

Schiffstoß- und Eisbelastung von Offshore-WEA

Nachdem in den 60iger Jahren erste Ölfunde in der Nordsee eine erfolgreiche Exploration versprochen, begann in den 70igern die Entwicklung der erforderlichen Bautechnik. Hierbei wollte auch die deutsche Bauindustrie beteiligt sein. Allerdings hatte sie die Fähigkeit der häufig in Deutschland ausgebildeten skandinavischen Ingenieure unterschätzt und damit den Einstieg in die festen Beton-Offshoreplattformen verpasst. In der Folge versuchten die deutschen Baufirmen durch die Entwicklung von Sonderlösungen wieder mit konkurrenzfähigen Lösungen an den Markt zu kommen. Diese Entwicklungsprojekte wurden teilweise durch Bundes- und EU-Forschungsmittel großzügig unterstützt.

Exemplarisch sind aus der Sicht des Autors folgende bei Bilfinger+Berger betriebenen Projekte zu nennen:

- **Das Cosmar-Projekt:** In einem großen Konsortium unter norwegischer Beteiligung wurden die grundsätzlichen Probleme bei der Verwendung des Baustoffes Beton für Offshorekonstruktionen untersucht.

- **Conat – Concrete Articulated Tower:** Die Entwicklung eines flaschenförmigen Betonturms mit einem Gelenk zur Verankerung in der Fundamentkonstruktion versprach insbesondere für größere Wassertiefen Vorteile gegenüber den festen Plattformen. Eine Studie für das Troll-Feld mit 350 m Wassertiefe erhielt von Det Norske Veritas ein „conceptual appraisal“.

- **Procon:** Als firmeneigene Entwicklung für ein Angebot und Präquali-

fikation für die Erstellung einer festen Plattform im Feld „Hibernia“ vor der Küste Neufundlands wurde der Schutz der festen Plattform gegen den Eisbergstoß mit Hilfe eines beweglichen Betonfenders von 300.000 t vorgelegt. Realisiert wurde allerdings in der Zusammenarbeit einer norwegischen und einer französischen Firma eine feste Plattform mit einer „Beton-Knautschzone“ (Informationen hierzu sind unter Hibernia.CA zu finden).

- **Erdbeben und Eis:** Nach einer Anfrage für einen Monotower in der Beringsee vor der Küste Alaskas stellte sich die Frage, ob es zu speziellen, ungünstigen Interaktionen bei festen Betontürmen kommt, die in der Wasserlinie von einer festen Eisdecke gehalten werden und durch Erdbeben angeregt werden.

Dass diese Projekte nicht realisiert wurden, lag unter anderem auch in der Entwicklung von Anlagen, die auf dem Meeresboden installiert werden konnten und deswegen entsprechende Plattformen überflüssig machten oder auch in der besseren Ausnutzung der vorhandenen Bohrplattformen durch weitreichende zielgenaue Horizontalbohrungen.

Es ist gleichwohl zu empfehlen, bei der jetzt anstehenden Entwicklung von Offshore-Windenergieanlagen auch auf das damals erarbeitete Wissen zurückzugreifen, da für etliche Probleme zum Beispiel der hydrodynamischen Belastung und auch der Stoßbelastung nach wie vor gültige Lösungen entwickelt wurden.

Die Kontaktkraft steigt vom Wert Null vor dem Stoß auf den Spitzenwert an und fällt wieder auf Null ab. Als einfache Stoßkraft-Zeit-Funktion kann ein dreiecksförmiger Verlauf angenommen werden, so dass das Integral (Dreiecksfläche) sich aus der Stoßdauer t_0 und dem Spitzenwert der Stoßkraft R_0 errechnen lässt (Abb. 1).

$$\text{Dreiecksverlauf: } \int R dt = \frac{1}{2} \cdot R_0 \cdot t_0$$

$$\text{Spitzenwert: } R_0 = \frac{2 \cdot m \cdot \sqrt{2gh}}{t_0} = \frac{m \cdot v}{\frac{t_0}{2}}$$

$$\text{Beispiel: } \left. \begin{array}{l} m = 10 \text{ t} \\ h = 3 \text{ m}, \\ t_0 = 0,010 \text{ s} \end{array} \right\} R_0 = \frac{2 \cdot m \cdot \sqrt{2gh}}{t_0} = \frac{m \cdot v}{\frac{t_0}{2}} = 15.344 \text{ kN}$$

Mit diesem Spitzenwert der Stoßbelastung:

$$R_0 = \frac{m \cdot v}{\frac{t_0}{2}}$$

kann für Schiffstoß die Größenordnung der Kontaktkraft für einen wahrscheinlichen oder einen möglichen Schiffstoß abgeschätzt werden:

Wahrscheinlicher Spitzenwert:

Versorgungsboot: $m = 1.000 \text{ t}$

Driften: $v = 2 \text{ m/s}$

ohne Fender

$$t_0 = 1 \text{ s} \quad R_0 = 4.000 \text{ kN}$$

mit Fender

$$t_0 = 10 \text{ s} \quad R_0 = 400 \text{ kN}$$

Möglicher Spitzenwert:

Frachter: $m = 100.000 \text{ t}$

Fahrtgeschwindigkeit 20 kn: $v = 10 \text{ m/s}$

$$t_0 = 10 \text{ s} \quad R_0 = 200.000 \text{ kN}$$

Dadurch ergibt sich die Größenordnung der Druckkraft für die Bemessung der Kontaktfläche. Für numerische Untersuchungen empfiehlt es sich aber, Funktionen zu wählen, die bis in höhere Ableitungen stetig differenziert werden können. Zudem ergibt sich für die Berechnung des dynamischen Verhaltens der Konstruktion eine realistischere Abschätzung als durch Funktionen, die selbst oder in irgendeiner Ableitung Sprünge enthalten.

Möglicher und wahrscheinlicher Schiffstoß

Einem Herrn Murphy wird der Spruch zugeschrieben, dass das, was passieren kann, auch passiert. Seine



Dr.-Ing.
Oswald Klingmüller

Anschrift des Autors:
Gesellschaft für
Schwingungsuntersuchungen und dynamische Prüfmethode mbH,

Käfertaler Str. 164,
68167 Mannheim,
Tel. 0621/331361,
Fax 0621/334252

Email:
ok@gsp-mannheim.de
Internet:
www.gsp-mannheim.de

Wissenschaft und Technik

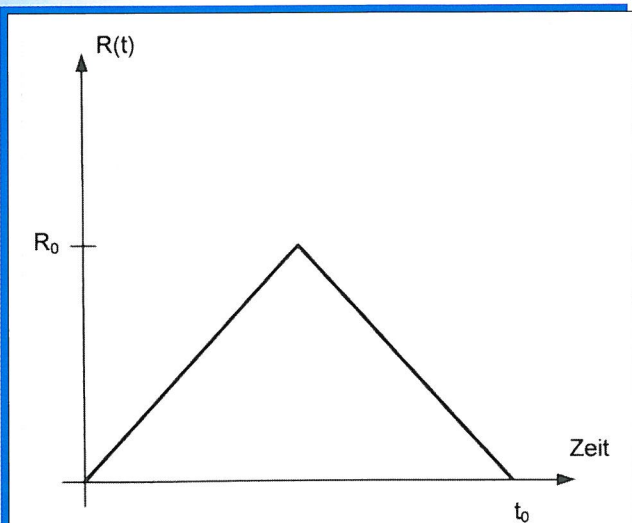


Abbildung 1: Stoßbelastung

Grundlagen einer Bemessung für Stoßbelastung

Kinetik und Kinematik des Stoßes zweier Massen werden im wesentlichen durch den Energie- und den Impulssatz beschrieben. Für die Abschätzung der aufgetragenen Belastung beim Auftreffen einer Masse auf ein festes Hindernis zum Beispiel beim Rammen von Pfählen oder bei der Stoßprüfung von Pfählen kann der Impuls der bewegten Masse dem Zeitintegral über die Kontaktkraft gleichgesetzt werden.

Stoßbelastung

$$\text{Impuls: } m \cdot v = m \cdot \sqrt{2gh}$$

$$\text{Stoßkraft: } \int R dt = m \cdot \sqrt{2gh}$$

Jünger versuchten dann mit teilweise skurrilen Methoden nachzuweisen, dass dabei auch immer der größtmögliche Schaden verursacht wird (Butterbrotphänomen). So ist ja auch in 1988 ein U-Boot auf die Verankerung einer Bohrplattform aufgelaufen.

Erst die Risikoanalyse [1] zeigt, ob ein bestimmtes mögliches Ereignis zu einem Bemessungslastfall führt oder ob es als Unglück akzeptiert werden muss. Bauwerke, deren Versagen mit einem sehr hohen Schaden verbunden sind, werden deswegen auch für Ereignisse mit sehr geringer Auftretenswahrscheinlichkeit bemessen (z.B. Erdbebenbelastung auf feste Offshore-Konstruktionen in der Nordsee oder auf Kernkraftwerke in Deutschland).

Für Offshore-Windenergieanlagen liegen entsprechende Risikoanalysen und Abschätzung der Schadensfolgen nicht vor. Vorbehaltlich einer genaueren Untersuchung, bei der auch der Energieverzehr der nicht auf Stoß bemessenen Schiffkörper zu erfassen ist, wird deswegen angenommen, dass die Bemessung für einen wahrscheinlichen und nicht für einen möglichen Schiffstoß durchzuführen ist.

Als wahrscheinlich ist der Stoß eines Bootes mit Wartungspersonal oder Ausrüstung anzusehen. Die Masse solcher Boote kann mit mehreren 100 Tonnen angenommen werden. Dementsprechend ist nicht nur die dynamische Belastung, sondern auch das Abfangen des Stoßes durch Fender von Bedeutung.

Die so ermittelte Größenordnung entspricht auch den Werten der Empfehlungen des Arbeitsausschusses für Uferbefestigungen (EAU) [2], die für Pollerzug, aber auch für Stoß vorgegeben werden (Tabelle 1).

Wasserverdrängung in t	Pollerzuglast in kN
< 2.000	100
< 10.000	300
< 20.000	600
< 50.000	800
< 100.000	1.000
< 200.000	1.500
> 200.000	2.000

Tabelle 1: Anlegedruck = Pollerzug nach [2]

Neben der Angabe von Stoßkräften ist als ein weiteres Element der Bemessung gegen Schiffstoß in der EAU vorgesehen, aufgrund der angenommenen Schiffstonnage und der

Driftgeschwindigkeit erforderliche Fender zu dimensionieren.

Erforderliches Arbeitsvermögen für Fender [3]

$$A = 1/2 \cdot M \cdot v^2 \cdot C_M \cdot C_E \cdot C_S$$

M: Schiffsmasse

v: Driftgeschwindigkeit

C_M : Beiwert für die hydrodynamische Masse

C_E : Beiwert für den exzentrischen Stoß

C_S : Beiwert für die Dalbenverformbarkeit

Beispiel:

$$A = 1/2 \cdot 1.000 \cdot 2^2 = 2.000 \text{ kNm}$$

Fender mit dem so ermittelten Arbeitsvermögen können aus den Katalogen der Hersteller (meist Reifenhersteller) ausgewählt werden.

Eine dynamische Wirkung des Stoßes durch Schwingungsanregung des Turmes einer Windenergieanlage muss erst dann berücksichtigt werden, wenn die Kraft aus der Beschleunigung der Masse des Turbinenhauses die Bemessungskraft aus dynamischer Windbelastung für den Lastfall Standsicherheit übersteigt.

Literatur

[1] Klingmüller, Bourgund: „Sicherheit und Risiko im konstruktiven Ingenieurbau“, Wiesbaden: Vieweg-Verlag 1992

[2] Arbeitsausschuss „Uferbefestigungen“:

„Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Uferbefestigungen“, Häfen und Wasserstraßen, EAU 1996“, Berlin: Ernst & Sohn-Verlag 1997

[3] Petersen: „Dynamik der Baukonstruktionen“, Braunschweig: Vieweg-Verlag 1996

[4] Shengming Zhang: „The Mechanics of Ship Collisions“, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark 1999

WIND-consult

Ingenieurgesellschaft für umweltschonende Energiewandlung mbH



Messungen an WEA

- Leistungskurve
- Schallemission
- Netzverträglichkeit
- Beanspruchung

Planung von WEA

- Windpotential
- Energieertrag
- Schall
- Schattenwurf
- Sichtweite
- Visualisierung
- Wind- und Flächenanalyse mit GIS

Wind

- Messung, Auswertung, Prognose

Anemometerkalibration

Wiederkehrende Prüfungen

F/E-Projekte

Messfeld

und

Akkreditiertes
Prüf-
laboratorium



DAP - PL - 2756.00

Nach DIN EN ISO/IEC 17025 durch die DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde aufgeführten Prüfverfahren.

WIND-consult GmbH
Reuterstraße 9
D-18211 Bargeshagen

Tel. + 49(0)3 82 03/5 07 25
Fax + 49(0)3 82 03/5 07 23

e-mail: company@wind-consult.de
Internet: www.wind-consult.de

Bemessungsrelevanter Schiffstoß

Bei einer Winddruckkraft von 2.000 kN kann ein Maschinenhaus von 200 t eine Beschleunigung von 10 m/s^2 erfahren, ohne dass eine Neudimensionierung vorgenommen werden muss. Eine bemessungsrelevante Beanspruchung ist das Einspannmoment aus Winddruckkraft, welches für einen freien Hebelarm von 130 m (30 m Wassertiefe und 100 m Turmhöhe) für einen Schiffstoß in Höhe der Wasserlinie eine maximal zulässige Kraft von $2.000 \cdot 130 / 30 = 8.666 \text{ kN}$ ergibt (Abbildung 2).

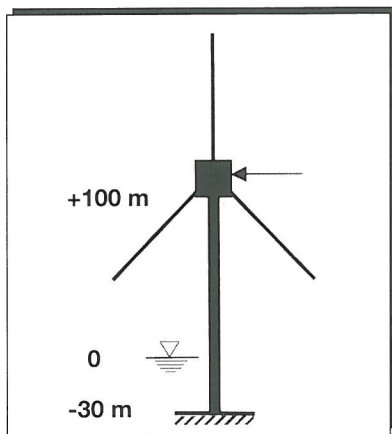


Abbildung 2: Bemessungsrelevanter Schiffstoß

Ob die oben als zulässig beziehungsweise noch nicht bemessungsrelevant ermittelte Beschleunigung von 10 m/s^2 überschritten wird, kann durch einfache Bewegungsgleichungen [4] abgeschätzt werden (Abb. 3):

Grundgleichung:

$$k_{bb} \cdot \xi_b + k_{bp} \cdot \xi_p = F_\xi$$

$$M_p \cdot \xi_p + k_{pb} \cdot \xi_b + k_{pp} \cdot \xi_p = 0$$

Stoßkraft

$$F_\xi = k_s \cdot (\xi_s - \xi_b); F_\xi \geq 0$$

Plattformbeschleunigung

$$\ddot{x}_p = \frac{\omega_p \cdot \xi_s}{\left(\frac{k_{bp}}{k_{bb}} + \frac{k_{bb}}{k_{bp}} \cdot \frac{M_p}{M_s} \right)}$$

Beispiel

Schiffsmasse: 1.000 t
Geschwindigkeit: 2 m/s
Rotormasse: 200 t

$$k_{hh} = 50 \text{ MN/m}$$

$$k_{pp} = 10 \text{ MN/m}$$

$$k_{hp} = k_{ph} = -20 \text{ MN/m}$$

$$\text{Frequenz } f = 0,5 \text{ Hz}$$

Maschinenbeschleunigung $\ddot{x}_p = 7 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Wir beflügeln Energieleistungen

Gardemann
vermietet Arbeitsbühnen

**Wenn hoch,
dann richtig!**

Unerreichte
Geräte-
Auswahl in
Höhen von 35
bis 100 m

Fit für jedes
Gelände:
Allrad-Systeme
bis 61 m
Arbeitshöhe

Maximaler
Sicherheits-
standard

Einfach überall
verfügbar

Günstige Tarife
für jeden
Mietzeitraum

Bequeme
Buchung durch
Call-Center

Besuchen Sie uns auf
der WINDTECH, Husum:
HALLE 2, STAND B 208

Beratungs-
und Info-
Hotline:
0180
3 227 227

Aachen
Alpen
Berlin
Bielefeld
Bremen
Dortmund
Düsseldorf
Duisburg
Essen
Frankfurt
Hamburg
Hannover
Köln
Leipzig /
Halle
Martinsried
München-
Riem
Nürnberg
Regensburg
Stuttgart

**Wissenschaft
und Technik**

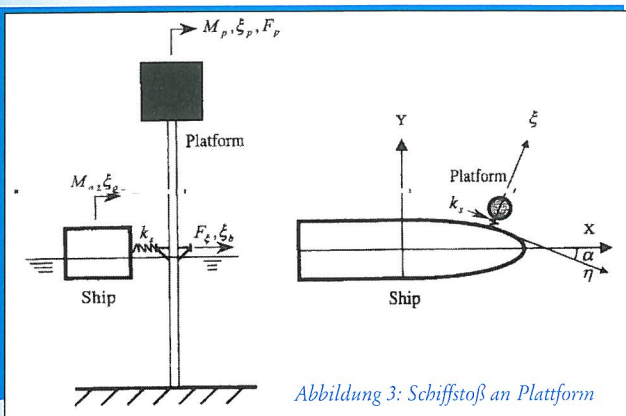


Abbildung 3: Schiffstoß an Plattform

Eisbelastung

Da in den hier zu diskutierenden Standorten für Windenergieanlagen eine Belastung durch Eisbergstoß als ausgeschlossen gelten kann, ist lediglich die Belastung durch den Druck einer Eisdecke vor allem für Standorte in der Ostsee zu berücksichtigen. Zur Eisdruckbelastung liegen Messungen und Ergebnisse mehrerer Versuchsreihen

der Hamburgischen Schiffbau Versuchsanstalt vor. Ein Schätzwert kann für eine 50 cm starke Eisdecke und einem Schaftdurchmesser in der Wasserlinie von 4 m bei einer Eisdruckfestigkeit von 10 MPa zu 20 MN angegeben werden (siehe Abb. 4).

Eisdruckkraft

Eisfestigkeit: 10 MPa
 Dicke der Eisdecke: 50 cm
 Durchmesser: 4 m

$$F = 4 \cdot 0,5 \cdot 10 = 20.000 \text{ kN}$$

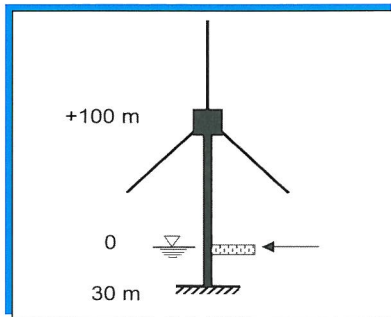


Abbildung 4: Eisdruck

Schlussfolgerungen

Obwohl die Errichtung von Offshore-Windenergieanlagen eine neue Problemklasse bildet, kann für die sichere Bemessung auch auf Schiffstoß und Eisbelastung auf vorhandene Bemessungsgrundlagen zurückgegriffen werden. Eine besondere Bedeutung kommt dabei der notwendigen Überlagerung von Lastfällen zu. Vorbehaltlich einer genaueren Untersuchung und Risikoabschätzung ist durch die normale Bemessung für extreme Windlasten eine große Reserve anzunehmen, die auch nicht zu überlagernde Sonderlastfälle abdeckt.

Dr.-Ing. Oswald Klingmüller

ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik, Kassel): Ausgewählte Standorte im WMEP-Fernmessnetz „250-MW-Wind-Programm“

WKA-Typ	Nenn- lsg. (kW)	Rotor ø (m)	Naben- höhe (m)	Standort	Werte im August 2001				kumulierte Werte ab Januar 2001				
					WKA-Abgabe (kWh)	spez. Ener.* (kWh/m ²)	mittl. Windgesch. (m/s) (Messh.m)	WKA-Abgabe (kWh)	spez. Ener.** (kWh/m ²)	mittl. Windgesch. (m/s) (Messh.m)			
BINNENLANDSTANDORTE					Messung beendet!								
Südwind N 1230	30	12,5	30,5	Feuerscheid / Rheinland-Pfalz									
AN Bonus 150/30	150	23	30	Grebenhain-Hartmannshain / Hessen	8.942	22	1,9	30	121.706	293	4,6	30	
Nordex 150	150	27	36	Altenbeken / Nordrhein-Westfalen	12.773	22	3,0	30	162.549	284	4,3	30	
HSW 250	250	28,5	28,5	Grebenhain-Hartmannshain / Hessen	15.093	24	1,9	30	185.060	290	4,6	30	
Enercon 33	280	33	35,6	Breitnau / Baden-Württemberg	7.658	9	3,0	10	90.307	106	4,0	10	
Tacke TW 300	300	33	50	Reinholterode / Thüringen	31.104	36	4,0	10	296.880	347	4,1	10	
Enercon E 40	500	40,3	42	Koxhausen / Rheinland-Pfalz	35.838	28		10	448.554	352		10	
AN Bonus 600/41	600	41	42,8	Möhnese / Nordrhein-Westfalen	27.000	20	##		391.597	297	##		
AN Bonus 1 MW/54	1.000	54	50	Altenbeken / Nordrhein-Westfalen	78.167	34	3,0	30	813.691	355	4,3	30	
Nordtank NTK	1.500	64	68	Wünneberg-Helmern / Nordrh.-W.	123.300	38		10	1.230.429	382		10	
Vestas V 63/1500	1.500	63	60	Dahlem-Berk / Nordrhein-Westfalen	88.187	28	3,8	30	1.158.959	372	4,1	30	
STARKWINDSTANDORTE													
WTN 200/26	200	26	30	Uelvesbüllkoog / Schleswig-Holstein	27.391	52	4,5	10	226.308	426	4,8	10	
Micon 530-250	250	26	30	Reußenköge / Schleswig-Holstein	37.143	70		30	281.050	529		30	
Micon 750-400	400	31	36	Reußenköge / Schleswig-Holstein	61.202	81		30	458.615	608		30	
Vestas V 39/500	500	39	40,5	Reußenköge / Schleswig-Holstein	96.573	81		30	696.849	583		30	
Enercon E 40	500	40,3	42	Reußenköge / Schleswig-Holstein	107.617	84		30	791.447	620		30	
Tacke TW 600	600	43	50	Schülp / Schleswig-Holstein	86.793	60	5,4#	30	736.853	507	5,7#	30	
Nordex N 52	800	52	60,5	Weener / Niedersachsen	93.744	44	3,5	10	903.965	426	4,0	10	
HSW 1000	1.000	54	55	Bosbüll / Schleswig-Holstein	159.755	70		10	1.377.295	601		10	
Enercon E 66	1.500	66	68	Emden / Niedersachsen	241.673	71		48	2.341.215	684		48	
Vestas V 63/1500	1.500	63	60	Kaiser-Wilhelm-Koog / Schl.-Holstein	229.706	74		30	2.078.081	667		30	
Micon 1500/64	1.500	64	68	Ahrenshöft / Schleswig-Holstein	214.762	67	4,7	30	1.779.286	553	5,0	30	
INSELVERGLEICH													
Vestas V 25/200	200	25	30	Pellworm / Schleswig-Holstein	38.844	79	5,4	10	318.598	649	5,7	10	
Vestas V 25/200	200	25	30	Westfehmar / Schleswig-Holstein	38.989	79	6,5	30	276.914	564	6,3	30	
Vestas V 27/225	225	27	31,5	Oevenum-Föhr / Schleswig-Holstein	46.070	80	6,4	30	371.640	649	6,6	30	
Enercon E 33	300	33	37,5	Altenkirchen-Rügen/Mecklenburg-Vp.	59.436	69	6,2	30	438.852	513	6,1	30	
AN Bonus 450/37	450	37	35	Schlagsdorf / Schleswig-Holstein	69.040	64	6,5#	30	524.118	487	6,3#	30	
Enercon E 40	500	40,3	42	Altenkirchen-Rügen/Mecklenburg-Vp.	98.272	77	6,2#	30	809.355	635	6,1#	30	
Enercon E 66	1.500	66	68	Bohlendorf-Rügen/Mecklenburg-Vp.	290.220	85	6,2#	30	2.468.580	722	6,1#	30	

#) Messergebnis einer benachbarten Windmessstation ##) Windmessung abgeschlossen!