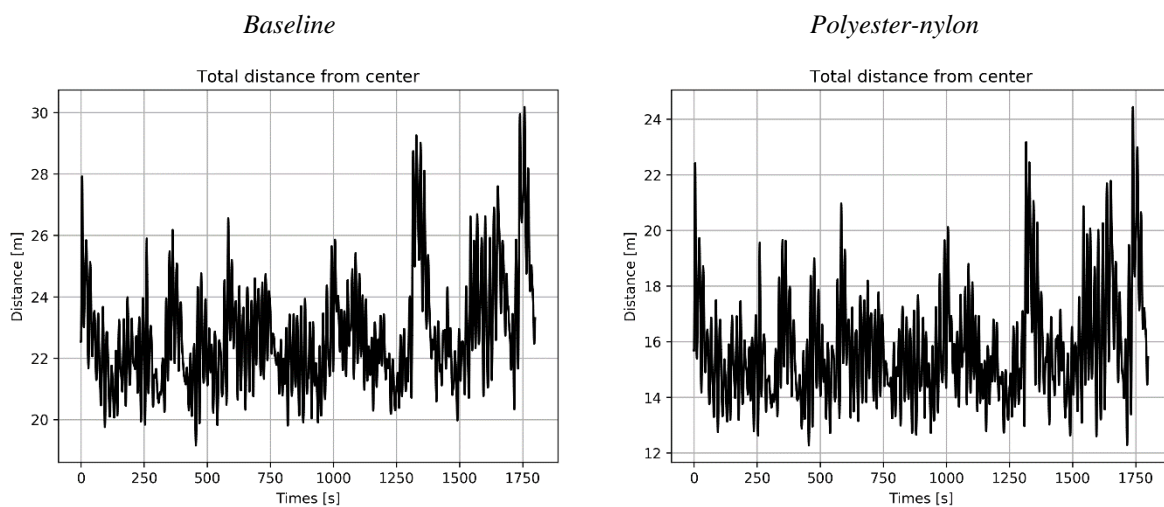
Plottene for posisjonen i x og y retning er vist i Figur 8-1. Her kommer det frem at i x-retning, beveger det nye systemet seg mer frem og tilbake enn baseline, samtidig som den største avstanden fra utgangsposisjonen er 2 meter kortere: på 22 meter. Dette gir mening da stivhetskurven er mindre bratt som gir grunnlag for mer bevegelse ved samme variasjon i påkjenning, samtidig som horisontalkraften er høyere ved kortere forflytning.

I y-plottene er forskjellen mellom største og minste bevegelse omtrent den samme, med baseline 8 meter lenger unna. Dette kan tyde på at stivheten er veldig lik ved de to lengdene og at den strammere utgangspenningen sørger for at dette skjer ved en mindre forflytning.



Figur 8-1: Bevegelse i x og y-retning

For å få en oversikt over den totale avstanden mellom konstruksjon og utgangsposisjon ble dette beregnet og plottet i Figur 8-2. Det viser seg at baseline faktisk overskrider den lovlige bevegelsen på 30 meter grunnet strømkabelen, om så bare så vidt. Det er usikkert hvorfor dette skjedde, men kan skyldes at kre. Det er derfor gledelig at polyester holder seg innenfor 25 meter med ellers veldig lik oppførsel.

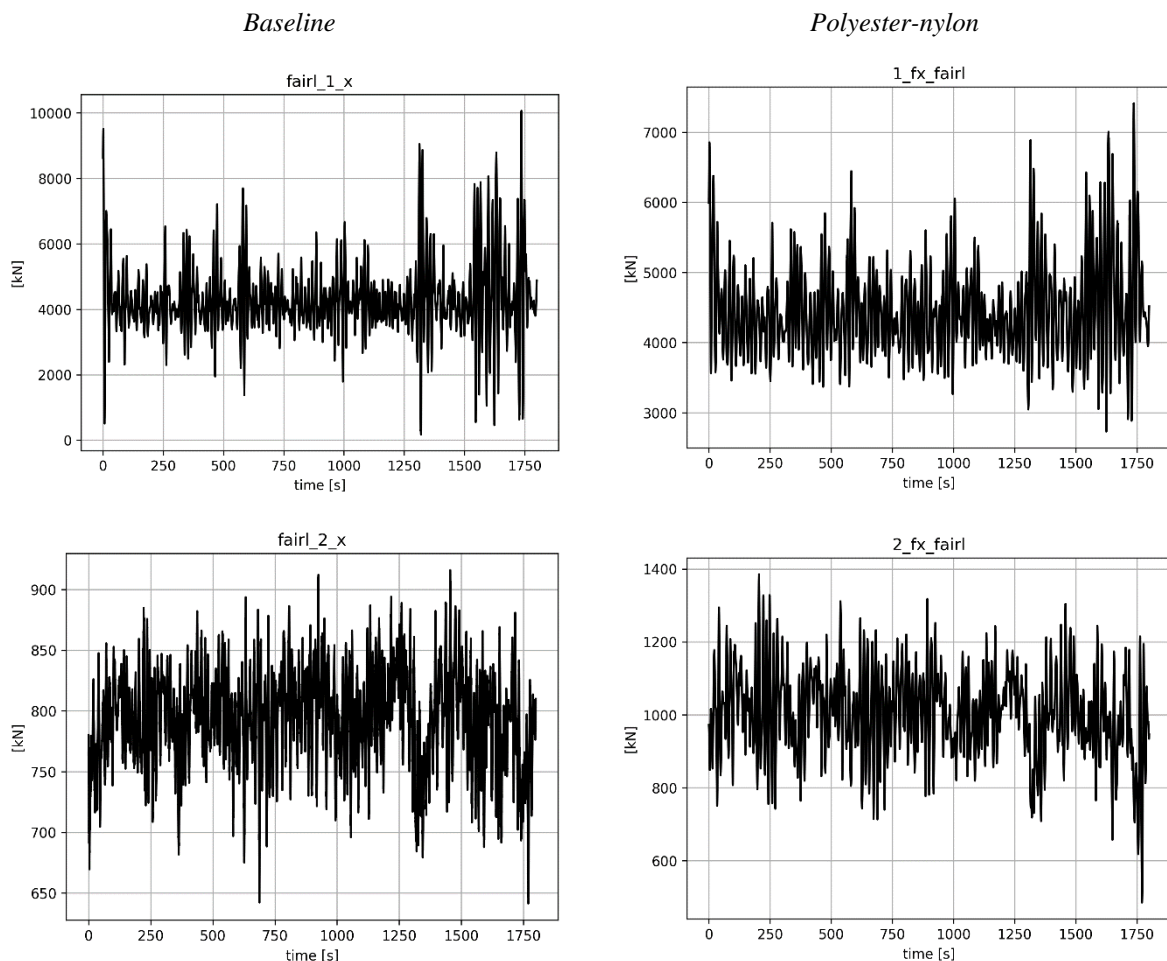


Figur 8-2: Total avstand mellom plattformens posisjon og dens utgangsposisjon

8.2.2 Spenninger ved fairlead

Kreftene for linene ved fairlead er vist frem i Figur 8-3. For den mest utsatte lina, line 1, er plottet drastisk endret. Baseline ligger for det meste rundt 4000 kN med høyeste verdi oppe i 10000 kN, som er grunnlaget for studiet. Den laveste kraften blir i tillegg helt ned mot null. Det er dette som er problemet med baseline: kreftene varierer veldig når systemet er stivt. Dette gjør at krafttoppene blir store når en stor bølge kommer, og bunnene lave når systemet faller tilbake etter bølgen. For polyesterløsningen er den midlere spenningen ganske lik, men ekstremalverdiene mye nærmere: 7500 kN og 3000 kN. Det gir mening da det er stor forskjell i stivheten ved store krefter. PNS øker kraften på plattformen saktere som gir da mindre tykk og napp.

For fairlead 2 ligger plottet for polyester 200 kN over baseline med en amplitude på omtrent det dobbelte. Likevel er amplituden mye lavere enn for line 1 og er ikke noe problem i denne sammenhengen. Line 3 oppfører seg likt for baseline og polyester og fungerer derfor like godt.



Figur 8-3: Aksial kraft i fairlead 1 og 2 for baseline og polyester-nylon-systemet

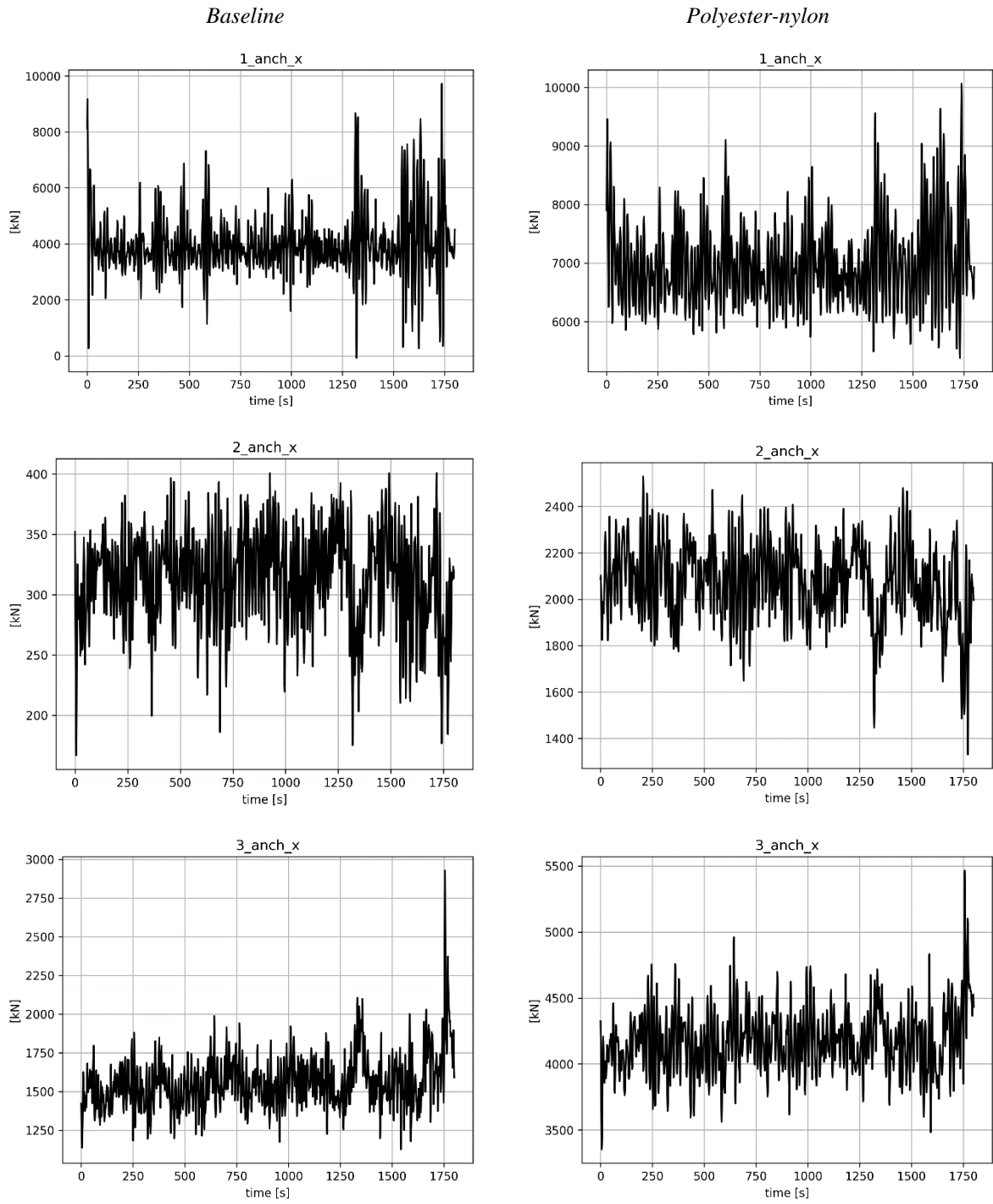
8.2.3 Spenninger ved ankeret

Spenningen ved ankeret og fairlead var omtrent likt for baseline, med noe høyere verdier for fairlead grunnet egenvekten til kjettingen som drar i kjettingen. Dette var ikke tilfellet for polyester, som vist i Figur 8-4. Her er nemlig kreftene en del større og det oppstår en like stor kraft i line 1 som for baseline på 10000 kN. Grunnen til dette er som nevnt tidligere at vinkelen nylontauet treffer polyesterlina med, gir økt strekk ved ankerdelen. Det er altså kreftene i ankeret som bukes til dimensjonering av polyesterlina.

Resultatet viser at line 1 får en middelvei på litt over 6500 kN og ligger dermed godt over baseline. Variasjonen er derimot mye mindre som kan gi grunn til å tro at utmatting kan være lavere, men kan ikke sies sikkert.

Ved line 2 var kreftene ekstremt lave for baseline. Dette er lina som får kreftene og plattformen imot seg slik at kjettingen bli nesten helt slakk og henger ned slik at kun egenvekten yter mye av kraften. For PNS derimot sørger nylonlina for at systemet holder seg stramt og tar opp en kraft på rundt 2000 kN.

Line 3 har også stort sprik i midlere kraft med polyester over det dobbelte av baseline. Ved slutten av simuleringen oppstår det en stor økning på 1500 kN for begge tilfeller. Denne endringen er også synlig ved samme tid for line 1 som får det til å virke som en liten endring i angrepsvinkel fra omgivelsene. På plottet for line 2 er denne situasjonen synlig som en dupp i kraft like etter og det kan tenkes å være i det systemet faller på plass etter den største bølgen har passert.



Figur 8-4: Krefter i ankeret

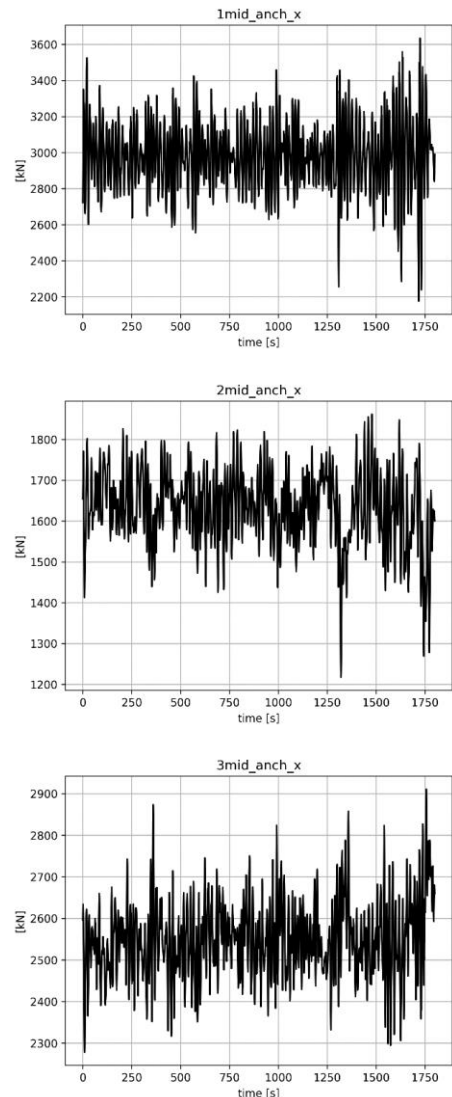
8.2.4 Nylon og midtanker

For nylonlinene er det ingenting å sammenligne med og det er derfor kun interessant å se om de har tendens til å ryke. Figuren til høyre viser blant annet at den mest utsatte nylonlina, som er festet til line 1, har en midlere kraft i seg på 3000 kN med 3600 kN som maks og 2200kN som minimum. Dette er verdier som er godt under det som er tillatt og bør derfor gå veldig fint.

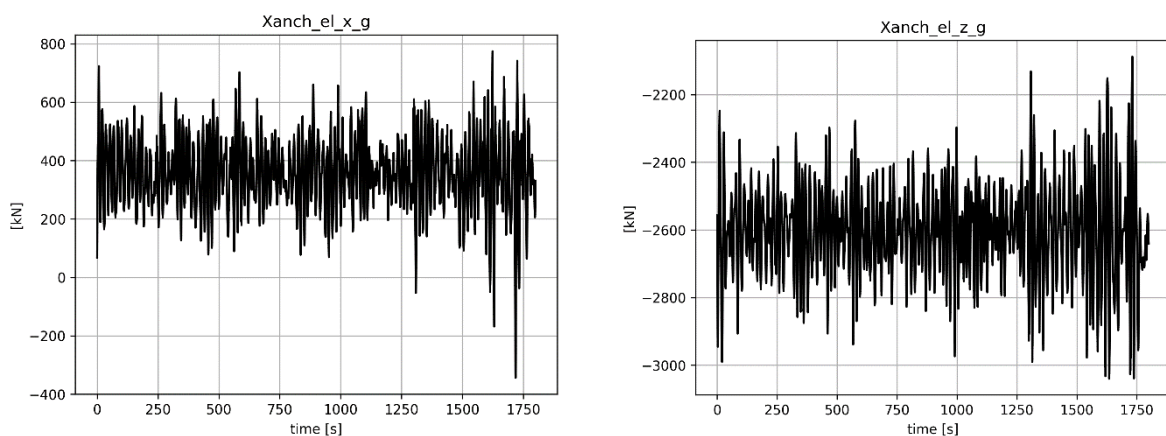
De andre nylonlinene oppfører seg ganske likt, men med litt lavere verdier. Dette er bra da det ikke er problemer med å møte kravet om at repene må være stramme hele tiden.

Midtankeret er vist med sine krefter i det globale koordinatsystemet på Figur 8-5. Z-aksen viser negative verdier, men skyldes kun defineringen av retning og betyr ikke at elementet oppfatter trykk. Kraftene i denne retningen varierer rundt 2600 kN. X-komponenten når et maksimum på positiv 800 kN som betyr at line 1 er den dominerende lina langs denne akse. I y-retning er kreftene enda lavere og den lave kraften horisontalt skyldes at nylonlinenes kraftkomponenter i xy-planet utbalanserer hverandre godt. Dette betyr at vektorsummen av kreftene ikke blir spesielt stor og at det ikke er behov for et veldig stort anker.

Nylonliner



Midtankeret



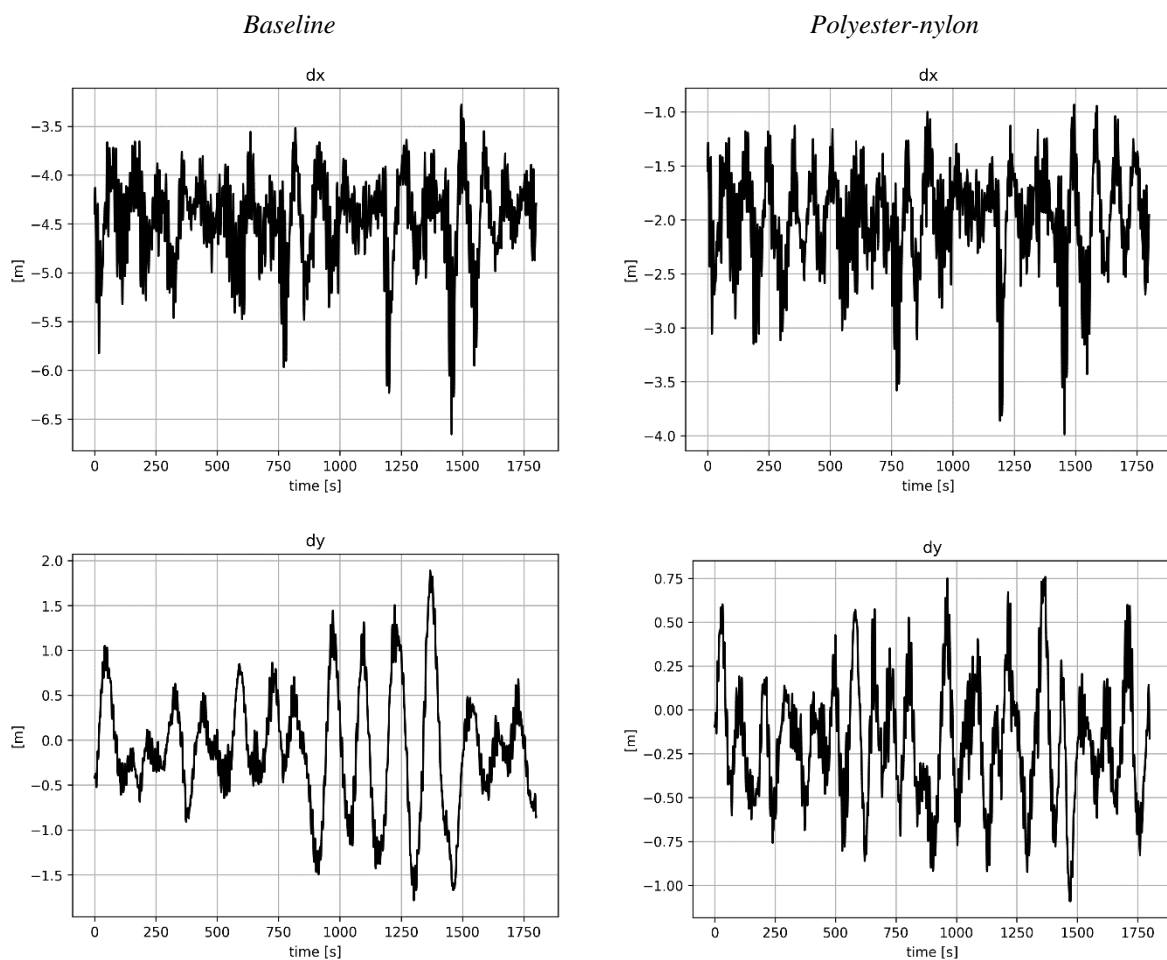
Figur 8-5: Kraftene i midtankeret i z og x-retning globalt

8.3 FLS

Etter at ULS analysen var gjennomført skulle FLS simuleres. Det er her snakk om utmattingsproblematikk og selv om ikke beregninger på temaet skal gjennomføres, skal noen forenklete tilnærminger brukes for å gi et hint om dette.

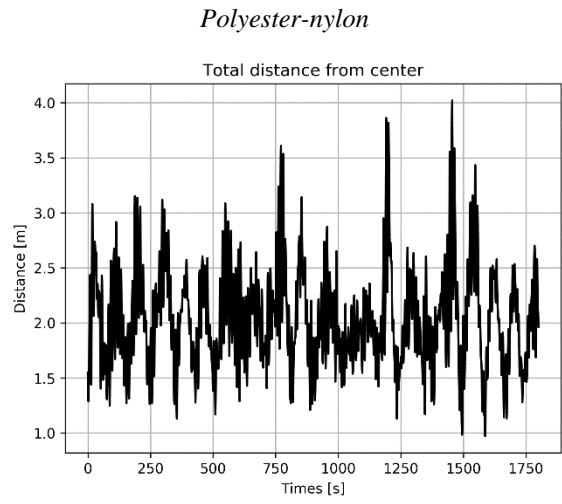
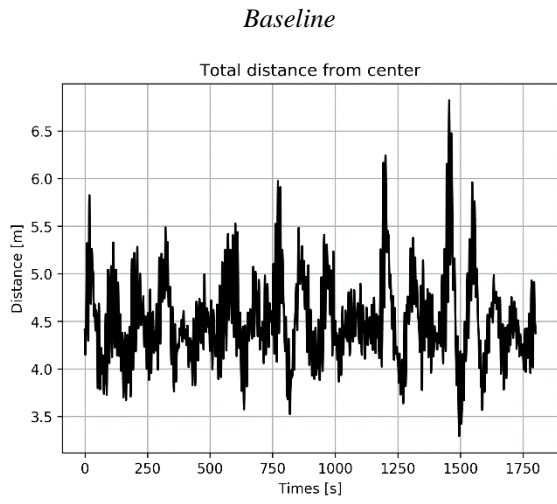
8.3.1 Bevegelse av plattform

Bevegelsen i FLS studiet er veldig små i forhold til ULS som kommer frem av Figur 8-6. For x-retningen var bevegelsesmønsteret veldig likt, men forskjøvet 2 meter lenger ut for baseline. Bevegelsen langs y-aksen ga utsving for baseline på omtrent det dobbelte av polyester og med alle kreftene 180 grader på x-aksen ga dette et forventet midtpunkt på null forflytning.



Figur 8-6: Forflytning av plattformen i x-y-planet

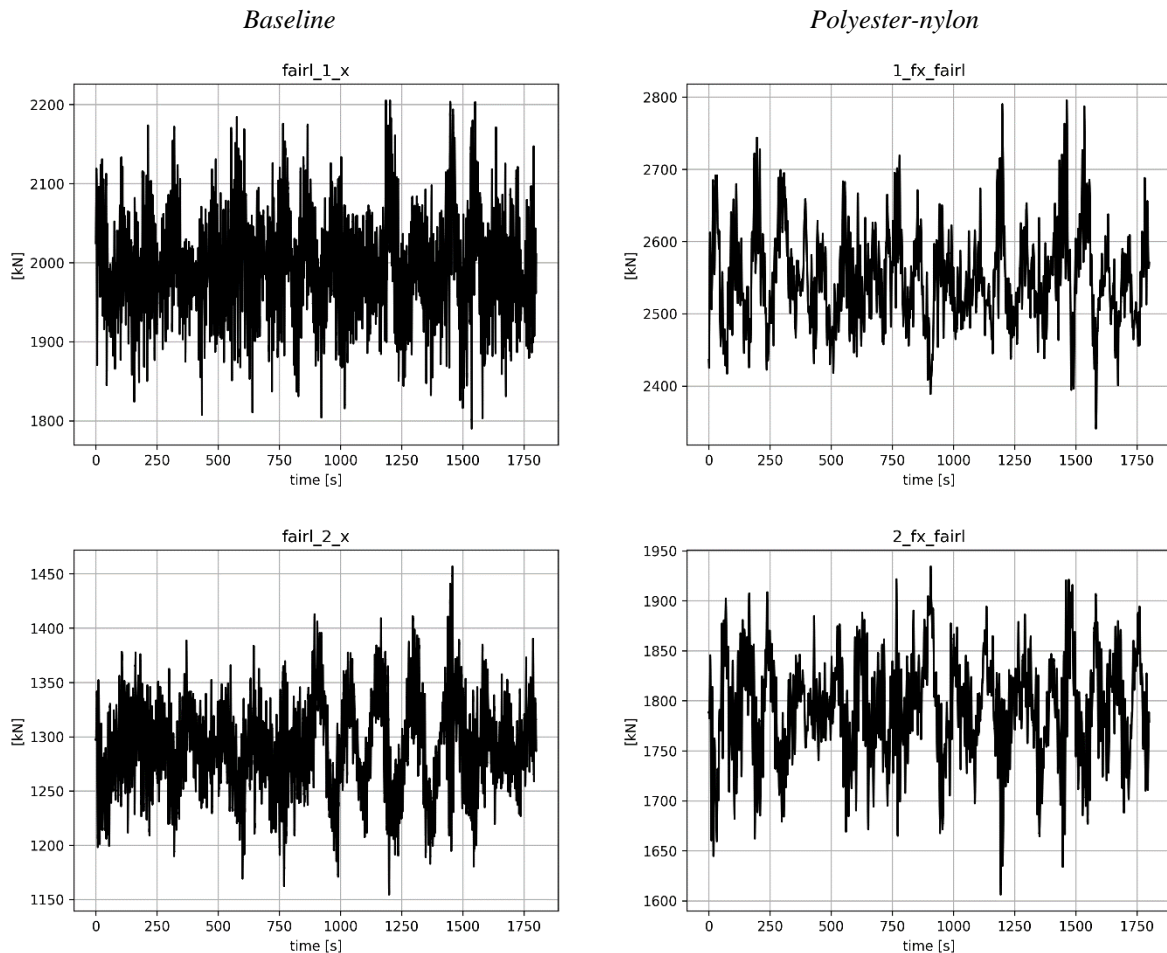
Ved å se på den totale lengden fra senterposisjonen gitt av Figur 8-7 er situasjonen ganske lik her. Det oppstår samme svingninger, men 2.5 meter lenger unna for baseline. Kjettingen henger veldig rett ned og gir derfor liten motstand mot mindre bevegelser nært senter.



Figur 8-7: Avstand mellom plattformens og dens utgangsposisjon

8.3.2 Spenninger ved fairlead

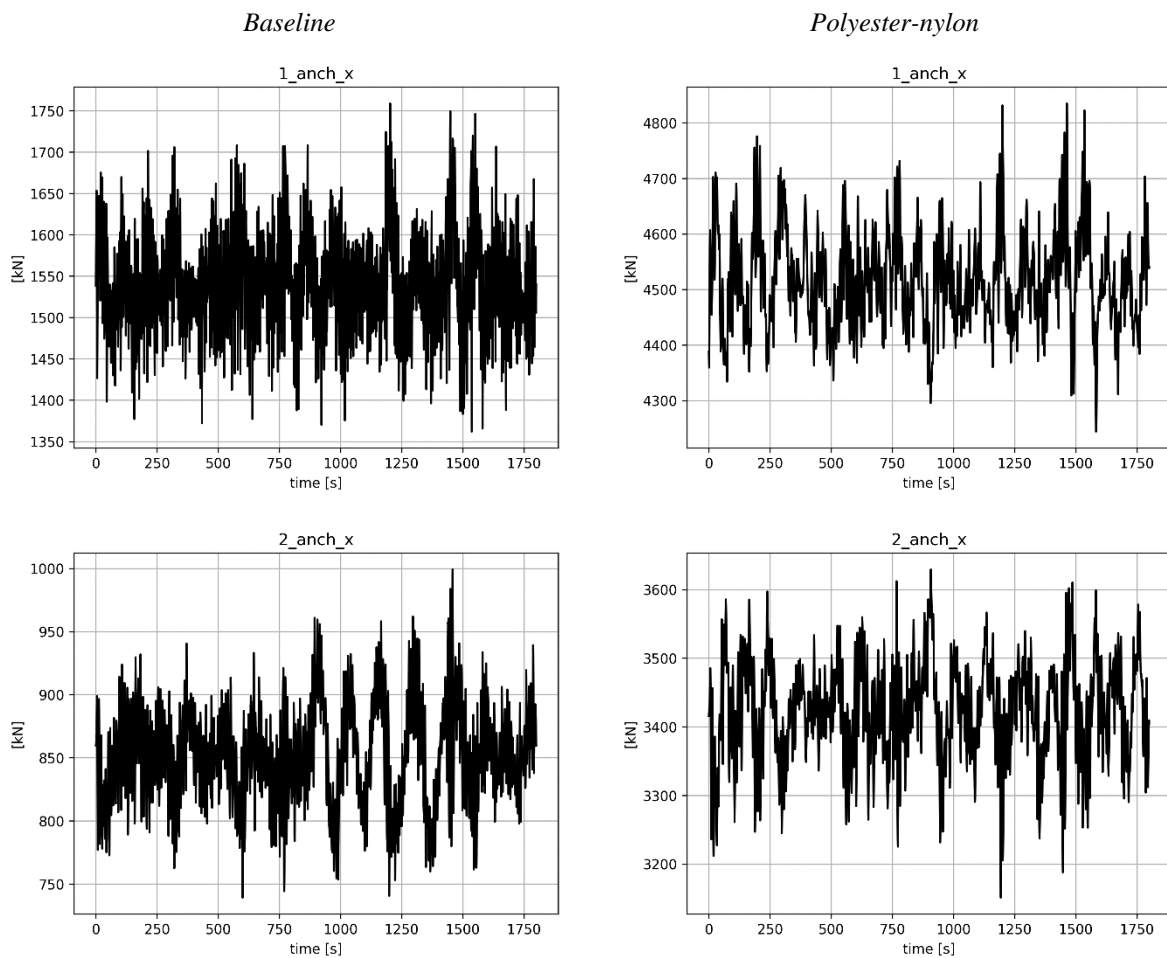
Nok en gang kommer det frem at polyester-nylon-systemet har litt høyere midlere verdi, ut fra Figur 8-8, på grunn av strammingen til denne løsningen. Det maksimale utslaget mellom de to er ellers tilnærmet likt, som ikke var tilfelle i ULS studiet: der line 1 varierte mer og line 2 mindre. Dette påpeker at baseline får problemene i det systemet blir veldig stivt. På grunn av at vind, strøm og bølger alle kommer fra samme side er line 2 og 3 så like at kun line 2 vises.



Figur 8-8: Aksialkraft i baseline og polyester ved fairlead

8.3.3 Spenninger ved ankeret

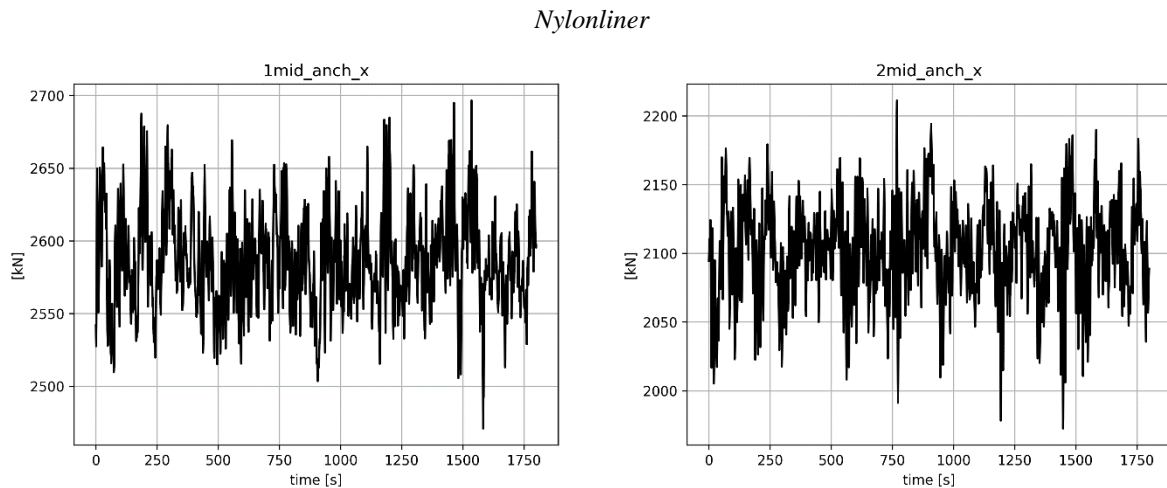
Ved å se nærmere på resultatet fra ankersegmentet vist i Figur 8-9 er forskjellen enda større her. Spesielt middelspenningen er høy her fordi nylonlina må dra ned og endre vinkelen polyesterlina har på fairlead for å gi myk nok horisontal bevegelse. Dette fører til økt spenning spesielt ved ankeret. Grunnen til at ankeret kjenner det ekstra mye i FLS tilfeller er at plattformen har beveget seg kortere og at tilkoblingspunktet ikke har flyttet seg like mye over midtankeret. Det gir en vinkel som øker kraften ved ankeret.



Figur 8-9: Krefter ved ankeret

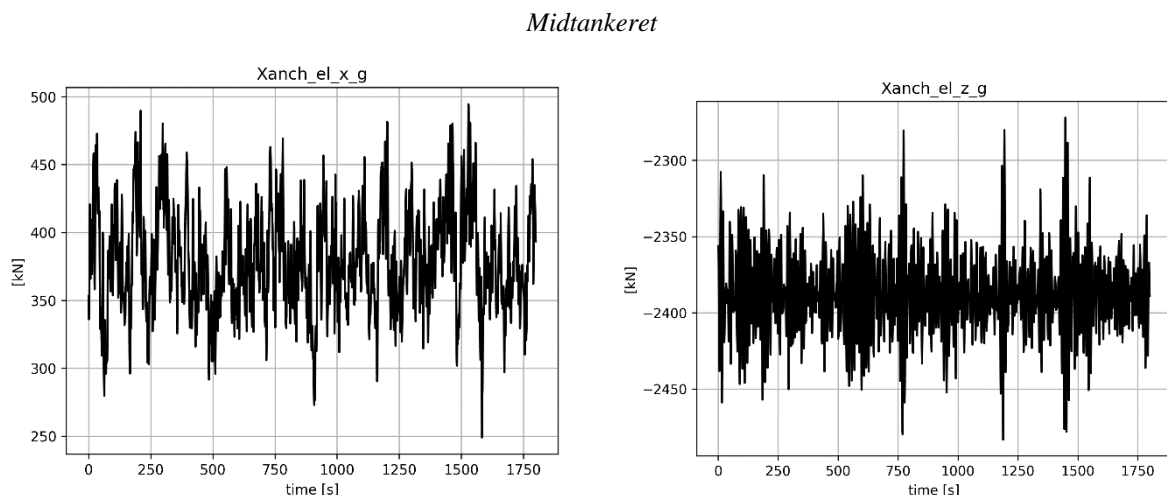
8.3.4 Nylon og midtanker

Med den lave påkjenningen er ikke forskjellen så stor mellom de forskjellige nylonlinene. Line 2 og 3 er nesten identiske og kun line 1 og 2 er derfor vist i Figur 8-10. Line 1 er selvfølgelig slakkere nå som systemet ikke er strammet like mye opp som ved ULS og faren for brudd er enda lavere. Den motsatte sammenhenger er sann for de andre linene, som nå ikke er slakket like mye.



Figur 8-10: Krefter i nylonline 1 og 2

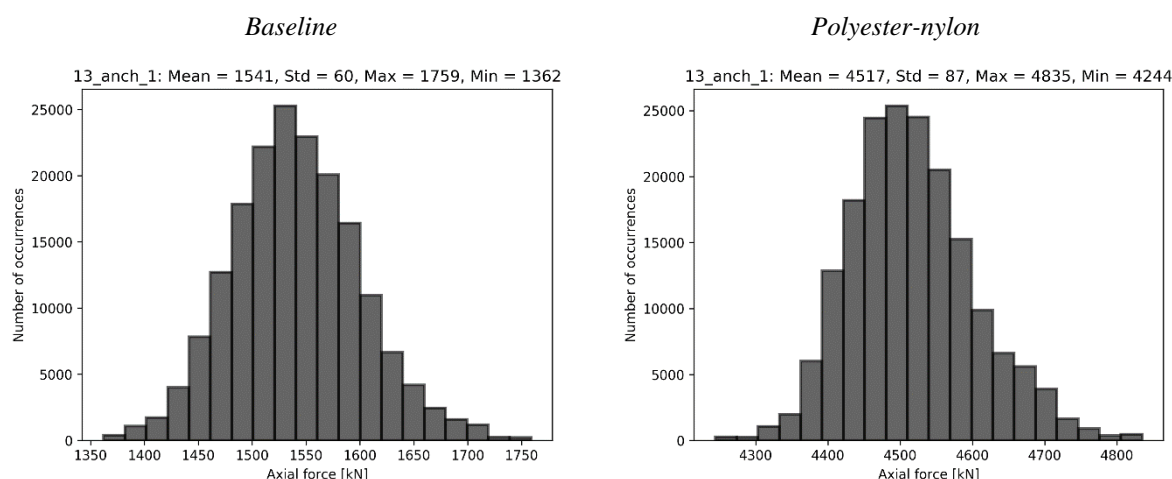
Figur 8-11 viser at kreftene i midtankeret er har mye mindre utslag og i x-retning og holder seg stabilt rundt 400 kN. For z-aksen varierte har den midlere verdien sunket med kun 200 kN. Dette kan forklares av flere fenomener. For det første har alle linene en relativt jevn kraft uansett kraften i polyesterrepet fordi når lina strammes føres tilkoblingspunktet samtidig mot midtankeret som reduserer strekket i nylonlina. Det andre er når en line strammes opp og begynner å vinkles mer oppover gjør de andre linene det motsatte og motvirker denne effekten.



Figur 8-11: Kraften i midtankeret i den globale x og z-retning

8.3.5 Utmatting

Det skulle ikke gjennomføres utmattingsberegninger, men fordi FLS er fører til utmattingsbrudd er det av den grunn brukt er en forenklet tilnærming for å gi en pekepinn på hvordan systemet scorer i forhold til baseline. Polyester og nylon er antatt å bli mindre påvirket av utmatting som gjør det til et mindre problem for systemet. Men systemet er tenkt med kjettinger mellom festepunktene og linene som kan være utsatt for utmattingsbrudd i tillegg til i selve innfestingspunktene. Derfor er det laget plott over hyppigheten av kraftintervaller som vist i Figur 8-12, og det ser ut som om aksialkreftene i linene fordeler seg ganske nært en normalfordeling.



Figur 8-12: Histogram av aksialkreftene.

I tabellene Tabell 8-1 og Tabell 8-2 er middelerverdi, standardavvik, maksimum og minimumsverdi av aksialkreftene regnet ut for henholdsvis baseline og PNS. Da lina 2 og 3 er såpass like er verdier for line 3 utelatt i tabellene. Middelerverdien er større for alle polyester-nylon målingene og standardavviket er større for alle polyester-nylon målingene og standardavviket er større for alle unntatt fairlead 1. Ut fra dette kan en anta at utmatting kan bli et større problem for PNS enn for baseline, spesielt ved ankeret. Ved å se på kraftplottene til linene i Figur 8-11 kan det se ut som om polyester har mindre korte svingninger på toppen av en større svingning med lenger periode. Det kan da tenkes at dette fører til mindre utmatting enn baseline. Siden begge systemene har et argument som taler for og imot seg, kan det påstås at det ene er bedre enn det andre.

Tabell 8-1: Verdier for Baseline. Da lina to og tre er så like er kun verdier for line en og to presentert.

	Middelerverdi	Standardavvik	Maksimum	Minimum
Fairlead 1	1995	63	2205	1790
Fairlead 2	1291	42	1457	1154
Anker 1	1541	60	1759	1362
Anker 2	852	39	999	739

Kreftene i nylonlinene for polyester-nylon-systemet er blant de laveste og har klart lavest standardavvik på 30 kN. Det er derfor rimelig å anta at utmatting ved midtankeret vil være et mindre problem enn ellers i konstruksjonen.

Tabell 8-2: Verdier for det innovative forankringssystemet. Da line to og tre er så like er kun verdier for line en og to presentert.

	Middelverdi	Standardavvik	Maksimum	Minimum
Fairlead 1	2549	65	2795	2341
Fairlead 2	1792	51	1934	1606
Anker 1	4517	87	4835	4244
Anker 2	3423	73	3629	3151
Nylon 1	2586	33	2696	2471
Nylon 2	2101	34	2211	1972

9 Konklusjon og videre arbeid

I dette kapittelet presenteres konklusjoner basert på arbeidet med oppgaven samt resultater og diskusjon. I tillegg gis det anbefalinger om videre arbeid på temaet og alternative mulige konsepter.

9.1 Konklusjon

- Arbeidet viste seg å være av større omfang enn først antatt utformingen av rapporten gikk på bekostning av riktige resultater mot slutten.
- Flere simuleringer ble gjennomført før det ble oppdaget feil i koden. Det ble gått nøye gjennom alle resultater, men feil kan ikke utelukkes.
- Det burde blitt gjennomført simuleringer av flere bølgefiler for å se hvordan dette påvirket resultatene. Likevel burde resultatene ikke være så følsomme for dette da bølgelaster kun er en av flere laster som påvirker vindturbinen.
- Optimaliseringen av kun en line viste seg å være omfattende arbeid. Den manuelle metoden finner en sammensetning av tilkoblingspunkt, ankerradius, nylondiameter og oppstramming som fungerer, men er nok et stykke unna det optimale. Likevel antas verdiene på de tre første punktene å være ganske gode. For oppstrammingen hadde ikke analysen like høye krav og er derfor noe mer usikkert.
- En line i PNS fungerer i realiteten som om det består av tre liner fordi spenningen fra nylonlina ikke blir fordelt likt mellom fairlead og ankeret. Siden fairlead og ankersegmentet går sammen i festepunktet reagerer de veldig likt, men ankersegmentet får noe konstant høyere kraft. Derfor er det kreftene ved ankeret som må brukes med tanke på dimensjonering av polyestertau og anker.
- Resultater fra ULS-simuleringen viser at PNS klarer seg omtrent like godt med tanke på største kraft i linene og har krefter innenfor et mye mindre spenn. I tillegg er kreftene i de andre linene så små at det ikke skal være et problem med brudd her.
- I fairlead er kreftene lavere for PNS enn for baseline som gjør det mulig å redusere dimensjonene her.
- Ved fairlead er kreftene en del lavere for ULS Likevel var den største kraften i linene omtrent like på 10000kN for begge systemer. Baseline får mye større variasjon og har verdier ned mot null, mens PNS aldri går under 5000kN og har noe høyere middelverdi. For andre to linene er PNS mye strammere og baseline går nesten helt i slakk.
- PNS beveges seg mindre ut fra utgangsposisjonen i forhold til baseline, og kom spesielt tydelig frem ved ULS-sammenligningen. Baseline brøt nemlig kravet om å holde seg innenfor 30 meter i radius, noe PNS klarte med 25 meter på det meste. Dette skyltes i stor grad den reduserte bevegelsen langs y-aksen, som står omtrent normalt på kraftretningen til omgivelsene, og oppstår fordi baseline gir lite motkraft før plattformen har beveget seg ganske langt.
- Det er vanskelig å si hvilket av systemene som kommer best ut av FLS-simuleringen med tanke på utmatting. PNS og baseline gjorde det dårlig på hver sin måte og det må

derfor grundigere analyser til for å kunne si noe sikkert angående dette. Det som kan nevnes er at utmatting ved nylonlinene er mindre sannsynlig enn ved ankeret fordi standardavviket og middelspenningen var veldig lav i sammenligning.

- Nylonlinene som er med i PNS holdt seg godt under den tillatte maksimalkraften på 70% av MBL som var oppgitt av produsent. Det bør derfor ikke være i fare for brudd her.
- Når alle nylonkreftene blir komponert sammen i midtankeret viser det seg at kreftene ikke blir for store i hverken FLS eller ULS-tilfellet. Det er fordi x og y-komponentene motvirker hverandre godt og z komponentene er aldri når mer enn 3000kN til sammen. Det bør derfor ikke være for kostbart med et ekstra anker, da dette tar opp krefter på en tredjedel av ankrene festet til polyesterrepene.

9.2 Videre arbeid

Utmattingsberegninger er anbefalt på det sterkeste da dette gir bedre grunnlag til å ta en beslutning om videre utvikling av PNS eller ikke. Den forenklete metoden brukt i denne oppgaven ga ingen tydelige svar på dette.

Analyse av forstrammingen bør gjøres grundigere for å se om det går an å etterligne baseline ytterligere.

PNS viste seg ikke utnytte hele den lovlige forflytningen. Å simulere med mindre slakk polyesterline som gir 5 meter mer forflytning kan kanskje være enda bedre.

Det bør prøves ut flere konfigurasjoner som simuleres med fullt system. Det er interessant å se hvor store endringene kan bli. Spesielt med tilkoblingspunkt nærmere fairlead er å anbefale da det er ved ankeret de største kreftene oppstår.

9.3 Alternative konsepter

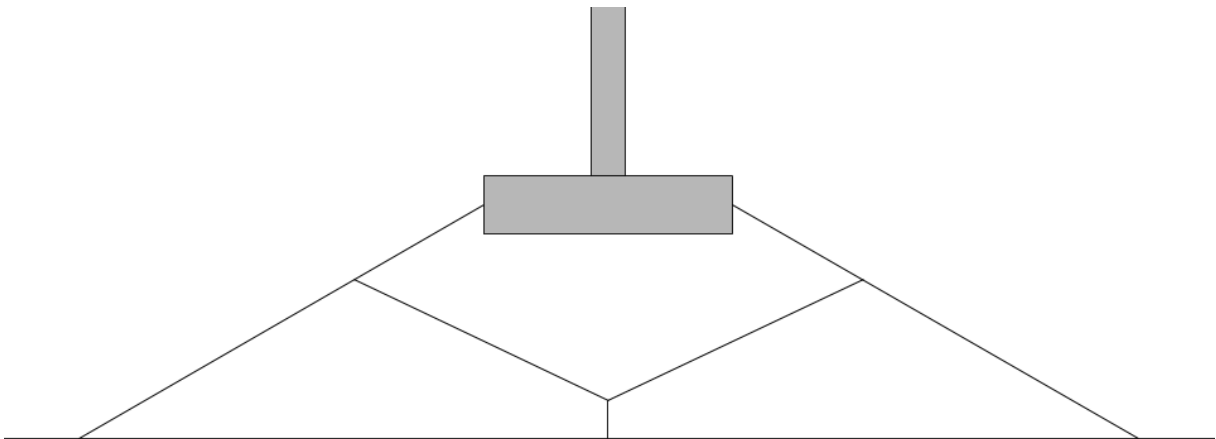
Ganske tidlig i arbeidet ble alternative løsninger utarbeidet på bakgrunn av enkel prøving og feiling med 3DFloat. De ble ikke gått videre med da de er mer avanserte versjoner av PNS og at PNS da ville verifiseres eller forkastes før neste konsept skulle vurderes. Da oppgaven var omfattende nok ble derfor de andre alternativene aldri prøvd ut.

Alternativene baserer seg på tanken om at polyesterlina alene er myk nok ved store påkjenningen, men at den er for stiv ellers. I tillegg kommer kravet til stramme liner. Dette gjorde at tanken på et system som kunne stramme opp polyesterlina når den gikk i slakk og ikke yte noen betydelig kraft når polyesterlina blir stram. Dette er nemlig vanskelig for forankringssystemet som er utviklet i denne oppgaven. Det ble derfor utviklet to konsepter som baserer seg på prinsippet om lave krefter i nylonlina når polyesterrepet er strammet opp. Begge

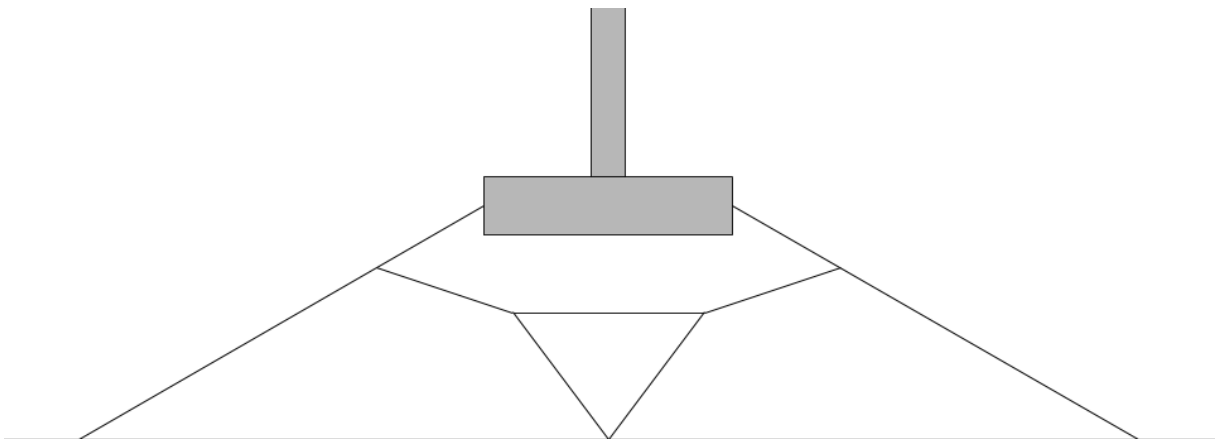
de alternative konseptene består av en sammenkobling av nylonlinene før de kommer ned til ankeret som vist i Figur 9-1 og Figur 9-2.

Systemene fungerer som følger:

1. Vindturbinen beveger seg vekk fra anker 1 og strammer opp line 1.
2. Det tilhørende nylonrepet, nylonrep 1, strekke seg ut.
3. Nylonrep 1 er koblet mot de to andre repene som da strammes opp
4. Fordi nylonlinene er koblet mot hverandre vil de nå et likevektspunkt når kreftene er relativt like som strammer de slakke linene og motsatt



Figur 9-1: Alternativ 1 til forankringssystem



Figur 9-2: Alternativ 2 til forankringssystem

10 Referanser

Dette skal ikke være i stor skrift

- [1] Maritime Research Institute Netherlands. *Mooring*. Hentet fra: <https://wiki.marin.nl/images/2/2d/MOORING.pdf>. Lastet ned: 15.05.
- [2] S. D. Weller, L. Johanning, P. Davies og S. J. Banfield, "Synthetic mooring ropes for marine renewable energy applications," *Renewable Energy*, vol. 83, s. 1268-1278, 2015/11/01/ 2015.
- [3] M. Roser og E. Ortiz-Ospina. 2013. *World population growth*. Hentet fra: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>. Lastet ned: 07.05.2018.
- [4] H. Ritchie og M. Roser. *Energy production & changing energy sources* [Online]. Hentet fra: <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>. Lastet ned: 14.05.2018.
- [5] Wind Europe, "Floating offshore wind vision statement," Wind Europe 14.05.2018 2017, <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Floating-offshore-statement.pdf>.
- [6] Global Wind Energy Council. 2018. *Cost-competitiveness puts wind in front* [Online]. Hentet fra: <http://gwec.net/cost-competitiveness-puts-wind-in-front/>.
- [7] E. S. Kjelstad, "En komparativ kostnadsanalyse av forankringssystemer for flytende vindturbiner," Masters, REALTEK, NMBU, 2017.
- [8] Ingvild Ulrikke Jakobsen og S. Kallbekken. 2017. *Parisavtalen* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/Parisavtalen>.
- [9] A. Nghiem, D. Fraile, A. Mbistrova og T. Remy, "Wind energy in europe: Outlook to 2020," Wind Europe.
- [10] A. Nghiem og I. Pineda, "Wind energy in europe: Scenarios for 2030," Wind Europe 2017.
- [11] Dr. Techn. Olav Olsen. *Oo-star wind floater* [Online]. Hentet fra: <https://www.olavolsen.no/nb/node/149>. Lastet ned: 14.05.
- [12] T. A. Nygaard, "Personlige samtaler med veileder våren 2018," Upublisert.
- [13] "Quick guide to 3dfloat," 07.01, 2014.
- [14] "3dfloat user manual," upublisert.
- [15] B. Pedersen, "Bernoulliligningen," i *SNL*, utg., 2017.
- [16] A. A. Grimenes, P. Jerstad og B. Sletbak, *Grunnleggende fysikk for iniversitet og høgskole*, 1. utg. Oslo: Cappelen Damm, 2011.
- [17] SNL. 2018. *Turbulens* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/turbulens>. Lastet ned: 14.05.2018.
- [18] H. Ormestad. 02.03.2018. *Svingninger* [Online]. Hentet fra: <https://snl.no/svingninger>. Lastet ned: 07.05.2018.
- [19] 14.02.2009. *Harmonisk svingning* [Online]. Hentet fra: https://snl.no/harmonisk_svingning.

- [20] NTNU. *Definisjoner* [Online]. Hentet fra: <http://folk.ntnu.no/oivarn/flid37083/defini.htm>. Lastet ned: 14.05.
- [21] Wikiwaves. *Ocean-wave spectra* [Online]. Hentet fra: https://wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra. Lastet ned: 07.05.2018.
- [22] DNV. *Section 2.8.3 - jonswap spectrum* [Online]. Hentet fra: <http://research.dnv.com/hci/ocean/bk/c/a28/s3.htm>. Lastet ned: 07.05.2018.
- [23] H. E. Krogstad og Ø. A. Arntsen. 2000. *3 sea state parameters and engineering wave spectra* [Online]. Hentet fra: http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/partB/3seastate/3%20SEA%20STATE%20PARAMETERS%20AND%20ENGINEERING%20WAVE%20SPECTRA.htm. Lastet ned: 07.05.2018.
- [24] Orcina. *Morison's equation* [Online]. Hentet fra: <https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Documentation/Help/Content/html/Morison'sEquation.htm>.
- [25] Wikipedia. *Stiffness*. Hentet fra: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stiffness>. Lastet ned: 07.05.2018.
- [26] *Catenary & scope in anchor rode*. Hentet fra: <http://www.petersmith.net.nz/boat-anchors/catenary.php>. Lastet ned: 09.05.2018.
- [27] G. Terjesen, "Grunnleggende om utmatting i metaller," Upublisert, 2017.
- [28] DNV-GL, "Design, testing and analysis of offshore fibre ropes," 2015.
- [29] A. Sønåsen, "Kostnadsanalyse av et innovativt forankringssystem for flytende vindturbiner," Masters, REALTEK, NMBU, 2018.

Appendix A Enlinede simuleringresultater

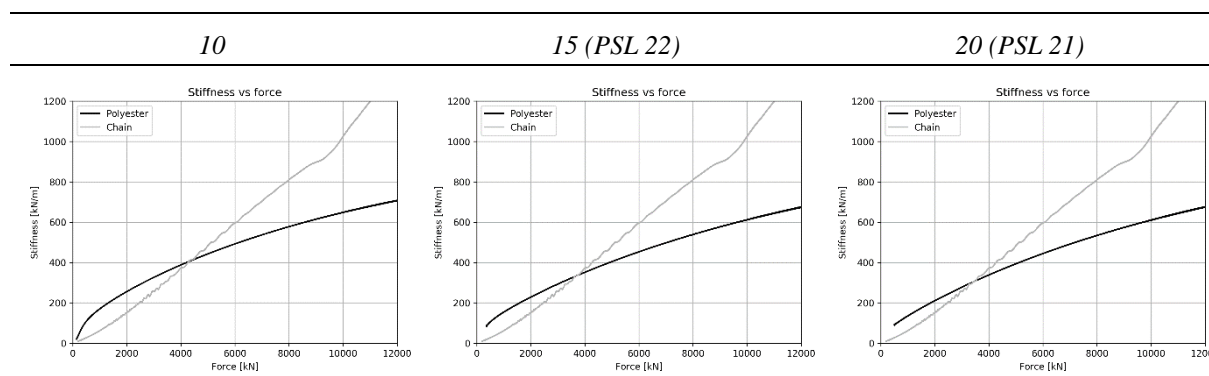
450 meter ankerradius

Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
450	20	144

Den reduserte vinkelen mellom tilkoblingspunkt og havbunn gjør at kraften i nylonlina blir tatt opp av nesten bare ankerdelen når vinkelen blir liten nok. Dette er tydelig ved 30 % hvor fairlead er langt under tillatt verdi og nylonkraften er svært lik differansen mellom fairlead og ankeret. Flere resultater hadde veldig passende stivhet, men litt for høye verdier i de forskjellige segmentene. For å fininnstille dette ble PSL justert for å komme så tett opp mot lovlig grense som mulig. De testene dette er gjort på er markert med PSL i parentes.

Konfigurasjon	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]
10	11700	12700	4900
(PSL 20) 15	11100	12900	4300
(PSL 22) 15	11300	13500	5000
(PSL 23) 15	11500	13800	5400
(PSL 30) 15	12800	16200	8500
20	10900	13500	4600
(PSL 21) 20	11000	13900	4900
25	10800	14600	5400
30	10700	16100	6700

Her er de plottene som tilfredsstillt kravene til krefter i linene presentert. På det beste oppstår samme stivhet som kjetting ved 3000 kN. Må altså ha lenger line for å bli myk nok



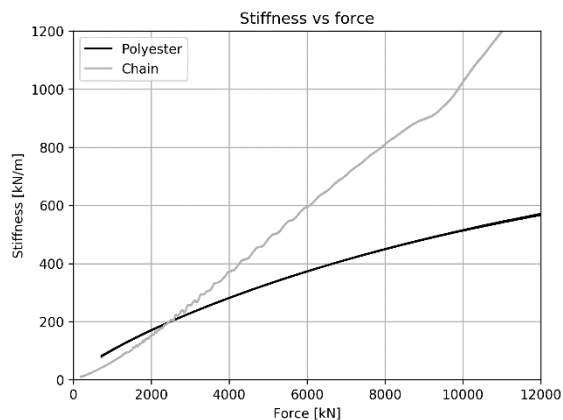
550 meter ankeradius

Ankerradius [m]	PSL	Nylon diameter [mm]
550	20	144

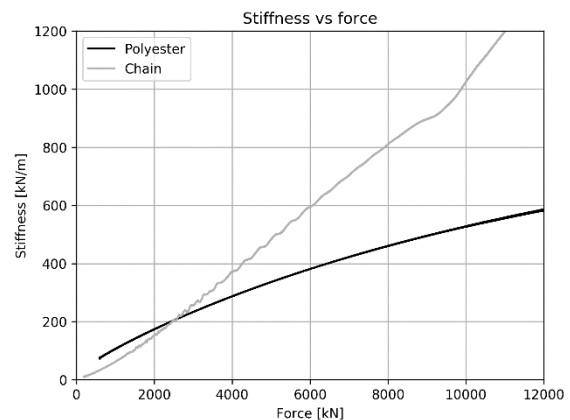
PSL blir stilt på de beste oppsettene for å få full utnyttelse av linesegmentene. Likevel overstiges tillat spenning ved de to ytterste tilkoblingene i tillegg til at deres stivhetsplott ikke er noe bedre enn de andre.

Konfigurasjon	Fairlead [kN]	Anker [kN]	Nylon [kN]	Forskyvning [m]
5	12500	12500	6400	13.2
10	10900	12300	4000	13.5
(PSL 23) 10	11300	13000	5100	13.1
(PSL 25) 10	11700	13500	5900	12.8
15	10600	12700	3900	13.8
(PSL 23) 15	10900	13600	4900	13.5
20	10500	13700	4000	14.1
(PSL 17) 25	10300	13700	4400	14.4
25	10400	15100	5900	14.5

10 (PSL 25)

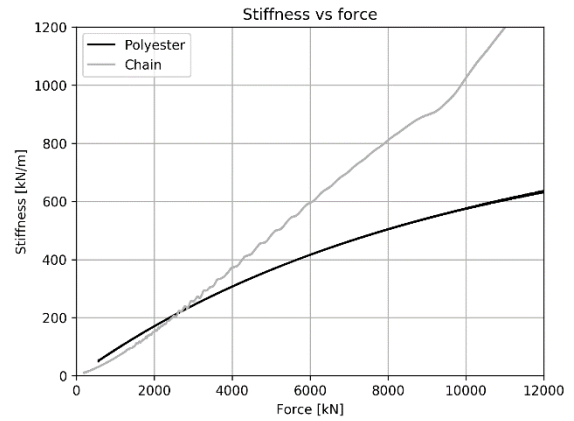
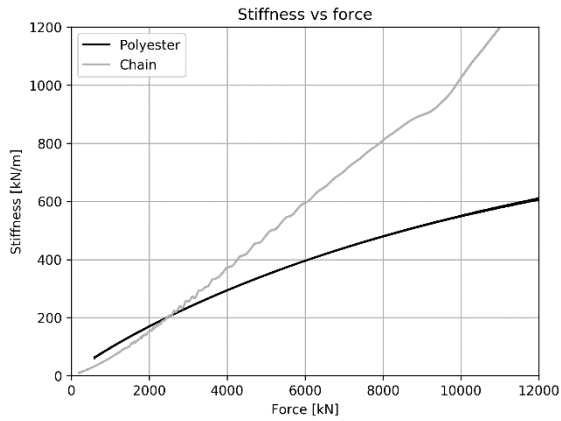


15 (PSL 23)



20

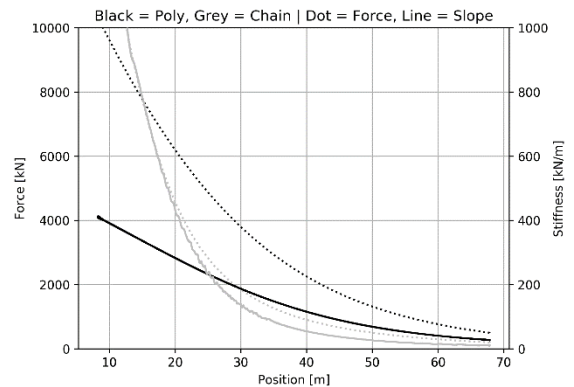
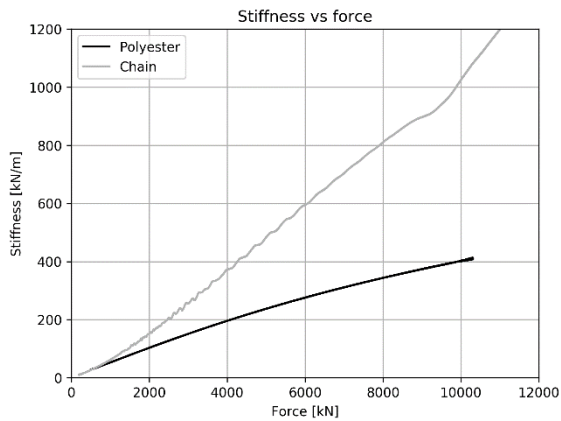
25 (PSL 17)



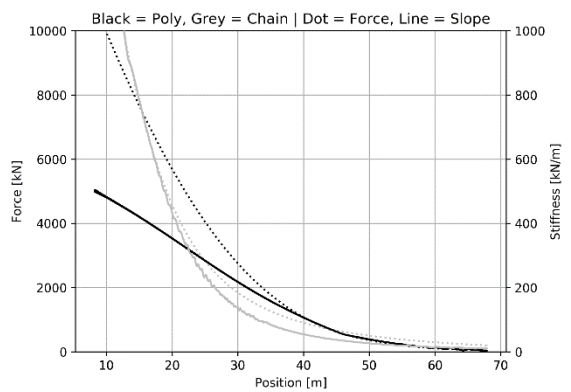
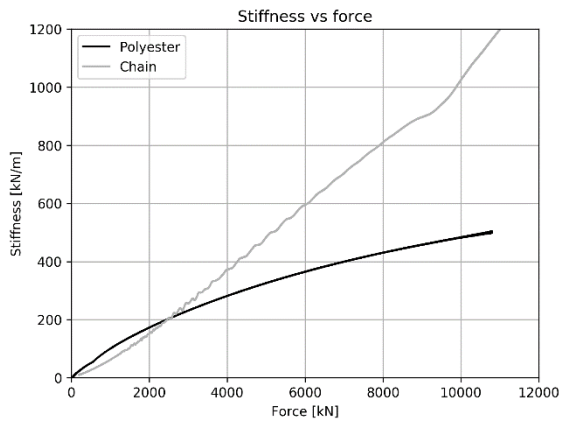
15 (PSL 23) og 20 ser best ut, men for stive ved 2000. Må derfor forlengte.

Forstramming

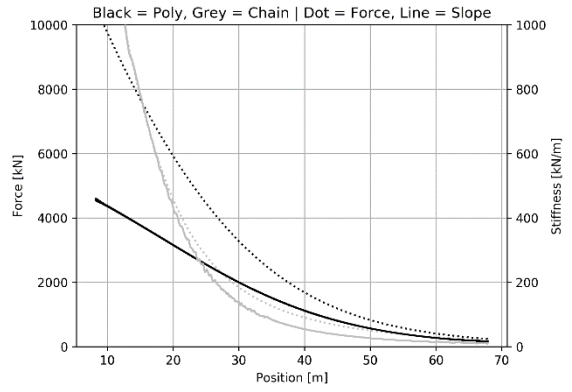
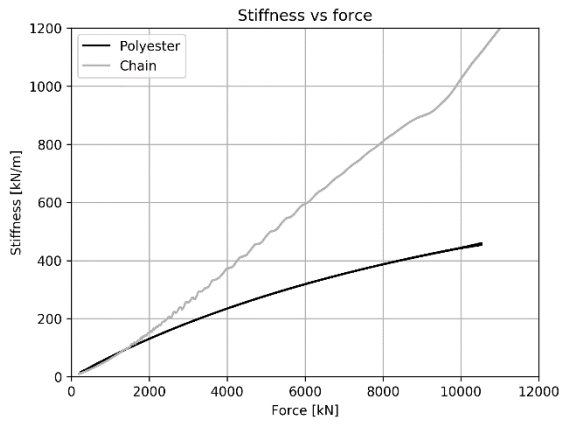
15 % PSL -0.010 PSL 30



15 % PSL -0.010 PSL 21



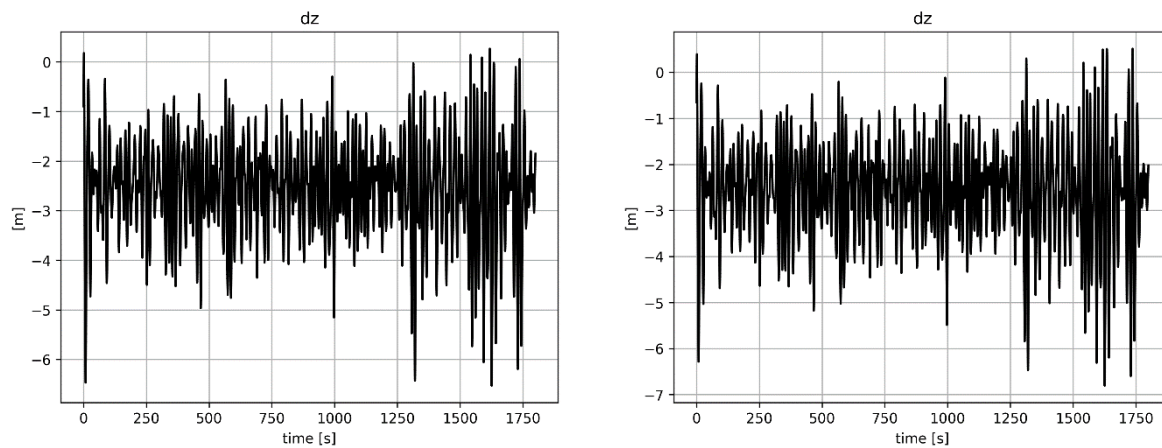
15 % PSL -0.010 PSL 25



Appendix B Resultater fra fullskala simulering

ULS

Bevegelse

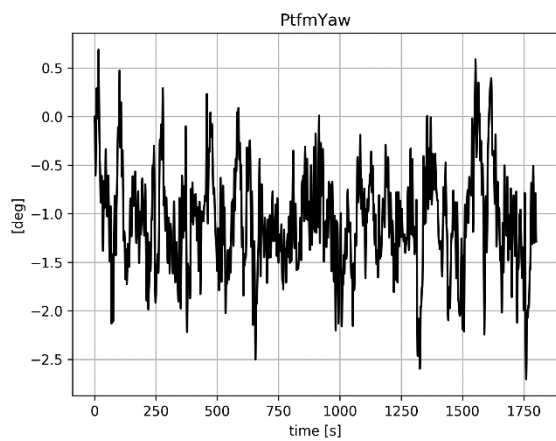
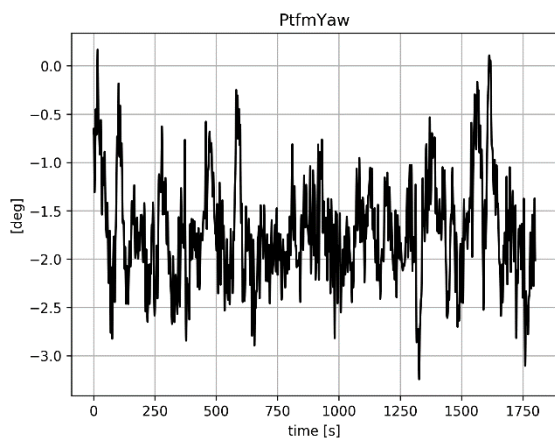
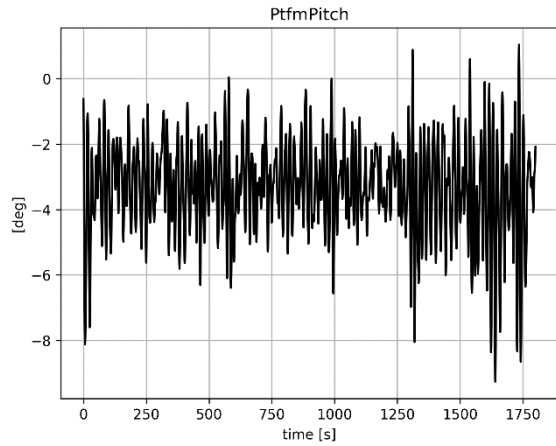
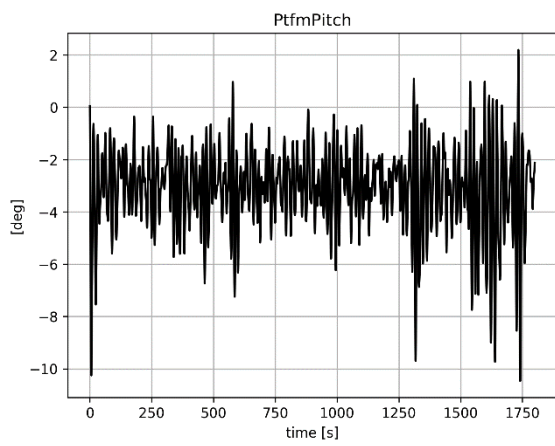
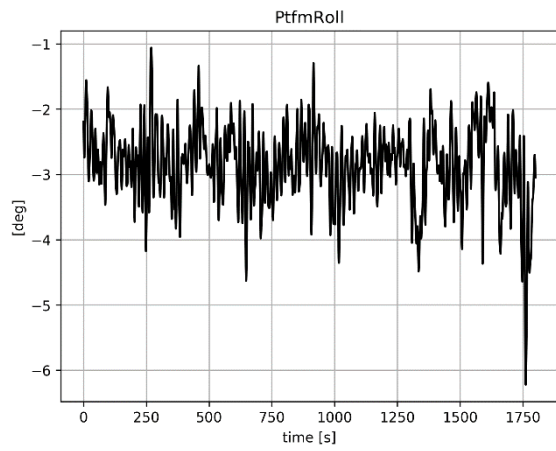
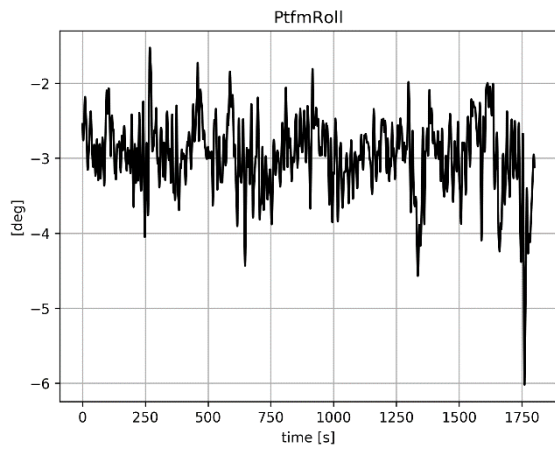


For rotasjonen om aksene, roll, pitch og yaw i figur []. Roll oppfører seg ganske likt, men har litt større variasjon for den innovative løsningen. Pitch varierer mye mindre men kan skyldes at tc kin var av på baseline. Yaw ser veldig likt ut, men er sentrert omtrent en halv grad nærmere 0.

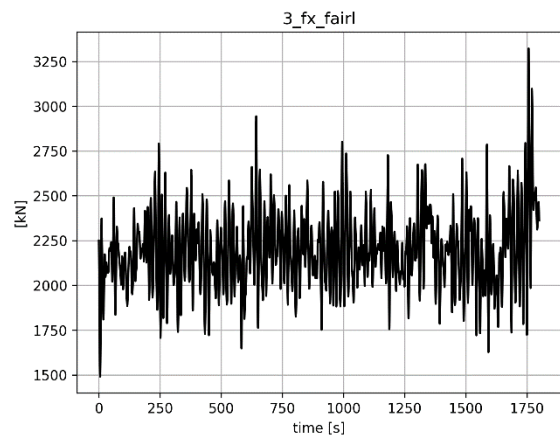
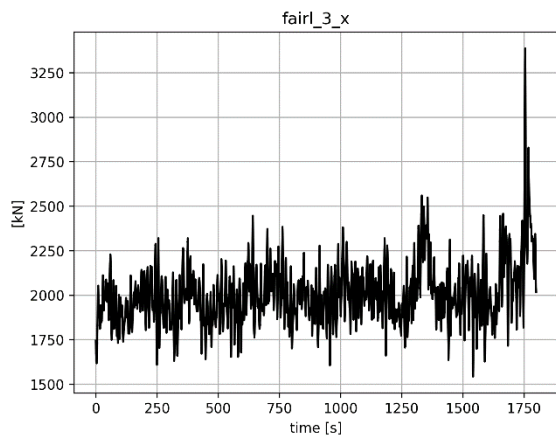
Roll, pitch, yaw

Baseline

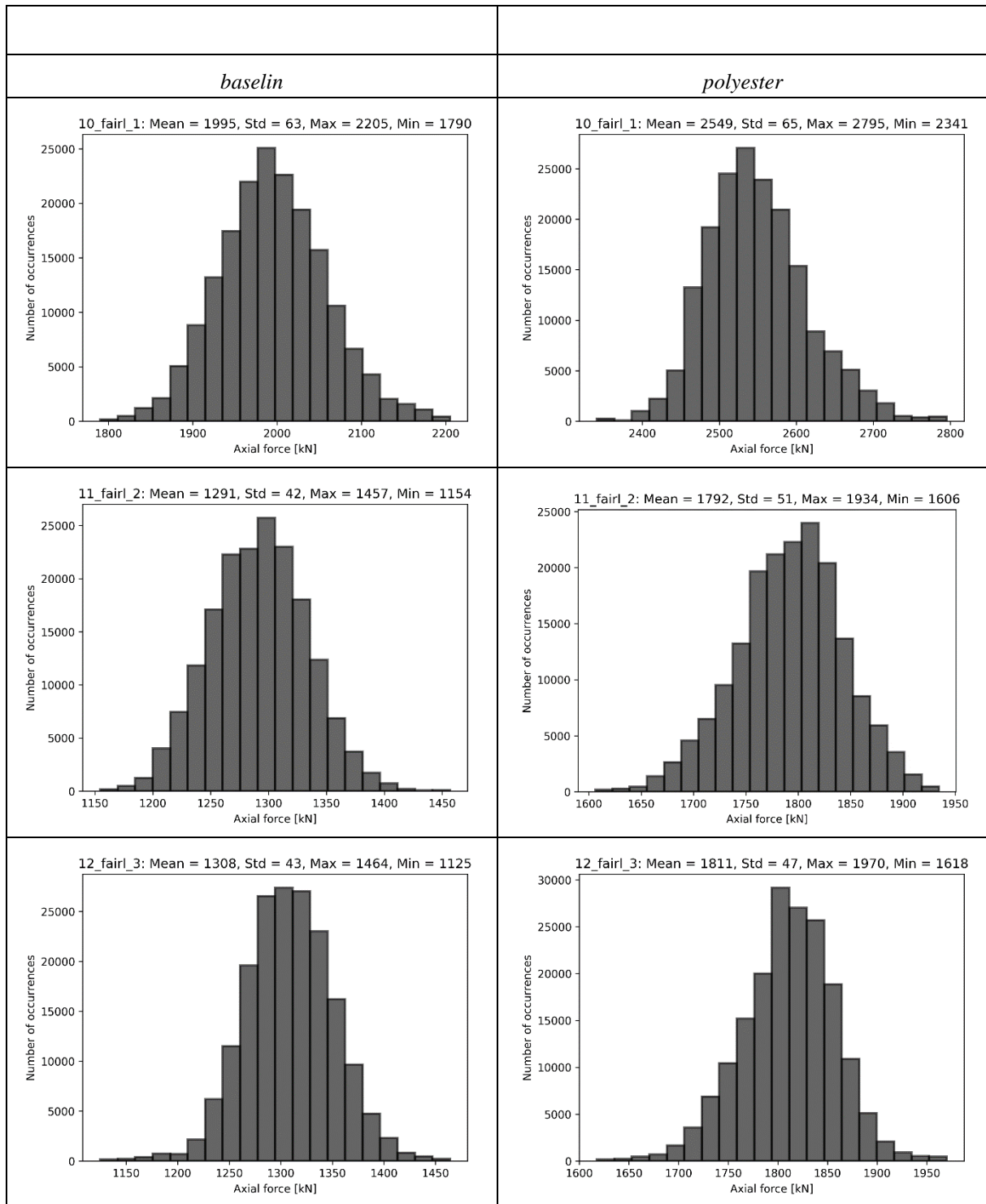
Polyester-nylon

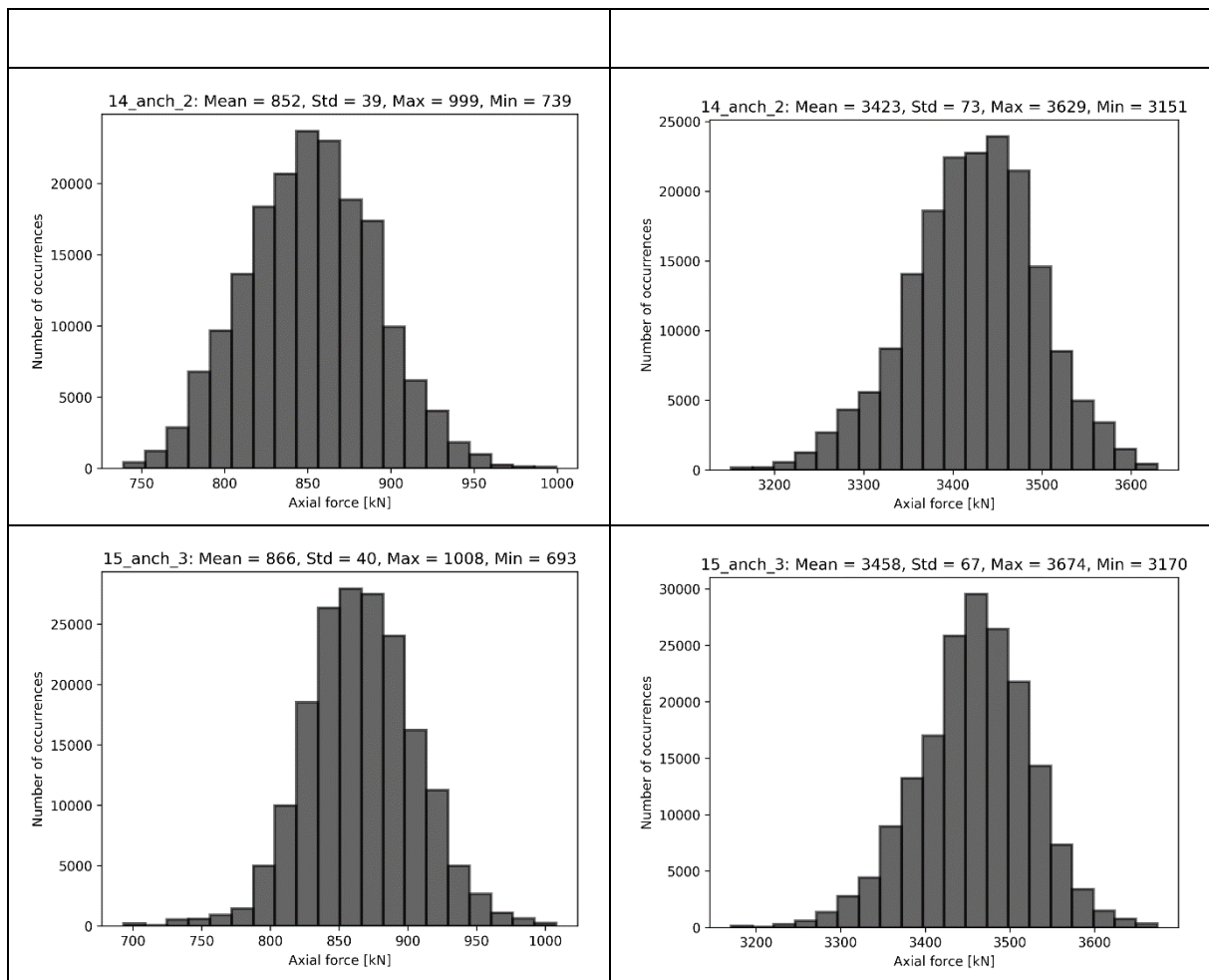


Krefter i fairlead



Utmatting





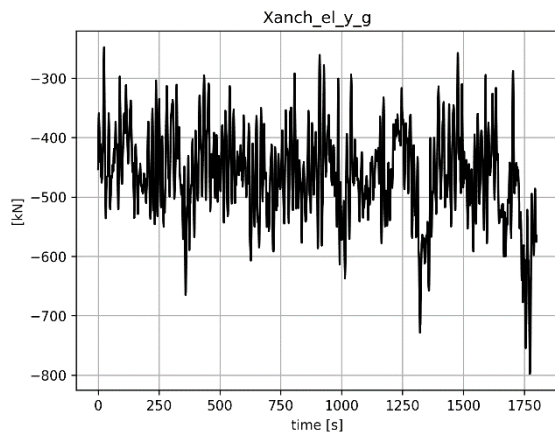
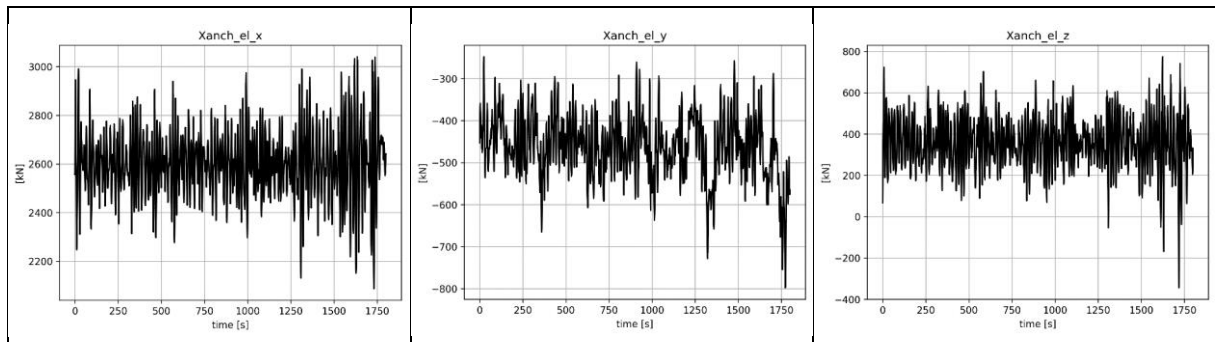
Baseline

Fairlead 3	1308	43	1464	1125
Anker 3	866	40	1008	693

Polyester

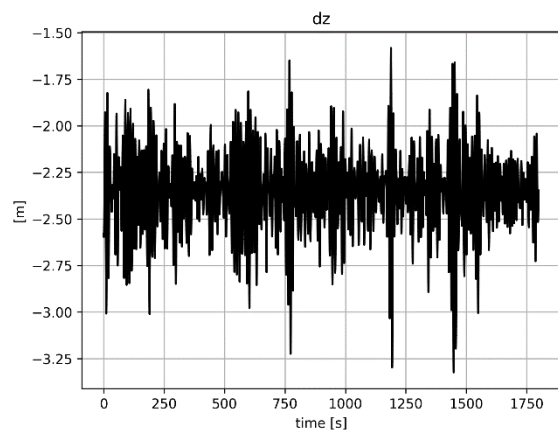
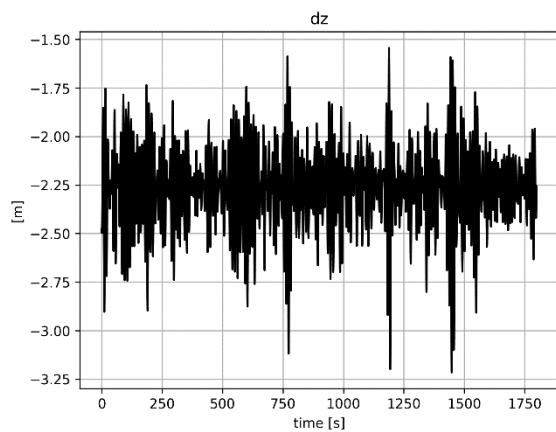
Fairlead 3	1811	47	1970	1618
Anker 3	3458	67	3674	3171
Nylon 3	2127	32	2229	1997

Midtanker



FLS

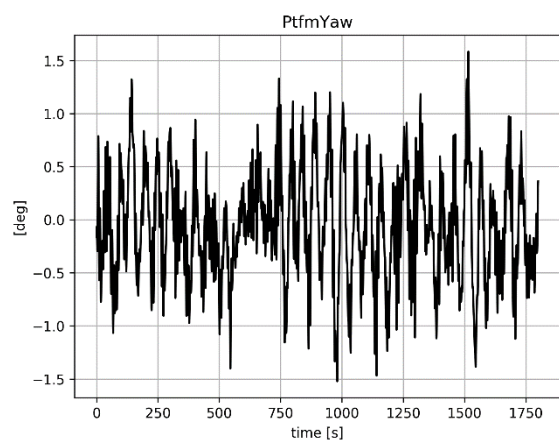
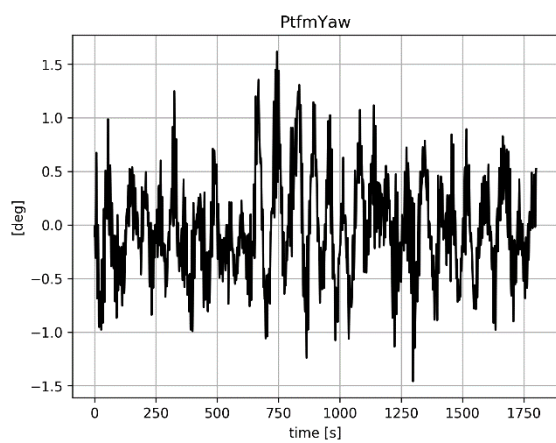
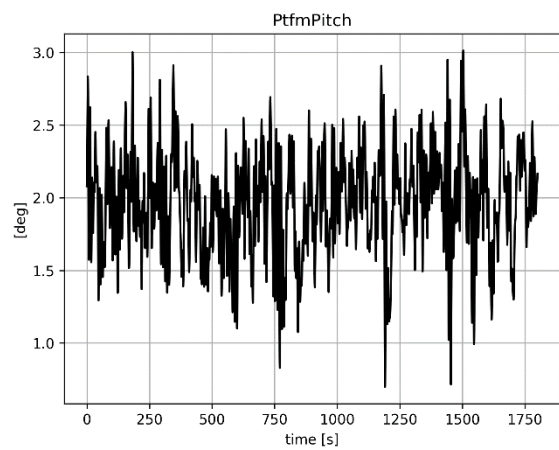
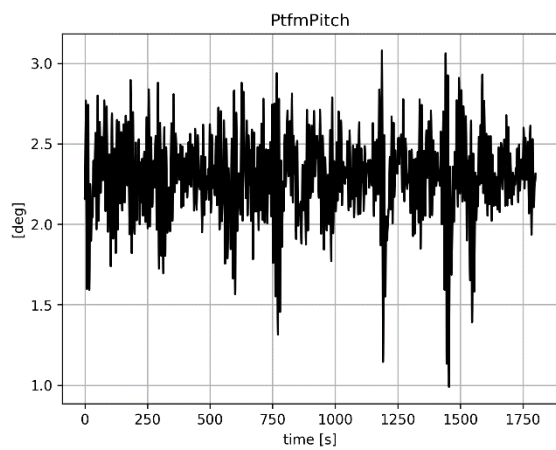
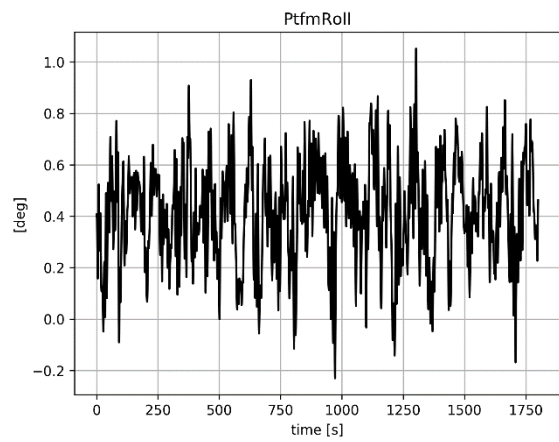
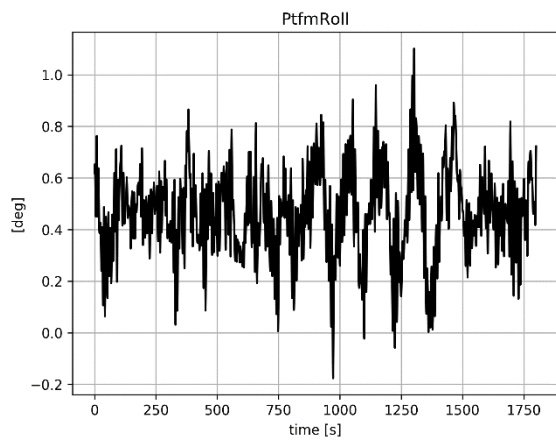
Bevegelse



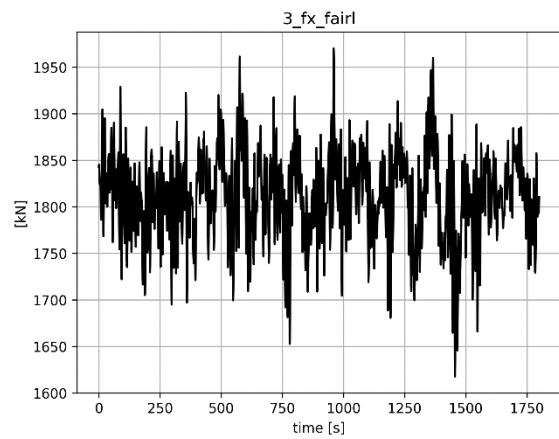
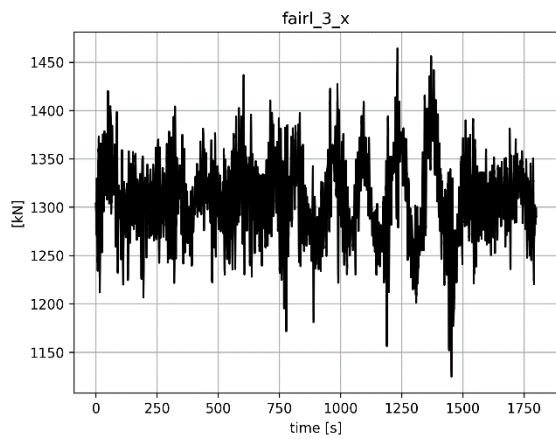
Rotasjon:

Baseline

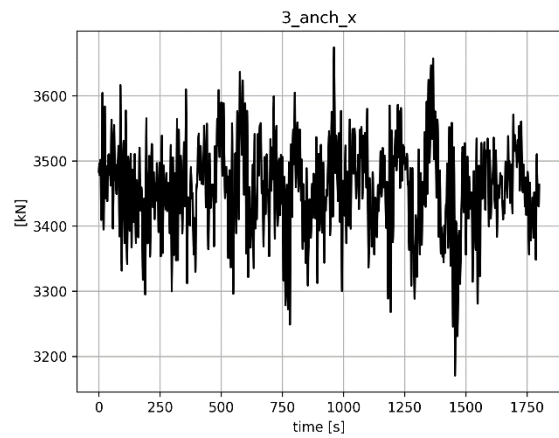
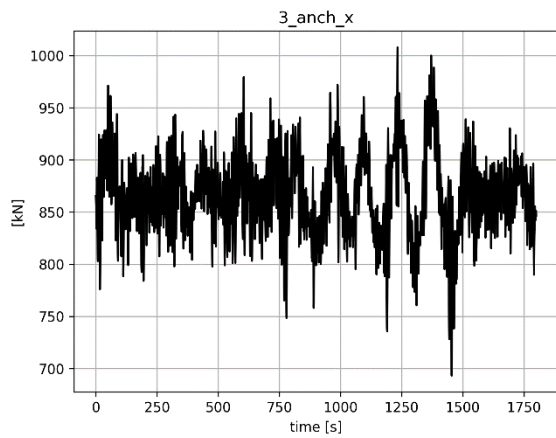
Polyester-nylon



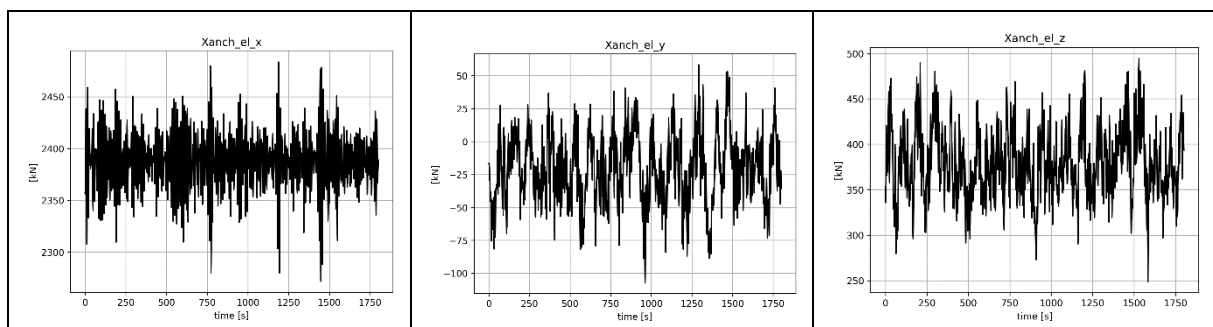
Krefter ved fairlead

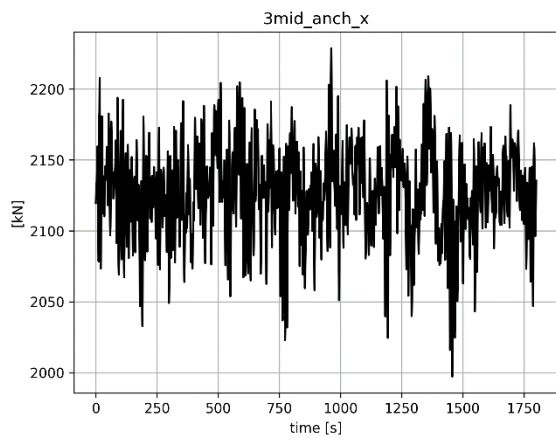


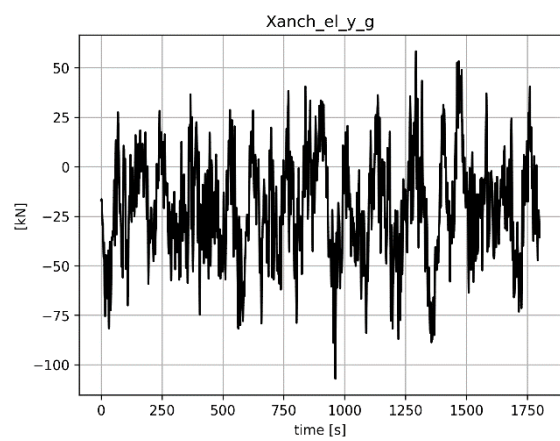
A.1.1 Ankerkrefter



A.1.1 Mid anch



mid anch 3

global y komponent i midtankeret



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway