

Statistische Untersuchung von MetOcean-Daten für die Bemessung von Offshore-Windenergieanlagen in deutschen Gewässern

Anja Brüning und Elimar Precht

Zusammenfassung

Eine optimale Planung von Offshore Windparks setzt die bestmögliche Kenntnis der meteorologischen und ozeanographischen Rahmenbedingungen voraus. Dieser Artikel zeigt, wie statistische Auswertungen von Hindcastdaten zu diesem Zweck genutzt werden können. Numerische Modelle finden Anwendung, um die ozeanographischen Bedingungen großer Seegebiete zu berechnen und lange Ergebniszeitreihen an beliebigen Positionen aus der räumlichen Ergebnistabelle auszulesen. Die Ergebnisse der Analyse von Normal- und Extrembedingungen begünstigen den Entwurfs- und Planungsvorgang, sowie den betrieblichen Ablauf eines Windpark Projektes. Je nach Detailgrad kann zum Beispiel folgender Nutzen aus den Auswertungen gezogen werden: Die Entwicklung eines kosteneffektiven Entwurfs- und Betriebsplans oder eine Risikobewertung für den Lebenszyklus des Parks aufgrund eines verbesserten Verständnis der Umgebungsbedingungen.

Schlagwörter

Meteorologische und hydrographische Standortbedingungen, Offshore, Extremwertanalyse, Wahrscheinlichkeitsverteilung, Multivariate Eintrittswahrscheinlichkeit

Summary

This paper summarises how statistical analyses of hindcast MetOcean data can be applied to find optimal solutions for offshore windfarm projects. Models can be used to generate oceanographic conditions for large sea areas where long time series can be extracted from any position of interest. The results delivered by analyses of normal and extreme conditions are valuable information for the design, planning and operation of an offshore windfarm project. Based on the level of detail benefits are the development of a cost effective design and operation process as well as a better understanding of the site conditions for the development of a risk assessment for the entire lifecycle of offshore wind farms.

Keywords

metocean data, offshore environments, extreme value analysis, probability distribution, joint probabilities

Inhalt

1	Einleitung	182
2	Datengrundlage	183
3	Statistische Untersuchung von MetOcean-Daten	184
3.1	Normalbedingungen	184
3.1.1	Zeitreihen und Statistik	185
3.1.2	Scatter-Diagramme und Rosendiagramme	185
3.1.3	Ermüdungsdaten	186
3.1.4	Windrichtung-Wellenrichtung Abweichung (englisch: Wind-Wave Misalignment)	188
3.1.5	Operationelle Parameter - Wetterfenster/Persistenzstatistiken	189
3.2	Extrembedingungen	191
3.2.1	Extremwertstatistische Analyse	192
3.2.2	Wahrscheinlichkeitsverteilungen	192
3.2.3	Konfidenzgrenzen	194
3.2.4	Einzelwellen- und Wellenkammhöhen.....	194
3.2.5	Verteilungen für kurze Zeiträume.....	194
3.2.6	Einzelwellen (Stürme)	195
3.2.7	Extrema in Teildatensätzen.....	196
3.2.8	Optimierte Teildatensätze (direktional).....	196
3.2.9	Multivariate Wahrscheinlichkeitsverteilung.....	197
4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	198
5	Danksagung.....	199
6	Schriftenverzeichnis.....	199

1 Einleitung

Die Planung von Offshore-Windparks erfordert eine solide und zuverlässige meteorologische und ozeanographische Datenbasis (MetOcean-Daten). Viele existierende Offshore-Standards basieren auf der Erfahrung aus der Öl-und Gasindustrie. Bei deren näherer Betrachtung fiel auf, dass Anpassungen erforderlichen waren, um standortspezifische Anforderungen und Anforderungen der Windparkindustrie zu berücksichtigen. Zwar liefern die Standards für die Konstruktion von Offshore-Windparks (DNV 2011; GL 2012; IEC 2009) Anhaltspunkte für die zu wählende Methodik, doch die einzelnen Analysetools unterliegen häufig Veränderungen auf Grund des wissenschaftlichen Fortschritts und individueller Beurteilungen.

DHI/DHI-WASY hat in einer Vielzahl von Studien Verfahren etabliert, die zuverlässige MetOcean-Daten und dazugehörige statistische Parameter für Zwecke der Entwicklung, Konstruktion/Errichtung sowie des Betriebs und der Instandhaltung von Anlagen liefern. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die angewendeten statistischen Analysen standortspezifischer ozeanographischer Parameter unter normalen und Extrembedingungen.

gen. Die Ergebnisse können für die Bemessung von Offshore-Bauten dienen, entweder im Hinblick auf den Grenzzustand der Ermüdung (fatigue limit state, FLS), d. h. die Möglichkeit eines Versagens infolge akkumulierter Einwirkungen auf Grund von zyklischen Beanspruchungen, oder im Hinblick auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ultimate limit state, ULS).

Für praktische Anwendungen werden vorzugsweise lange Zeitreihen für die Projektstandorte ausgewertet. Diese lassen sich durch Hindcast-Modellierungen oder aus Beobachtungsdaten gewinnen. Es werden Verfahren und Werkzeuge für spätere Analysen dargestellt. Darüber hinaus wird die Sensitivität gegenüber der Auswahl der Methoden diskutiert. Der Beitrag schließt mit einem Fazit über die Eignung und Genauigkeit von MetOcean-Daten für die Entwicklung von Offshore-Windenergieanlagen in deutschen Gewässern.

2 Datengrundlage

Zur Durchführung statistischer Analysen von Normal- und Extrembedingungen in einem Offshore-Windpark (OWP) sollten vorzugsweise langfristige Zeitreihen von Wasserständen, Strömungen und Seegang für den Projektstandort betrachtet werden. Die Daten lassen sich entweder aus Messungen in der Nähe des OWP ableiten oder aus Hindcast-Zeitreihen für das Projektgebiet gewinnen.

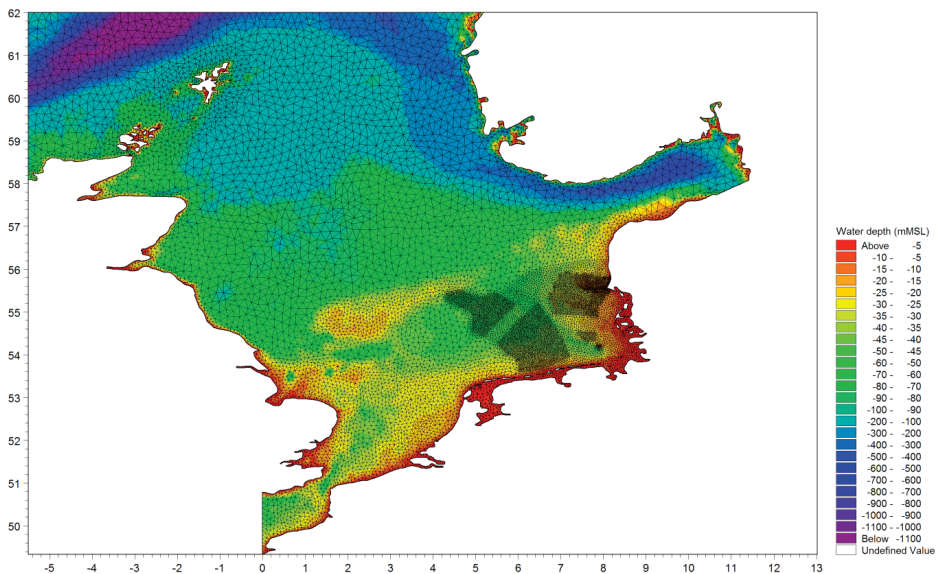


Abbildung 1: Bathymetrie und Gitter eines spektralen Seegangsmodells für die Nordsee mit Berechnungsschwerpunkt auf der Deutschen Bucht.

Bisher wurden OWPs in der Deutschen Bucht und der Ostsee meist in Gebieten geplant, für die es keine oder kaum Beobachtungsdaten gab. Beobachtungsdatensätze decken üblicherweise kürzere Zeiträume ab und sind auf Grund zeitlicher Unterbrechungen möglicherweise nicht konsistent. Selbst wenn lange Zeitreihen verfügbar sind, betreffen sie oft

gerade nicht den eigentlichen Projektstandort. In der überwiegenden Zahl der Fälle eignen sich solche Daten nicht als Grundlage für zuverlässige standortspezifische statistische Analysen. Eine mögliche Lösung ist daher die Verwendung der Hindcast-Methode zur Bewertung von MetOcean-Bedingungen an verschiedenen Standorten.

Die Hindcast-Methode basiert auf der Beschreibung großer Seegebiete, z. B. der gesamten Nord- oder Ostsee, mittels numerischer Modelle, die in der Lage sind, Strömungen, Wasserstände und Seegang zu simulieren (Abb. 1). Die Modelle werden von langen Zeitreihen meteorologischer Daten angetrieben. Dabei ist es unbedingt erforderlich, die Modelle mittels Beobachtungsdaten zu validieren.

Die Modellierung von Strömungen und Wasserständen erfolgt über ein hydrodynamisches Modell, z. B. MIKE 21 HD FM (FM – flexible mesh – flexibles Gitter), unter Verwendung langer Zeitreihen von astronomischen Tiden, Windfeldern und atmosphärischem Luftdruck. Die Modellierung des Seegangs erfolgt mithilfe eines spektralen Seegangsmodells der neuesten Generation, z. B. MIKE 21 SW FM. Die Randbedingungen für dieses Modell sind wiederum die Windfelder sowie die Strömungen und Wasserstände aus der hydrodynamischen Berechnung, da diese die Ausbreitung des Wellenfeldes und die Wellenhöhen im Flachwasser beeinflussen. Darüber hinaus werden Wellenspektren aus dem Nordatlantikmodell an den Modellrändern integriert, um die vom Nordatlantik her einlaufende langperiodische Dünung zu berücksichtigen.

Mithilfe dieser Modelle ist es möglich, die verfügbaren langen Zeitreihen für Windfelder zu verwenden, um Seegang, Wasserstände und Strömungen für längere Zeiträume zu berechnen (Hindcast). Die Zeitreihen können nachfolgend einer sorgfältigen statistischen Analyse unterzogen werden.

3 Statistische Untersuchung von MetOcean-Daten

Für die Bemessung von Windkraftanlagen und ihren Gründungen sind Informationen zu den hydrographischen Bedingungen am Standort des jeweiligen OWP erforderlich. Zur Einschätzung der Normal- und Extrembedingungen von Wasserständen, Strömungen und Seegang werden Referenzpunkte des jeweiligen Gebiets für die Analyse ausgewählt. Die Auswahl hängt von der Größe des Projektgebiets, der Komplexität der Bathymetrie und dem für die Bemessung benötigten Detaillierungsgrad ab.

3.1 Normalbedingungen

Die Beobachtungsdaten bzw. die ermittelten MetOcean-Daten werden einer Reihe von Analysen unterzogen, in denen die Bemessungsrandbedingungen am Projektstandort im Hinblick auf Betrieb und Ermüdungsfestigkeit im Einzelnen untersucht werden: Zeitreihen von stündlichen Werten werden statistisch ausgewertet und für die Erstellung von Streudiagrammen und Streutabellen sowie die Darstellung von Wetterfenstern und Ausfallzeiten herangezogen.

3.1.1 Zeitreihen und Statistik

Zeitreihen und allgemeine Statistiken geben die Werte von Wind, Wasserstand, Strömung und Seegang wieder, die für die Analyse der Normalbedingungen verwendet werden. Die erforderlichen Parameter, die unmittelbar aus dem Hindcast-Modell gewonnen werden, sind z. B. die höchste modellierte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über dem Mittelwasser (U_{10}), die maximalen Wasserstandsschwankungen (bestehend aus dem Tidenhub und residuellen – durch Windstau erzeugten – Anteilen), die Gesamtströmungsgeschwindigkeit und Parameter des Seegangsspektrums (einschließlich Windsee und Dünung), nämlich signifikante Wellenhöhe (H_{m0}), Spitzenperiode (T_p) und Nulldurchgangsperiode (T_{02}).

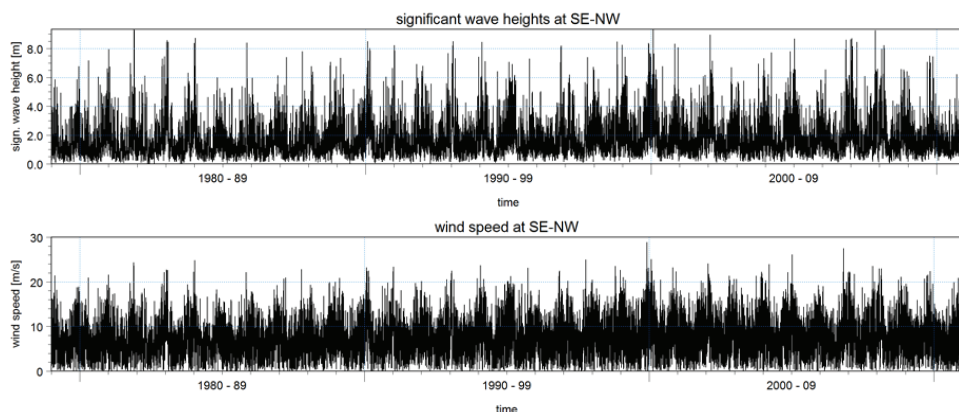


Abbildung 2: Lange Zeitreihen modellierter Hindcast-Daten für den OWP Sandbank, signifikante Wellenhöhe (oben) und Windgeschwindigkeit (unten).

Abb. 2 zeigt eine Zeitreihe von Hindcast-Daten (in diesem Fall die signifikante Wellenhöhe und die Windgeschwindigkeit am Projektstandort Sandbank). Diese Datensätze für verschiedene Parameter bilden die Grundlage für anschließende Analysen.

3.1.2 Streudiagramme und Rosendiagramme

Basierend auf der MetOcean-Datenbank können Streudiagramme/Rosendiagramme für jährliche/omnidirektionale, monatliche und direktionale Bedingungen für Kombinationen von Parametern erstellt werden, beispielsweise: signifikante Wellenhöhe mit Wellenperiode (Streudiagramm) oder Wellenrichtung (Rosendiagramm), sowie Wind-/Strömungsgeschwindigkeit mit Richtung. Für monatliche (Jan. - Dez.) und direktionale Bedingungen (basierend auf der mittleren Wellenrichtung MWD oder Windrichtung auf 10 m Höhe D_{10}) wird die Datenbank mittels eines dritten Parameters gefiltert.

Rosendiagramme illustrieren sehr gut die allgemeine Verteilung des jeweiligen Parameters. Die Abbildung der jährlichen/omnidirektionalen Bedingungen am Projektstandort Sandbank wie in Abb.3 dargestellt illustriert die Hauptströmungsrichtungen entlang der NW-SO-Achsen und zeigt, dass die stärksten Strömungen bei Ebbe auftreten.

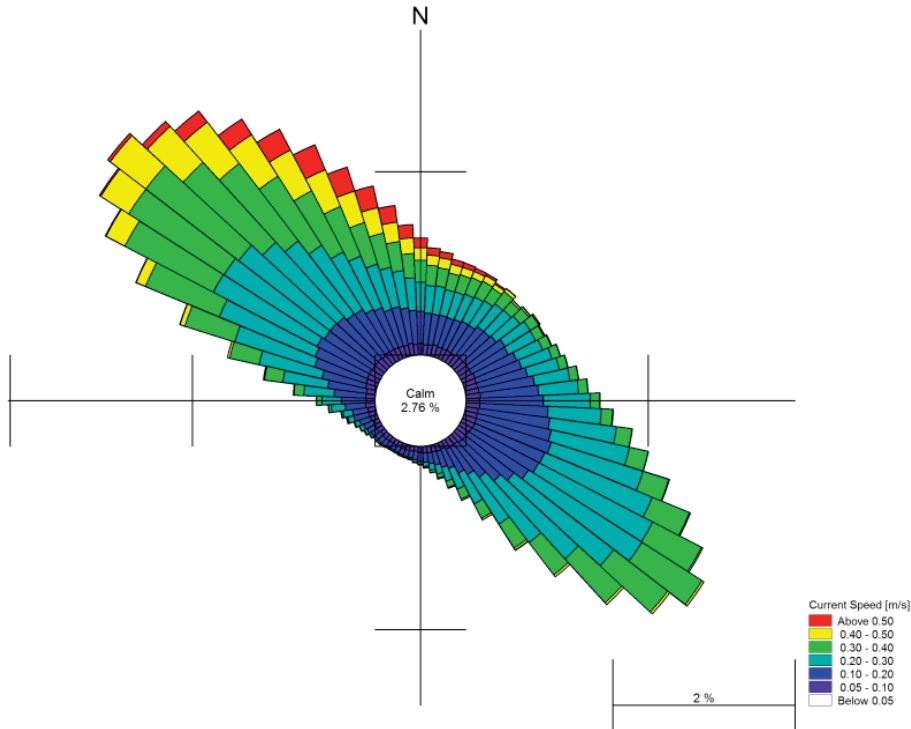


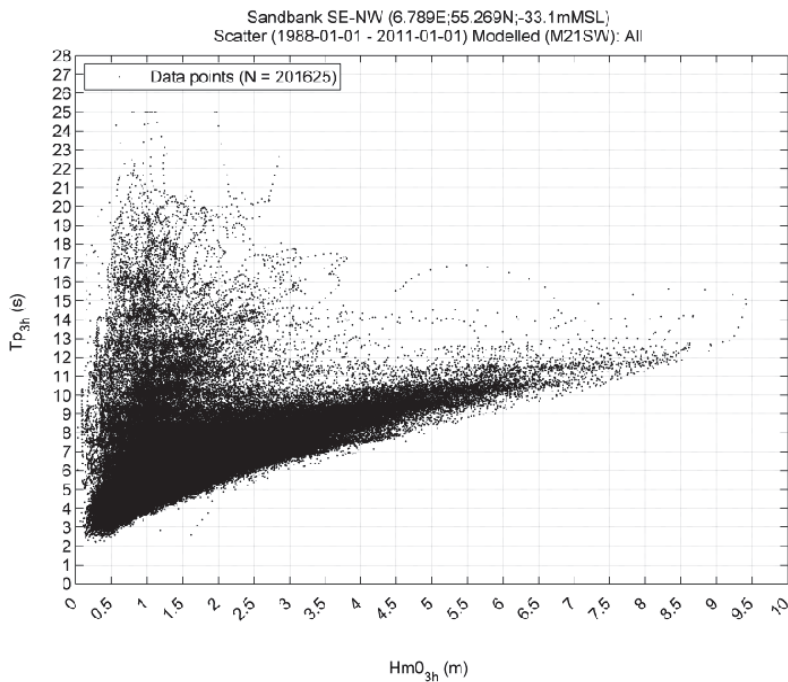
Abbildung 3: Strömungsrose für den Projektstandort Sandbank.

3.1.3 Ermüdungsdaten

Für die Ermüdungsanalyse werden signifikante Wellenhöhen und zugehörige Wellenperioden auf Basis von Streudiagrammen und -tabellen bewertet, um die wichtigsten Lastspiele beispielsweise für die Bemessung der Gründung zu ermitteln.

In Abb.4 ist ein omnidirektionales Streudiagramm mit der zugehörigen Streutabelle der signifikanten Wellenhöhe H_{m0} als Funktion der Spitzenwellenperiode (T_p) für einen über 3 Stunden andauernden Seegang am Projektstandort Sandbank dargestellt. Die Auflösung der Skalen ist 1 s für T_p beziehungsweise 0,5 m für H_{m0} .

Es sind eindeutige Abhängigkeiten zu erkennen, besonders klar wird dies bei hohem Wellengang. Allerdings könnten bei leichtem Wellengang durch Dünungseinfluss signifikante Fraktionen langperiodischer Wellen auftreten, wie hier anhand der höheren Spitzenwellenperioden für $H_{m0} < 4$ m in Abb. 4 verdeutlicht. Durch Polynomannpassung an die 1 % höchsten Wellen kann eine Korrelation zwischen der signifikanten Wellenhöhe und der Wellenperiode aus den Daten abgeleitet werden. Das Polynom, welches die Korrelation zwischen H_{m0} und T_{02} beziehungsweise T_p beschreibt, weist eine gute Übereinstimmung mit den aus der Literatur bekannten Beziehungen auf (s. z. B. JOURNÉE und MASSIE 2001, WMO 1998).



Reference Point Sandbank SE-NW - All Wind Directions

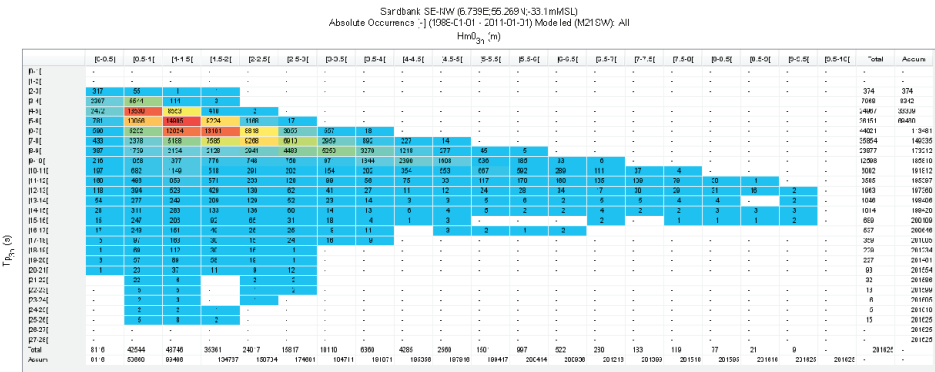


Abbildung 4: Scatter-Diagramm und -Tabelle für H_{m0} über T_p -modellerte Daten am OWP Sandbank.

Weitere Verbesserungen der verwendeten Hindcast-Modelle erlauben die Verwendung ihrer Frequenzspektren zur Bestimmung von Streudaten einzelner Wellenhöhen H in Kombination mit der Wellenperiode T für Berechnungen von Ermüdungsversagen, anstatt einfach die ursprünglichen Zeitreihendaten aus dem Modell zu heranzuziehen. Diese Streutabellen werden über eine inverse Fourier-Transformation der modellierten Frequenzspektren für jede einzelne Seegangssituation unter Zugrundelegung eines Gaußprozesses generiert. Individuelle Wellenhöhen und Wellenperioden werden mittels Null-durchgangsverfahren (Zero-Down-Crossing-Analyse) der generierten Zeitreihen der

Wasserspiegellage (Surface elevation, SE) ermittelt. Die Analysen werden für den gesamten Teil des Wellenspektrums durchgeführt und die Seegangssituationen werden nach der mittleren Wellenrichtung (Mean Wave Direction: MWD) sortiert.

Eine Anpassung mithilfe der Fehlerquadratmethode der mittleren Werte von $H_{\max}$ und $T_{H\max}$ (basierend auf den einzelnen maximalen H für jeden Seegang mit zugehörigem T) wird in die angewendete Methode einbezogen.

3.1.4 Windrichtung-Wellenrichtung Abweichung

Für die Auslegung von Offshore-Windturbinen ist die Richtungsabweichung zwischen den beiden wichtigsten dynamischen Kräften (Wind in Nabenhöhe und Wellen) ein bedeutender Lastfall.

Eine Streutabelle der Windrichtung (D_{10}) und der mittleren Wellenrichtung (MWD) zeigt die Richtungsabweichung zwischen Wind und Wellen in Gesamtwerten (Abb. 5). Üblicherweise werden Analysen für abweichende Windgeschwindigkeiten auf Nabenhöhe separat durchgeführt, um zu einer detaillierteren und somit optimierten Auslegung zu gelangen. Die Auslegungsoptimierung auf der Grundlage sorgfältiger Analysen kann erhebliche Kosteneinsparungen bei der Entwicklung von Windenergieanlagen ermöglichen.

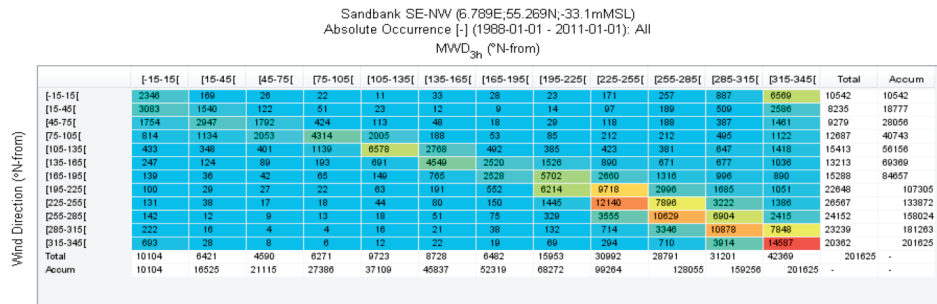


Abbildung 5: Streutabelle der Windrichtung über der mittleren Wellenrichtung für den OWP Sandbank.

Zurzeit wird ein leicht modifizierter Ansatz für die Bewertung der Richtungsabweichung verfolgt.

Die Differenz zwischen Windrichtung und Wellenrichtung wird als MWD minus D_{10} für jeden Zeitschritt berechnet. Bei Wind aus Süden ($WR = 180^\circ N$) und einer Wellenausbreitung von Westen ($MWD = 270^\circ N$) beträgt die Differenz beispielsweise $+90^\circ$.

Streudiagramme der Differenz über U_{10} und H_{m0} und Frequenzverteilungen stellen die allgemeinen Lastfälle dar. Für sämtliche Seegangssituationen ist eine bedeutende Richtungsabweichung bei geringen Windgeschwindigkeiten (d. h. unter etwa 10 m/s) oder niedrigem H_{m0} (d. h. unter 1,5 m) zu beobachten. Dies erklärt sich durch das Auftreten heterogener Seegangssituationen und die Tatsache, dass Wellen sich z. B. in der Deutschen Bucht überwiegend von Nordwesten her ausbreiten, wohingegen das Auftreten von Windereignissen gleichmäßiger über die Richtungssektoren verteilt ist. Bei stärkerem Seegang reduziert sich die Richtungsabweichung merklich und unter extremen Seegangsbedingungen liegt sie nahe 0° .

Der Windsee-Anteil des Wellenspektrums korreliert verhältnismäßig gut mit der Windrichtung, während der Dünungsanteil des Wellenspektrums mit -90° und $+90^\circ$ eine dominierende Richtungsabweichung aufweist.

3.1.5 Operationelle Parameter - Wetterfenster/Persistenzstatistiken

Operationelle Parameter (Wetterfenster und Ausfallzeiten) sind entscheidend für den Bau und Betrieb von OWP. Eine präzise Datengrundlage und sorgfältige Analysen können zur Verbesserung der Planung und Optimierung der Arbeiten herangezogen werden, z. B. in der Auswahl der geeigneten Zeitfenster und Installationsschiffe.

Zeitreihen von Hindcast-Daten werden analysiert, um die Wahrscheinlichkeit von Wetterfenstern und Ausfallzeiten für Offshore-Arbeiten im Errichtungsgebiet zu bestimmen. Eine Persistenzanalyse liefert Informationen zum langfristigen Mittelwert der Witterungsbedingungen im Projektgebiet. Zu diesem Zweck werden Wetterfenster und Ausfallzeiten für operationelle Parameter wie z. B. die signifikante Wellenhöhe H_{m0} und die Windgeschwindigkeit U_{10} berechnet.

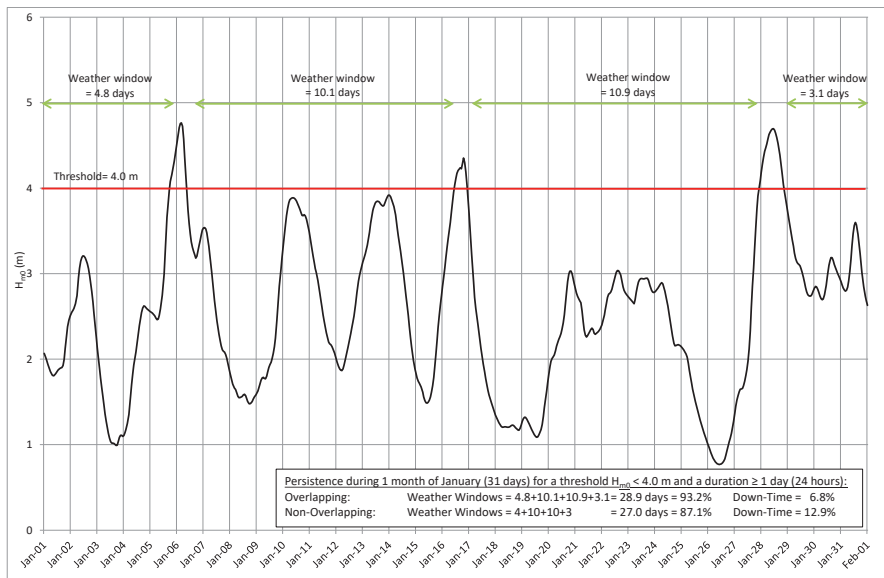


Abbildung 6: Wetterfenster Januar (31 Tage) einschließlich eines Beispiels für einen Vergleich zwischen der Betrachtungsweise mit und ohne Überschneidungen. Für beide Betrachtungsweisen gilt die Definition Wetterfenster + Ausfallzeiten = 100 %.

Dabei wird ein Wetterfenster als der Zeitraum definiert, in dem eine operationelle Bedingung über die festgelegte Dauer erfüllt ist, das heißt, ein bestimmter Grenzwert dauerhaft nicht überschritten wird (z. B. signifikante Wellenhöhe $H_{m0} < 3$ m). Alle anderen Zeiträume sind als Ausfallzeiten definiert. Somit bildet die Summe aus Wetterfenstern und Ausfallzeiten für die jeweils betrachtete Wetterbedingung die Gesamtdauer des Zeitraums. Dieser Definition liegt die übliche Interpretation für Zwecke der Logistik-Planung

zugrunde. Bei der Analyse von Wetterfenstern sind zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen möglich: mit oder ohne Überschneidung.

Werden Überschneidungen ausgeschlossen, werden nur ganzzahlige Wetterfenster gezählt. Dies bedeutet, dass bei Eintreten eines Wetterfensters unterhalb eines Parametergrenzwerts in einem gegebenen Zeitraum die Zahl seines Vorkommens auf die nächste ganze Zahl abgerundet wird, anstatt eine Dezimalzahl zuzuweisen (Betrachtungsweise mit Überschneidungen), vgl. Abb. 6.

Der Mittelwert kann die Grundlage für die Analyse bilden, häufiger jedoch werden Wahrscheinlichkeiten als Perzentile, wie etwa P50 (Medianwert), herangezogen. Für die meisten resistenten Statistiken entspricht der Medianwert annähernd dem Mittelwert (50 %). Solange über die Hälfte der Daten keine Lücken aufweisen, liefert der Medianwert korrekte Ergebnisse und eine robustere Statistik im Hinblick auf Ausreißer.

Die Analysen können für unterschiedliche Perzentile durchgeführt werden (z. B. P50, P75 und P90), basierend auf einer Auswahl von Grenzwerten für operationelle Parameter (H_{m0} , U_{10}) für variierende Zeitdauern. Zusätzlich kann eine Kombination beider Parameter basierend auf ihren kritischen Grenzwerten für unterschiedliche Zeitdauern analysiert werden, z. B. 1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 48, und 96 Stunden.

Abb. 7 zeigt eine Darstellung der Analysen basierend auf den P50-Ergebnissen am Standort Sandbank für unterschiedliche Grenzwerte von H_{m0} und eine Zeitdauer von 12 Stunden.

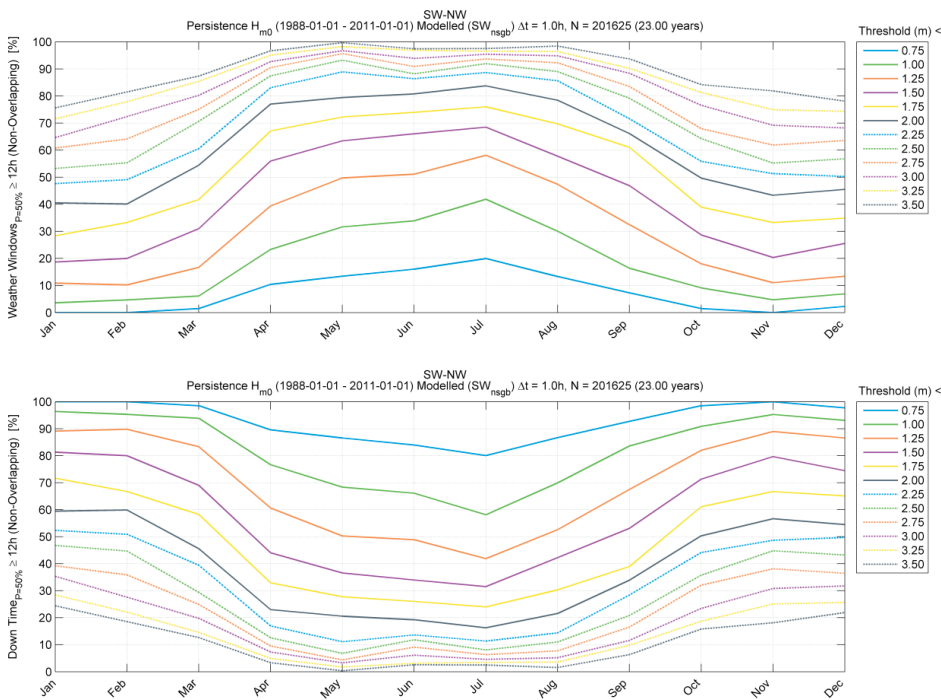


Abbildung 7: Diagramm mit Wetterfenstern (oben) und Ausfallzeiten (unten) H_{m0} und einer Dauer von 12 h.

In Tab. 1 sind zusätzlich saisonale Ergebnisse als Eintrittswahrscheinlichkeit in % für jeden Monat dargestellt. Die Standardabweichung, die definitionsgemäß auf dem Mittelwert basiert, ist in Klammer eingeschlossen; sie zeigt die Varianz/Streuung jedes monatlichen Bin-Wertes innerhalb eines Modellzeitraums von 23 Jahren an.

Tabelle 1: Tabelle mit Wetterfenstern (oben) und Ausfallzeiten (unten) H_{m0} und einer Dauer von 12 h.

SW-NW Persistence H_{m0} (1988-01-01 - 2011-01-01) Modelliert (SW _{ns9b}) $\Delta t = 1.0h$, $N = 201625$ (23.00 years) Weather Window $p_{w50\%} \geq 12h$ (Non-Overlapping) [%]												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.75	0.0 (1.9)	0.0 (2.9)	1.5 (4.8)	10.4 (9.9)	13.4 (10.6)	16.0 (11.2)	20.0 (13.3)	13.3 (12.2)	7.3 (5.7)	1.5 (5.1)	0.0 (3.2)	2.3 (3.1)
1.00	3.6 (5.2)	4.7 (7.4)	6.1 (10.4)	23.3 (12.2)	31.7 (13.2)	33.9 (14.8)	41.9 (16.3)	30.0 (15.3)	16.4 (9.7)	9.1 (7.7)	4.7 (7.2)	6.9 (8.0)
1.25	10.9 (11.9)	10.2 (12.1)	16.7 (12.9)	39.4 (13.1)	49.7 (12.1)	51.1 (16.4)	58.1 (16.0)	47.4 (14.7)	32.5 (11.8)	18.0 (11.0)	11.0 (12.7)	13.4 (11.2)
1.50	18.7 (14.4)	20.0 (16.8)	31.0 (15.0)	56.0 (14.8)	63.4 (10.6)	66.0 (13.9)	68.5 (14.8)	57.7 (13.7)	46.9 (14.2)	28.7 (13.7)	20.3 (15.0)	25.5 (12.2)
1.75	28.4 (15.2)	33.3 (19.0)	41.7 (16.7)	67.1 (14.3)	72.2 (9.4)	74.0 (11.4)	76.0 (13.1)	69.7 (11.2)	61.0 (14.4)	38.9 (14.5)	33.3 (16.1)	34.9 (13.4)
2.00	40.5 (18.1)	40.1 (20.9)	54.4 (17.3)	77.0 (11.4)	79.4 (7.2)	80.8 (9.5)	83.7 (10.9)	78.4 (9.2)	66.1 (13.6)	49.7 (15.7)	43.3 (16.1)	45.5 (14.8)
2.25	47.6 (18.9)	49.1 (20.6)	60.6 (18.1)	83.1 (9.2)	88.9 (5.9)	86.4 (7.3)	88.6 (9.2)	85.6 (8.0)	71.6 (12.8)	55.8 (16.3)	51.3 (15.2)	50.3 (14.7)
2.50	53.2 (19.3)	55.3 (21.3)	70.6 (18.0)	87.4 (7.5)	93.2 (4.5)	88.2 (5.9)	91.9 (7.6)	89.0 (6.6)	79.2 (11.5)	64.2 (15.9)	55.2 (14.4)	56.8 (15.5)
2.75	60.8 (19.8)	64.1 (18.5)	75.1 (17.7)	90.5 (5.8)	95.6 (3.5)	90.9 (3.8)	93.7 (5.7)	92.3 (5.8)	83.5 (10.5)	67.9 (14.9)	61.9 (13.8)	63.6 (14.4)
3.00	64.7 (19.9)	72.4 (18.1)	80.2 (16.0)	92.7 (4.9)	96.7 (2.8)	93.9 (3.5)	95.4 (4.3)	94.8 (4.3)	88.4 (9.2)	76.5 (14.6)	69.2 (12.9)	68.2 (14.1)
3.25	71.6 (19.7)	77.9 (17.1)	85.4 (14.3)	95.1 (4.3)	98.3 (2.5)	96.9 (3.0)	96.6 (3.5)	96.4 (3.1)	90.2 (7.9)	81.3 (11.5)	74.9 (12.4)	74.3 (12.6)
3.50	75.6 (19.0)	81.5 (14.8)	87.4 (12.7)	96.7 (3.5)	99.7 (1.9)	97.4 (2.6)	97.5 (2.6)	98.5 (2.8)	93.7 (6.6)	84.2 (10.8)	81.9 (10.7)	78.1 (11.6)

SW-NW Persistence H_{m0} (1988-01-01 - 2011-01-01) Modelliert (SW _{ns9b}) $\Delta t = 1.0h$, $N = 201625$ (23.00 years) Down Time $p_{w50\%} \geq 12h$ (Non-Overlapping) [%]												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.75	100.0 (1.9)	100.0 (2.9)	98.5 (4.8)	89.6 (9.9)	86.6 (10.6)	84.0 (11.2)	80.0 (13.3)	86.7 (12.2)	92.7 (5.7)	98.5 (5.1)	100.0 (3.2)	97.7 (3.1)
1.00	96.4 (6.2)	95.3 (7.4)	93.9 (10.4)	76.7 (12.2)	68.3 (13.2)	66.1 (14.8)	58.1 (16.3)	70.0 (15.3)	83.6 (9.7)	90.9 (11.7)	95.3 (7.2)	93.1 (8.0)
1.25	89.1 (11.9)	89.8 (12.1)	83.3 (12.9)	60.6 (13.1)	50.3 (12.1)	48.9 (16.4)	41.9 (16.0)	52.6 (14.7)	67.5 (11.8)	82.0 (7.0)	89.0 (12.7)	86.6 (11.2)
1.50	81.3 (14.4)	80.0 (16.8)	69.0 (15.0)	44.0 (14.8)	36.6 (10.6)	34.0 (13.9)	31.5 (14.8)	42.3 (13.7)	53.1 (14.2)	71.3 (13.7)	79.7 (15.0)	74.5 (12.2)
1.75	71.6 (15.2)	66.7 (19.0)	59.3 (16.7)	32.9 (14.3)	27.6 (9.4)	26.0 (11.4)	24.0 (13.1)	30.3 (11.2)	39.0 (14.4)	61.1 (14.5)	66.7 (16.1)	65.1 (13.4)
2.00	59.5 (18.1)	59.9 (20.9)	45.6 (17.3)	23.0 (11.4)	20.6 (7.2)	19.2 (9.5)	16.3 (10.9)	21.6 (8.2)	33.9 (13.6)	50.3 (15.7)	56.7 (16.1)	54.5 (14.8)
2.25	52.4 (18.9)	50.9 (20.6)	39.4 (18.1)	16.9 (9.2)	11.1 (5.9)	13.6 (7.3)	11.4 (9.2)	14.4 (8.0)	28.4 (12.8)	44.2 (16.3)	48.7 (15.2)	49.7 (14.7)
2.50	46.8 (19.3)	44.7 (21.3)	29.4 (18.0)	12.6 (7.5)	6.8 (4.5)	11.8 (5.9)	8.1 (7.6)	11.0 (6.6)	20.8 (11.5)	35.8 (15.9)	44.8 (14.4)	43.2 (15.5)
2.75	39.2 (19.8)	35.9 (18.5)	24.9 (17.7)	9.5 (5.8)	4.4 (3.5)	9.1 (3.8)	6.3 (5.7)	7.7 (5.8)	16.5 (10.5)	32.1 (14.9)	38.1 (13.8)	36.4 (14.4)
3.00	35.3 (19.9)	27.6 (18.1)	19.8 (16.0)	7.3 (4.9)	3.3 (2.8)	6.1 (3.5)	4.6 (4.3)	5.2 (4.3)	11.6 (9.2)	23.5 (14.6)	30.8 (12.9)	31.8 (14.1)
3.25	28.4 (19.7)	22.1 (17.1)	14.6 (14.3)	4.9 (4.3)	1.7 (2.5)	3.1 (3.0)	3.4 (3.5)	3.6 (3.1)	9.9 (7.9)	18.7 (11.5)	25.1 (12.4)	25.7 (12.6)
3.50	24.4 (19.0)	18.5 (14.8)	12.6 (12.7)	3.3 (3.5)	0.3 (1.9)	2.6 (2.6)	2.5 (2.6)	1.5 (2.8)	6.3 (6.6)	15.8 (10.8)	18.1 (10.7)	21.9 (11.6)

3.2 Extrembedingungen

Extrembedingungen im Hinblick auf Wind, Seegang, Wasserstände und Strömungen, die am Standort auftreten, werden ermittelt, um Bemessungsanforderungen für den sogenannten Ultimate Limit State (ULS), den Grenzzustand der Tragfähigkeit, zu definieren. Eine präzise Bewertung von Extrembedingungen ist entscheidend, nicht nur aus Sicherheitsgründen, sondern weil durch eine detaillierte und verlässliche Bewertung dieser Faktoren eine Optimierung der Bemessung für eine sichere und kostengünstige Anlage möglich ist.

Bei DHI werden für die fraglichen Parameter extremwertstatistische Analysen (EVA) durchgeführt. Diese basieren auf Sensitivitätstests einer Anzahl von unterschiedlichen Verteilungen und Schwellwerten sowie auf Anpassungsmethoden.

Die Bewertung einzelner Wellenhöhen innerhalb eines vordefinierten Sturmseegangs kann auf Basis des „Storm Mode“-Ansatzes (TROMANS und VANDERSCHUREN 1995) erfolgen. Der Ansatz erlaubt die Bestimmung der während eines Sturms auftretenden maximalen Wellen- bzw. Wellenkammhöhe (H_{max} , C_{max}) basierend auf Verteilungen für ein kurzzeitiges Ereignis. Extremwertanalysen können außerdem auf monatliche oder direktionale Sub-Serien beschränkt werden, um so die direktionale oder monatliche Variabilität zu berücksichtigen.

3.2.1 Extremwertstatistische Analyse

Der erste Schritt einer extremwertstatistischen Analyse ist die Auswahl von Extremereignissen aus den Datenreihen, auf die eine Wahrscheinlichkeitsverteilung angepasst werden soll. Hierfür gibt es unterschiedliche Ermittlungsmethoden wie etwa die Annual-Maximum-Peak (AMP)- oder die Peak-Over-Threshold (POT)-Methode. Bei der AMP-Methode wird pro Jahr aus den vorliegenden Daten ein Spitzenwert ausgewählt, während die POT-Methode alle Überschreitungen einer definierten Schwelle auswählt. Die POT-Methode wird auch als Average Annual Peak (AAP) Methode bezeichnet, wenn der Schwellwert als Durchschnitt einer Anzahl von Spitzenwerten pro Jahr definiert wird und nicht als fixer Wert. Die zur Anwendung kommende Funktion und Methode sind immer subjektiv und hängen von physikalischen Gegebenheiten und standortspezifischen Kenntnissen ab. Daher kann sowohl die AMP- als auch die AAP-Methode in Studien zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen für unterschiedliche Verteilungen eingesetzt werden, um zu einer möglichst zuverlässigen und objektiveren Einschätzung zu gelangen.

Bei Anwendung der POT-/AAP-Methode kann die Unabhängigkeit zwischen den Extremereignissen durch eine Inter-Event-Time (Intervall zwischen Ereignissen) von 36 Stunden und ein Inter-Event-Level (Ausprägungsdifferenz zwischen Ereignissen) von 0,7 sichergestellt werden. Daraus ergibt sich, dass zwei Ereignisse nur dann als Extremereignisse gelten, wenn sie sich in einem Abstand von mindestens 36 Stunden ereignen und ihr Wert (U_{10} , H_{m0} ...) in dieser Zwischenzeit das 0,7-fache des Spitzenwertes des kleineren Ereignisses unterschritten hat. Abb. 8 zeigt die POT-/AAP-Methode.

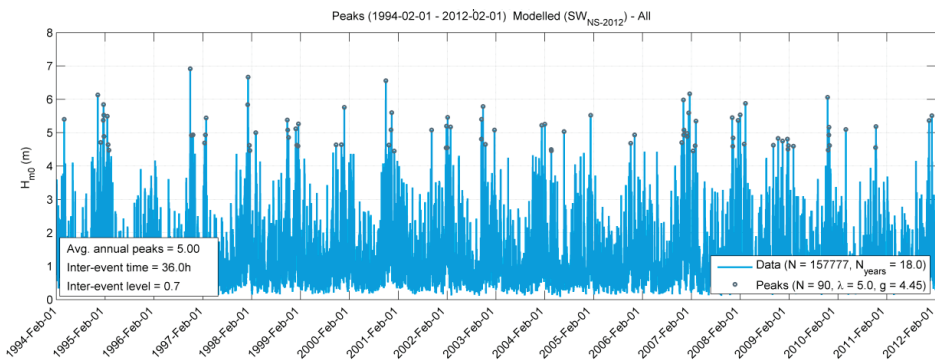


Abbildung 8: Zeitreihe H_{m0} mit mittels der AAP-Methode ausgewählten Spitzenwerten.

3.2.2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Extremwerte mit langen Wiederkehrzeiten werden mittels der Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung an historische Daten geschätzt. Zur Bestimmung von Extremen auf Basis historischer Daten stehen unterschiedliche Verteilungs-, Datenauswahl- und Anpassungsmethoden zur Verfügung und die geschätzten Extreme sind häufig eher sensitiv gegenüber der ausgewählten Methode. Es ist jedoch nicht möglich, eine bevorzugte Methode allein auf Grund ihrer überlegenen theoretischen Fundierung oder verbreiteten Akzeptanz in der Industrie auszuwählen. Daher hat sich die Praxis etabliert, eine Reihe unterschiedlicher Ansätze zu testen und die endgültige Entscheidung auf Grund der

erreichten Anpassungsgüte zu treffen. Die folgenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen kommen häufig in Verbindung mit Extremwertschätzungen zur Anwendung: 2-Parameter-Weibull-Verteilung, trunkierte Weibull-Verteilung und die Gumbel-Verteilung.

Ein Beispiel der Anpassungsmethoden ist in Abb. 9 dargestellt; Abb. 10 zeigt die Anpassung einer Extremwertverteilung.

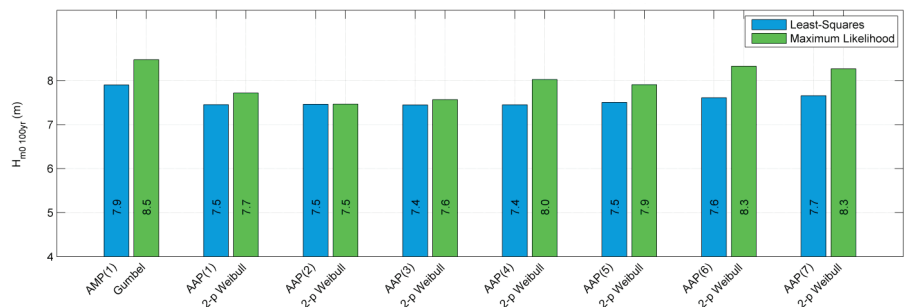


Abbildung 9: Omnidirektionale Werte einer 100-Jahres- H_{m0} in einem Nordsee-OWP, geschätzt unter Verwendung unterschiedlicher Verteilungen für variierende Schwellen.

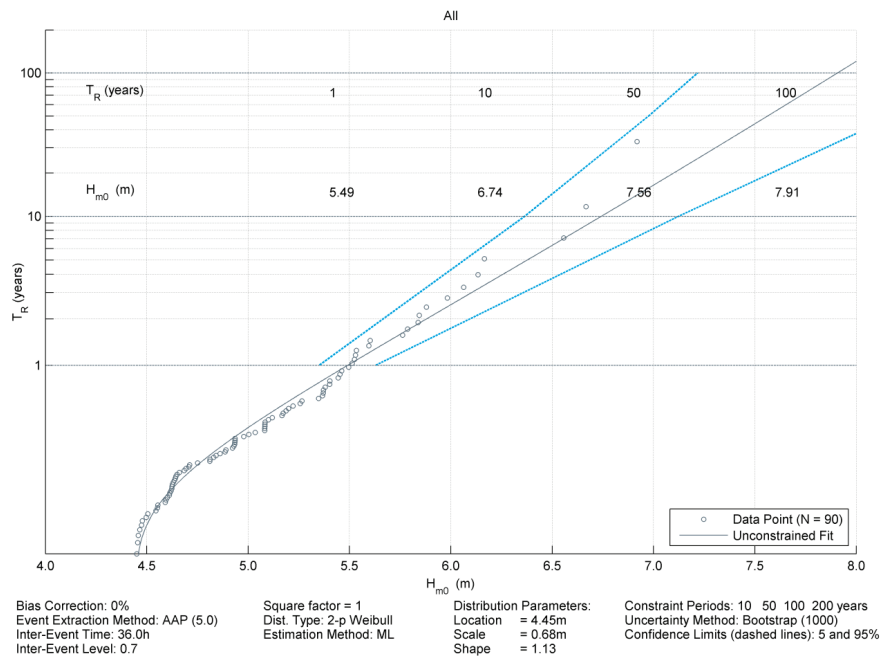


Abbildung 10: Extremwertverteilung an einem H_{m0} Nordsee OWP-Standort (UK EEZ) auf Basis einer Weibull-Verteilung (AAP = 5,0). Punkte: Daten; schwarze Kurve: zentrale Schätzung der Extremwertverteilung. 5 %- und 95 %-Vertrauensbereiche dargestellt als blau gestrichelte Linie.

3.2.3 Konfidenzgrenzen

Zur Eingrenzung der Unsicherheit aufgrund stichprobenabhängiger Fehler erfolgt eine Bootstrap-Analyse für die omnidirektionalen Extremwerte. Die Bootstrap-Analyse umfasst folgende Schritte:

- Aufbau eines neuen Satzes von Extremereignissen mittels Stichproben und Ersetzen der ursprünglichen Extremwertdatensätze.
- Durchführung einer extremwertstatistischen Analyse am neu aufgebauten Datensatz zur Schätzung von Extremereignissen mit relevanter Jährlichkeit.

Eine empirische Verteilung des Extremereignisses erhält man durch mehrfache Wiederholung der Schritte 1 und 2. Aus der empirischen Verteilung werden Quartile ausgelesen.

Die Ergebnisse werden als Kurven dargestellt, die die geschätzte Verteilung und die 5 %- und 95 %-Quartile (blau gestrichelte Linien in Abb. 10) zeigen.

3.2.4 Einzelwellen- und Wellenkammhöhen

Für die Bemessung von Windkraftanlagen sind die bei einem Sturm auftretenden maximalen Wellen- und Wellenkammhöhen von besonderem Interesse: beispielsweise für die Schätzung des äußersten Grenzzustandes der Tragfähigkeit (ULS) ist eine Kenntnis der maximalen Wellenhöhe erforderlich, oder für die Bestimmung des benötigten Freiraums unterhalb einer Plattform muss die maximale Wellenkammhöhe im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) bekannt sein. Basierend auf Hindcast-Daten werden nur die Extremwerte für signifikante Wellenhöhen für einen bestimmten Seegang geschätzt, und die maximale bei diesem Sturm auftretende einzelne Wellenhöhe $H_{\max}$ wird meist über Formeln abgeleitet, wobei man damit den seltenen und eher asymptotischen Eigenschaften von Extremen nicht gerecht wird.

In einem detaillierteren Ansatz, der von DHI angewendet wird, wird die kurzzeitige Variabilität der maximalen Höhe von einzelnen Wellen und Wellenkämmen während eines Sturms anhand der Konvolutionsmethode nach TROMANS und VANDERSCHUREN (1995) bestimmt. Hierbei wird die langfristige Verteilung einzelner Wellen und Wellenkämme durch die Konvolution der langfristigen Verteilung der Stürme mit der kurzzeitigen Verteilung des innerhalb eines Sturms auftretenden Maximum („Storm-Mode“) ermittelt.

3.2.5 Verteilungen für kurze Zeiträume

Für die Verteilungen einzelner Wellenhöhen und Wellenkämme über kurze Zeiträume (z. B. innerhalb eines Sturmereignisses) wird angenommen, dass sie den von FORRISTALL (1978 und 2000) vorgelegten Verteilungen folgen. Die Wellenhöhenverteilung von Forristall beruht auf Messungen im Golf von Mexiko, wobei die Erfahrung an der Nordsee gezeigt hat, dass diese Verteilungen auch allgemeingültiger anwendbar sind. Für diese Art der Verteilung konvergiert die Verteilung der Extrema einer gegebenen Anzahl von Ereignissen N (Wellen, Wellenkämme) zu einer Gumbel-Verteilung in Abhängigkeit von den wahrscheinlichsten Werte des Extremereignisses H_{mp} (oder C_{mp} für Wellenkämme).

3.2.6 Einzelwellen (Stürme)

Die wahrscheinlichsten Werte einer maximalen Welle oder eines maximalen Wellenkamms in einem Sturm (H_{mp} oder C_{mp}) ergeben sich durch die Integration der Verteilung für einen kurzen Zeitraum der von H_{m0} abhängigen Wellenhöhen über die gesamte Anzahl von den Sturm bildenden Seegangssituationen. Daraus ergibt sich eine Datenbank historischer Stürme, jeweils charakterisiert durch ihre wahrscheinlichste maximale einzelne Wellenhöhe, die für weitere extremwertstatistische Analysen herangezogen wird.

In Abb. 11 sind die Peak-over-Threshold-Schätzungen einer 100-Jahres-Maximalwelle am Standort eines Nordsee-OWP als Funktion der durchschnittlichen jährlichen Anzahl von Ereignissen mit Überschreitung der Schwelle aufgetragen.

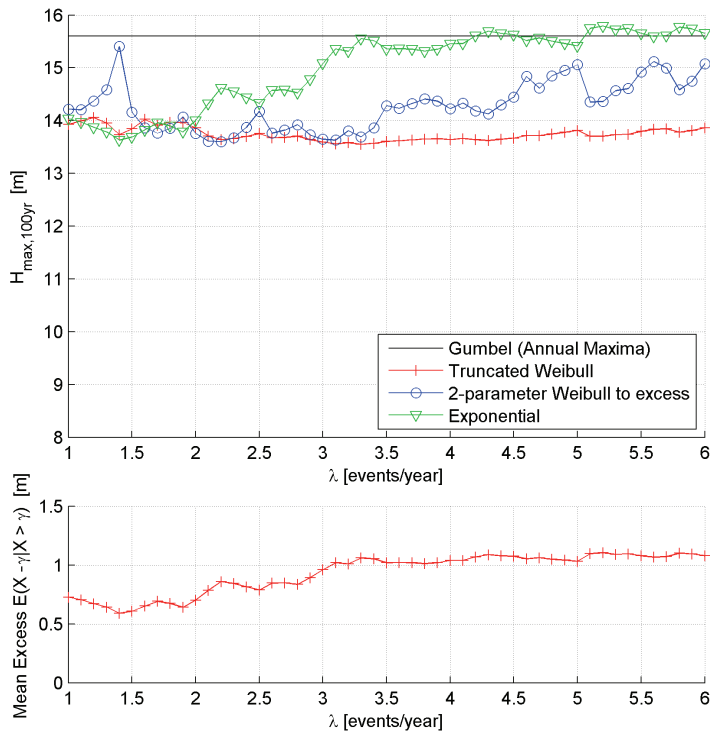


Abbildung 11: Omnidirektionale Werte einer 100-Jahres- H_{max} in einem Nordsee-OWP. Die Schätzung basiert auf der Verwendung unterschiedlicher Verteilungen für eine varierende Anzahl ausgewählter Peak-Ereignisse (AAP).

Die Analyse für einzelne Wellenkammhöhen folgt demselben Ansatz unter Verwendung der von FORRISTALL (2000) vorgeschlagenen kurzfristigen Verteilung. Die Analyse wird für die Wellenkammhöhe über dem RWS (dem momentanen Wasserspiegel einschließlich Tide und Windstau) durchgeführt.

Die zugehörige Periode für die Maximalwelle kann entsprechend den Empfehlungen in (DNV 2010) und (IEC, 2009) abgeleitet werden. Die dargestellten Beziehungen sind Schätzungen für ein konkretes Gebiet in der Nordsee und berücksichtigen keine standortspezifischen Bedingungen. Eine eher fortschrittlichere Weise, die Beziehung

zwischen $H_{\max}$ und der zugehörigen Periode $T_{H\max}$ zu schätzen, ist die Verwendung gegebener spektraler Informationen aus Hindcast-Daten. Die zur maximalen Einzelwellen zugehörigen Periode ($T_{H\max}$) wird aus Paaren von Maximalwellen und zugehörigen Perioden für jede einzelne Seegangssimulation abgeleitet, die zur Ermittlung von HT-Streudaten durchgeführt wird (siehe Ermüdungsdaten). Das weiter unten beschriebene Modell der multivariaten Eintrittswahrscheinlichkeit wird verwendet, um die Beziehung zwischen $H_{\max}$ und seinem resultierenden Median (50) sowie die 5- und 95-Perzentile zu ermitteln (die als obere und untere Grenzen verwendet werden können).

3.2.7 Extrema in Teildatensätzen

Für eine Anzahl von Parametern sind Schätzungen von Extrema für Teildatensätze (z. B. direktional oder monatlich) erforderlich. Diese erlauben ein besseres Verständnis der Standortbedingungen; an einem Projektstandort mit stark direktionalen Extrema etwa kann der Entwickler diese im Bemessungsprozess berücksichtigen, beispielsweise in der Planung von Anlegemöglichkeiten für Schiffe oder Kolkenschutzmaßnahmen.

Zur Ermittlung dieser Extrema ist es allgemeine Praxis, Extremwertverteilungen an Stichproben aus der Modelldatenbank, welche die jeweilige Richtungsanforderung erfüllen, anzupassen. Dabei werden Extrema für jede Richtung ausgelesen und die Verteilungen wiederum an jeden Satz direktionaler Daten angepasst. Bei der Stichprobenentnahme einer meist relativ kleinen Anzahl von Daten aus dem Datensatz unterliegen diese direktionalen Verteilungen einer Unsicherheit auf Grund von stichprobenabhängigen Fehlern. Dadurch ergeben sich direktionale Verteilungen, die nicht mit der an die Maxima des gesamten (omnidirektionalen) Datensatzes angepassten omnidirektionalen Verteilung übereinstimmen. Die Übereinstimmung zwischen direktionalen und omnidirektionalen Verteilungen kann z. B. durch die Anforderung sichergestellt werden, dass das Produkt der n -direktionalen jährlichen Nichtüberschreitungswahrscheinlichkeiten gleich dem der omnidirektionalen ist.

3.2.8 Optimierte Teildatensätze (direktional)

Die direktionalen Extrema werden von Anpassungen an jeden Teilseriendatensatz abgeleitet, was bedeutet, dass ein T_R -Jahres-Ereignis aus jeder Richtung im Schnitt einmal pro T_R Jahre überschritten wird. Hat man beispielsweise 8 Richtungen, dann bedeutet dies, dass das Ereignis aus *einer* der Richtungen im Schnitt einmal alle $T_R/8$ Jahre überschritten wird. Ein 100-Jahres-Ereignis würde somit (im Schnitt) einmal alle $100/8 = 12,5$ Jahre aus *einer* der Richtungen überschritten.

Zu Bemessungszwecken wird oft die Anforderung erhoben, dass die summierte Wiederkehrzeit (Wahrscheinlichkeit) (insgesamt) T_R Jahre beträgt. Ein einfacher Weg, diese Anforderung zu erfüllen, wäre die Wahl eines Wiederkehrwertes, welcher der Wiederkehrzeit T_R mal der Anzahl der Richtungen entspricht, das heißt in diesem Fall dem $8 \times 100 = 800$ -Jahres-Ereignis für jede Richtung. Dies ist jedoch häufig nicht der optimale Weg, denn es können sich so sehr hohe Schätzungen für die starken Sektoren ergeben, während die schwachen Sektoren unbedeutend bleiben.

Daher wird zusätzlich zu den oben beschriebenen Einzelwerten direktionaler Extrema ein optimierter Satz direktionaler Extremwerte für Bemessungszwecke erstellt. Die

optimierten Werte werden abgeleitet, indem die einzelnen T_R -Werte der Richtungen erhöht (skaliert) werden, um so eine summierte (Gesamt-)Wahrscheinlichkeit von T_R Jahren zu erhalten und gleichzeitig sicherzustellen, dass die Extremwerte der/des starken Sektors/en sich dem Gesamt-Extremwert möglichst annähern. In der Praxis geschieht dies, indem man das T_R der schwachen Richtungen stärker erhöht als das der starken Sektoren, während man gleichzeitig sicherstellt, dass die Summe der inversen direktionalen $T_{R,n}$ gleich dem Kehrwert der angestrebten Wiederkehrzeit ist, das heißt:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{R,i}} = \frac{1}{T_{R,omni}} \quad (1)$$

wobei n die Anzahl der direktionalen Sektoren ist und $T_{R,omni}$ die gewünschte Gesamt-Wiederkehrzeit.

3.2.9 Multivariate Wahrscheinlichkeitsverteilung

Die Wahrscheinlichkeit eines Zusammentreffens zweier Extremparameter (z. B. WS = Wasserstand oder WL = Water level und H_{m0}) wird meistens benötigt, um das Ereignis eines extremen Lastzustands zu bewerten. Beispielsweise ist in der Nordsee die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens von extremem Seegang und niedrigem Wasserstand zu vernachlässigen, da ersterer bei Stürmen aus westlicher Richtung auftritt, letzterer bei Ostwind. Es kann daher für Bemessungszwecke dienlich sein, z. B. das gleichzeitige Auftreten von Hochwasserstandsextremen und extremen Wellenhöhen einzuschätzen, um daraus die Wahrscheinlichkeit des Zusammenfallens dieser zwei Parameter abzuleiten.

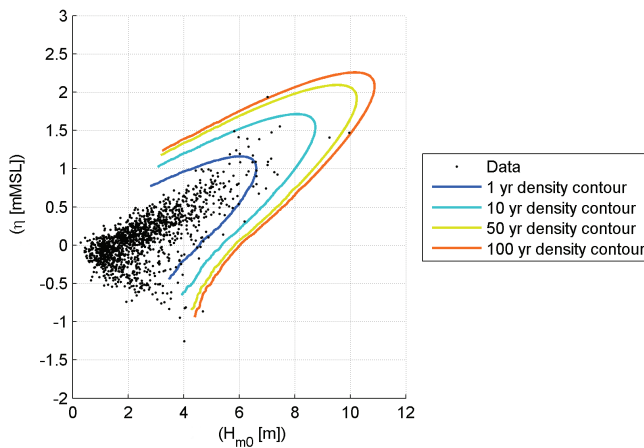


Abbildung 12: Abhängigkeitsstruktur von H_{m0} und Wasserstand im physikalischen Raum. Kreismarkierungen zeigen Datenpunkte, farbige Linien markieren die Konturen einer konstanten Wahrscheinlichkeitsdichte.

Werte von U_{10} , Wasserstand (WS) und Strömungsgeschwindigkeit (englisch: Current speed, CS), die mit Extrema einer zweiten Variable auftreten, werden unter Verwendung

der von (HEFFERNAN und TAWN 2004) vorgeschlagenen Methode ermittelt. Nach diesem Ansatz wird die Randverteilung jeder Variable getrennt modelliert.

Für das Randmodell der Variablen ist keine Beschränkung vorgegeben. Hier wurde eine Kombination aus einer empirischen Verteilung für den Hauptanteil der Ereignisse und einer an das extreme Verteilungsende angepassten parametrischen Extremwertverteilungsfunktion gewählt. Bei Parametern, die sowohl einen positiven als auch einen negativen Extremwert aufweisen, wie etwa die Kombination der Parameter Wellenhöhe und Wasserstand, werden das positive und das negative Verteilungsende der Kurve parametrisch modelliert.

Abb. 12 zeigt das Beispiel einer modellierten Abhängigkeitsstruktur für die signifikante Wellenhöhe H_{m0} und den Wasserstand η im physikalischen Raum. Das Modell ist deutlich in der Lage, den positiven Zusammenhang zwischen Wellenhöhe und Wasserstand für diese Bedingung zu beschreiben und scheint auch die relativ große Spreizung abzubilden.

Das angewandte multivariate Wahrscheinlichkeitsverteilungsmodell ist ereignisbasiert. Das bedeutet, dass unabhängige Ereignisse des bedingenden Parameters aus den Modelldaten der stündlichen Werte ausgelesen werden. Das kombinierte Kriterium aus zeitlichem Abstand und Ausprägungsdifferenz zwischen Extremereignissen wurde angewendet, um auf den bedingenden Parameter bezogene unabhängige Ereignisse zu isolieren. Der bedingte Parameter wurde aus der Modellzeitreihe zum Zeitpunkt des Höchstwertes des bedingenden Parameters ausgelesen. Vor dem Auslesen der Daten wird oft eine Zeitmittelung durchgeführt, um den Einfluss eines Phasenversatzes in der Analyse zu reduzieren (beispielsweise die Tatsache, dass der Wasserstand nicht exakt zur selben Zeit seinen Höchstwert erreicht wie die Wellenhöhe).

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für Zwecke der Bemessung und des Betriebs eines Offshore-Windparks ist eine detaillierte und robuste Kenntnis der Standortbedingungen unabdingbar für eine sichere und kosteneffiziente Planung.

Lange Zeitreihen zuverlässiger MetOcean-Bedingungen bilden das Rückgrat jeder soliden statistischen Analyse. Diese langen Zeitreihen können aus Messungen stammen oder aus dem Stand der Forschung entsprechenden numerischen Modellen abgeleitet werden, die mit Messwerten unterschiedlicher Standorte und für unterschiedliche Bedingungen validiert werden.

Statistiken zu Normalbedingungen geben bereits einen guten Überblick über die Bemessung bestimmende Parameter im Hinblick auf deren richtungs- und monatsbezogenes Eintreten. Insbesondere Ermüdungsuntersuchungen auf der Grundlage von Streudaten und Richtungsabweichungen zwischen Wind und Wellen (Wind-Wave-Misalignment) sind für die konstruktive Bemessung von erheblicher Bedeutung. Wetterstatistiken bilden einen grundlegenden und aller Wahrscheinlichkeit nach auch vertraglichen Bestandteil der Logistikplanung für den Bau und Betrieb von OWPs und können während Betriebs- und Wartungsphasen für Einsparungen sorgen, weil sie eine optimierte Logistikplanung ermöglichen.

Die hier dargestellten Extremwertstatistiken zeigen den Ansatz von DHI bei der Ermittlung der äußersten Lastbedingungen auf Basis von Hindcast-Daten, die für die

Planung von Windparks in deutschen AWZ-Gewässern verwendet werden. So wird eine optimale Bemessung gewährleistet, die räumliche und zeitliche Schwankungen von Extrembedingungen sowie das gemeinsame Auftreten einzelner Parameter berücksichtigt.

Im Allgemeinen führt die Entwicklung eines Offshore-Windparks basierend auf kontinuierlich verbesserten MetOcean-Daten und -Analysen zu einer sicheren, aber nicht überdimensionierten und daher kosteneffizienten Auslegung, die eine risikobewertete Planung begünstigt.

5 Danksagung

Die Darstellung von Beispielen vom OWP Sandbank in diesem Artikel erfolgte mit freundlicher Genehmigung durch Vattenfall Europe Windkraft GmbH.

6 Schriftenverzeichnis

- DHI: MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation. MIKE by DHI. Hørsholm, 2014.
- DHI: MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation. MIKE by DHI. Hørsholm, 2014.
- DNV: Environmental Conditions and Environmental Loads, Offshore Standard DNV-RP-C205, Det Norske Veritas AS, 2010.
- DNV: Design of Offshore Wind Structures, Offshore Standard DNV-OS-J101, Det Norske Veritas AS, 2011.
- FORRISTALL, G.Z.: On the Statistical Distribution of Wave Heights in a Storm. *Journal of Geophysical Research*, 83, 2353-2358, 1978.
- FORRISTALL, G. Z.: Wave Crest Distributions: Observations and Second-Order Theory. *Journal of Physical Oceanography*, 30, 1931-1942, 2000.
- GL: Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines. Germanischer Lloyd, Hamburg, 2012.
- HEFFERNAN, J. E. and TAWN, J. A.: A conditional approach for multivariate extreme values. *Journal of the Royal Statistical Society*, p. 497-546, 2004.
- IEC: Design Requirements for Offshore Wind Turbines. IEC 61400-3, 2009.
- JOURNÉE, J. M. J. and MASSIE, W. W.: Offshore Hydromechanics, 1st Edition. Delft University of Technology, Maritime Technology Departement, Script. Delft, Netherlands, 2001.
- TROMANS, P. and VANDERSCHUREN, L.: Response Based Design Conditions in the North Sea: Application of a New Method, Offshore Technology Conference, Texas, USA, May 1995, OTC 7683, 1995.
- WMO: Guide to Wave Analysis and Forecasting, 2nd Edition. Secretariat of the World Meteorological Organisation, Genf, Schweiz, 1998.