

Sensitivitätsuntersuchungen zur Ermüdung der Tragstrukturen von Offshore-WEA unter Seegangsbeanspruchungen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Dipl.-Ing. Patric Kleineidam

Institut für Stahlbau; Universität Hannover

Appelstraße 9A; 30167 Hannover

www.stahlbau.uni-hannover.de; schaumann@stahl.uni-hannover.de

1 Einleitung

Die Belastungen, denen Offshore-WEA ausgesetzt sind, werden vor allem durch Wellen und Wind bestimmt. Zusätzlich können z.B. in der Ostsee noch bedeutende Anteile infolge von Eislasten auftreten. Wie bei den Windenergieanlagen an Land sind neben der Bemessung der Tragfähigkeit mit Lastszenarien großer Wiederkehrperioden (z.B. 50-Jahres-Welle) besonders die Untersuchungen im dynamischen Bereich von entscheidender Bedeutung. Kombiniert mit den hochdynamischen Beanspruchungen infolge des Anlagenbetriebes aus Windeinwirkung sind Wechselanregungen aus den Wellen zu berücksichtigen. In der Nordsee können aus Wellenlasten Lastwechselzahlen von ca. $1,5 \cdot 10^8$ innerhalb von 25 Jahren erreicht werden. Für Windenergieanlagen werden in dieser Zeit allein aus dem Betrieb Lastwechselzahlen von bis zu 10^9 erwartet.

Um die Einflüsse auf die Ermüdungsbeanspruchungen infolge der Wellen isoliert zu betrachten, werden in den hier vorgestellten Untersuchungen die Beanspruchungen aus dem Wind zunächst nicht einbezogen. Die Untersuchungen umfassen Sensitivitätsstudien zum deterministischen Ermüdungsnachweis der Tragstruktur infolge der Wellenbeanspruchung. Die Ergebnisse können auf die kombinierten Beanspruchungen übertragen werden. Ausführlicher wurde über diese Fragestellung von den Verfassern auf dem „2. Symposium Offshore-Windenergie – Bau- und umwelttechnische Aspekte“ berichtet [12].

2 Deterministisches Lebensdaueranalyse

Die deterministische Lebensdaueranalyse von Offshore-Konstruktionen unter Wellenbeanspruchung basiert auf der Untersuchung von Einzelwellen. Diese Untersuchungen müssen in geeigneter Weise sowohl das Langzeitverhalten der Seegangsbeanspruchungen als auch das dynamische Verhalten der Tragstruktur widerspiegeln.

Die Erhöhungsfaktoren zur Berücksichtigung des dynamischen Strukturverhaltens infolge der Anregung aus den Wellen werden hier über eine Frequenzganganalyse ermittelt. Die elastischen Bodeneigenschaften werden zunächst nicht berücksichtigt. Wie z.B. in [10] gezeigt wurde, ist der Einfluss der Bodensteifigkeit auf die erste Eigenfrequenz ab einer bestimmten Steifigkeit nur noch gering. Hier wird für die folgenden Untersuchungen eine entsprechende Steifigkeit des Bodens unterstellt. Die Schlussfolgerungen lassen sich ebenfalls auf Monopiles mit geringeren Eigenfrequenzen aufgrund der geringeren Bodensteifigkeiten übertragen. Die Erregerlast wird in der Frequenzganganalyse als repräsentative Wellenbelastung aufgebracht. Die Form der Belastung wird nach [5] festgelegt. Das mechanische Modell für die vorgestellten Untersuchungen ist in Abbildung 1 dargestellt.

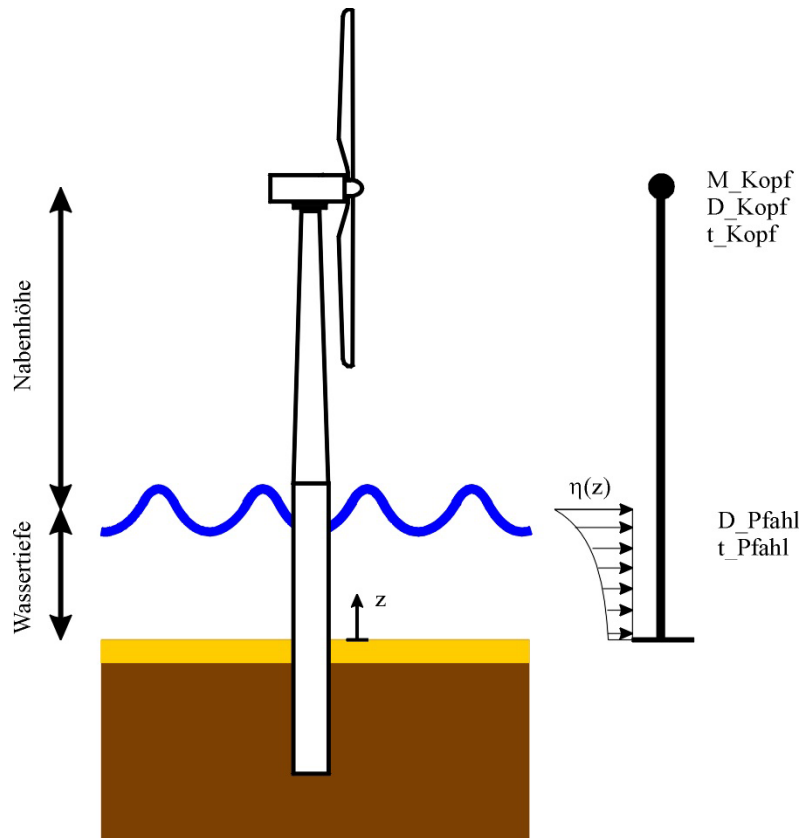


Abbildung 1: Monopile, Modell für Berechnungen und angesetzte Wellenverteilung für Frequenzganganalyse

Wellenhöhenüberschreitungsdiagramm

Das Langzeitverhalten des Seegangs kann mit Hilfe von Wellenverteilungsdiagrammen beschrieben werden (sog. Scatter-Diagramme), in denen die Häufigkeit des Auftretens verschiedener Seegangszustände angegeben sind, die durch signifikante Wellenhöhen und –perioden gekennzeichnet werden. In [6] sind Wellenverteilungsdiagramme für verschiedene Seegebiete dargestellt, unter anderem ist ein Diagramm für die gesamte Nordsee enthalten. Um genauere Angaben für einen betrachteten Standort, z.B. Borkum-Riffgrund, zu erhalten, wird auf [2] zurückgegriffen. Dort sind Informationen über die Wellenverhältnisse in der Nordsee enthalten, unterteilt nach 15 verschiedenen Seegebieten. Angegeben sind die Häufigkeiten unterschiedlicher Seegangsstufen.

Mit geeigneten statistischen Auswertungen, die eine Weibull-Verteilung für die Häufigkeiten des Seegangs unterstellen, kann aus diesen Angaben das Wellenhöhenüberschreitungsdiagramm abgeleitet werden. Dieses beschreibt, wie groß die statistisch erwartete Anzahl n von Wellen ist, die unter Berücksichtigung der Kurzzeitseegangszustände ein bestimmtes Höhenniveau h in einem Bezugszeitraum T überschreiten, siehe dazu z.B. [5].

$$n(h) = n_0 \cdot \exp\left(-\left(\frac{h}{c}\right)^\alpha\right) \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Bereich der auftretenden Wellenhöhen wird in einzelne Wellenhöhenklassen aufgeteilt, für die die Anzahl der auftretenden Wellen in den Klassen mit Gleichung 1 bestimmt wird.

Wellenhöhen-Perioden-Zuordnung

Zur Berechnung der zu den einzelnen Wellenhöhenklassen zugehörigen Spannungsschwingbreiten muss der verwendeten mittleren Wellenhöhe einer Klasse eine Wellenperiode zugeordnet werden. Für die Zuordnung der Wellenperiode zu einer bestimmten Wellenhöhe existieren unter-

schiedliche Ansätze. In [5] sind unter anderem die beiden folgenden Zusammenhänge angegeben.

Zuordnung 1

$$T = 0,7 + 4,2 \cdot h^{0,4}$$

Gleichung 2

Zuordnung 2

$$h = 0,115 \cdot T^{1,788}$$

Gleichung 3

Die ermittelte Lebensdauer kann davon abhängen, welche Zuordnung gewählt wird. Denn mit Wahl einer anderen Zuordnung verschiebt sich die Übereinstimmung von Wellenperiode und Eigenschwingzeit zu anderen Wellenhöhen. Dies führt dazu, dass die hohen Werte der dynamischen Überhöhungsfaktoren bei anderen Wellen und Wellenhäufigkeiten auftreten.

Beanspruchung der Tragstruktur

Bisher wurde die Charakteristik der Seegangszustände beschrieben. Um daraus die Reaktionen der Tragstruktur zu bestimmen, muss eine Verbindung zwischen der Seegangsbeanspruchung und der Tragstruktur hergestellt werden. Eine Welle kann mit Hilfe der Parameter Wellenhöhe, -periode und Wassertiefe so charakterisiert werden, dass eine Bestimmung der erforderlichen Wellentheorie mit Hilfe von Diagrammen möglich ist, wie sie z.B. in [1] angegeben sind. Weitere Informationen sind hierzu z.B. in [11] zu finden. In den hier durchgeführten Untersuchungen wird für die Berechnung der Wellenlasten das Programm verwendet, das im Rahmen der Bearbeitung des GIGAWIND-Projektes am Institut für Strömungsmechanik entstanden ist, siehe [8]. Zur Koppelung des Programms mit dem hier verwendeten Strukturberechnungsprogramm ANSYS wurde ein geeignetes Interface programmiert. Die im Folgenden verwendeten Spannungsschwingbreiten wurden aus den maximalen und minimalen Momenten für einen Wellendurchgang unter Berücksichtigung der oben beschriebenen dynamischen Einflüsse ermittelt.

3 Vergleichende Untersuchungen

Zur Untersuchung des Einflusses der Systemeigenschaften von Offshore-WEA auf die rechnerische Lebensdauer infolge der Wellenbeanspruchung werden hier die Schädigungen für in Frage kommende Strukturen unter bestimmten Randbedingungen für einen Zeitraum von 10 Jahren untersucht. Als grundlegende Umgebungsbedingung wird zunächst von dem geplanten Standort Borkum-Riffgrund ausgegangen. Die Schädigungsberechnungen werden hier exemplarisch für eine Stumpfnah mit besonderer Güte in Höhe des Meeresbodens durchgeführt. Dies ist ein Kerbdetail, das in allen betrachteten Vorschriften zu finden ist und hier für die Verbindung der Grobbleche der Rohre untereinander angesetzt wird. Untersucht werden Strukturen für Anlagen der Leistungsklasse 2 MW sowie 4,5 MW. Die verwendeten Abmessungen beruhen auf Vordimensionierungen von Monopile-Strukturen unter Extremlasten. Die zugrunde liegenden Lasten wurden von der Fa. Enercon zur Verfügung gestellt. Hier werden die Ergebnisse für einen repräsentativen Teil der Gesamtuntersuchung vorgestellt. Kenngrößen der Systeme sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Über die 1. Eigenfrequenz des Turmes der Tragstruktur werden dort die untersuchten Systemvarianten in die Steifigkeitskategorien nach [9] eingeordnet. Die gewählten Parameter der 2-MW-Anlagen mit einer Nenndrehzahl von 21 U/min liegen im Übergangsbereich von Soft-Soft zu Soft-Stiff, während die Parameter der 4,5-MW-Anlage (Nenndrehzahl 12 U/min) im Soft-Stiff-Bereich liegt.

System-Nr.	Nennleistung [MW]	Nabenhöhe [m]	Kopfmasse [t]	Wassertiefe [m]	D_Pfahl [mm]	t_Pfahl [mm]	D_Kopf [mm]	t_Kopf [mm]	1. Eigenfrequenz [Hz]	Auslegung
1	2	70	90	30	4000	55	2000	20	0,336	Soft-Soft
2	2	70	90	30	4000	60	2000	20	0,347	Soft-Soft
3	2	70	90	30	4000	65	2000	20	0,358	Soft-Stiff
4	2	70	90	30	4500	60	2000	20	0,401	Soft-Stiff
5	2	70	90	30	4500	70	2000	20	0,426	Soft-Stiff
6	4,5	100	355	30	6500	66	3000	20	0,279	Soft-Stiff

Tabelle 1: Parametersätze der untersuchten Systemvarianten

Einfluss der Vorschriften

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Lebensdaueranalyse nach unterschiedlichen Normen auf Basis des Nennspannungskonzeptes vergleichend nebeneinandergestellt. In die Betrachtung werden die folgenden Vorschriften einbezogen:

DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen [3]

GL-Richtlinie [4]

N-004 [7]

Zur Durchführung eines Ermüdungsnachweises mit dem Nennspannungskonzept werden die entsprechenden Wöhlerlinien benötigt. Unterschiede zwischen den Vorschriften ergeben sich durch die Lage der Wöhlerlinie, sowie durch die verwendeten Sicherheitskonzepte.

Werden die Schädigungssummen den Onshore-Vorschriften mit denen der Offshore-Vorschriften bei vorhandenem Korrosionsschutz verglichen, so liegen die Schädigungssummen der DIBt-Richtlinie unterhalb der Schädigungen, die sich für die korrosionsgeschützten Offshore-Bauwerke nach GL (GL-A) ergeben aber oberhalb der Werte nach N-004 (N-CP), wie für einige der untersuchten Systeme in Abbildung 2 dargestellt ist. Für ungeschützte Bauteile in korrosiver Umgebung werden Schädigungssummen ermittelt, die etwa den fünf- bis sechsfachen Wert derjenigen von korrosionsgeschützten Bauteilen erreichen. Die Beanspruchungen wurden für diesen Vergleich mit dem Wellenhöhen-Überschreitungsdiagramm für die Nordsee ermittelt.

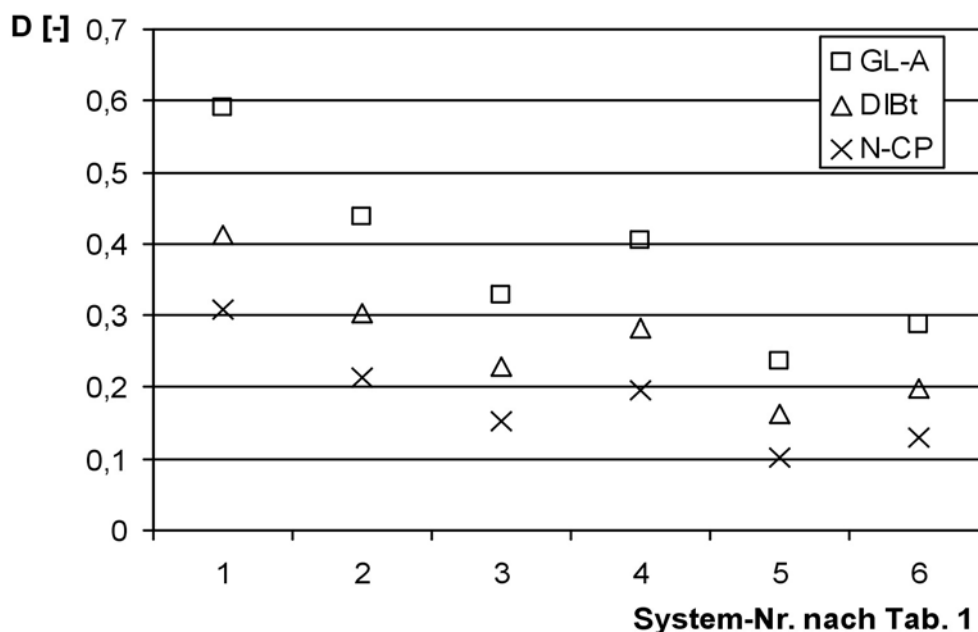


Abbildung 2: Schädigung der verschiedenen Systeme nach Tab. 1, bei Ansatz unterschiedlicher Vorschriften

Standortbezogene Schädigungen

Nachdem zunächst der Einfluss der unterschiedlichen Vorschriften auf die Lebensdauerberechnung untersucht worden ist, wird in diesem Abschnitt überprüft, wie sich die oben beschriebenen unterschiedlichen Wellenhöhen-Überschreitungsdiagramme für die gesamte Nordsee bzw. für Seegebiet „K“ Borkum auf die ermittelte Schädigung auswirken. Für diese beiden Fälle werden die Schädigungen nach N-004 (N-CP) ermittelt und in Abbildung 3 dargestellt. Die Verwendung der standortbezogenen Daten führt zu einer erheblichen Reduktion der Schädigungen für den Standort Borkum im Vergleich zu dem Ansatz des allgemeinen Scatter-Diagramms für die Nordsee.

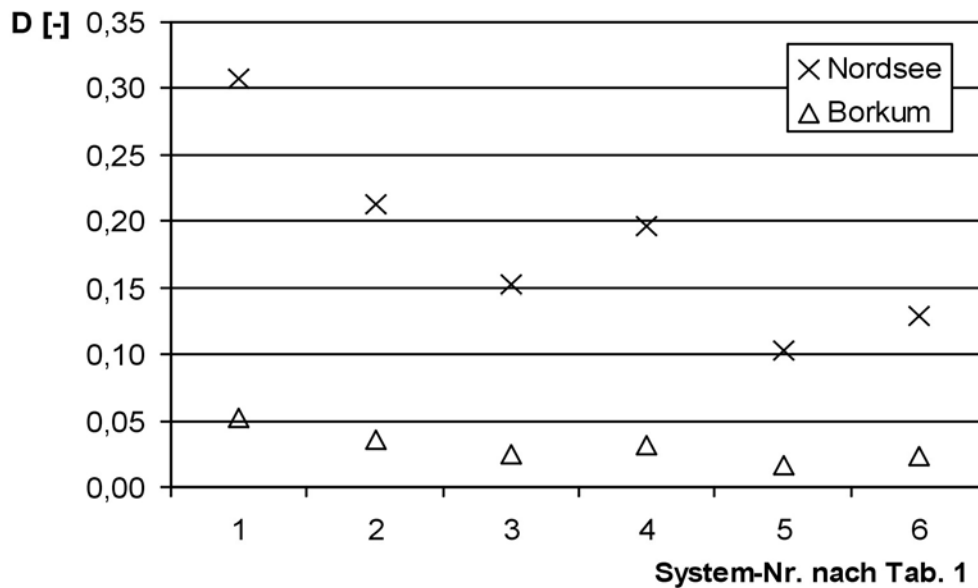


Abbildung 3: Schädigung N-CP der verschiedenen Systeme nach Tab. 1, bei Ansatz standortbezogener Wellenhöhenüberschreitungsdiagramme

Einfluss der Wellenhöhen-Perioden-Zuordnung

Durch die Verwendung unterschiedlicher Wellenhöhen-Perioden-Zuordnungen werden die Eigenschaften der Wellen beeinflusst. Weiterhin werden die dynamischen Erhöhungen in andere Wellenhöhen verschoben. Vergleichsbasis für die Auswirkungen auf den Ermüdungsnachweis ist die Schädigung N-CP, siehe Abbildung 4. Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Wahl der Wellenhöhe-Periodenzuordnung im untersuchten Parameterbereich die Lebensdauerprognose erheblich beeinflusst. Die Wellenhöhen-Perioden-Zuordnung ist daher weiter zu hinterfragen.

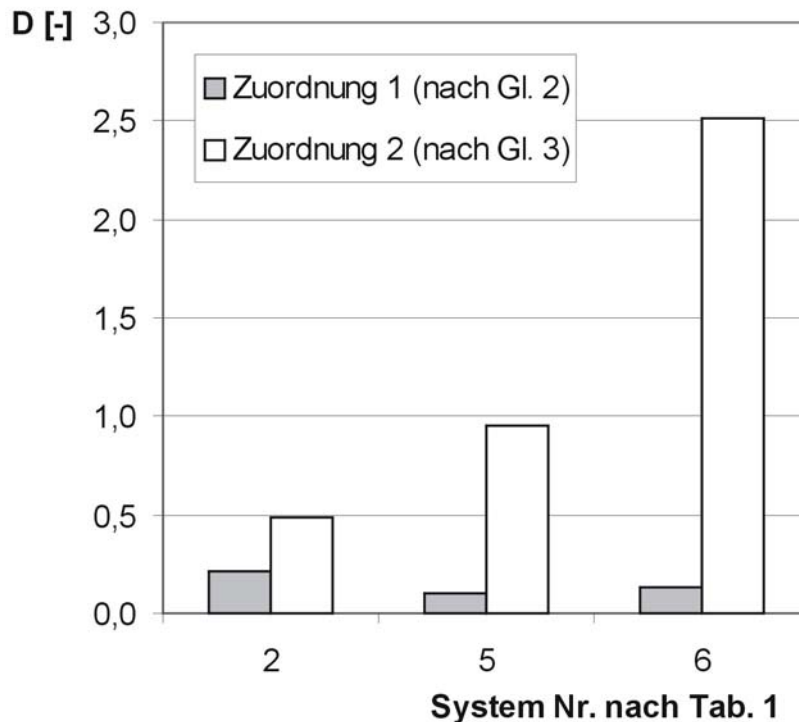


Abbildung 4: Schädigung für einige Systeme nach Tab. 1, bei Ansatz unterschiedlicher Wellenhöhen-Perioden-Zuordnung nach Gl. 2 bzw. 3

4 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde die deterministische Lebensdaueranalyse für Offshore-Bauwerke unter Seegangbeanspruchungen auf die Bedingungen angewendet, die für Offshore-WEA mit Monopile-Gründung zu erwarten sind. Bewusst wurde die Betrachtung hier auf die Beanspruchungen aus dem Seegang beschränkt. Für verschiedene mögliche Systemabmessungen von Offshore-WEA mit Monopile-Gründung für WEA der Größenordnung 2 MW und 4,5 MW wurde die Lebensdauer untersucht. Die Ergebnisse wurden unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen vergleichend beurteilt. Es zeigte sich vor allem, dass eine standortbezogene Ermittlung der Beanspruchungen sich erheblich auf die Nachweise auswirken kann. Die unterschiedlichen Vorschriften liefern Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung, wenn von ähnlichen Voraussetzungen bezüglich des Korrosionsschutzes ausgegangen wird.

Um die Fragen der standortspezifischen Beanspruchungen weiter zu klären, sollten Ergebnisse von Messkampagnen wie sie z.B. im Rahmen des FINO-Projektes durchgeführt werden, herangezogen werden, um die Ergebnisse weiter abzusichern. Für die weitere Entwicklung des Modells ist die Verwendung von durch Simulationen erzielten Zeitreihen der Wellenbeanspruchungen geplant, die auf den Spektren der zugrundeliegenden Seegangszuständen beruhen. In den weiteren Bearbeitungsschritten des Projektes ist geplant, die Ergebnisse aus Seegangssimulationen zu verwenden, die am Institut für Strömungsmechanik durchgeführt werden, um den Einfluss auf die Schädigungen der Tragstruktur im Vergleich zu dem deterministischen Nachweis-konzept nachzuvollziehen, das den hier vorgestellten Berechnungen zugrunde liegt. Darüber hinaus werden die entwickelten Verfahren auf komplexere Strukturen, wie z.B. Tripod-Gründungen übertragen.

Literatur

- [1] Arbeitsausschuss „Ufereinfassungen“ der HTG und der DGGT [Hrsg.]: EAU 1996 Häfen und Wasserstrassen. 9. Auflage Ernst & Sohn 1997 Berlin.
- [2] BSH [Hrsg.]: Klima und Wetter in der Nordsee. Hamburg: BSH 1994.
- [3] DIBt [Hrsg.]: Richtlinie für Windenergieanlagen. Entwurf 2002.
- [4] Germanischer Lloyd [Hrsg.]: Regulations for the Certification of Offshore Wind Energy Conversion Systems. 1995.
- [5] Hapel, K.-H.: Festigkeitsanalyse dynamisch beanspruchter Offshore-Konstruktionen. Braunschweig: Vieweg 1990.
- [6] Hogben, N.; Dacunha, N.M.C.; Oliver, G.F.: Global Wave Statistics. Feltham Middlesex: British Maritime Technology 1985.
- [7] N-004, Design of Steel Structures. NORSOK Standard December 1998
- [8] Nguyen, B., Mittendorf, K., (2002), Theory Manual - A computerprogram to calculate wave loading on vertical and inclined tubes, in prep., Inst. f. Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen, Universität Hannover.
- [9] Rooij, R.v. [Hrsg.]: Terminology, Referenc Systems and Conventions. Duwind 2001.004. TU Delft 2001.
- [10] Schaumann, P.; Kleineidam, P.: Entwurf und Bemessung der Tragkonstruktion von Offshore-WEA. Symposium Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte, 25. Juni 2001, Hannover.
- [11] Wagner, P.: Meerestechnik. Berlin: Ernst & Sohn 1990.
- [12] Schaumann, P.; Kleineidam, P.: Einflüsse auf die Ermüdung der Tragstruktur. 2. Symposium Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte, 9. September 2002, Hannover. (www.gigawind.de)