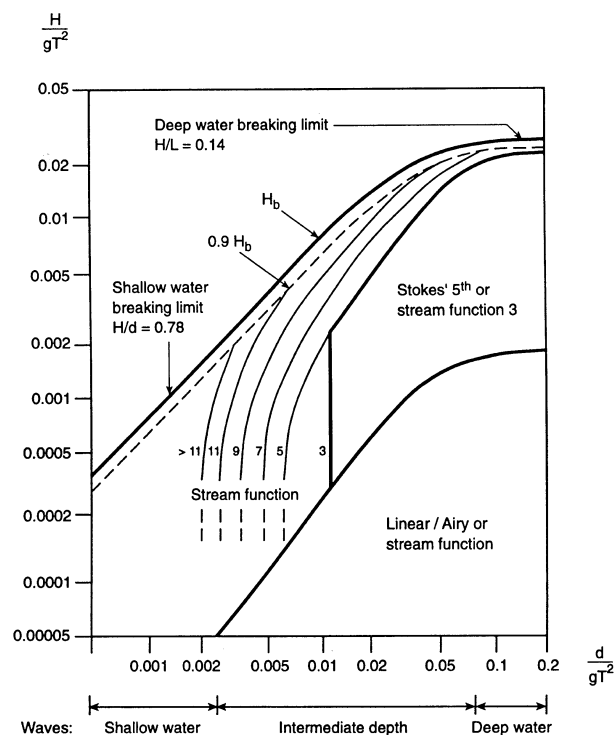


Våglaster på fundament till vindkraftverk - systemdynamik och utmattning Litteraturstudie

Ingemar Carlén



Våglaster på fundament till vindkraftverk -
systemdynamik och utmattning
Litteraturstudie

Ingemar Carlén

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Avdelningen för Flygteknik FFA 172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0109--SE	Klassificering Underlagsrapport
	Forskningsområde 9 Övriga civila tillämpningar	
	Månad, år Maj 2001	Projektnummer E870307
	Verksamhetsgren 91 Övriga civila tillämpningar	
	Delområde 5 Uppdragsfinansierad verksamhet	
Författare/redaktör Ingemar Carlén Teknikgruppen AB	Projektledare Sven-Erik Thor	
	Godkänd av Sven-Erik Thor	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig	
Rapportens titel Våglaster på fundament till vindkraftverk - systemdynamik och utmattning: Litteraturstudie		
Sammanfattning (högst 200 ord) Lokalisering av vindkraftverk till havs innebär ett flertal nya förutsättningar i jämförelse med landbaserade installationer. Till dessa förutsättningar hör t.ex. is- och våglaster. Denna korta översikt är avsedd att tjäna som vägledning till litteratur inom området <i>våglaster på fundament till vindkraftverk</i>. Här behandlas modeller för vågrörelse, vågkrafter på slanka bottenfasta installationer, vågstatistik för svenska kustvatten, samt projektering och certifiering. Merparten av de 71 referenser som behandlas, finns tillgängliga på FFA för kopiering. I en liknande litteraturgenomgång studeras inverkan av islaster på fundament till vindkraftverk. Se rapporten FOI-R--0108--SE		
Nyckelord Vindenergi, våglaster, fundament		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 15 s.	
Distribution enligt missiv STEM	Pris: Enligt prislista Sekretess Öppen	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Division of Aeronautics, FFA 172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--0109--SE	Report type Base data report
	Research area code Civil applications	
	Month year February 2001	Project no. E870307
	Customers code Civil applications	
	Sub area code Contracted Research	
Author/s (editor/s) Ingemar Carlén, Teknikgruppen AB	Project manager Sven-Erik Thor	
	Approved by Sven-Erik Thor	
	Scientifically and technically responsible	
Report title (In translation) Wave loads on foundations for wind turbines. A literature survey		
Abstract (not more than 200 words) This report is an overview of literature covering the influence of wave loads on foundations for wind power plants. Relevant subjects are wave motion, wave forces on slender structures, wave statistics for the swedish coast together with planning and certification.		
Keywords Wind Energy, Wave loads, foundations		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 15 p.	
Distribution: STEM	Price acc. to pricelist Security classification Open	

Innehållsförteckning

1.	SAMMANFATTNING	7
2.	INLEDNING	7
3.	VÅGTEORIER	7
3.1.	REGELBUNDNA VÅGOR	7
3.2.	OREGELBUNDNA VÅGOR	8
3.3.	PROPAGERING	9
3.4.	SÄRSKILDA EFFEKTER	9
4.	VÅGSTATISTIK	9
5.	VÅGLASTER	10
6.	CERTIFIERING	11
7.	SLUTSATSER	11
8.	REFERENSER	12

1. Sammanfattning

Lokalisering av vindkraftverk till havs innebär ett flertal nya förutsättningar i jämförelse med landbaserade installationer. Till dessa förutsättningar hör t.ex. is- och våglaster. Denna korta översikt är avsedd att tjäna som vägledning till litteratur inom området *våglaster på fundament till vindkraftverk*. Här behandlas modeller för vågrörelse, vågkrafter på slanka bottenfasta installationer, vågstatistik för svenska kustvatten, samt projektering och certifiering. Merparten av de 71 referenser som behandlas, finns tillgängliga på FFA för kopiering.

I en liknande litteraturgenomgång studeras inverkan av *våglaster på fundament till vindkraftverk*. Se rapporten FOI-R--0108--SE

2. Inledning

Intresset för att exploatera grunda kustområden för utbyggnad av havsbaserad vindenergi, har tilltagit markant under 90-talet. Det europeiska JOULE-programmet har givit stöd till flera F&U-projekt [1] och [2], en del forskningsresultat har börjat publiceras [3][4][5][6][7][8][9], några demonstrationsanläggningar har byggts (t.ex. Vindeby och Bockstigen), och ett stort antal förstudier har genomförts av en växande skara intressenter. Huvudsakligen handlar det om att flytta befintlig och mogen teknik ut till havs, dock med ett antal nya förutsättningar att ta hänsyn till. Till dessa hör t.ex. is- och våglaster.

Denna korta översikt är avsedd att tjäna som vägledning inom området *våglaster på fundament till vindkraftverk*, och förhoppningen är att såväl forskaren som ingenjören, skall kunna hitta vidare till relevant litteratur för det egna ändamålet. Inriktningen på de publikationer som tagits med i referenslistan har en spännvidd ifrån praktiska handböcker och allmänna rekommendationer, till djupt teoretiska uppsatser om ickelinjär teori för kortkammiga vågor på grunt vatten. Framställningen är främst inriktad mot vågmodeller för studier av *systemdynamik och utmattning*, och utelämnar metoder och teorier för branta vågor, och de transienta krafter som uppkommer då dessa slår mot bottenfasta strukturer. Dessa teorier är väsentligt mer komplicerade och kräver därför speciell uppmärksamhet. De metoder som idag utgör 'state of the art' avseende dimensionerande lastfall (*designvågor*) finns dock med i denna översikt.

För den som önskar börja läsa in sig på området rekommenderas varmt de utmärkta HMSO-publikationerna "Fluid Loading on Fixed Offshore Structures – I and II" [10][11], eller något av de många bidragen till den etablerade referenslitteraturen (t.ex. [12][13] eller [15]).

3. Vågteorier

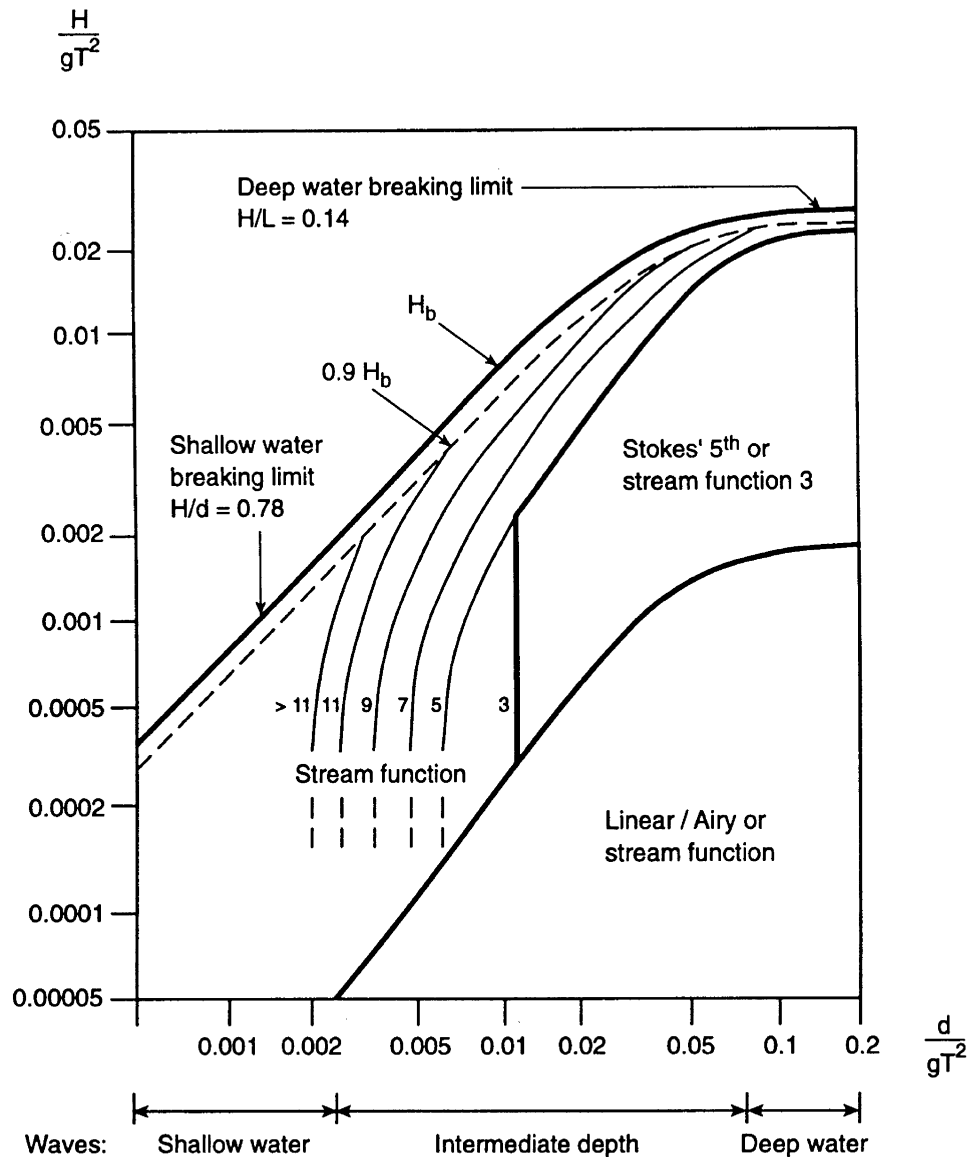
Samtliga nedan beskrivna vågteorier har det gemensamt att de representerar lösningar till någon differentialekvation för gravitationsvågor i vatten med fri vätskeyta. Det finns ett flertal sådana teorier beskrivna i litteraturen, och här behandlas ett fåtal av dem som befunnits mest intressanta.

3.1. Regelbundna vågor

Det enklaste fallet representeras av sk. *långkammiga regelbundna vågor* och den linjära approximationen för rörelsen hos en vågpartikel i någon riktning (t.ex. vågytans rörelse i vertikal riktning), blir en ren sinusfunktion. Då vattendjupet minskar, ökar inverkan av ickelinjära effekter och vågformen blir mera kantig. Den linjära approximationen bör då ersättas med en lösning av högre ordning (sk. *Stokesvågor*). Kinematiska storheter såsom vågytans rörelse $\zeta(t)$, eller horisontell hastighet $u(z,t)$ hos en vattenpartikel, får då formen:

$$\zeta(t) = \sum_k a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) \quad , \quad u(z,t) = \sum_k b_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) f_k(z) \quad (1)$$

där T är vågens periodtid, och f_k är en funktion av vattendjupet z . En schematisk bild som ger vägledning för att välja vågteori avseende olika vattendjup och våghöjd, visas i figur 1.



Figur 1: Teorier för regelbundna vågor (rekommendationer för olika kombinationer av vattendjup d , och våghöjd H , [1]).

3.2. Oregelbundna vågor

Regelbundna vågor utgör ett intressant specialfall som i de flesta fall fungerar bra för enkla uppskattningar. Verkliga havsvågor uppvisar stor variation i amplitud, periodtid, samt vågriktning även på kort tidsskala. På samma sätt som simulerad turbulent vind väsentligt bidrar till möjligheterna att på ett realistiskt sätt prediktera dynamiska utmattningslaster i ett vindkraftverk på land, så är det av motsvarande intresse att även kunna representera vågornas slumpmässiga

natur till havs. Det oregelbundna mönstret uppkommer ur att rörelsen är resultatet av ett antal överlagrade vågkomponenter med olika frekvens. Oregelbundna långkammiga vågor kan oftast skrivas på formen:

$$\zeta(t) = \sum_k A_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) \quad , \quad u(z,t) = \sum_k B_k \cos(\omega_k t + \varphi_k) g_k(z) \quad (2)$$

där ω_k är vinkelfrekvens. I det linjära fallet är φ_k oberoende slumpmässiga fasvinklar (likformigt fördelade på intervallet $[0, 2\pi]$), medan koefficienterna A_k och B_k kan beräknas direkt genom en diskretisering av det antagna vågspektrat. En nackdel med den linjära ansatsen är att lösningen gäller endast upp till stillvattennivån. För att beräkna kraftbidrag även från vågtoppar måste man således extrapolera hastigheter och accelerationer upp till vågytan med någon lämplig metod (se t.ex. [16][17])

Kortkammiga oregelbundna vågor erhålls om man tecknar lösningen (2) även som funktion av koordinaterna x och y , samt tilldelar vågkomponenterna olika riktningar (enligt någon spridningsfunktion). Det är då naturligt att ta nästa steg och även inkludera andra ordningens termer i lösningen. Teorin för ickelinjära stokastiska havsvågor utvecklades i ett antal artiklar i början av 60-talet [18][19][20][21][22][23] [24][25][26][27], men fick sin tillämpning först mot senare delen av 70-talet, när utvecklingen av datorsystem för tekniska beräkningar tog fart [28][29]. Man började då även utveckla ”exakta” ekvationer för sambandet mellan koordinater i tid och rum (*dispersion relation*) [30][31][32][33][34][35][36].

3.3. Propagering

När havsvågor propagerar in över grunda kustområden, så minskar den totala rörelseenergin (till följd av reflektion/friktion mot botten, ökande dissipation etc.). Effekterna börjar synas på djup mellan 50-100 m, och mellan 50 m och t.ex. 10 m har vågspektrat förändrats avsevärt. Det har även stor betydelse hur brant botten är (dvs. på hur lång sträcka uppgrundningen sker). Grundläggande teori för hur vågor propagerar över botten med varierande djup, återfinns i t.ex. [13] eller [14], medan mera tillämpade studier och experiment behandlas i ett antal artiklar; se [37][38][39] samt [40].

3.4. Särskilda effekter

De analytiska (och semi-analytiska) modellerna som presenterats ovan baseras på ett antal antaganden om ”snälla” förhållanden. I realiteten har man dock ofta antingen ojämna eller lösa botten, branta djupvariationer, branta vågor, eller ström. Om sådana effekter kan anses vara måttliga så kan ofta enkla korrekationer göras, medan man i andra fall måste ta till avancerade numeriska verktyg (*CFD*) för att producera realistiska resultat. Ett antal av dessa speciella effekter behandlas i [14][41][42] samt [43].

4. Vågstatistik

Indata till modeller för oregelbundna vågor utgörs väsentligen av statistik som beskriver fördelningen av olika sjötillstånd. De viktigaste storheterna är *karakteristisk våghöjd* och *medelperiodtid*, men även information om *vågriktning* och *spridning* (dvs variation mellan riktningar hos enskilda vågkomponenter) är av intresse vid modellering. Statistik för oceanerna har samlats in från fartyg (visuella observationer), och fasta mätstationer under större delen av 1900-talet. Det senaste decenniet har tekniken att samla in oceanografiska data från satelliter utvecklats i snabb takt, och inom en inte allt för avlägsen framtid kommer säkerligen satellitbaserade mätsystem att kunna samla in vågstatistik från såväl världshaven, som kustnära grundområden av intresse för vindenergi. Data för områden kring den svenska kusten har samlats

in från några fasta mätstationer, och en del av materialet finns beskrivet i öppna rapporter, se t.ex. [44][45][46][47][48] och [49].

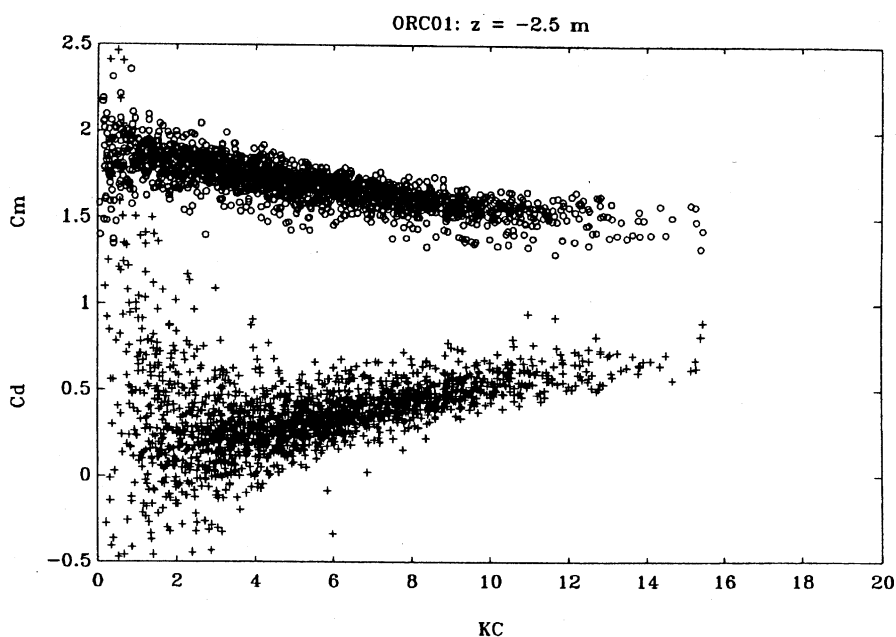
Vågdata för en plats där mätningar ej har utförts, kan uppskattas genom att kombinera olika metoder. En metod är att använda vindstatistik i kombination med kunskap kring hur sjöstillstånd uppkommer genom interaktion mellan vind och vågor. I kustnära vatten är det av särskild betydelse hur lång sträcka (*fetch*) som vinden har blåst över vatten innan den når den platsen av intresse. Ett annat sätt är att jämföra det aktuella området med någon plats i närheten där data från vågmätningar finns tillgängliga, och därpå korrigera för vattendjup, propageringsväg etc. Beräknade vågdata för de flesta lokaliseringar kring våra kuster, kan köpas av SMHI.

5. Våglaster

Det finns många olika lösningar till problemet hur fundamentering mot havsbotten skall lösas, men gemensamt för flertalet förslag är vågorna möter en cylindrisk sektion på den övre halvan av vattendjupet. Reaktionskrafter som är resultatet av att vågor propagerar mot vertikala ”slanka” strukturer kan beräknas enl. Morison

$$F(t) = \frac{1}{4} C_m \rho D^2 \frac{du(t)}{dt} + \frac{1}{2} C_d \rho D u(t) |u(t)| \quad (3)$$

där D är cylinderns diameter, $u(t)$ horisontell hastighet hos en vattenpartikel, ρ vattnets densitet, samt C_m och C_d hydrodynamiska koefficienter avseende tröghetskrafter respektive viskösa krafter. Morison's kraftekvation representerar en form av *stripteori* som till stora delar liknar bladelementteorin inom rotoraerodynamiken, och huvuduppgiften består i att bestämma koefficienterna C_m och C_d . Man har experimentellt visat att dessa koefficienter främst beror av *Reynolds tal*, ytråhet, samt *Keulegan-Carpenters tal*, $T u_{max}/D$, där T är tiden för en vågperiod. Experiment med oregelbundna vågor, såväl i bassäng som i full skala, indikerar som regel en betydande spridning vid bestämning av C_d (se fig. 2) vid låga värden på *Keulegan-Carpenters tal*, K_c (<10). OBS # justera figuren.



Figur 2: Exempel på resultat från försök att experimentellt bestämma C_m och C_d vid försök med oregelbundna vågor (från [55]).

Detta beror på att virvlar som avlöser bakom cylindern vid en vågtopp, följer med tillbaks vid nästa vågdal och påverkar strömningen på ett oförutsägbart sätt. Olika aspekter på Morison's kraftekvation har fått mycket uppmärksamhet i litteraturen [50][51][52][53][54][55][56][57]. Mycket av den tillämpade forskningen på området har ägnats uppgiften att utveckla Morison's kraftekvation, samt att försöka förstå hur kraftcykeln under en vågperiod även beror av tidigare vågor, dock utan någon större framgång (en intressant genomgång av dessa ansträngningar återfinns i en doktorsavhandling vid Chalmers [61]). Då tröghetstermen i (3) torde vara dominerande för de flesta fall avseende *våglaster på fundament till vindkraftverk*, så antas denna osäkerhet inte utgöra något betydande problem.

Ett fåtal referenser behandlar beräknade vågkrafter till följd av ickelinjära kortkammiga vågor [62][63][64][65][66], men de slutsatser som produceras går i allmänhet ej att direkt tillämpa på fundament till vindkraftverk

6. Certifiering

Bland de klassällskap som certifierar vindkraftverk, så är det idag endast *Germanischer Lloyd (GL)* och *Det Norske Veritas (DNV)*, som har lång erfarenhet av fasta marina konstruktioner (främst från offshore-industrin). Eftersom förutsättningar för anslutning och fundamentering kan variera väsentligt mellan olika havsbaserade lokaliseringar, så väljer man att tills vidare utfärda ett *typcertifikat* för varje installation. Detta kan verka omständigt, men förfarandet blir allt vanligare även på land, i takt med att tillverkare väljer att skräddarsy främst torn, rotor, och drivlina för varje ny plats.

Regler och rekommendationer för designberäkningar, avseende såväl extrema lastfall som utmattning, återfinns i [67][68][69] samt [70]. Mest relevant är här [68] som är inriktad speciellt mot havsbaserade vindkraftverk, och fokuserar på förhållanden i vattendjup kring 5-20 m. De modeller som föreskrivs för att beskriva vågor samt beräkna våglaster är väl beskrivna i den översiktliga litteraturen (t.ex. [10][11][12][13] eller [15]). Förutom klassregler ger brittiska HMSO även ut allmänna rekommendationer för projektering, design, och certifiering av offshore-installationer (se t.ex. [71]).

7. Slutsatser

Slutsatsen av denna litteraturöversikt är att det finns rikligt med underlag i litteraturen för att på ett adekvat sätt beräkna vågkrafter på fundament till havsbaserade vindkraftverk. Om metoder och teorier finns i tillräcklig mängd så är det betydligt tunnare med resultat, erfarenheter, samt slutsatser för den aktuella tillämpningen. De modeller som verkar mest lämpade för ändamålet har ännu ej kommit till användning, troligen eftersom de anses komplicerade och svåra att implementera. Speciellt kan man notera att de största skillnaderna mellan att använda linjära långkammiga oregelbundna vågor, respektive ickelinjära kortkammiga dito (med ickelinjär fasthastighet), troligen uppenbarar sig kring dubbla värdet av den frekvens där vågspektat har sitt maximum (i Östersjön typiskt 0.3-0.4 Hz). Detta frekvensområde sammanfaller med grundfrekvensen för flera av dagens tänkbara installationer.

I övrigt kan man notera att mekanik för *designvågor* (dvs. branta vågor och resulterande transienta lastförlopp) ej behandlas i någon större omfattning. Detsamma gäller branta bottenvariationer.

8. Referenser

- [1] Matthies H. G. m.fl. "*Study of Offshore Wind Energy in the EC*" , JOULE I , Verlag Natürliche Energie , Brekendorf , 1995
- [2] Kühn M. m.fl. "*Opti-OWECS Final Report Vol. 0: Structural and economic Optimisation of Bottom-Mounted Offshore Wind Energy Converters – Executive Summary*" , Institute for Wind Energy , Delft University of Technology , 1998
- [3] Kühn M. , "*Dynamics of an Offshore Wind Turbine Digital Simulation*" , Report IW-93068R , October 1993 , Faculty of Civil Engineering – Institute for Windenergy , Delft University of Technology
- [4] Quarton D. , Wastling M. , "*Wind and Wave Loading of Offshore Wind Turbines*" , Paper presented at the European Community Wind Energy Conference , 8-12 March 1993 , Lübeck-Travemünde Germany , pp 575-578
- [5] Wastling M. , Quarton D. , Schellin T. , "*Dynamic Response of Offshore Wind Turbines*" , Wind Engineering Vol. 17 No. 5 , pp 238-246
- [6] Jamieson P. , Quarton D. , "*Technology Development for Offshore*" , Paper presented at the European Wind Energy Conference , Nice France , 1999
- [7] Sinclair F. , Clayton B. , "*Excitation and Damping Forces on Offshore Wind Turbines*" , Wind Engineering Vol. 13 No. 6 , pp 276-292
- [8] Dixon J. C. , Swift R. H. , "*Wave Forces and Scaling Effects on Offshore Wind Turbines*" , Wind Engineering Vol. 10 No. 1 , 1986 , pp 21-29
- [9] Oscar D. S. , Paez T. L. , "*Analysis of Wind Turbines on Offshore Support Structures Excited by Random Wind and Random Waves*" , Report SAND87-1689 , Sandia National Laboratories , Albuquerque USA , 1988
- [10] Barltrop N. , Mitchell G. , Atkins J. , "*Fluid Loading on Fixed Offshore Structures , Volume 1*" , HMSO London , 1990
- [11] Barltrop N. , Mitchell G. , Atkins J. , "*Fluid Loading on Fixed Offshore Structures , Volume 2*" , HMSO London , 1990
- [12] Sarpkaya T. , Isaacson M. , "*Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*" Van Nostrand , 1981
- [13] Dean R. G. , Dalrymple R. A. "*Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*" , Prentice Hall , 1984
- [14] Mei C. C. , "*The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves*" , Wiley , 1983
- [15] Chakrabati S. K. , "*Hydrodynamics of Offshore Structures*" , Springer-Verlag , 1987
- [16] Gudmestad O. T. , Karunakaran D. , "*Wave Kinematics Models for Calculation of Wave loads on Truss Structures*" , Paper presented at the 26th Annual Offshore Technology Conference (OTC) , Houston , May 1994
- [17] Wheeler J. D. , "*Method for Calculating Forces Produced by Irregular Waves*" , Journal of Petroleum Technology , March 1970 , pp 359-367
- [18] Longuet-Higgins M. , "*The Effect of Non-Linearities on Statistical Distributions in The Theory of Sea Waves*" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 17 Part 3 , 1963 , pp 459-480
- [19] Hasselmann K. , "*On the Non-Linear energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum – Part 1. General Theory*" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 12 , 1962 , pp 481-500

- [20] Hasselmann K. , "On the Non-Linear energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum – Part 2. Conservation Theorems; Wave-Particle analogy; Irreversibility" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 15 , 1963 , pp 273-281
- [21] Hasselmann K. , "On the Non-Linear energy Transfer in a Gravity-Wave Spectrum – Part 3. Evaluation of the Energy Flux and Swell-Sea Interaction for a Neumann Spectrum" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 15 , 1963 , pp 385-397
- [22] Hasselmann K. , "On the Non-Linear energy Transfer in a Wave Spectrum" , Ocean Wave Spectra , Prentice-Hall , 1961 , pp 191-197
- [23] Tick L. , "A Non-linear Random Model of Gravity Waves – I" , Journal of Mathematics and Mechanics , Vol. 8 , No. 5 1959 , pp 643-651
- [24] Tick L. , "Nonlinear Probability Models of Ocean Waves " , Ocean Wave Spectra , Prentice-Hall , 1961 , pp 163-169
- [25] Phillips O. , "On the Dynamics of Unsteady Gravity Waves of Finite Amplitude – Part 1. The Elementary Interactions" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 9 , pp 193-217
- [26] Phillips O. , "On the Dynamics of Unsteady Gravity Waves of Finite Amplitude - Part 2. Local Properties of a Random Wave Field" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 11 , pp 143-155
- [27] Phillips O. , "The Dynamics of Random Finite Amplitude Gravity Waves " , Ocean Wave Spectra , Prentice-Hall , 1961 , pp 171-178
- [28] Hudspeth R. T. , Chen M-C. , "Digital simulation of Nonlinear Random Waves" , Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE , Vol. 105 , No. WW1 , Feb. 1979 , pp 67-85
- [29] Tuah H. , Hudspeth R. T. , "Finite Water Depth Effects on Nonlinear Waves", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol 111 , No. 2 , March , 1985 , pp 401-416
- [30] Laing A. K. , "Nonlinear Properties of Random Gravity Waves in Water of Finite Depth" , Journal of Physical Oceanography , Vol. 16 , December , 1986 , pp 2013-2030
- [31] Masuda A. , Kuo Y-Y. , Mitsuyasu H. , "On the Dispersion Relation of Random Gravity Waves: Part I. Theoretical Framework" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 92 , No. 4 , 1979 , pp 717-730
- [32] Mitsuyasu H. , Kuo Y-Y. , Masuda A. , "On the Dispersion Relation of Random Gravity Waves: Part II. An Experiment" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 92 , No. 4 , 1979 , pp 731-749
- [33] Huang N. E. , Tung C-C. , "The Dispersion Relation for a Nonlinear Random Gravity Wave Field" , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 75 , No. 2 , 1976 , pp 337-345
- [34] Huang N. E. , Tung C-C. , "The Influence of the Directional Energy Distribution on the Nonlinear Dispersion Relation in a Random Gravity Wave Field" , Journal of Physical Oceanography , Vol 7 , 1977 , pp 403-414
- [35] Weber B. L. , Barrick D. E. , "On the Nonlinear Theory for Gravity Waves on the Ocean's Surface. Part I: Derivations" , Journal of Physical Oceanography , Vol. 7 , No. 1 , 1977 , pp 3-10
- [36] Barrick D. E. , Weber B. L. , "On the Nonlinear Theory for Gravity Waves on the Ocean's Surface. Part II: Interpretation and Applications" , Journal of Physical Oceanography , Vol. 7 , No. 1 , 1977 , pp 11-21

- [37] Hughes S. A. , Miller H. C. , “*Transformation of Significant Wave Height*” , Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol 113 , No. 6 , November , 1987 , pp 588-605
- [38] Gentile R. , Rebaudengo Landò L. , Scarsi G. , “*Design Wave on Finite Depth: A Re-analysis of the TMA Model*” , Proc. 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering , Houston , 1994 , Vol. 2 , pp 49-60
- [39] Scarsi G. , Rebaudengo Landò L. , Taramasso A. C. , Gentile R. , “*Multidirectional Waves on Decreasing Depths*” , International Symposium: Waves – Physical and Numerical Modelling , Vancouver , 1994 , Vol II , pp 891-900
- [40] Rebaudengo Landò L. , Gentile R. , Scarsi G. , “*A Nonlinear Spectral Model for Directional Random Waves at Decreasing Depths*” , International Journal of Offshore and Polar Engineering , Vol. 9 , No. 22 , June 1999 , pp 81-89
- [41] Shemdin O. , Hasselmann K. , Hsiao S. V. , Herterich K. , “*Nonlinear and Linear Bottom Interaction effects in Shallow Water*” , Proceedings of the NATO Conference on Turbulent Fluxes Through the Sea Surface, Wave Dynamics, and Prediction , Marseille 1977 , pp 347-370
- [42] Thomas G. P. , “*Water Wave-Current Interactions: A Review*” , Symposium on the Mechanis of Wave-Induced Forces on cylinders , 3 – 6 September 1978 , pp 179-203 (Proceedings edited by T. L. Shaw, published by Pitmans Advanced Publishing Program , 1979)
- [43] Baddour R. E. , Song S. , “*On the Interaction Between Waves and Currents*” , Ocean Engineering , Vol. 17 , No. ½ , 1990 , pp 1-21
- [44] Mårtensson N. , Bergdahl L. , “*On the Wave Climate of the Southern Baltic*” , Report A:15 , Department of Hydraulics , Chalmers University of Technology , Sweden
- [45] Wahl G. , “*Vågstatistik från Svenska Kustvatten – Fyrskeppet Fladen*” , Allmän Rapport Nr 35 , Statens Skeppsprovsningsanstalt , 1973
- [46] Wahl G. , “*Vågstatistik från Svenska Kustvatten – Fyrskeppet Svenska Björn*” , Allmän Rapport Nr 36 , Statens Skeppsprovsningsanstalt , 1973
- [47] Wahl G. , “*Vågstatistik från Svenska Kustvatten – Fyrskeppet Finngrundet*” , Allmän Rapport Nr 37 , Statens Skeppsprovsningsanstalt , 1973
- [48] Wahl G. , “*Vågstatistik från Svenska Kustvatten – Fyrskeppet Falsterborev*” , Allmän Rapport Nr 38 , Statens Skeppsprovsningsanstalt , 1973
- [49] Svensson J. , “*Vågdata från Svenska Kustvatten 1979-1980*” , Rapport RHO30 , SMHI , 1981
- [50] Jaw-Fang Lee, Yan-Jyh Lan , “*Wave Forces on Vertical Circular cylinders*” , Paper presented at the third International Offshore and Polar Engineering Conference, Singapore 6-11 June 1993 , pp 176 - 183
- [51] Sarpkaya T. , Rajabi F. “*Hydrodynamic Drag on Bottom-Mounted Smooth and Rough Cylinders in Periodic Flow*” . Paper presented at the 11th annual Offshore Technology Conference (OTC), Huston April 30 – May 3 1979 , pp 219 - 226
- [52] Sarpkaya T. , “*In-Line and Transverse Forces on Cylinders in Oscillatory Flow at High Reynold Numbers*” , Jornal of Ship Research, Vol. 21, No. 4, Dec. 1977 , pp 200 – 216
- [53] Sarpkaya T. , “*Force on a Circular Cylinder in Viscous oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter numbers*” , Journal of Fluid Mechanics , Vol. 165 1986, pp 61 – 71
- [54] Graham J. M. R. , “*Forces on Cylindrical Bodies in Oscillatory Flow at Low Keulegan-Carpenter Numbers*” , Symposium on the Mechanis of Wave-Induced Forces on cylinders ,

- 3 – 6 September 1978 , pp 461 – 474 (Proceedings edited by T. L. Shaw, published by Pitmans Advanced Publishing Program , 1979)
- [55] Klopman G. , Kostense J. K. , *The Loading on a Vertical Cylinder in Random Waves at High Reynolds Numbers* , Water Wave Kinematics (edited by A. Tørum and O. T. Gudmestad), Kluwer Academic Publishers, 1990
 - [56] Lundgren H. , *“Wave Loading in the Drag/Inertia Regime with Particular Reference to Vertical Cylinders”* , Symposium on the Mechanis of Wave-Induced Forces on cylinders , 3 – 6 September 1978 , pp 55 - 67 (Proceedings edited by T. L. Shaw, published by Pitmans Advanced Publishing Program , 1979)
 - [57] Isaacson M. , Baldwin J. , Niwinski C. , *“Estimation of Drag and Inertia Coefficients From Random Wave Data”* , Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 113 1991, pp 128 – 136
 - [58] Hu C. , Koterayama W. , *“A Study on Random Wave Force Coefficients Using Numerical Simulation of Flow Field”* , Paper presented at the third International Offshore and Polar Engineering Conference, Singapore 6-11 June 1993 , pp 137 – 142
 - [59] Horton T. E. , Feifarek M. J. , Golestanian H. , *“Wave Force Coefficients Correlation Based on Wake Volume Scaling”* , Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 116 1994, pp 97 – 101
 - [60] Burrows R. m.fl. , *“Morison Wave Force Coefficients for Application to Random Seas”* , Applied Ocean Research, Vol. 19 1997 , pp 183 – 199
 - [61] Moberg G. , *“Wave Forces on a Vertical Slender Cylinder”* , Report A:16 , Department of Hydraulics , Chalmers University of Technology , Sweden
 - [62] Raman H. , Venkatanarasaiah P. , *“Forces due to nonlinear Waves on Vertical Cylinders”*, Journal of the Waterways Harbors and Coastal Division , Vol. 102 , No. WW3 , 1976 , pp 301 – 315
 - [63] Rebaudengo Landò L. , Scarsi G. , Stura S. , Taramasso A. C. , *“Random Wave Forces on Vertical Cylinders in Directional Seas”* , Proceedings of the Third International Offshore and Polar Engineering Conference , Singapore 1993 , Vol. III , pp 129 – 136
 - [64] Hudspeth R. T. , *“Wave Forces Predictions from Nonlinear Random Sea Simulations”* , Offshore Technology Conference , Houston 1975 , Paper OTC 2193 , pp 471 – 485
 - [65] Sharma J. , Dean R. G. , *“Second-Order Directional Seas and Associated wave Forces”* , Offshore Technology Conference , Houston 1979 , Paper OTC 3645 , pp 2505 – 2515
 - [66] Rebaudengo Landò L. , Gentile R. , Scarsi G. , *“A Nonlinear Model for Random Forces on a Vertical Cylinder Set in Finite Depth Water”* , Proceedings of the 17th International Conference on Offshore Mechanics an Arctic Engineering , 1998
 - [67] *“Environmental Conditions and Environmental Loads”* , Det Norske Veritas , Classification Note No. 30.5 , March 1991
 - [68] *“Rules an Regulations , IV – Non-Marine Technology , 2 - Offshore Wind Energy Converters , 4 – Environment and Loads”* , Germanischer Lloyd , 1998
 - [69] *“Rules an Regulations , III – Offshore Technology , 2 - Offshore Installations , 1 – Environmental Conditions”* , Germanischer Lloyd
 - [70] *“Rules an Regulations , III – Offshore Technology , 2 - Offshore Installations , 2– Loads”* , Germanischer Lloyd
 - [71] *“Offshore Installations: Guidance on Design, Construction and Certification”* , HMSO , London , 1990