

## **BELASTUNG SCHLANKER ZYLINDER DURCH BRECHENDE WELLEN**

- Analyseverfahren zur Bestimmung des dynamischen Kraftanteils -

von

Kai Irschik<sup>1</sup>  
Uwe Sparboom<sup>2</sup>  
Hocine Oumeraci<sup>3</sup>

### **ABSTRACT**

Large-scale model tests were carried out in the Large Wave Channel (GWK) with a slender cylindrical pile located at the end of a 1:10 slope. The test cylinder was subject to both regular and irregular waves. The pile inclination was varied from  $-45^\circ$  against to  $+45^\circ$  in wave direction in five steps. The paper deals with the separation of the measured force time histories into a slowly varying quasi-static and a dynamic part. A low pass filter adapted to the cylinder response characteristics and the EMD (Empirical Mode Decomposition) are used for the analysis of breaking wave attack.

### **1. EINLEITUNG**

In GWK-Messungen wurde die Gesamtkraft brechender Wellen auf einen schlanken Zylinder, der am Ende einer 1:10 Böschung positioniert war, als Summe der Auflagerkräfte aufgezeichnet (Abb. 1). Die gemessene Gesamtkraft setzt sich aus zwei getrennt zu betrachtenden Anteilen zusammen (WIEGEL, 1982). Die dynamische Belastung bezeichnet eine gedämpfte Schwingung. Diese Schwingung stellt die Zylinderantwort auf den Aufschlag der Brecherzunge und der nachfolgenden senkrechten Wellenfront dar. Die Einwirkung der brechenden Welle kann aufgrund der Trägheit der Struktur nicht direkt gemessen werden. Die langsam veränderliche quasi-statische Kraft ist in Phase mit der Wasserspielauslenkung. Die dynamische Belastung überlagert die quasi-statische Einwirkung. Die Trennung der beiden Kraftanteile wird im Folgenden vorgestellt. Die Methode zur Krafttrennung ist allgemein anwendbar, unabhängig von der Zylinderneigung und den Versuchsparametern. Die Methode wird auf die aktuellen

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

<sup>2</sup> Dr.-Ing., Forschungszentrum Küste, Merkurstr. 11, 30419 Hannover

<sup>3</sup> Univ.-Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstr. 51a, 38106 Braunschweig

Messungen sowie auf Messdaten einer vorangegangenen Versuchsreihe angewendet, um die Genauigkeit der Auswertung abschätzen zu können.

## 2. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Im Rahmen des DFG-Projektes „Belastung von zylindrischen Strukturen durch brechende und teilbrechende Wellen“ wurden Versuche im Großen Wellenkanal (GWK) durchgeführt. Die Versuchseinrichtung Großer Wellenkanal gehört zum Forschungszentrum Küste (FZK) in Hannover. Das GWK-Modell besteht im wesentlichen aus einem Zylinder und einer Böschung (Abb. 1). Die ebene Böschung mit einem Neigungsverhältnis von  $m = 1:10$  beginnt bei 178 m. Sie besteht aus einem Sandkern, der durch eine Asphaltdecke versiegelt ist. An die folgende Berme schließt sich eine Böschung mit einer Neigung von  $m = 1:17,5$  an. Durch die Vorstrandneigung von  $m = 1:10$  werden überwiegend Sturzbrecher generiert. Die 1:17,5 geneigte Böschung dient zur Minimierung von Wellenreflexionen am Ende des Kanals. Der Zylinder ist am Ende der 1:10 geneigten Böschung auf der Berme bei Kanalmeter 201 positioniert. Das untere Auflager ist momentenfrei ausgebildet. Das obere Auflager ist ebenfalls gelenkig ausgebildet und wird von einer Haltetraverse aufgenommen. Für die verschiedenen Versuchsphasen wurde die Neigung des Zylinders variiert. Abb. 1 zeigt den Zylinder in lotrechter Position ( $0^\circ$ ). Die verwendeten Neigungswinkel des Zylinders sind  $\alpha_{Zyl} = -45 / -22,5 / 0 / 22,5 / 45^\circ$  gegen und in Wellenfortschrittsrichtung. Der Zylinderdurchmesser beträgt  $D = 0,7$  m. Die Länge des Zylinders ist auf jeden Neigungswinkel anzupassen. Dies erfolgt durch Zwischensegmente. Der untere Auflagerpunkt bleibt während der gesamten Messkampagne unverändert.

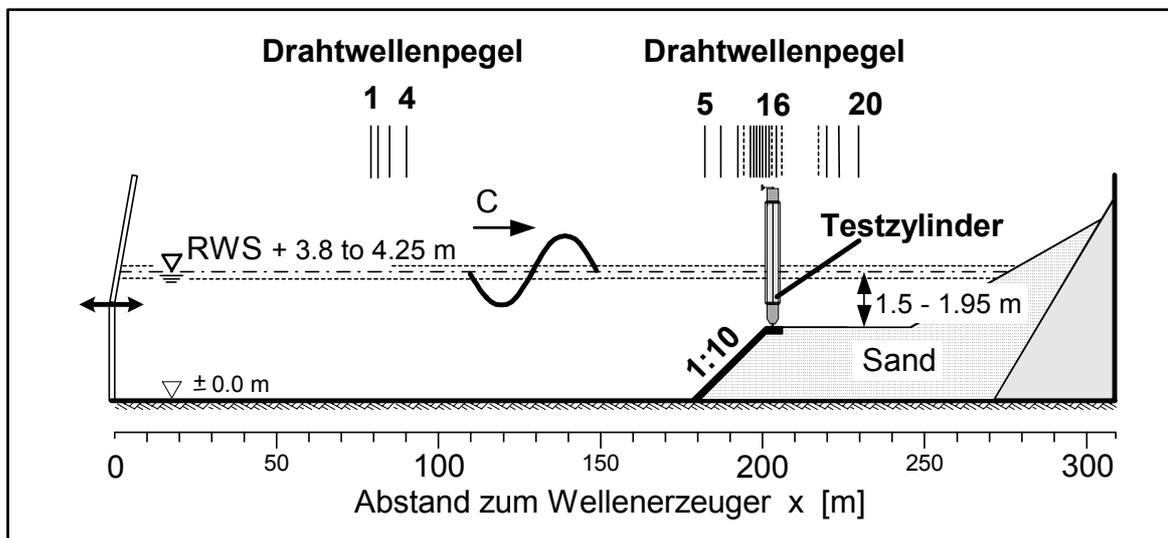


Abb. 1: Versuchsaufbau und Positionen der Wellenpegel im GWK.

Die Wellenbelastung des Zylinders wird u.a. durch eine Gesamtkraftmessung erfasst. Die Gesamtkraft wird in den Auflagerpunkten mit Dehnmessstreifenapplikationen gemessen. Die Messung erfolgt in Quer- und in Längsrichtung des Kanals. In Abb. 2 ist der Gesamtkraftverlauf (Längsrichtung) aus der Summe des unteren und oberen Auflagers dargestellt. Der Versuch wurde mit dem lotrechten Testzylinder durchgeführt. Der

Kraftverlauf ist charakteristisch für Lastfall 3, der für die maximale zu erwartende Wellenbelastung steht (CHAN et al., 1995; WIENKE et al., 2000; IRSCHIK et al., 2002).

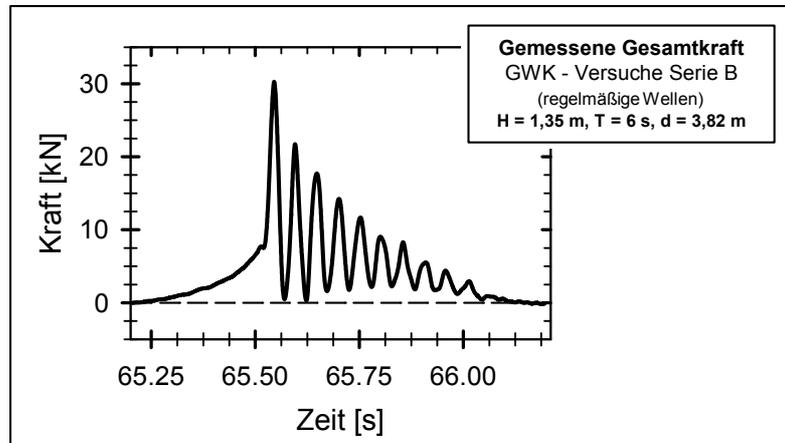


Abb. 2: Gemessene Gesamtkraft als Summe der Auflagerkräfte bei einem Versuch mit brechenden Wellen ( $\alpha_{Zyl} = 0^\circ$ ).

### 3. TRENNUNG DER QUASI-STATISCHEN UND DYNAMISCHEN KRAFTANTEILE

#### 3.1 Beschreibung des Vorgehens

Die Trennung der quasi-statischen und dynamischen Kraftanteile basiert darauf, dass zunächst der quasi-statische Kraftanteil bestimmt wird und der dynamische Anteil anschließend aus der Differenz von gemessener Gesamtkraft und quasi-statischer Kraft berechnet wird. Die Vorgehensweise ist in Abb. 3 zusammenfassend dargestellt. Es ist zu beachten, dass der Beginn der dargestellten Gesamtkraft jeweils den Zeitpunkt ohne Kraftwirkung kennzeichnet und der Kraftnullpunkt gegenüber der Zeitachse verschoben ist.

Zum Einen ist die Trennung unter alleiniger Verwendung eines FFT-Tiefpassfilters problematisch, da das Ergebnis stark von der Wahl der Abschneidefrequenz beeinflusst wird. Aufgrund der großen Asymmetrie von Wellenform und Kraftverlauf entstehen Überschneidungen der dynamischen und quasi-statischen Kraftanteile im Energiedichtespektrum, wodurch keine eindeutige Grenzfrequenz zwischen den Anteilen erkennbar ist. Zum Anderen ist das Amplitudenverhältnis des dynamischen zum quasi-statischen Kraftanteil für die Auswertung im Zeitbereich, zum Beispiel durch eine Modenzerlegung mittels der Empirical Mode Decomposition (EMD) nach HUANG et al. (1999), sehr ungünstig. Die Amplitude des hochfrequenten Anteils erreicht den zweifachen Wert des quasi-statischen Maximums. Dem Kraftverlauf können neben einer Schwingung mit der Eigenfrequenz des Zylinders  $f_E$  Schwingungen mit kleiner Amplitude überlagert sein. Diese zwar vom Betrag unbedeutenden Schwingungen erschweren die Modenzerlegung mittels der EMD jedoch erheblich, da der Verlauf der oberen und unteren Einhüllenden durch die lokalen Extrema stark beeinflusst wird. In der Detailansicht in Abb. 4 ist die Entstehung lokaler Extrema durch die hochfrequenten Schwingungen erkennbar.

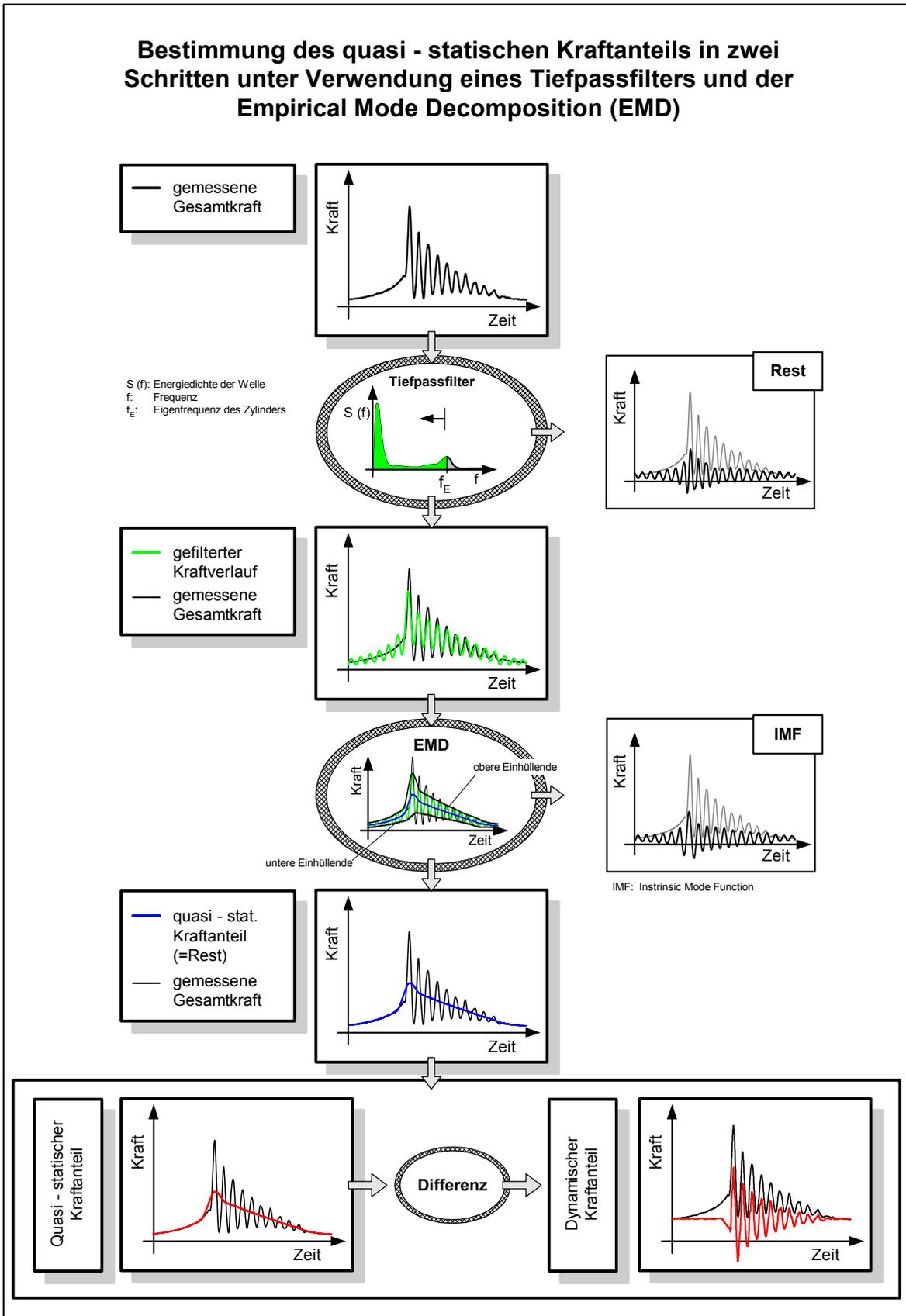


Abb. 3: Schematische Darstellung der Krafttrennung.

Im ersten Schritt der Krafttrennung (Abb. 3) wird daher der gemessene Kraftverlauf durch einen FFT-Tiefpassfilter mit der Abschneidefrequenz gleich der Eigenfrequenz des Zylinders  $f_E$  geglättet, d.h. Maxima und Minima liegen gleichmäßig verteilt oberhalb bzw. unterhalb der zu bestimmenden Kurve. Somit werden die Ausreißer bei den lokalen Extrema, hervorgerufen durch Schwingungen mit einer Frequenz oberhalb von  $f_E$ , eliminiert, die zu einem veränderten Verlauf der Einhüllenden und infolgedessen zu einem veränderten Ergebnis der im nächsten Schritt angewendeten EMD führen. Zusätzlich wird das Amplitudenverhältnis für die weitere Auswertung im Zeitbereich verbessert. Die Eigenfrequenz ist gleichzusetzen mit der peak-Frequenz des dynamischen Anteils und je nach Zylinderneigung und Wasserstand variabel. In Abb. 3 ist der Bereich bis  $f_E$  grün eingefärbt. Der größere Energieanteil bei niedrigeren Frequenzen ist dem quasi-statischen Anteil zuzuordnen. Die quasi-statische Belastung wird von dem Tiefpassfilter mit einer derart hohen Abschneidefrequenz nicht verändert.

Nachdem die Datenreihe geglättet wurde, kann die Krafttrennung durch die Empirical Mode Decomposition (EMD) nach HUANG et al. (1999) in nur einem Schritt erfolgen. Das Signal wird in eine Intrinsic Mode Function (IMF) und einen Restanteil zerlegt. Der Restanteil ist gleichzusetzen mit der maximal zu erwartenden quasi-statischen Belastung.

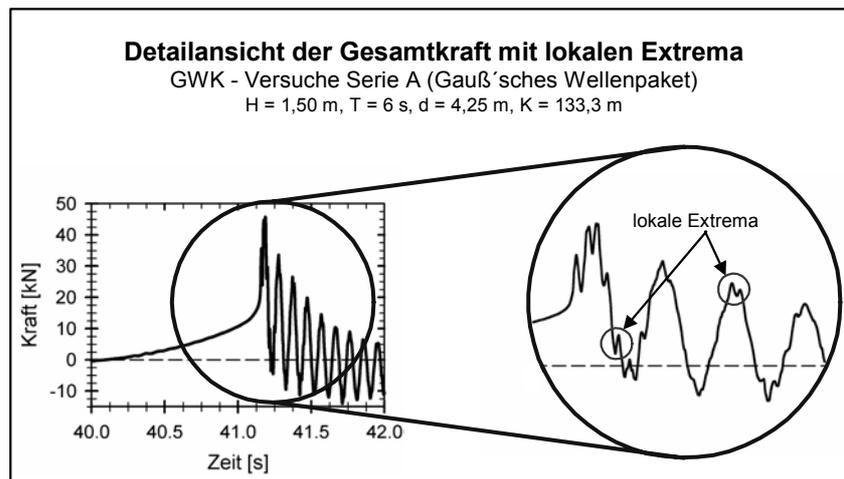


Abb. 4: Detailansicht der lokalen Extrema am Beispiel des Gesamtkraftverlaufs bei einem Versuch mit Gauß'schen Wellenpaketen ( $\alpha_{Zyl} = 0^\circ$ ).

### 3.2 Vergleich mit experimentell erzeugter Trennung

Bei Versuchen unter Flachwasserbedingungen wird das Brechen der Wellen durch die abnehmende Wassertiefe induziert. Die brechenden und nicht-brechenden Wellen weisen im letzteren Fall zu große Differenzen in der Wellenform und -steilheit auf, als dass der quasi-statische Kraftanteil einer brechenden Welle durch eine nicht-brechende Welle repräsentiert werden könnte. Die experimentelle Krafttrennung kann nur für Versuche mit horizontaler Sohle durchgeführt werden. Die brechenden Wellen werden dann durch transiente Wellenpakete erzeugt (WIENKE, 2001). Ein transientes Wellenpaket, das kurz hinter dem Zylinder bricht, repräsentiert in diesem Fall den quasi-statischen Kraftanteil. Dies entspricht Lastfall 5. Die Trennung erfolgt durch Subtraktion des Lastfalls 5 von den Lastfällen 1-4.

Die aus der gemessenen Gesamtkraft mittels EMD ermittelte quasi-statische Belastung ist in Abb. 5 schwarz dargestellt. Zum Vergleich ist der entsprechende Lastfall 5 (= exp.) gestrichelt eingezeichnet. Lastfall 5 steht für den experimentell erzeugten quasi-statischen Anteil, erzeugt durch ein hinter dem Zylinder brechendes transientes Wellenpaket mit einem theoretischen Konzentrationspunkt K bei  $x = 120$  m vom Wellenerzeuger. Das entsprechende Wellenpaket der grau gezeichneten Gesamtkraft wurde mit einem Konzentrationspunkt bei  $x = 113,3$  m generiert.

Es sind Unterschiede bei Größe und Position der maximalen Amplitude und beim Abstand der Nulldurchgänge feststellbar. Der vom Lastfall 5 erzeugte Kraftverlauf weist einen größeren Abstand zwischen den Nulldurchgängen auf. Die Anteile des transienten Wellenpakets sind bei Lastfall 5 weniger konzentriert als in den anderen Fällen, da der Konzentrationspunkt bei der Wellengenerierung hinter dem Zylinder gewählt wurde. Die enger zusammen liegenden Nulldurchgänge bei der durchgezogenen Linie sind demnach der höheren Konzentration des Wellenpakets zuzuordnen. Wird der dynamische Anteil als gedämpfte Schwingung um die Abszisse mit einem exponentiellen Abfall definiert, so ist die rechts oben dargestellte Kraft (EMD) eine sehr gute Näherung. Der Unterschied im Bereich der maximalen Amplitude ist zum einen auf das für die Krafttrennung ungünstige Amplitudenverhältnis zurückzuführen. Zum anderen aber wird die gemessene Gesamtkraft

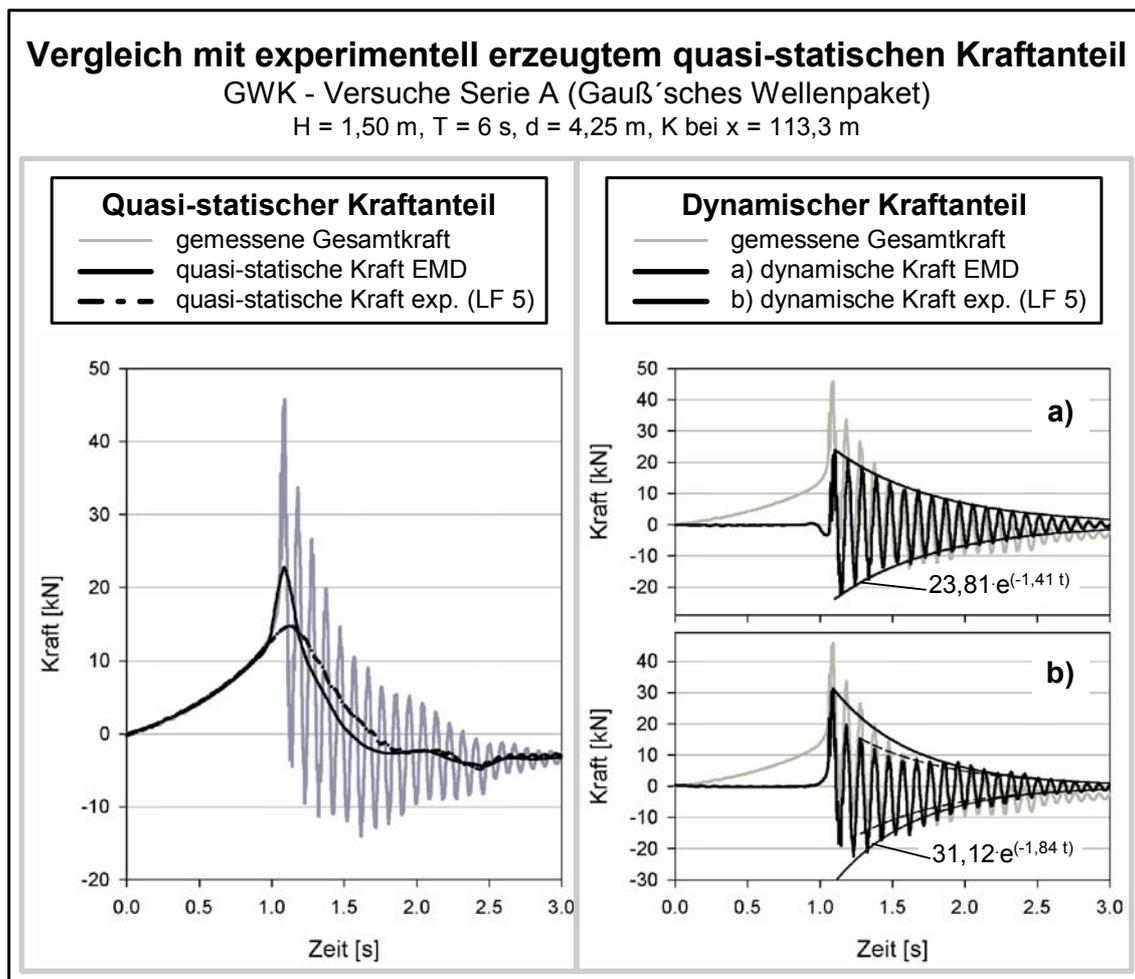


Abb. 5: Vergleich von ermitteltem und gemessenem (gestrichelt) quasi-statischem Kraftanteil (LF 5: K bei  $x = 120$  m).

durch die Vorgabe von unterschiedlichen Konzentrationspunkten bei der Wellengenerierung von einer steileren Welle erzeugt als der entsprechenden Welle für Lastfall 5. Hierdurch ist aus der veränderten Orbitalkinematik für das vorhandene quasi - statische Maximum ein Betrag gleich oder größer dem experimentell bestimmten Extremwert zu erwarten. Der dynamische Kraftverlauf, der mit der EMD bestimmt wurde, zeigt vor dem Maximum eine Abnahme ins Negative, die lediglich durch die Auswertung erzeugt wird. Dies ist beim späteren Vergleich mit theoretischen Beschreibungen zu beachten.

In Abbildung 5 sind für die dynamischen Kraftanteile zusätzlich Exponentialfunktionen eingezeichnet. Die Exponentialfunktionen sind die Einhüllenden einer gedämpften Sinusfunktion, die nach einem Vergleich mit dem dynamischen Anteil unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die geringste Abweichung aufweisen. Die Funktion wird anschließend auf das erste Maximum skaliert. In der oberen Grafik a) wird der dynamische Anteil von der Exponentialkurve gut eingehüllt. Wenn die Anpassung erst beim dritten Maximum begonnen wird, wie in b) erkennbar, hat dies kaum Einfluss auf die Dämpfungskonstante für den in a) abgebildeten dynamischen Kraftanteil (-1,39 statt -1,41). Der Unterschied ist derart gering, dass die gestrichelte Linie nicht von der durchgezogenen Kurve zu unterscheiden ist.

### **3.3 Anwendung der Krafttrennung bei geneigtem Zylinder**

Hier wird gezeigt, dass die Krafttrennung mittels eines FFT-Filters und der EMD auf verschiedenste Kraftverläufe anwendbar ist. Verschiedene Kraftverläufe ergeben sich z.B. für verschiedene Lastfälle, d.h. bei einer konstanten Zylinderneigung können je nach Distanz zwischen Brechpunkt und Zylinderfront fünf Lastfälle unterschieden werden (CHAN et al., 1995; WIENKE et al., 2000; IRSCHIK et al., 2002). Ebenso erzeugen Wellen des gleichen Lastfalls für verschiedene Zylinderneigungen unterschiedliche Verläufe. In Abb. 6 ist der gemessene Gesamtkraftverlauf für einen durch brechende Wellen belasteten und um  $\alpha_{Zyl} = -45^\circ$  (gegen die Wellenfortschrittsrichtung) geneigten Zylinder dargestellt. Die Gesamtkraft zeigt sehr deutlich zwei aufeinander folgende, getrennte Oszillationen. Die erste Oszillation ist auf den Aufschlag der Brecherzunge zurückzuführen. Die zweite auf den Aufschlag der nachfolgenden Brecherfront. Die Einflüsse aus der Auftriebskraft auf den quasi-statischen Kraftverlauf und der veränderten Schwingungseigenschaften aufgrund des sich verändernden Wasserspiegels sind ebenfalls zu berücksichtigen. Durch die Zylinderneigung erfolgt der Aufschlag der Brecherfront mit größerer Zeitverzögerung im Vergleich zum lotrechten Zylinder (in Abb. 2 für  $\alpha_{Zyl} = 0^\circ$  wird der Aufschlag als zeitgleich über die gesamte Aufschlagshöhe angenommen). In beiden Fällen, sowohl für den Aufschlag der Brecherzunge als auch der Brecherfront, wird die gedämpfte Schwingung sehr gut von der Gesamtkraft separiert. Der dargestellte vorläufige quasi-statische Kraftverlauf muss abschließend noch um den Auftrieb bereinigt werden. Erst dann ist die tatsächlich wirkende quasi-statische Einwirkung ermittelt.

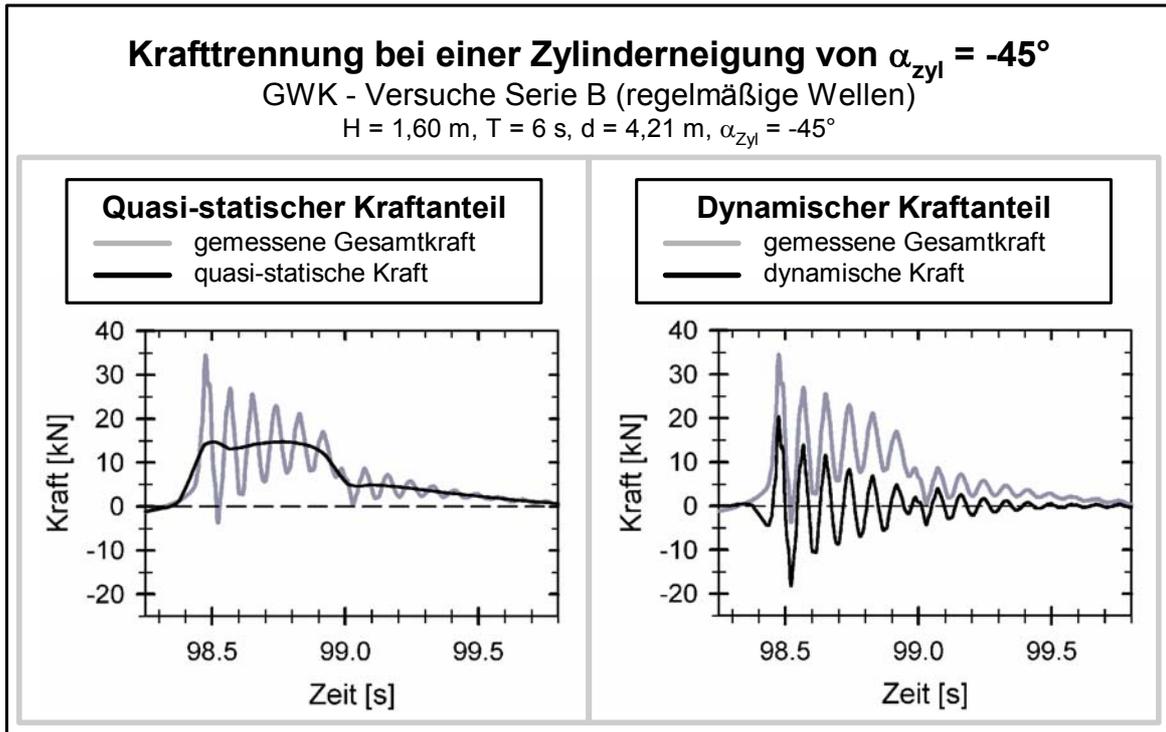


Abb. 6: Krafttrennung bei geneigten Zylinder ( $\alpha_{\text{Zyl}} = 0^\circ$ ).

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der quasi-statische Kraftanteil wird durch die Verwendung eines Tiefpassfilters und der EMD sehr gut angenähert. Im Bereich der maximalen Amplitude, zwischen den mit der EMD ermittelten Krümmungspunkten, wird die maximal zu erwartende quasi-statische Belastung ermittelt. Im übrigen Bereich wird der langsame Kraftverlauf mit größter Genauigkeit ermittelt. Der steile Anstieg des quasi-statischen Anteils im Bereich von 1,0 - 1,2 s (Abb. 5) zeigt jedoch kaum Einfluss auf die Dämpfungskonstante der einhüllenden Exponentialkurven. Die Dämpfungskonstante der an das erste, absolute Maximum angefitteten Exponentialkurve unterscheidet sich nur unwesentlich von der Konstante, wenn der Vergleich zu einem späteren Zeitpunkt begonnen wird.

Ein großer Vorteil der vorgeschlagenen Methode ist die Transparenz der Krafttrennung. Durch die Wahl der Zylindereigenfrequenz als Abschneidefrequenz ist die Methode für die verschiedensten Randbedingungen einsetzbar. Die Zerlegung durch die EMD in eine IMF und einen Restanteil ist eindeutig und gut nachvollziehbar.

Bei der Fortführung der Datenanalyse wird die Auftriebskraft genau definiert, so dass die signifikanten Parameter getrennt für beide Kraftverläufe ausgelesen werden können. Anschließend wird der Vergleich mit den theoretischen Beschreibungen durchgeführt.

Das Forschungsvorhaben zum Einfluss brechender Wellen auf zylindrische Seebauwerke wird von der DEUTSCHEN FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT gefördert (Ou 1 / 4 - 2).

## **5. SCHRIFTTUM**

- CHAN, E.-S., CHEONG, H.-F. und TAN, B.-C.: Laboratory study of plunging wave impact on a vertical cylinder. *Coastal Engineering*, 25, 1995
- HUANG, N.E., ZHENG, S. und LONG, S.R.: A new view of nonlinear water waves: The Hilbert Spectrum. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 1999
- IRSCHIK, K., SPARBOOM, U. und OUMERACI, H.: Breaking wave characteristics for the loading of a slender pile. *Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 2002
- WIEGEL, R.L.: Forces induced by breakers on piles. *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1982
- WIENKE, J., SPARBOOM, U. und OUMERACI, H.: Breaking wave impact on a slender cylinder. *Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 2000
- WIENKE, J.: Druckschlagbelastung auf schlanke zylindrische Bauwerke durch brechende Wellen – Theoretische und großmaßstäbliche Laboruntersuchungen. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau, 2001