



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Vårsemesteret, 2012

Konstruksjon og materialteknologi/
maskinkonstruksjon

Åpen

Forfatter:
Delsher Mirza

.....
(signatur forfatter)

Veileder: Lene Eliassen

Tittel på masteroppgaven:

Effekten av turbulens modeller på utmattingsskade (OC4 vindturbin)

Engelsk tittel:

The effect of turbulence models on fatigue damage (OC4 wind turbine)

Studiepoeng: 30 sp

Emneord:

- Manns turbulens
- FEDEM
- Utmatting
- DEL

Sidetall: 61
+ vedlegg: 24

Stavanger, 14.06.2012

Sammendrag

Dette studiet handler om å finne hvilken effekt turbulens har i ulike atomsfæriske stabilitet på utmattingen av en offshore vindturbin. De aller fleste av dagens operative offshore vindparker har kun vært i drift i noen få år og det er begrenset tilgang på gode erfaringsdata. I tillegg, dagens baserer standarder seg i stor grad på kunnskaper fra onshore vindturbiner. Turbulens parameterne som blir brukt i standarder er blitt utviklet mens en hadde mindre vindturbiner, og for det meste onshore vindturbiner. Derfor er det en del usikkerheter rundt fremgangsmåter som er brukt for å etablere disse parameterne og om disse parameterne er konservative. Hovedfokuset i dette studiet er rettet mot konsekvensen av turbulente vindfelt som skaper økte laster og dermed utmatting på en offshore vindturbin. De sentrale temaene i dette studiet oppsummeres som følgende:

- Simulering av ulike turbulente vindfelter
- Utføring av dynamiske analyser for en offshore vindturbin m.h.t. vindlaster og estimere reaksjonslastene for de mest utsatte nodene
- Estimering av skade ekvivalent last som representerer utmattings-skaden

Totalt, så er 10 ulike vindfelt klasser simulert. Simuleringene er basert på forskjellige turbulens modeller (Manns og Kaimal). Turbulensintensitet er estimert, dette for å finne effekten av turbulens parameterne i de forskjellige vindfeltene. Resultatene av turbulensintensitet viser fallende trend fra veldig ustabil til veldig stabil klasse. Denne trenden gjenspeiler også lastbildet som påvirker vindturbinen. I tillegg, resultatene viser store forskjeller mellom den veldig ustabile klassen og den anbefalte IEC standard verdien.

Offshore vindturbiner er utsatt for betydelig dynamiske laster. Noe som fører til økt slitasje (utmattning) av kritiske komponenter i en offshore vindturbin. Utmattning oppstår på grunn av uregelmessige spenninger i form av varierende sykluser som materialet har opplevd gjentatte ganger over en tidsperiode. Skade ekvivalent last er estimert for de mest utsatte områdene på vindturbinen; vingeroten, toppen og bunn av tårnet. Resultatene viser store prosentvis forskjeller for skade ekvivalent last mellom den veldig ustabile og den anbefalte IEC standard verdien.

Basert på antagelsene i metoden og utførelsen av dette studiet, har det kommet fram at IEC standardverdien kanskje ikke er en konservativ antagelse og stabilitet bør inkluderes i utmattingsanalysene.

Forord

Masteroppgaven er avslutning på sivilingeniørstudiet som er utført ved Universitetet i Stavanger, Institutt for konstruksjon og materialteknologi - maskinkonstruksjon, ved det teknisk naturvitenskapelige fakultet.

Å skrive masteroppgaven er en lang, spennende og ikke minst krevende prosess. Oppgaven har vært utfordrende og lærerik. Erfaring av oppgaven har forsterket min faglige kunnskap for veien videre i karrieren.

Arbeidet av oppgaven er utført under veiledning av:

- Stipendiat Lene Eliassen

Det er i tillegg flere personer jeg vil rette en stor takk til:

Spesielt takk til stipendiat Lene Eliassen for en glimrende faglig oppfølging. Det hadde ikke vært mulig uten hennes veiledning og kompetanse både faglig og skriftlig oppfølging.

Jeg vil også utrykke min takknemlighet for hjelp jeg fikk av professor Jasna Bogunovic Jakobsen, som ga meg muligheten til å fullføre denne oppgaven.

Jeg vil også takke min bror senioringeniør Dler Mirza for all hjelpen og støtten som jeg har fått gjennom utdanningsårene.

Til slutt, jeg vil takke alle mine forelesere ved Universitet i Stavanger.

Tusen takk.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	I
Forord.....	II
Figurer.....	V
Tabeller.....	VI
Forkortelser.....	VI
INTRODUKJON.....	7
1 Innledning.....	7
1.1 Generell innføring.....	7
1.2 Vindturbin teknologi.....	7
1.3 Vindturbin typer.....	8
1.3.1 Horisontale aksling.....	8
1.3.2 Vertikale aksling.....	10
1.4 Problemstilling.....	11
1.5 Prosjekt mål.....	11
1.6 Prosjekt oppsett.....	12
TEORI.....	13
2 VIND.....	13
2.1 Vindhastighet.....	14
2.2 Vindprofil.....	15
2.3 Vindenergi.....	17
3 TURBULENS.....	18
3.1 Turbulensintensitet.....	19
3.2 Turbulens spektra.....	21
3.3 Turbulens modell.....	23
3.4 Vindturbin klasser.....	24
4 MEKANISKE OG DYNAMISKE LASTER.....	25
4.1 Ulike last typer.....	25
4.2 Ulike lastkilder.....	26
4.3 Ulike eksterne laster.....	27
4.4 Bjelkeelement teori.....	28
5 UTMATTING.....	33
5.1 Skade ekvivalent last.....	34
5.2 Rainflow.....	36

METODE.....	38
6 METODE BESKRIVELSE.....	38
6.1 Simulering av vindfelt	38
6.1.1 Windsimu	39
6.2 FEDEM.....	41
6.3 Matlab	45
6.3.1 Mlife	45
RESULATAT AV ANALYSENE	47
7 RESULTATER	47
7.1 Grunnlegende last beregning	47
7.2 Turbulente vindfelt	48
7.3 Turbulensintensitet	50
7.4 Skade ekvivalent last	51
8 DISKUSJON OG KONKLUSJON	56
9 VIDERE ARBEID.....	59
10 REFERANSELISTE.....	60
VEDLEGG	62
vedlegg A: Beregning av turbulensintensitet	62
vedlegg B: Beregning av grunnlegende last	63
vedlegg C: Resultat av turbulente vindfeltene for alle klassene	64
vedlegg D: Skade ekvivalent last (4 vs. 8-10) klassene.....	67
vedlegg E: Skade ekvivalent last verdiene	70
vedlegg F: Windsimu tekstfilene	73
vedlegg G: Turbsim tekstfilene.....	76
vedlegg H: Milfe tekstfilene	79
vedlegg I: Manns turbulensparameter.....	83

Figurer

Figur 1.1: Utvikling av HAVT kontra elektrisk energi [5].....	8
Figur 1.2: Prinsippskisse for HAVT [6]	9
Figur 1.3: Hovedkomponenter for VAVT [8]	10
Figur 2.1: Skisse av vinddannelse.....	13
Figur 2.2: Vindkart for Norge [11]	14
Figur 2.3: Power law vindprofil	15
Figur 2.4: Illustrasjon av vindprofil.....	15
Figur 2.5: Eksempel på Weibull fordeling ved 6 m/s [9]	16
Figur 3.1: Vindspektrum med ulike topper [9]	18
Figur 3.2: Sammenligning av spektrum ved 10 m/s [13].....	22
Figur 4.1: Ulike last typer for vindturbin [9].....	25
Figur 4.2: Et snitt av ulike parametrene for en vindturbinvinge [7]	28
Figur 4.3: Koordinatsystem for vindturbinvinge [7]	29
Figur 4.4: Skisse av en vindturbin vinge [7]	30
Figur 4.5: Fast innspent bjelke [7]	31
Figur 4.6: En del av en bjelke	31
Figur 5.1: Spenningsstilstander over en tidsperiode	33
Figur 5.2: Tilfeldig spenningscykluser vs. tidsperiode	36
Figur 5.3: Illustrasjon av Rainflow metoden	37
Figur 6.1: Illustrasjon av metode beskrivelse	38
Figur 6.2: Illustrasjon av rektangulær volumfelt [20]	39
Figur 6.3: De mest utsatte områdene for en offshore vindturbin	42
Figur 6.4: Koordinatakse for vingerot [25].....	43
Figur 6.5: Koordinatakse for tårn [25].....	43
Figur 6.6: Illustrasjon av syklus med Bin kontra BW	46
Figur 7.1: Vingerot, skjærkraften.....	47
Figur 7.2: Klasse 1, veldig ustabil vindhastighet	49
Figur 7.3: Klasse 4, nøytral vindhastighet.....	49
Figur 7.4: Klasse 7, veldig stabil vindhastighet	49
Figur 7.5: Sammenligning av turbulensintensitet for klassene 1-10	50
Figur 7.6: Kreftene i vingerot, klasse 1-7	52
Figur 7.7: Bøyemoment i vingerot, klasse 1-7	52
Figur 7.8: Kreftene på topp av tårnet, klasse 1-7	54
Figur 7.9: Bøyemoment på topp av tårnet, klasse 1-7	54
Figur 7.10: Kreftene på bunnen av tårnet, klasse 1-7	55
Figur 7.11: Bøyemoment på bunnen av tårnet, klasse 1-7	55

Tabeller

Tabell 1.1: Komponent beskrivelse for HAVT [6]	9
Tabell 3.1: Turbulensparameter for klassene 1-7 [vedlegg I]	23
Tabell 3.2: Turbulensparameter for klasse 8 [vedlegg I]	23
Tabell 3.3: Vindturbin klasser [2]	24
Tabell 5.1: Antall sykluser for figur 5.3	37
Tabell 6.1: Parameter beskrivelse av Windsimu	40
Tabell 6.2: Egenskapsverdiene for offshore vindturbin OC4 [24].....	44
Tabell 6.3: Beskrivelse av node detaljene	44
Tabell 6.4: Spesifikasjon for offshore vindturbin OC4 [24].....	44
Tabell 7.1: Turbulensintensitetsverdier for klassene 1-10	50

Forkortelser

HAVT	- Horisontalakslede vindturbin
VAVT	- Vertikalakslede vindturbin
IEC	- International Electrotechnical Commission
DNV	- Det Norske Veritas
NERL	- National Renewable Energy Laboratory
FEDEM	- Finite Element Dynamics in Elastic Mechanisms
DEL	- Damage Equivalent Load, (skade ekvivalent last)
OC4	- The Offshore Code Comparison Collaboration Continuation

INTRODUKJSON

1 Innledning

1.1 Generell innføring

Det er høy energi etterspørsel i hele verden, særlig de siste årene har det vært mer fokus på utvikling av fornybare energikilder. Etterspørselen etter fornybar energi har økt internasjonalt, noe som har ført til at energi som blir produsert av vind er i et raskt voksende marked for offshore både i Norge og over hele verden.

I 1991 ble den første offshore vindparken åpnet, 2,5 km utenfor den danske kysten ved Vindeby. I perioden 2001 til 2010 har markedet for offshore vindenergi i Europa økt med 9,5 % [3].

1.2 Vindturbin teknologi

Historien om vindmøller går tilbake til mer enn 3000 år [4], da det ble brukt vindmøller i Egypt. I utgangspunktet ble vindmøller brukt for sliping av korn og pumping av vann. De første vindmøllene som ble bygget i Europa kom på 1100 tallet, de ble bygget av treverk og brukt til å male opp korn.

I motsetning til gamle vindmøller, blir moderne vindturbiner brukt for generering av fornybare energi. Fornybare energi fra både onshore og offshore vindturbiner anses å være en viktig elektrisk kilde. Det teknologiske og økonomiske perspektivene knyttet til installasjon og drift av onshore vindturbiner er velkjent og velutviklet med dagens teknologi.

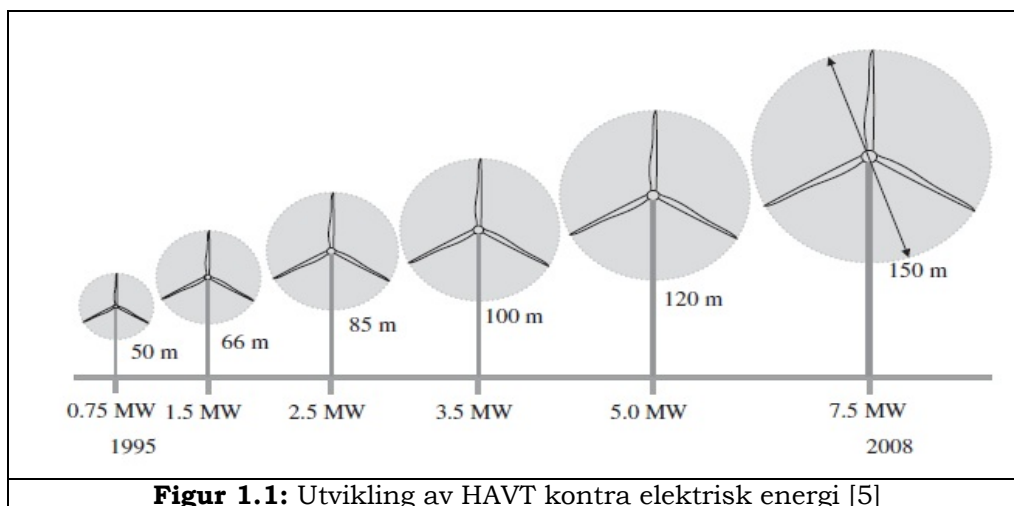
For offshore vindturbin er kostnadsoversikten for drift og vedlikehold uoversiktlig. Det er utfordrende å sammenlikne tall fra ulike områder, da viktige parametere som vanddybde, avstand til land, størrelse på vindparker og nødvendig nettintegrasjon er sterkt varierende. Samtidig har de fleste av dagens operative offshore vindparker kun har vært i drift i noen få år og dermed er det begrenset tilgang på gode erfaringsdata [3].

1.3 Vindturbin typer

Vindturbiner er inndelt i hovedsak i to klasser, vertikalakslede (VAVT) og horisontalakslede (HAVT) vindturbiner. Dette studiet fokuserer på sistnevnte typen. For HAVT finnes både oppstrøms og nedstrøms turbintyper. HAVT som benyttes i dette prosjekt er en oppstrømstype, dvs. vinden retningen treffer rett mot turbinen, mens nedstrøm kommer vinden bakfra.

1.3.1 Horisontale aksling

Horisontalakslede vindturbiner (HAVT) er det mest vanlige vindturbinen (figur 1.1) som brukes for generering av vindenergi. Hovedkomponentene til en slik vindturbin består av tårn, maskinhus og vingene. Det er flere mekaniske komponenter i maskinhuset, blant annet: generator, gir, kontrollsystem og horisontalaksel. Det fins turbiner som har magnetiske generatorene og ingen aksling. Rotoren for HAVT roteres om dets horisontale akse.

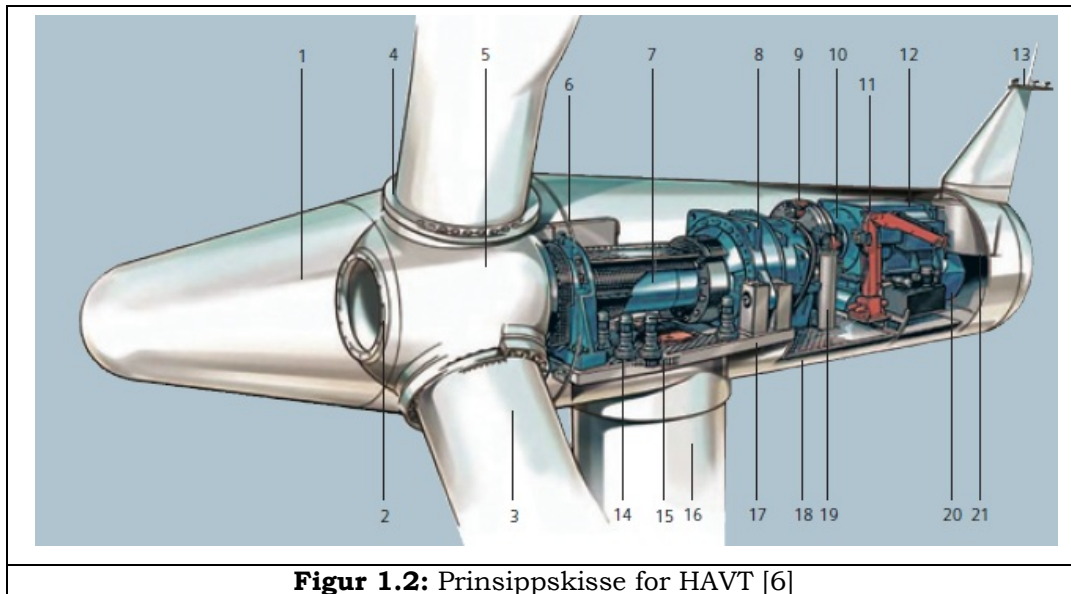


Figur 1.1: Utvikling av HAVT kontra elektrisk energi [5]

Vindturbiner produserer elektrisitet ved at vindkraften roterer vingene som igjen overfører energien via akslingen til generator. Vind treffer på vingene og genererer løft og drag kreftene. Moderne vindturbiner har to eller tre vinger som er koblet til hver sin justerbare vingeinkel. De fleste vindturbinene har vanligvis tre vinger og de er utsatt for store vindlaster, noe som vil føre til store påkjenninger på vingeroten [5].

De rotende vingene roterer hovedakselen inne i maskinhuset, akslingen går inn i en girkasse som har en bremse for å kontrollere rotorens rotasjons-hastigheten. Girkassen øker frekvens til det som er hensiktsmessig for

generatoren som bruker magnetfelt for å konvertere kinetisk energi til elektrisk energi. Den elektriske energien overføres videre gjennom kabler til en transformator og videre ut til elektriske installasjoner [5]. Dette er den vanligste metoden for å generere elektrisitet.



Figur 1.2: Prinsippskisse for HAVT [6]

Nr.	Komponent beskrivelse	Nr.	Komponent beskrivelse
1	Rotor nav kapsel	12	Generator
2	Rotor nav	13	Anemometer
3	Vinge	14	Yaw gir
4	Pitch lager	15	Yaw ring
5	Rotor nav	16	Tårn
6	Hovedlager	17	Motorcelle plate
7	Hovedaksel	18	Deksel
8	Gir	19	Oljefilter
9	Brems	20	Generatorvifte
10	Kobling	21	Olje kjøler
11	Vedlikeholdskran		

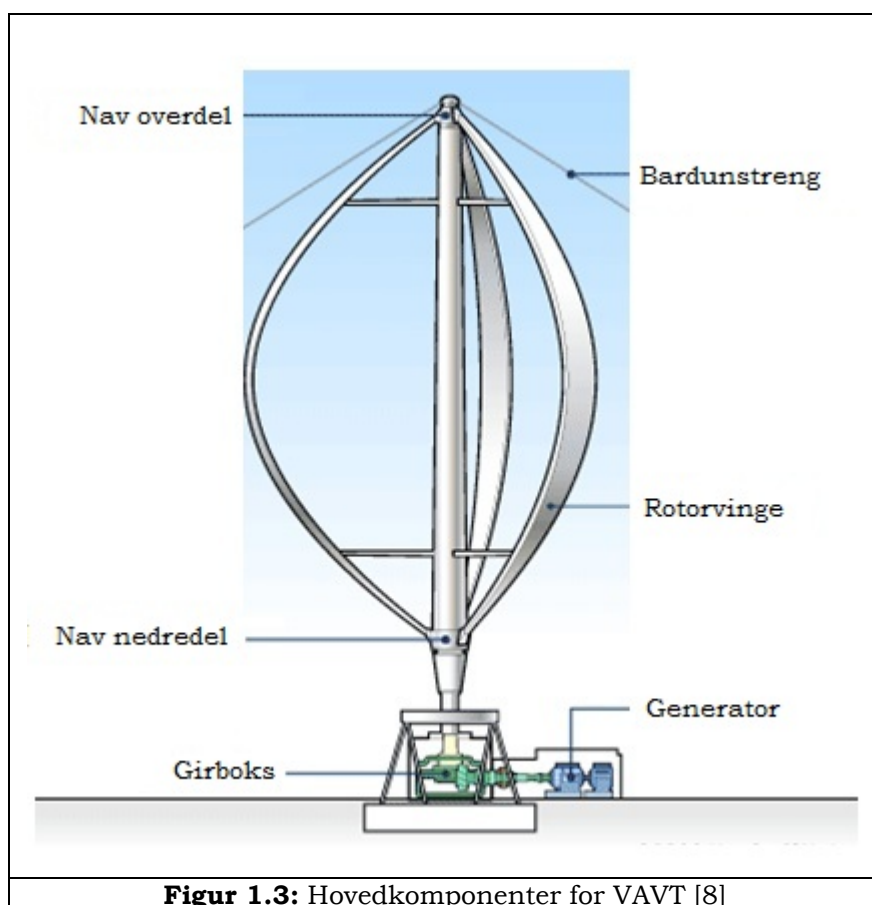
Tabell 1.1: Komponent beskrivelse for HAVT [6]

1.3.2 Vertikale aksling

Den vertikalakslede vindturbin (VAVT) bygges helt annerledes enn den horisontale akse vindturbinen. Hovedforskjellen mellom turbinene er at den vertikale asken vindturbinen har sin rotoraksel satt vertikalt [7].

Maskinhuset i en VAVT ligger normalt på eller i nærheten av overflaten. Det gir lavere tyngdepunkt på grunn av vekten av maskinhuset i bunn. Noe som gir mulighet til bedre tilkomst for å vedlikeholde turbinen, i forhold til HAVT som har maskinhuset på toppen av tårnet. Dette gir VAVT en stor fordel i offshore sammenheng. Det er andre utfordringer som er knyttet mot VAVT offshore, noe som ikke er en del av dette studiet.

Figur 1.3 viser hovedkomponenten til VAVT. Vanligvis brukes vertikalakslede vindturbiner i områder der vinden ofte endrer retning. Vindlastene kan treffe rotorvingene i alle retninger og det er heller ikke behov for støtte tårn.



1.4 Problemstilling

Konsekvensen av turbulent i vindfelt er økte laster og utmatting på en vindturbin [9]. Turbulens parametere som blir brukt i standarder er blitt utviklet mens en hadde mindre vindturbiner og for det meste onshore vindturbiner. Hovedproblemstillingen i dette studiet er ”Hvilken effekt har turbulens, i ulike atomsfærisk stabilitet, på utmattingen av offshore vindturbiner?”

Dagens standarder baserer seg i stor grad på kunnskaper fra onshore vindturbiner. Det er en usikkerhet rundt om dette er en konservativ fremgangsmåte som kun tar hensyn til nøytral atomsfærisk stabilitet. Turbulens parametere som er anbefalt i IEC 61400-3 standarden [1] brukes som et utgangspunkt ved å utføre analyser for ulike klasser i henhold til standarden. Andre problemstillinger vil tvinge seg frem:

- Hvordan simuleres et tredimensjonalt turbulent vindfelt?
- På hvilken måte kan vindfeltene påvirke en offshore vindturbin?
- Hva er effekten av forskjellige turbulens modeller (Manns/Kaimal) basert på ulike turbulens parametrene/intensiteten for vindturbiner i forhold til standarden?
- Hvilken turbulens modell og metode skal brukes for simuleringen av vindfeltene?
- Hvordan beregne turbulensintensiteten verdi? Noe som er basert på ulike turbulens parametere som påvirker vindfelt spekter.
- Hvordan kan en dynamisk analyse (virtuelltesting) gjennomføres for offshore vindturbiner (OC4) ved å bruke FEDEM?
- Hva blir effekten av de dynamiske analysene som gjenspeiler vindlastene på vindturbinen?
- Hvilket verktøy brukes for å estimere utmatting, skade ekvivalent last (DEL) basert på analyse resultatene?
- Hvordan kan resultatene sammenlignes for å analysere effekten av turbulente modeller fra ulike klasser for de mest utsatte områdene på vindturbinen?

1.5 Prosjekt mål

Gjennomføring av dette studiet er et forsøk på å finne svar på de overnevnte problemstillingene.

1.6 Prosjekt oppsett

Dette studiet startet med å gi en generell innføring av offshore vindenergi og vindturbinens teknologi og typer, både prosjektets problemstilling og mål er definert og presenteret. Videre, kapittel 2 til 5 beskriver teorien om mest grunnleggende og sentrale emnene for dette studiet. Kapittel 2 beskriver emner om vind: vindhastighet, vindprofil og vindenergi. Kapittel 3 beskriver emner om turbulens: – intensitet, - spektra og – modell. Kapittel 4 beskriver emner om mekaniske og dynamiske laster: ulike last typer og lastkilder som påvirker vindturbin og bjelkeelement teorien. Kapittel 5 beskriver emner om utmatting: skade ekvivalent last og rainflow metoden. Emnene er grunnleggende fundament for å kunne utføre målet med dette studiet.

Kapittel 6 beskriver i detaljer hvilken metode som er benyttet i arbeidet for å utføre dette studiet inkludert fremgangsmåter og prosess beskrivelse for de ulike verktøyene som er brukt. Windsimu og Turbsim benyttes for simulering av turbulente vindfeltene. FDEEM brukes for å analysere vindturbinen OC4¹ (dvs. virtuelltesting av de mest utsatte områdene), samt Matlab benyttes for å beregne utmattingsskade dvs. skade ekvivalent last "Damage Equivalent Load" (DEL). Resultatene er presentert i kapittel 7, etterfulgt med konklusjon og diskusjon av oppgaven i kapittel 8.

¹ OC4 er et prosjekt for å sammenligne dynamiske datamaskin koder og modeller som brukes for designe offshore vindturbiner og støttestruktur [10]. OC4 vindturbin modellen er brukt i analyse arbeidet i dette studiet.

TEORI

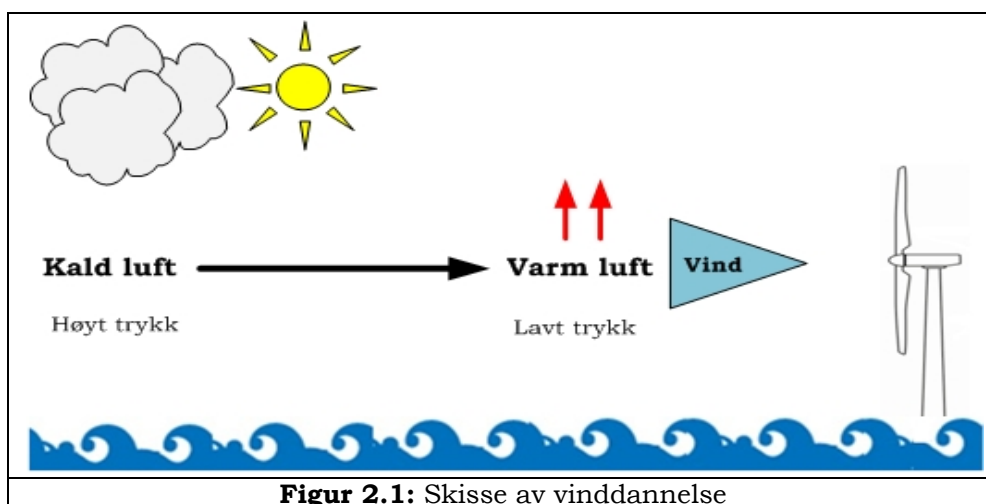
2 VIND

Vinden er i bevegelse hele tiden, og bevegelsen er ganske tilfeldig. Vind varierer fra sesong til sesong og er avhengig av en rekke metrologiske egenskaper. Vindhastighet og vindretning endres blant annet på grunn av turbulens i luftstrømmer som følge av interne tilfeldige svingninger.

Tyngdekraften og solas oppvarming av jord overflaten er en direkte årsak til at trykk forskjeller oppstår. Dette fører til at luft strømmer fra et område med høyt trykk til et område med lavt trykk. I et område med høy trykk er luften kald og søker et område lavt trykk, hvor det er varmt luften. Luften i et varmt område beveger lettere oppover og danner vind (figur 2.1).

Det er stort potensial for utnyttelse av vindenergi i Norge på grunn av landets geografisk plassering og klima forhold. Danmark har en lang og solid erfaring innenfor produksjon av energi fra vind onshore. Norges offshore erfaring innen for oljevirkosomhet er en viktig kompetanse som kan benyttes for utvikling av vindenergi produksjon offshore.

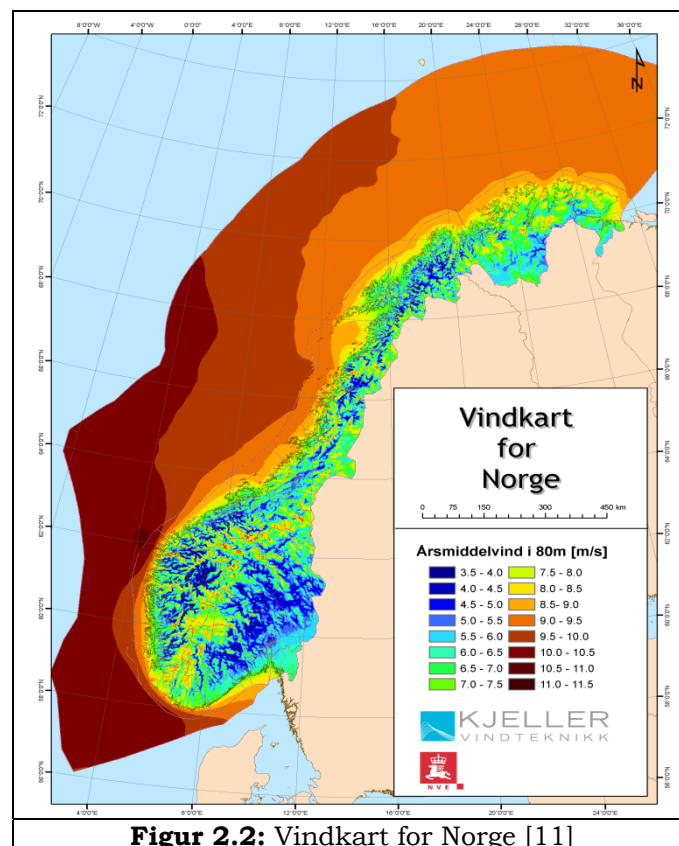
På generell basis er det mer vind til sjøs enn på land, grunnet større temperatur forskjeller mellom havet og luften. Dette medfører til høyere vindhastigheter og høyere vindhastighet betyr høyere produksjon av vindenergi. Store vindhastigheter er en av de viktigste forutsetningene for etablering av en levedyktig vindpark offshore.



2.1 Vindhastighet

Vindstyrke og retning måles ved hjelp av et anemometer som sitter bak på vindturbinen. Vindhastigheten varierer med tiden og måles som hastighet i meter per sekund. Vindhastighet og retning er forskjellig fra sted til sted og er avhengig av flere faktorer blant annet geografisk plassering, overflate topografi, høyde over havoverflaten og ikke miste klima egenskaper [9].

Rogaland kysten (Nordsjøen) er et av de beste områdene for offshore vindpark med en årsmiddelvind på 9,5-11,5 m/s [11]. Dette er bekreftet i media [12] hvor en kan lese at "Hywind" som er en test vindturbin utenfor Karmøy er best i klassen. Energi produksjonen fra denne turbinen (sammenlignet med andre vindturbiner andre steder i landet) er blant de mest effektive med hensyn til bruk av vindstyrken til å produsere energi. Det er viktig å utnytte vindstyrken på en riktig og effektiv måte for å oppnå høy produksjonsnivå, men det er enda viktigere å opprettholde vindturbinens tilstand og levetid. Det som skiller "Hywind" fra andre vindturbiner er at en flytende vindturbin som er plassert et stykke fra fastlandet. Dette gir muligheten for å teste det som en offshore vindturbin, noe på grunn av enklere tilkomst til vindturbinen på grunn av sin plassering.



Figur 2.2: Vindkart for Norge [11]

2.2 Vindprofil

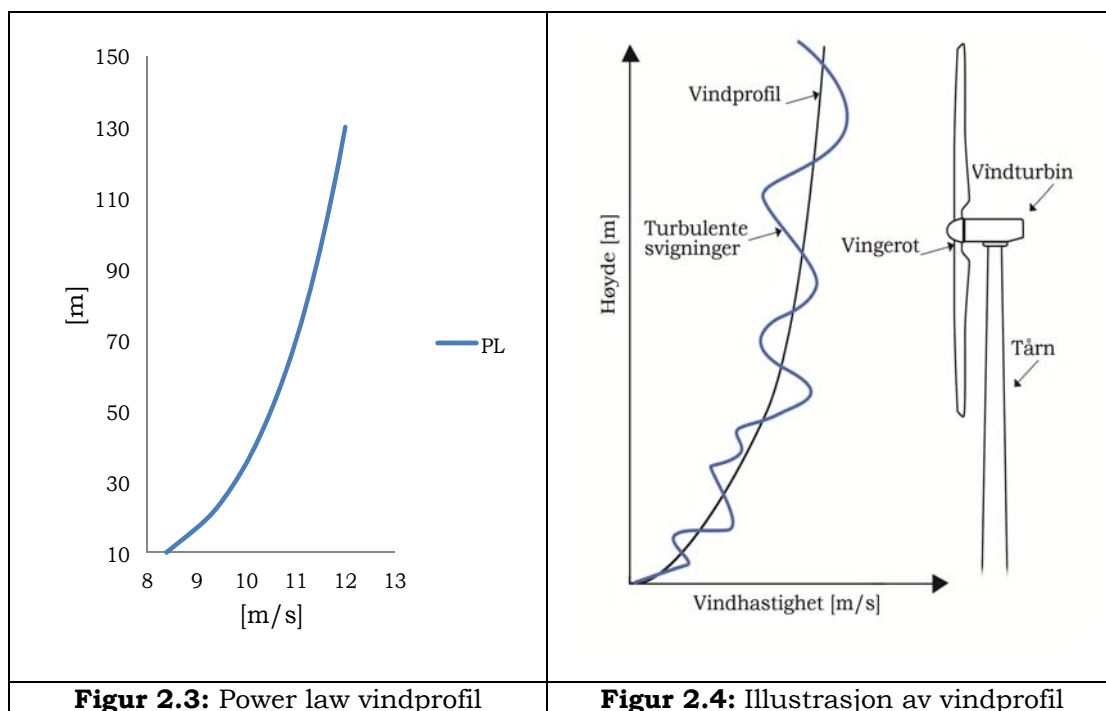
Tidligere er nevnt at vindhastighet er ikke konstant og forandrer seg med blant annet økende høyde over jordens overflate. For å kunne illustrere vindhastighetsprofilen benyttes vindprofilen som er kalt for "Power law" (PL). PL er også definert i IEC standard 64100-3 og er gitt ved [1]:

$$U(z) = U_{\text{nav}} \times \left(\frac{z}{z_{\text{nav}}} \right)^{\alpha} \quad (2.1)$$

Hvor,

- $U(z)$ [m/s] - vindprofil som funksjon av høyden
- U_{nav} [m/s] - vinds gjennomsnittshastighet ved nav høyde
- z [m] - avstanden fra overflaten
- z_{nav} [m] - nav høyde
- α [-] - vindskjær eksponenten ($\alpha = 0,14$) ved normal vindforhold
- z_0 [-] - overflate ruhet (seksjon 3.1)

Figur 2.3 viser vindprofilen for "Power Law" ved å bruke likning 2.1 ved $U_{\text{nav}} = 11,4$ m/s og $z = 90,55$ m. Figur 2.4 viser en illustrasjon av konstant vindprofilen men med varierende turbulente parameter, dvs. turbulente svingninger i form av konstant hastighet som funksjon av høyde. Høyden av tårnet er en fordel etter som vindhastighet øker.



Weibull fordeling er en statistisk fordeling. Det betyr snitthastighet på vinden kan beskrives med Weibull fordelingen. Weibull funksjon er gitt som følgende [9]:

$$f(u) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{u}{\lambda}\right)^{k-1} * \exp\left[-\left(\frac{u}{\lambda}\right)^k\right] \quad (2.2)$$

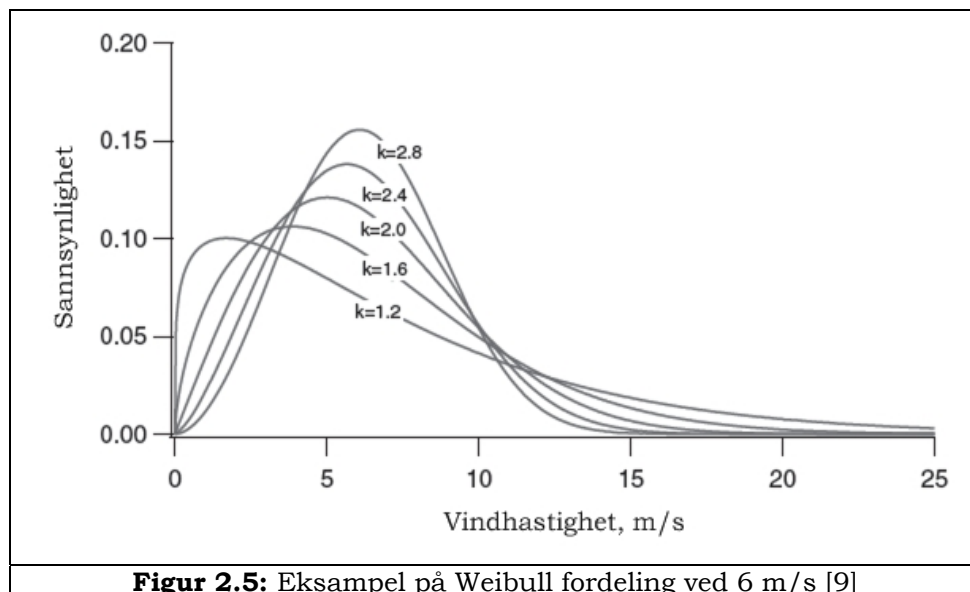
Hvor,

- $f(u)$ [m/s] - weibull funksjon
- u [m/s] - vindhastighet
- k, λ [-] - weibull parameter ($k > 0, \lambda > 0$)

k , kalles for form faktoren og viser oppdeling av funksjonen. Når (k) verdien øker, vil kurven ha skarpere topp noe som indikerer at det er mindre vindhastighetsvariasjon.

λ , kalles for skala faktoren og viser hvor mye sannsynlighetsfordelingen er forskjøvet mot høyre. Når verdien for (λ) øker, vil kurven ha mindre skarpe topp noe som indikerer at det er høyere middelvindhastighet.

For å oppnå effektiv vindenergi produksjon er det viktig å ha høy (λ) og (k) verdi. Figur 2.5 viser ulike verdier av Weibull parametrene (k) for en middelvinds hastighet på 6 m/s, ved $k=2$ da er det Rayleigh fordeling [9].



2.3 Vindenergi

Det er forskjellige vind bevegelsesmønstre som treffer vindturbiner. Vindbevegelsen skaper kinetisk energi som blir omgjort til mekaniske energi og deretter omgjort til elektrisitet. Utvinning av vindenergi til elektrisitets energi er avhengig av flere begrensinger knyttet til både vindturbinen (mekaniske begrensinger) og vindens fysiske egenskaper. Det er derfor vanskelig å utvinne all bevegelsesenergi (i vinden) til elektrisitetsenergi.

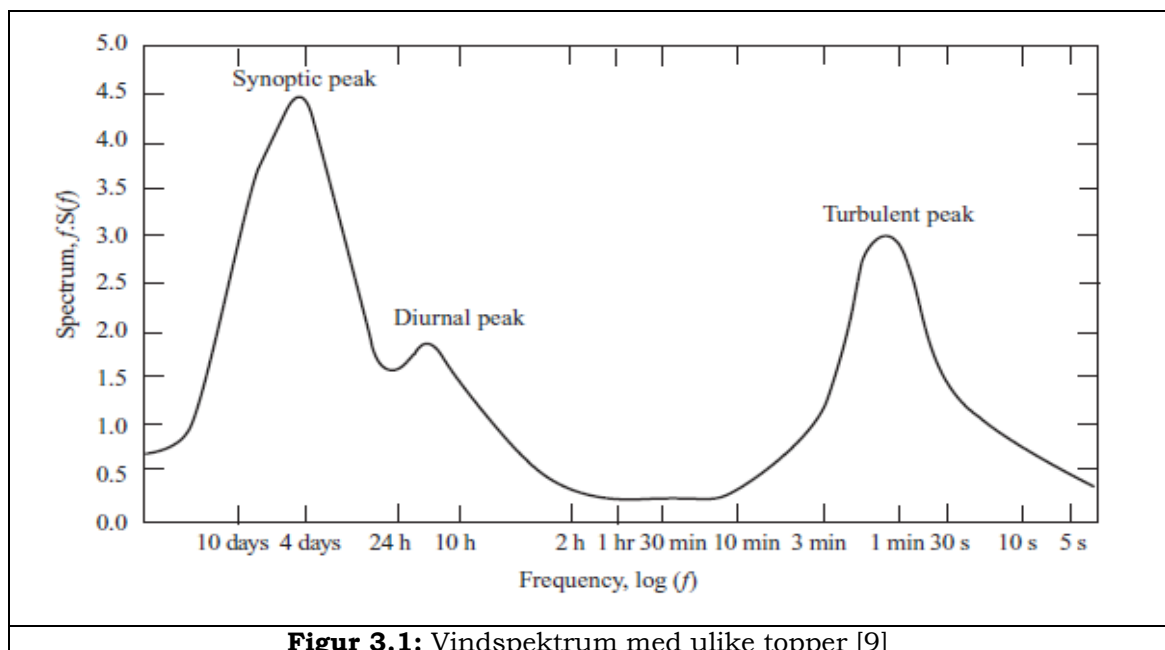
Vindturbinens virkningsgrad er lik den effekten som genereres av vindturbinen som er forårsaket av kinetiske energien i vinden som treffer vindturbinvingene. Den maksimale teoretiske energi som kan utvinnes av vindturbinen er 0,5962 (dvs. den teoretiske virkningsgrad omtrent 60 %), men i realiteten vil verdien av virkningsgraden være enda mindre på grunn av begrensninger nevnt tidligere [9].

3 TURBULENS

Turbulens er variasjon i vind som funksjon av tid og rom. Turbulens er en kompleks prosess, den er uregelmessig og tilfeldig (kaotisk). Turbulens er usynlig og det er vanskelig å fastsette en bestemt turbulens modell. Dannelse av turbulens er avhengig av en rekke faktorer. Disse faktorene kan karakteriseres som geografiske, meteorologiske, topografiske egenskaper samt ulike vindforhold (vindmasse, vindbevegelse og vindhastighet), overflate ruhet, temperatur og trykk forskjeller mellom luft og overflaten.

Turbulens forbindes med svingninger i vindstryken, når vinden fluktueres i luften da er det et tegn på dannelse av turbulens [9]. Turbulensen kan anses til å være konstant hvis den varer over lengre tidsperiode på en time eller mer, og ganske varierende hvis den varer over en kortere tidsperiode (på en tidsperiode som er vanligvis mindre enn 10 minutter). Ofte betraktes to effekter som kan henge sammen for dannelse av turbulens:

1. "Friksjon" som er forårsaket av jord overflate topografiske egenskaper [9].
2. Termiske effekter som er forårsaket av luftemasse i bevegelse som følge av tetthet i luft og variasjon i temperaturer [13].



Figur 3.1: Vindspektrum med ulike topper [9]

Figur 3.1 viser vindspektrum ved ulike topper, turbulens toppen representerer svingninger i luftstrømmen på en relativt kort tidsperiode, vanligvis mindre enn 10 minutter.

Vind svingninger forekommer i tre retninger, langsgående, sideveis og vertikal [9],[13]. Derfor kan vind betraktes som en sum av vinden som kommer fra disse retningene til sammen. Siden vind forekommer i tre retninger, vil det også fluktuere tredimensjonalt. Det er derfor vanskelig å forutsi med deterministiske likninger bevegelsen av luft i en turbulent vindfelt. Men for å beskrive turbulens med likninger, det er nødvendig å ta hensyn til verdier som temperatur, lufttetthet, fuktighet, trykk forskjeller osv. Når alle disse verdiene er tilgjengelig, det er mulig å definere differensiallikninger som beskriver oppførselen til turbulens i luftmassen [13].

Forutsi et homogent åpent hav overflate (offshore), turbulens forholdene er lavere i forhold til vekslende landskap (onshore) som har høy turbulens verdi. En høy turbulens grad har flere negative konsekvenser for vindturbiner, belastning som følge av turbulens kan medføre ekstra påkjenninger på turbiner.

3.1 Turbulensintensitet

Turbulensintensitet er avhengig av flere faktorer som blant annet ruheten og høyde fra overflaten. Begrepet turbulensintensitet brukes ofte og kan defineres som forholdet mellom vindstandardavvik (σ_{nav}) og vinds gjennomsnittshastighet (\bar{U}_{nav}), ved en tidsperiode på 10 minutter.

Oppførselen til turbulens er som nevnt tidligere er tredimensjonal. Turbulensintensitet (I) er beskrivelsen og er gitt som følgende [14]:

$$I = \frac{\sigma_{nav}}{\bar{U}_{nav}} \quad (3.1)$$

Det er definert ulike formler for vindens standardavvik, men dette studiet brukes standardavviken som gjelder for offshore, definert i IEC 61400-3 standarden som følgende [1]:

$$\sigma_{nav} = \frac{\bar{U}_{nav}}{\ln\left(\frac{z_{nav}}{z_0}\right)} + 1,28 \times 1,44 \times I_{15} \quad (3.2)$$

Hvor,

- \bar{U}_{nav} [m/s] - vinds gjennomsnittshastighet ved nav høyde
- z_{nav} [m] - nav høyde
- z_0 [-] - definert i likning 3.3
- I_{15} [-] - representerer turbulens klasse (seksjon 3.3, tabell 3.3)

Overflate ruheten z_0 defineres av de parameterne som er i likning (3.3). Når overflaten ruheten øker med vindhastighet, vil turbulensintensiteten øke som funksjon av vindhastigheten. Ruhet z_0 er en viktig faktor og definert i DNV- standarden som følgende [14]:

$$z_0 = \frac{A_c}{g} \left[\frac{k\bar{U}}{\ln\left(\frac{z_{nav}}{z_0}\right)} \right]^2 \quad (3.3)$$

Hvor,

- $A_c = 0,014$ [-] - Charnock's konstant
- $g = 9,81$ [m/s²] - gravitasjon
- $k = 0,4$ [-] - Von Karman's konstant

Mengden av turbulens avtar når avstanden fra overflaten øker, og etter en viss høyde er turbulens effekten neglisjerbar. Det er lavere turbulensintensitet for offshore enn onshore på grunn av lavere ruhet og lavere vertikale temperaturgradient [9].

Temperatur gradienten er lavere offshore på grunn av:

- Høy spesifikk vann temperatur som resulterer en relativt stabilt vann temperaure i havet
- Sol lyset absorberer flere meter gjennom vannet og mye mindre gjennom jorden, dette resulterer til at alt varmen er samlet ved overflaten på land. Dette vil medføre til ustabilitet i atomsfæren på grunn av den varme luften som stiger opp og danner "store skala" turbulens

3.2 Turbulens spektra

Turbulens spektra beskriver hvordan turbulens energien er fordelt som funksjon av frekvensen. Tidligere har vind blitt beskrevet som en sannsynlighets funksjon (seksjon 2.2). Denne beskrivelsen forteller vindstyrke omfanget, men det gir ikke noe beskrivelse om hvor rask vindstyrken varierer med tiden eller med høyden. For å beskrive hvordan vinden varierer i løpet av en tidsperiode, må den speltaletthet (S_k) (forkortelse spektrum) defineres. Spektret definerer hvordan hver frekvens bidrar til variansen (σ_k) [2].

$$\sigma_k^2 = \int_0^{\infty} S_k(f) df \quad (3.4)$$

I metrologer og bygg ingeniører trengs det generelt spektre, spesielt for bruer. Ulike former av spektrum modeller er studert og implementert, de mest vanlige modellene er Kaimal og von Karman. Modellene definerer spektrum for langsgående hastigheten (parallelle til gjennomsnitt vindretning). Von Karman formelen er beskrevet i likning 3.5, og Kaimal modellen er anbefalt av IEC 64100-1 standarden [2] og er beskrevet i likning 3.6:

Von Karman:

$$\frac{f S_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{\frac{4 f L_{2k}}{\bar{U}_{nav}}}{\left(1 + \frac{70,8 f L_{2k}}{\bar{U}_{nav}}\right)^{5/6}} \quad (3.5)$$

Kaimal:

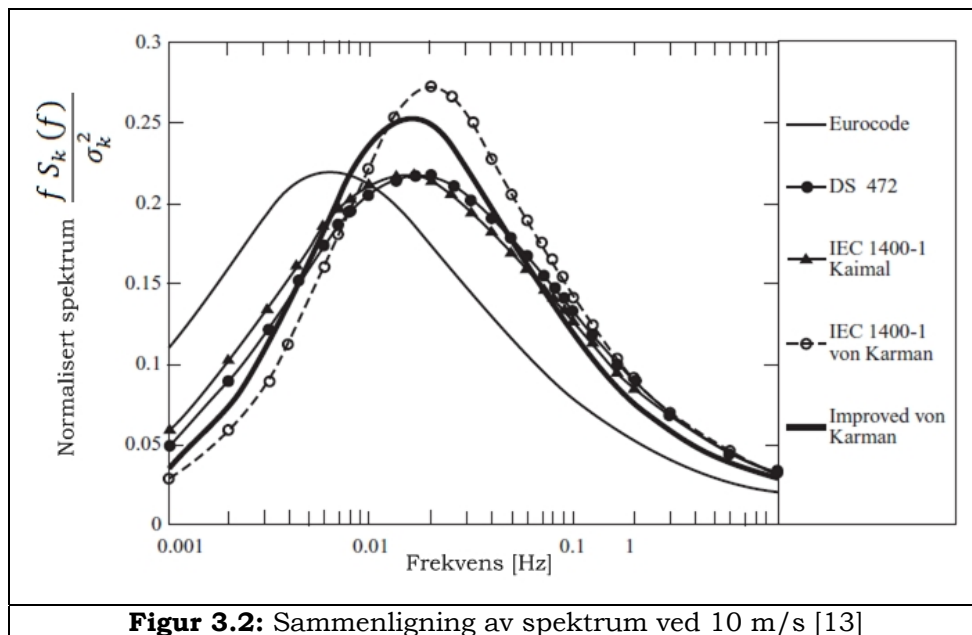
$$\frac{f S_k(f)}{\sigma_k^2} = \frac{\frac{4 f L_{1k}}{\bar{U}_{nav}}}{\left(1 + \frac{6 f L_{1k}}{\bar{U}_{nav}}\right)^{5/3}} \quad (3.6)$$

Hvor,

- f - frekvensen i hertz (Hz)
- S_k - en-sidig hastighetskomponent spektrum
- k - indeksen som henviser til hastighetskomponent retningene, (dvs. 1= langsgående, 2= lateral og 3= stigende)
- σ_k - standardavviket, hastighetskomponent
- \bar{U} - representerer vinds gjennomsnittshastighet ved nav høyde
- L_1, L_2 - lengdeskala, forholdet mellom begge er $L_{1k} = 2.329L_{2k}$ [13]. Lengde skala varierer med både terreng overflate ruheten og høyden fra overflaten.

Figur 3.2 viser sammenlikning av ulike langsgående turbulens spektrum ved 30 meters høyde, en gjennomsnittshattighet på 10 m/s og overflate ruhet $z_0=0,001$. Toppene representerer normaliserte spekteret til en frekvens. Kaimal modellen viser lavere spredningstopp enn von Karman spekteret. Derfor, IEC standarden anbefaler Kaimal modell med:

$L_{1k} = 340,2$ m, eller $3,777z$ for $z < 30$ m



3.3 Turbulens modell

Manns modelle representerer Manns turbulens, slik den er anbefalt og beskrevet i IEC 64100-3 standarden [1].

Formuleringen av Manns modellen baserer seg på spektral turbulens som beskriver svingninger og rotasjon av turbulens. Modellen er avhengig av tre turbulens parametere ($\alpha\epsilon^{2/3}$, L , Γ) som må være kjente for å kunne simulere den turbulente vindfelt. Tabell 3.1 viser turbulensparameterne for klasse 1 til 7, verdiene er gitt av veileder, og er som følgende:

Klasse	Klasser beskrivelse	$\alpha\epsilon^{2/3}$ (11,4 m/s)	L	Γ
1	Veldig ustabil (vu)	0,7091	72,3	1,02
2	Ustabil (u)	0,4502	63,1	1,83
3	Nær ustabil (nu)	0,2759	46,4	2,21
4	Nøytral (n)	0,1480	31,3	2,45
5	Nær stabil (ns)	0,0973	22,9	2,66
6	Stabil (s)	0,0334	11,0	2,87
7	Veldig stabil (vs)	0,0171	7,42	2,98

Tabell 3.1: Turbulensparameter for klassene 1-7 [vedlegg I]

Klasse	Klasser beskrivelse	$\alpha\epsilon^{2/3}$ (11,4 m/s)	L	Γ
8	IEC standardverdi	0,1810	29,0	3,90

Tabell 3.2: Turbulensparameter for klasse 8 [vedlegg I]

Hvor,

- α - tre dimensjonal Kolmogrov konstant ($\alpha = 1,7$)
- ϵ - spredning av den turbulente kinetiske energien
- L - turbulensskala
- Γ - forsyningen av spektrale tensor

3.4 Vindturbinklasser

Vindturbiner er definert i klasser som tar hensyn til vindhastighet og turbulens parametere. Hensikten er å dekke alle mulige tilfeller. Klassene I, II, III er best egnet (designmessig) for landbaserte vindturbiner, mens sikkerhetsklassen (S) gjelder for ekstreme vær forhold og offshore. IEC 61400-1 standarden [2] beskriver ulike parametere som må tas hensyn til for nav høyde over et terreng.

Vindturbin klasse	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42,5	37,5	Verdier som angis av designer
A I_{ref} (-)		0,16		
B I_{ref} (-)		0,14		
C I_{ref} (-)		0,12		

Tabell 3.3: Vindturbinklasser [2]

Hvor,

- V_{ref} referanse hastighet (gjennomsnittshastighet i 10 min)
- A definerer kategori for høye turbulens kategorier
- B definerer kategori for medium turbulens kategorier
- C definerer kategori for lav turbulens kategorier
- I_{ref} forventet turbulensintensitetsverdi

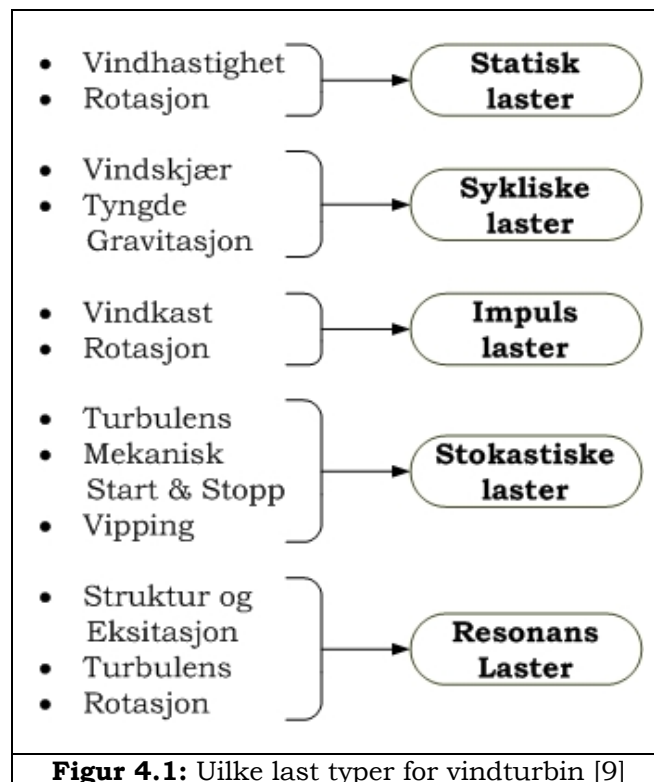
I følge IEC standarden, designet for en offshore vindturbine skal være i henhold til en av de to sikkerhetsmessige klassene [1]:

1. En normal sikkerhets klasse, gjelder når svikten resulterer fare for personell og samfunnet eller kan føre til økonomiske konsekvens
2. En spesiell sikkerhets klasse, gjelder når kravene til sikkerhet er bestemt av lokale/interne forskrifter til sikkerhet eller er avtalt mellom produsenten og kunden

4 MEKANISKE OG DYNAMISKE LASTER

Levetiden for en vindturbin er estimert til å være 20 år [4], i løpet av denne perioden vil mekaniske og dynamiske laster påvirke vindturbin-konstruksjons komponenter, primært på grunn av vindlaster.

Det er forventet at en vindturbin skal produsere energi og oppnå optimalt leve tid, den skal også være kostnadseffektiv. Det er derfor viktig å ta hensyn til funksjonelle forhold ved design av en vindturbin, særlig for de mest utsatte komponentene. Det er ulike last typer som på bakgrunn av ulike last kilder vil påvirker vindturbin-komponenter [9]. Figur 4.1 viser de primære årsakene til dannelse av ulike last typene, disse årsakene er også beskrevet i påfølgende seksjoner:



4.1 Ulike last typer

Statiske laster

Lasten er konstant, dvs. varierer ikke med tiden og virker på konstruksjonskomponenter. Statisk last oppstår ved for eksempel når en jevn fordelt vindlast treffer både en roterende og/eller ikke roterende vindturbin [9].

Sykliske laster

Sykliske laster er ikke konstant og kan variere regulert med tiden eller i perioder, særlig på grunn av rotorrotasjonen. Når tyngde kraften virker på vingene oppstår dynamiske laster, dette som følge av faktorer som: vekten av vingene, "Yaw² bevegelse" og variasjon i vindhastighet, bevegelse i konstruksjonen eller komponenter i selve turbinen [9].

Impuls laster

Lasten er tidsavhengig og varierende. Lastene kan oppstå på grunn av midlertidige påvikninger fra ytre omgivelsen. For eksempel, det kan være svingninger forbundet med impuls laster spesielt når vingen(e) passerer tårnet. Impuls last kjennetegnes ofte av signifikante maks last over en kortere periode [9].

Stokastiske laster

Stokastiske laster (i likehet med sykliske og impuls laster) er varierende med tiden og er mer tilfeldige. Lastene varierer på ulike måter. Et eksempel på stokastiske laster kan være last som oppstår på grunn av turbulens i vinden [9].

Resonans

Resonans induerte laster er dynamiske laster som stammer fra dynamisk respons på ulike vindturbindeler som følge av påvirkning i sin naturlige frekvens [9].

4.2 Ulike lastkilder

Aerodynamikk

Aerodynamiske laster som virker på et objekt er et resultat av dens bevegelse gjennomluft, eller omvent, de lastene som oppstår når et objekt blir utsatt for vindlaster [15]. Lastene kan være ganske store, spesielt når de oppstår under ekstreme vind forhold. Det er drag kreftene som oppstår av aerodynamiske lastene når vindturbinen står i ro under ekstreme vindforhold og det er løft kraften som skaper bekymringer når vindturbinen er i drift.

² "Yaw bevegelse" beskrives som rotasjon om den horisontale planet.

Oppdriftskraft (løftekraften) er definert til å være vinkelrett på retningen av mot gående strømming. Kraften er en konsekvens av trykkforskjellene mellom turbinens vinge sidene [9].

Luftmotstandskraft (dragkraften) er definert til å være parallell med retningen på mot gående strømming. Kraften skyldes både viskøse friksjonskreftene på overflaten av vingeprofilen og ulike trykk på vingeprofil flaten vendt mot og bort fra møtende strømming [9].

Tyngdekraft

Maskinhuset og vingene til en vindturbin er av store dimensjoner, derfor tyngdekraften er en viktig kraft kilde [9].

Dynamisk interaksjon

Aerodynamiske og tyngdekraft lastene genererer andre laster som påvirker andre mekaniske komponenter på turbinen. For eksempel "gyroskopisk" laster som dannes på grunn av dannelse av Yaw bevegelser når rotoren er i rotasjon, disse lastene kan ha store påvirkninger spesielt når Yaw raten er høy [9].

Mekanisk kontroll

Den mekaniske kontrollen av vindturbinen (start/stans av drift dvs. innkobling og utkoblings hastighet) kan medføre til store belastinger [9].

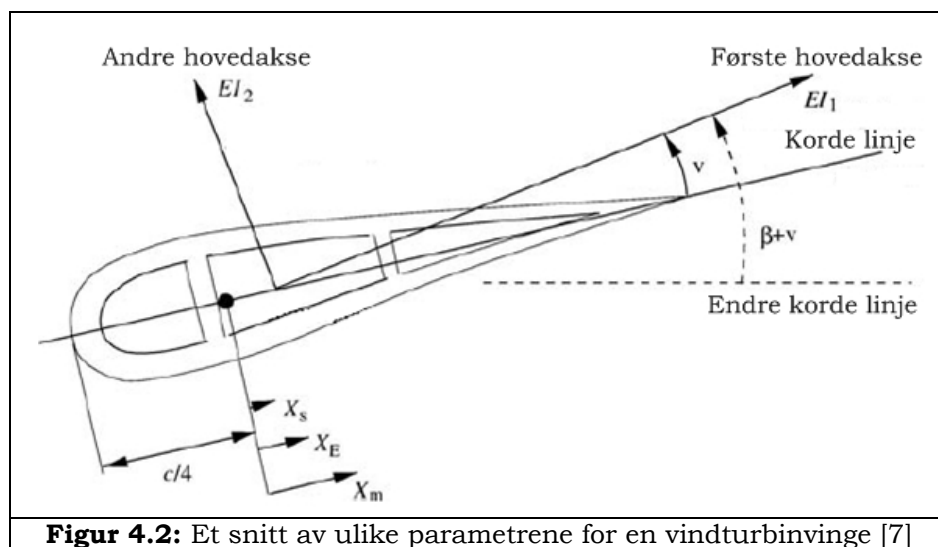
4.3 Ulike eksterne laster

I tillegg til den primære lasten (vindlast), finnes det andre ulike eksterne laster som påvirker vindturbiner, særlig offshore vindturbiner. Disse eksterne lastene (naturlaster) kan være: Luft tetthet, ising på vingene, vannbølge, lyd, jordskjelv og ikke miste ulike sol strålinger og temperatur forskjeller.

4.4 Bjelkeelement teori

Vindturbin vinger modelleres i ulike former. Det brukes ulike materialer for produksjon av vinge, normalt består de av kompositt materialer. Modellering og utforming av vingene er avhengig av flere parametere som den absolutt grensetilstanden, stivhet, lengde, egenvekt og ikke minst kostnadene.

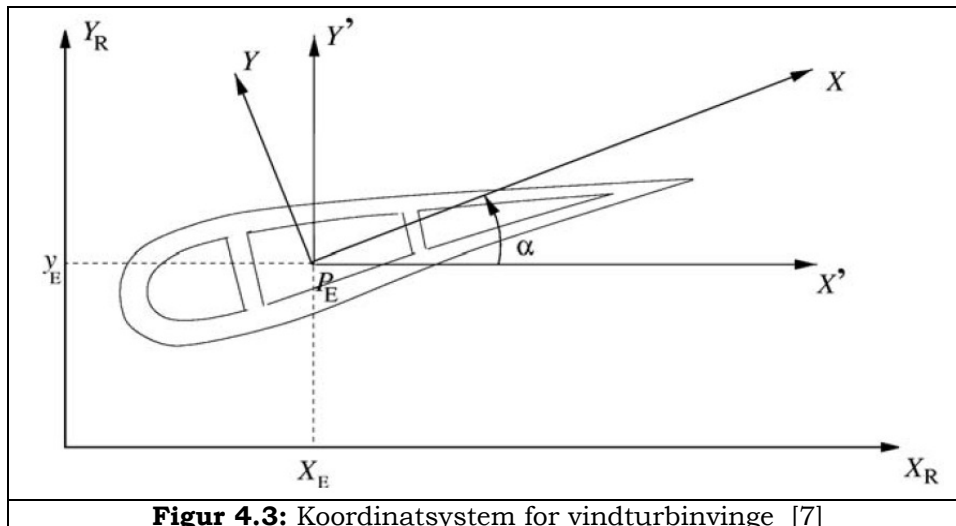
Bjelkeelement teorien brukes for å beregne lastene (kraftene og bøyemoment) i vingen ved å anta at en vindturbinvinge kan modelleres som en bjelke [7]. Figur 4.2 viser et snitt av en vindturbinvinge med ulike parametre for vingen.



Beskrivelsen av de ulike parametrene er som følgende [7]:

- EI_1 er bøyestivhet om første hovedakse
- EI_2 er bøyestivhet om andre hovedakse
- X_s er avstanden fra referansepunkt til elastisitetpunkt
- X_E er avstanden fra referansepunkt til skjærsenter
- X_m er avstanden fra referansepunkt til massesenter
- β er vingesegmentets vridning i henhold til endre kordelinjen
- V er vinkelen mellom korde linjen og første hovedakse
- $V + \beta$ er vinkelen mellom endre korde linjen og første hovedaksen

Figur 4.3 viser de nødvendige verdiene som er definert i forhold til referanse koordinatsystemet (X_R, Y_R):



Elastisitet er definert som et punkt hvor normalkraften (ut av planet) ikke vil påvirke bjelkebøyning. Skjærsenteret er definert som det punktet som kraften i planet ikke vil rotere vingesegmentet. Hvis bjelken bøyes om rundt en av hovedaksene, vil bøyningen skje bare om denne akse [7].

- Aksial stivhet: $[EA] = \int_A E dA$
- Stivhetsmoment om X_R akse: $[ESx_R] = \int_A E Y_R dA$
- Stivhetsmoment om Y_R akse: $[ESy_R] = \int_A E X_R dA$
- Trehetsmoment om X_R akse: $[EIx_R] = \int_A E Y_R^2 dA$
- Trehetsmoment om Y_R akse: $[EIy_R] = \int_A E X_R^2 dA$
- Sentrifugal stivhetsmoment: $[EDxy_R] = \int_A E X_R Y_R dA$

Basert på disse definisjonene, kan elastisitetpunktet $P_E = (X_E, Y_E)$ beregnes i referanse koordinatsystemet (X_R, Y_R) , [7]:

$$X_E = \frac{[ESy_R]}{[EA]} \tag{4.1}$$

$$Y_E = \frac{[ESx_R]}{[EA]} \tag{4.2}$$

For konstante verdier av (E) og (ρ) vil elastisitetpunktet være lik massesenteret av segmentet. Hvor ρ betegnes som tetthet av materialet som brukes. Både trehetsmomentene og sentrifugal stivhetsmomentet flytes over koordinatsystemet $(X'Y')$, noe som er parallelt med referanse

koordinatsystemet (X_R, Y_R) . Ut fra elastisitetpunkt som er vist i figur 4.3 gjelder følgende formeler [7]:

$$[EI_{X'}] = \int_A E(Y')^2 dA = [EI_{X_R}] - Y_E^2[EA] \quad (4.3)$$

$$[EI_{Y'}] = \int_A E(X')^2 dA = [EI_{Y_R}] - X_E^2[EA] \quad (4.4)$$

$$[ED_{X'Y'}] = \int_A E X'Y' dA = [ED_{X_RY_R}] - X_E Y_E[EA] \quad (4.5)$$

Nå er det mulig å beregne vinkelen mellom (α) og (X') (figur 4.3), første hovedakse og bøyestivhetene om hovedaksen, hvor den andre hovedaksen står vinkelrett på den første hovedaksen [7]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2 [ED_{X'Y'}]}{[EI_{Y'}] - [EI_{X'}]} \right) \quad (4.6)$$

$$[EI_1] = [EI_{X'}] - [ED_{X'Y'}] \tan \alpha \quad (4.7)$$

$$[EI_2] = [EI_{Y'}] + [ED_{X'Y'}] \tan \alpha \quad (4.8)$$

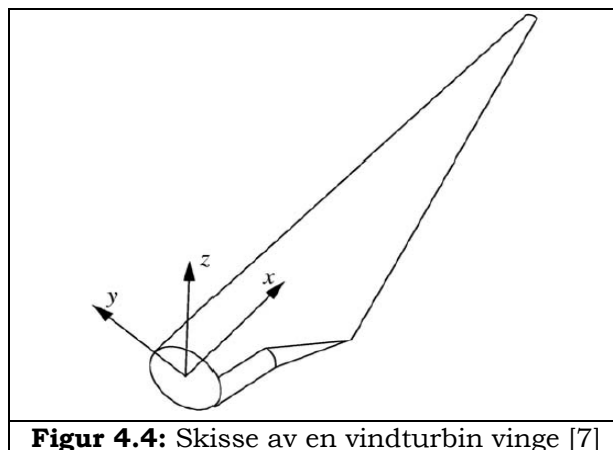
Spenningene i tverrsnittsarealet fra bøyemomentene om begge hovedaksene og normal kraften uttrykkes som følgende [7]:

$$\sigma(x, y) = E(x, y)\varepsilon(x, y) \quad (4.9)$$

Hvor tøyningene er:

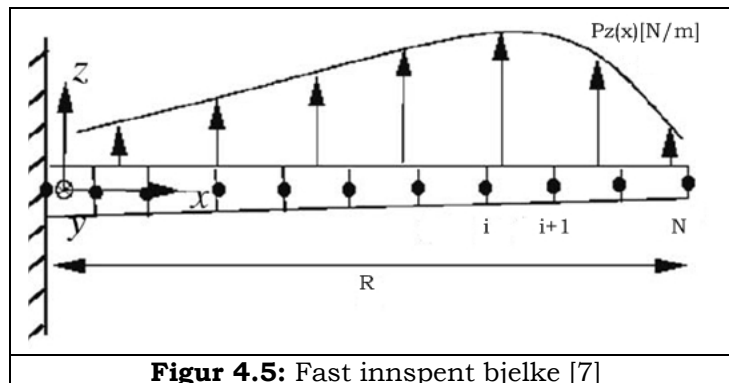
$$\varepsilon(x, y) = \frac{M_1}{[EI_1]}y - \frac{M_2}{[EI_2]}x + \frac{N}{[EA]} \quad (4.10)$$

Spenninger (σ) , tøyninger (ε) og normalkraften (N) er positiv ved strekk og negativ ved trykk. Bøyemomentene og normalkraften må beregnes ut fra lasten som virker på rotorvingen [7].



Figur 4.4: Skisse av en vindturbin vinge [7]

Figur 4.4 viser skisse av en vindturbin vinge, en fast innspent bjelke vist i figuren under:



Figur 4.5: Fast innspent bjelke [7]

Hvis de eksterne kreftene (P_y, P_z) for en vinge er kjent, da er det mulig å finne skjærkreftene (T_z, T_y) og bøyemomentene (M_y, M_z), [7]:

$$\frac{dT_y}{dx} = -P_y(x) + m(x)\ddot{u}_z(x) \quad (4.11)$$

$$\frac{dT_z}{dx} = -P_z(x) + m(x)\ddot{u}_y(x) \quad (4.12)$$

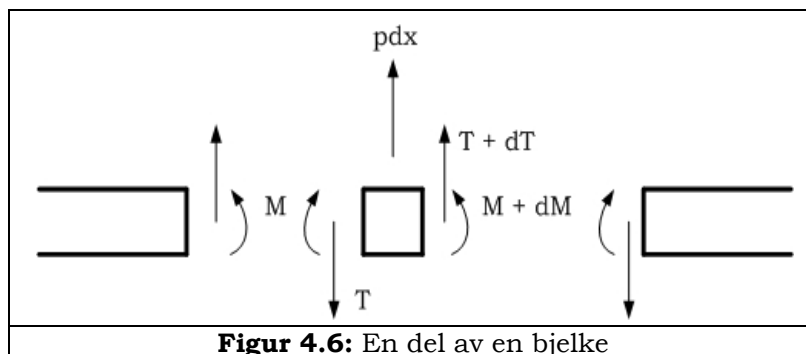
$$\frac{dM_y}{dx} = T_z \quad (4.13)$$

$$\frac{dM_z}{dx} = -T_y \quad (4.14)$$

Hvor,

\ddot{u} er akselerasjon

Likningene kan utledes ved hjelp av newtons andre lov på en del av bjelken (dx) som er vist i figuren under:



Figur 4.6: En del av en bjelke

De siste delene av likning (4.11 og 4.12) kan neglisjeres når vingerota er i likevekt. Det betyr at bøyemomentene kan transformeres til hovedaksene,

når Y-asken legges langs korde linjen. Dermed, kan bøyemomentene uttrykkes som følgende [7]:

$$M_1 = M_y \cos(\beta + v) - M_z \sin(\beta + v) \quad (4.15)$$

$$M_2 = M_y \sin(\beta + v) + M_z \cos(\beta + v) \quad (4.16)$$

Hvor,

$\beta + v$ er vinkelen mellom Y-aksen og den først hovedasken (figur 4.3)

Ved å ta i betraktning de kjente lastene (vindlast) for de ulike punktene langs bjelken (figur 4.5), og ved å anta at lastene varierer lineært mellom to punkter, kan lastene (kreftene og bøyemomentene) beregnes numerisk.

For å beregne lastene kan både vingen og tårnet representeres som en bjelke. Bjelken deles opp i flere elementer. Hvert element har flere noder, hver node med tre frihetsgrader. Dette vil bli komplisert å regne for hånd. Det er derfor nødvendig å bruke FEDEM for å behandle store mengde av data for finne lastene ved å ta hensyn til bjelkeelement teorien.

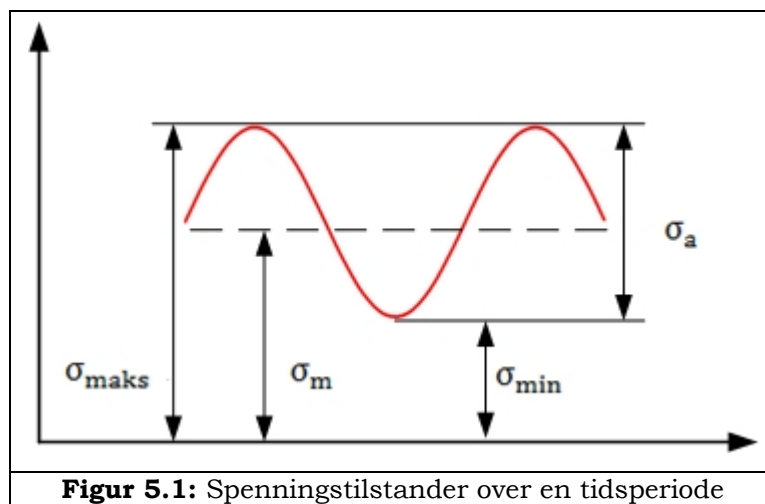
5 UTMATTING

Utmatting kan defineres som den forandringen som foregår i et materiale når det utsettes for en periodisk varierende spenning av tilstrekkelig størrelse [16].

Primære faktorer som forårsaker dannelse av utmattingskade er når syklusene inneholder minimum og maksimum laster, dvs. tilstrekkelig høye topp og bunn verdier med store svingninger. Ved topp og bunn av syklusene tilsvares strekk eller trykk som forandres over en tidsperiode.

Spenningsverdi nivået i et material må være av tilstrekkelig høy for å oppstå utmatting, dersom verdien er for lavt, vil ikke oppstå utmatting. Derfor må materialet må oppleve et tilstrekkelig stort antall sykluser påført over en tidsperiode, dermed oppnås slitasje og deretter utmatting.

Det er utviklet ulike metoder som kan brukes for å estimere utmattingskade for en vindturbin. Estimeringen er i hovedsak, avhenging av hvilken spenningstilstand materialet har opplevd i løpet av en tidsperiode. Figur 5.1 illustrerer spenningstilstander som varierende i løpet av periode.



Hvor,

- σ_{maks} - maksimal spenning
- σ_{min} - minimal spenning
- $\sigma_m = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2}$ - middelspenning
- $\sigma_a = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2}$ - spenningsamplitude
- $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} = \frac{\sigma_m - \sigma_a}{\sigma_m + \sigma_a}$ - spenningsrekkevidde

Utmattingssskade kan ofte skyldes uregelmessig spenninger i form av varierende sykluser som materialet har opplevd gjentatte ganger over en tidsperiode. Dette gjelder særlig for offshore vindturbiner som er utsatt for betydelig varierende dynamiske laster.

I tillegg til de dynamiske lastene som er forårsaket av naturen (vindhastighet, vindkaster og turbulens) kan flere andre faktorer bidra med å øke material skaden ytreligere. En av de viktigste faktorene er den absolutte grensetilstand "m" (material faktor) dvs. material egenskaper for vinger som er lagt av kompositt material og tårn som er lagt av stål material.

Andre faktorer som blant annet; metallurgisk struktur, spenningskonsentrasjon, korrosjon, temperaturforandringer og restspenninger også kan ha effekt for dannelse av utmattingen.

5.1 Skade ekvivalent last

IEC standarden beskriver en hypotese kalt Palmgen-Miner regelen som antar at utmattingssskaden akkumuleres lineært og bestemmer antall sykluser for en gitt amplitude. Likningene for skade ekvivalent last er utviklet og formulert basert på hypotesen i vedlegg G, som er anbefalt av IEC 64100-1 standarden [17].

I dette studiet er analysen av utmattingssskaden representert som skade ekvivalent last, "Damage equivalent load" (DEL). Skade ekvivalent last er utviklet i Mlife for å finne materiales evne til å motstå uregelmessige last historier. Ettersom last syklusene gjøres om til rekkevidder for forskjellige last historiene. Både material faktoren (m) og frekvens (f^{eq}) holdes konstant for beregning av skade ekvivalent lastene. Det er kun rekkevidden som forandres for ulike last spektrum. Resultat av dette representeres som endring i rekkeviddene.

Fordelen med å bruke skade ekvivalent last, er å estimere for kortsiktig utmattingssskade, noe som gir rask og enkelt tilgang til å sammenligne resultatene i prosentvis endring.

I Milfe benyttes følgende likninger for bergning av skade ekvivalent last [17]:

$$D_j^{ST} = \sum_k \frac{n_{jk}}{N_k} = \frac{n_j^{STeq}}{N_j^{eq}} \quad (5.1)$$

Basert på Palmgen-Miner regelen akkumuleres antall syklusene n_k [-] av en gitt frekvens og divideres med antall sykluser til brudd N_k [-] for en gitt frekvens. Dette er gir (D_j^{ST}) som representerer en kortsiktig akkumulert utmattingsskade. Basert på dette har Milfe utviklet skade ekvivalent last.

$$n_j^{STeq} = f^{eq} \times T_j \quad (5.2)$$

n_j^{STeq} [-] representerer den totale ekvivalent utmattingsskaden for kortsiktig last historie, hvor (n_j^{STeq}) er lik frekvensen ($f^{eq} = 10$ Hz) for skade ekvivalent lasten og multiplisert med analysetiden (T_j) som tilsvarer 600 sekunder. Dette tilsvarer 6000 sykluser for 10 minutters analyse.

$$N_j^{eq} = \left(\frac{L^{ult} - |L^{M0}|}{\left(\frac{1}{2} DEL_j^{ST0}\right)} \right)^m \quad (5.3)$$

N_j^{eq} [-] representerer antall ekvivalent for syklusene inntil brudd for den kortsiktige last historien. Likningen 5.3 er avhengig av flere parameter: L^{ult} [-] er den maksimale design last for komponenten, L^{M0} [-] er middelvei last ved null, DEL_j^{ST0} [Nm] som gleder for kortsiktige skade ekvivalent last ved null middelvei og er avhengig av material faktor (m) for komponenten.

$$L_k^{R0} = L_k^R \left(\frac{(L^{ult} - |L^{M0}|)}{(L^{ult} - |L_k^M|)} \right) \quad (5.4)$$

Likning 5.4 representerer Rainflow metoden, seksjon 5.2. L_k^{R0} [Nm] kan justeres i forhold til rekkevidden. Beregningen for skade ekvivalent last tar utgangspunkt i middelvei last ved null. Det er derfor middelvei last L^{M0} [N] er likt null og elimineres i likning 5.4.

$$DEL_j^{ST0} = \left(\frac{\sum_k (n_k (L_k^{R0})^m)}{n_j^{STeq}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (5.5)$$

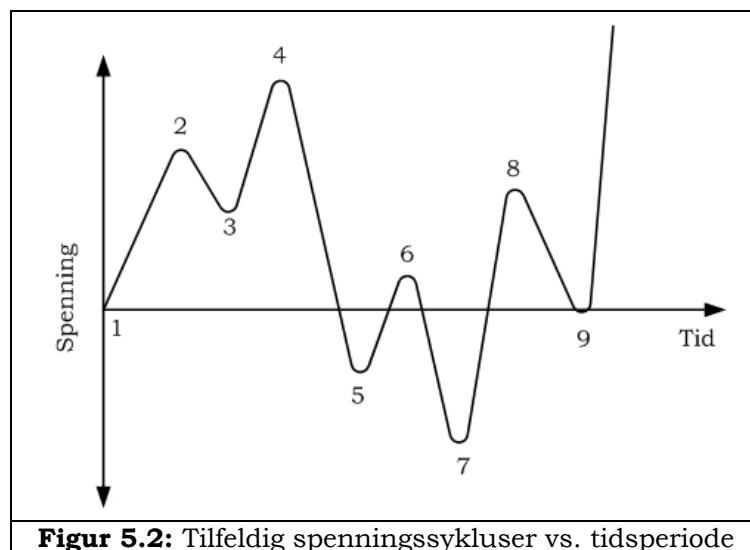
Når alle parameterne er definert vil likning 5.5 gi verdiene for den kortsiktige skade ekvivalent last ved null middelvei.

5.2 Rainflow

Analyse av sykluser er tydelige når det gjelder konstante amplituder, men i virkeligheten vil materialene sjelden bli utsatt for rent konstante amplituder (figur 5.1), fordi lastene er i varierende form i løpet av en tidsperiode.

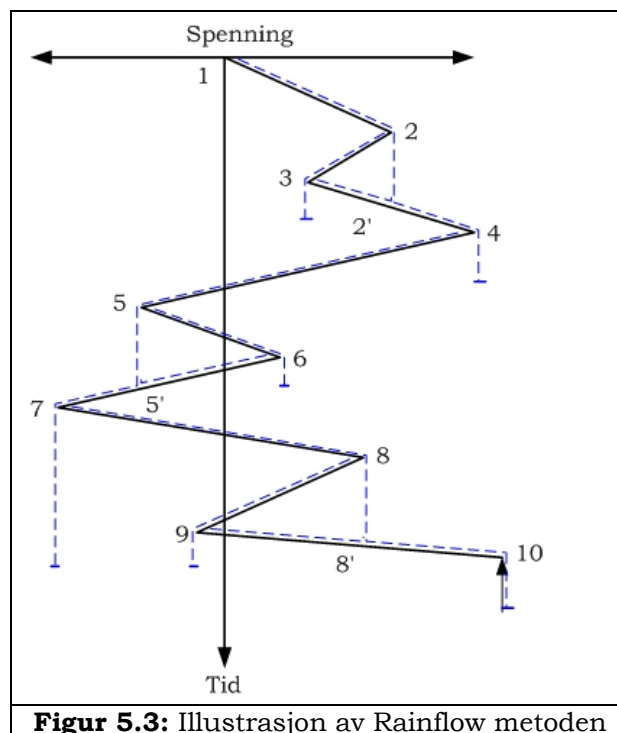
En metode kalt for "Rainflow counting" brukes for å redusere et spekter av uregelmessig spenninger over en tidsperiode. Metoden ble utviklet i 1968 av Tatsuo Endo [18]. Metoden har vært mye i bruk etter datateknologi framskrittet, som medførte til etablering av enkelte algoritmeisk programmer som gir mer nøyaktige utmattingskade analyse.

Metoden er utviklet for opptelling av hel syklus og halv syklus spenninger over en tidsperiode. Algoritmen i metoden tillatter justerbare filter som gir mulighet for justering/eliminering av sykluser med ubetydelige størrelse. I tillegg kan den gi gjennomsnittsspenningen for hver syklus, dvs. gjennomsnittsverdi av positive og negative topper/bunner for hver syklus.



Figur 5.2 viser tilfeldige spenningscykluser i vertikalretning og tidsperiode i horisontal retning. For å kunne analysere tilfeldige spenningscykluser brukes ulike opptellings metoder som blant annet Rainflow metoden. For å beskrive metoden tegnes en ekstra linje (blå, splittet linje) som indikerer hvordan regn vannet flyter nedover dersom grafen (figur 5.2) roteres 90 grader. Det antas at vann renner fra toppen, vannet fortsetter å renne nedover og slutter når en av følgende betingelser er oppfylt i regelen(e) for Rainflow, som er beskrevet nedenfor [19]:

- Vannet starter å renne nedover fra toppen ved punkt 1, når vannet kommer til kanten ved punkt 2 vil den dryppe nedover.
- Vannet vil stoppe dersom betingelsen for en halv syklus er nådd, dvs. ved punktene 1-2-4
- Hvis vann start fra toppen: vann flyten stopper når det kommer til en mer positiv topp enn den som vannet har startet ved, det vil også stoppe dersom flyten møter et kryssende vann
- Hvis vann start fra en fall: vann fallet stopper når det kommer til en mer negativ fall enn det som vannet har startet ved, det vil også stoppe dersom fallet møter en forgående fall



Av figur 5.3 kan hell og halv sykluser identifiseres ved å benytte metoden ettersom spektrene redusert av uregelmessig spenningen over en tidsperiode, resultatene er vist i tabellen under:

Antall	Hell syklus	Halv syklus
1	2-3-2'	1-2-4
2	8-9-8'	4-5-7
3	5-6-5'	7-8-10

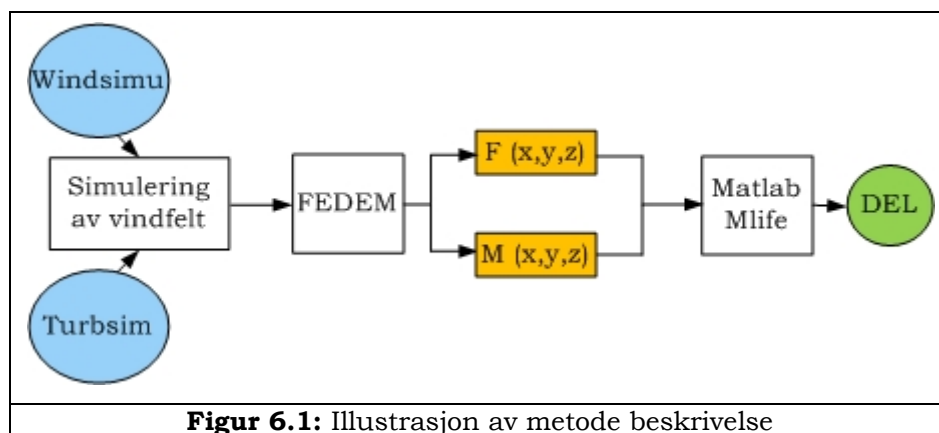
Tabell 5.1: Antall sykluser for figur 5.3

METODE

Dette kapitlet representerer oversikt over hvilke metode som er benyttet i arbeidet for å utføre dette studiet inkludert fremgangsmåter og prosessbeskrivelsen for de ulike verktøyene som er brukt.

6 METODE BESKRIVELSE

Metoden som er benyttet i dette studiet er i hovedsak delt i tre trinn, simulering av vindfelt, virtuelltesting av vindturbinen ved å bruke analyse verktøyet FEDEM og Matlab ved å bruke Mlife for å estimere skade ekvivalent last (DEL). Disse trinnene er illustrert i figur 6.1.



Figur 6.1: Illustrasjon av metode beskrivelse

6.1 Simulering av vindfelt

I dette studiet simuleres turbulent vindfelt for klassene 1 til 9, for hver klasse simuleres seks i økter. Det blir benyttet et vilkårlig tall for å kunne skille simuleringsøktene, siden hver klasse har samme turbulensparameter. Verdiene for turbulensparametrene er definert i tabell 3.1 og tabell 3.2. Det simuleres kun et vindfelt for klasse 10, verdien for turbulens parameteren er tilnærmet likt null. Det er derfor heller ingen fluktuering i vindfelten for klasse 10.

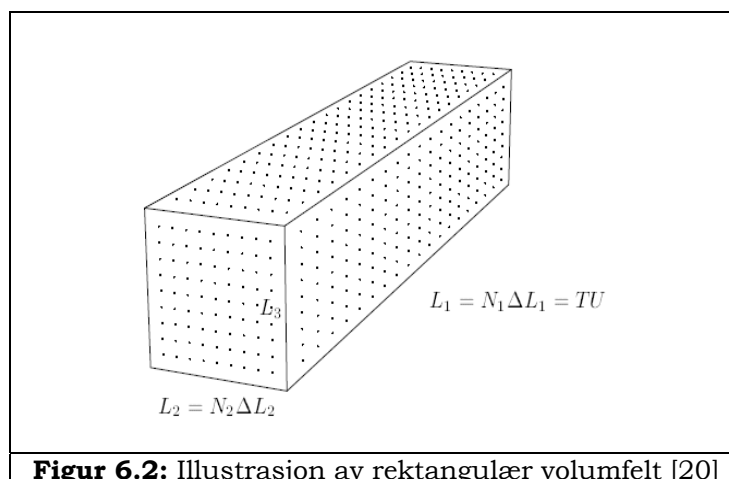
Det er viktig å understreke at styrken til turbulente vindfeltene er med å definere karakteren på vindlasten som påvirker vindturbinen. Dette er avgjørende bestemmelse for utmatting.

6.1.1 Windsimu

Det er veldig sjelden alle nødvendig verdier er tilgjengelig for å angi turbulensintensitets verdi. Det er derfor mer nyttig å simulere turbulente vindfelter med simuleringsprogram. Windsimu er et data program som brukes for simulering av vindfelter, dvs. dannelse av vind fluktuering i form av turbulens i komplekse terreng. Windsimu bruker Manns modellen som er i henhold til den anbefalte turbulens modellen, den er beskrevet i IEC 64100-3 standarden [1]. Programmet brukes for å simulere vindfelt for klassene 1 til 8. Dette for å finne effekten av turbulensparametrene de ulike klassene, turbulensparametrene som er benyttet for Windsimu er empiriske verdier.

Uilke simuleringstyper kan brukes i Windsimu. Simuleringstypen "Basic" er benyttet i dette studiet og gjelder for flatt terreng og for tre dimensjonalt spektrum. Vindprofilen er beskrevet i teorien, seksjon 2.2. Vindprofilen "Power law" (PL) og vindens gjennomsnittshastighet ved nav høyde er konstant, de er henholdsvis $\alpha = 0,14$ og $U_{nav} = 11,4$ m/s, mens turbulensparametrene ($\alpha \epsilon^{2/3}$, L, T) endres for hver av klassene (tabell 3.1 og tabell 3.2).

Figur 6.2 illustrerer simulering av en vindfelt som foretas i et rektangulært volumfelt som gjelder Manns turbulens. vinds gjennomsnittshastighet (U) og simuleringstiden (T). Simuleringspunkter representerer ($N_1 \times N_2 \times N_3$) og sidelengde L_i ($i = 1, 2$ og 3) der avstanden mellom hvert punkt kan defineres som $\Delta L_i = \frac{L_i}{N_i}$ [20].



Figur 6.2: Illustrasjon av rektangulær volumfelt [20]

Den rektangulære volumfeltlengden tilsvarer en vindfelt med en varighet på 600 sekunder. Det er 10 minutter per simulering, for hver klasse gjennomføres totalt seks simuleringsøkter. Dette er anbefalt av IEC standard 64100-3 [1].

Det betyr totalt 1 time vindfeltlengde med samme turbulens parameter for hver klasse. For å simulere vindfeltene med samme turbulens parametere og for å unngå dannelse av samme vindfelt i Windsimu benyttes et unikt nummer. Et vilkårlig tall (random seed) benyttes for hver simulering, dette for å kunne skille simuleringsøktene. Verdiene for de tredimensjonale retningene x, y, og z er definert for rektangulære volumfeltet (tabell 6.1). I tillegg, defineres vindturbin egenskapens verdi (tabell 6.4).

Tabell 6.1 viser de primære parametrene som benyttes i Windsimu for simulering av de turbulente vindfeltene for klasse 1 til 8. Et eksemplar av Windsimu tekst filen er modifisert og presentert i vedlegg F.

Parameter	Beskrivelse av parametrene	
Basic	Simuleringstype	
$\alpha\epsilon^{2/3}$	Empiriske verdi	Turbulens parameter
L	Turbulens skala	
Γ	Forsyningen av spektrale tensor	
3	Tre dimensjonalt vindfelt	
3	Simulering av alle tre retningene u, v og w	
8192	Antall simuleringspunkt N_1	Rektangulært volumfelt lengde figur 6.2
32	Antall simuleringspunkt N_2	
32	Antall simuleringspunkt N_3	
8192	Sidelende L_1	
160	Sidelende L_2	
160	Sidelende L_3	
69910	Et vilkårlig tall (random seed)	
Tabell 6.1: Parameter beskrivelse av Windsimu		

Turbsim er også et vindfelt simuleringsdata program som også brukes for simulering av turbulente vindfelt. Turbsim er tilgjengelig i NREL nettside [21]. Den turbulente vindfelt spekteret som benyttes av Turbsim er Kaimal modellen, som er i henhold til IEC 61400-1 [2]. Turbsim blir benyttet for å simulere vindfelt for klasse nummer 9 som representerer en turbulensintensitet³ på 10 %. Et eksemplar av Turbsim tekstfilen er modifisert og presentert i vedlegg G.

³ Beregningen av turbulensintensiteten er presentert i vedlegg A.

6.2 FEDEM

FEDEM står for "Finite Element Dynamics in Elastic Mechanisms". FEDEM er en relativt nyutvikla program, programmet brukes og betegnes som en teknologisk plattform for ingeniør rammeverk for virtuelltesting av komplekse mekaniske forsamlinger [22]. Dette betyr at FEDEM er i stand til å forenkle bruken av grensesnittet for ingeniør prosesser og gir raskere tilgang til analyse resultater for å gi bedre forståelse av fysiske oppførsel for en modell.

FEDEM brukes som analyse data program i dette studiet, derfor er innføringsmanual [23] grundig gjennomgått for å kunne forstå og beherske framgangsmåten. Dette for å kunne modellere en offshore vindturbin modell.

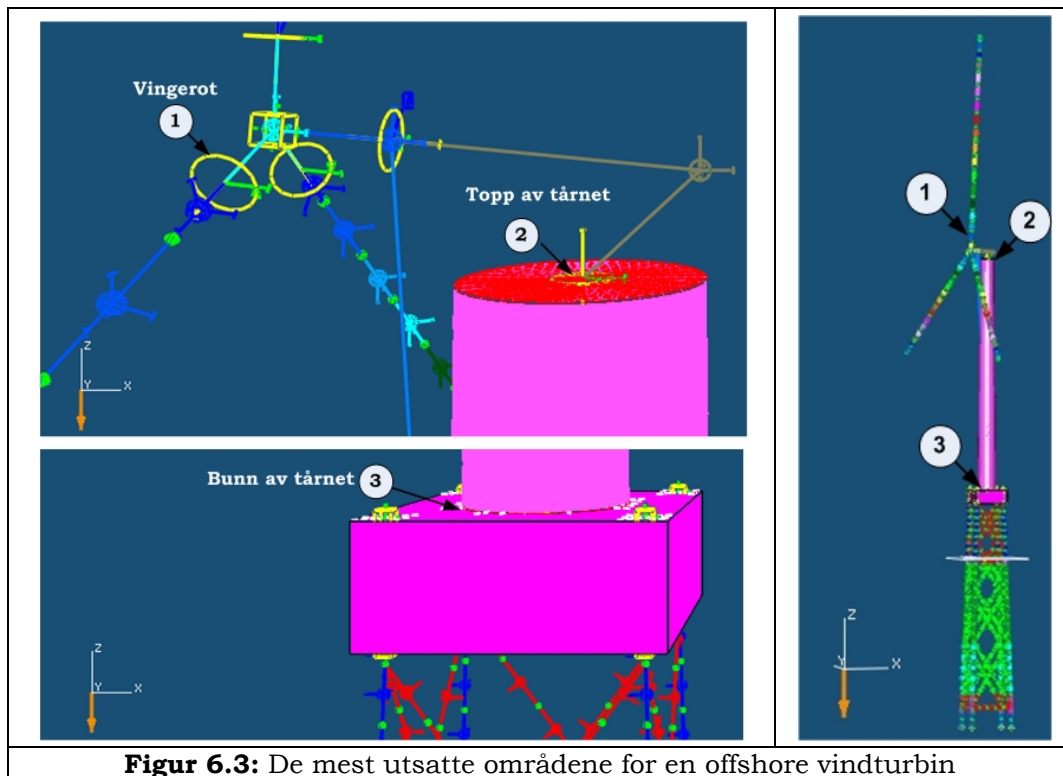
Følgende punkter i manualen er grundig gjennomgått i FEDEM:

- Modellere en enkel vindturbin
- Tilføre kontrollsystem til modellen
- Tilføre en offshore jakke bærestruktur (fundamentet)
- Tilføre hydrodynamikk til modellen
- Bygge modellen fleksibel og legge inn jord fjærer
- Prosessering av lastpåkjenninger

I dette studiet benyttes en offshore vindturbin modell (OC4) som er modellert med hjelp av Kristian Sætertrø fra FEDEM. Modellen brukes under analyse arbeidet, analyse arbeidet i hovedsak rettes mot de tre mest utsatte områdene i turbinen:

1. Vingerot
2. Topp av tårn
3. Bunn av tårn

De over nevnte områdene er valgt på bakgrunn av de betydelige kreftene som er i store svingninger og som er forårsaket av ekstreme vindlastene. Figur 6.3 viser de tre mest utsatte områdene for vindturbinen som er modellert i FEDEM.



Figur 6.3: De mest utsatte områdene for en offshore vindturbin

- ① Vingene⁴ er justerbare, noe som gir mulighet for både å produsere mest mulig elektrisitet og for å sikre turbinen under ekstreme vindforhold.
- ② Maskinhuset og vingene er på toppen av tårnet, noe som betyr at toppen er utsatt for ekstreme påkjenninger.
- ③ Bunnen av tårnet er et koblingspunkt for både fundamentet, tårn og maskinhuset på toppen. Derfor må bunnen av tårnet konstrueres for å kunne tåle betydelige krefter.

De mest nødvendige og sentrale punktene for gjennomføring av analysen i FEDEM er beskrevet som følgende:

1. Analyse og sekvens tid

Analysetiden er 650 sekunder med en sekvens tid på 0,025 sekund, dvs. at analyse verdiene lagres etter hvert 0,05 sekund. Ved analyse start vil det være ujevne laster med store variasjoner, for å unngå ujevne laster i starten av analysen vil de første 50 sekundene elimineres, noe som betyr at den faktiske analysetiden er fra 50 til 650 sekunder (10 minutter) for hver analyse.

⁴ Det er totalt 17 noder langsvingen for OC4 offshore vindturbin [24].

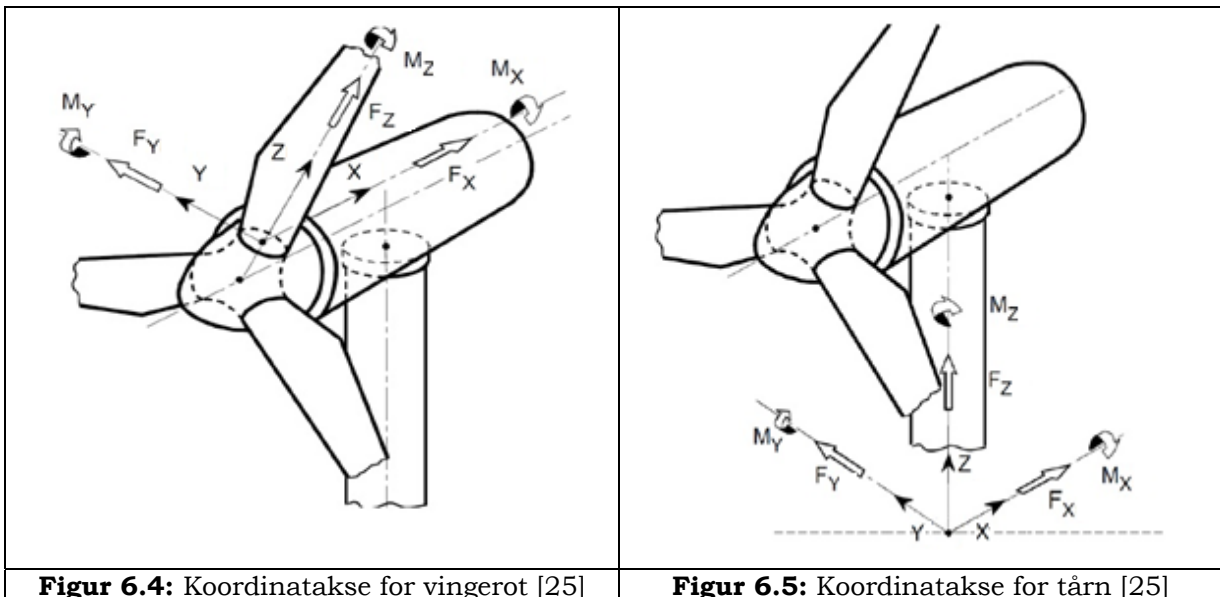
2. Grafer

For å kunne ekstrahere resultatene for vindturbinen må grafene for de aktuelle områdene (dvs. nodene for de mest utsatte områdene) defineres slik at resultatene av den dynamiske analysen som genereres i FEDEM ekstraheres på en enkel måte. Disse grafene må også skaleres slik at det blir standard skaleringer på alle ekstraherte verdiene. I grafene vil x-aksen representere analysetiden og y-aksen representere de aktuelle nodene (tabell 6.3).

3. Utdata

Utdata representerer de ekstraherte verdiene av analysene. Når analysen er fullført i FEDEM, genereres det en automatisk utdata (rsp.fil) som inneholder lastverdiene for de definerte nodene. Det er derfor viktig å definere grafene numerisk slik at det blir oversiktig og strukturert i utdata. Verdiene inneholder lasthistoriene for (F_x , F_y , F_z) og (M_x , M_y , M_z) som representerer grunnlag for videre arbeid i Mlife for å kunne estimere skade ekvivalent last.

Figurene under viser koordinataksene for de mest utsatte områdene. Den primære vindretningen treffer mot vindturbinen og er definert som: x retningen inn i planet, y retning i planet og z retningen er normalt retning.



Tabell 6.2 viser egenskapsverdier for vingen og tårnet for offshore vindturbin. Tabell 6.3 Beskrivelse av node detaljene henvises til i vedlegg H. Verdiene i Tabell 6.4 vil bli brukt i håndberging som er presentert i vedlegg B.

Forkortelse	Beskrivelse	Verdi	Enhet
m_{vinge}	Masse for hver vinge	17 740	kg
L_{vms}	Lenge for ving masse senter	20,475	m
m_{nav}	Nav masse	56 780	kg
m_m	Maskinhus masse	240 000	kg
T_m	Tårn masse	347,460	kg
L_n	Lengde langs aksel fra nav senter til Yaw akse	5,01910	m
L_m	Maskinhusets masse senter normal til Yaw akse	1,90	m

Tabell 6.2: Egenskapsverdiene for offshore vindturbin OC4 [24]

Nr.	Node	Enhet	Node beskrivelse	m	BW
1	Tid	s	Analysetid	-	-
2	VindVx	m/s	Langsgående vindhastighet	-	-
3	VindVy	m/s	Sideveis vindhastighet	-	-
4	VindVz	m/s	Vertikal vindhastighet	-	-
5	RotFx	kN	Skjærkraft ut av planet ved vingerot	5	5
6	RotFy	kN	Skjærkraft i planet ved vingerot	5	8
7	RotFz	kN	Normalkraft ved vingerot	5	10
8	RotMx	kNm	Bøyemoment i planet ved vingerot	5	189
9	RotMy	kNm	Bøyemoment ut av planet ved vingerot	5	207
10	RotMz	kNm	Torsjonsmoment ved vingerot	5	5
11	ToppFx	kN	Skjærkraft ved topp av tårnet i vind retning	12	12
12	ToppFy	kN	skjærkraft ved topp av tårnet i sideveis retning	12	3
13	ToppFz	kN	Vertikal kraft ved topp av tårnet	12	3
14	ToppMx	kNm	Bøyemoment side til side ved topp av tårnet	12	45
15	ToppMy	kNm	Bøyemoment ved topp av tårnet i vind retning	12	179
16	ToppMz	kNm	Torsjonsmoment ved toppen av tårnet	12	245
17	BunnFx	kN	Skjærkraft ut av planet ved bunn av tårnet	12	12
18	BunnFy	kN	Skjærkraft i planet ved bunn av tårnet	12	3
19	BunnFz	kN	Normalkraft ved bunn av tårnet	12	3
20	BunnMx	kNm	Bøyemoment side til side ved bunn av tårnet	12	211
21	BunnMy	kNm	Bøyemoment ved bunn av tårnet i vind retning	12	756
22	BunnMz	kNm	Torsjonsmoment ved bunn av tårnet	12	247

Tabell 6.3: Beskrivelse av node detaljene

Beskrivelse	Spesifikasjon
Vindturbin klassetype	5 MW
Vind retning	Motvind
Antall vinger	3 stykker
Vingelengde	61,5 m
Nav radius	1,5 m
Rotor diameter	126 m
Nav diameter	3 m
Nav høyde	90,55 m
Innkoblingshastighet	3 m/s
Nominell hastighet	11,4 m/s
Utkoblingshastighet	25 m/s

Tabell 6.4: Spesifikasjon for offshore vindturbin OC4 [24]

6.3 Matlab

Matlab (R2011a) er et numerisk data program som enkelt gir tilgang til plotting av funksjoner og data implementering av algoritmer. Matlab brukes i forbindelse med Mlife for å estimere skade ekvivalent last (DEL).

6.3.1 Mlife

Mlife er et Matlab basert dataverktøy som brukes for å prosessere resultatene fra FEDEM med både elastiske og dynamiske simuleringer [17]. Mlife estimerer verdien for (DEL) fra utdata filene som tilsvare "input fil". Prosessering gir rask tilgang til å bearbeide data slik at resultatet av (DEL) bestemmes på enkel måte. Et eksemplar for Mlife tekstfilen er modifisert og de sentrale detaljene presentert i vedlegg H. Etter prosessering av inndata i Mlife etableres resultatene for skade ekvivalent last, total oversikten over resultatene er presentert i vedlegg E.

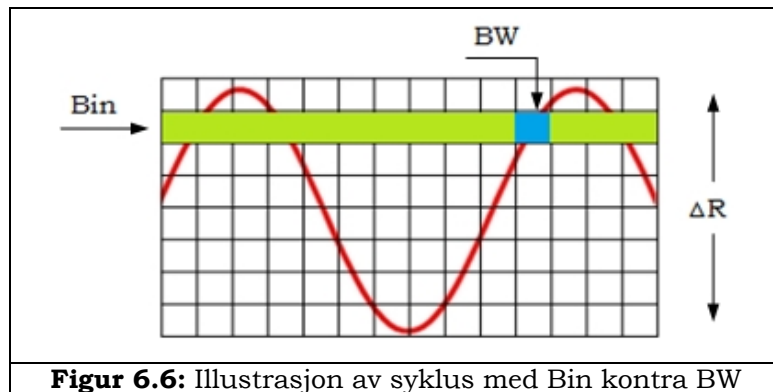
I forbindelse med Mlife testfilen, det er viktig å påpeke på tre faktorer som vil være avgjørende for estimering av skade ekvivalent lastene:

1. BW størrelsen:

I Mlife er BW størrelsen en viktig faktor som har i oppgave å eliminere mindre utslag mellom syklus intervallene (figur 6.6). Dette for å kunne redusere unøyaktigheter i utslagene. Mlife er utviklet slik at Rainflow metoden kan brukes for å redusere uregelmessig spenninger over en tidsperiode, det for å estimere kortsiktig skade ekvivalent last, som representerer utmattingsskaden. BW størrelsen beregnes fra de ekstraherte resultatene av FEDEM og likningen kan uttrykkes som følgende:

$$BW = \frac{\Delta R}{Bin} = \frac{(maks-min)}{50} \quad (6.1)$$

Rekkevidden ΔR er forholdet mellom maks og minimum last verdiene for hver node. Bin er konstant og er valgt til å være lik 50. Det betyr at syklusene deles på 50 Bin i vertikalretning (tabell 3.1), etter at maks og min last verdiene er identifisert for hver node.



Den nøytrale klassen er valgt til å definere BW størrelsen, dvs. rekkevidden ΔR er identifisert basert på nøytral klassen. Størrelsen holdes konstant for alle andre klassene, dette for å kunne sammenligne skade ekvivalent last for alle klassene.

2. Ultimale material grensetilstand (Lult):

”Lult” verdien beregnes etter å ha identifisert den høyeste verdien for x, y, og z for hver node i den nøytrale klassen. Den høyeste verdien i noden er multiplisert med en faktor på 8, dette for å ta høyde for at konstruksjonen skal kunne tåle betydelige krefter.

3. Den absolutte grensetilstand:

Den absolutte grensetilstand representerer material faktor (m). Vingen er lagt av kompositt material som har en material faktor på 10,11 eller 12, mens tårnet er lagt av stål og har en material faktor på 3,4 eller 5 [25]. For å betrakte det verst tenkelig utfallet velges de høyeste verdiene for material faktorene, dvs. $m = 5$ for vingen og $m = 12$ for tårnet.

Resultatene blir representert som gjennomsnittsverdien av skade ekvivalent last. Det betyr at verdiene for de seks analysene summeres og deles på seks for hver klasse. Dette for å unngå tilfeller med store turbulensskala i et bestemt vindfelt, noe som resulterer i ekstreme last påkjenninger, som igjen gjenspeiler stor skade.

RESULTAT AV ANALYSENE

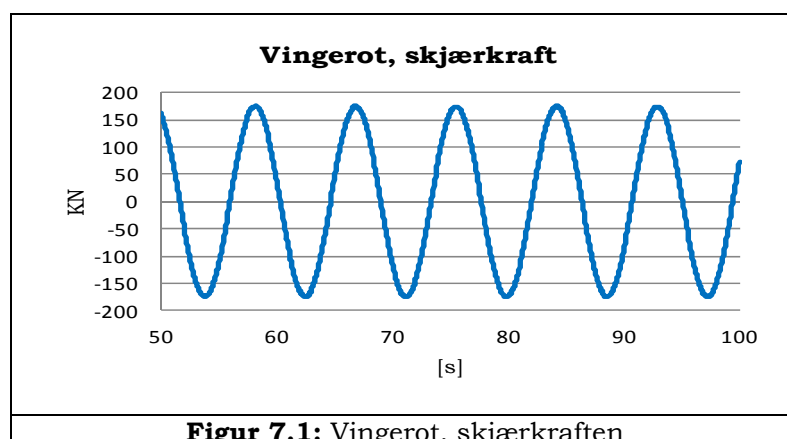
Kapitel 7 presenterer resultatene av analysearbeidet for dette studiet. Kapittel 8 drøfter resultatene etterfulgt av konklusjon av analysearbeidet.

7 RESULTATER

7.1 Grunnleggende last beregning

Det er nødvendig å foreta grunnleggende beregninger for de mest utsatte belastingsområdene av en vindturbin, for eksempel vingeroten. Dette gjøres for å kunne sjekke nøyaktigheten og ikke minst verifisere om analyseresultatene som er generert av FEDEM, stemmer overens med beregningsresultatene. For vingeroten beregnes lastene; skjærkraft, normalkraft og bøyemoment, koordinataksene er vist i figur 6.4. Metodikken er basert på bjelkeelement teorien som antar at vindturbinvinge kan modelleres som en bjelke [7]. Det betraktes at vindturbinen roteres men vingene er kun påvirket av gravitasjonen og av sin egen vekt. Dermed er de aerodynamiske kreftene (krefter fra vinden) er ikke inkludert i beregningene. Bergingsresultatene er basert på gjeldende ligninger, og analyse resultatene som er generert av FEDEM er analysert og vist grafisk i figur 7.1 (kun for skjærkraft), resten av last beregningene (normalkraft og bøyemoment) er presentert i vedlegg B. Sammenligningen verifiserer at resultatene fra FEDEM er identiske med håndberegningene. Noe som betyr at vindturbinen er riktig modellert og at analyse resultatene for de ulike lastene for hver klasse har samme grunnlag og kan sammenlignes. Skjærkraft for vingeroten er som følgende:

$$F = m_{\text{vinge}} \times g = \pm (17\,740 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2) = \pm \underline{\underline{174 \text{ kN}}}$$



Figur 7.1: Vingerot, skjærkraften

7.2 Turbulente vindfelt

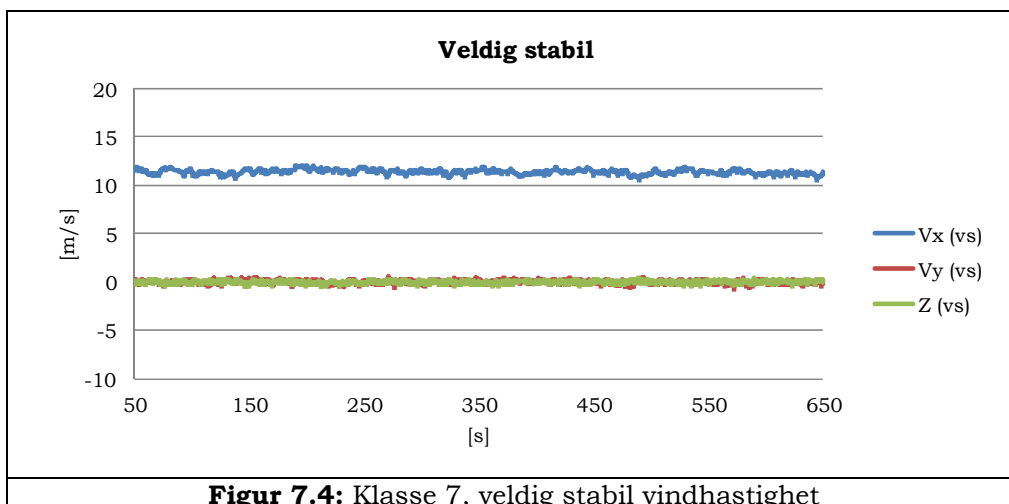
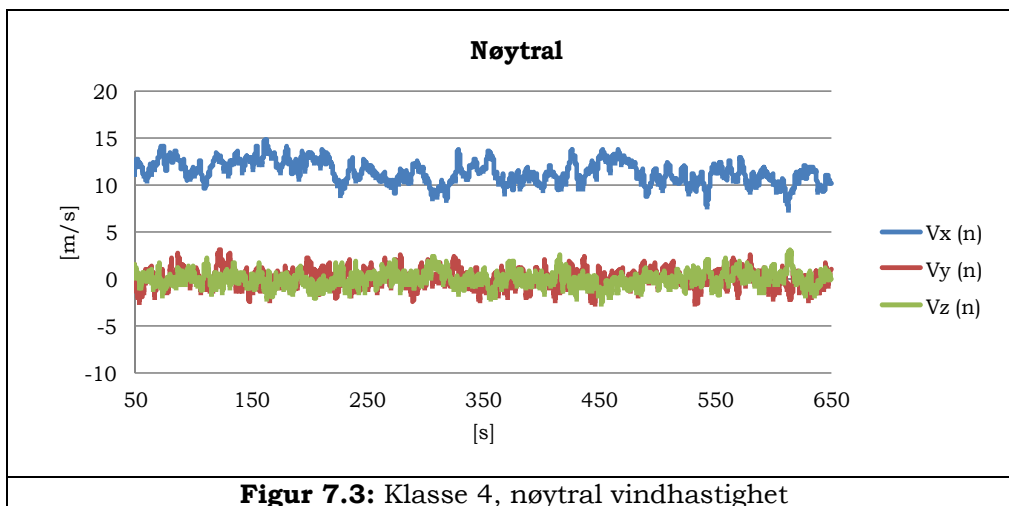
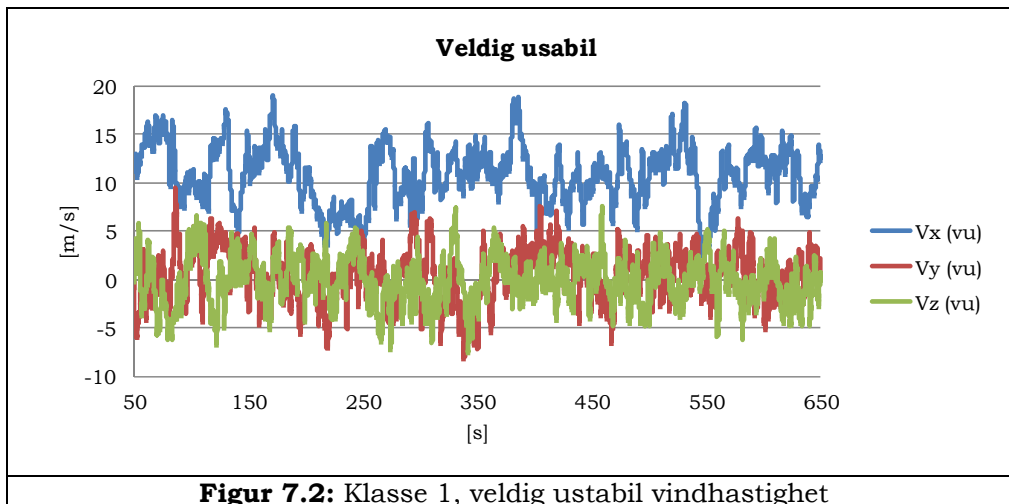
Resultatene av de turbulente vindfeltene presenteres kun for tre av klassene; veldig ustabil (klasse 1), nøytral (klasse 4) og veldig stabil (klasse 7). Den nøytrale klassen er tilnærmet lik IEC standard verdien. Alle vindfeltene er simulert med vindprofil "Power law" (PL) og vinden gjennomsnittshastighet ved nav høyde er konstant $U_{nav} = 11,4$ m/s. Oversikt over resten av vindfelteklassene er presentert i vedlegg C.

Vindfeltene for klassene 1 til 8 er simulert ved hjelp av Windsimu og er basert på turbulensparametre som gjelder for Manns turbulens modell. Klasse 9 er simulert ved hjelp av Turbsim med 10 % turbulensintensitet (Kaimal modell). Klasse 10 er simulert ved hjelp av Windsimu, med turbulensparametrene som er tilnærmet lik null (10^{-8}). Det er derfor ingen turbulens i vindfeltet for klasse 10, noe som betyr ingen fluktuering i vindfeltet og at kun en jevn vindlast treffer vindturbinen.

Grafene (figur 7.2, figur 7.3 og figur 7.4) viser resultatene av de turbulente vindfeltene for klassene; veldig ustabil, nøytral og veldig stabil. Den turbulente variasjonen for tredimensjonalt vindfelt er svært forskjellige for klassene. Det er på grunn av forskjellene i turbulensparametre som er definert for hver klasse. Samt, det er størst forskjell mellom veldig ustabil (klasse 1) i forhold til nøytral (klasse 4), henholdsvis figur 7.2 og figur 7.3. Hvor den nøytrale klassen er tilnærmet lik IEC standardverdi klassen (klasse 8).

Figur 7.2 viser stor fluktuering i x-retning for veldig ustabil klassen dvs. den primære vindretningen som treffer mot vindturbinen. I tillegg, det er også stor fluktuering i både i y og z-retningene sammenlignet med figur 7.3 som viser relativt mindre fluktuering i x, y og z retninger for nøytrale klassen.

Figur 7.4 viser tilnærmet ingen fluktuering i alle retningene, dvs. vinden i x-retningen er tilnærmet lik vindens gjennomsnittshastighet og vinden i både y og z retningene er tilnærmet lik null.



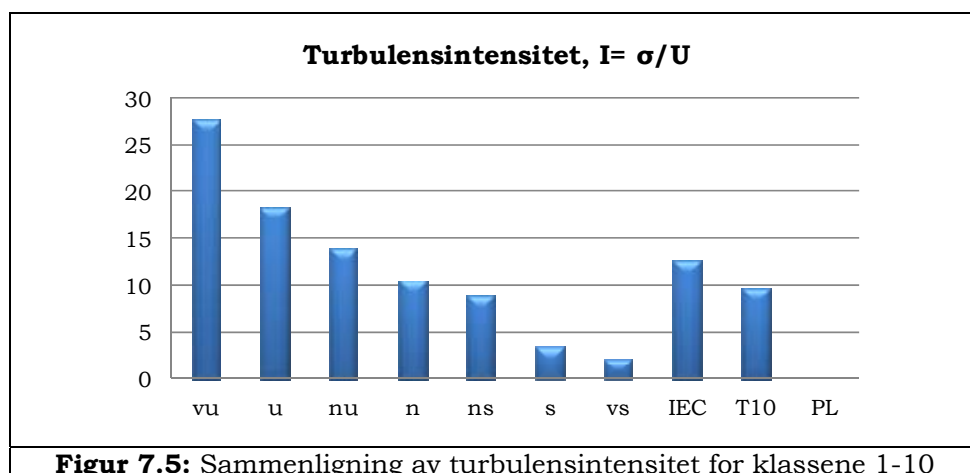
7.3 Turbulensintensitet

Turbulensintensitet representerer fluktuering av et turbulent vindfelt. Fluktuering oppstår når det er vind fra forskjellige retninger (x, y, og z) som krysser på tvers i forhold til hverandre og skaper kaotiske svinger i vindfeltet. Figur 7.5 viser prosentvis sammenligning av turbulensintensitet for klasse 1 til 10, hvor variansen (σ^2) for vindspekteret er beregnet ved hjelp av Matlab. Standardavviket (σ) er identifisert for de turbulente vindfeltene og er dividert på vindhastigheten for hver klasse.

Analyse av figur 7.5 indikerer at turbulensintensitetsverdiene er høyest for den veldig ustabile klassen, som er 17,1 % høyere enn verdien for den nøytrale klassen. Dette er på grunn av høy verdi for turbulensparametre for den veldig ustabile klassen i forhold til de andre klassene. Noe som verifiserer at turbulensintensitet har stor påvirkning og kan skape mer slitasje på vindturbinen.

Klasse		Standardavvik	Vindhastighet	Turbulensintensitet
nr	Beskrivelse	σ	U	I [%]
1	Veldig ustabil (vu)	3,04	11,01	27,60
2	Ustabil (u)	2,11	11,63	18,17
3	Nær ustabil (nu)	1,55	11,15	13,90
4	Nøytral (n)	1,19	11,33	10,50
5	Nær stabil (ns)	1,01	11,47	8,80
6	Stabil (s)	0,39	11,41	3,40
7	Veldig stabil (vs)	0,24	11,39	2,10
8	IEC standard (IEC)	1,44	11,45	12,60
9	Turbsim (T10)	1,07	11,31	9,50
10	Power Law (PL)	0,00	11,40	0,00

Tabell 7.1: Turbulensintensitetsverdier for klassene 1-10



7.4 Skade ekvivalent last

Skade ekvivalent last for stabilitetsklassene basert på Manns turbulens (klasse 1 til 7) for de mest utsatte områdene; vingeroten, topp og bunn av tårnet er presentert fra figur 7.6 til figur 7.11. Koordinataksen for vingerot og tårn (retning og rotasjon) er presentert i seksjon 6.2. Resultatene for de samme utsatte områdene for klassene 8, 9 og 10 i forhold til nøytral klasse er presentert i vedlegg D. Alle verdiene for skade ekvivalent last (DEL) er presentert i vedlegg E.

Det er gjennomsnittsverdien av analysene som er presentert for hver klasse, dvs. gjennomsnittsverdien av de seks simuleringene for hver klasse. Dette for å unngå eventuelle store fluktueringer som måtte oppstå i et bestemt vindfelt, som ville gjenspeile urealistisk stor skade.

Verdiene for skade ekvivalent last (DEL) blir normaliserte med hensyn til den nøytrale klassen som er tilnærmet lik IEC standarden. Det betyr at DEL for hver klasse divideres på DEL for den nøytrale klassen. Verdien vil derfor alltid være 1 (som tilsvarer 100 %) for den nøytrale klassen. Etter normalisering av skade ekvivalent last for alle klassene, kan en sammenligne resultatene med hverandre.

Vingerot

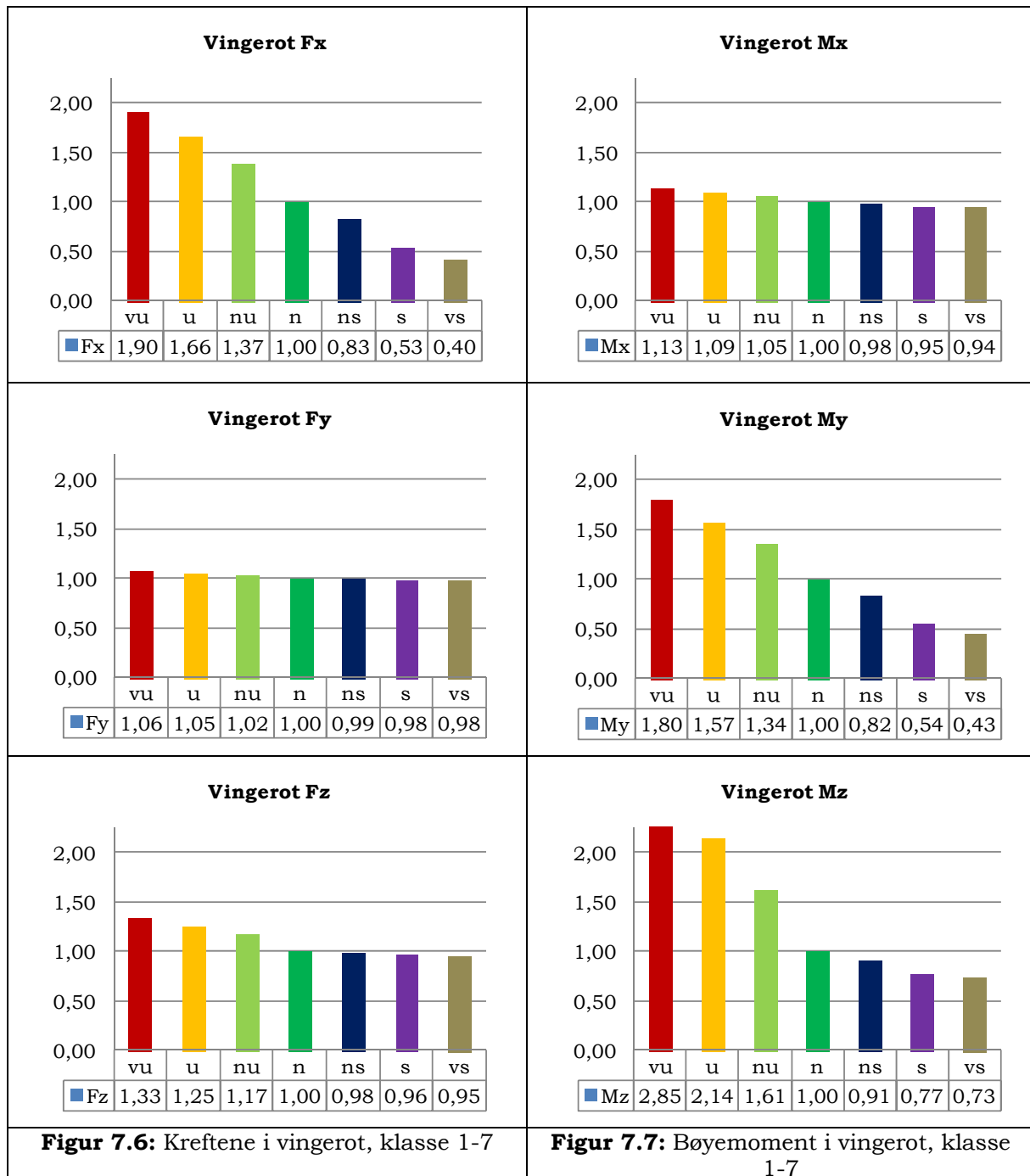
Rot av vingen er en av de mest utsatte områdene i en vindturbin. Dette området er særlig utsatt for fluktuering på grunn av uregelmessig bevegelser forårsaket av vindlaster.

Ved å sammenligne resultatene for skade ekvivalent last for vingerotslastene (kraft og bøyemomentet), vil en observere store forskjeller i skjærkraft (F_x) inn i planet og bøyemoment (M_y) i planet. Forskjellen er på hele 90 % mer for skjærkraften (F_x , figur 7.6) og for bøyemomentet er den på hele 80 % (M_y , figur 7.7) for veldig ustabil klassen i forhold til den nøytrale klassen. I tillegg, forskjellen er på hele 60 % mindre både for (F_x) og (M_y) for veldig stabil klassen i forhold til den nøytrale klassen.

Normalkraften (F_z) og torsjonsmoment (M_z) har en viss fluktuering, størst for torsjonsmoment (M_z) som er i bevegelse ut av planet, men forskjellen er ikke så stor for skjærkraft (F_x) i forhold til bøyemomentet (M_y).

Derimot, ingen forskjeller er observert for skjærkraft (F_y) inn i planet og bøyemoment (M_x) i planet. Verdiene for alle klassene er tilnærmet like den nøytrale klassen.

Vingerot



Figur 7.6: Kraftene i vingerot, klasse 1-7

Figur 7.7: Bøyemoment i vingerot, klasse 1-7

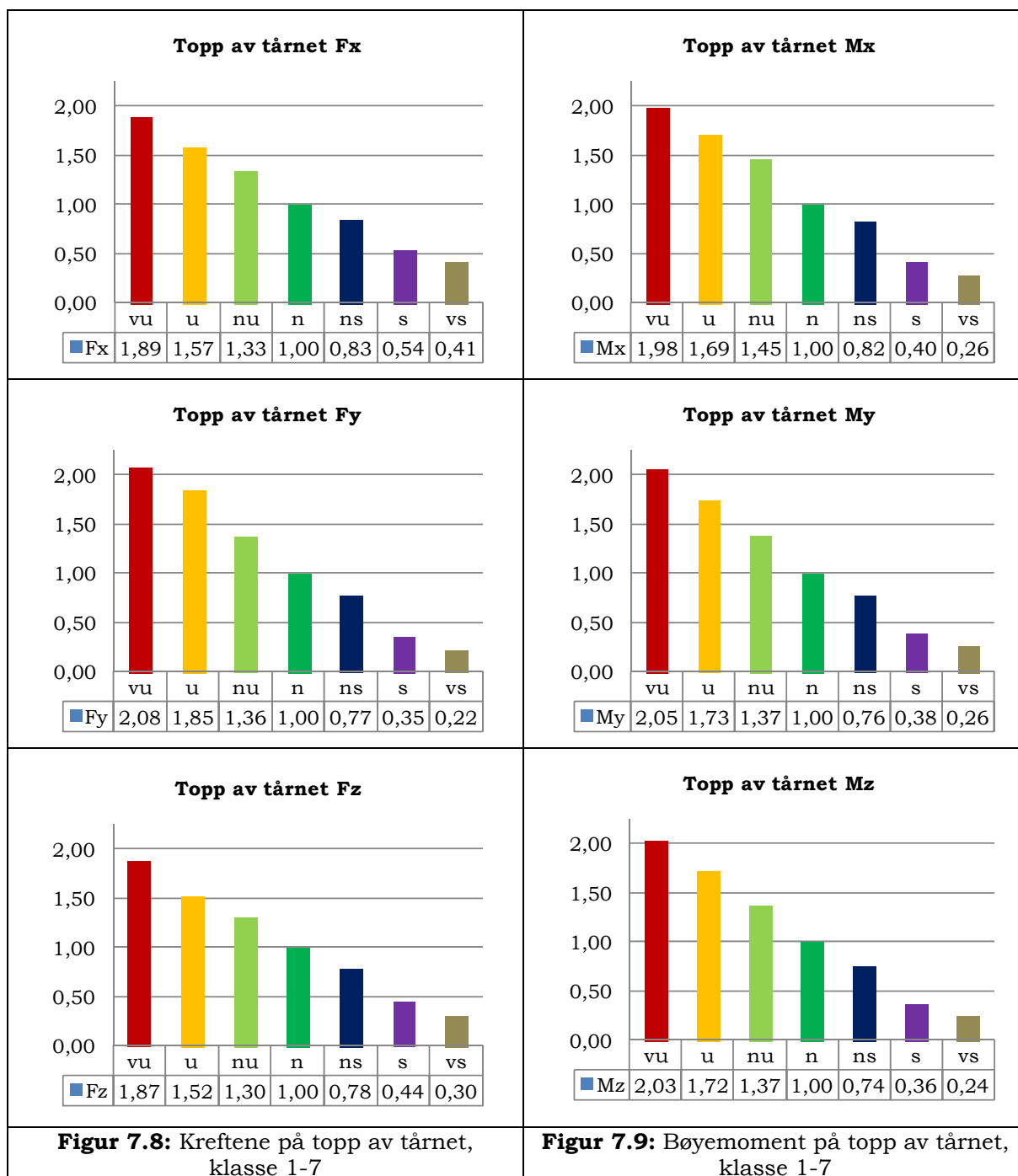
Topp og bunn av tårnet

Både toppen og bunn av tårnet er også svært utsatte områder for betydelig vindlast, særlig bunnen av tårnet. Vekten av vingene og maskinhuset bidrar til økt belastning på toppen av tårnet. Vekten av vingene, maskinhuset og tårn til sammen bidrar til enda mer belastning på bunnen av tårnet. Ved å sammenligne resultatene for skade ekvivalent last (kraft og bøyemoment) for både toppen og bunnen av tårnet, vil en observere at verdiene for både kraft og bøyemomentet i x, y og z retninger er minkende fra klasse 1 til 7.

Veldig ustabil klasse har en verdi tilnærmet det dobbelte av verdien til den nøytrale klassen, både for kraft og bøyemoment i alle tre retningene. DEL er normalisert i dette studiet og trenden er lik for topp og bunn av tårnet. Derfor en ikke kan se den forskjellen mellom topp og bunn av tårnet for DEL verdiene, denne forskjellen er presentert i vedlegg E.

Disse resultatene også verifiserer at effekten av turbulensintensitet i vindfeltene har mest påvirkning for veldig ustabile klassen. Dette forsterker teorien om at høye turbulensintensitet vil føre til at vindturbinens konstruksjon bli betydelig utsatt for store skade ekvivalent laster. Dette er gyldig spesielt for vindturbiner offshore.

Toppen av tårnet



Bunnen av tårnet



8 DISKUSJON OG KONKLUSJON

Usikkerhetsfaktor

Totalt, 10 forskjellige turbulente vindfelt klasser er simulert i dette studiet. Hver simulering har en vindfeltlengde tilsvarende 10 minutter. For klassene 1 til 9 gjennomførtes totalt seks simuleringer for å få lengre vindfeltlengde, tilsvarende 1 time for hver klasse med samme turbulens parameter. Dette for å redusere usikkerheten rundt simuleringsresultatene, ved å unngå tilfeller med stor turbulensskala i et bestemt vindfelt. I tillegg, en kan ikke få samme variasjon i vindfeltet ved å simulere et enkelt vindfelt i en time sammenlignet med å simulere seks mindre intervaller. Det er også andre usikkerhetsfaktorer knyttet til utførelsen av vindfelt simuleringene, blant annet vindhastigheten; vinden er ikke konstant og det er nettopp vindhastigheten som er den største usikkerhetsfaktoren i dette studiet.

Vindfeltene for klassene 1 til 8 er simulert basert på Manns modell. Turbulensparametrene er empiriske for Manns modell, det betyr at modellen er basert på erfaringsverdier. En måte å redusere usikkerheten rundt Manns turbulens verdier, er å bruke nettopp erfaringsverdier for det aktuelle feltet, der vindturbin(e) skal plasseres. Når tilgjengeligheten av erfaringsverdier er et faktum, kan en modifisere modellen i forhold til feltskriterier. Dermed kan en simulere en vindfelt som er representativt for feltets virkelige natur.

Vindfelt for klasse 9 er simulert av Turbsim, vindfeltspekteret er i henhold til Kaimal modellen. Ved å se nærmere på turbulensintensitets verdi for klasse 9, kan en observere at det er 0,5 % avvik mellom turbulensintensitets verdi fra Turbsim som er estimert til 9.5 % og beregnet turbulensintensiteten som er 10 %. Dette avviket kan være på grunn av flere usikkerhetsfaktorer, blant annet usikkerheter rundt antagelsene for bergning av turbulensintensitet (vedlegg A) og ikke minst usikkerheter knyttet til den simulerte vindfelt for Turbsim. Fordi Turbsim har en vindfeltlengde som tilsvarer 1050 sek, men i FEDEM benyttes kun 650 sek vindfeltlengde. I tillegg, Turbsim vindfelt lages for hver 0,025 sek per punkt, kontra 0,05 sek per lagringspunkter i FEDEM.

Vindfelt for klasse 10 er simulert av Windsimu med en jevn vindprofil (PL) og en jevn last som treffer vindturbinen. Dette ble utført for å verifisere at ved en turbulensintensitets verdi lik null vil resultatet være ingen fluktuering i vindfeltet (vedlegg C, figur C.7).

Vindfelt

Resultatene er presentert grafisk for de tredimensjonale turbulente vindfeltene i seksjon 7.2 og i vedlegg C for alle klassene. Figurene viser tydelig at det er store forskjeller (vind i x, y og z retninger) mellom klassene. Det er mer kaotisk som følge av turbulensintensiteten for den veldig ustabile klassen i forhold til den nøytrale klassen og den veldig stabile klassen. Dermed er det fluktuering i vindfeltene som gjenspeiler variasjonen i lastbilde.

Effekten av turbulensintensitet (tabell 7.1) for hver klasse er estimert basert på turbulensintensitets parametre (tabell 3.1 og tabell 3.2). Det ble estimert høy turbulensintensitets verdi for den veldig ustabile klassen, på grunn av høye fluktuerings nivå i vindhastigheten i x, y og z retninger.

Det er viktig å understreke at styrken til turbulent vindfeltene er med å definere karakteren på vindlasten som påvirker vindturbinen. Samtidig, det er estimert en fallende trend for intensitetsverdi fra veldig ustabile til veldig stabile klassen. Konklusjonen er at turbulensintensitet er høyst for veldig ustabil klasse på grunn av høy turbulens parameter verdi og dermed utmattingskaden er størst for denne klassen.

Skade ekvivalent last

Effekt av vindlastene har vist seg å ha store påvirkninger for utmattingskader for en vindturbin. Utmattingskaden i dette studiet representerer en kortsiktig akkumulert utmattingskade (skade ekvivalent last), og er basert på at vindturbinen er i drift, dvs. bidragene til utmattingskade ved oppstart og stans av vindturbinen er neglisjert. Dette for å kunne redusere usikkerheter knyttet til estimering av skade ekvivalent last. Både i en virkelighets situasjon og i en virtuelltesting av en vindturbin, utsettes vindturbinen for store ujevne laster. Derfor trenger vindturbinen en viss tid for å justere den mekaniske rotasjon til et optimalt driftsnivå. For å neglisjere oppstarts effekter, elimineres de første 50 sekundene fra analyse tiden, derfor er analyse resultatene skalert fra 50 til 650 sekunder.

Manns turbulens

Analyseresultatene av skade ekvivalent last for klasse 1 til 7, viser relativt store forskjeller mellom klassene. For vingeroten er forskjellen mellom den veldig ustabile klassen og den nøytrale klassen 90 % for skjærkraften (F_x) og

80 % for bøyemomentet ut av planet (M_y). Det er også store forskjeller, opp mot det dobbelte i toppen og bunnen av tårnet i x, y og z retninger (figur 7.6 til figur 7.11). En forklaring for disse forskjellene kan knyttes til for høy fluktuering i vindfeltet, som et resultat av for høy turbulensintensitet som fører til større vindlast og påkjenninger på vindturbinen. I tillegg, resultatene verifiserer at effekten av turbulens i vindfeltene har sammenheng med skade ekvivalent last i de for utsatte områdene; vingerot, topp og bunnen av tårnet.

Analyse resultatene av skade ekvivalent last for klasse 4 (den nøytrale klassen) kontra klassene 8 (IEC standard) til 10, viser også relativt store forskjeller. Skade ekvivalent last resultatene for den nøytrale klassen er tilnærmet lik IEC standardverdien som er basert på Manns turbulensmodell. Det er viktig å merke verdien for turbulensparameterne ($\alpha \epsilon^{2/3}$, L, T) for den nøytral (klassen 4, tabell 3.1) i forhold til verdien for turbulensparametre for IEC standardverdi (klasse 8, tabell 3.2). En kan observere at verdien for klasse 8 er høyere enn for den nøytrale klassen. Samme observasjon er observert for turbulensintensiteten for klasse 4 i forhold til klasse 8 i tabell 7.1. Dette er en bekreftelse på at klasse 8 har høyere prosentvis ekvivalent skade enn klasse 4.

Kaimal vs. Manns

Analyse resultatene av skade ekvivalent last for klasse 9 viser relativt stor forskjell i forhold til klasse 4. Denne forskjellen er enda større i forhold til klasse 8. Skade ekvivalent last forskjellen for klasse 9 er 39 % mindre for vingeroten og omtrent 30 % mindre for topp og bunnen av tårnet i forhold til nøytral klassen. En forklaring på disse forskjellene er at disse to klassene er simulert basert på ulike vindsimuleringer modeller (Kaimal og Manns). Kaimal turbulens modell utgir 9,5 % turbulensintensitet i vindfeltet for klasse 9, mens Manns turbulens modell utgir 10,5 % turbulensintensitet for nøytrale vindfelt. Dermed vil Kaimal turbulens modell gi mindre påvikning på vindturbinen kontra Manns turbulens. Resultatene er presentert i vedlegg D.

Ingen turbulensintensitet

Analyse resultatene av skade ekvivalent last for klasse 10 (PL) i forhold til den nøytrale klassen viser også relativt store forskjeller i forhold til nøytrale klassen. Gjennomsnittsforskjellen er på omtrent 80 % mindre skade ekvivalent for klasse 10 i forhold til den nøytrale klassen for vingen, topp og bunnen av vindturbinen. Resultatene er presentert i vedlegg D.

Basert på antagelsene i metoden og utførelsen av dette studiet, har det kommet fram at IEC standardverdien kanskje ikke er en konservativ antagelse. Derfor anbefaler dette studiet at en ny praksis for IEC standarden og en bør inkludere stabilitet i utmattingsanalysene. Samt utarbeide mer forskning for å etablere bedre simuleringsrutiner for vindturbiner offshore. Samtidig vil dette studiet ikke anbefale bruk av Kaimal modellen.

9 VIDERE ARBEID

Det er viktig å benytte erfaringsdata for det aktuelle området hvor vindturbinen skal plasseres. Deretter kan en bruke Manns modellen for simulering av turbulente vindfelter slik at vindfeltet oppnå det optimale feltskriteriet. I tillegg, levetidsbetraktninger bør studeres nærmere ved å ta i betraktning flere ulike vindhastigheter.

Skade ekvivalent last er estimert av Milfe, men det er også interessant å kunne bruke MCrunch, i stedet for Milfe og deretter sammenligne resultatene med de eksisterende resultatene.

Forbedringstiltak for gjennomføring av tilsvarende studier: Det er behov for kraftigere datamaskiner, spesielt viktig med tilgang til lagringsplass (RAM) og ikke minst minnestørrelsen.

10 REFERANSELISTE

- [1] IEC, International Electrotechnical Commission. IEC 61400-3 Ed.1. *Wind Turbines—Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines*. International Electrotechnical Commission, 2009.
- [2] IEC, International Electrotechnical Commission. IEC 61400-1 Ed.3. *Wind Turbines—Part 1: Design Requirements*. International Electrotechnical Commission, 2005.
- [3] EWEA, Winds in our Sails, *The coming of Europe's offshore wind energy industry*, 2011
- [4] Hau, Erich. *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. 2nd edition. 2006.
- [5] Olimpo, Anaya-Lara. *Wind Energy Generation: Modelling and Control*. Chichester: Wiley, 2009.
- [6] Simens, http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/wind-power/E50001-W310-A123-X-4A00_WS_SWT-2.3-82%20VS_US.pdf (funnet 20 Januar 2012)
- [7] Hansen, Martin O. L. *Aerodynamics of Wind Turbines*. London: Earthscan, 2008.
- [8] Gdiy, http://www.gdiy.com/projects/producing-energy-from-wind/images/Image_3.gif (funnet 17 februar 2012)
- [9] Manwell, J. F., J. G. McGowan, and A. L. Rogers. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. Chichester: Wiley, 2009.
- [10] Ieawind, http://www.ieawind.org/task_30/task30_Public.html (funnet 14 januar 2012)
- [11] Vindteknikk, <http://www.vindteknikk.no/norges-vindressurser-kartlagt/?nav=framside> (funnet 02. februar 2012)
- [12] Aftenbladet, <http://www.aftenbladet.no/energi/Hywind-er-best-i-klassen-2930616.html> (funnet 10 April 2012)
- [13] Burton, Tony. *Wind Energy: Handbook*. Chichester: Wiley, 2001.
- [14] DNV, Den Norske Veritas. DNV-RP-C205. *Environmental Conditions and environmental Loads*, 2010.
- [15] Jan-Erik rønningen, *Kort innføring i aerodynamikk, stabilitet og baneanalyse av raketter*. Aerodynamikk, stabilitet og baneanalyse. 2002.
- [16] Almar- Næss, Almar. *Metalliske Materialer: Struktur Og Egenskaper*. Trondheim: Tapir, 2003.

- [17] G. J., Hayman. *Mlife Theory Manual for Version 1.00*. National Renewable Energy Laboratory, 2011.
- [18] Dowling, Norman E. *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999.
- [19] Almar -Næss, Almar. *Fatigue Handbook: Offshore Steel Structures*. Trondheim: Tapir, 1985.
- [20] Jakob Manns, *Windsimu a program for simulation of turbulence in complex terrain*, 1999.
- [21] B.J., Jonkman. *TurbSim User's Guide: Version 1.50*. National Renewable Energy Laboratory, 2009
- [22] Fedem Technology AS, *Fedem User's Guid*: <http://fedem.no/images/stories/pdf/fedemr5-0-usersguide.pdf> (funnet 18 februar 2012)
- [23] FEDEM Training Course, *Modelling of an offshore wind turbine with jacket support structure*, (2012).
- [24] J., Jonkman, S., Butterfield, W. Musial, and G., Scott. *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*. National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- [25] Denis, Matha. *Model Development and Loads Analysis of an Offshore Wind Turbine on a Tension Leg Platform, with a Comparison to Other Floating Turbine Concepts*. National Renewable Energy Laboratory, 2009.

VEDLEGG

vedlegg A: Beregning av turbulensintensitet

Beregningen er basert på likningene som er gitt og beskrevet i seksjon 3.1.

Turbulensintensiteten beregnes ved å benytte likning 3.1:

$$I = I = \frac{\sigma_{\text{nav}}}{\bar{U}_{\text{nav}}} = \frac{1,14152101}{11,4} = \underline{0,1}$$

⇒ 10 % turbulensintensitet

For offshore standardavviket beregnes ved å benytte likning 3.2:

$$\sigma = \frac{\bar{U}_{\text{nav}}}{\ln\left(\frac{z_{\text{nav}}}{z_0}\right)} + (1,28 \times 1,44 \times I_{15})$$

$$\sigma = \frac{11,44}{\ln\left(\frac{90,55}{0,0001285}\right)} + (1,28 \times 1,44 \times 0,16) = \underline{1,14152101}$$

$I_{15} = 0,16$ (fra tabell 3.3, "A" er valgt som definert for høye turbulens kategorier).

Overflate ruhet z_0 kan defineres å benytte likning 3.3 og ved å bruke implisitt bergning:

$$z_0 = \frac{A_c}{g} \left[\frac{kU_{\text{nav}}}{\ln\left(\frac{z_{\text{nav}}}{z_0}\right)} \right]^2$$

$$z_0 = \frac{0,011}{9,81} \left[\frac{0,4 \times 11,4}{\ln\left(\frac{90,55}{z_0}\right)} \right]^2 = \underline{0,0001285}$$

z_0	z_0
0,0001000	0,00012393
0,0001095	0,00012714
0,0001119	0,00012714
0,00012850	0,00012859
0,0001380	0,0001299
0,0001475	0,0001312
0,0001570	0,0001325
Implisitt bergning for z_0	

vedlegg B: Beregning av grunnleggende last

Vingeroten, normalkraft (figur B.1)

Summen av skjærkraft for vingeroten vil være som følgende:

$$F_V = F \times 3 = \underline{552 \text{ kN}}$$

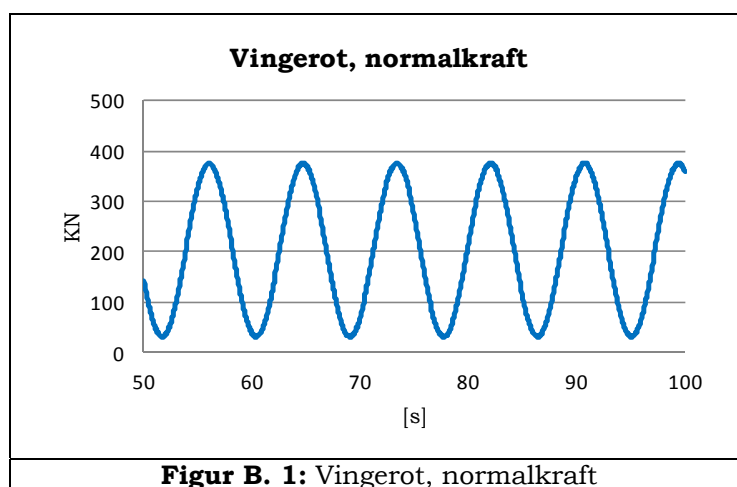
Kraften som holder igjen ved nav:

$$F_{\text{nav}} = m_{\text{nav}} \times g = 56\,780 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = \underline{557 \text{ kN}}$$

Normalkraft for vingeroten vil være som følgende:

$$F_N = (557 - 174) \text{ KN} = \underline{383 \text{ KN}} \text{ ved strekk}$$

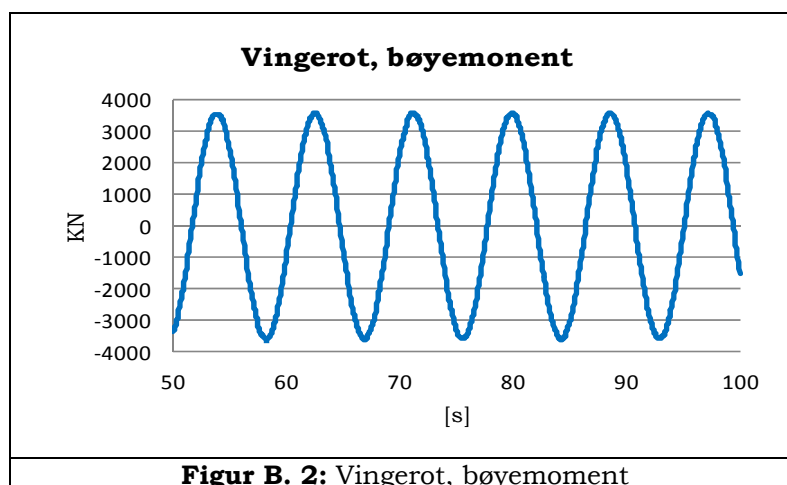
$$F_N = (557 - 552) \text{ KN} = \underline{35 \text{ KN}} \text{ ved trykk}$$



Vingeroten, bøyemoment (figur B.2)

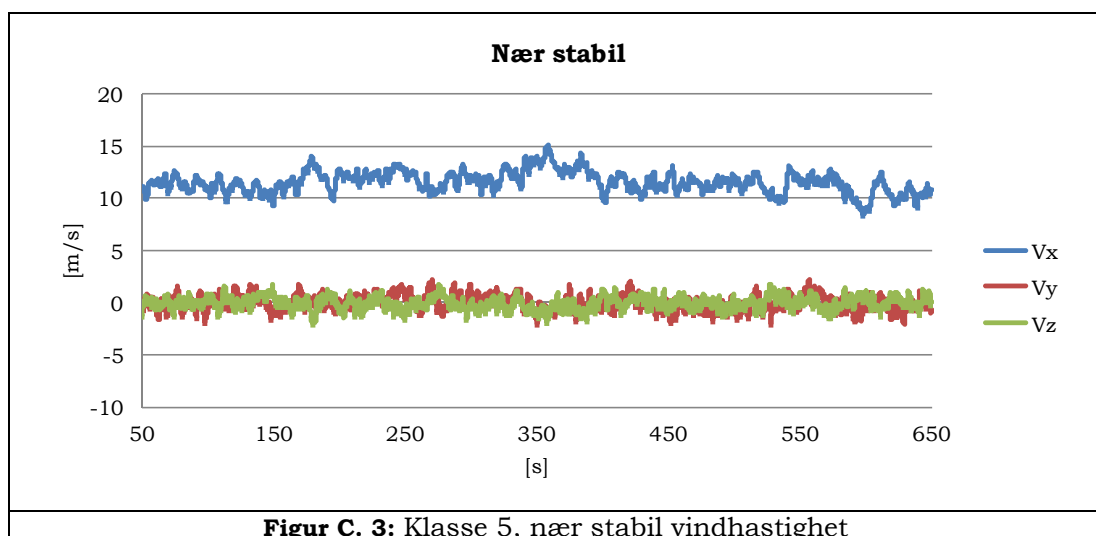
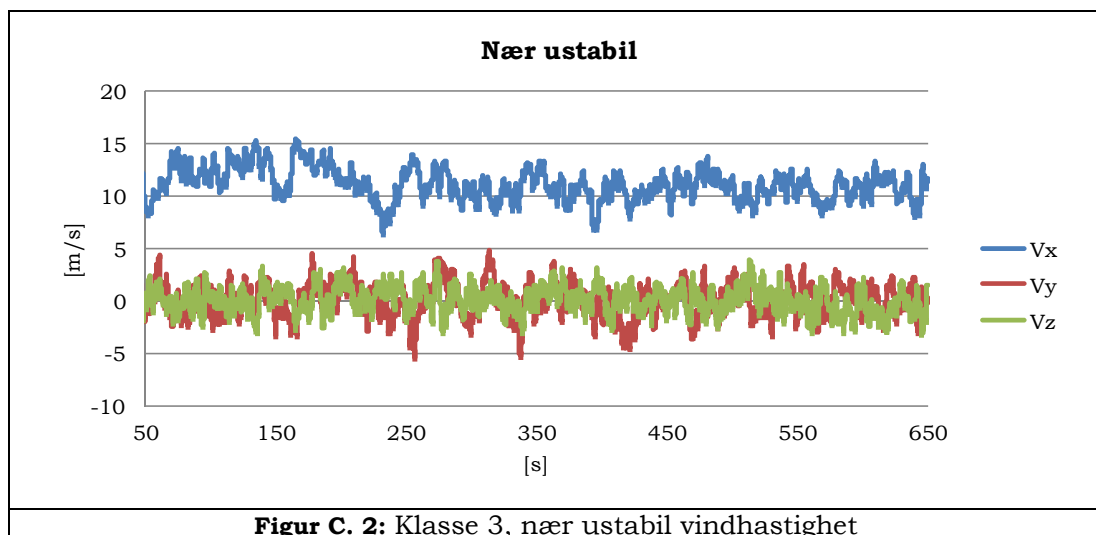
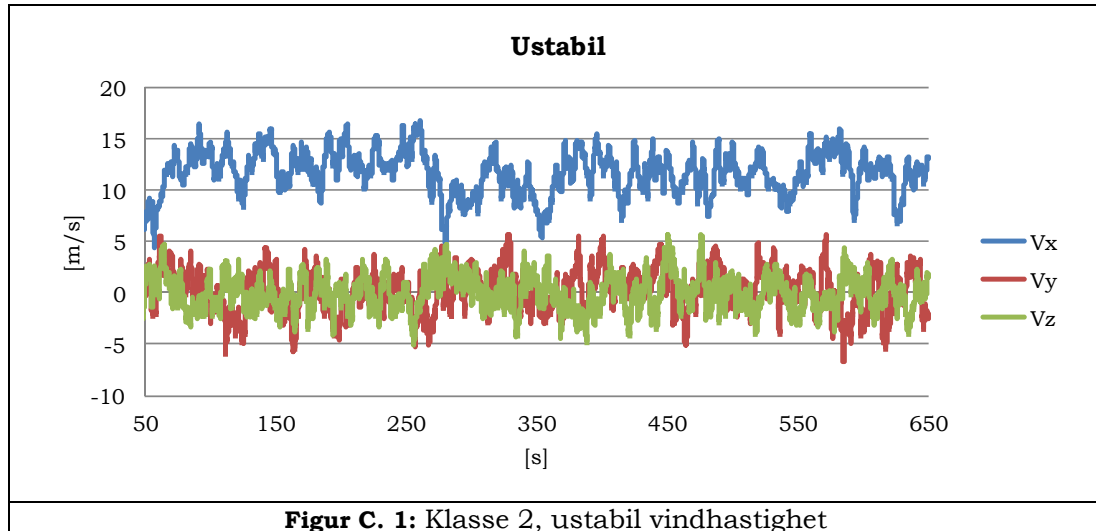
Inn i planet, bøyemoment om x-aksen for vingeroten vil være som følgende:

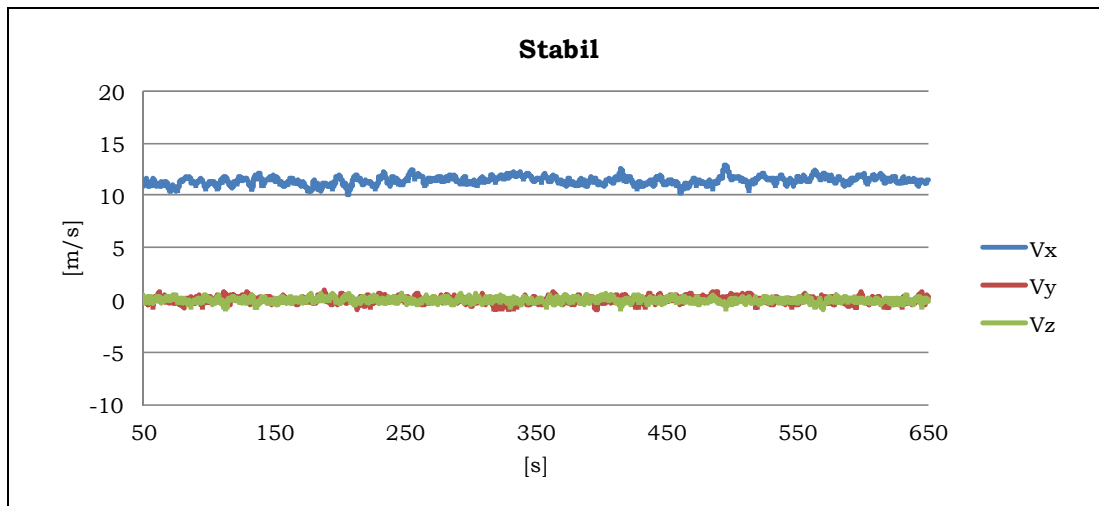
$$\sum M_{\text{vingerot}} = F \times L_{\text{vms}} = \pm (174 \text{ KN} \times 20,475 \text{ m}) = \pm \underline{3563 \text{ kNm}}$$



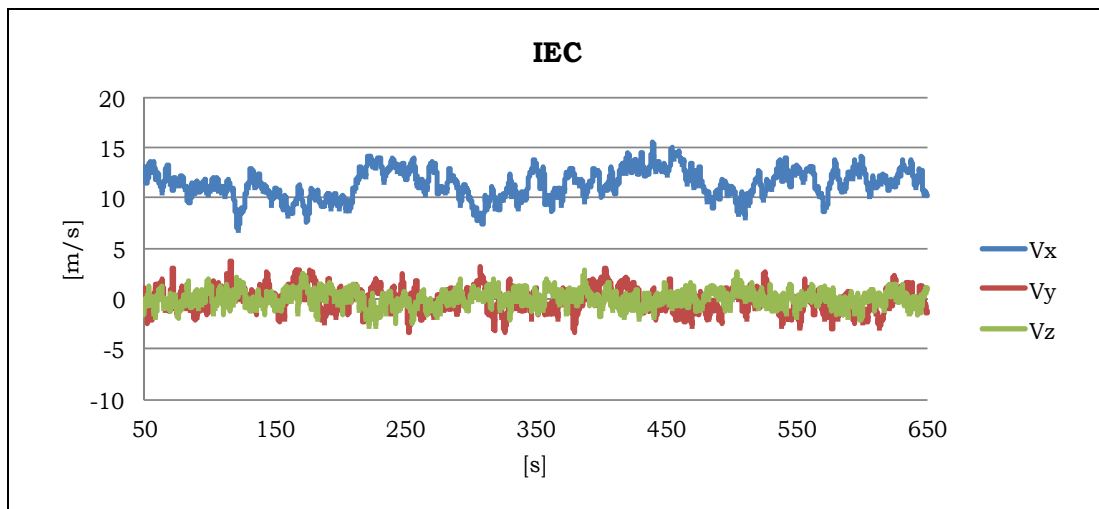
vedlegg C: Resultat av turbulente vindfeltene for alle klassene

Grafene for klassene 1, 4 og 7 presentert i seksjon 7.2, resten av resultat for er følgende:

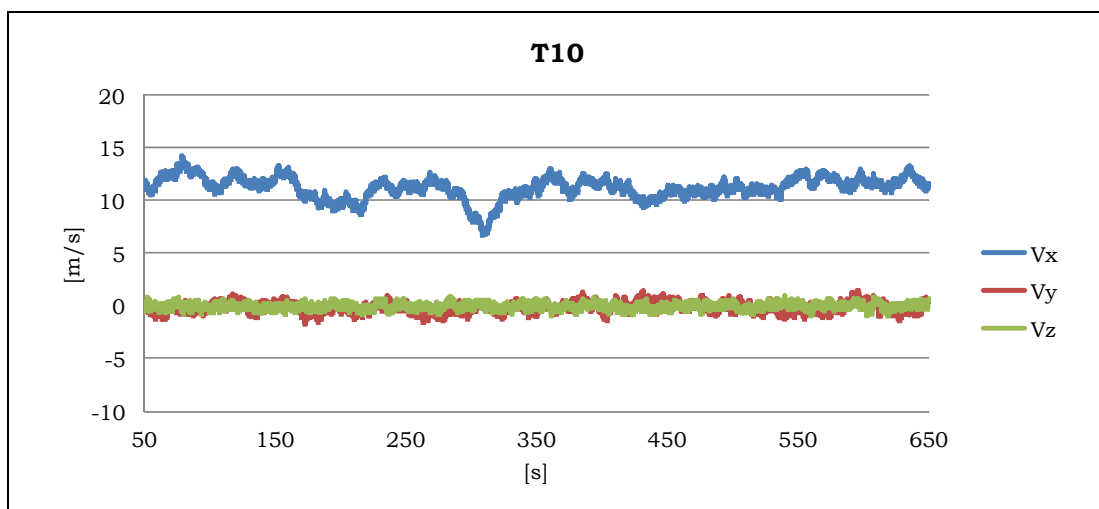




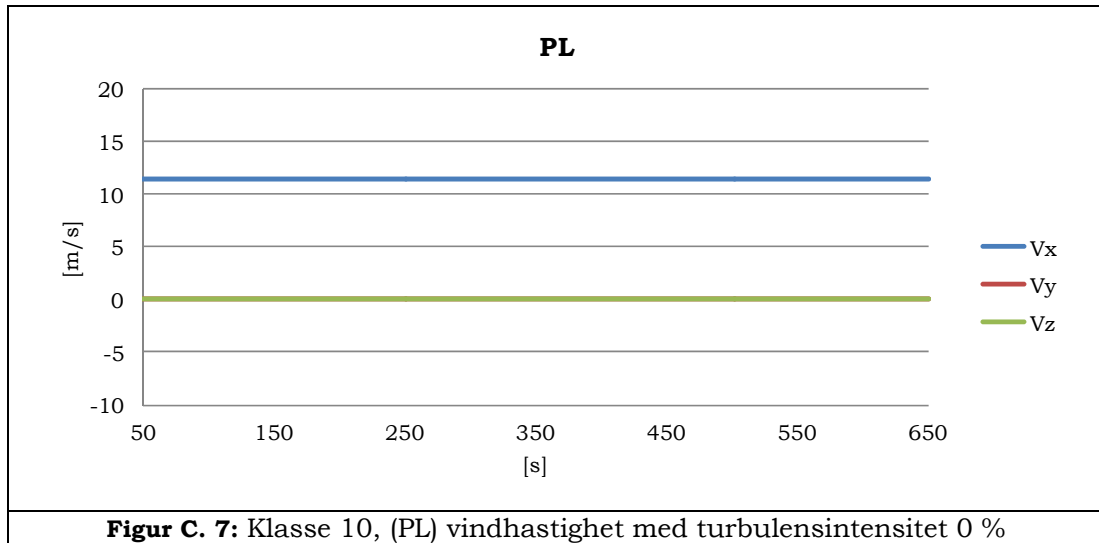
Figur C. 4: Klasse 6, stabil vindhastighet



Figur C. 5: Klasse 8, (IEC) vindhastighet

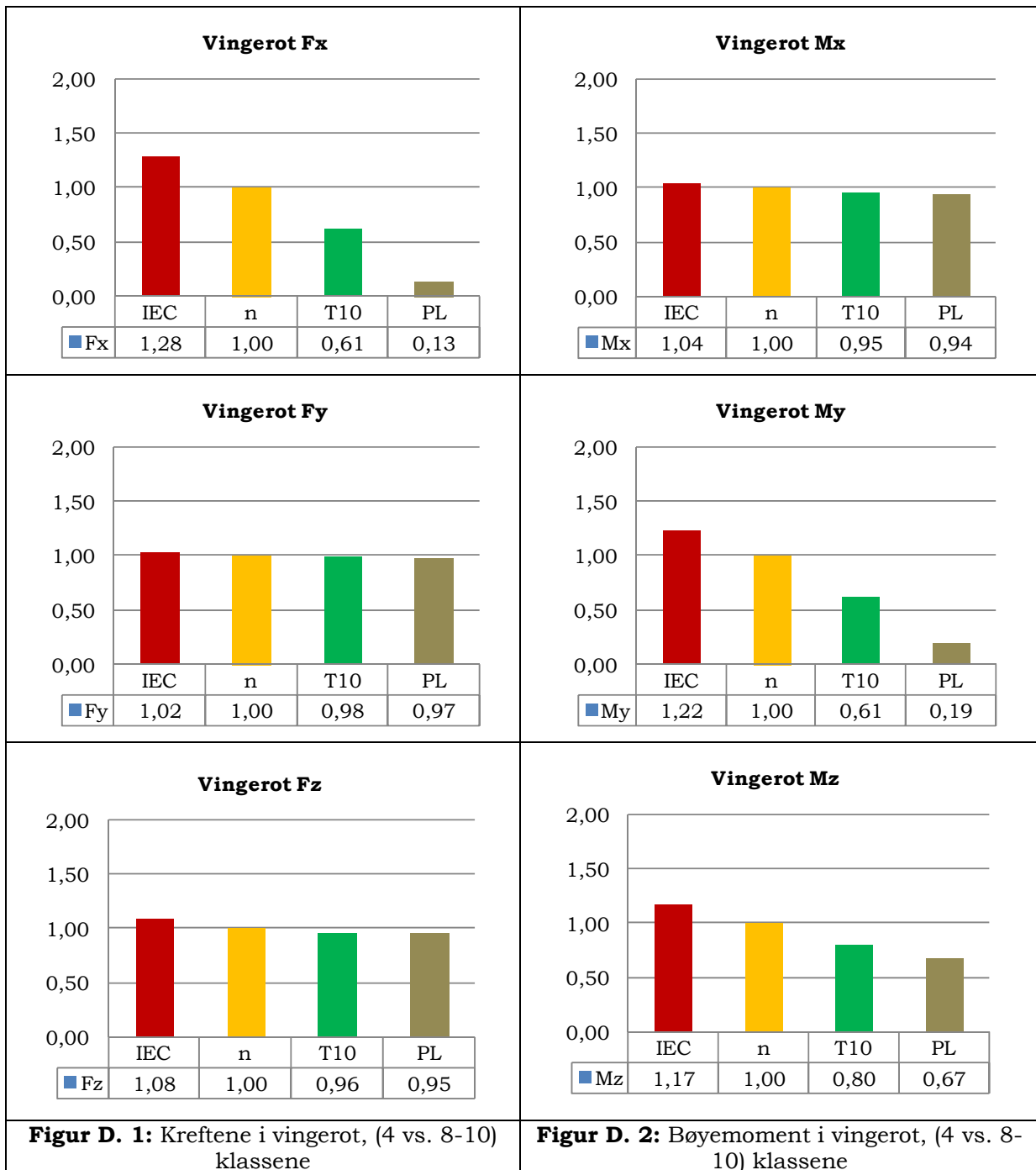


Figur C. 6: Klasse 9, (T10) vindhastighet med turbulensintensitet 10 %

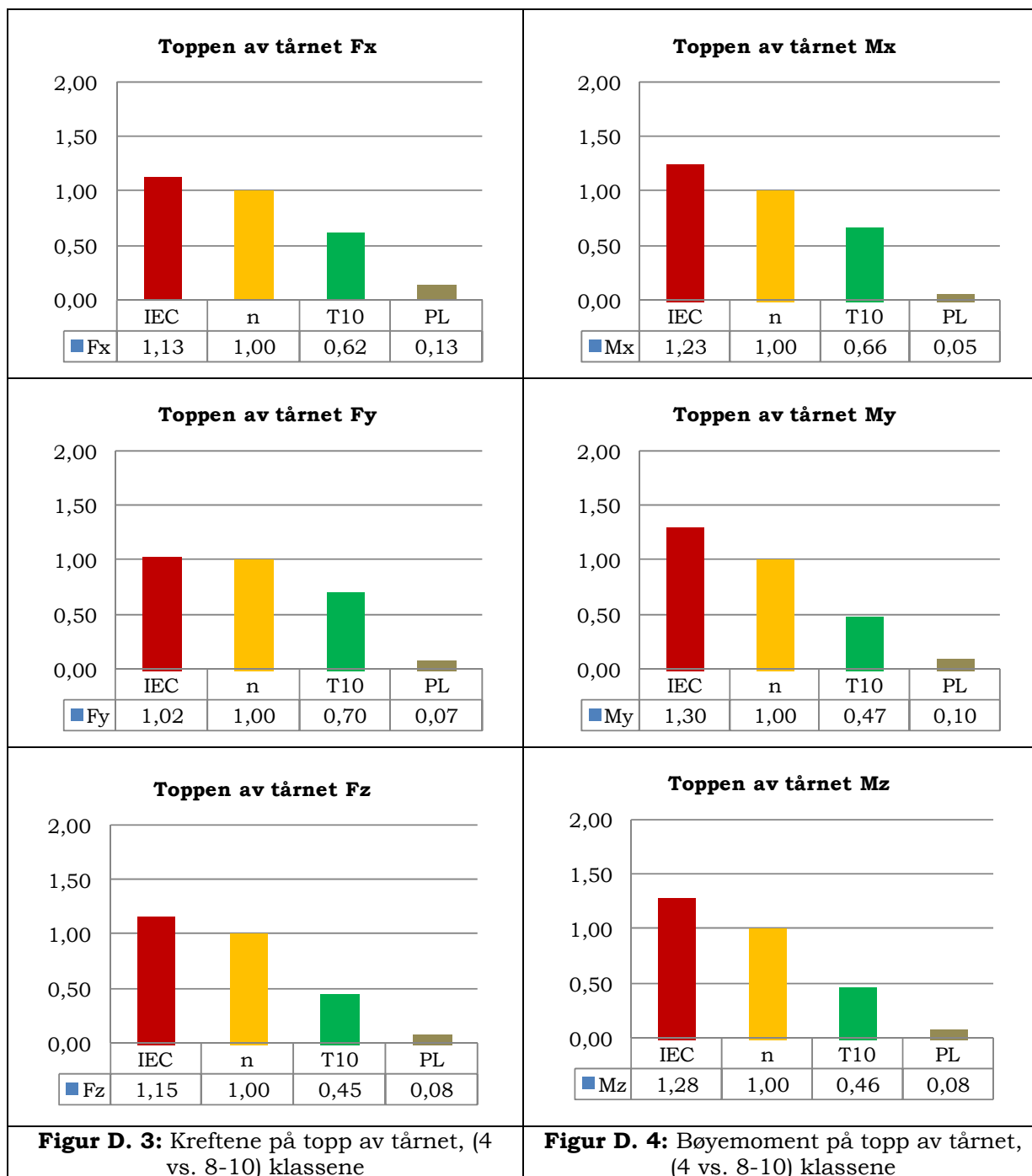


vedlegg D: Skade ekvivalent last (4 vs. 8-10) klassene

Vingerot



Toppen av tårnet



Bunnen av tårnet



vedlegg E: Skade ekvivalent last verdiene

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	228	282	410	6450	9180	288	246	68	79	945	4850	5110	265	78	81	5160	17700	5090
2	236	281	367	6410	9050	350	238	77	83	904	4430	4790	250	93	85	6020	16700	4750
3	240	281	372	6450	9590	364	243	60	79	930	4830	5090	258	67	82	4420	17200	5010
4	243	282	383	6400	9230	462	254	57	79	914	4930	5560	261	63	82	4150	18000	5450
5	248	283	367	6440	9810	273	241	70	85	921	4660	5140	252	78	88	5250	17200	5080
6	219	284	404	6490	8670	237	235	75	75	958	4450	4820	247	81	77	5500	16300	4800
Σ/6	236	282	384	6440	9255	329	243	68	80	929	4692	5085	256	77	82	5083	17183	5030

Tabell E. 1: Klasse 1, verdiene for veldig ustabil skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	161	270	312	5920	6600	184	158	37	54	656	3050	3310	166	38	55	2590	10900	3300
2	172	272	329	6030	6910	153	174	58	63	674	3120	3360	181	68	64	4510	12300	3360
3	171	270	361	5950	6800	222	184	44	54	762	3220	3510	194	52	56	3400	13000	3500
4	172	274	327	6080	6980	187	170	52	58	642	3220	3350	176	60	60	3990	11900	3330
5	174	273	345	5990	7050	183	166	32	55	671	2970	3340	167	37	57	2400	11600	3320
6	174	273	340	6050	7140	187	174	45	52	677	3270	3700	175	49	53	3330	12300	3670
Σ/6	171	272	336	6003	6913	186	171	45	56	680	3142	3428	177	51	57	3370	12000	3413

Tabell E. 2: Klasse 2, verdiene for nær ustabil skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	191	282	330	6350	7510	284	195	47	65	760	4350	4320	212	52	66	3460	13800	4290
2	212	277	384	6170	8480	206	190	57	58	807	3650	4240	211	67	59	4360	13800	4200
3	211	274	383	6120	8120	174	208	51	69	819	3850	4300	219	59	70	3860	14600	4250
4	212	276	326	6130	8340	222	203	61	69	775	4200	4700	209	70	71	4660	14100	4590
5	196	278	375	6160	7690	263	209	68	67	813	3880	4010	219	80	69	5320	14800	4000
6	211	281	355	6320	8260	332	208	78	64	798	3880	4270	224	92	65	6030	14900	4230
Σ/6	206	278	359	6208	8067	247	202	60	65	795	3968	4307	216	70	67	4615	14333	4260

Tabell E. 3: Klasse 3, verdiene for ustabil skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	126	265	288	5700	5090	125	127	26	41	480	2220	2420	126	28	42	1870	8860	2420
2	118	266	285	5710	5040	128	124	35	44	477	2250	2480	121	38	45	2560	8360	2470
3	132	268	286	5810	5540	116	133	36	44	480	2290	2600	129	40	45	2700	9220	2600
4	121	264	283	5670	5050	104	122	31	44	460	2390	2510	121	35	45	2290	8030	2510
5	123	266	291	5720	5000	104	137	40	42	463	2270	2460	137	45	43	3010	9500	2470
6	125	264	294	5640	5140	116	128	29	43	458	2310	2570	128	31	44	2070	8940	2570
Σ/6	124	266	288	5708	5143	116	129	33	43	470	2288	2507	127	36	44	2417	8818	2507

Tabell E. 4: Klasse 4, verdiene for nøytral skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	100	262	281	5580	4150	105	101	25	34	355	1790	1840	103	26	35	1770	7120	1840
2	106	265	284	5650	4180	95	107	24	36	390	1720	1790	103	26	37	1710	7270	1810
3	97	264	283	5590	4170	97	103	25	32	380	1730	1820	104	28	33	1890	7260	1820
4	110	265	282	5610	4380	124	120	28	33	400	1770	1830	117	31	33	2050	8500	1830
5	101	264	285	5610	4050	101	115	28	33	424	1730	1900	117	32	34	2090	8300	1910
6	104	264	280	5640	4280	106	96	22	34	358	1750	1980	99	23	35	1580	6840	1980
Σ/6	103	264	283	5613	4202	105	107	25	34	385	1748	1860	107	28	35	1848	7548	1865

Tabell E. 5: Klasse 5, verdiene for nær stabil skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	59	259	275	5390	2550	89	67	9	19	174	833	891	66	10	19	654	4770	897
2	67	260	276	5400	2850	89	71	9	18	188	843	882	70	10	19	633	5030	895
3	65	261	276	5440	2710	87	69	13	19	203	899	917	67	13	20	900	4920	923
4	66	260	275	5440	2730	91	66	14	19	194	843	931	66	16	20	1060	4750	943
5	72	260	275	5440	2990	87	70	10	20	181	902	864	67	10	21	683	4970	873
6	66	260	277	5420	2850	88	71	14	19	195	872	908	71	16	20	1050	5110	918
Σ/6	66	260	276	5422	2780	88	69	12	19	189	865	899	68	12	20	830	4925	908

Tabell E. 6: Klasse 6, verdiene for stabil skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	51	259	274	5390	2290	82	54	7	13	128	575	619	53	7	13	480	3930	624
2	54	259	275	5370	2330	85	57	6	13	124	588	632	56	7	14	422	4210	637
3	48	259	274	5380	2100	91	53	9	13	142	614	587	53	10	13	619	3870	596
4	48	259	273	5400	2090	84	47	7	12	118	567	596	47	7	13	489	3420	602
5	52	259	274	5380	2350	83	54	8	13	115	570	579	54	9	14	558	4010	586
6	49	259	274	5360	2180	83	54	6	13	119	607	560	55	7	13	437	4010	562
Σ/6	50	259	274	5380	2223	84	53	7	13	124	587	596	53	8	13	501	3908	601

Tabell E. 7: Klasse 7, verdiene for veldig stabil skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	162	271	338	5950	6460	119	149	32	51	622	2840	3150	153	34	52	2280	10300	3130
2	154	269	303	5820	6230	114	145	34	50	556	3010	3140	145	37	51	2430	9610	3130
3	156	272	299	5950	6090	135	141	27	49	553	3030	3140	149	28	50	1880	9700	3120
4	162	272	304	6050	6290	148	147	39	50	592	2810	3270	146	42	51	2830	9990	3240
5	158	271	313	5890	6450	137	146	31	50	582	2950	3200	150	33	51	2220	9890	3180
6	160	269	304	5850	6280	157	143	38	46	575	3160	3400	150	41	48	2710	10000	3360
Σ/6	159	271	310	5918	6300	135	145	33	49	580	2967	3217	149	36	51	2392	9915	3193

Tabell E. 8: Klasse 8, verdiene for IEC skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
1	80	261	278	5450	3230	92	83	22	19	326	1090	1170	84	26	20	1680	6100	1180
2	77	260	275	5430	3290	88	81	20	19	271	1060	1200	84	24	20	1550	5920	1190
3	82	260	275	5400	3320	100	85	18	19	295	1150	1140	87	21	20	1360	6300	1150
4	79	260	276	5430	3230	90	77	24	20	304	1070	1150	78	28	21	1820	5710	1160
5	66	260	275	5430	2730	95	74	25	19	299	1090	1040	75	30	20	1970	5370	1050
6	73	261	277	5450	2970	91	76	28	19	358	994	1160	79	33	20	2180	5540	1170
Σ/6	76	260	276	5432	3128	93	79	23	19	309	1076	1143	81	27	20	1760	5823	1150

Tabell E. 9: Klasse 9, verdiene for (T10) skad ekvivalent last

Nr	Vingerot						Topp av tårnet						Bunn av tårnet					
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
PL	17	258	273	5370	972	78	17	2	3	24	225	211	22	3	4	198	1440	211

Tabell E. 10: Klasse 10, verdiene for (PL) skad ekvivalent last

vedlegg F: Windsimu tekstfilene

Følgende punkter modifiseres/endres og resten holdes uendret i tekst filen:

1. Bin filen

- For hver klasse (1 til 8) benyttes turbulens parameterne verdiene i tabell 3.1 og tabell 3.2 for å simulere turbulente vindfeltene
- Et unikt nummer, dvs. et vilkårlig tall (random seed) benyttes for hver simulering, dett for å unngå dannelse av samme vindfelt

2. HWC filen

I HWC filene legges det inn retning/lokasjon for tilhørende Bin fil for å kunne ta med de definerte parametrene i Bin filen. Følgende punkter modifiseres/endres:

- Verdiene for tredimensjonal vindfelt dvs. verdiene for x, y, og z - retningene (tabell 6.1) for et rektangulært volumfelt
- Definerings av vindturbin egenskapens verdi dvs. nav høyde, kinetisk viskositet og vindtetthet
- **Middelvind profil parameter** (seksjon 2.2)
 - Vindprofilen "Power law" (PL)
 - Vind gjennomsnittshastighet $U = 11,4$ [m/s]
 - Vindskjær eksponenten $\alpha = 0,14$
 - Overflate ruhet z_0

3. IPT filen

I IPT filene Legges det inn retning/lokasjon for tilhørende HWC fil for å kunne ta med i betraktning de definerte parametere i HWC filen. IPT filen vil fungere som vindfelt banen i FEDEM. Etter at tekstfilene for en klasse er modifisert da er den klar til å ta i bruk i FEDEM.

----- **Binfiles** -----

3

3

8192

32

32

8192

160

160

basic

0.1480 **31.30** **2.45** (Turbulens parameter)

-69910 (Random seed)

Nøytral/Nøytral_no1_u.bin

Nøytral/Nøytral_no1_v.bin

Nøytral/Nøytral_no1_w.bin

----- **HWCfiles** -----

Manns turbulence input file; Used for fatigue calculation using the IEC 61400-3

Wind Type -switch for wind file type

----- **Parameters for the HAWC-format binary files** -----

"F:\FEDEM\Turbulens\BINfiles\Nøytral \Nøytral_no1_u.bin"

"F:\FEDEM\Turbulens\BINfiles\Nøytral \Nøytral_no1_v.bin"

"F:\FEDEM\Turbulens\BINfiles\Nøytral \Nøytral_no1_w.bin"

8192 nx- number of points in the x direction (in the 3 files above)

32 ny- number of points in the y direction (in the 3 files above)

32 nz- number of points in the z direction (in the 3 files above)

1 dx

5 dy

5 dz

90.55 RefHt

----- **Mean wind Profile Parameters** -----

PL WindProfileType

11.4 mean u-component

0.14 power law exponent

0.01 z₀

----- **IPTfiles** -----

NREL 5.0 MW offshore baseline aerodynamic input properties; Compatible with AeroDyn v12.58.

SI SysUnits - System of units for used for input and output [must be SI for FAST] (unquoted string)

BEDDOES StallMod - Dynamic stall included [BEDDOES or STEADY] (unquoted string)

USE_CM UseCm - Use aerodynamic pitching moment model? [USE_CM or NO_CM] (unquoted string)

EQUIL InfModel - Inflow model [DYNIN or EQUIL] (unquoted string)

SWIRL IndModel - Induction-factor model [NONE or WAKE or SWIRL] (unquoted string)

0.0002 AToler

PRANDtl TLModel

PRANDtl HLModel

"F:\FEDEM\Turbulens\HWCfiles\Nøytral\Nøytral_no1.hwc"

90.55 HH

0.0 TwrShad

9999.9 ShadHWid

9999.9 T_Shad_Refpt

1.225 AirDens

1.464E-5 KinVisc

0.02479 DTAero

8 NumFoil

"F:/FEDEM/AirFoilData/Cylinder1.dat"

"F:/FEDEM/AirFoilData/Cylinder2.dat"

"F:/FEDEM/AirFoilData/DU40_A17.dat"

"F:/FEDEM/AirFoilData/DU35_A17.dat"

"F:/FEDEM/AirFoilData/DU30_A17.dat"

"F:/FEDEM/AirFoilData/DU25_A17.dat"

"F:/FEDEM/AirFoilData/DU21_A17.dat"

"F:/FEDEM/AirFoilData/NACA64_A17.dat"

17 BldNodes - Number of blade nodes used for analysis (-)

RNodes AeroTwst DRNodes Chord NFOil PrnElm

2.8667 13.308 2.7333 3.542 1 NOPRINT

5.6000 13.308 2.7333 3.854 1 NOPRINT

8.3333 13.308 2.7333 4.167 2 NOPRINT

11.7500 13.308 4.1000 4.557 3 NOPRINT

15.8500 11.480 4.1000 4.652 4 NOPRINT

19.9500 10.162 4.1000 4.458 4 NOPRINT

24.0500 9.011 4.1000 4.249 5 NOPRINT

28.1500 7.795 4.1000 4.007 6 NOPRINT

32.2500 6.544 4.1000 3.748 6 NOPRINT

36.3500 5.361 4.1000 3.502 7 NOPRINT

40.4500 4.188 4.1000 3.256 7 NOPRINT

44.5500 3.125 4.1000 3.010 8 NOPRINT

48.6500 2.319 4.1000 2.764 8 NOPRINT

52.7500 1.526 4.1000 2.518 8 NOPRINT

56.1667 0.863 2.7333 2.313 8 NOPRINT

58.9000 0.370 2.7333 2.086 8 NOPRINT

61.6333 0.106 2.7333 1.419 8 NOPRINT

vedlegg G: Turbsim tekstfilene

Følgende punkter modifiseres/ændres og resten holdes uendret i tekstfilen:

1. Kjørings alternativer

- Legg inn to unik nummer, altså et vilkårlig tall (random seed) for hver simuleringsøkt

2. Turbin / modell spesifikasjoner

- Definer vindfelt simuleringstid 650 [s], dvs. tiden tilsvarer vindfelt lenden som pågår i FEDEM analysen.
- Sekvens trinn 0,025 [s]
- Nav høyde 90,55 [m]

3. Meteorologisk randbetingelser

- Turbulensintensiteten holdes konstant
- Turbulens type; normal turbulens modell Kaimal er valgt i henhold til IEC standarden.
- Vindprofilen "Power law" (PL) og vindhastighet holdes konstant henholdsvis $\alpha = 0,14$ og $U = 11,4$ m/s (seksjon 2.2)
- Referansen høyde ved nav er 90,55 [m]

TurbSim Input File. Valid for TurbSim v1.50, 25-Sep-2009. Input File for Certification Test.

-----**Runtime Options**-----

- 25784** **RandSeed1** - First random seed (-2147483648 to 2147483647)
12138 **RandSeed2** - Second random seed (-2147483648 to 2147483647) for intrinsic pRNG, or an alternative pRNG: "RanLux" or "RNSNLW"
False WrBHHTP - Output hub-height turbulence parameters in GenPro-binary form?
(Generates RootName.bin)
True WrFHHTP - Output hub-height turbulence parameters in formatted form?
(Generates RootName.dat)
False WrADHH - Output hub-height time-series data in AeroDyn form?
(Generates RootName.hh)
True WrADFF - Output full-field time-series data in TurbSim/AeroDyn form?
(Generates RootName.bts)
False WrBLFF - Output full-field time-series data in BLADED/AeroDyn form?
(Generates RootName.wnd)
False WrADTWR - Output tower time-series data? (Generates RootName.twr)
False WrFMTFF - Output full-field time-series data in formatted (readable) form?
(Generates RootName.u, RootName.v, RootName.w)
True WrACT - Output coherent turbulence time steps in AeroDyn form?
(Generates RootName.cts)
True Clockwise - Clockwise rotation looking downwind?
(used only for full-field binary files - not necessary for AeroDyn)
0 ScaleIEC - Scale IEC turbulence models to exact target standard deviation?
[0=no additional scaling; 1=use hub scale uniformly; 2=use individual scales]

-----**Turbine/Model Specifications**-----

- 10 NumGrid_Z - Vertical grid-point matrix dimension
10 NumGrid_Y - Horizontal grid-point matrix dimension
0.025 TimeStep - Time step [seconds]
1050 AnalysisTime - Length of analysis time series [seconds] (program will add time if necessary: AnalysisTime = MAX(AnalysisTime, UsableTime+GridWidth/MeanHHWS))
650.0 UsableTime - Usable length of output time series [seconds] (program will add GridWidth/MeanHHWS seconds)
90.55 HubHt - Hub height [m] (should be > 0.5*GridHeight)
130.00 GridHeight - Grid height [m]
130.00 GridWidth - Grid width [m] (should be >= 2*(RotorRadius+ShaftLength))
0 VFlowAng - Vertical mean flow (uptilt) angle [degrees]
0 HFlowAng - Horizontal mean flow (skew) angle [degrees]

----- **Meteorological Boundary Conditions** -----

"IECKAI" TurbModel - Turbulence model ("IECKAI"=Kaimal, "IECVKM"=von Karman, "GP_LLJ", "NWTCUP", "SMOOTH", "WF_UPW", "WF_07D", "WF_14D", or "NONE")

3 IECstandard - Number of IEC 61400-x standard (x=1,2, or 3 with optional 61400-1 edition number (i.e. "1-Ed2"))

25 IECturbc - IEC turbulence characteristic ("A", "B", "C" or the turbulence intensity in percent) ("KHTEST" option with NWTCUP, not used for other models)

NTM IEC_WindType - IEC turbulence type ("NTM"=normal, "xETM"=extreme turbulence, "xEWM1"=extreme 1-year wind, "xEWM50"=extreme 50-year wind, where x=wind turbine class 1, 2, or 3)

default ETMc - IEC ETM "c" parameter [m/s] (or "default")

PL WindProfileType - Wind profile type ("JET"=Low-level jet, "LOG"=Logarithmic, "PL"=Power law, "IEC"=PL on rotor & LOG elsewhere, or "default")

90.55 RefHt - Height of the reference wind speed [m]

11.4 URef - Mean (total) wind speed at the reference height [m/s]

350 ZJetMax - Jet height [m] (used only for JET wind profile, valid 70-490 m)

0.14 PLExp - Power law exponent (or "default")

default Z0 - Surface roughness length [m] (or "default")

----- **Non-IEC Meteorological Boundary Conditions** -----

default Latitude - Site latitude [degrees] (or "default")

0.05 RICH_NO - Gradient Richardson number

default UStar - Friction or shear velocity [m/s] (or "default")

default ZI - Mixing layer depth [m] (or "default")

default PC_UW - Mean hub u'w' Reynolds stress (or "default" or "none")

default PC_UV - Mean hub u'v' Reynolds stress (or "default" or "none")

default PC_VW - Mean hub v'w' Reynolds stress (or "default" or "none")

default IncDec - u-component coherence parameters (e.g. "10.0 0.3e-3" in quotes) (or "default")

default IncDec2 - v-component coherence parameters (e.g. "10.0 0.3e-3" in quotes) (or "default")

default IncDec3 - w-component coherence parameters (e.g. "10.0 0.3e-3" in quotes) (or "default")

default CohExp - Coherence exponent (or "default")

----- **Coherent Turbulence Scaling Parameters** -----

".\EventData" CTEventPath - Name of the path where event data files are located

LES CTEventFile - Type of event files ("random", "les" or "dns")

true Randomize - Randomize disturbance scale and location? (true/false)

1.0 DistScI - Disturbance scale (ratio of dataset height to rotor disk).

0.5 CTLy - Fractional location of tower centerline from right (looking downwind) to left side of the dataset.

0.5 CTLz - Fractional location of hub height from the bottom of the dataset.

30.0 CTStartTime - Minimum start time for coherent structures in RootName.cts [seconds]

=====
 NOTE: Do not add or remove any lines in this file!
 =====

vedlegg H: Milfe tekstfilene

Følgende punkter modifiseres/ændres, resten holdes uendret i tekstfilen:

1. Klasse beskrivelse

- Klasse navn - Navn for den aktuelle klassen, for eksempel "nøytral"

2. Inndata⁵

- 7 - Rad nummer for node beskrivelser i utdata
- 1008 - Rad nummer for start av analysetiden
- 22 - Antall kolonner for ekstraherte verdiene i utdata
- Kolonne - Node beskrivelse for kolonnene (tabell 6.3)

3. Tid og vindhastighet

- 1 - Kolonnen nummer for tidsanalysen
- 2 - Kolonnen nummer for den primære vindhastighet

4. Utmatting

- 18 - Antall utmattingskolonner (nummer 4 til 22, tabell 6.3)
- true - Bin størrelse for Rainflow sykluser
- BN - Størrelsen på Bin⁶
- true - Utskrive av DEL i resultatene (se vedlegg E)
- Utmatting - Definerer av utmattingskolonnene

5. Input Filene

- 6 - Antall inndata filer for hver klasse

⁵ Inndata for Mlife tilsvarer utdata i FEDEM dvs. "input fil" (seksjon 5.1)

⁶ Bin - representerer oppdeling av syklus rekkevidden

----- **MLife version 1.0 Input File** -----

Binned (+Names, -Chans, -CC, -TSp, +Stats, +SwT, -SwX, -SF, -EE, -Bins, -Bp, -PDF, -PDFp, -PSD, -PSDp, -PSDtxt, -PSDxls, +F, +FBR, +FBM, +DEL, -CF, -FwDELt, +FwDELx, -FwRFt, +FwRFx, +FpBC, -FpPE, -FpCC, -FpRM, +TbDEL, +Multi).

----- **Job Options** -----

false	EchoInp	Echo input to <Rotname>.echo as this file is being read.
false	StrNames	Use channel names following a "\$" instead of numbers when specifying channels in this input file.
false	OutData	Output modified data array after scaling and calculated channels. (currently unavailable)
"%10.2e"	RealFmt	Format for outputting floating-point values.
<u>Nøytral</u>	AggRot	Rot name for aggregate output files.

----- **Input-Data Layout** -----

0	TitleLine	The row with the file title on it (zero if no title is available).
<u>7</u>	NamesLine	The row with the channel names on it (zero if no names are available or are specified below).
0	UnitsLine	The row with the channel units on it (zero if no units are available or are specified below).

1008 FirstDataLine The first row of data.

22 NumChans The number of channels in each input file.

ChanTitle ChanUnits Scale Offset NumCols rows of data follow. Title and units strings must be 10 characters or less.

"Tid"	"s"	1.0	0.0
"VindVx"	"m/s"	1.0	0.0
"VindVy"	"m/s"	1.0	0.0
"VindVz"	"m/s"	1.0	0.0
"RotFx"	"kN"	1.0	0.0
"RotFy"	"kN "	1.0	0.0
"RotFz"	"kN "	1.0	0.0
"RotMx"	"kNm"	1.0	0.0
"RotMy"	"kNm"	1.0	0.0
"RotMz"	"kNm"	1.0	0.0
"ToppFx"	"kN"	1.0	0.0
"ToppFy"	"kN"	1.0	0.0
"ToppFz"	"kN"	1.0	0.0
"ToppMx"	"kNm"	1.0	0.0
"ToppMy"	"kNm"	1.0	0.0
"ToppMz"	"kNm"	1.0	0.0
"BunnFx"	"kN"	1.0	0.0
"BunnFy"	"kN"	1.0	0.0
"BunnFz"	"kN"	1.0	0.0
"BunnMx"	"kNm"	1.0	0.0
"BunnMy"	"kNm"	1.0	0.0
"BunnMz"	"kNm"	1.0	0.0

----- **Calculated Channels** -----

0 NumCChan The number calculated channels to generate.
 1234567890 Seed The integer seed for the random number generator (-2,147,483,648 to 2,147,483,647)
 Col_Title Units Equation Put each field in quotes. Titles and units are limited to 10 characters.
 NumCChan rows of data follow.

----- **Time and Wind Speed** -----

1 TimeChan The channel containing time.
 2 WSChan The primary wind-speed channel (used for mean wind speed and turbulence intensity, 0 for none)

----- **Statistics and Extreme Events** -----

false DoStats Generate statistics of all the channels.
 false WrStatsTxt Write the stats to a text file?
 false WrStatsXLS Write the stats to an Excel file?
 0 NumSFChans Number of channels that will have summary statistics generated for them.
 1 SFChans List of channels that will have summary statistics generated for them. Must number NumSFChans.

----- **Fatigue** -----

18 nFatigueChannels The number of fatigue channels. Next six lines ignored if zero.
 0.0 FiltRatio The fraction of the maximum range of each channel used as a cutoff range for the racetrack filter. Use zero for no filter.
 630720000 DesignLife Number of seconds in the design lifetime (20 years = 630720000 seconds).
true BinCycles Bin the rainflow cycles?
 0.5 UCMult Multiplier for binning unclosed cycles. (0 discards, 1 counts as a full cycle)
true DoSimpDELs Compute short-term (file-based) damage-equivalent loads?
 false DoLife Do lifetime-related calculations?
 10 WeibullMeanWS Weibull-average wind speed.
 2 WeibullShapeFactor Shape parameter for Weibull distribution. 2 = Rayleigh distribution
 3 WSmin Starting value for the wind-speed bins for the Weibull distribution.
BN WSBinFlag BN = number of bins specified or BW = bin width specified
 6 WSBinVal Number of bins or the width of the wind-speed bins for the Weibull distribution.
true WrDELsTxt Write DELs to plain-text files?
 false WrDELsXLS Write DELs to an Excel workbook?
 false WrLifeTxt Write lifetime results to plain-text files?
 false WrLifeXLS Write lifetime results to an Excel workbook?
 10 EquivFreq The frequency of the damage equivalent load (Hz)
true DEL_AsRange true = report DELs as a range value, false = report as a one-sided amplitude

Channel# NSlopes SNslopeLst BinFlag BinWidth/Number TypeLMF LUlt BinWidth not used when BinCycles is false. nFatigueChannels rows of data follow. LUlt >> LMF

5	1	12	BW	5	161	6753
6	1	12	BW	8	33	6753
7	1	12	BW	10	490	6753
8	1	12	BW	189	161	109290
9	1	12	BW	207	33	109290
10	1	12	BW	5	490	109290
11	1	5	BW	12	161	28528
12	1	5	BW	3	33	28528
13	1	5	BW	3	490	28528
14	1	5	BW	45	161	52426
15	1	5	BW	179	33	52426
16	1	5	BW	245	490	52426
17	1	5	BW	12	161	45562
18	1	5	BW	3	33	45562
19	1	5	BW	3	490	45562
20	1	5	BW	212	161	494832
21	1	5	BW	756	33	494832
22	1	5	BW	247	490	494832

1 NumDELGroups Number of DEL groups. DEL tables are organized according to groups.

NChannels ChannelList

18 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

----- **Input Files** -----

6 NumFiles The number of input files to read.

"Nøytral_no1.out"

"Nøytral_no2.out"

"Nøytral_no3.out"

"Nøytral_no4.out"

"Nøytral_no5.out"

"Nøytral_no6.out"

==EOF==

DO NOT REMOVE OR CHANGE. MUST COME JUST AFTER LAST

LINE OF VALID INPUT

vedlegg I: Manns turbulensparameter

Introduction

This paper describes the parameters needed to generate the Manns turbulence parameters as well as the neutral wind profile used. These parameters are used to investigate the effect of turbulence, and we will keep a constant neutral wind profile to ensure that the effects are only due to the turbulence, disregarding the stability effect on the mean wind profile. The neutral wind profile will be modeled with a power law and the exponent is 0.14.

A total of 8 different turbulence situations are to be investigated. The first is evaluating the wind as generated in OC3 and recommended in standards. The seven remaining cases are based on measurements.

Required Manns Turbulence Parameters

Required information to model the Mann spectra to describe the three dimensional spectrum for flat terrain is listed in table 1:

Table 1: Manns Turbulence Parameter

Parameter	Dimension	Description
$\alpha\varepsilon^{2/3}$	m/s	
L	m	Length scale of the spectral velocity tensor
Γ	-	parameter of the sheared spectral tensor

in which α is the three-dimensional Kolmogrov constant ($=1.7$), ε is the dissipation of the turbulent kinetic energy. The length scale, L , is proportional to the size of the turbulent eddies, $\alpha\varepsilon^{2/3}$ is a measure of the energy dissipation and Γ is a measurement of the degree of anisotropy [1]

OC3 Generated Wind

In OC3, two wind cases are generated. These are normalized with the Kaimal spectrum. The fields are simulated using 8192 longitudinal points in a 32x32 cross sectional grid and interpolating into a polar grid with 5 radial points and 32 azimuthal points. The length of the fields correspond to 600 sec.

Table 2: OC3 Manns Turbulence parameters

Wind Speed [m/s]	11.4	18
$\alpha\varepsilon^{2/3}$	0.181	0.33
L	29.4	29.4
Γ	3.9	3.9

L is corresponding to $0.7 - 0.8 \Lambda$ in IEC51400-1 ed3. Γ is corresponding to γ in IEC51400-1 ed3.

Stability Parameters, Hövsöre

z_0 is computed by fitting the observations from the sonic anemometer at 10 m to the wind profile from surface-layer theory.

$$U = \frac{u_{*0}}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \phi_m \right] \quad (1)$$

z_i is the boundary layer height and is estimated from:

$$z_i = C \frac{u_{*0}}{|f_C|} \quad (2)$$

where C is a proportionality constant.

Table 3: Atmospheric stability classes according to intervals of Obukhov length, L_{mo} .

Obukhov length interval (m)	Atmospheric stability class	L_{mo} (m)	u_{*0} (ms^{-1})	z_0 (z_0)	z_i (z_i)	No. of 10 min data
$-100 \leq L \leq -50$	Very unstable (vu)	-74	0.35	0.013	600	397
$-200 \leq L \leq -100$	Unstable (u)	-142	0.41	0.012	600	459
$-500 \leq L \leq -200$	Near unstable (nu)	-314	0.40	0.012	550	292
$\geq L 500$	Neutral (n)	5336	0.39	0.013	488	617
$200 \leq L \leq 500$	Near Stable (ns)	318	0.36	0.012	451	439
$50 \leq L \leq 200$	Stable (s)	104	0.26	0.008	257	1144
$10 \leq L \leq 50$	Very Stable (vs)	28	0.16	0.002	135	704

The anisotropy parameter Γ seems relatively constant with height for neutral and stable conditions, whereas turbulence seems more isotropic for unstable stratifications, at least above the first 40 m (, see figure 1).

Relationship between the length scale, l , of the profile and the friction velocity, u_* is:

$$l = \frac{u_*}{\partial U / \partial z} \quad (3)$$

We use the relation $L_M = 1.702l - 0.006l^2$ to approximate l [1].

Values to be used in the simulations

Turbulence

$z^{2/3}$ is $90.55^{2/3} = 20.16$. u_* is the local friction velocity and is estimated as $\sqrt{-\hat{u}'w'}$ and $\hat{u}'w'$. We have estimated the u_* based on the power law wind

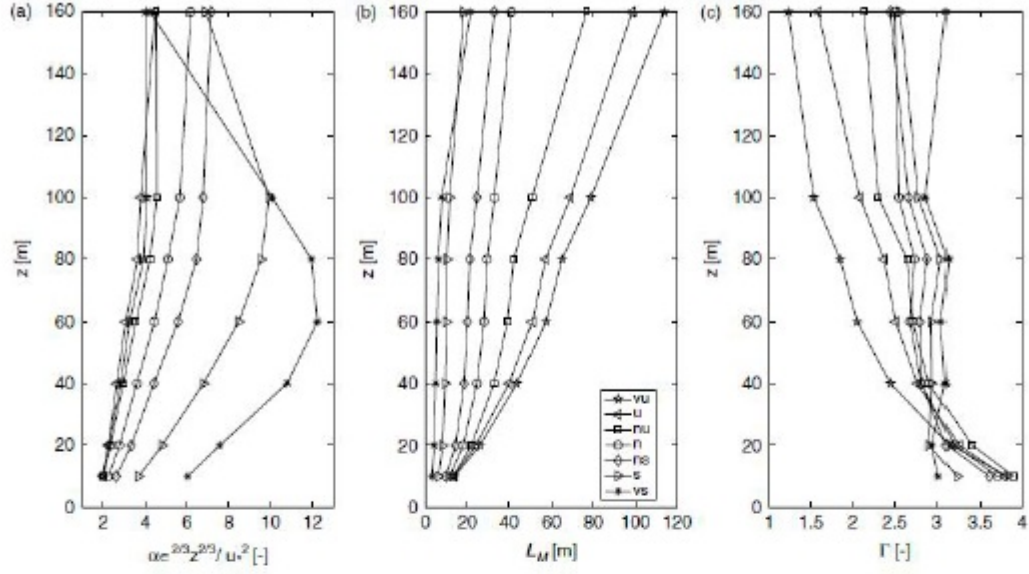


Figure 1: Profiles of (a) energy dissipation, (b) length scale, and (c) degree of anisotropy

speed used in the simulations.

Table 4:

stability classes	$\alpha\epsilon^{2/3}z^{2/3}/u_*^2$ [-]	l	u_* for 11.4 m/s	$\alpha\epsilon^{2/3}$ for 11.4 m/s [m/s]	L	Γ
vu	3.28	52.0	6.59	7.091	72.3	1.02
u	2.93	43.9	5.55	4.502	63.1	1.83
nu	3.7	30.6	3.87	2.759	46.4	2.21
n	4.74	19.8	2.50	1.480	31.3	2.45
ns	6.07	14.2	1.79	0.973	22.9	2.66
s	9.56	6.6	0.84	0.334	11.0	2.87
vs	10.9	4.4	0.56	0.171	7.42	2.98

The Monin-Obhukov length, L_{mo} , and the friction velocity u_* will vary with height. For simplifications, we have assumed L_{mo} constant.

References

- [1] Pena A., Gryning S-E., and Mann J. 2010. On the length-scale of the wind profile. *Q.J.R. Meteorol. Soc* **136**: 2119-2131.