

**REKOMMANDATION FOR
TEKNISK GODKENDELSE AF VINDMØLLER PÅ
HAVET**

DECEMBER 2001

Energistyrelsens godkendelsesordning for vindmøller

Indholdsfortegnelse:

1. INTRODUKTION.....	4
1.1 ANVENDELSE.....	4
1.2 FORUDSÆTNINGER OG NORMHENVISNINGER.....	5
1.3 DEFINITIONER.....	5
2. KLIMAPARAMETRE OG SIKKERHED I RELATION TIL DS 472	6
2.1 TILLÆG TIL DS 472	6
2.2 ÆNDRINGER TIL DS 472 MED TILLÆG.....	6
2.2.1 Årsmiddelvindhastigheder.....	6
2.2.2 Sikkerhedsniveau og integreret sikkerhed.....	6
2.2.3 Partialkoefficienter.....	6
2.2.4 Forenklet formel for turbulensintensitet i parker.....	7
3. LASTER OG LASTTILFÆLDE.....	8
3.1 BEREGNINGSMETODE	8
3.1.1 Omfanget af den dynamiske konstruktion	8
3.1.2 Omfang af simuleringer	8
3.2 LASTER.....	9
3.3 LASTTILFÆLDE	10
3.3.1 Vind.....	10
3.3.2 Bølger.....	10
3.3.3 Strøm.....	13
3.3.4 Vandstand	14
3.3.5 Erosionsforhold.....	15
3.3.6 Is.....	15
3.3.7 Overisning.....	17
3.3.8 Skibsstød	18
3.3.9 Laster under opførelse	19
3.4 SAMTIDIGT VIRKENDE LASTER	19
3.4.1 Baggrund.....	19
3.4.2 Generelt.....	21
3.4.3 Sammenhørende klimatiske forhold	22
3.4.4 "Statisk check"	23
4. FUNDAMENTER	24
4.1 GENERELT	24
4.2 FUNDERINGS- OG SIKKERHEDSKLASSE	24
4.3 GEOTEKNISKE FORUNDERSØGELSER.....	24
4.4 KONTROL OG TILSYN	26
4.4.1 Detailkontrol af bundtopografi	26
4.4.2 Pæleramning	26
4.4.3 Erosion.....	26
5. MATERIALER OG KORROSION	27
5.1 BETONKONSTRUKTIONER OG BESKYTTELSESSYSTEMER.....	27
5.2 STÅLKONSTRUKTIONER OG BESKYTTELSESSYSTEMER	29
6. ANDRE FORHOLD	31
6.1 ARBEJDS-SIKKERHED	31
6.2 LYNREKOMMANDATION.	31
6.3 AFMÆRKNING.....	32
6.4 STØJ	32
6.5 VVM REDEGØRELSE	32
7. BILAG.....	33

Bilag A: Lasttilfælde ifølge DS 472 og den danske godkendelsesordning

Bilag B: Lasttilfælde, med reference til afsnittene (DLC) i IEC 61400-1

Bilag C: Vægtet partialkoefficient og effekt af en mange gange gentagen situation

Bilag D: IEC Klasse S beskrivelse

Bilag E: Illustrationer af bølger på lavt vand

Bilag F: Særlige forhold ved specifikke funderingskoncepter

1. INTRODUKTION

Rekommandationen er et bilag til "Teknisk grundlag for typegodkendelse og certificering af vindmøller i Danmark", og indeholder anvisninger og supplerende oplysninger om godkendelseskrav for vindmøller, der opstilles på havet.

Rekommandationen er udarbejdet af en arbejdsgruppe, der blev nedsat i december 1999 af Energistyrelsens "Rådgivende udvalg for vindmøllegodkendelsen i Danmark". Arbejdsgruppen har afdækket behov for detaljerede forskrifter i godkendelses-sammenhæng og efterfølgende udarbejdet nærværende rekommandation. Nærværende udgave erstatter tidligere udgave pr. juni 2001.

Tekst med lille skrifttype skal læses som vejledende. Bilag er vejledende.

Rekommandationen er i vid udstrækning baseret på resultater fra forskningsprojektet: "Designgrundlag for vindmølleparker på havet", EFP-1363/99-0007, som projektle-delsen velvilligt har stillet til rådighed.

Arbejdsgruppens medlemmer:

Sten Frandsen, Risø
Helge Gravesen, Carl Bro A/S
Lars Jørgensen, SEAS
Christer Eriksson, DNV
Kaj Morbech Halling, Vestas R&D
Poul Skjærbæk, Bonus Energy A/S
Uffe Jørgensen, Elsamprojekt A/S
Nils E. Werner, Forsikring og Pension, Codan
Jørgen Lemming, Energistyrelsen
Egon T.D. Bjerregaard, Risø (sekretær)

1.1 Anvendelse

Der er i rekommandationen tilstræbt en detaljeringsgrad, der for vindmøller på havet er tilstrækkelig for

- design og detailprojektering af fundamenter
- design/tilpasning af vindmøller

I et vist omfang er også behandlet følgende emner:

- adgangs- og arbejdsforhold under bygning og drift
- materialer og korrosion

1.2 Forudsætninger og normhenvisninger

Ved design af vindmøller til opstilling og drift på havet skal sikkerhedsniveauet svare til det niveau, som den danske vindmølle industri hidtil har opnået ved opstilling og drift af vindmøller på landjorden i Danmark. Dette opnås ved brug af det i det følgende specificerede normgrundlag.

Opstilling og nettilslutning af vindmøller i Danmark på land og i danske farvande kræver, at vindmøllerne har en dansk typegodkendelse. Denne typegodkendelse er baseret på:

- *Teknisk grundlag for typegodkendelse og certificering af vindmøller i Danmark (TG) suppleret med nærværende og andre gældende rekommandationer under TG*
- *DS 472, Last og sikkerhed for vindmøller*
- *Øvrige danske og udenlandske standarder og normer som listet i TG*

For bølgelaster refereres generelt til

- DS 449 "Pælefunderede offshore konstruktioner"

DS 449 er ikke opdateret sammen med de øvrige danske normer, men vejledende materiale heri kan stadig anvendes. Partialkoefficienter i DS 449 kan ikke anvendes i sammenhæng med de nye konstruktionsnormer.

For islaster refereres generelt til

- API Recommended practice 2N, 2nd ed (1995) "Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for arctic conditions".

Partialkoefficienter m.m. i DS 472 er ikke revideret sammen med de danske konstruktionsnormer (DS 409, 2.udg.: 1998, DS 410, 4.udg.: 1998, DS 411, 4.udg.:1999, DS 412, 3.udg.:1998, DS 413:1998, 5. Udg., DS 414, 5.udg.:1998, DS 415, 4.udg.:1998), hvorfor der er udarbejdet et tillæg til DS 472.

Ønskes andre normer eller metoder anvendt, skal der redegøres for, hvordan det samme sikkerhedsniveau, som er specificeret i de ovenfor nævnte danske normer, er opnået.

Det antages at der normalt i forbindelse med valg af placering eller VVM-redegørelsen er udarbejdet en risikovurdering indeholdende bl.a. kvantificering af risiko for skibsstød fra tredje parts skibe differentieret på skibstyper og tilhørende forventede skibsstøds-energier.

1.3 Definitioner

Se DS 472.

Dog, v_b og $v_{b,0}$, se DS 410, 4.udg, 1998.

V_{eN} , (kun i bilag D), se IEC 61400-1, 2nd edition.

2. KLIMAPARAMETRE OG SIKKERHED I RELATION TIL DS 472

2.1 Tillæg til DS 472

Der henvises til tillæg til DS 472, udgivet af Dansk Standard i 2001. (Tillægget kan indtil videre ses på www.vindmoellegodkendelse.dk).

2.2 Ændringer til DS 472 med tillæg

Dette afsnit indeholder ændringer, som vil være gældende for offshore forhold.

2.2.1 Årsmiddelvindhastigheder

Vindforhold:	Parameter
Årsmiddelvindhastighed De angivne årsmiddelvindhastigheder kan kun anvendes til strukturelle beregninger.	50 m højde. Extrapoleres efter DS 472 med $z_0 = 0,001$ m. Nordsøen: 10,0 m/s De indre danske farvande: 8,5 m/s <i>Eller beregning efter relevant dokumentation</i>

2.2.2 Sikkerhedsniveau og integreret sikkerhed

Strukturel sikkerhed: Der tilsigtes design til det sikkerhedsniveau, der er normalt for møller på land i Danmark, idet møllerne skal designes efter gældende danske normer.

2.2.3 Partialkoefficienter

Lasttilstandene defineres, og lastkombinationer samt beregningsforudsætninger gennemgås i afsnit 6.2, DS 472.

For tyngdelaster regnes i overensstemmelse med hidtil praksis og svarende til DS 415 med partialkoefficient $\gamma = 1,0$ for såvel tyngden af konstruktionsdele som tyngden af jord og grundvand, idet disse ansættes forsigtigt (eller dokumenteres ved målinger). Dette gælder alle lasttilfælde. For fyld i lukkede rum bør egenvægten ansættes (ekstra) forsigtigt og ved fyld i åbne rum, evt. beskyttet af erosionsbeskyttelse, bør egenvægten ansættes særdeles forsigtigt. Ved en accepteret skade på erosionsbeskyttelse bør egenvægten af erosionsbeskyttelsen reduceres kraftigt.

Naturlaster behandles i sammenhæng med luftlaster. For andre naturlaster end vindlast kan partialkoefficienten bestemmes af de aktuelle variationskoefficienter på årsextremet, se bilag 3.4.3.

2.2.4 Forenklet formel for turbulensintensitet i parker

Hvis afstanden til nærmeste nabomølle er mindst 5 rotordiametre, kan der anvendes følgende forenklete formel for turbulensintensiteten i parken:

$$I_T = \sqrt{0,15^2 + I_0^2},$$

Hvor I_0 er turbulensen i den fri strømning.

3. LASTER OG LASTTILFÆLDE

3.1 Beregningsmetode

3.1.1 Omfanget af den dynamiske konstruktion

Generelt:

"Vindmøllesystemet" omfatter rotor, nacelle, tårn, mekanisk og elektrisk transmission, styre- og sikkerhedssystemer samt fundament plus underliggende/omgivende jord. Afhængigt af systemets stivhed kan vælges mellem følgende metoder for strukturelle beregninger.

Metode 1

Medmindre det kan vises, at fundamentetskonstruktionen plus underliggende/omgivende jord er "tilstrækkelig" stiv¹, skal vindmøllesystemet (defineret ovenfor) betragtes som en helhed og de strukturelle beregninger foretages for dette som en helhed.

Metode 2

Er fundamentetskonstruktionen plus underliggende/omgivende jord "tilstrækkelig" stiv¹, og er der en veldefineret skilleflade mellem mølletårn og fundament, da kan de strukturelle beregninger skilles i 1) en beregning af konstruktionen fra skillefladen og opfter, og 2) en beregning af konstruktionen fra skillefladen og nedefter.

Dersom der er behov for separate godkendelser (og dermed beregninger) af vindmølle og fundament, er det nødvendigt at definere en skilleflade mellem tårn og fundament. Skillefladen kan defineres i et niveau, således at en del af tårnet henregnes som hørende til fundamentkonstruktionen. Det er et krav, at skillefladen defineres i et niveau, der ligger over højeste vandlinies niveau. Højeste vandlinies niveau skal for dette formål beregnes som 50-års-stormflodsvandstand plus maksimum bølgetop i tilhørende 3-timers søtilstand plus 1 meter for at tage højde for diverse usikkerheder.

Ved separate godkendelser af vindmølle og fundament påhviler det vindmølleproducenten i et separat dokument at dokumentere resulterende karakteristiske snitkræfter, der overføres fra vindmøllen til fundamentet i skillefladen.

På samme måde påhviler det fundamentsleverandøren i et separat dokument at dokumentere ækvivalente fundamentsstivheder og dæmpningsforhold for alle relevante lastkombinationer for anvendelse i skillefladen ved lastberegninger for vindmøllen.

3.1.2 Omfang af simuleringer

Ved beregning af belastninger vha. simulering er det kendt, at resultatet er afhængigt af de "seeds", som regneprocessen initieres med. Derfor skal simuleringen gentages med varierende seeds.

¹ Med "tilstrækkelig stiv" menes at fundamentet er så stift, at det dets dynamik under belastning har ingen eller ubetydelig indvirkning på møllens dynamik. Anvendes metode 2 skal dette dokumenteres.

Anvendes tidssimulering til bestemmelse af ekstrem- og/eller udmattelseslaster, hvor simuleringsperioden er 10 min, bør antallet af simuleringer med forskellige seeds mindst være fem per lasttilfælde. Anvendes længere eller kortere simuleringsperioder skal antallet af simuleringer tilpasses hertil.

Man skal dog være opmærksom på, at flere simuleringer kan være nødvendige, når ikke kun middelværdien af ekstremer skal bruges. Dette er for eksempel tilfældet når ekstremer søges for møllen i drift, hvor resultatet af f.eks. 10-min-simuleringer skal ekstrapoleres til længere perioder.

For udmattelsesberegninger kan der anvendes 1 seed pr. lastinterval, forudsat at der skiftes seed imellem lastintervallerne, og forudsat at ca. 5 lastintervaller har lige stor vægt på resultatet. Se tillige bilag C5.

Når tidssimulering anvendes til bestemmelse af ekstremlast er det karakteristiske respons defineret som middelværdien af ekstremerne i de forskellige tidsserier.

3.2 Laster

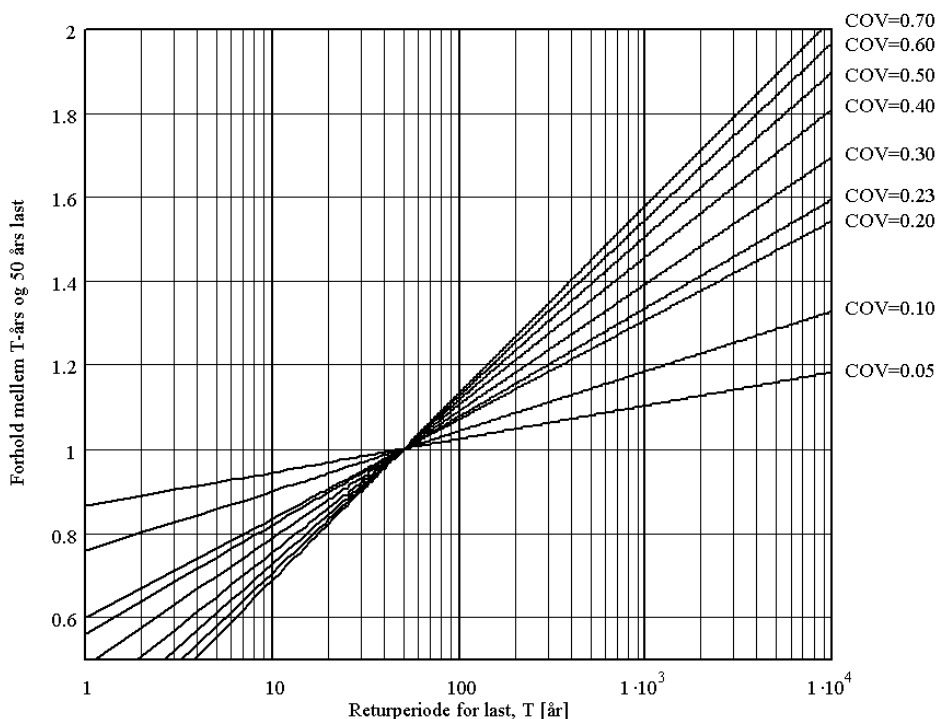
Karakteristiske værdier defineres som 98% fraktilen af årseksremværdifordelingen for lasten. Dette svarer til lasten med 50 års returperiode.

I visse designberegninger skal laster med andre returperioder anvendes. Hvis belastningerne, der svarer til disse returperioder, ikke er defineret, kan værdier i nedenstående tabel benyttes, idet ekstremlastfordelingen er antaget at svare til en Gumbelfordeling. T-års lasten er stærkt afhængig af lastens variationskoefficient (COV), der således skal estimeres. I DS 410 er antaget en $COV=0,23$ på ekstrem vindlast for $T < 50$ år og en $COV = 0,40$ for $T > 50$ år.

COV T [år]	0.05	0.10	0.15	0.20	0.23	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60	0.70
1	0.865	0.758	0.671	0.599	0.561	0.538	0.486	0.441	0.402	0.368	0.337	0.285	0.243
5	0.921	0.858	0.806	0.764	0.742	0.728	0.697	0.671	0.648	0.628	0.610	0.579	0.554
10	0.945	0.900	0.865	0.835	0.819	0.810	0.789	0.770	0.754	0.740	0.727	0.706	0.689
20	0.968	0.943	0.923	0.906	0.897	0.892	0.880	0.869	0.860	0.852	0.845	0.833	0.823
25	0.976	0.957	0.942	0.929	0.922	0.918	0.909	0.901	0.894	0.888	0.883	0.873	0.866
50	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
100	1.024	1.043	1.058	1.071	1.078	1.082	1.091	1.099	1.106	1.112	1.118	1.127	1.134
200	1.048	1.086	1.117	1.142	1.156	1.164	1.182	1.198	1.212	1.224	1.235	1.253	1.268
500	1.079	1.143	1.194	1.236	1.258	1.272	1.303	1.329	1.352	1.372	1.390	1.421	1.446
1000	1.103	1.185	1.252	1.307	1.336	1.354	1.394	1.428	1.458	1.484	1.508	1.547	1.580
10000	1.183	1.328	1.446	1.544	1.595	1.626	1.696	1.757	1.810	1.857	1.898	1.968	2.025

Tabel 1: Forhold mellem T-årslast og 50-årslast ved forskellige variationskoefficienter af årseksremlastfordelingen (for $p=\exp[-1/T]$).

Relationen mellem T-årslasten og 50-årslasten er vist grafisk i Figur 1.



Figur 1: Forhold mellem T-årslast og 50-årslast (for $p=\exp[-1/T]$).

3.3 Lasttilfælde

3.3.1 Vind

Bilag A indeholder lasttilfælde svarende til de tilfælde, der som minimum skal vurderes ved en dansk godkendelse. Udover disse lasttilfælde skal det undersøges, om der for den aktuelle møllekonstruktion findes andre, værre tilfælde. Sådanne skal i så fald også defineres og gennemregnes.

Bilag B indeholder lasttilfælde, der referer til IEC 61400-1. Disse er ikke aktuelle og behøver ikke at gennemregnes for en dansk godkendelse. Men man kan blive præsenteret for krav om gennemregning af lasttilfældene i bilag B ved certificering i andre lande.

3.3.2 Bølger

Belastninger fastlægges efter principper beskrevet i DS 449, der gælder for dybere vand. På lave vanddybder, hvor de fleste havmøller placeres, får følgende forhold væsentlig betydning:

- endelige bølgehøjder
- bølgetoppe er væsentlig højere end bølgedale (op til ca. 3 x bølgedal i stedet for af samme størrelsesorden som bølgedale)
- bølgetoppen optræder kun ned til 1/3 af bølgelængden (i stedet for ca. halvdelen af bølgelængden)
- hastighederne i brydende bølger bliver væsentligt større i specielt bølgetop (størrelsesorden $u_{\max} = \sqrt{gh}$, hvor h = vanddybden)

- bølgeprofilen bliver asymmetrisk på langs ved at stejlehed af bølgeprofilen er større op mod bølgetop end efter bølgetop
- bølgehøjdefordelingen ændres (fra den normalt antagne Rayleigh-fordeling)

Der vises illustrerende figurer i Bilag E.

Disse forhold gør, at der må anvendes specielle metoder omfattende effekter af begrænset vanddybde (inkl. refraction og brydning) og diffraktion til både at fastlægge bølgeforholdene og laster fra bølgerne.

Til dimensionering af konstruktionen for bølgekræfter skal der undersøges dels for ekstremhændelser og dels for udmattelse af konstruktionen. Ved styrtbrydende bølger skal lokalstabilitet undersøges separat.

3.3.2.1 Designbølgetilstanden

Ekstremhændelsen, der skal dimensioneres for, er karakteriseret ved designbølgehøjden $H_{sd} = H_{s,XX}$ dvs. den signifikante bølgehøjde, der har en returperiode på XX år.

Den tilhørende maksimale bølge og sandsynlige bølgeperiodeinterval bestemmes

Bølgebrydning

Dimensionering skal foretages med hensyntagen til brudte eller brydende bølger. Ved dybdebegrænsede bølger skal der dimensioneres med den dertil hørende maksimale vandstand.

Topbrydning

Enkeltbølger kan simuleres efter strømfunktionsteorien eller Stokes 5'ordensteori, jvf. /4/. Tidsserier for bølger på begrænset vanddybde (men uden styrtbrydning) i form af bølgeelevationer og hastigheder kan simuleres jvf. /5/. For den maksimale partikelhastighed i en topbrydende bølge gælder $u_{\max} \leq 1,0 \cdot \sqrt{gh}$

Styrtbrydning

Særlige forhold for konstruktioner under bølgers styrtbrydning skal undersøges. Grænserne for styrtbrydning fastlægges jf. /2/ via forholdet ξ mellem bundhældningen $\tan\beta$ og kvadratroden af bølgestejlheden. Bølgestejlheden beregnes fra dybvandsbølgehøjden H_0 eller bølgehøjden ved brydning H_b :

$$\xi_0 = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}}$$

$$\xi_b = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_b/L_0}}$$

Styrtbrydning skal tages i regning dersom enten ξ_0 eller ξ_b er i følgende intervaller

$$0,5 < \xi_0 < 3,3$$

$$0,4 < \xi_b < 2,0$$

Der skal tages hensyn til, at bølgetop for brydende bølger er væsentlig højere end bølgedal. Den maksimale partikelhastighed i den brydende bølge er $u_{max} = 1,25 \cdot \sqrt{gh}$ (jf. /3/), og der skal benyttes som hastigheden i et ensformigt hastighedsprofil for hele bølgen over stillevandspejl. Under stillevandspejl benyttes hastighedsprofil jf. konventionel bølgeteori. Hvis konstruktionen er væsentlig større under vandspejlet end over vandspejlet, kan dette medføre styrtbrydning, og effekten heraf må kvantificeres.

Simulering

Vedrørende simulering af uregelmæssige bølger henvises til referencerne i 3.3.2.4 og til bilag til "Designgrundlag for vindmølleparker på havet", EFP-1363/99-0007.

3.3.2.2 Bølgekræfter

Der skal dimensioneres for bølgekræfter beskrevet ved:

- Inertikræfter F_i : Funktion af accelerationerne du/dt af vandmassen omkring vindmøllefundamentet
- Strømkrafter F_d : Funktion af strømhastigheden u (den kombinerede bølge- og strømhastighed)
- Trykkrafter F_t : Funktion af vandspejlselevationen

Trykkrafter (integreret over arealet) er identisk med inertikrafter (acceleration integreret over volumet). Hvis konstruktionens effektive volumen i vandet er stor, i forhold til over hvilken længde der er tilnærmelsesvis konstant acceleration i bølger, må der tages hensyn til dette ved at medregne de endelige trykforskelle. Der må ved trykkraft/inertikraft dominerede konstruktioner medregnes effekt fra de endelige bølgehøjder. Ved beregning med kombineret bølger og strøm adderes den stationære strøm vektorielt til bølgeorbitalhastigheden.

På begrænset vanddybde skal sammenhængen imellem vandstand og bølgeforhold nøje vurderes. På begrænset vanddybde skal der desuden til beregning af lokalstabilitet adderes chok-kræfter fra styrtbrydende bølger, hvis dette lasttilfælde er aktuelt.

Lastfastsættelsen skal ske ved metoder, der resulterer i den påkrævede sikkerhed. Jo mere bølge- og strømlasterne betyder i forhold til vindlasterne, jo mere nøjagtige og pålidelige metoder må der anvendes. Forenkede metoder til lastfastsættelse er givet i /6/. Konstruktionens udformning og størrelse i forhold til bølgelængden er afgørende for om der må lægges vægt på at hhv. trykgradienterne eller hastighederne i bølgeprofilen og om bølge- og strømkrafterne kan beregnes på basis af en bølge- og strømsimulering.

For konstruktioner hvor bølge- og strømlasterne er væsentlige, må lastfastsættelse, såfremt de numeriske metoder ikke er fuldt pålidelige, ske på basis af modelforsøg. Der kan alternativt anvendes forsigtige skøn for bølge- og strømlasterne.

Regulær bølgekraft

Jf. DS 449 skal påvirkninger på fundamenter med en diameter større end 0,2 bølgelængde L beregnes via diffraktionsteori. På grund af de ændrede stejlehedsforhold ved

begrænset vanddybde skal der tages hensyn til diffraktionseffekter for fundamenter med tilsvarende mindre diameter (ned til 0,13 bølgelængde på lavt vand i stedet for ned til 0,2 bølgelængde på dybere vand). Se i øvrigt /4/. For fundamenter med en diameter på mindre end 0,13 bølgelængde kan Morrisons formel anvendes til fastsættelse af laster. Der skal dog medtages effekt af endelige bølgehøjder med mindre det kan påvises, at denne effekt er ubetydelig.

Ved store bølgelængder i forhold til fundamentets karakteristiske dimensioner kan der optræde hvirvelafløsning, som må medtages i lastgrundlaget.

3.3.2.3 Bølgechok-kraft

Bølgechok-tryk kan forekomme også uden styrtbrydning. Der dimensioneres jf. DS 449 idet bølgechok-kraften regnes som en trekantformet impuls opvoksende fra 0 til maksimum værdien på 0,01 sek. og derefter aftagende fra maksimum værdien til 0 i løbet af 0,1 sek.

3.3.2.4 Referencer

- /1/ DS 449 Pælefunderede Offshore Stålkonstruktioner
- /2/ Fredsø & Deigaard, 1992 'Mechanics of Coastal Sediment Transport', World Scientific
- /3/ Svendsen, I.A., 1979 Bølgebrydning, ISVA, DTU.
- /4/ Svendsen, I.A. og Justesen, P., 1984 "Forces on slender cylinders from very high waves and spilling breakers", Symp. Description and Modelling of Directional Seas, DHI, DTU
- /5/ Madsen, P., Bingham, H. and Liu, H., 2000 "The ultimate Boussinesq formulation for highly dispersive and highly nonlinear water waves, ICCE 2000, Sydney, Australia.
- /6/ Lundgren, H. 1972 "Bølgeproblemer i Ocean teknikken. ISVA, DTU

3.3.3 Strøm

3.3.3.1 Strømkomponenter

Der skal tages højde for følgende strømbidrag:

- Tidevandsgenereret strøm
- Barometrisk genereret strøm
- Strøm forårsaget af vindstuvning lokalt eller i forbindelse med større vandområder
- Overfladestrøm genereret af vindforskydningskraften

Hvis vindmøllerne placeres inden for en bølgebrydningszone på en kyst skal der også tages hensyn til den kystparallelle strøm, der genereres af de brydende bølgers forskydningskraft langs kysten.

Som generel parameter til beskrivelse af strømmen skal anvendes overfladestrømhastigheden $U(0)$ for alle komponenter.

3.3.3.2 Strømprofil

Strømbidrag fastlægges jf. DS 449. Bidrag fra tidevandsgenereret strøm, barometrisk genereret strøm og strøm forårsaget af vindstuvning samles i en strømkomponent. Denne strømkomponents fordeling over dybden beskrives ved et potensprofil, hvor strømhastigheden $U_S(z)$ som funktion af højden z over vandspejlet er:

$$U_S(z) = U_S(0) (1 + z/h)^{1/7}$$

h er vanddybden.

Den vinddrevne strømkomponent U_V regnes iht. DS 449 lineært aftagende ned til 20 m under middelvandspejl:

$$U_V(z) = U_V(0) (1 + z/20)$$

Ved dybder mindre end 20 m afskæres strømprofilen ved havbunden. Til fastsættelse af mulig erosion i havbunden skal den vindinducerede overfladestrøm inkluderes i potens-strømprofilen med overflade hastigheden $U_V(0)$ til beregning af strømhastigheder ved havbunden.

3.3.3.3 Beregning af strømkræfter

Strømpåvirkninger skal beregnes jf. DS 449

Ved kombination af bølger og strøm skal den stationære strøm adderes vektorielt til de bølgegenererede strømhastigheder.

Hvirvelafløsning undersøges iht. DS 449 B 2.2.

3.3.3.4 Referencer

/1/ DS 449 Pælefunderede Offshore Stålkonstruktioner

3.3.4 Vandstand

3.3.4.1 Vandstand

Der skal fastsættes dimensionsgivende vandstande. Ved fastsættelse skal der beskrives såvel tidevandsforhold som vindstyrkede vandstandssituationer.

Ved islastfastsættelse skal der tilsvarende bestemmes den relevante dimensionsgivende vandstand. Dette er specielt vigtigt, når konstruktionen udformes med iskraftreducerende skrånende flader.

Der skal tages hensyn til vandstandens lastpåvirkning ved opdrift på konstruktionen, samt ved bestemmelse af bølge- og strømpåvirkninger.

Bølgeskylszone

Der skal defineres en bølgeskylszone, der normalt defineres imellem normalt forekommende højvande og tilhørende signifikant bølgetophøjde og normalt forekommende lavvande med tilsvarende signifikant bølgedalshøjde.

Normalt forekommende vandstand kan f.eks. defineres som høj-/lavvande med hyppighed mindst på 3 timer/år. På grund af refleksion kan signifikant bølgetop/-dal skønnes som: En afstand over hhv. under vandstand på signifikant bølgehøjde. Højde på bølgeskylszone kan evt. begrænses til top af evt. platform, så konstruktionselementer trukket væsentligt tilbage fra platformkant undtages fra bølgeskylszone.

3.3.5 *Erosionsforhold*

3.3.5.1 Erosionsforhold

Vindmøllefundamentet skal dimensioneres med hensyntagen til den maksimale mulige erosion af havbunden ved fundamentet. Herunder skal havbundens naturlige niveaueændringer over årtiderne og årene fastlægges.

De maksimale vandpartikelhastigheder incl. strømhastigheder ved havbunden benyttes som beregningsgrundlag. Forstærkningen af den resulterende bundforskydnings-spænding pga. fundamentet fastlægges ud fra KC-tallet (med og uden strøm) og forholdet imellem fundamentets karakteristiske dimensioner og bølgelængden. Jvf. DS 449.

Det kan evt. være nødvendigt at udføre forsøg til bestemmelse af forstærkning på bundforskydnings-spænding og stabilitetsforhold for den valgte erosionsbeskyttelse. Tilladelige skader fastlægges afhængigt af de vurderede konsekvenser. F.eks. kan erosionsbeskyttelsen indgå som stabiliserende element.

Der skal tages hensyn til risiko for erosion udenfor det område, hvor der erosionsbeskyttes.

3.3.5.2 Referencer

- /1/ Sumer.B.M. and Fredsøe, J., 2000 "Wave scour around structures". Advances in Coastal and Ocean Engineering, vol 4.
- /2/ Sumer B.M. and Fredsøe, J., 1997 "Scour around a large vertical circular cylinder in waves". OMAE 1997, Vol 1A, ASME

3.3.6 *Is*

Lastfastsættelsen skal ske ved metoder, der resulterer i den påkrævede sikkerhed. Der henvises generelt til /5/. Jo mere islasten betyder i forhold til vindlasterne, jo mere nøjagtige og pålidelige metoder må der anvendes.

Lastfastsættelse bør, indtil erfaringsgrundlaget er mere udviklet, ske på basis af modelforsøg med kunstig is. Hvis konstruktionen er fleksibel i henhold til definitionen for metode 1 i kap. 3.1.1, bør forsøgene også omfatte en model, hvor de elastiske forhold er medtaget.

De eksisterende metoder er primært baseret på islast fra drivende flager i strømfyldte indre danske farvande. Ved dimensionering af fundamenter i mere lukkede farvande må dimensioneringsgrundlaget og –metoderne revurderes.

3.3.6.1 Isparametre

Den karakteristiske islast fastlægges på baggrund af kuldesummen (K_{\max}) ved følgende lokalitetsafhængige parametre.

- Trykstyrken r_u ,
- Bøjningsstyrken r_f ,
- Tykkelsen e
- Flagestørrelse
- Drifthastighed for flager

For indre danske farvande anvendes normalt

Årlig overskridelsesrisiko	0,2	0,1	0,02	0,01	8×10^{-4}	10^{-4}
Returperiode	5 år	10 år	50 år	100 år	1250 år	10.000 år
K_{\max} ($^{\circ}\text{C d\o}gn$)	170	245	410	480	744	960
r_u (Mpa)	1,0	1,5	1,9	2,0	2,4	2,6
r_f (Mpa)	0,25	0,39	0,50	0,53	0,64	0,69
e (m)	0,33	0,42	0,57	0,63	0,80	0,91

For Nordsøen kan der efter en dertil hørende dokumentation af ringe eller ingen karakteristiske istykkelser ses bort fra islasten som lasttilfælde.

Derudover haves følgende parametre og generelle værdier:

Massefylde is, ρ_i	900 kg/m ³
Vægtfylde is, γ_i	8,84 kN/m ³
Elasticitetsmodul, E	2 GPa
Poisson's forhold, ν	0,33
Is-is friktionskoefficient, μ	0,1
Is-beton dynamisk friktionskoefficient, μ	0,2
Is-stål dynamisk friktionskoefficient, μ	0,1

Islastens angrebshøjde afhænger af de aktuelle vandstandsvariationer, der fastsættes på basis af vandstandsstatistik for måneder med is. og eventuelle skrånende flader på fundamentet.

3.3.6.2 Statisk islast

Der skal dimensioneres for vandret og lodret statisk islast. Belastningerne fra is på lodrette konstruktioner beregnes efter DS 410, /1/, idet de i afsnit 6.3 angivne parametre anvendes.

For konstruktioner med skrånede dele beregnes islasten efter formler af Ralston, /2/, såfremt isen angriber de skrånede dele og såfremt der fra overside eller underside af isen er mindst 0,5 m til overgangen fra de skrånede dele til de lodrette dele. Konstruktioner med iskraftreducerende konus er typiske eksempler på konstruktioner med skrånede dele.

Der skal dimensioneres for lokalt istryk, r_{lokal} , givet ved, /3/,

$$r_{lokal} = \left[5 \left(\frac{e^2}{A_{lokal}} \right) + I \right]^{0.5} r_u$$

hvor r_u er isens karakteristiske trykstyrke, e er isens tykkelse, og A_{lokal} er arealet over hvilket det lokale istryk virker. Det lokale istryk kan ikke overskride 20 MPa.

Der kan være en øvre grænse for islasten grundet isflagernes mulige størrelse, strøm og vind i området samt isflagerne kinetiske energi.

Last af evt. pile-up foran fundamentene skal vurderes.

3.3.6.3 Dynamisk islast

Der skal tages hensyn til isens dynamiske virkemåde. For fundamenter i strømddomimerede områder er det normalt den dynamiske islast, der er afgørende ved sammensætning af vindlast og islast. Fremgangsmåde fra /4/ kan anvendes til at skønne islasterne.

3.3.6.4 Referencer

- /1/ DS 410 Norm for last på konstruktioner, Dansk Standard, 4. udgave, 1998
- /2/ Progress Report 66, ISVA, DTU, 1988
- /3/ The Øresund Link: "Ice Loads", 1995.
- /4/ "Granskningsnote til design basis for iskærfter, Middelgrunden", dateret 1999-11-30
- /5/ API Recommended practice 2N, 2nd Ed 1995 "Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipeline for arctic conditions"

3.3.7 Overisning

Overisning af møllekonstruktionen sker bl.a. ved søsprøjt eller ved atmosfærisk overisning. Søsprøjt giver typisk anledning til overisning af de nederste dele af møllekonstruktionen, medens atmosfærisk overisning påvirker flader på hele konstruktionen.

Ved atmosfærisk overisning skal møllen undersøges for ekstremlaster i driftssituationen, hvor overisning må påregnes op til stopvindhastigheden. Der benyttes en simpel overisningsmodel som angivet i DIBT-richtlinien /1/. Møllen skal undersøges i situationer, hvor:

- a) Alle rotorblade er tilisede
- b) Alle rotorblade undtagen et er tiliset

Endvidere skal overisning inkluderes i udmattelsesanalysen, idet retningslinierne i de tyske DIBT-richtlinie /1/ benyttes. Der skal mindst anvendes en varighed af overisningshændelsen på 7 dage pr. år.

Ved parkeret mølle skal der regnes med et 30 mm tykt islag på alle konstruktionsdele. Densiteten af is kan regnes til 900 kg/m^3 . I Nordsøen skal tykkelsen af overisningen øges til 150 mm på konstruktionsdele i koter op til +20,0 som følge af søsprøjt. For vindmølleparker i de indre danske farvande kan overisningen op til kote +20,0 fastsættes til 100 mm.

Alternative fremgangsmåder for overisningsanalyse kan tages i anvendelse, f.eks. WECO-projektet /2/.

3.3.7.1 Referencer

- /1/ Richtlinie: *Windkraftanlagen Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung* (Fassung Juni 1993), Deutsche Institut für Bautechnik (DIBT-richtlinie)
- /2/ *Wind Energy Production in Cold Climate (WECO)*, EU-projekt (se <http://www.fmi.fi/TUT/MET/energia>)

3.3.8 Skibsstød

Ved dimensionering af havvindmøller skal følgende situationer betragtes i forbindelse med skibsstød:

- Brudgrænsetilstand*: Anløb af et karakteristisk serviceskib med stævn eller hæk ved direkte anløb (langskibs) mod passende af-fendring af konstruktionen.
- Ulykkesgrænsetilstand*: Utilsigtet påsejling af drivende skib – større arbejdsfartøj (kranskib eller tilsv.), alternativt påsejling med et uvedkommende fartøj.

3.3.8.1 Designkriterier

Ved dimensionering af havvindmøller i forbindelse med skibsstød skal følgende designkriterier overholdes:

Brudgrænsetilstanden: Hovedkonstruktionen må ikke påføres skader, der reducerer bæreevnen.

Ulykkesgrænsetilstanden: Det er normalt ikke muligt at beskytte hovedkonstruktionen imod skader. Det antages jf. afsnit 1 at der i forbindelse med valget af placeringen af havvindmølleparken er udført en analyse af risiko for skibsstød differentieret på skibstyper og tilhørende antagne skibsstøds-energier. Konstruktionens robusthed vurderes i forhold hertil. Hvis det er muligt indenfor rimelige praktiske og økonomiske rammer

at forstærke konstruktionen, så risikoen for skader som følge af skibsstød reduceres mærkbart, skal det foretages.

3.3.9 Laster under opførelse

Der skal opstilles kriterier for tilladelige naturforhold under transport, opstilling og udskiftning. Med udgangspunkt i de benyttede arbejdsprocedurer og fartøjer skal der angives grænseværdier for følgende:

- Vind
- Bølger
- Vandstand
- Strøm
- Is

Løftebeslag og procedurer skal under de angivne naturforhold være udformet så skader på konstruktionen forhindres. Dette skal dokumenteres.

Styrke af transportbeslag, løftebeslag og andet påmonteret udstyr er ikke omfattet af typegodkendelsen, men bør normalt kræves certificeret.

Der henvises i øvrigt til eksisterende normer og vejledninger for søtransport og løft.

3.3.9.1 Referencer

- /1/ DS/R 461 Transport og installation af offshore konstruktioner
- /2/ DNV (2000) Rules for planning and execution of marine operations

3.4 Samtidigt virkende laster

3.4.1 Baggrund

Ved bestemmelse af møllekonstruktionens respons overfor de tidsafhængige laster skal der anvendes dynamiske beregningsmetoder. Der kan ved ikke-lineær opførelse være specielle forhold, som gør det nødvendigt, ved beregninger med mere end en tidsafhængig last, at benytte andre partialkoefficienter end de angivet DS 409 og DS 472.

Ved dimensionering skal undersøges for henholdsvis ekstremrespons og udmattelse. Dette er illustreret i nedenstående figur. Den ydre last $F(t)$ er sammensat af en række enkeltlaste: Vindlaste (DS 472 og dette dokument), laste fra bølger, strøm, tidevand og is, $F_i(t)$. Fra de beregnede lastresponsserier skal beregnes henh. det største respons og lastspektrum.

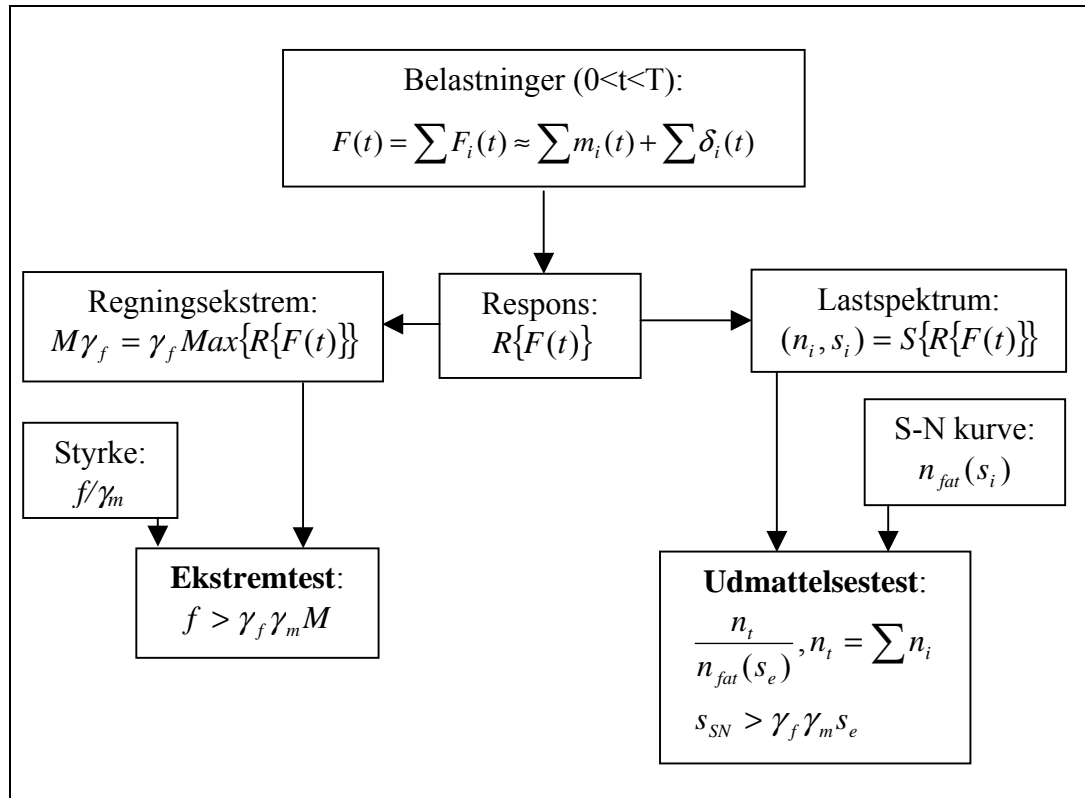


Illustration af dimensionering for punkt i konstruktion.

Ved ekstremanalysen sammenlignes det bestemte ekstremrespons med kapaciteten, idet der er tillagt sikkerhed med partialkoefficienter på respons og på materialets karakteristiske styrke.

Ved udmattelsesberegninger beregnes levetidsforbruget af lastspektret samt materialets SN-kurve. På samme grundlag kan eventuelt også beregnes en til det samlede antal cykler svarende ækvivalent spændingsamplitude. Som sikkerhed er der en partialkoefficient på materialestyrken.

For både ekstrem- og udmattelseslaster er partialkoefficienten 1.2 i det nye normsæt, jf. tillæg til DS 472. I danske godkendelser kan det dog undlades at forøge lasterne med 1.2, fordi der kræves målinger, der verificerer størrelsen af lasterne.

Det er i praksis ikke muligt at beregne konstruktionens respons over hele dens levetid, tidsskridt for tidsskridt. Derfor udvælges et antal lasttilfælde, der tilsammen antages at resultere i samme sikkerhed som det faktiske lastforløb. Til det formål tænkes sædvanligvis lasten dekomponeret i en (løbende) middelværdi² og en perturbation om denne. Denne dekomposition anvendes både for tidssimulering og ved en kvasi-statisk betragtning.

² Svarende til for vind f.eks. middellasten ved $V_{10\min}$.

3.4.2 Generelt

Følgende skal iagttages:

- Partialkoefficienter skal, som illustreret, påføres *efter* responsberegningen.
- Partialkoefficienter for laster findes i tillæg til DS 472
- Ved dimensioneringsberegningerne skal anvendes tidssimulering.
- Der anvendes normalt simuleringsperioder på 10 minutter, i et omfang specificeret i afsnit 3.1.2.
- Lasttilfælde med kombineret last skal vælges, således at der opnås samme sikkerhed som ved en enkelt last.

Det skal undersøges, om de nedenfor angivne laster i det enkelte tilfælde er dækkende. Hvis nødvendigt skal tilføjes yderligere lasttilfælde.

I den forbindelse henledes opmærksomheden på forhold, som kan ændre vindmøllens dynamiske egenskaber over levetiden, såsom korrosion, scour, ændrede geotekniske egenskaber m.v.

Partialkoefficienterne for ekstrem vind jf. tillæg til DS 472 giver tilstrækkelig sikkerhed for årsektremlaster med en variationskoefficient på 40%. Såfremt enkeltlaste (som f.eks. is) har en større variationskoefficient skal partialkoefficienten øges. Såfremt enkeltlaste, som f.eks. inertilaste fra dybdebegrænsede bølger, har en dokumenteret mindre variationskoefficient, kan partialkoefficienten reduceres.

Det skal tilsikres, at der er samme risiko for overskridelse i levetiden for alle enkeltlaste og for de kombinerede laste.

Når partialkoefficienter påføres efter responsberegninger kan der kun anvendes een partialkoefficient. Hvis ikke alle naturlaste har samme variationskoefficient og dermed partialkoefficient, skal der foretages et valg af partialkoefficient. En samvægtning af partialkoefficienterne for forskellige naturlaste kan under hensyntagen til lasternes virkning i et givent punkt i konstruktionen og i et bestemt lasttilfælde foretages efter følgende princip: De karakteristiske naturlaste påsættes hver for sig og responset i det betragtede punkt beregnes for hver last. De enkelte respons sammen sættes derefter til et karakteristisk kombineret respons samt, under anvendelse af naturlasternes partialkoefficienter, til et kombineret designrespons. Forholdet mellem designrespons og karakteristisk respons udgør den vægtede partialkoefficient. Til bestemmelsen af den vægtede partialkoefficient kan responsberegningerne og sammensætningen gennemføres ved brug af passende simple modeller. Se Bilag C for vejledning i en række ekstremlasttilfælde for hovedsageligt stift fundament. Hvis man vil reducere omfanget af vægtede partialkoefficienter kan man nøjes med at vælge een vægtet partialkoefficient for alle punkter i konstruktionen og for alle lasttilfælde, hvis det kan vises, at denne partialkoefficient giver konservativt design.

For udmattelsesberegninger bør retningsafhængigheden for respons fra vindmøllelaste i tårnbund kun bruges med forsigtighed, og kun hvor respons på tværs af vindretningen er eftervist ved lastmålinger. Dette fordi dæmpningen normalt er meget lav parallelt med rotorplanet, og lasterne/responset er dårligt defineret i denne retning.

3.4.3 Sammenhørende klimatiske forhold

For de forskellige klimatiske forhold skal der etableres betingede fordelingsfunktioner, således at der kan bestemmes sammenhørende værdier på udvalgt sandsynlighedsniveau af vindhastighed, vindretning, bølgehøjde, vandstand, strømforhold og is.

Der vælges normalt én afgørende naturfaktor (f.eks. vindhastighed for bestemt retning eller isforhold og tilhørende vindlast), hvorefter de betingede fordelinger og tilhørende laster for de øvrige naturforhold bestemmes.

Så længe der ikke foreligger en samlet statistisk beskrivelse, kan der optræde flere mulige bestemmende kombinerede lasttilfælde for samme naturfaktor afhængigt af det valgte sandsynlighedsniveau. I disse tilfælde må der vurderes flere scenarier og det afgørende vælges. Nedefor følger en oversigt over sådanne scenarier.

3.4.3.1 Vind- og hydrauliske laster

Ekstrem- og udmattelseslaster

- Laster fra vind, bølger, strøm og tidevand (= hydrauliske laster) sammensættes til en last, der skal regnes at kunne virke samtidigt.
- Hydrauliske laster skal tages i regning ved alle ekstreme lasttilfælde såvel som alle udmattelseslasttilfælde, som angivet i Bilag A.
- Ved simuleringen anvendes den signifikante bølgehøjde, der svarer til den pågældende vindhastighed som basisparameter, idet der antages at forholdene er stationære.

Der er ikke nødvendigvis sammenfald imellem de vindretninger, hvor vindlasten er størst, og de retninger hvor bølgelasten er størst. Bølgelasten er normalt domineret af retningen med størst frie stræk.

3.4.3.2 Vind-, is- og strømlaster

- Laster fra vind, strøm og is skal regnes at kunne virke samtidigt.
- Islasten kan være domineret af retningen med største strømhastighed.

Ekstremlast

- Ekstrem dynamisk islast samtidig med vindlast svarende til vindhastighed med 1 års returperiode
- Dynamisk islast samtidig med maksimal driftslast fra vind³, se bilag C.

Det kan normalt antages, at i strømfylte farvande er den ekstreme statiske total-islast kombineret med vindlast mindre end den ekstreme dynamiske total-islast kombineret med vindlast, på grund af at den statiske total-islast kun optræder kortvarigt ved opbrud af isen.

Udmattelse

Det kan antages, at statisk islast ingen indflydelse har på materialers udmattelse. Endvidere vides det, at (dynamisk) islast kun forekommer et begrænset antal gange per 50års-periode.

- Det samlede tidsrum over konstruktionens levetid, hvor isen giver anledning til brydning og dermed dynamisk last, skal estimeres.

³ For eksempel vindlast under drift ved vindhastigheder 20-25 m/s svarende til, at islasten optræder efter opbrud af isen efter en hård isvinter ved en kraftig vindsituation i februar-april måned. Afhængigt af den betragtede mølles styringsprincip kan andre middelvindhastigheder være relevante.

- Levetidsforbruget for denne periode skal tages i regning med et lasttilfælde med ekstrem dynamisk islast og sædvanlige laster for møllen i drift ved en middelvindhastighed på 15 m/s.

3.4.4 ”Statisk check”

Pga. møllestrukturens og lasternes ofte ikke-lineære natur vil sædvanlige kvasi-statiske beregninger være mindre pålidelige. Skulle det alligevel ønskes at kontrollere beregninger, anvendes det sædvanlige normgrundlag.

4. FUNDAMENTER

4.1 Generelt

Eksisterende normer danner baggrund for dimensioneringen af vindmøllefundamenter.

Primært skal der tages udgangspunkt i "Foundations (Recommendation to Comply with the Requirements in the Technical Criteria for the Danish Approval Scheme for Wind Turbines)", Energistyrelsen 1998, hvor der henvises til bl.a. DS 415 'Fundering' og DS 449 "Pælefunderede off-shore stålkonstruktioner".

Det bemærkes, at i henhold til det danske godkendelsessystem, skal fundament og mølle, selvom de beregnes og designes separat, i den sidste ende beregnes og godkendes som ét samlet system.

Vedrørende særlige forhold ved specifikke funderingskoncepter, se bilag F.

4.2 Funderings- og sikkerhedsklasse

Fastsættelsen af konstruktionens funderingsklasse følger retningslinierne i DS 415 "Fundering".

For fundamenter/jordbundsforhold hvor jordens deformationsegenskaber har afgørende indflydelse på konstruktionens egenfrekvenser, skal fundamentet henføres til skærpet funderingsklasse. Hvor jordens deformationsegenskaber kun har begrænset indflydelse, kan benyttes normal funderingsklasse.

Fastsættelse af hele eller dele af konstruktionens sikkerhedsklasse følger retningslinierne i DS 409, "Sikkerhedsbestemmelse for konstruktioner". Fundament og tårn kan sædvanligvis henføres til normal sikkerhedsklasse.

4.3 Geotekniske forundersøgelser

Omfanget af nødvendige geotekniske forundersøgelser for de to typer af funderingsklasser fremgår af DS 415 "Fundering" og DS 449 "Pælefunderede off-shore stålkonstruktioner".

Geoteknisk/geofysisk undersøgelsesprogram

Det geotekniske/geofysiske undersøgelsesprogram skal tilrettelægges og gennemføres på en sådan måde, at de aktuelle fundamentskoncepter tilgodeses.

Indledende undersøgelser kan f. eks. bestå af bathymetri, side-scan sonar og seismik. Disse undersøgelser kan ikke stå alene, men skal følges op af egentlige geotekniske undersøgelser.

For hver lokalitet skal der i det endelige forsøgsprogram som minimum være udført en punktmåling. Antallet af punktmålinger afstemmes efter den aktuelle geologi, fundamentskonceptet, antallet af fundamenter (enkeltmøller eller møllepark) samt resultatet af eventuelle indledende geofysiske undersøgelser kombineret med et

tatet af eventuelle indledende geofysiske undersøgelser kombineret med et eventuelt generelt kendskab til det pågældende områdes geologi.

Punktmålinger kan udføres som rene geotekniske boringer eller som et nøje afstemt antal geotekniske boringer suppleret med CPT-forsøg. Som supplement til den geologiske bestemmelse kan der udføres "vibro cores". I forbindelse med borearbejdet udtages jordprøver og der udtages et nærmere bestemt antal A-rørsprøver af alle hovedaflejringer samt specielle aflejringer. Det kan ikke påregnes at "vibro cores" kan benyttes som intakte prøver.

Undersøgellesprogrammet skal tilrettelægges og udføres på en sådan måde, at efterfølgende geotekniske kontrolarbejder (og laboratoriearbejder) og beregninger kan henføres til skærpet funderingsklasse.

Der kan som vejledning regnes med følgende undersøgelsesomfang:

Pælefundering: Der bør som minimum udføres en punktmåling pr. fundament. Ved etablering af en større møllepark, kan punktmålingerne kombineres med et antal korte "vibro-core"-boringer og afhængig af resultaterne af CPT-forsøgene et antal egentlige geotekniske boringer, hvor der udføres SPT-forsøg og/eller vingeforsøg samt udtages prøver til klassifikations- og eventuelt laboratorieforsøg. Ved et pælefunderet tripod-fundament, kan det ved meget varierende bundforhold være nødvendigt at udføre 2 eller 3 sonderinger kombineret med en boring pr. fundament.

Direkte fundering (og sugebøtter): Der bør som minimum udføres en geoteknisk boring pr. fundament. Forsøgs- og prøveomfang er som ved pælefundering. Ved store fundamentsdiametre og/eller ved varierende bundforhold, kan boringen kombineres med et antal CPT-forsøg spredt over fundamentsfladen.

Laboratorieforsøg og beregningsmodeller

Statiske forhold: Ved sammenstilling mellem vingeforsøg og laboratorieforsøg (triaxiale tryk- og trækforsøg samt DSS-forsøg) skal det fastlægges hvordan den triaxiale tryk- og trækstyrke, vingestyrken og styrken fra et DSS-forsøg kan relateres.

Dynamiske forhold: Dynamisk påvirkning i de områder/niveauer, hvor fundament indgår i jorden skal undersøges, og modstandsdygtighed skal dokumenteres. Undersøgelsen skal føres ud forbi brudzonen (elastiske tilfælde). Ved dimensionering for cyklisk/dynamisk påvirkning skal jordparametre og beregningsmetode vælges i overensstemmelse med den valgte lasthistorik, de resulterende spændinger og deformationer.

Deformationer: Størrelsesordenen af jorddeformationer skal beregnes og vurderes i såvel det plastiske (af hensyn til blivende deformationer) som i det elastiske område.

Opmærksomheden henledes specielt på anvendelse af høje jordstyrker. Såfremt der regnes med høje trækspændinger i jord, skal det dokumenteres, at der ikke opstår så store deformationer, at de opstillede projektkrav ikke længere er overholdt. Selv om der normalt kan regnes med en mobilisering af deformationsparametrene under forøget belastning, skal det til enhver tid kontrolleres, at der ikke forekommer brud i jorden med efterfølgende accelererende tøjningstilvækst.

4.4 Kontrol og tilsyn

Kontrolundersøgelserne skal udføres i overensstemmelse med DS 415, "Fundering" og DS 449, "Pælefunderede offshore stålkonstruktioner" med nedennævnte ændringer og tilføjelser.

4.4.1 Detailkontrol af bundtopografi

For fundamentstyper som placeres ovenpå havbunden eller på en udlagt sprængstenskude, og hvis virkemåde er afhængig af bundtopografien, skal der gennemføres en detailkontrol umiddelbart inden installation af fundamentet. Kontrolomfanget fastlægges under hensyntagen til de udførte forundersøgelser og konstruktionens følsomhed over for bundforhold, der afviger fra det forudsatte.

En dykkerinspektion eller undervands-videoinspektion af havbunden umiddelbart inden installation vil normalt være tilstrækkeligt

4.4.2 Pæleramning

Rammearbejdets fulde forløb skal registreres i en rammejournal i hht. specifikationerne i DS 449, "Pælefunderede offshore stålkonstruktioner".

For enkeltpæle (lodpæle) skal pælens vinkel med lodret under nedramningen jævnligt registreres og noteres i rammejournalen.

Hvor den vertikale pælebæreevne ikke er kritisk, kan undlades registrering af evt. dannet bundprop.

4.4.3 Erosion

Hvis der ved projekteringen er fastsat en øvre grænse for erosion af havbunden eller et eventuelt erosionsbeskyttende lag omkring fundamentet, skal det efter installation regelmæssigt tilses at denne grænse ikke overskrides.

5. MATERIALER OG KORROSION

Afsnittet vedrører kun beton- og stålkonstruktioner samt tilhørende beskyttelsessystemer for fundamenter og tårne indtil underkant af nacellen - ikke vinger, gear/generator og installationer. Endvidere tager afsnittet udgangspunkt i de holdbarhedsmæssige forhold. Konstruktionerne skal korrosionsbeskyttes på en sådan måde, at der ikke opstår skader, som i konstruktionens forventede levetid kan føre til lavere sikkerhed end foreskrevet i relevant(e) konstruktionsnormer. Funderingspæle skal omfattes af korrosionsbeskyttelsen. Det skal ved materialevalg til konstruktionsdele, svejssømme, bolte, armering og vedhæng til konstruktion sikres, at der ikke benyttes metallegeringer, der vil fungere som katoder for den øvrige konstruktion. Risikoen for tæring vil være tilstede, såfremt der er kontakt mellem metaller med forskellig potentiale i spændingsrækken.

Designlevetiden defineres for det enkelte projekt. Den kan for fundamentet og forankringen af tårnet med fordel vælges længere end designlevetiden for tårnet, som er tilgængeligt og lettere at reparere eller udskifte end fundamentet.

For en definition af det i nærværende afsnitt anvendte bølgeskylszonebegreb henvises til afsnit 3.3.4.1.

Der skal udføres lynbeskyttelse i systemet, jf. afsnit 6.

5.1 Betonkonstruktioner og beskyttelsessystemer

Stålarmeringen i armerede betonkonstruktioner skal beskyttes mod korrosion. Denne beskyttelse kan bedst opnås ved et tilstrækkeligt betondæklag, en tæt betonstruktur, begrænsning af revnedannelse og revnevidder samt ved anvendelse af gældende regler for minimumsarmering og fordeling af armering.

Det anbefales, at betonkonstruktionerne opdeles i to miljøklasser afhængig af den geometriske placering i forhold til bølgeskylszonen:

I bølgeskylszonen:

- Minimum betondæklag er 50 mm
- Maksimal beregnet revnevidde er 0,1-0,2 mm

Udenfor bølgeskylszonen:

- Minimum betondæklag er 40 mm
- Maksimal beregnet revnevidde er 0,2-0,3 mm

Beregningen af revnevidder skal baseres på metoden givet i /4/ afsnit 6.3 og gennemføres for de hyppigst forekommende laster i anvendelsestilstanden. De fundne armeringsspændinger fra ydre last tillægges bidrag fra svind, krybning og temperaturforskelle i forbindelse med vurdering af revneviddestørrelsen.

I øvrigt anbefales det, at betonen sammensættes svarende til miljøklasse E, skærpet kontrolklasse, jf. reference /5/ og /6/, og at følgende krav som minimum opfyldes:

- Betonens karakteristiske trykstyrke, $f_{ck} > 40$ MPa

- Vand/cementforhold for betonen, $v/c < 0,40$
- Maksimal stenstørrelse, $d_{\max} \leq 32\text{mm}$ eller minimumsafstand mellem armeringsstænger
- Maksimal afstand mellem ikke-forspændte armeringsstænger er 150-200 mm.
- Anvendelse af armering med relativt små armeringsdiametre ($D=12-20\text{ mm}$) så vidt muligt.
- Anvendelse af krav til minimumsarmering og fordeling af armering som anbefalet i /4/.

Kabelkanaler til spændarmering injiceres med grout efter opspænding.

Under udførelse skal der generelt tages følgende forholdsregler:

- Krav til betonsammensætning skal tilpasses således at det er muligt at opnå en beton med rimelig bearbejdighed samtidig med at der kan opnås tilstrækkelig holdbarhed. Armeringsarrangementer, geometri m.m.. skal udføres hensigtsmæssigt. Anvendelse af særlige tiltag som formdug skal indarbejdes.
- Der iværksættes tiltag der sikrer, at der ikke opstår fejl eller skader på betonkonstruktionerne. Især skal det sikres at temperatur og fugtpåvirkninger ikke skader betonkonstruktionen. En grundig forberedelse og styring af støbeprocessen skal sikres.
- Der indarbejdes systemer, der sikrer konstruktionernes holdbarhed, selvom der er fejl og skader på betonkonstruktionerne.
- Samlingsdetaljer ved overgang mellem tårn og fundament skal udformes med fald, således at ophobning af chlorider og fugt minimeres.

Intentionerne skal indarbejdes, og kvaliteten af udførelsen skal sikres bl.a. ved skærpet krav med hensyn til sammensætning af betonen for at opnå egnet bearbejdighed, samt med hensyn til håndtering og beskyttelse af betonen under hærdeningen.

Risikoen for revnedannelse ved sammenstøbning af konstruktionsdele skal minimeres. Der tillades normalt ikke en større temperaturdifference end $\Delta T=12-15\text{ °C}$ målt over tværsnittet.

For at sikre god udførelse bør der foretages en forprøvning af betonarbejdets udførelse. Denne skal konkretiseres jf. /6/, pkt 9.4. Prøvestøbninger i stor skala er kostbare og tidskrævende, hvorfor omfanget skal sættes i relation til den samlede produktion og den forventede effekt af prøvestøbningen.

Med henblik på at sikre den ønskede levetid, skal der iværksættes særlige tiltag for at udbedre de (eventuelle) skader, der er opstået i udførelsesfasen, jf. /6/ afsnit 9.10 og 11.

Det anbefales at anvende katodisk beskyttelse i h.t. /7/ som ekstra korrosionsbeskyttelse af armeringen, ligesom anvendelse af rustfri armering på udsatte dele skal overvejes.

I bølgeskylszonen bør det endvidere overvejes at anvende glasfiberarmeret epoxybaseret maling som overfladebeskyttelse af betonen. Et alternativ hertil er anvendelsen af en rustfri stålkappe omkring fundamentet.

5.2 Stålkonstruktioner og beskyttelsessystemer

Stålkonstruktioner til vindmøller skal normalt udføres i overensstemmelse med DS 412 i varmvalset konstruktionsstål med betegnelserne S275, S235 eller S355, der opfylder kravene i DS/EN 10025 eller tilsvarende f.eks. DIN 17100.

Svejsesømme skal udføres i overensstemmelse med DS 412 og DS/ENV 1090. Bolte og skruer m.m. udføres i overensstemmelse med DS/ENV 20988.

Det skal vurderes, om man med fordel kan udnytte de styrkemæssige fordele ved at vælge skærpet kontrolklasse.

Overfladebehandling skal generelt udføres svarende til miljøklasse C5-M og Im2 (marint miljø) i overensstemmelse med bl.a. DS 1090 og DS/EN ISO 12944 ”Malinger og lakker – korrosionsbeskyttelse af stålkonstruktioner med malingsystemer”.

Der anbefales følgende korrosionsbeskyttelse afhængigt af placering i forhold til bølgeskylszonen:

Over bølgeskylszonen:

Ståloverflader over bølgeskylszonen beskyttes normalt med maling.

I bølgeskylszonen:

Stålkonstruktionsdele i bølgeskylszonen skal beskyttes ved korrosionsbeskyttelsessystemer, som er velegnet til at modstå det aggressive miljø i denne zone. Anerkendt design praksis er at benytte korrosionstillæg som hovedsystem for korrosionsbeskyttelse i bølgeskylszonen, d.v.s. godstykkelsen forøges af hensyn til korrosion. Det aktuelle korrosionstillæg for en given lokalitet skal vurderes i hvert enkelt tilfælde. For beregning af korrosionstillæg kan man dog som vejledende for korrosionsraten i bølgeskylszonen antage 0,3 – 0,5 mm/per år (ref. /1/). Det bør bemærkes, at korrosionsraten generelt vil være stigende med alderen af konstruktionen.

Det anbefales at kombinere beskyttelsessystemet baseret på korrosionstillæg med overfladebehandling med f.eks. glasfiberarmeret epoxymaling. Det er normal praksis ikke at regne med, at overfladebehandlingen virker nedsættende på korrosionsraten.

Under bølgeskylszonen:

Neddykkede og indre ståloverflader som udsættes for påvirkning fra havvand, f.eks. indersiden af en pæl, bør beskyttes katodisk med offeranoder og/eller med påtrykt strøm suppleret med overfladebehandling. For anbefalinger vedrørende design af katodisk beskyttelsessystemer, grænser for påkrævet potentiale i stål m.v. kan der f.eks. henvises til /2/, /3/ og /7/.

I en zone omkring havbunden anbefales det at kombinere den katodiske beskyttelse med et korrosionstillæg på 3 mm på f.eks. pæle, og at regne med en reduceret udmattelseslevetid, der tager højde for at der ikke er fuld katodisk beskyttelse i dette område.

Referencer:

- /1/ : DNV "Rules for Classification of Fixed Offshore Installations", January 1998.
- /2/ : DNV Recommended Practice RP B401 "Cathodic Protection Design", 1993.
- /3/ : DS Rekommandation DS/ 464 "Korrosionsbeskyttelse af Stålkonstruktioner i marine omgivelser", 1988.
- /4/ : DS 411, "Norm for betonkonstruktioner", 4. udgave, 1999.
- /5/ : DS 481, "Beton Materialer", 1. udgave, 1999.
- /6/ : DS 482, "Udførelse af betonkonstruktioner", 1. udgave, 1999.
- /7/ : prEN 12473: Generelle principper for katodisk beskyttelse i havvand, DS 1996.

6. ANDRE FORHOLD

6.1 Arbejdssikkerhed

Arbejde i møllen

Der vil gælde samme regler med hensyn til arbejdssikkerhed ved arbejde på vindmøller til havs, som der gælder for tilsvarende vindmøller på land. Der henvises her til afsnit 3.6 i Teknisk grundlag.

Bemanding

Bemandingskrav svarende til bemandingsregler for ubemandede platforme på den danske sokkel bør følges. Der henvises til "Guidelines for design of unmanned production platforms (UP)".

Dette indebærer bl.a. at der skal udarbejdes procedurer for:

- Bemanding af møllerne.
- Hvordan miljøforholdene bliver monitoreret, når møllerne er bemandet, og hvornår mandskabet bliver evakueret.

Skibstransport og landingsarrangement

Skibstransport til/fra møllerne og overførsel af mandskab dækkes af Søfartsstyrelsens forskrift: "Teknisk forskrift A nr. 2 om arbejdets udførelse om bord på skibe".

- Heri er bl.a. følgende emner behandlet: Minimering af risici.
- Evaluering af risici som ikke kan forhindres.
- Bekæmpelse af risici ved kilden.
- Tilpasning af arbejdet til mennesket.

Søfartsstyrelsen skal acceptere løsninger og procedurer.

Helikoptertransport

Godkendende myndighed ved helikoptertransport og hoistoperationer er Statens Luftfartsvæsen (SLV).

Det forventes at hoistoperationer vil blive krævet udført i henhold til JAR/OPS 3.005(Z), Helihoist Operation.

En egentlig helikopterplatform forventes at skulle opfylde relevante krav i BL 3-5. BL 3-5 er udarbejdet med henblik på offshore-platforme for olie- og gasproduktion. Det må således forventes at visse krav i BL 3-5 kan frafaldes i forbindelse med vindmøller til havs.

6.2 Lynrekommandation.

Der henvises til DEFU lynrekommandation 25. Dimensionering af lynbeskyttelse skal kombineres med dimensionering af korrosionsbeskyttelse. Se i øvrigt DEFU Rep. 394 Lynbeskyttelse af vindmøller (- 9: Forhold vedr. korrosion af offshorefundamenter, - 10: Beregning af inducerede strømme og spændinger).

6.3 Afmærkning

Luftfartsafmærkning

Generelt skal afmærkningen af vindmøller med hensyn til luftfarten følge reglerne i BL 3-10 "Bestemmelser om luftfartshindringer". I BL 3-10 er det angivet at afmærkningen skal foretages i.h.t. følgende regler:

- 0-100 m: Ingen afmærkning nødvendig.
- 100-150 m: Nødvendigheden for afmærkning afgøres af SLV.
- Over 150 m: Afmærkning er et krav.

Afmærkningen skal aftales med SLV, herunder også Flyvertaktisk kommando (Forsvarsministeriet). Herfra kan der være yderligere krav som følge af brug af redningshelikoptere, som flyver i lav højde. Ved fastsættelse af luftfartsafmærkning skal Farvandsvæsenet inddrages, da denne afmærkning eventuelt kan have betydning for søfarten.

Farvandsafmærkning

Afmærkningsomfanget afgøres fra sag til sag. Bygherren skal udarbejde et forslag til farvandsafmærkning evt. med input fra Farvandsvæsenet. Farvandsvæsenet afgør om forslaget til farvandsafmærkning kan accepteres.

6.4 Støj

Der gælder samme regler som på land.

6.5 VVM redegørelse

VVM-redegørelsen ligger ud over den tekniske godkendelse af vindmølle anlæg. Men der gøres opmærksom på, at der af bygherren i forbindelse med opstillingstilladelse af vindmøller på havet skal udarbejdes en VVM-redegørelse (Vurdering af Virkninger på Miljøet). Kravene til indholdet af VVM-redegørelsen følger af EF's VVM-direktiv af 27. juni 1985 med ændringer af 3. marts 1997 samt bekendtgørelse nr. 815 af 28. august 2000 om vurdering af virkninger på miljøet (VVM) af elproduktionsanlæg på havet.

Miljø- & Energiministeriet har i et notat af februar 2000 opstillet retningslinier for udarbejdelse af VVM-redegørelse for vindmølleparker på havet.

7. BILAG

Bilagene skal betragtes som vejledende. Til disse skal lægges lasttilfældene angivet i afsnit 3, Laster og lasttilfælde.

Der gøres opmærksom på, at der til møllernes elektriske systemer kan blive stillet specielle krav p.g.a. ønske om netreguleringsegenskaber. Disse krav er en skærpelse i forhold til gældende praksis på land, og der skal tages hensyn til eventuelle nye lasttilfælde herfra, som ikke er dækket af Bilag A.

BILAG A: LASTTILFÆLDE IFØLGE DS 472 OG DEN DANSKE GODKENDELSESORDNING:

Lastsituation	DLC	Vindforhold	Andre forhold	Beregningstype	Partial koef. ficienter
<i>Normale lasttilfælde</i>					
Produktionskørsel	6.2.1.1	$V_{start} < V_{nav} < V_{stop}$ Turbulens fra annekts A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Krøje fejl (fordeling) medregnes Tillæg for parkturbulens Mange vindfiler nødv. for at få ekstrem værdi	U	Tabel 5.4 i DS 472 + tillæg
	6.2.1.1	$V_{start} < V_{nav} < V_{stop}$ Turbulens fra annekts A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft. Weibull fordeling	Krøje fejl (fordeling) medregnes Tillæg for parkturbulens Vurdering af nødvendighed for flere vindfiler	F	Tabel 5.4 i DS 472 + tillæg
Start og belastnings- omkobling Fra friløb (el. stil- stand) til produkti- onskørsel.-og omkob- ling ved to-generator (ved aktuel vindhastighed)	6.2.1.2	$V_{nav} = V_{min}, V_{nom}$ og V_{max} Turbulens fra annekts A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens	U	
	6.2.1.2	$V_{nav} = V_{min}, V_{nom}$ og V_{max} Turbulens fra annekts A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens Hvis ikke andet er dokumenteret kan i DK anvendes (pr. år): 2000 lavvindsstarter 700 generatoromkoblinger ↑ 700 generatoromkoblinger ↓ 50 højvindsstarter	F	
Stop el. Overgang til kontrolleret friløb Normal stop-sekvens	6.2.1.3	$V_{nav} = V_{min}, V_{nom}$ og V_{max} Turbulens fra annekts A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens	U	
	6.2.1.3	$V_{nav} = V_{min}, V_{nom}$ og V_{max} Turbulens fra annekts A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens Hvis ikke andet er dokumenteret kan i DK anvendes (pr. år): 2000 lavvindsstop 50 højvindsstop	F	
Stilstand eller kon- trolleret friløb	6.2.1.4	$V_{nav} < V_{min}$ $V_{nav} > V_{max}$ (såfremt friløb) Weibull fordeling		F	

<i>Ekstraordinære lasttilfælde</i>					
Ekstre Vindforhold 50 års hændelse	6.2.2.1	$V_{nav} = V_{10min}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Kombineret med mest ufordelagtig blad-, rotor- og krøjeposition (evt. kan møllens konstruktion udelukke visse kombinationer af rotorposition og vindretning) Elektrisk net kan ikke regnes tilstede	U	
	6.2.2.1	$V_{nav} = V_{2s}$	Kombineret med mest ufordelagtig blad-, rotor- og krøjeposition (evt. kan møllens konstruktion udelukke visse kombinationer af rotorposition og vindretning) Elektrisk net kan ikke regnes tilstede	U	
	6.2.2.1	$V_{nav} = 10 \rightarrow 25m/s$ samtidig med vindretning $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ på 30 sekunder		U	
Transport, montage og opstilling af møllen	6.2.2.2	Vindhastighed givet af fabrikant		U	
Funktionstest	6.2.2.3	Vindhastighed givet af fabrikant	Manuel betjening	U	
Nødstop	6.2.2.4	$V_{nav} = 1.3 \cdot V_{max}$		U	
Aktivering af luft- brems	6.2.2.4	$V_{nav} = 1.3 \cdot V_{max}$	Mest ugunstig krøjefejl Skæv anblæsning	U	
Friløb med luft- brems aktivret	6.2.2.4	$V_{nav} = 0.5 \cdot V_{10min}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens	U	
	6.2.2.4	$V_{nav} = 0.5 \cdot V_{10min}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens Mest ugunstig krøjefejl 50 timer	F	

Fejl i krøjesystem	6.2.2.5	$V_{nav} < V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens Mest ugunstig krøjefejl (inkl. bagvind)	U	
	6.2.2.5	$V_{nav} < V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Tillæg for parkturbulens Mest ugunstig krøjefejl 50 timer. Evt. udnytte ekstra overvågning be- grænser krøjefejl/varighed	F	
Svigt i det ene sikkerhedssystem	p. 32	$0.75 \cdot V_{2s}$	Omdrejningsfrekvens må ikke overstige $n_{r,max}$	U	
Arbejdsforhold	Teknisk Grundl. p. 31	$V_{nav} < V_{max}$	Blokering af rotor, pitch og krøjesystem	U	
Fejl i bladvinkelregulering Et blad i mest ugunstige position	6.2.2.5	$V_{nav} < V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Krøjefejl Tillæg for parkturbulens	U	
	6.2.2.5	$V_{nav} < V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Krøjefejl Tillæg for parkturbulens 200 timer	F	
Fejl i luftbremssystem ”tip”-bremser ikke bragt i normalstilling	6.2.2.5	$V_{nav} < V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Krøjefejl Tillæg for parkturbulens	U	
	6.2.2.5	$V_{nav} < V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Krøjefejl Tillæg for parkturbulens 200 timer	F	
Ulykkestilstand					
Friløb, med en aerodynamisk bremse ude af funktion	6.2.3	$V_{nav} = V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Krøjefejl Tillæg for parkturbulens	U	
	6.2.3	$V_{nav} = V_{max}$ Turbulens fra anneks A1 log. vindprofil, Kaimal spektrum, exponentiel kohærensft.	Krøjefejl Tillæg for parkturbulens 100 timer	F	

Bilag B: LASTTILFÆLDE, med referencer til afsnittene (DLC) i IEC 61400-1:

Lastsituation	DLC	Vindforhold*	Bølgeforhold	Isforhold	Andre forhold	Beregnings-type	Partial koefficienter
1) Energi produktion	1.1	NTM $V_{hub}=V_r$ or V_{out}				U	N
	1.2	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$				F	*
	1.3	ECD $V_{hub}=V_r$				U	N
	1.4	NWP $V_{hub}=V_r$ or V_{out}			Ekstern elektrisk fejl	U	N
	1.5	EOG ₁ $V_{hub}=V_r$ or V_{out}			Tab af net	U	N
	1.6	EOG ₅₀ $V_{hub}=V_r$ or V_{out}				U	N
	1.7	EWS $V_{hub}=V_r$ or V_{out}				U	N
	1.8	EDC ₅₀ $V_{hub}=V_r$ or V_{out}				U	N
	1.9	ECG $V_{hub}=V_r$				U	N
2) Produktion, hvor der opstår fejl	2.1	NWP $V_{hub}=V_r$ or V_{out}			Kontrolsystem fejl	U	N
	2.2	NWP $V_{hub}=V_r$ or V_{out}			Beskyttelsessystem eller efterfølgende intern elektrisk fejl	U	A
	2.3	NTM $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$			Kontrol eller beskyttelsessystem fejl	F	*
3) Opstart	3.1	NWP $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$				F	*
	3.2	EOG ₁ $V_{hub}=V_{in}, V_r$ or V_{out}				U	N
	3.3	EDC ₁ $V_{hub}=V_{in}, V_r$ or V_{out}				U	N
4) Normal Stop	4.1	NWP $V_{in}<V_{hub}<V_{out}$				F	*
	4.2	EOG ₁ $V_{hub}=V_r$ or V_{out}				U	N
5) Nødstop	5.1	NWP $V_{hub}=V_r$ or V_{out}				U	N
6) Parkeret (stående stille eller kører rundt)	6.1	EWM $V_{hub}=V_{e50}$			Muligt tab af net	U	N
	6.2	NTM $V_{hub}<0.7V_{ref}$				F	*
7) Parkeret og fejl	7.1	EWM $V_{hub}=V_{e1}$				U	A
8) Transport, samling, vedligehold og reparation	8.1	Indføjtes af fabrikant				U	T
Forkortelser, se næste side							
* Hvis ingen (normal) stop vindhastighed V_{out} er defineret, bør værdien af V_{ref} bruges.							

Forklaring til tabel med lasttilfælde:

DLC	Design load case
ECD	Extreme coherent gust with direction change
ECG	Extreme coherent gust
EDC	Extreme direction change
EOG	Extreme operating gust
EWM	Extreme wind speed model
EWS	Extreme wind shear
Subscript	Returperiode in years
NTM	Normal turbulence model
NWP	Normal wind profile model
F	Fatigue
U	Ultimate
N	Normal and extreme
A	Abnormal
T	Transport and erection
.	Partial safety factor for fatigue

Bilag C: VÆGTET PARTIALKOEFFICIENT OG EFFEKT AF EN MANGE GANGE GENTAGEN SITUATION

C1 Indledning

I dette annekts gives en kortfattet beskrivelse af en metode til bestemmelse af en sammensat dimensionsgivende last på stive fundamenter for havvindmøller vha. en vægtet partialkoefficient. Metoden er gældende, hvad enten lasterne er et resultat af en kombination af ekstreme hændelser eller, de er et resultat af at en situation med driftlast, der optræder mange gange sammen med en tilhørende bølgelast eller en ekstrem islast. Der ses alene på cylinderformet konstruktion udstyret med en nedadrettet konus (der bøjer isen nedad) til at minimere islast, som f.eks. anvendt på Middelgrunden. Metoden er udviklet med henblik på at fastsætte de designlaster, der virker på fundamentet, ud fra maksimumværdier i tidsserier for vind-, bølge- og islaster opnået ved en blanding af simuleringer og forsøg.

En præcis dimensionering kræver mange simuleringer, udførelse af modelforsøg (med is og bølger) og efterfølgende kombinerede simuleringer. Annekset giver alligevel forslag til nogle tilnærmede metoder, som kan anvendes til overslagsberegninger. Ved anvendelse bør det mindst undersøges

- a) hvor stort forholdet imellem middelværdi og middel-max. hændelse er,
- b) at den kvadratiske sammensætningsmodel tilnærmelsesvis passer,
- c) at 10-min-ekstremhændelsen tilnærmelsesvis er normalfordelt, og
- d) at variationskoefficienten af det sammensatte ekstremrespons kan vægtes lineært i forhold til maksimumværdierne.

C2 Bestemmelse af lastsammensætning ved udvalgt sandsynlighedsniveau for ekstremlast

Nedenfor gives en foreløbig og forenklet metode til bestemmelse af den vægtede partialkoefficient. Det er kritisk for resultatet, at der foretages en nøje udvælgelse af den kombinerede hændelse for vindlast og bølge/islast.

Idet vindlastens partialkoefficient på 1,5 svarer til at vindlasten optræder med sandsynligheden $p = 7,6 \times 10^{-4}/\text{år}$ ($T = 1320$ år) kan partialkoefficienter for sammensatte laster (f_R) bestemmes ud fra sammenligning af resultater fra 2 simuleringer som forholdet mellem største kombinerede last svarende til 1320-års- hhv. 50-års-hændelsen ($p = 7,6 \times 10^{-4}/\text{år}$ hhv. $p = 2 \times 10^{-2}/\text{år}$). Idet en situation med isflager så små, at bølger kan forekomme, antages ikke at være dimensionsgivende betragtes følgende to lastkombinationer:

1. 1320-årshændelsen for både vind- og bølgelast, og
2. 1-årsdriftshændelsen for vindlast kombineret med 1320-årshændelsen for islast.

De tilhørende partialkoefficienter bestemmes så ved:

Sammensat vind og bølgelast:

$$f_R = R_{\max} (\text{vind} + \text{bølger for } p = 7,6 \times 10^{-4}/\text{år}) / R_{\max} (\text{vind} + \text{bølger for } p = 2 \times 10^{-2}/\text{år})$$

Sammensat vind og islast:

$$f_R = R_{\max} (\text{vind for } p = 1/\text{år} + \text{is for } p = 7,6 \times 10^{-4}/\text{år}) / R_{\max} (\text{vind for } p = 1/\text{år} + \text{is for } p = 2 \times 10^{-2}/\text{år})$$

For vindlast regnes med at partialkoefficienten nogenlunde ligeligt dækker hensyntagen til variationskoefficienten og til modelusikkerheden. Det bemærkes at den valgte fremgangsmåde betyder, at den relative betydning af modelusikkerheden, der antages for vindlastberegninger, også antages at være gældende for bølge- og islast, således at jo større variationskoefficient lasten har desto større er modelusikkerheden også. Da fordelingerne for bølge- og islast for den betragtede fundamentstype ofte fastlægges vha. modelforsøg, analyse af naturforholdene og interpolation, er det derfor væsentligt at man vurderer, om forsøgsresultaterne og feltmålingerne er behæftede med modelusikkerheder, hvis relative betydning er sammenlignelig med modelusikkerheden for vindlast. Det vil være på den sikre side, hvis man efterviser, at forsøgsresultaterne og analysen af feltforholdene overvurderer lasterne. Det bemærkes også, at de valgte lastkombinationer vurderes at være tilstrækkelige for den betragtede fundamentstype men ikke nødvendigvis almengyldig.

Man kunne alternativt vælge at bedømme de 3 indgående naturlaster til at indeholde en forholdsvis lille, middel eller stor variationskoefficient og tilhørende modelusikkerhed med følgende størrelsesorden af partialkoefficienter og tilknytte denne størrelsesorden i forbindelse med lastsammensætning:

Last	Variationskoefficient og modelusikkerhed for naturlast	Partialkoefficient
Vind	Middel	1,5
Bølger (topbrydning, inertikræfter dominerende)	Lille	1,2
Is (iskonus på fundament)	Stor	1,8

Tabel C1 Størrelsesordener for partialkoefficienter på naturlaster

I det følgende er yderligere beskrevet en metodik til at håndtere kombinerede laster under en driftsituation, hvor der er mange gentagne hændelser med samme vindforhold. Denne metodik anvendes også for ekstrem islast, hvor det ligeledes antages at der sammen med ekstreme isforhold optræder en vis mængde gentagne hændelser.

C3 Generelt om sammensætning af stationære stokastiske tidsserier

Hvis man overvejer to stokastisk uafhængige stationære bølgetidsserier (med samme retning), får man, at variansspektet for den sammensatte tidsserie er summen af de to variansspektre S_{η} .

Fra bølgeserie 1 : $m_{01} = \int_0^{\infty} S_{\eta_1}(f)df = \text{varians af } \eta_1^2(t) = \sigma_1^2$, $H_{s1} \cong 4 \sigma_1$, $H_{1(1\%)} = 1,5 H_{s1}$

Fra bølgeserie 2 : $m_{02} = \int_0^\infty S_{\eta_2}(f)df = \text{varians af } \eta_2^2(t) = \sigma_2^2$, $H_{s2} \cong 4 \sigma_2$, $H_{2(1\%)} = 1,5 H_{s2}$

hvor σ betyder spredningen, H_s betyder signifikant bølgehøjde, og $H_{(1\%)}$ betyder den bølgehøjde, der overskrides for 1% af bølgerne.

For den samlede tidsserie fås: $m_{0t} = m_{01} + m_{02}$, $\sigma_t = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{0,5}$, $H_{st} \cong 4 \sigma_t$, $H_{t(1\%)} = 1,5 H_{st}$

Udtrykkene for H_s og $H_{1\%}$ gælder tilnærmet, selv om bølgeperioderne afviger en del. Variansen af de to overlejrede signaler sammensættes altså lineært, mens spredningen sammensættes kvadratisk. Alle andre parametre er ca. proportionale med spredningen. Selv i tilfælde med en relativt stor periodeforskel i tidsserierne, hvor det sammensatte spektrum bliver to-toppet, kan det sammensatte bølgetogs parametre relateres til den samlede spredning.

Tilsvarende gælder det for ukorreleerede stokastiske kraft/momenttidsserier, at variansen af to sammensatte tidsserier tilsvarende findes som summen af de to oprindelige varianser, dvs. altså lineært, mens spredningen tilsvarende sammensættes kvadratisk. Når periodeindholdet er noget forskelligt og den fysiske karakter giver en forskellig fordelingsfunktion, kan der optræde en forskellig faktor (k) imellem maximumhændelse (middel-max) minus middelværdien og spredningen. Men det er ikke anderledes end sammensætning af bølgetog med forskellige bølgespektre.

Den enkleste måde at vægte dette på er, at antage at maksimum (middel-max) i den sammensatte tidsserie kan beregnes som kvadratisk sum af afvigelserne fra middelværdier plus den lineære sum af middelværdierne. På denne måde opnås automatisk en vægtning af den faktor k_t på spredningen, som maksimumhændelserne afviger fra middelværdien med:

$$F_t = F_{\text{middel 1}} + F_{\text{middel 2}} + ((F_{\text{max,1}} - F_{\text{middel 1}})^2 + (F_{\text{max,2}} - F_{\text{middel 1}})^2)^{1/2}$$

$$F_{\text{max,1}} = F_{\text{middel 1}} + k_1 \sigma_1$$

$$F_{\text{max,2}} = F_{\text{middel 2}} + k_2 \sigma_2$$

$$F_t = F_{\text{middel 1}} + F_{\text{middel 2}} + k_t \sigma_t$$

$$\sigma_t = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2}$$

$$k_t \sigma_t = ((k_1 \sigma_1)^2 + (k_2 \sigma_2)^2)^{1/2}$$

Ud fra simuleringer udført af bl. a. Risø har det vist sig, at naturlaster på havvindmøllefundamenter i en række tilfælde tilnærmelsesvis har fulgt denne simple sammensætningsmodel på trods af, at hovedindholdet i vindlasten er domineret af en tårnperiode omkring 2,5 s, mens bølgelasten typisk har den dobbelte periode. Eksempler på anvendelser og etablering af en procedure til at bestemme et konsistent sæt dimensionsgivende forhold på basis af parametre bestemt ved simuleringer er vist nedenfor. Jo mere forskellige de to krafttidsserier er med hensyn til periodeindhold og faktor imellem maximumhændelse minus middelværdi og spredning, jo dårligere vil en simpel sammensætningsmodel passe. F.eks. kan en islast indeholde en højfrekvent komponent, der må vurderes for sig selv. Tilsvarende kan islasten skifte brudtype og middelværdi, som igen må vurderes for sig selv.

For fuldt korreleerede hændelser, hvor maksimum i den ene tidsserie optræder samtidigt med maksimum i den anden, gælder:

$$F_t = F_{\max,1} + F_{\max,2} = F_{\text{middel } 1} + F_{\text{middel } 2} + ((F_{\max,1} - F_{\text{middel } 1})^1 + (F_{\max,2} - F_{\text{middel } 1})^1)^{1/1}$$

Om nødvendigt kan en delvis korreleret empirisk sammensætning defineres ved hjælp af:

$$F_t = F_{\text{middel } 1} + F_{\text{middel } 2} + ((F_{\max,1} - F_{\text{middel } 1})^n + (F_{\max,2} - F_{\text{middel } 1})^n)^{1/n},$$

hvor $1 < n < 2$

C4 Eksempel på bestemmelse af vægtede partialkoefficienter for ekstrem vind og bølgelast

Eksempel:

Eksempel	Vanddybde	Kombination	hyppighed	Vindlast (max.)*		Bølgelast (max.)**		Vind + bølgelast***		f _{Fx}	f _{My}
				F _x	M _y	F _x	M _y	F _x	M _y		
	m			MN	MNm	MN	MNm	MN	MNm	-	-
1	5,8	Alle	2x10 ⁻²	0,56	38,8	1,60	10,6	1,90	41,5	1,00	1,00
	5,8	Vind	7,6 x10 ⁻⁴	0,84	58,2					1,50	1,50
		Bølger				1,92	13,1			1,20	1,20
		Vind + bølger		0,84	58,2	1,92	13,1	2,39	61,4	1,26	1,46
2	10	Alle	2x10 ⁻²	0,56	41,1	2,20	24,2	2,50	52,3	1,00	1,00
	10	Vind	7,6 x10 ⁻⁴	0,84	61,7					1,50	1,50
		Bølger				2,64	29,0			1,20	1,20
		Vind + bølger		0,84	61,7	2,64	29,0	3,09	73,2	1,24	1,40

* DS472

** bestemmes ved modelforsøg kombineret med statistisk sammensætning (foreløbigt typisk skøn)

*** bestemmes ved simuleringer af kombinerede tidsserier. Foreløbigt skøn: Der antages at middel vindlasterne er halvdelen af de maksimale vindlaste og at de kombinerede laster kan beregnes ud fra $F_x = 0,5 F_{x,\text{vind}} + ((0,5 F_{x,\text{vind}})^2 + (F_{x,\text{bølge}})^2)^{0,5}$ og $M_y = 0,5 M_{y,\text{vind}} + ((0,5 M_{y,\text{vind}})^2 + (M_{y,\text{bølge}})^2)^{0,5}$

Tabel C2 Eksempel på bestemmelse af partialkoefficienter ved metode C2

Det bemærkes at i dette eksempel er det fra forsøgsresultater vægtet med sandsynlighedsfordeling for aktuelle bølge- og vandstandsforhold fundet, at partialkoefficienten for bølgelast på den sikre side kan fastsættes til 1,20, og at eksemplet er baseret på forudsætningerne a) og b) fra afsnit C1. Det er således, hvad angår forudsætning a), antaget, at middelvindkraften udgør halvdelen af middel-max. Det fremgår af ovenstående, at partialkoefficienten på den kombinerede last for horisontalkraft i ovenstående eksempel er af størrelsesordenen 1,25, mens partialkoefficienten på væltende moment er af størrelsesordenen 1,45.

C5 Sammensætning af driftlaster med tilhørende bølgelast

Først bestemmes antal gentagelser n af den betragtede driftsituation i levetiden for hhv. drift vindlast og drift vindlast kombineret med bølgelast. Der defineres en sik-

kerhedsfilosofi baseret på en antagelse om at vejret bliver gennemsnitligt dårligere i hele levetiden, svarende til at hyppigheden for maksimumhændelsen i den betragtede driftsituation optræder dobbelt så hyppigt som normalt. Antal hændelser multipliceres derfor med en faktor 2.

Der udføres derefter en række simuleringer af vindlast og simuleringer/modelforsøg af bølgelast til bestemmelse af maksimumrespons for hver af naturlasterne. Udfra disse bestemmes på grundlag af metoden beskrevet i afsnit C3 fordelingsfunktionen for maksimumhændelsen. Da specielt halen af denne fordeling er vigtig for ekstrapolationen fra 1 til n gentagelser af den betragtede driftsituation, skal antallet af simuleringer, hvis man med sikkerhed skal fastslå halens fordeling, vælges væsentligt større end de fem, der anføres i afsnit 3.1.2 for bestemmelse af maksimumhændelsens middelværdi. Ellers bør man antage, at ekstremerne har en bestemt fordeling (f.eks. Gumbel) og så blot estimere parametrene i denne fordeling udfra et passende antal simuleringer, der typisk skal være større end fem. Det er m.a.o. vigtigt at bemærke, at det i afsnit 3.1.2 fastsatte antal simuleringer kun gælder for middelværdibestemmelse. Bestemmelse af andre fordelingsegenskaber kræver som hovedregel flere simuleringer. Det er også vigtigt at bemærke, at en konklusion, der hviler på et større antal simuleringer, ikke nødvendigvis er bedre end et resultat, der hviler på en fordelingsantagelse kombineret med et beskedent antal simuleringer.

Nogle foreløbige analyser har vist, at det kan antages, at i hvertfald maksimumhændelsen for forskydningskraften under fundamentet i driftsituationen er normalfordelt. For det væltende moment viser undersøgelser, at maksimumhændelsen er Gumbelfordelt. Ud fra de forskellige simuleringer bestemmes bedste skøn på spredningen. Hvis der er afvigelser fra antagelsen om normalfordeling lægges der vægt på de mest sjældne hændelser og herudfra bestemmes et forsigtigt skøn for spredning i den tilnærmede normalfordeling. Ud fra antallet af hændelser (n) bestemmes derefter den faktor k , som spredningen i forhold til middel-max. værdien skal ganges med for at sandsynligheden for overskridelse bliver $1/n$. Faktoren k for normalfordelingen er vist på Fig. C1.



Fig. C 1 k-faktor i normalfordeling

På Fig. C2 og C3 er illustreret de relative fordelinger i forhold til middel-max. hændelserne for hhv. horisontalkraft (F_x) og væltende moment (M_y).

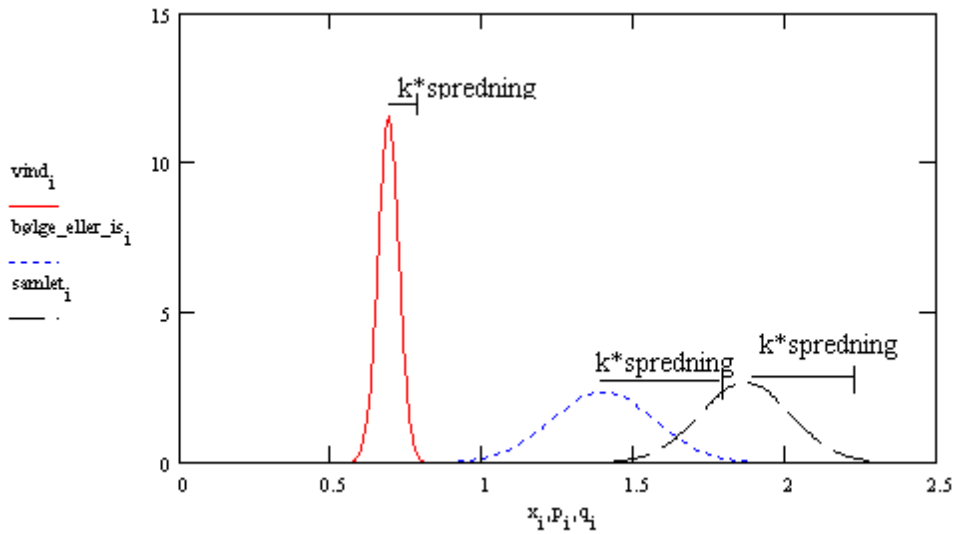


Fig. C2 Illustration af fordelingsfunktioner for maksimal horisontalkraft fra vind, bølger /is og sammensat vind med bøger/is for en given simuleringsperiode og i en given driftsituation.

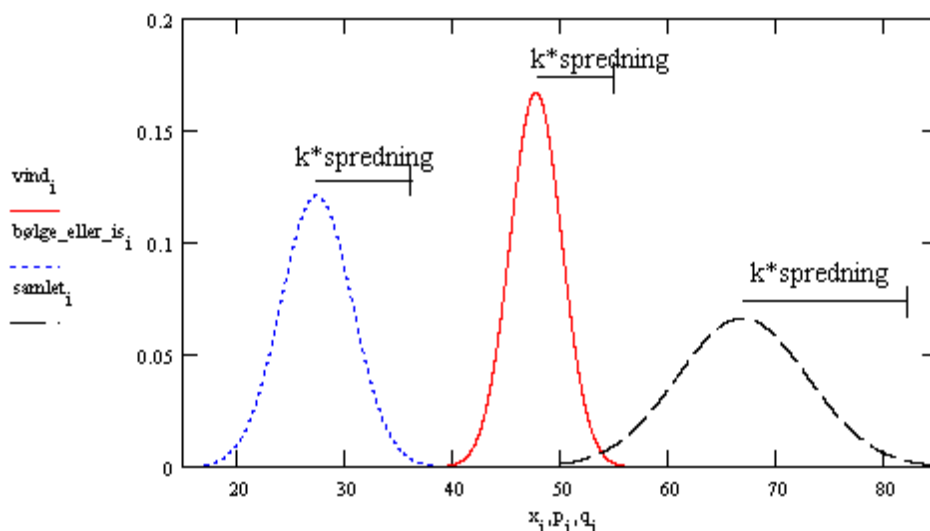


Fig. C3 Illustration af fordelingsfunktioner for maksimalt væltende moment fra vind, bølger /is og sammensat vind med bølger/is for en given simuleringsperiode og i en given driftsituation.

Eksempel:

Eksempel	Vanddybde	Antal 10 min. hændelser i levetid	Vindlast (max.)			Bølgelast (max.)			Vind + bølgelast**						
			F _{xv} (mid-del-max)	M _{yv} (mid-del-max)	V _v	F _{xb} (mid-del-max)	M _{yb} (mid-del-max)	V _b **	F _x (mid-del-max)*	M _y (mid-del-max)*	1+ kV _{Fx}	1+ kV _{My}	F _x (max) ***	M _y (max) ***	
	m		MN	MNm		MN	MNm		MN	MNm				MN	MNm
1	5,8	3.000	0,69	44,8	0,05	1,40	9,3	0,12	1,87	47,4	1,35	1,22	2,52	57,9	
2	10	3.000	0,69	47,7	0,05	1,93	21,2	0,12	2,39	58,0	1,37	1,26	3,27	72,9	

* Foreløbigt skøn for middel-max værdier (baseret på at middelvindlast er 65 % af maksimal vindlast):
 $F_x = 0,65 F_{x,vind} + ((0,35 F_{x,vind})^2 + (F_{x,bølge})^2)^{0,5}$ og $M_y = 0,65 M_{y,vind} + ((0,35 M_{y,vind})^2 + (M_{y,bølge})^2)^{0,5}$

** gælder kun for kraftigt dybdebegrænsede bølgelaster med dominans af inertikræfter

*** $F_x(\text{max}) = F_x(\text{middel-max}) \times (1 + kV_{Fx})$

*** $M_y(\text{max}) = (M_y(\text{middel-max}) \times (1 + kV_{My}))$

hvor k bestemmes ud fra antal hændelser for normalfordelingen (k = 3,1 for n = 1000, k = 3,4 for n = 3.000, k = 3,75 for n = 10.000, k = 4,05 for n = 30.000)

Tabel C3 Eksempel på bestemmelse af maksimal sammensat driftvindkraft og tilhørende bølgekraft

Foreløbigt skøn: $V_{Fx} = (V_v \times F_{xv} + V_b \times F_{xb}) / (F_{xv} + F_{xb})$, $V_{My} = (V_v \times M_{yv} + V_b \times M_{yb}) / (M_{yv} + M_{yb})$

Det bemærkes at eksemplet er baseret på forudsætningerne c) og d) i afsnit C1. Der er for dette lasttilfælde ikke nogen partialkoefficient men en faktor = 1 + kV på hhv. ca. 1,35 for horisontalkraft og ca. 1,25 for væltende moment, der indeholder hensyntagen til antal gentagelser og til variationskoefficienten. Der er således ikke medtaget et

bidrag fra modelusikkerheden ved bestemmelse af partialkoefficienten. Bemærk endvidere, at V_v står for variationskoefficienten af F_{xv} og M_{yv} og tilsvarende for V_b , V_{Fx} og V_M . Variationskoefficienten er defineret ved

$$V_v = \frac{\text{spredning af max } F_{xv}}{\text{middel-max af } F_{xv}}$$

C6 Sammensætning af ekstrem islast med tilhørende (drift) vindlast

Først bestemmes antal gentagelser af den betragtede driftsituation i levetiden for ekstrem islast kombineret med drift vindlast. Der udføres derefter en række simuleringer/modelforsøg af islast og for vind (se afsnit C5 for en diskussion angående det nødvendige antal simuleringer) til bestemmelse af fordelingen af maksimumhændelsen. For islast omregnes til en hændelse svarende til en hyppighed på hhv. 2×10^{-2} (karakteristisk last) og $7,6 \times 10^{-4}$ (designlast). I eksemplet nedenfor svarer det til at den karakteristiske last multipliceres med en faktor på ca. 2,0 (for den slags bøjningsbrud, der opstår ved konuskonstruktioner) for at finde islasten svarende til en hyppighed på $7,6 \times 10^{-4}$. Derefter udføres der tilsvarende simuleringer af de kombinerede hændelser. Nogle foreløbige analyser har vist, at det kan antages, at i hvertfald maksimumhændelsen for forskydningskraften under fundamentet er normalfordelt. Ud fra de forskellige simuleringer bestemmes bedste skøn på spredningen. Hvis der er afvigelser fra antagelsen om normalfordeling lægges der vægt på de mest sjældne hændelser og herudfra bestemmes et forsigtigt skøn for spredning i den tilnærmede normalfordeling.

Eksempel:
Hyppighed 2×10^{-2} :

Eksempel	Vanddybde	Antal 10 min. hændelser	Vindlast (max.)			Islast (max.)			Vind + islast**					
			F_{xv} (mid-del-max)	M_{yv} (mid-del-max)	V_v	F_{xi} (mid-del-max)	M_{yi} (mid-del-max)	V_i **	F_x (mid-del-max)*	M_y (mid-del-max)*	1+ kV_{Fx}	1+ kV_{My}	F_x (max)***	M_y (max)***
			MN	MNm		MN	MNm		MN	MNm			MN	MNm
1	5,8	100	0,69	44,8	0,05	1,00	10,3	0,12	1,51	51,1	1,21	1,15	1,82	58,6
2	10	100	0,69	47,7	0,05	1,00	14,8	0,12	1,51	57,1	1,21	1,15	1,82	65,9

Hyppighed $7,6 \times 10^{-4}$:

Eksempel	Vanddybde	Antal 10 min. hændelser	Vindlast (max.)			Islast (max.)			Vind + islast**					
			F_{xv} (mid-del-max)	M_{yv} (mid-del-max)	V_v	F_{xi} (mid-del-max)	M_{yi} (mid-del-max)	V_i **	F_x (mid-del-max)*	M_y (mid-del-max)*	1+ kV_{Fx}	1+ kV_{My}	F_x (max)***	M_y (max)***
			MN	MNm		MN	MNm		MN	MNm			MN	MNm
1	5,8	100	0,69	44,8	0,05	2,00	20,6	0,12	2,48	58,7	1,23	1,17	3,05	68,4
2	10	100	0,69	47,7	0,05	2,00	29,6	0,12	2,48	68,6	1,23	1,18	3,05	80,7

* Foreløbigt skøn for middel-max værdier for fundament med iskonus:

$$F_x = 0,65 F_{x,vind} + 0,55 F_{x,is} + ((0,35 F_{x,vind})^2 + (0,45 F_{x,is})^2)^{0,5}$$

$$\text{og } M_y = 0,65 M_{y,vind} + 0,55 M_{y,is} + ((0,35 M_{y,vind})^2 + (0,45 M_{y,is})^2)^{0,5}$$

** gælder kun for islast på konus og med middel vindlast = 65 % af maksimal vindlast

*** $F_x(\text{max}) = F_x(\text{middel-max}) \times (1 + kV_{Fx})$, $M_y(\text{max}) = M_y(\text{middel-max}) \times (1 + kV_{My})$

hvor k bestemmes ud fra antal hændelser for normalfordelingen (k = 2,3 for n = 100, k = 3,1 for n = 1000, k = 3,4 for n = 3.000, k = 3,75 for n = 10.000, k = 4,05 for n = 30.000)

Tabel C4 Eksempel på bestemmelse af maksimal sammensat ekstrem iskraft med drift-vindkraft. Se teksten til tabellen i afsnit C5 for en beskrivelse af variationskoefficienterne V_v , V_i og fremdeles.

For denne situation er der en partialkoefficient, der indeholder forskel på middelmax værdierne på hhv. ca. 1,65 for horisontalkraft (2,48/1,51) og ca. 1,20 for væltende moment (hhv. 58,7/51,1 og 68,6/57,1). Disse faktorer tager højde for bla. modelusikkerhed under de forudsætninger, der er givet i afsnit C2. Derudover findes en faktor = 1 + kV på ca. 1,20, der indeholder hensynstagen til antal gentagelser og til variationskoefficienten.

Der udføres foreløbigt alene en vurdering af et stift fundament med islast på 55° konus uden væsentlig dynamisk forstærkning. Ud fra forsøg med islast bestemmes følgende (middel-maksimum) parametre for islast:

$$F_i = F_{i0} + F_{ivar} + F_{ihøj}$$

hvor

F_{i0} = kvasistationær komponent

F_{ivar} = varierende komponent i periodeinterval ca. 1-10 s

$F_{ihøj}$ = højfrekvent komponent

Der anvendes følgende grove model:

Vandret: $F_{i0} + F_{ihøj} = 0,55 F_i$, $F_{ivar} = 0,45 F_i$,

Lodret: $F_{iz} = 0,5 F_i$ virkende i højvandspejl

Foreløbigt skøn: $V_{Fx} = (V_v \times F_{xv} + V_i \times F_{xi}) / (F_{xv} + F_{xi})$

$V_{My} = (V_v \times M_{yv} + V_b \times M_{yi}) / (M_{yv} + M_{yi})$

Ud fra granskningsnote (se Ref. /4/ til afsnit 3.3.3), som beskriver Ralstons teori og giver et skøn for tidsvariationen, kan anvendes $F_{i0} = 0,55 F_i$, $F_{ivar} = 0,45 F_i$ (her er ikke medtaget en højfrekvent komponent). Til gengæld er F_{i0} beregnet fra Ralstons formel større end fra forsøg.

Bilag D. IEC Klasse S beskrivelse

IEC(ENV) 1400-1, 1.edition:1994 (Wind Turbine Generator systems – Safety requirements) og IEC 61400-1, 2.edition:1999 er ikke gældende normer, hverken i Danmark eller i Europa. Der er her, som en hjælp til den der måtte søge godkendelse i lande, der har implementeret IEC-normen, foretaget en 'oversættelse' af den heri beskrevne danske normmølle til en IEC-klasse S mølle som specificeret i IEC 61400-1, 2.edition:1999.

Der kan i specielle tilfælde være tale om at supplere de danske normer med f.eks. DIN normer.

Tabuleringen nedenfor svarer til kravene specificeret i IEC 61400-1, ed.2, Anneks A. Der er dog tilføjet en specifikation af den strukturelle sikkerhed, der skal tilstræbes.

D.1 Maskinparametre

Forhandles mellem køber/sælger og udfyldes

Maskinparametre:	Parameter	Dim.
Maksimal effekt		kW
Navhøjde vindhastigheds-driftområde	$V_{in} - V_{out}$	m/s
Teknisk levetid		år

D.2 Vindforhold

Vindforhold:	Parameter	Dim
Karakteristisk turbulensintensitet som funktion af middelvindhastighed, udmattelse	$I = 1 / \ln(h / z_0)$ $z_0 = 0,001 \text{ m}^{(4)}$	-
Karakteristisk turbulensintensitet som funktion af middelvindhastighed, extremvind	$I = 1 / \ln(h / z_0)$ $z_0 = 0,004 \text{ m}$	-
Årsmiddelvindhastighed De angivne årsmiddelvindhastigheder kan kun anvendes til strukturelle beregninger.	50 m højde. Extrapoleres efter DS 472 med $z_0 = 0,001 \text{ m}$ De indre danske farvande: 8,5 Beregning efter Wasp eller lign.	m/s
Middel hældning af strømning	0	Deg.
Vindhastighedsfordeling (Weibull, Rayleigh, measured, other)	Weibull, parameters from European Wind Atlas	
Basisvindhastighed	Se f.eks. tillæg til DS 472	m/s m/s
(NWP) Normal vindprofil model og parametre	Logaritmisk profil. $v_{10 \min}(v) = v_b k_t \ln(h / z_0)$ $z_0 = 0,001 \text{ m}, k_t = 0,16$	m/s
Turbulens model og parametre	Kaimal, $\chi(L, n) = \exp(-12(nL / V_{10 \min}))$	m/s
Model for park-genereret turbulens	Se f.eks. tillæg til DS 472	
(EWM) Ekstremvindhastighed i navhøjde	$V_{e50} = v_b k_t (\ln(h_{nav} / z_0) + 3)$, $z_0 = 0,004 \text{ m}, k_t$ se NWP ovf. $V_{e1} = 0,75 V_{e50}, V_{eN} \text{ 2s middel}$	m/s m/s
(EOG) Model for ekstrem vindstød og parametre, for 1 og 50 års returperiode	Benyttes ikke i DK. For export benyttes IEC 61400-1 - model	
(EDC) Ekstrem vindretningsændring: model, og parametre for 1 og 50 års returperiode	Benyttes ikke i DK. For export benyttes IEC 61400-1 - model	
(ECG) Model for ekstrem kohærent vindstød og parametre	Benyttes ikke i DK. For export benyttes IEC 61400-1 - model	
(EDC) Model for ekstrem kohærent vindstød med	På 30 s: både	

⁴ Gælder på havet. Hvis møllen skal anvendes også på land, skal en højere z_0 værdi vælges og anføres her

vindretningsdrejning og parametre	Vindhastighed 10→25, Retning 0→90	m/s, deg
(EWS) Model for ekstrem vertikal vindhastighedsændring of parametre	Benyttes ikke i DK. For export benyttes IEC 61400-1 - model	
Vindforhold under bygning og drift	Separat rapport	

D.3 Strukturel sikkerhed

Definitionen af strukturel sikkerhed er ikke medtaget i IEC 61400-1, annek A. Imidlertid er en mølle, der bygges til et andet sikkerhedsniveau end 61400-1, også en klasse S mølle (IEC61400-1, afsnit 5.3, para 3). Endvidere er det meningen med definitionen i annek A, at det skal være klart, hvilket mølledesign, der tales om. Derfor må dette afsnit D.3 medtages i en klasse S specifikation.

Møllernes strukturelle sikkerhed fastlægges i følge danske normer.

For brug i IEC 61400-1 sammenhæng kan sikkerhedsniveauet illustreres ved følgende væsentlige partialkoefficienter⁶ for normal sikkerhedsklasse

Partialkoefficienter⁵:

Parameter	Danske normer, γ	Fraktil p%, COV $\delta\%$	IEC 61400-1, γ	IEC 61400-1 med valg af danske materialenormer.
Luftlast	1,5		1,35	1,35
Tyngdelast	1,0		1,1	1,1
Inertilaster	1,0		1,25	1,25
Funktionslaster	1,3		1,35	1,35
Stål, flydespænding	1,30	5%,5%	>1,04	1,30
Armering	1,25	5%,5%	>1,04	1,25
Beton	1,48	5%,15%	>1,16	1,48

Første søjle viser et udvalg af partialkoefficienter, når udelukkende danske normer skal benyttes. Sammenligning med IEC 61400-1 kan ikke blive præcis, da denne ikke har noget veldefineret sikkerhedsniveau. Det skyldes, at det er valgfrit, hvilket nationalt normsæt for materialer, der bruges. I Danmark vil man for eksempel bruge danske materialenormer. Derfor vil IEC 61400-1's sikkerhedsniveau afhænge af, hvilke materialenormer, der benyttes. Sidste søjle antyder niveauet, hvis danske materialenormer benyttes sammen med IEC 61400-1. Niveauet vil ændres, hvis materialenormer fra andre lande benyttes.

Fundament, tårn, nacelle og rotor konstrueres til normal sikkerhedsklasse⁷. Konstruktionselementer i sikkerhedssystemet af sikkerhedsmæssig betydning konstrueres til høj sikkerhedsklasse.

D.4 Elektriske forhold

Denne tabel bør udfyldes efter forhandlinger køber/sælger

⁵ Denne opstilling af partialkoefficienter tjener kun til illustration i forbindelse med IEC, klasse S beskrivelsen. Angående krav til partialkoefficienter i dette havmølledesigngrundlag henvises til de foregående kapitler.

⁶ Ordet 'sikkerhedsniveau' benyttes som betegnelse for kombinationen af valgte partialkoefficienter og fraktiler valgt som karakteristiske værdier for laster og materialestyrker.

⁷ Sikkerhedsklasser defineret i DS 409.

Elektriske netforhold	Parameter	Dim.
Normal spænding og variationsinterval		V
Normal netfrekvens og variationsinterval		Hz
Spændings ubalance		V
Maksimal varighed af netudfald		sec,h,days
Antal elektriske udfald		år ⁻¹
"Auto-reclosing cycles" (beskrivelse)		
Opførsel ved symmetrisk og usymmetrisk fejl (beskrivelse)		

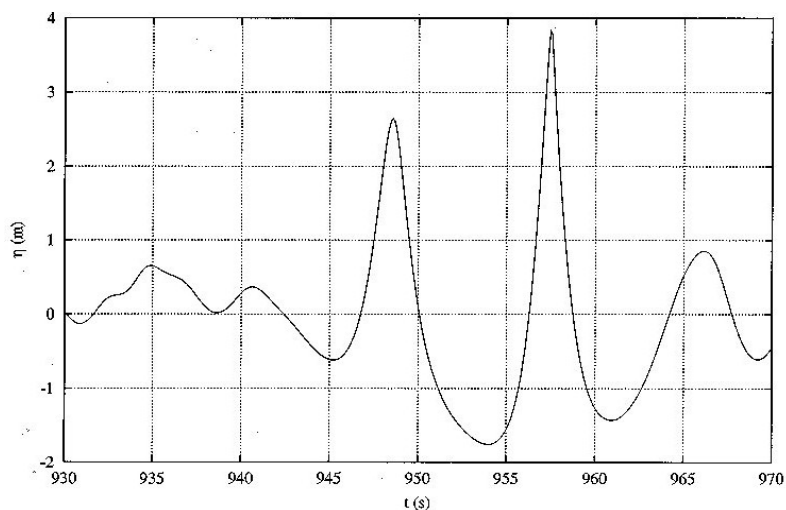
D.5 Andre ydre betingelser

Andre, ydre betingelser	Parameter	Dim.
Jordbundsstyrker, statik	Del 3	
Jordstyrker, dynamik	Del 3	
Normal vandstand og ekstreme	Del 2	
Model for bølger og bølgeretning, ekstreme højder svarende til 1 og 50 års "reccurence" intervaller	Del 2	
Model for strøm, ekstreme hastigheder svarende til 1 og 50 års "reccurence" intervaller	Del 2	
Model for iskræfter: ekstreme iskræfter som funktion af tværsnit, svarende til 1 og 50 års "reccurence" intervaller	Del 2	
Skibsstød	Del 2	
Begroning (beskrivelse)	Del 2	
Materialer (beskrivelse)	Del 4	
Normal og ekstreme temperaturer	DS 472	°C
Luftfugtighed	Detaljeret undersøgelse	%
Densitet af luften	DS 472	kg/m ³
Sol(ind)stråling	1000	W/m ²
Regn, hagl, sne og overisning (overisning: se Del 3)		
Kemisk aktive substanser		
Mekanisk aktive partikler		
Beskrivelse lynbeskyttelsessystem	Del 5	
Jordskælv model og parametre		
Saltholdighed	Detaljeret undersøgelse	g/m ³

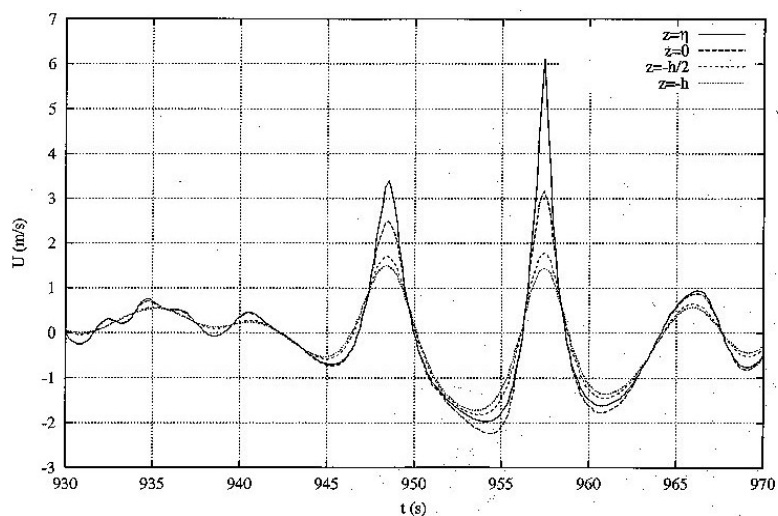
Bilag E: Illustrationer af bølger på lavt vand

I dette bilag gives eksempler på resultater fra beregning af kinematik i høje bølger på lavt vand (Per Madsen og Harry Bingham). Resultaterne illustrerer modellens evner til at håndtere stejle bølger.

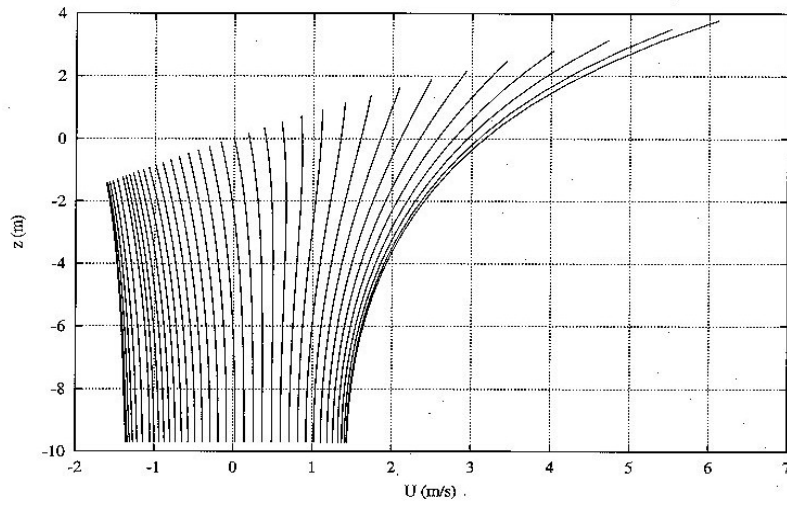
Figuren viser bølgeelevationen (η) som funktion af tiden (t) for et udsnit af en tidsserie omfattende største beregnede bølgetop ved vindmølle:



Nedenstående figur viser samtidige vandrette hastigheder u (i m/s) som funktion af t ved vindmølle i forskellige niveauer (bølgetop ($z = \eta$), midlevandspejl ($z = 0$), halv vanddybde ($z = -h/2$) og havbund ($z = -h$)) for samme tidsserie som ovenfor:



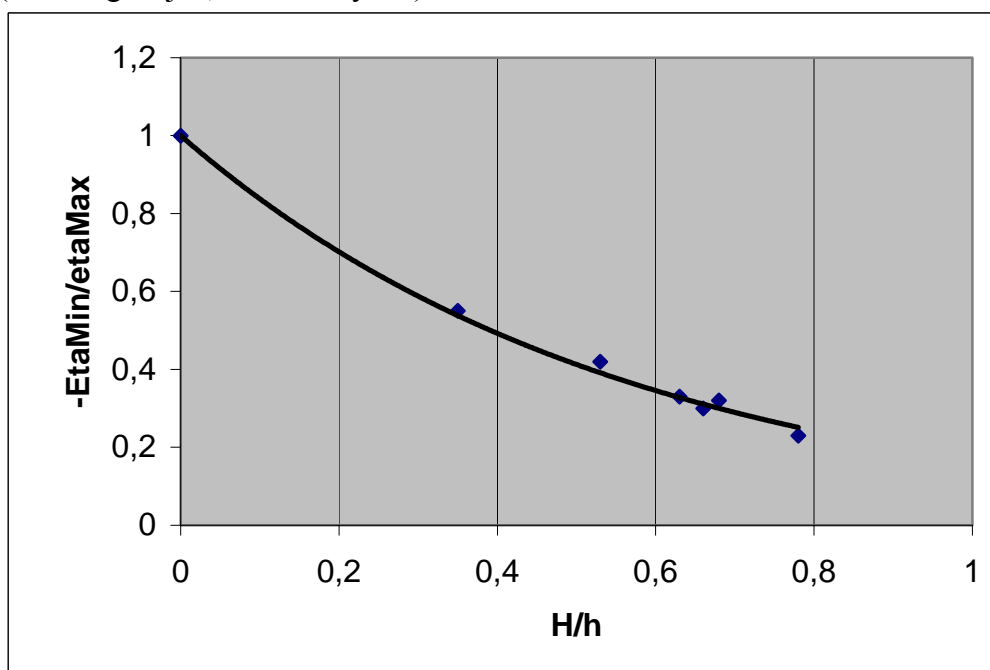
Nedenstående figur viser vandrette hastigheder tæt på største bølgetop: Der vises tidstrin fra bølgedal før bølgetop (ca. $t = 954$ s) til bølgetop (ca. $t = 957,5$ s).



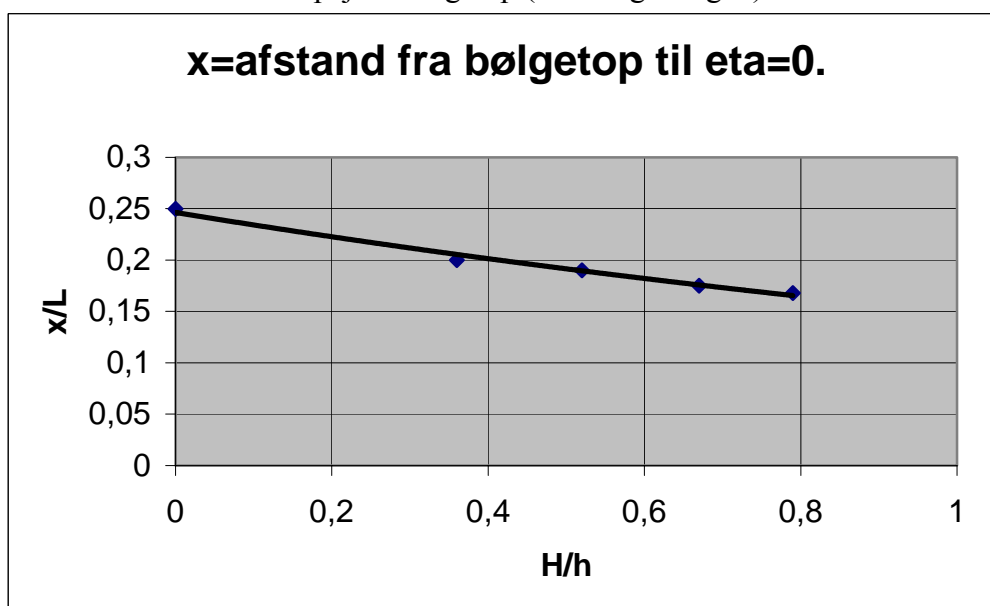
E.1 Typiske bølgeparametre for høje bølger på lavt vand (enkeltbølger beregnet ud fra strømfunctionsteorien).

Nedenstående kan anvendes til grafisk at skønne bølgeprofilen for enkeltbølger ud fra de 3 punkter, der kan aflæses, når bølgehøjde, bølgelængde og vanddybde er fastlagt, og der skønnes, at bølgeprofilen er symmetrisk omkring bølgetop.

Figuren forholdet bølgedal (EtaMin) / bølgetop (EtaMax) for forskellige bølgehøjder (H = bølgehøjde, h = vanddybde):



Afstand fra middelvandspejl til bølgetop (L = bølgelængde):



Bilag F - Særlige forhold ved specifikke funderingskoncepter

Det skal til enhver tid dokumenteres, at jordbundsforhold med større styrker og stivheder end angivet ikke giver anledning til bæreevnebrud, uacceptable spændingskoncentrationer samt deformationer i såvel konstruktion som jord med tilhørende følgeskader. Dette gælder også krav til tilladelig skævsætning af konstruktionen.

For alle fundamentstyper skal effekten på jordstivheden af den cykliske belastning vurderes, og det skal eftervises, at ingen kritisk respons vil opstå indenfor de usikkerheder, der er knyttet til den anvendte analysemetode. Effekten skal evt. underbygges af laboratorieforsøg, hvor prøven (-erne) udsættes for en lasthistorik svarende til det værste dynamiske belastningstilfælde.

Direkte fundering

Der skal blandt andet tages hensyn til følgende relevante grænsetilstande:

- Svigt af totalstabilitet
- Bæreevnebrud
- Glidningsbrud
- Kombineret brud i jord og konstruktion
- Brud som følge af fundamentbevægelser
- Uacceptable flytninger og vibrationer
- Egenfrekvensanalyser

For direkte funderede konstruktioner skal effekten af cyklisk belastning på jordstivheden vurderes, og det skal eftervises, at ingen kritisk respons vil opstå indenfor de usikkerheder, der er knyttet til den anvendte analysemetode. Effekten skal evt. underbygges af laboratorieforsøg, hvor prøven (-erne) udsættes for en lasthistorik svarende til det værste belastningstilfælde som vurderes at hidrøre fra vindlasten. Da arbejdskurverne for konstruktion og jord er vanskelige at fastlægge bør konstruktionen derfor behandles i skærpet funderingsklasse

Glidning

Såfremt der regnes med passivt jordtryk skal der foreligge en dokumentation for den forventede skadeprocent (f.eks. erosion), også hvis tilfyldning omkring fundamentet indregnes. Den tilladelige maksimale skadeprocent skal til enhver tid afstemmes efter det konkrete projekt

Glidningsundersøgelsen skal omfatte såvel vandrette kræfter som torsionsmomenter om konstruktionens lodrette akse.

Glidning skal undersøges i 2 tilfælde:

- Efter DS 415
- Ved fundering på lerlag skal undersøges muligheden for opblødning af lerlaget. $c_u = k \times \sigma'$, hvor parameteren k (typisk værdi: $0,4 < k < 0,55$) fastlægges på grundlag af forsøg eller erfaringsværdier for tilsvarende jordarter, samt under hensyn til relevant deformationshastighed.

Egensvingninger

I forbindelse med beregning af egensvingningstider kan fundamentet påsættes fjedre, der afspejler jordens stivhed, se f.eks. DNV (1992) Classification Notes N0. 30.4, Foundations.

Endvidere skal drænforholdene normalt antages således, at de virker til ugunst for konstruktionen.

I forhold til sædvanlige danske geologiske formationer fremhæves følgende:

- Uhærdet kalk (H1): Friktionsforhold skal afklares.
- Sprækket hærdet kalk: Såfremt der ikke kan optages intakte prøver skal de geotekniske egenskaber belyses gennem relevante in-situ forsøg f.eks. pressiometerforsøg.

Direkte fundering – skørt

Såfremt fundamentets stabilitet er baseret på en hel eller delvis udnyttelse af differensvandtryk til optagelse af kortvarige trækkræfter, skal dokumentationen endvidere indeholde vurdering af sikkerhed mod hydraulisk instabilitet.

Såfremt skørtfundamenter udnyttes til optagelse af vandrette kræfter skal der foreligge dokumentation for stabilitet af såvel konstruktion som den omkringliggende jord.

Såfremt skørtet har været udsat for en obstruktion med tilhørende skadesforvoldelse, og skørtet indgår i den samlede konstruktion, skal der ses bort fra skørtets stabiliserende bidrag til konstruktionens virkemåde.

Pælefundering

Pælefunderede fundamenter med store pæledimensioner (inkl. forbindelse imellem pæle og struktur) skal dimensioneres i henhold til principperne i Offshorenormen DS 449 og almindelig offshore praksis (se f.eks. DNV Class Note 30.4).

Pælene skal dimensioneres for mulig erosion af havbunden omkring konstruktionen (scour).

Fundamentet skal undersøges i følgende situationer:

- Elastisk brudgrænsetilstand
- Plastisk brudgrænsetilstand
- Udmattelsestilstand, der skal indeholde effekterne af de egentlige udmattelsespåvirkninger på konstruktionerne samt en eventuel delskade forårsaget af påvirkningerne fra pæleramning
- Rambarhedsanalyse
- Egenfrekvensanalyse

I den elastiske brudgrænsetilstandsanalyse undersøges spændinger i pæle og struktur. Én pæl må højst nå op på flydespændingen.

I den plastiske brudgrænsetilstandsanalyse checkes totalstabiliteten af hele konstruktionen. I denne analyse må pælene flyde, blot pælene kan optage designbelastningerne.

Som et første skøn kan pælelængden for en tværbelastet pæl bestemmes ud fra kriteriet om, at der ikke må være nogen beregningsmæssig udbøjning i punktet hvor udbøjningslinien anden gang passerer den neutrale line under ekstrem last (zero toe-kick).

Ovenstående fører som regel til bestemmelse af en noget konservativ pælelængde. Et mere realistisk krav knytter den blivende deformation (pælens hældning i det lodrette plan) efter et stort antal lastvekslinger sammen med dels et æstetisk krav til hældning af vindmøletårn og dels et strukturelt krav vedrørende tillægspåvirkninger på møllekonstruktion og fundament.

Strukturen skal dimensioneres for den situation, hvor den står på havbunden på bærelplader/pæleskabelon, inden pælene rammes.

Eventuelle belastninger på den omgivende struktur fra pæleramning skal vurderes detaljeret.

I forhold til sædvanlige danske geologiske formationer fremhæves følgende: Ved overførsel af erfaringstal fra moræneler fra andre steder skal der lægges vægt på, om det gælder moræneler med samme kalkindhold, idet dette giver anledning til ændrede parametre.

Sugebøtter

Fundamentet skal undersøges for følgende situationer:

- Installation af sugebøtterne.
- Plastisk brudgrænsetilstand
- Anvendelsestilstanden
- Egenfrekvensanalyse
- Shake up

Bøtterne skal dimensioneres således, at de kan nedpresses ved egenvægt eller suges ned ved hjælp af undertryk inde i bøtten. Sugens bøtterne ned skal det eftervises, at penetrationsmodstanden er mindre end den drivende kraft, og at jorden inde i bøtten ikke løftes udover bidrag fra fortrængt materiale ved installationen.

Da havbundserosion langs fundamentalsperiferien er særdeles kritisk for denne fundamentstypes bæreevne, skal der udvises særlig agtpågivenhed.

Geotekniske parametre

Der skal udarbejdes en oversigt over de enkelte jordlags karakteristika, hvor det klart fremgår hvilken position (-er), der er tale om, og hvilke styrke- og deformationsparametre der benyttes i de enkelte jordlag og tilfælde.

Der fastsættes normalt følgende geotekniske parametre, som er defineret i DS 415:

- Klassifikationsparametre (γ' , γ_s , I_p , kornkurve)
- Styrkeparametre (ϕ' , c' , c_u , "k", α)
- Deformationsparametre (E' , E_u , K , Q)
- Dynamiske parametre ($d\epsilon/dt$, G_{dyn})

Energistyrelsens godkendelsesordning for vindmøller / Risø - December 2001