

Seegangslasten und Strukturantworten der Messplattformen FINO-1 und Amrumbank

Dr.-Ing. K. Mittendorf¹
Dipl.-Ing. M. Kohlmeier²
Dr.-Ing. A. Habbar²
Prof. Dr.-Ing. W. Zielke²

¹Texas A&M
Maritime Systems Engineering Department
200 Seawolf Parkway
Galveston, Texas 77553, USA
Fon: +1 409 740-4464
E-mail: mittendk@tamug.edu
www.tamug.edu

²Leibniz Universität Hannover
Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen
Appelstr. 9A, 30167 Hannover, Germany

Seegangslasten und Strukturantworten der Messplattformen FINO-1 und Amrumbank

K. Mittendorf¹, A. Habbar², M. Kohlmeier² und W. Zielke²

¹*Maritime Systems Engineering Department, Texas A&M
200 Seawolf Parkway, Galveston, Texas 77553, USA*

²*Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A, 30167 Hannover, Germany*

1. Einleitung

Im Rahmen der Planung und Entwicklung von Offshore-Windfarmen werden Daten benötigt, die einerseits Aussagen über mögliche Auswirkungen von Offshore-Windenergieanlagen auf die marine Flora und Fauna erlauben, andererseits dem Projektentwickler notwendige Informationen für die Auslegung der Anlagen liefern.

Für die Bemessung der Anlagen auf Extremereignisse und auf Ermüdung werden langzeitstatische Daten über die lokalen Wind- und Seegangsverhältnisse benötigt. Aufschluss über Unsicherheiten beim Belastungsprozess und den korrespondierenden Strukturantworten geben kurzzeitstatische Messdaten der Strukturdehnungen und -beschleunigungen in Kombination mit Wind- und Seegangsaufzeichnungen.

Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich ausschließlich mit der kurzzeitstatischen Analyse von Messdaten des Seegangs und der Strukturantworten der Forschungsplattformen FINO-1 und Amrumbank West. Dabei liegt der Schwerpunkt der durchgeführten Analysen auf der Untersuchung des Belastungsprozesses infolge unregelmäßiger kurzkämmiger Wellen. Die im Rahmen des GIGAWIND Forschungsprojektes entwickelten Seegangslastmodelle sollen mittels der Messdaten validiert werden.

2. Messdaten und Messzeiträume

Zur Beschreibung einer Seegangssituation wird von der Modellvorstellung ausgegangen, dass Wellen unterschiedlicher Höhe, Periode und Richtung überlagert sind. Die aus mathematischer Sicht einfachste Vorstellung geht dabei von einer Superposition linearer Wellen aus [3].

Das reale Seegangsgeschehen kann für unterschiedlich lange Betrachtungszeiträume auf verschiedene Weisen erfasst und dargestellt werden.

Die Aufzeichnung der Wasserspiegelauslenkung an einer Position über die Zeit stellt Stufe 1 dar. Mittels Methoden, wie z.B. dem Nulldurchgangsverfahren, wird eine Zeitreihe in einzelne Wellen zerlegt, die durch die Nulldurchgangsperiode (T_i) und Wellenhöhe (H_i) charakterisiert sind.

Da sich das Seegangsgeschehen relativ langsam ändert, kann es für Zeiträume zwischen 1 und 6 Stunden als stationär angesehen werden, d.h. Mittelwerte der Wellenhöhen (H_i) und Perioden (T_i) können für den Zeitraum als Konstanten betrachtet werden. Eine Transformation der Zeitreihe in den Spektralbereich mittels der Fourier-Transformation ist ebenfalls eine häufig verwendete Form zur Beschreibung eines stationären Seegangsgeschehens und stellt gleichzeitig eine Datenreduktion dar (Stufe 2 - Kurzzeitstatistik). Eine Charakterisierung des Seegangs

durch signifikante Parameter (signifikante Wellenhöhe H_s und Peak Periode T_p), welche die Momente n-ter Ordnung des Energiedichtespektrums darstellen, wird möglich.

Diese Methode enthält jedoch keine Informationen über die Wellenrichtung. Zur Berücksichtigung der Wellenrichtung sind z.B. Messungen an mehreren Punkten oder zusätzliche Messungen der Neigung der Wasserspiegelauslenkungen an einer Stelle und deren Transformation in den Spektralbereich notwendig, um dann über Phasendifferenzen der einzelnen Frequenzkomponenten auf deren Fortschrittsrichtung schließen zu können.

In einer nächsten Stufe betrachtet man die Variabilität der signifikanten Seegangparameter über längere Zeiträume und gelangt damit zum Seegangsklima (Stufe 3 - Langzeitstatistik), welches meist in Form eines Scatter-Diagramms oder auch durch statistische Verteilungsfunktionen dargestellt wird.

Die Seegangsmessungen in der Nähe der Forschungsplattformen FINO und Amrumbank erfolgten mittels einer Seegangsrichtungsboje. Die gemessenen Seegangsspektren haben eine Auflösung von 0.01 Hz und 1.5° für die Richtung. Die analysierten Daten der FINO Plattform sind zwischen dem 30.07.2003 und 27.01.2006 aufgezeichnet worden. Die Datendeckung liegt bei 73%. Die Amrumbankdaten sind zwischen dem 22.11.05 und dem 27.09.06 aufgezeichnet worden. Die Datendeckung liegt bei 61%. Die Messdaten des Seegangs liegen als Spektren und in Form signifikanter Parameter, wie Wellenhöhe, Peakperiode, Spreading-Grad und Seegangshaupttrichtung, vor. Die Strukturmessungen umfassen Dehnungs- und Beschleunigungsmessungen in verschiedenen Höhen. Detaillierte Informationen über die genauen Sensorpositionen sind den Gigawind Jahresberichten 2004 und 2005 zu entnehmen [4]. Die Strukturmessdaten liegen als Zeitreihen vor. Die Samplerate liegt bei 10Hz (FINO) bzw. 20Hz (Amrumbank).

Die an den beiden Forschungsplattformen durchgeführten Messungen dienen zum einen der Entwicklung und Verifikation von Seeganglastmodellen unter Berücksichtigung der Seegangrichtung und zum anderen der langzeitstatistischen Analyse der Seegangslasten mit Hinblick auf Extremereignisse und auf die Lebensdauerprognose.

2.1 Analyse der Seegangsmessungen – FINO Plattform

Ein Scatter-Plot der signifikanten Wellenhöhe über die Seegangshaupttrichtung (Abbildung 1 oben) zeigt deutlich, dass für den Standort FINO Wellen aus westlicher bis nördlicher Richtung dominieren.

Die Darstellung der Anzahl N von Seegangseignissen in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe H_s und Richtung θ_0 (Abbildung 2) zeigt zudem deutlich, dass für den FINO Standort eine zweiter dominierender Richtungssektor (Nord-Ost) für das Seegangsgeschehen vorliegt. Die größten Wellenhöhen sind aus Nord-Westen und Nord-Nord-Westen beobachtet worden (Abbildung 1 oben).

Die Richtungsstreuung des Seegangs s (Spread) als Funktion der mittleren Richtung θ_0 weist eine große Variabilität auf, wobei kaum Richtungsgebiete identifiziert werden können, die eine ausgeprägte große oder kleine Streuung aufweisen (Abbildung 1 Mitte). Das Seegangsgeschehen aus südlicher Richtung zeigt die höchsten Spreadparameter, wobei gleichzeitig geringe Streuungen selten vorkommen. Die beiden dominierenden Seegangrichtungen (Nord-Nord-West und Nord-Ost) zeigen auch gleichzeitig die größte Variabilität für den Seegangsspread auf.

Der Seegangsspread zeigt weiterhin eine deutliche Abhängigkeit von der signifikanten Wellenhöhe (Abbildung 1 unten). Mit größer werdender Wellenhöhe nimmt die Richtungsstreuung ab. Die größten signifikanten Wellenhöhen weisen die geringste Streuung auf.

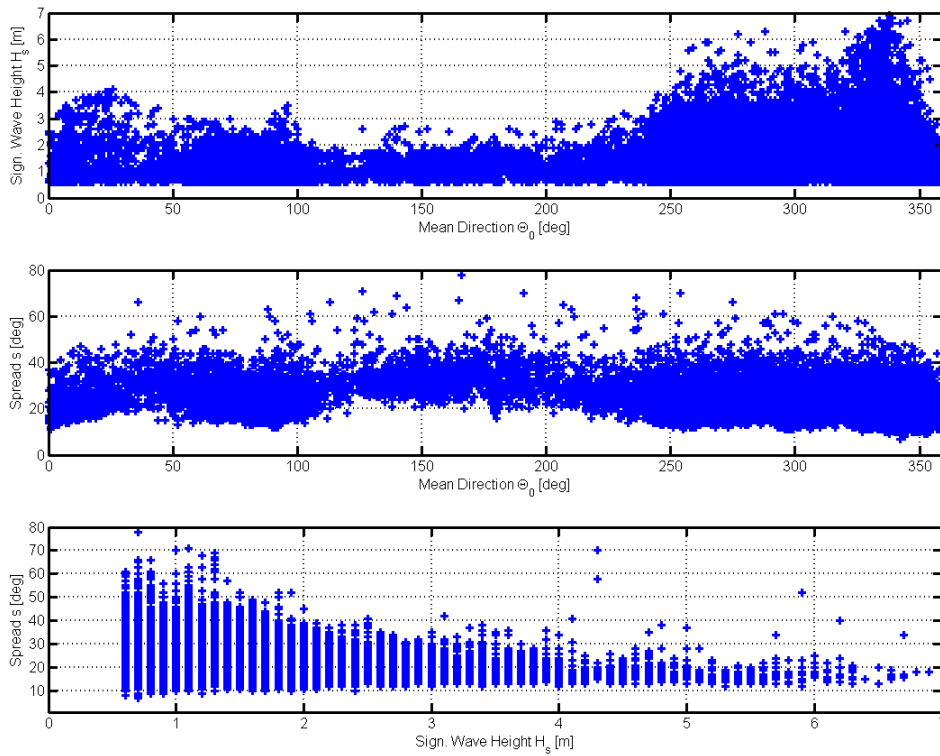


Abbildung 1 Scatter-Plot sign. Wellenhöhe H_s vs. mittlere Richtung θ (oben), Spread s vs. mittlere Richtung θ (Mitte) und Spread s vs. sign. Wellenhöhe H_s (unten), FINO-1.

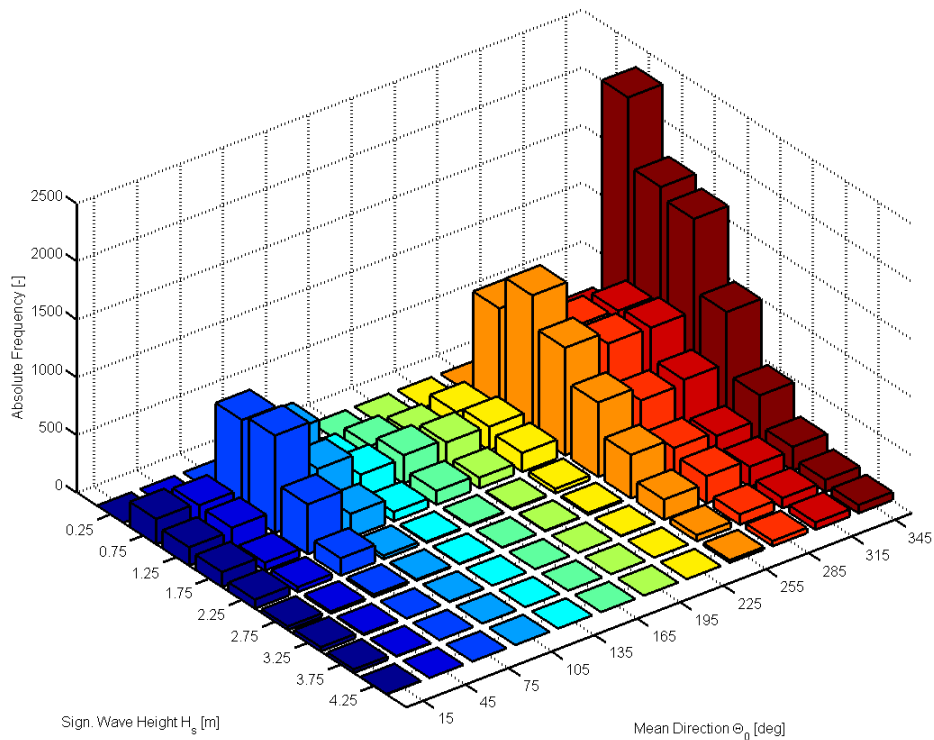


Abbildung 2 Scatter-Diagramm H_s und θ , FINO-1.

2.2 Analyse der Seegangsmessungen – Amrumbank

Der für die Messstation Amrumbank zur Verfügung stehende Datenbestand ist wesentlich geringer als der für FINO-1, dennoch lassen sich auch hier dominierende Seegangsrichtungen erkennen. Der Scatter-Plot der signifikanten Wellenhöhe als Funktion der Seegangsrichtung (Abbildung 3 oben) zeigt, dass die vorherrschende Seegangsrichtung Nord-West ist. Die größten Wellenhöhen sind ebenfalls aus dieser Richtung beobachtet worden.

Abbildung 4 lässt vermuten, dass eine zweite dominierende Seegangsrichtung aus dem Sektor Süd-Ost vorliegt. Das 3D Scatter-Diagramm zeigt eine größere Anzahl von Seegangseignissen aus dieser Richtung, jedoch auf Grund der geringen Datengrundlage ist diese Anhäufung nicht sehr ausgeprägt.

Die Darstellung des Seegangsspreadings s als Funktion der mittleren Richtung θ_0 (Abbildung 3 Mitte) zeigt eine mit dem FINO-Standort vergleichbare Variabilität. Das Seegangsgeschehen aus südlicher Richtung zeigt i.A. eine größere Richtungsstreuung, wobei gleichzeitig kleinere Werte relativ selten vorkommen. Die beiden dominierenden Seegangsrichtungen besitzen für den Standort Amrumbank die größten Variabilitäten.

Die deutliche Abhängigkeit des Seegangsspreadings von der signifikanten Wellenhöhe kann auch in dem Amrumbank-Datensatz bestätigt werden, auch hier weisen die größten signifikanten Wellenhöhen die geringste Streuung auf (Abbildung 3 unten).

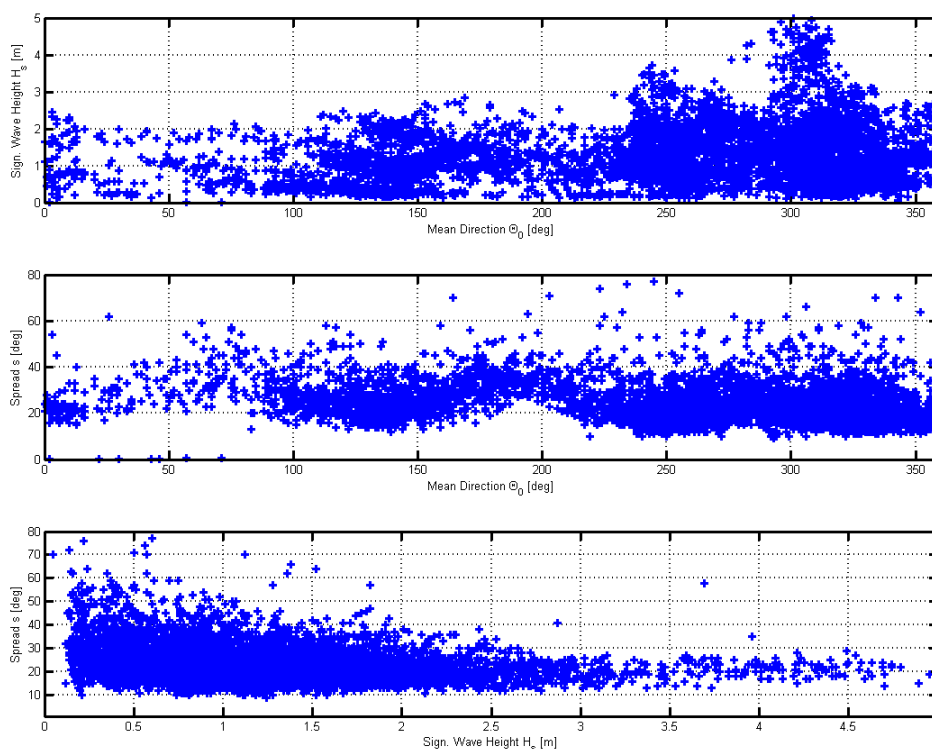


Abbildung 3 Scatter-Plot sign. Wellenhöhe H_s vs. mittlere Richtung θ (oben), Spread s vs. mittlere Richtung θ (Mitte) und Spread s vs. sign. Wellenhöhe H_s (unten), Amrumbank.

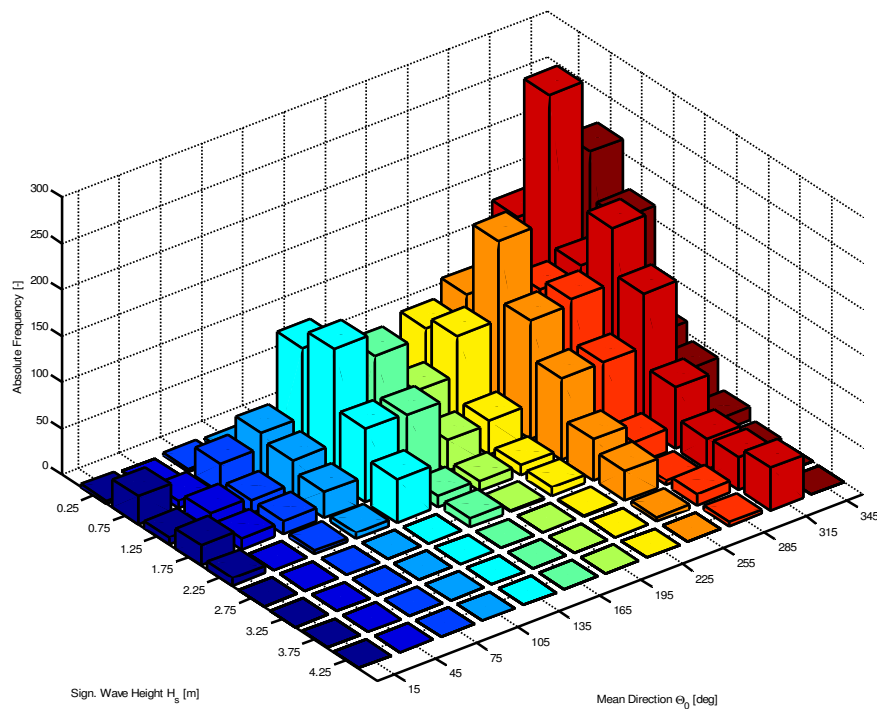


Abbildung 4 Scatter-Diagramm H_s und θ , Amrumbank.

3. Ermittlung des Seegangsrichtungsspektrums

Der Aufwand zur Ermittlung des Seegangsrichtungsspektrums ist um ein vielfaches größer als der des einfachen Frequenzspektrums. Reicht zur Ermittlung des Frequenzspektrums eine einfache Punktmessung der Wasserspiegelauslenkung aus, so erfordert die Bestimmung des Richtungsspektrums die simultane Aufzeichnung weiterer Komponenten, wie z.B. die Neigung der Wasserspiegelauslenkung, die Geschwindigkeit oder Beschleunigung der Wasserpartikel oder die Aufzeichnung der Wasserspiegelauslenkung an mehreren Positionen. Die Messung des Seegangsrichtungsspektrums erfolgt an beiden Standorten (FINO und Amrumbank) mittels einer Richtungsboje, die zusätzlich zur Wasserspiegelauslenkung deren Neigung in zwei orthogonalen Richtungen erfasst.

Das Seegangsrichtungsspektrum $S(f, \theta)$ ist eine Funktion der Wellenfrequenzen f und der Fortschrittsrichtung θ . Es ergibt sich aus der Multiplikation des Realteils des Frequenzspektrum $E(f)$ mit einer Richtungsfunktion $D(\theta)$:

$$S(f, \theta) = E(f) \cdot D(f, \theta)$$

Aufgrund der Energieerhaltung ergibt die Integration des Richtungsspektrums $S(f, \theta)$ über alle Richtungen das Frequenzspektrum $E(f)$. Die Richtungsfunktion $D(f, \theta)$ erfüllt folgende zwei Eigenschaften:

$$D(f, \theta) \geq 0 \quad [0, 2\pi] \quad \text{und} \quad \int_0^{2\pi} D(f, \theta) d\theta = 1$$

Zwischen dem Richtungsspektrum und der Wasserspiegelauslenkung kann folgende Pseudo-Integral-Beziehung aufgestellt werden:

$$\eta(x, y, t) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \sqrt{2 \cdot S(f, \theta)} d\theta df \cdot \cos[2\pi f t - k \cdot (x \cdot \cos \theta + y \cdot \sin \theta) + \varepsilon]$$

Die Boje misst die vertikale Wasserspiegelauslenkung und deren Neigung in zwei zueinander orthogonalen Richtungen:

$$\eta(t) = X_1(t)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x}(t) = \eta_x(t) = X_2(t)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y}(t) = \eta_y(t) = X_3(t)$$

Im nächsten Schritt werden dann die Kreuzspektren $G_{ij}(f)$ zwischen jedem Datenpaar (X_i, X_j) ermittelt:

$$G_{ij}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{ij}(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad \text{mit} \quad R_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X_i(t) \cdot X_j(t + \tau) dt$$

Die Koeffizienten der Kreuzspektren sind im Allgemeinen komplex und werden in folgender Form dargestellt:

$$G_{ij}(f) = C_{ij}(f) - iQ_{ij}(f)$$

$C_{ij}(f)$ wird als Co-Spektrum und $Q_{ij}(f)$ als Quad-Spektrum bezeichnet.

Die Richtung θ und die Streuung (Spreading) s der betrachteten Frequenzkomponenten ergeben sich aus folgenden Zusammenhängen:

$$\theta = \arctan\left(\frac{B}{A}\right)$$

$$s = \sqrt{2 \cdot \left(1 - \sqrt{A^2 + B^2}\right)} \quad \text{mit} \quad A = \frac{\text{Im}(C_{12})}{k \text{Re}(C_{11})} \quad \text{und} \quad B = \frac{\text{Im}(C_{13})}{k \text{Re}(C_{11})}$$

Lediglich sechs der 12 Kreuzkorrelationskoeffizienten sind verschieden von Null, und C_{11} enthält keine Informationen über die Richtungsverteilung [1]. Darüberhinaus gilt folgender Zusammenhang für die Koeffizienten C_{11} , C_{22} und C_{33} :

$$C_{22}(f) + C_{33}(f) = k^2 \cdot C_{11}(f)$$

Die Richtung der Frequenzkomponente mit der größten Seegangsenergie wird als Hauptrichtung θ_0 bezeichnet und der signifikanten Wellenhöhe zugeordnet.

Die Abbildungen 5 bis 7 zeigen gemessene Richtungsspektren mit unterschiedlichem Spreading. Abbildung 5 weist eine geringe Verteilung der Seegangsenergie über die Richtung auf. Der von der Boje gemessene Grad der Streuung liegt bei $s=15$ Grad. Die Abbildung 6 zeigt eine wesentlich größere Streuung ($s=36$ Grad) auf. Der Streuungsgrad in der Abbildung 7 wird von der Boje mit $s=39$ Grad angegeben. Die 3D-Darstellung weist eine Doppelpeakverteilung auf, wobei das besondere hierbei ist, dass die Peaks genau um 180 Grad auseinanderliegen. Dies deutet auf Unsicherheiten in der Messung hin, da genau entgegengesetzt laufende Wellen eher unwahrscheinlich sind und zudem unmittelbar vorhergehende und nachfolgende Messdatensätze eine geringe Streuung aufweisen. Für die nachfolgenden Analysen bedeutet dies einen größeren Aufwand, da solche Datensätze identifiziert und aussortiert werden müssen.

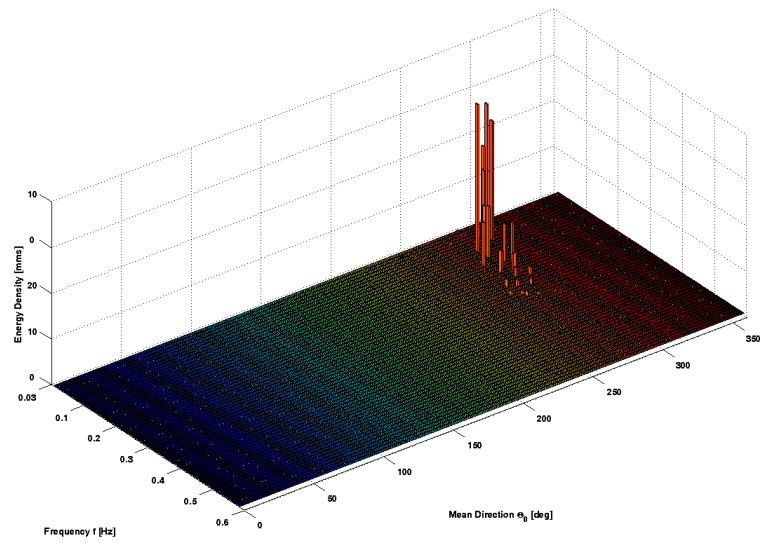


Abbildung 5 Gemessenes Richtungsspektrum vom 08.02.2006, 15:00 Uhr, $s=15$, Amrumbank.

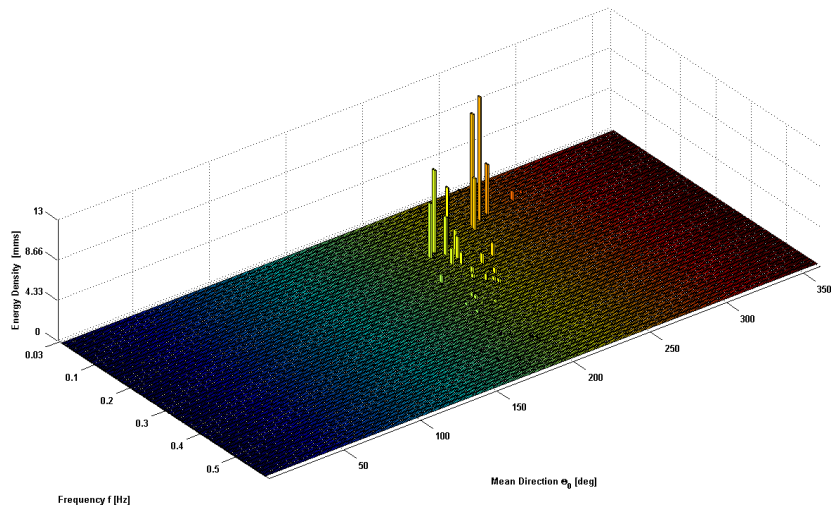


Abbildung 6 Gemessenes Richtungsspektrum vom 24.11.2005, 20:00 Uhr, $s=36$, Amrumbank.

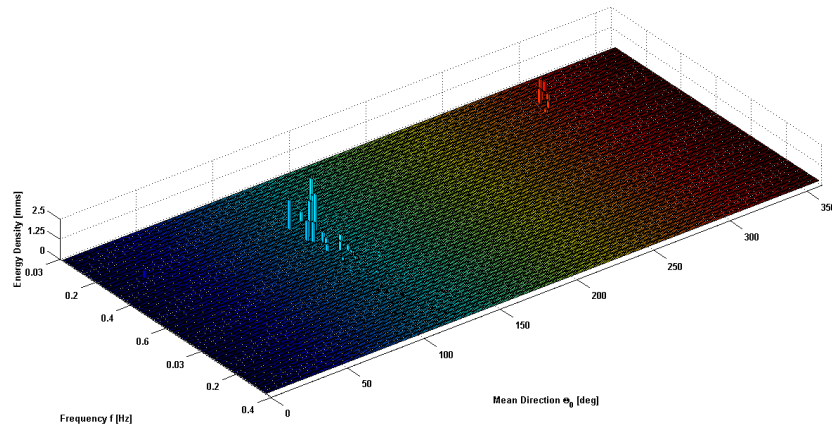


Abbildung 7 Gemessenes Richtungsspektrum vom 25.11.2005, 23:00 Uhr, $s=39$, Amrumbank.

4. Ermittlung der Beanspruchungen

Die Beanspruchungen beider Messplattformen werden aus den gemessenen Strukturdehnungen abgeleitet. Die Spannungsverteilung über einen Stahlrohrquerschnitt ist aus der Betrachtung von vier ringförmig um einen Querschnitt angeordneten Dehnungsaufnehmern ermittelt worden. Dabei ist das von Haake et al. [4] beschriebene Verfahren verwendet worden, um die Normalkraft- und Biegeanteile zu bestimmen.

Die Hauptlastriechung ψ sowie die Dehnung ε_M infolge des Hauptmomentenanteils werden nach folgenden Formeln berechnet:

$$\psi = -\arctan\left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_4}\right) \pm 90 \quad \text{in } ^\circ$$

$$\varepsilon_{M,\psi} = -\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \cdot \cos(\psi) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_4) \cdot \sin(\psi)}{2} \quad \text{in } \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

Das Hauptmoment M_H als Funktion der Zeit t ergibt sich aus folgender Beziehung:

$$M_H(t) = \varepsilon_{M,\psi}(t) \cdot E \cdot I / r \quad \text{in kNm}$$

mit E Hauptdehnung,
 I Flächenträgheitsmoment und
 r Zylinderradius

Die Zeitreihe des Hauptmomentes wird mittels der Fast Fourier Transformation (FFT) in den Spektralbereich transformiert:

$$M_{\text{fft}}(f) = \text{FFT}(M_H(t))$$

Das Energiedichtespektrum des Hauptmomentes ergibt sich zu:

$$S_{MH} = \frac{M_{fft}^2}{2 \cdot \Delta f} \text{ in } (kNm)^2 \cdot s$$

Analog zum Nullten Moment des Seegangs als Referenzgröße für die Seegangenergie, wird im folgenden die Responseenergie in Form des nullten Moments der Hauptmomente bestimmt:

$$M_0 = \int S_{MH}(f) \cdot f^0 df \text{ in } (kNm)^2$$

4.1 Analyse der Beanspruchung der FINO-1-Plattform

Die Positionen der Sensoren an der FINO-1-Plattform sind in Abbildung 8 dargestellt. Im folgenden sind die Sensoren AVW, AVS und AVN der Ebene A ausgewertet worden.

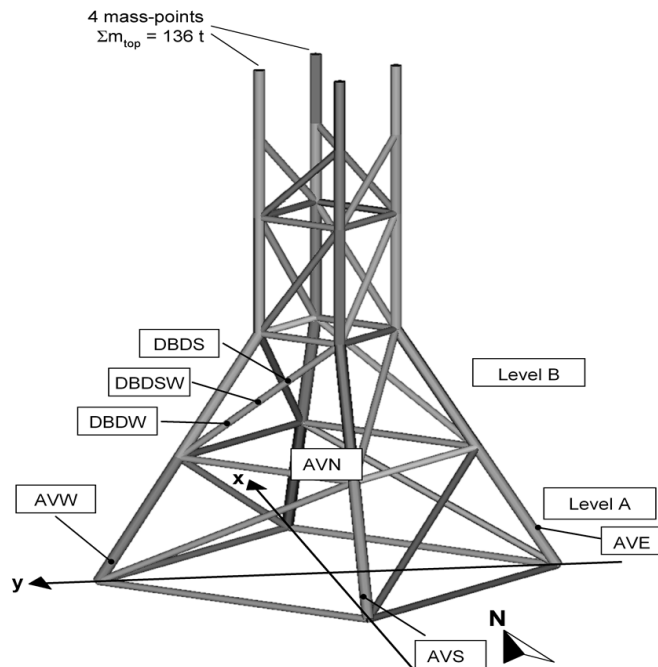


Abbildung 8 Sensorpositionen an der FINO-1-Plattform.

Die Darstellung des Nullten Moments der Hauptmomente M_0 in Abhängigkeit der signifikanten Wellenhöhe H_s (Abbildung 9) zeigt eine nichtlineare Zunahme der Belastung mit größer werdender Wellenhöhe. Zugleich ist eine größere Variabilität der Belastung bei größeren Wellenhöhen zu erkennen. Die Größenordnung der Belastungen an den drei betrachteten Beinen der Jacket-Struktur ist identisch. Der Anstieg der Ausgleichskurven des Nullten Moments der Belastung M_0 unterscheidet sich geringfügig von Bein zu Bein. Sensor AVN zeigt den langsamsten Anstieg, AVS hingegen den schnellsten.

Die Ursache der Variabilität bei der Belastung lässt sich damit erklären, dass die signifikante Wellenhöhe zur Charakterisierung des Seegangszustandes allein nicht ausreicht. Die Seegangslasten hängen weiterhin von der Wellenperiode und auch von Seegangsrichtungseffekten wie Spreading und Seegangshauptrichtung ab.

Als nächstes wird der Einfluss der Wellenperioden auf die Gesamtbelastung untersucht. Hierzu sind die Daten in drei Wellenhöhenklassen eingeteilt worden:

- 1. Klasse $3\text{m} \leq H_s < 4\text{m}$ (Abbildung 10)
- 2. Klasse $2\text{m} \leq H_s < 3\text{m}$ (Abbildung 11)
- 3. Klasse $1\text{m} \leq H_s < 2\text{m}$ (Abbildung 12)

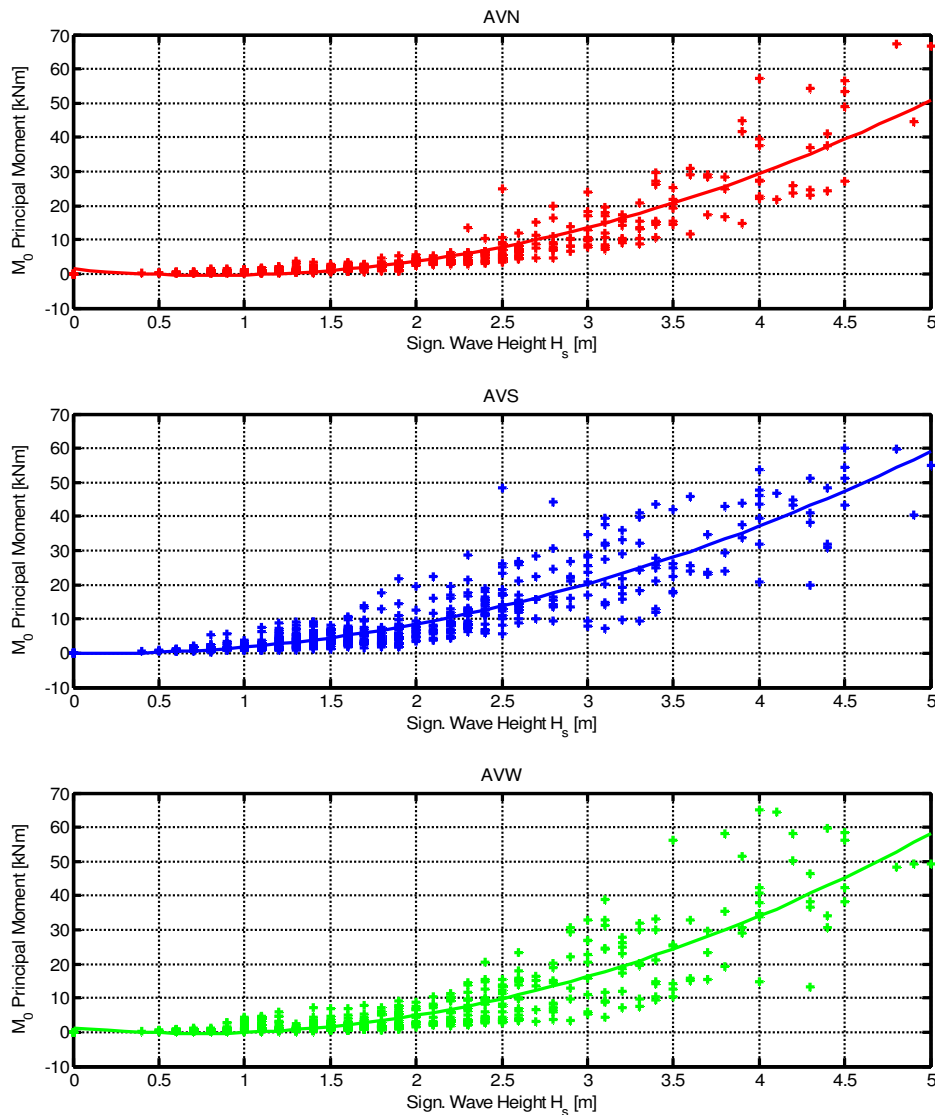


Abbildung 9 M_0 versus H_s , FINO-1.

Je Wellenhöhenklasse werden die Peakperioden ebenfalls in Klassen eingeteilt. Die Klassenbreite beträgt eine Sekunde. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Verlauf des signifikanten Hauptmomentes M_0 in Abhängigkeit der Peakperioden. Je Periodenklasse ist der Maximal- (gelb), Minimal- (grün) und Mittelwert (blau) der Belastung dargestellt. Die Rohdaten des signifikanten Hauptmomentes M_0 sind als rote Kreuze in den Diagrammen enthalten. Die gemessene Belastung zeigt je Jacket-Bein ein leicht unterschiedliches Verhalten in Abhängigkeit der Peakperiode.

Die Wellenhöhenklassen eins und zwei (Abbildung 10 und 11) zeigen ein vergleichbares Bild der Belastung je Jacket-Bein. Die Mittelwerte des Hauptmomentes M_0 sind an der Position AVN

verhältnismäßig konstant. AVW hingegen zeigt eine Zunahme der Belastung mit anwachsenden Perioden. Der Sensor am südlichen Bein (AVS) zeigt die größten mittleren Belastungen für kleine und große Perioden.

Für die Wellenhöhenklasse drei lässt sich an allen drei Sensorpositionen eine Zunahme der Belastung mit der Peakperiode bis zum Wert von zehn Sekunden beobachten (Abbildung 12). Danach werden die Belastungen mit einer weiteren Zunahme der Peakperioden wieder geringer.

Alle drei betrachteten Wellenhöhenklassen weisen je Periodenklasse weiterhin eine große Streuung der Belastung auf, diese liegt zwischen 20% und 86%.

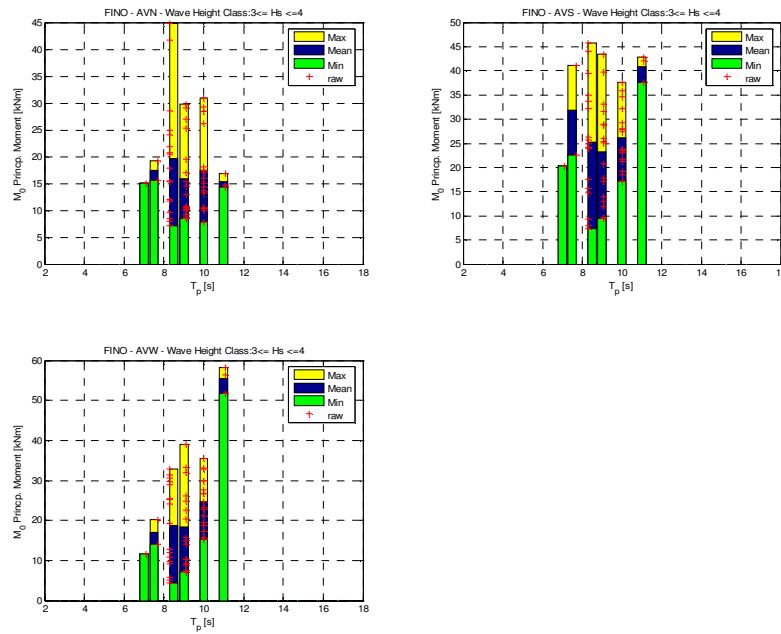


Abbildung 10 M_0 in Abhängigkeit der Peak Periode, Wellenhöhenklasse $3m \leq H_s < 4m$, FINO-1.

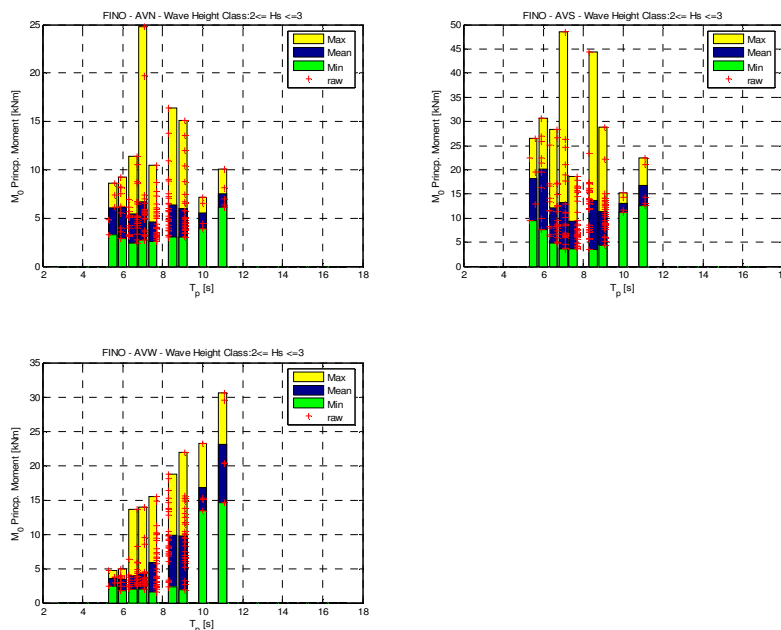


Abbildung 11 M_0 in Abhängigkeit der Peak Periode, Wellenhöhenklasse $2m \leq H_s < 3m$, FINO-1.

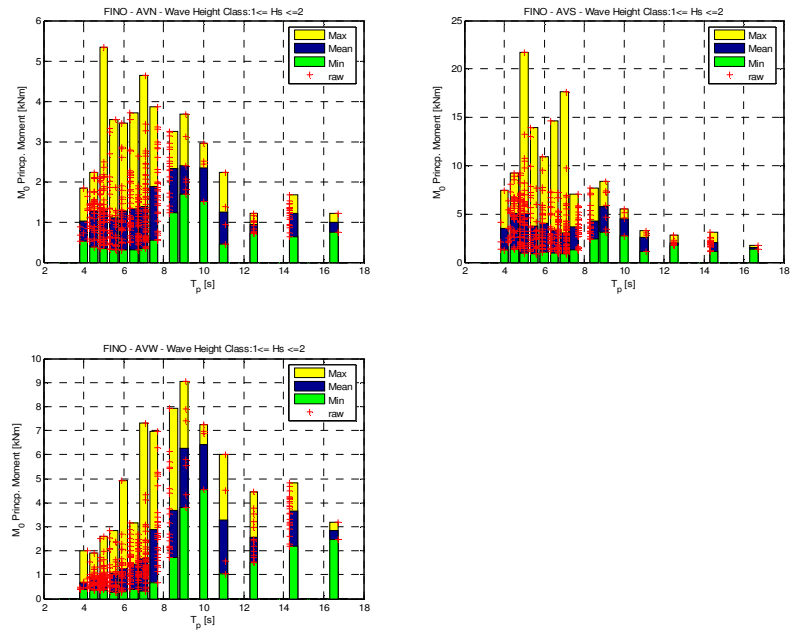


Abbildung 12 M_0 in Abhängigkeit der Peak Periode, Wellenhöhenklasse $1\text{m} \leq H_s < 2\text{m}$, FINO-1.

Eine 3D-Darstellung des signifikanten Hauptmomentes M_0 als Funktion der signifikanten Wellenhöhe und Peakperiode aller Wellenrichtungen zeigt weitere Unterschiede in der Belastung der einzelnen Jacket-Beine auf (Abbildung 13 und Abbildung 14). Die Beine in südlicher (AVS) und westlicher (AVW) Richtung haben eine Doppellastspitze, wohingegen das Bein in nördlicher Richtung nur über eine einzelne Lastspitze verfügt.

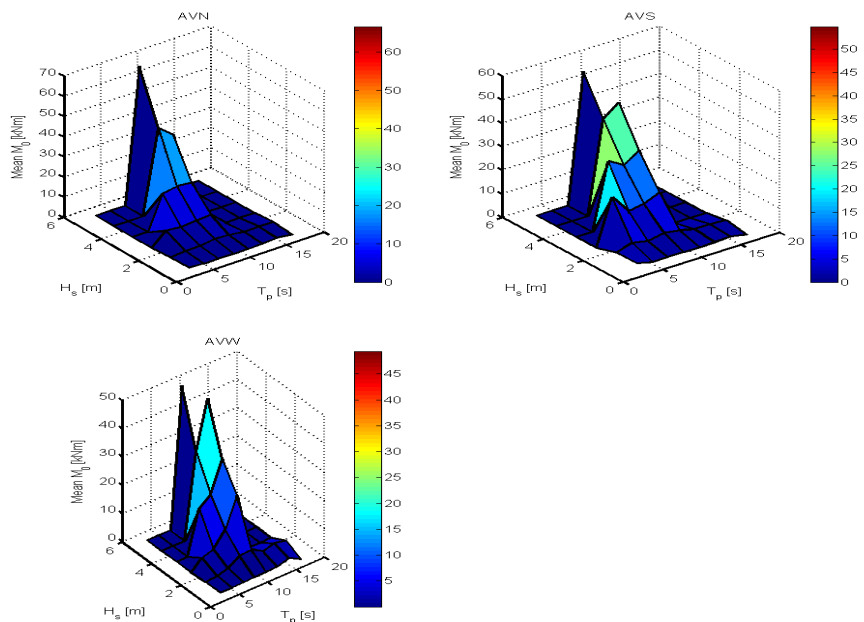


Abbildung 13 M_0 als Funktion von H_s und T_p , FINO-1.

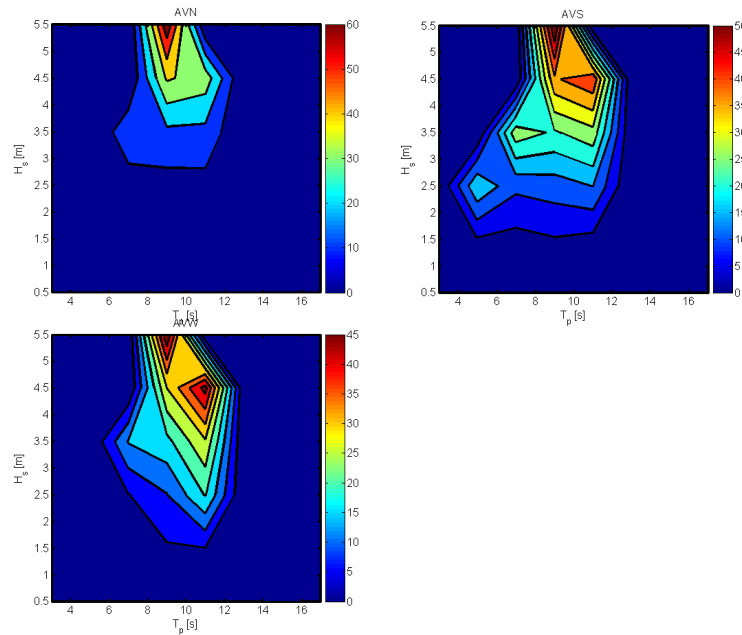


Abbildung 14 Isoflächendarstellung des Responses M_0 in Abhängigkeit der Wellenhöhe und Periode, FI-NO-1.

Eine Aufteilung der Belastungsdaten nach Richtungssektoren soll Aufschluss über den Einfluss der Seegangshauptrichtung θ_0 geben. Dazu sind die Daten in folgende vier Richtungssektoren eingeteilt worden:

- Sektor Süd $135^\circ < \theta \leq 225^\circ$
- Sektor Nord $315^\circ < \theta \leq 360^\circ$ & $0^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$
- Sektor Ost $45^\circ < \theta \leq 135^\circ$
- Sektor West $225^\circ < \theta \leq 315^\circ$

Die Streuung der Belastungsdaten nimmt etwas ab, wenn die Daten nach Richtungssektoren, Wellenhöhen und Perioden eingeteilt werden (siehe Abbildung 16, Abbildung 18 und Abbildung 21). Die Doppelspitze der Last an den Beinen AVS und AVW sind nur für die Richtungssektoren West und Nord zu beobachten.

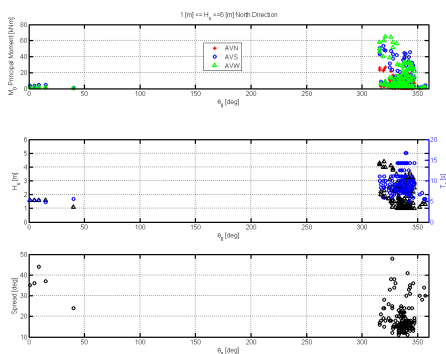


Abbildung 15 Belastungen und Seegangsdaten aus nördlicher Richtung, FI-NO-1.

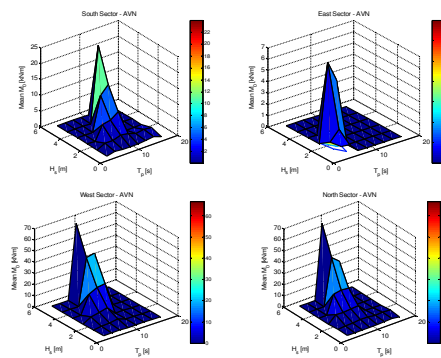


Abbildung 16 M_0 als Funktion von H_s und T_p , AVN, FI-NO-1.

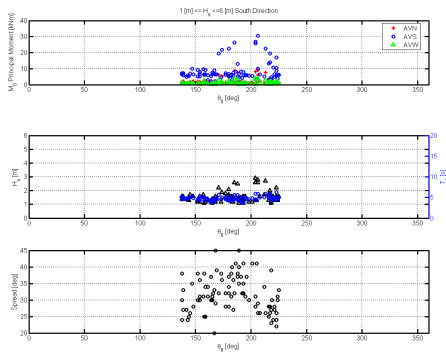


Abbildung 17 Belastungen und Seegangsdaten aus südlicher Richtung, FINO-1.

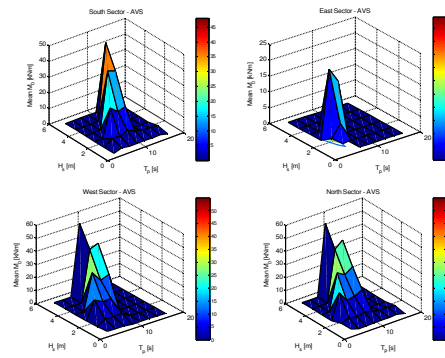


Abbildung 18 M_0 als Funktion von H_s und T_p , AVS, FINO-1.

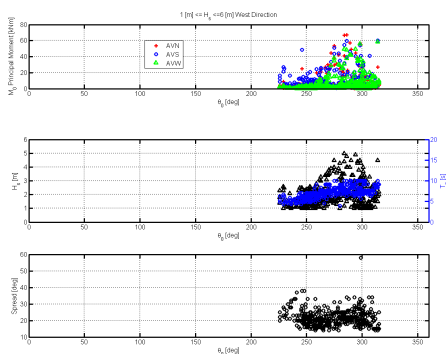


Abbildung 19 Belastungen und Seegangsdaten aus westlicher Richtung, FINO-1.

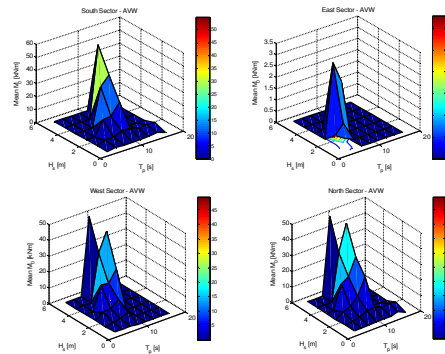


Abbildung 20 M_0 als Funktion von H_s und T_p , AVW, FINO-1.

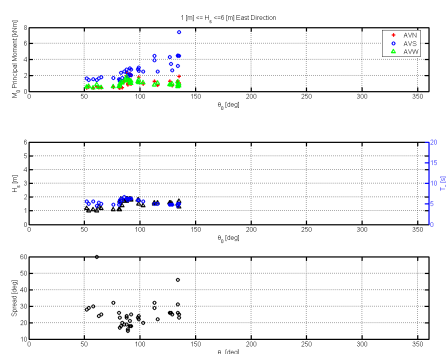


Abbildung 21 Belastungen und Seegangsdaten aus östlicher Richtung, FINO-1.

Als weiterer Parameter zur Charakterisierung des Seegangsgeschehens kann der Grad der Seegangsstreuung (Spread) herangezogen werden. Im folgenden wird die Variabilität der Belastung in Abhängigkeit des Seegangsspreiding analysiert.

Abbildung 22 (oben) stellt den Verlauf des signifikanten Hauptmomentes M_0 als Funktion des Spreadinggrades dar. Mit der Zunahme der Seegangsstreuung nimmt auch M_0 ab, dies hängt zum Großteil damit zusammen, dass oftmals kleinere Wellenhöhen eine größere Streuung aufweisen als hohe Wellen (vgl. Abbildung 22 unten).

Wird die gleiche Betrachtung innerhalb einer Wellenhöhenklasse durchgeführt, so ist die Tendenz eines kleiner werdenden signifikanten Hauptmomentes bei Vergrößerung der Seegangsstreuung zu beobachten (vgl. Abbildung 23 bis Abbildung 25). Eine Ausnahme jedoch bildet der Datensatz von Jacket-Bein AVN in der Wellenhöhenklasse zwischen $3m \leq H_s < 5m$ (Abbildung 24).

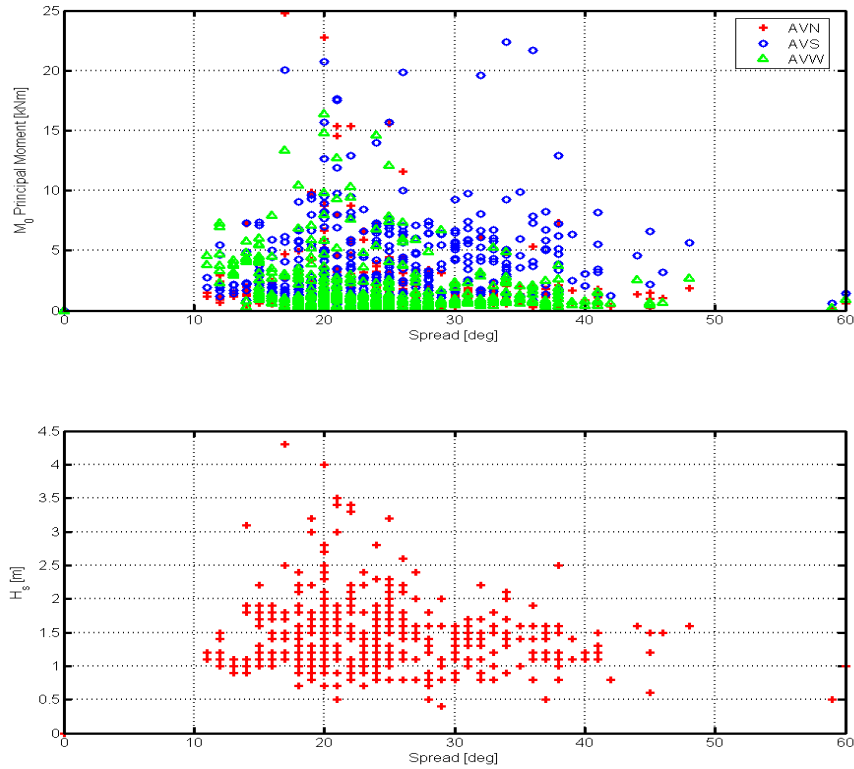


Abbildung 22 M_0 als Funktion des Spreadings, FINO-1.

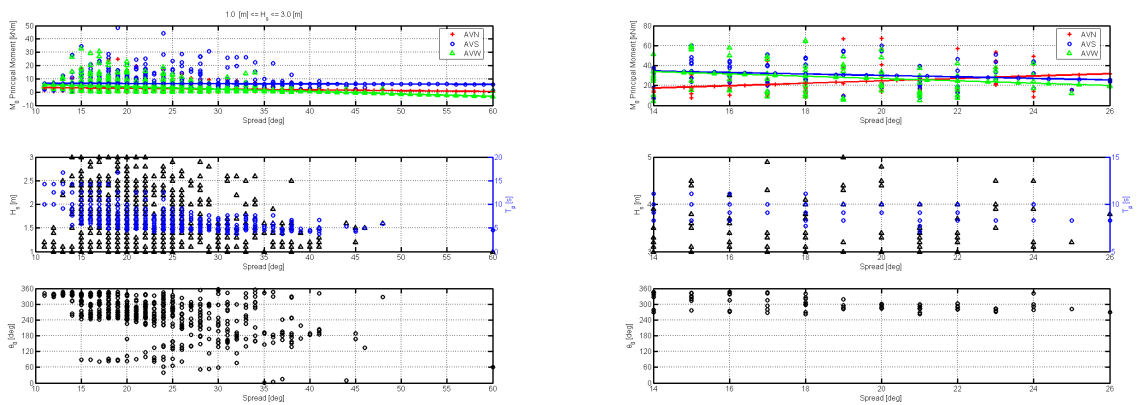


Abbildung 23 M_0 in Abhängigkeit des Spreadings, $1m \leq H_s < 3m$, FINO-1.

Abbildung 24 M_0 in Abhängigkeit des Spreadings, $3m \leq H_s < 5m$, FINO-1.

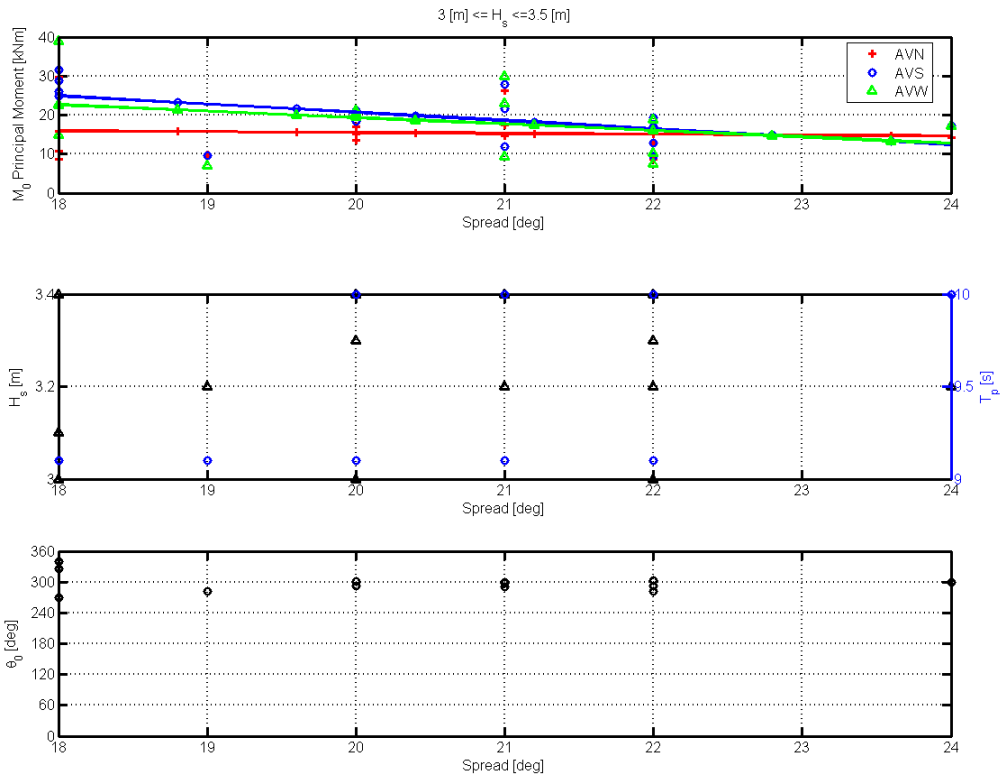


Abbildung 25 M₀ in Abhängigkeit des Spreadings, 3m ≤ H_s ≤ 3.5m, FINO-1.

Der Tabelle 1 kann entnommen werden, dass bei geringen Spreadingwerten (1 ≤ s < 20) die mittlere Belastung geringfügig größer wird. Dieses ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Superpositionsmodells zur Simulation von Richtungsseegang [5]. Für eine weitere detailliertere Analyse ist die zur Verfügung stehende Datenbasis derzeit noch nicht ausreichend.

Seegangparameter		AVN	AVS	AVW
2.75 ≤ H _s < 3.25 7.5 ≤ T _p < 8.5 1 ≤ s < 90	M ₀ [kNm]			
	Maximum	24.14	44.31	31.33
	Minimum	7.09	7.26	4.37
	Mittelwert	11.87	19.44	12.01
2.75 ≤ H _s < 3.25 7.5 ≤ T _p < 8.5 1 ≤ s < 20	M ₀ [kNm]			
	Maximum	24.14	39.46	35.72
	Minimum	7.75	9.32	5.90
	Mittelwert	14.21	20.32	12.24

Tabelle 1 Signifikante Hauptmomente M₀ einer Wellenhöhen- und Periodenklasse, FINO-1.

Der Einfluss des Spreadings auf die Belastung ist ebenfalls in der spektralen Betrachtungsweise zu erkennen. Weist der Seegang eine geringe Streuung auf (vgl. Abbildung 26), so liegen die Antwortspektren der Normalkraft von allen drei Jacket-Beinen dicht beieinander und fallen mit dem Seegangsspektrum zusammen (Abbildung 26).

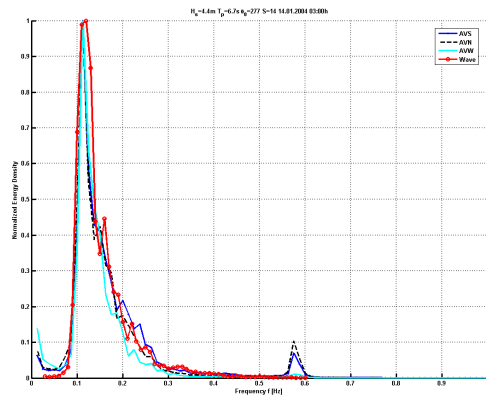


Abbildung 26 Wellen- und Normalkraftspektren, 14.01.2004, 3:00h, FINO-1.

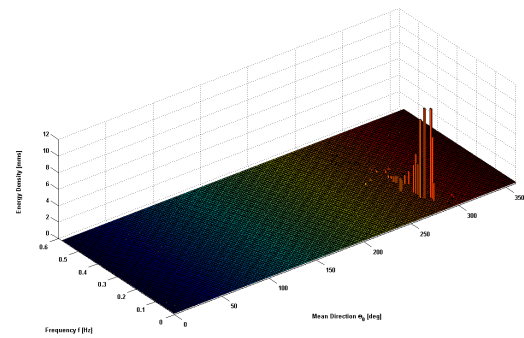


Abbildung 27 Gemessenes Richtungsspektrum, $\theta_0=277^\circ$ $s=14^\circ$, 14.01.2004, 3:00h, FINO-1.

Nimmt die Streuung der Seegangsenergie zu (Abbildung 29), so hat das Einfluss auf die Antwortspektren (Abbildung 28). Das gemessene Richtungsspektrum hat im Bereich von 0.2 bis 0.3 Hz Frequenzkomponenten, die aus süd-westlicher Richtung kommen und scheinbar das Antwortspektrum des südlichen Jacket-Beines (AVS) beeinflussen. Das West-Bein (AVW) zeigt kein Response infolge dieser Komponenten.

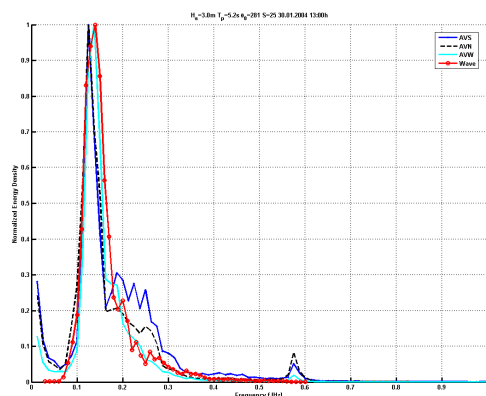


Abbildung 28 Wellen- und Normalkraftspektren, 30.01.2004, 13:00h, FINO-1.

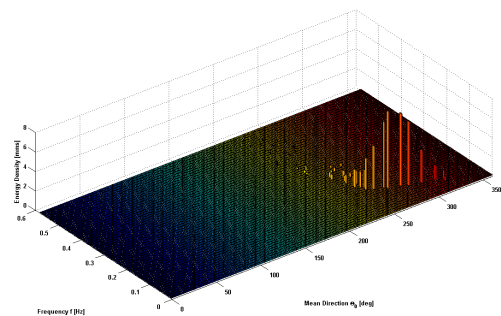


Abbildung 29 Gemessenes Richtungsspektrum, $\theta_0=281^\circ$ $s=25^\circ$, 30.01.2004, 13:00h, FINO-1.

Das in Abbildung 31 dargestellte gemessene Spektrum weist eine größere Streuung der Seegangsenergie über die Richtung auf. Die Hauptseegangsenergie kommt aus südlicher Richtung, eine weitere Energiekonzentration mit deutlich niedrigeren Frequenzanteilen ist in der Richtung Süd-West-West bis West zu erkennen. Die Peaks der Normalkraftspektren des Süd- und Nord-Beines (AVS und AVN) der Plattform fallen mit dem Peak des Seegangsspektrums zusammen. Sie zeigen jedoch im Verhältnis zum Seegangsspektrum eine größere Bandbreite. Der Peak im Normalkraftspektrum des West-Beines (AVW) zeigt eine Verschiebung zu den niedrigeren Frequenzkomponenten (um 0.1 Hz) auf, welche aus Süd-West-West bis West kommen (Abbildung 30). Das Responsespektrum des Süd-Beines (AVS) hat zudem einen zweiten kleineren Peak um 0.1 Hz.

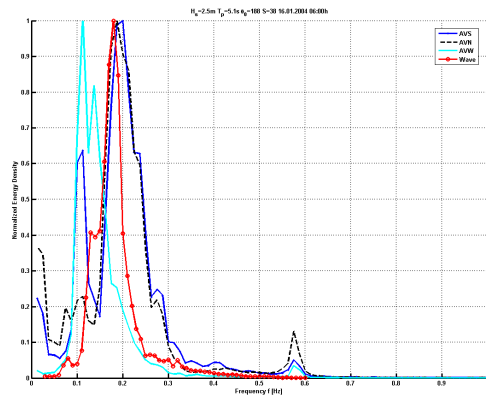


Abbildung 30 Wellen- und Normalkraftspektren, 16.01.2004, 06:00h, FINO-1.

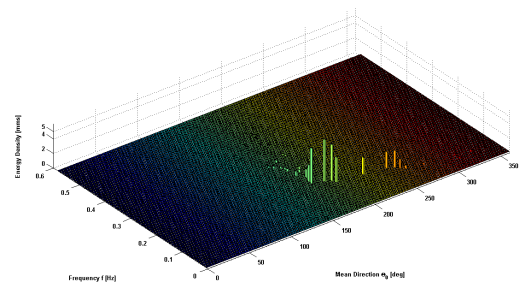


Abbildung 31 Gemessenes Richtungsspektrum, $\theta_0=188^\circ$ $s=38^\circ$, 16.01.2004, 06:00h, FINO-1.

Im folgenden soll untersucht werden, ob sich ein Zusammenhang zwischen der gemessenen Hauptlastrichtung ψ des Hauptmomentes und den Richtungen der im Seegangsspektrum enthaltenen Komponenten herstellen lässt.

Hierfür werden die Hauptmomente einer einstündigen Messung in zehn Klassen eingeteilt. Je Lastklasse werden dann die zugehörigen Hauptlastrichtungen in Histogramm-Form dargestellt. Für die drei Plattformbeine AVS, AVW und AVN sind die Hauptlastrichtungen für drei Seegangssituationen mit unterschiedlicher Wellenhauptrichtung in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Abbildung 32 zeigt die Verteilung der Hauptlastrichtungen infolge eines Seegangereignisses mit Hauptrichtung $\theta_0=84^\circ$ (\sim Ost), d.h. die energiereichsten Komponenten kommen aus dieser Richtung. Die Streuung der Seegangenergie über die Richtung ist recht gering. Am westlichen Jacket-Bein (AVW, Abbildung 32 unten links) fallen die Hauptlastrichtungen in den größten Lastklassen mit den Richtungen der energiereichsten Seegangskomponenten zusammen. Dieses Verhalten ist in den geringeren Lastklassen weniger ausgeprägt. Zudem zeigt das Seegangsspektrum eine Richtungsauflösung für die Komponenten geringerer Energie, was mit den Verteilungen der Hauptlastrichtungen in Übereinstimmung steht. Die Verteilungen der Hauptlastrichtungen an den Plattformbeinen AVS und AVN zeigen eine deutliche Verschiebung gegenüber dem Seegangsspektrum (Abbildung 32 oben).

Bei einer Änderung der Seegangshauptrichtung (Süd-Richtung Abbildung 33 bzw. Nord-Richtung Abbildung 34) ist zu erkennen, dass die Hauptlastrichtungen an den Plattformbeinen AVS und AVN etwas besser mit den Seegangsrückungskomponenten übereinstimmen. Dennoch weisen sie erkennbare Abweichungen auf. Mögliche Ursachen für die beobachteten Abweichungen sind strukturspezifische Lastabtragungsmechanismen, die die äußeren Einwirkungen überlagern oder auch Ungenauigkeiten in den Messungen. Identische Analysen der Messdaten von der Monopile-Struktur Amrumbank sollen darüber Aufschluss geben.

Am West-Bein AVW ist in beiden Fällen eine deutliche Richtungsverschiebung in den Strukturantworten zu erkennen. Die Doppelpeakverteilungen in den Histogrammen der Hauptlastrichtungen stehen in Übereinstimmung mit dem Vorzeichenwechsel der Kinematik in den Wellentheorien. Es treten um 180° verschobene Lasten und damit auch Strukturantworten auf.

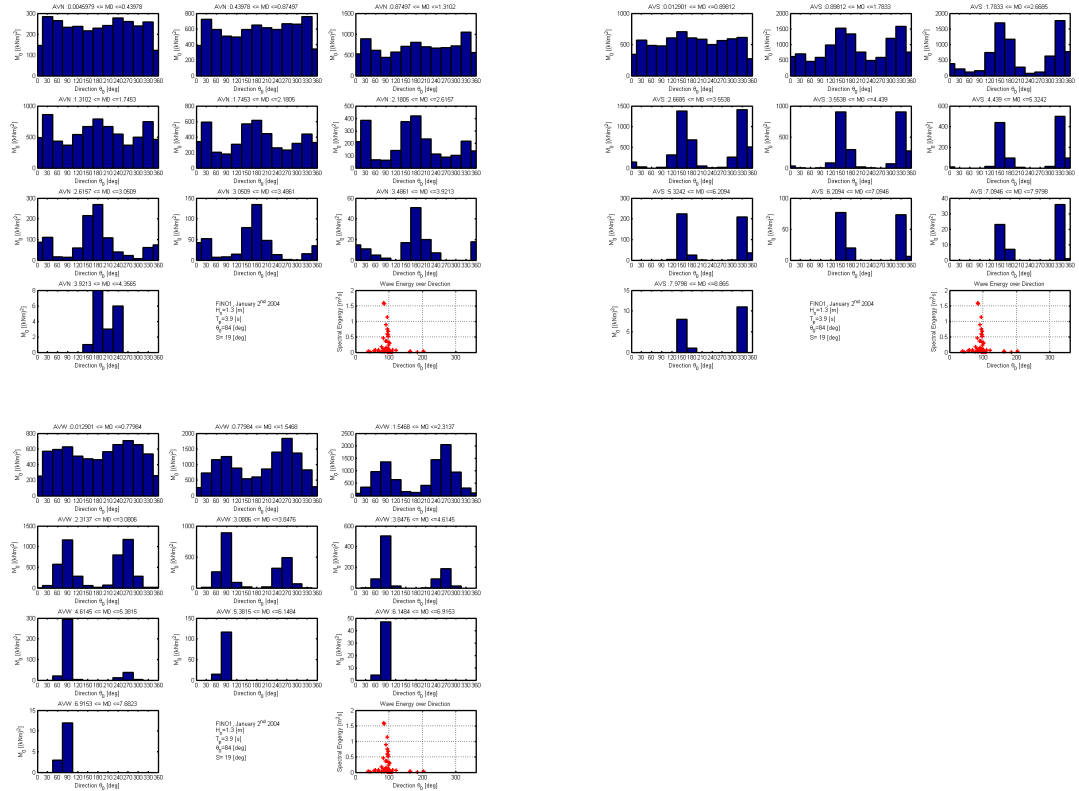


Abbildung 32 Hauptplastrichtungen für AVN, AVS und AVW, FINO-1, 02.01.2004.

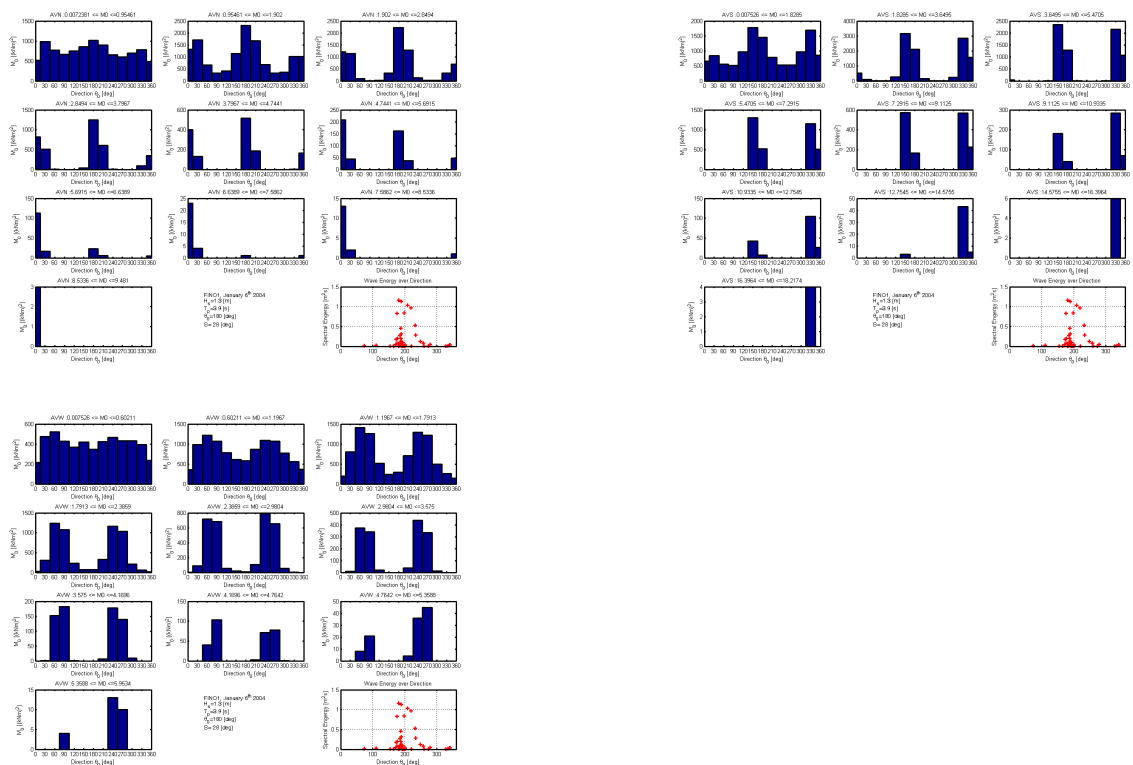


Abbildung 33 Hauptplastrichtungen für AVN, AVS und AVW, FINO-1, 06.01.2004.

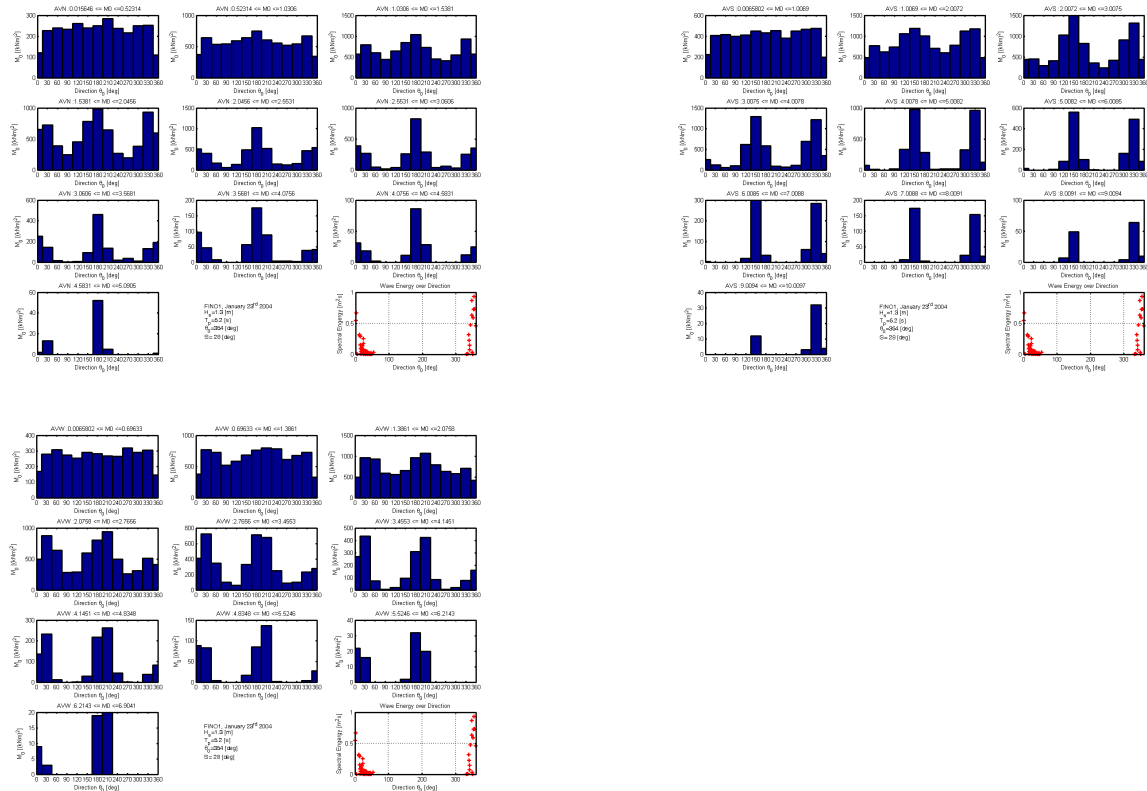


Abbildung 34 Hauptlastrichtungen für AVN, AVS und AVW, FINO-1, 23.01.2004.

4.2 Analyse der Beanspruchung der Amrumbank-Plattform

Der Umfang der Messdaten für die Amrumbank-Plattform ist relativ gering und umfasst ein knappes halbes Jahr. Synchroner Seegang- und Strukturmessungen liegen für folgende Zeiträume vor:

- 22.11.2005 bis 13.02.2006 (~82 Tage)
- 16.05.2006 bis 13.07.2006 (~57 Tage)
- 10.08.2006 bis 27.09.2006 (~47 Tage)

Die im Vergleich zur FINO-1 einfache Struktur der Amrumbank-Plattform ermöglicht eine bessere Analyse der Richtungseffekte des Seegangs auf das Responseverhalten der Tragstruktur. Zunächst erfolgt die Betrachtung der Strukturdehnungen und Schnittkräfte im Frequenzbereich. Die nachfolgenden Spektren sind mit dem jeweiligem Maximalwert normalisiert, um eine einheitliche Darstellung zu gewähren.

Den spektralen Darstellungen ist zu entnehmen, dass der dominierende Energieanteil in der Strukturantwort im Bereich der Seegangenergie liegt. Weiterhin ist deutlich ein zweiter Peak bei ca. 0.5 Hz im Responsespektrum zu erkennen, welches ungefähr der ersten Eigenfrequenz entspricht [4]. Mit geringer werdender signifikanter Wellenhöhe ist eine Zunahme des zweiten Peaks im Responsespektrum zu erkennen. Abbildung 36 zeigt ein Doppelpeak-Seegangsspektrum. Die beiden Peaks im Wellenspektrum finden sich auch im Antwortspektrum wieder. Ein Einfluss der Seegangsstreuung lässt sich nicht direkt in den Spektren erkennen. Die bereits an der FINO-1 Plattform durchgeführte Analyse der Hauptlastrichtung ψ des Hauptmomentes wird für den Monopile Amrumbank wiederholt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die an einem senkrechten Monopile gewonnenen Messdaten weniger durch strukturspezifische Lastabtragungseffekte beeinflusst sind und sich daher ein möglicher Zusammenhang zwischen den Richtungen der im Seegangsspektrum enthaltenen Komponenten und den Hauptlastrichtungen des Strukturresponses beobachten lässt.

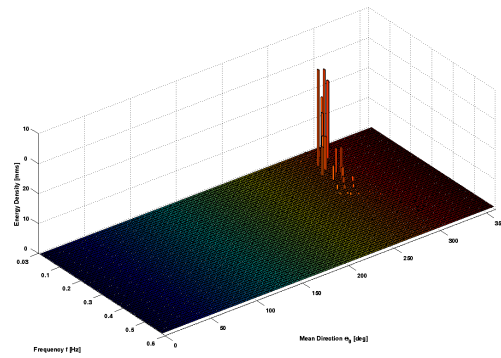
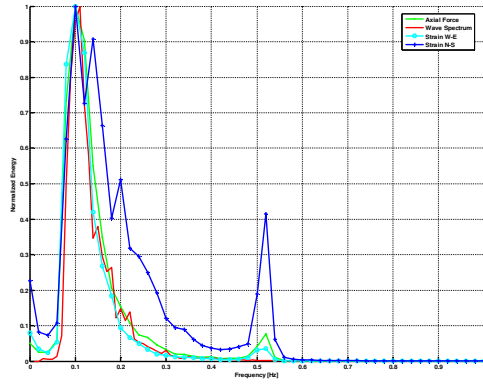


Abbildung 35 Amrumbank Seegangs- und Responsespektren, $H_s=4.41m$, $T_p=6.7s$, $\theta_0=284^\circ$, $s=21^\circ$, 08.02.2006 15:00.

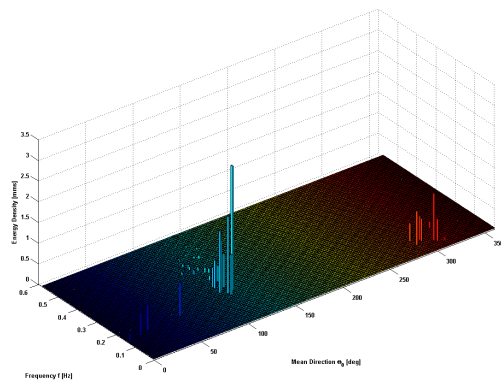
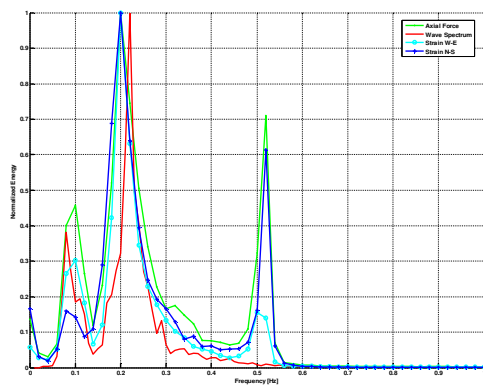


Abbildung 36 Amrumbank Seegangs- und Responsespektren, $H_s=1.80m$, $T_p=4.8s$, $\theta_0=123^\circ$, $s=32^\circ$, 25.11.2005 22:00.

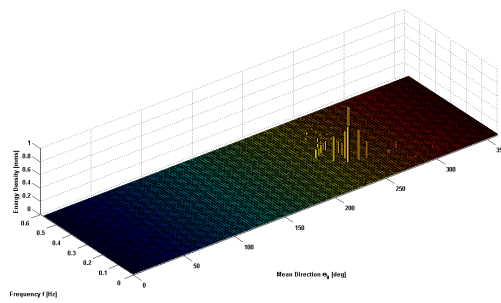
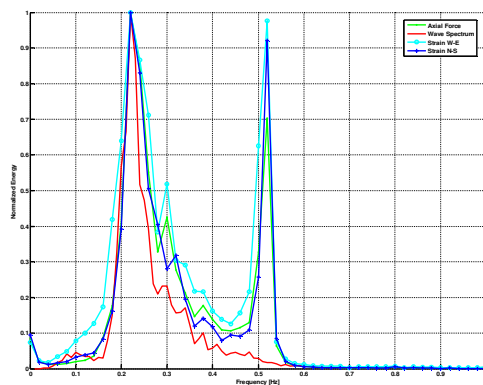


Abbildung 37 Amrumbank Seegangs- und Responsespektren, $H_s=1.02m$, $T_p=3.9s$, $\theta_0=243^\circ$, $s=35^\circ$, 06.02.2006 14:00.

Für die Analyse werden die Reaktionskräfte der Größe nach in Klassen eingeteilt und je Klasse die Häufigkeit der Lastrichtungen in Histogrammform dargestellt. Zum Vergleich wird die relative Häufigkeit der Richtungen der im Seegangsspektrum enthaltenen Frequenzkomponenten ausgezählt und ebenfalls in Histogrammform dargestellt. Zusätzlich zeigt ein Scatter-Plot des Energiegehaltes der einzelnen Seegangskomponenten in Abhängigkeit der Richtung die räumliche Energieverteilung an (Abbildung 38 bis Abbildung 41).

Es ist dabei deutlich zu erkennen, dass die Richtungen der größten Reaktionskräfte mit den Richtungen der größten Seegangenergie zusammenfallen. Weiterhin ist erkennbar, dass schmalbandige Richtungsverteilungen zu schmalbandigeren Richtungsverteilungen des Responses führen und dass sich die Richtungshäufigkeiten von bestimmten Wellenkomponenten im Responseverhalten widerspiegeln.

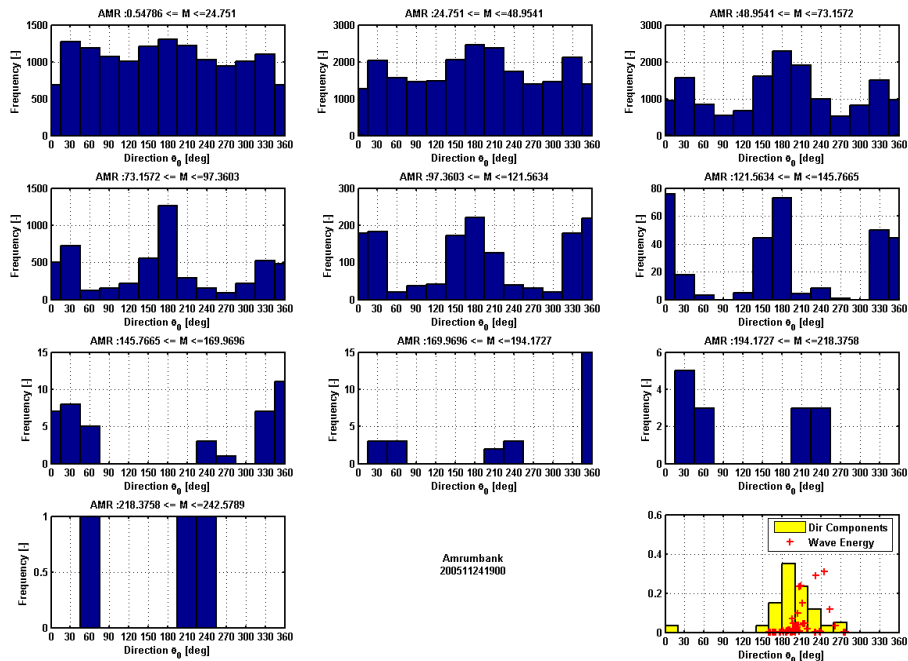


Abbildung 38 Hauptlastrichtungen Amrumbank, 24.11.2005, 19:00h.

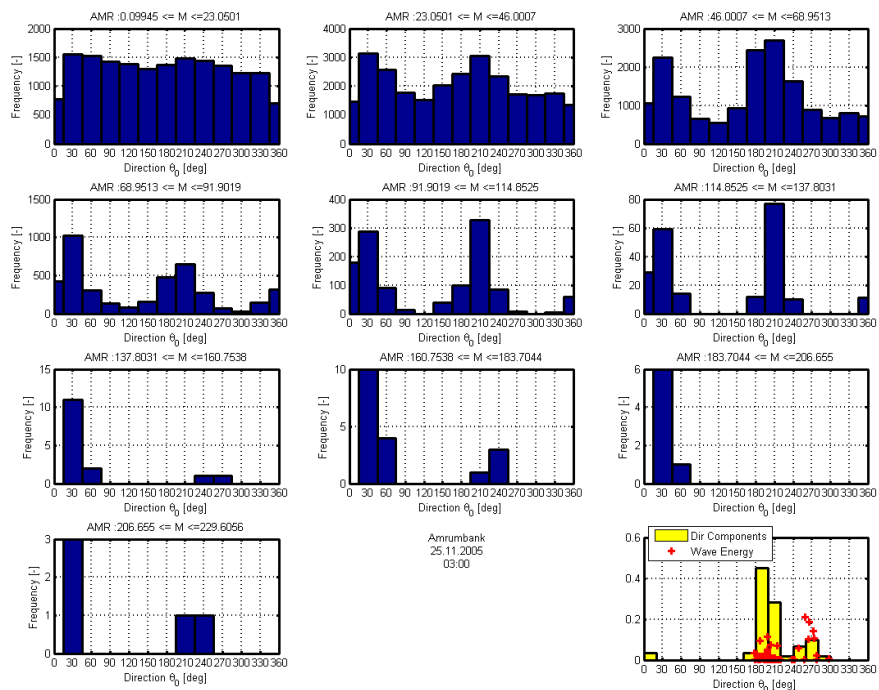


Abbildung 39 Hauptlastrichtungen Amrumbank, 25.11.2005, 03:00h.

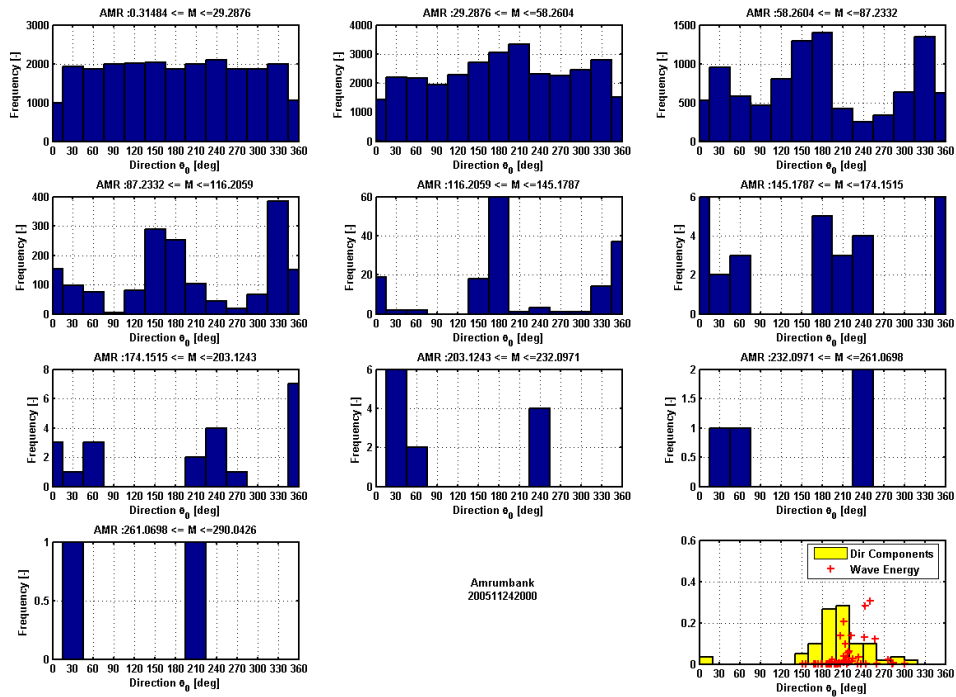


Abbildung 40 Hauptlastrichtungen Amrumbank, 24.11.2005, 20:00h.

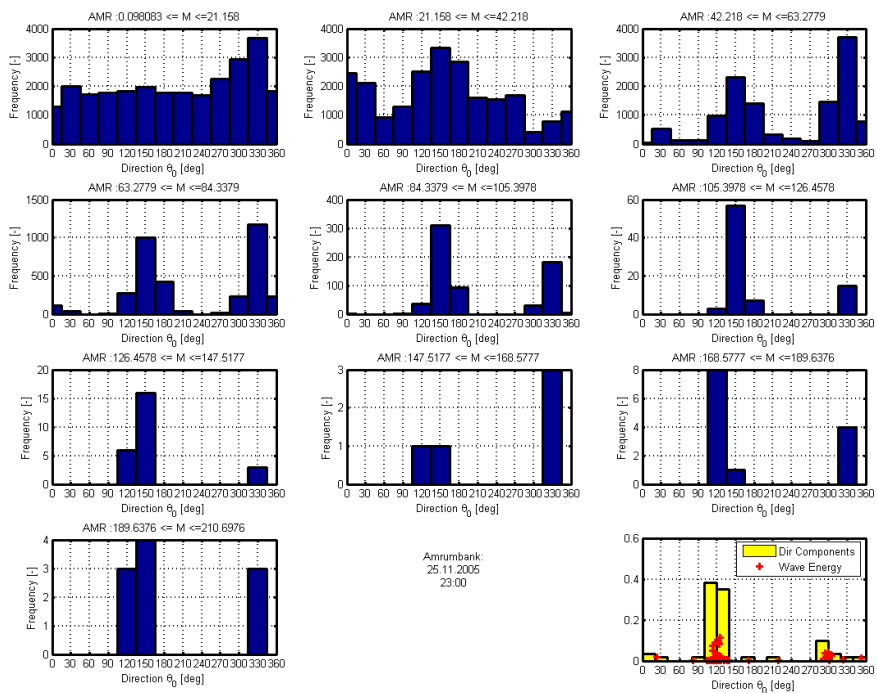


Abbildung 41 Hauptlastrichtungen Amrumbank, 25.11.2005, 23:00h.

5. Seegangssimulations- und Lastmodell

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der zweidimensionalen Seegangslastsimulation im Zeitbereich. Hierzu wird ausgehend von einem parametrisierten zweidimensionalen Seegangsspektrum die orts- und zeitabhängige Wasserpartikelkinematik mit dem linearen Superpositionsverfahren ermittelt. Das zweidimensionale Spektrum ergibt sich aus der Multiplikation eines durch signifikante Wellenhöhe und Peakperiode parametrisierten JONSWAP-Spektrums mit einer Spreadingfunktion. Die verwendete Spreadingfunktion basiert auf dem von Mitsuyasu [6] veröffentlichten \cos^{2S} -Ansatz, wobei der Spreadingparameter S den Grad der Seegangsstreuung beschreibt. Die Phasen der einzelnen Wellenkomponenten sind gleichverteilte Zufallsszahlen, und die Amplituden ergeben sich aus dem Energiedichtespektrum [5]. Die Wellenlastermittlung erfolgt über die Morison-Gleichung [7]. Eine detaillierte Beschreibung der Modelle ist in [8] zu finden.

Die Analyse des Einflusses des Seegangsspreadings auf die schädigungssäquivalenten Lasten sind am Beispiel der FINO-Plattform durchgeführt worden. Hierzu ist ein vereinfachtes FEM-Modell aus Balkenelementen erstellt worden (vgl. Abbildung 8). Die Aufbauten (wie z.B. die Container und der Windmessmast) auf der Plattform sind vereinfacht durch zusätzliche Massenpunkte abgebildet worden. Für die Analyse sind Messdaten der Dehnungsmessstreifen von Plattformebene A und B verwendet worden (vgl. Abbildung 8). Eine Modellverifikation ist in [8] zu finden. Die Schädigungssäquivalenten Lastgrößen sind analog zu dem von [9] verwendeten Verfahren ermittelt worden.

An der FINO-Plattform gemessene schadenäquivalente Lasten weisen bei gleichen Seegangparametern (H_s und T_p) eine große Variabilität auf (Abbildung 42). Abweichungen von über 100% sind teilweise bei den Vertikalstreben zu beobachten, die Diagonalstrebe weist eine etwas geringere Schwankungsbreite auf.

In den vorhergehenden Abschnitten konnte gezeigt werden, dass Strukturbelastungen eine Abhängigkeit von der Wellenhaupttrichtung und dem Spreading zeigen. Dieses stellt eine mögliche Ursache für die in den Messdaten beobachtete große Variabilität der schädigungssäquivalenten Lasten dar.

Im folgenden ist dieses Verhalten in den Simulationen berücksichtigt worden. Die Wirkung auf die schädigungssäquivalenten Lastgrößen ist dabei genauer untersucht und mit Messwerten verglichen worden.

Der Vergleich von Mess- und Simulationsdaten zeigt, dass die Abweichungen zwischen Beobachtung und Simulationsergebnissen deutlich reduziert werden können, wenn in der Simulation die Wellenhaupttrichtung und die Seegangsstreuung angemessen berücksichtigt werden (Abbildung 43).

Simulationsergebnisse für weitere Seegangszustände sind in Abbildung 44 und Abbildung 45 wiedergegeben. Sämtliche durchgeführte 2D-Seegangssimulationen zeigen gegenüber den 1D-Simulationen eine deutliche Verbesserung bei der Beanspruchungsermittlung. Daher erscheint es sinnvoll, trotz eines erhöhten Rechenaufwandes, bei einer Lastermittlung die Haupttrichtung des Seegangsfeldes, sowie den Streugrad in der Simulation zu berücksichtigen.

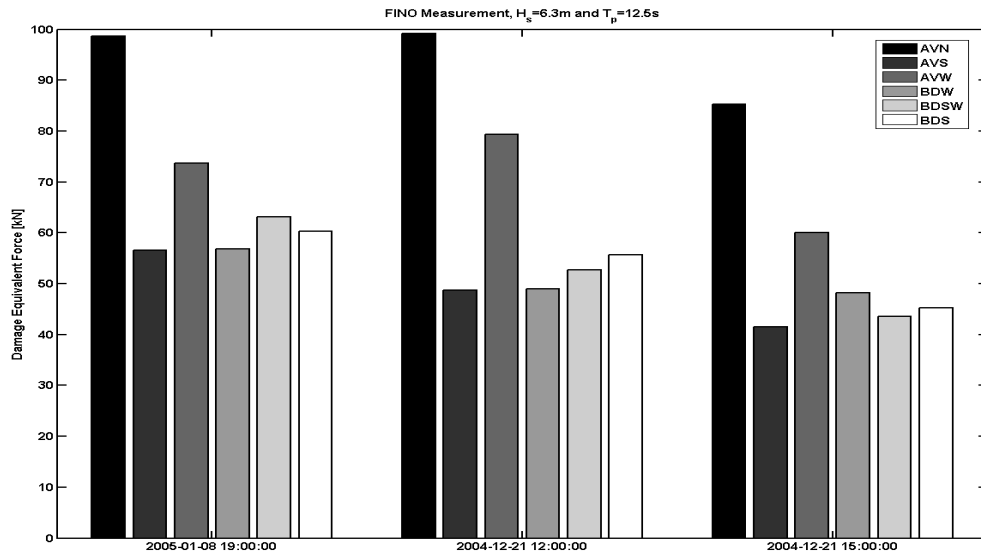


Abbildung 42 Variation der schädigungsäquivalenten Lasten bei gleichen signifikanten Seegangsparemtern (FINO, $H_s=6.3m$ und $T_p=12.5s$).

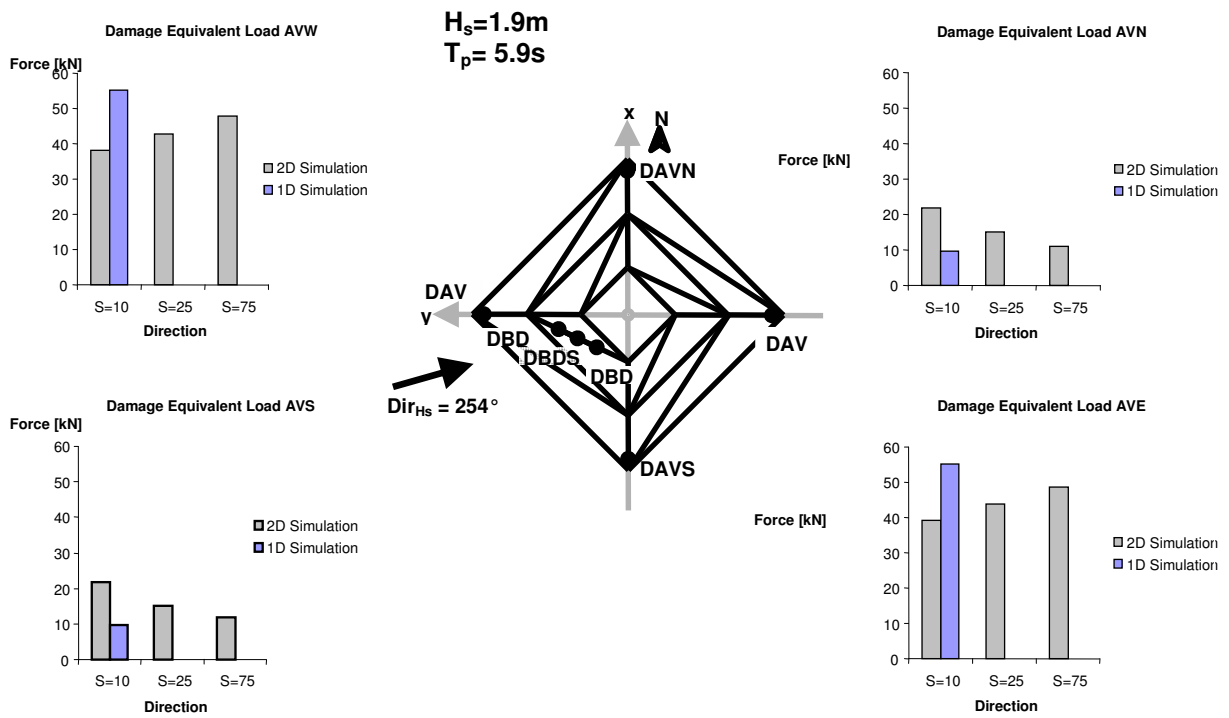


Abbildung 43 Simulierte schädigungsäquivalente Lasten unter Berücksichtigung des Seegangsspreidings.

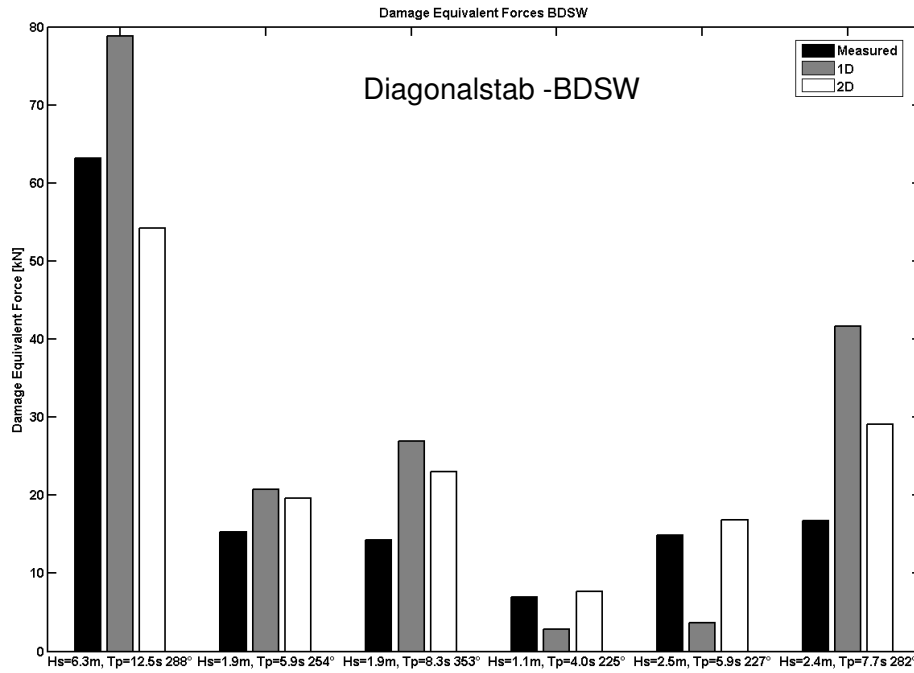


Abbildung 44 Vergleich gemessener und simulierter schädigungsäquivalenter Lasten (Diagonale).

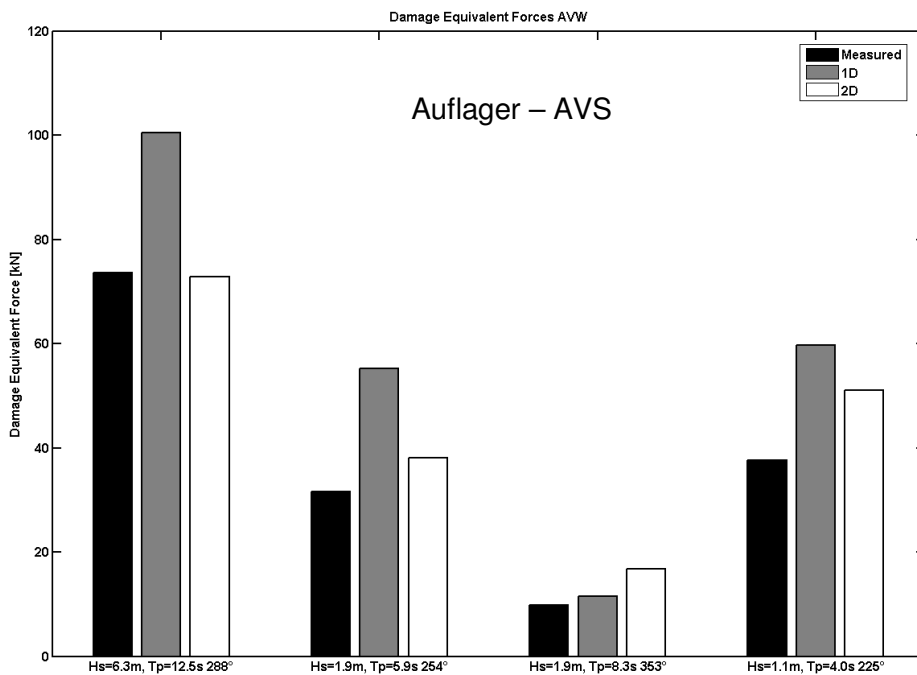


Abbildung 45 Vergleich gemessener und simulierter schädigungsäquivalenter Lasten (Auflager West).

6. Zusammenfassung

Die Auswertung der Messdaten von den Plattformen Amrumbank und FINO-1 zeigen deutlich, dass die Richtungsstruktur des Seegangs einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Lastantworten der Tragstrukturen hat. Die Richtungsstruktur des Seegangs wird durch das Richtungsspektrum beschrieben. Dieses lässt sich im Responseverhalten der Strukturen wiedererkennen, so z.B. fallen die Richtungen der Seegangskomponenten mit hoher Energie mit den Hauptrichtungen des größten Responses zusammen.

Wird das Seegangspreading in der Seegangmodellvorstellung berücksichtigt, so zeigt sich eine Verringerung der absoluten Beträge der Wasserpartikelkinematik gegenüber der unidirektionalen Modellvorstellung und daraus resultierend auch eine Reduktion der Lasten. Weiterhin zeigt sich in den resultierenden Belastungen der Wechsel der Angriffsrichtung. Wie stark dieser Effekt ausgeprägt ist, hängt vom Grad des Spreadings ab. Liegt eine große Streuung vor, so ist das Histogramm der Richtungsverteilung der Strukturantworten wesentlich breiter, als bei geringem Spreading. Die Seegangslastsimulationen auf die FINO-1-Struktur und der Vergleich mit den Messdaten bestätigen diese Modellvorstellung und zeigen zugleich auch die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Richtungsverteilung bei der Lastermittlung. Weitere Simulationen und Messdatenauswertungen für den Messpfahl Amrumbank werden folgen.

7. Literatur

- [1] Longuet-Higgins, M.S., Cartwright, D.E. and Smith, N.D., Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy. *Ocean Wave Spectra*, p. 111. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1963.
- [2] Benoit, M., Extensive comparison of directional wave analysis methods from gauge array data, *Proceedings Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES 93 Symposium*, New Orleans, LA, American Society of Civil Engineers, New York, NY, pp. 740-754, 1994.
- [3] Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken (EAK 2002) in "Die Küste", Heft 65, 2002.
- [4] Zielke, W. (Editor), Jahresberichte GIGAWINDplus 2004 und 2005, <http://www.gigawind.de>.
- [5] Mittendorf, K., Habbar, A. und Zielke, W., Zum Einfluss der Richtungsverteilung des Seegangs auf die Beanspruchung von OWEA, 4. GIGAWIND Symposium, Hannover, September 2005.
- [6] H. Mitsuyasu, Measurement of the high-frequency spectrum of ocean, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 7, pp. 882-891, 1977.
- [7] J.R. Morison, M.P. O'Brien, J.W. Johnson, S.A. Schaaf (1950): The Force exerted by Surface Waves on Piles, *Pet. Trans., AIME*, 189, pp. 149 – 154, 1950.
- [8] Mittendorf, K., Hydromechanical Design Parameters and Design Loads for Offshore Wind Energy Converters. Dissertation, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover, Bericht Nr. 71/2006.
- [9] Schaumann, P., Böker, C., Lebensdaueranalyse von Offshore-Tragstrukturen unter Verwendung der FINO-Messdaten. 4. Symposium Offshore-Windenergie Bau- und umwelttechnische Aspekte, 27. September 2005.