
MEMO



INGENIEURGESELLSCHAFT MBH
Stadtdeich 7 · 20097 Hamburg

Projekt: Vertiefung der Außenems bis Emden – UVU

Datum: 15. März 2010

Dokument-Nr.: 90141-07

Thema: Schiffswellenanalyse

1 Einleitung

Im Rahmen der Bearbeitung des Gutachtens zur Erfassung des Ist-Zustands schiffserzeugter Wellen- und Strömungsbelastungen in der Außenems sind durch IMS die an den verschiedenen Messlokalationen gewonnenen Messdaten auszuwerten. Die Auswertung umfasst Schiffswellen und schiffserzeugte Strömungen.

Die Auswertung soll ereignisbezogen erfolgen, d.h. aus den aufgenommenen Zeitreihen sollen mögliche Schiffspassagen erkannt und dann die von der BAW vorgegebenen Kenngrößen bestimmt werden. Die erfassten Kenngrößen werden mit den von der Verkehrszentrale (VKZ) erfassten Schiffspassagen zusammengeführt, so dass eine Zuordnung zwischen den Ereignissen und den Schiffspassagen erfolgen kann.

Für diesen Zweck wurden verschiedene Auswerte-Programme, u.a. mit dem System MATLAB, erstellt. Die Vorgehensweise bei der Auswertung der Schiffswellen und der schiffserzeugten Strömung wird in folgenden Abschnitten erläutert.

2 Auswertung der Schiffswellen

2.1 Vorstufe

Die Vorstufe der Auswertung umfasst:

1. Eingangskontrolle mit Visualisierung aller Messdaten;
2. Umformatierung der Rohdaten;
3. Berücksichtigung von Messausfällen in der Messkette;
4. Filterung der Daten zur Trennung von Primär- und Sekundärwellenphänomenen;
5. Festlegung der auszuwertenden Ereignisse durch Kombination mit Schiffspassagedaten.

Eingangskontrolle

Die Eingangskontrolle der Messdaten erfolgt durch Darstellung der Zeitreihen jedes Messsignals in übersichtlichen Diagrammen für jeden Messtag und jeden Messquerschnitt. Die Messdaten werden mit den durch die Verkehrszentrale erfassten Schiffspassagen (Zeitpunkt der Passage) kombiniert. Die Visualisierung dient der ersten Beurteilung der Anzahl der erfassten Ereignisse und des Anteils der Messausfälle/-fehler.

Umformatierung der Rohdaten

Die Rohdaten werden mit einer Datenrate von 20 Hz aufgezeichnet. Die Datenrate wird bei der Auswertung nicht reduziert, sondern beibehalten. Eine Umformatierung der Daten ist dennoch erforderlich, um bestimmte Formatvorgaben einzuhalten (Kommentarzeilen, u. ä.).

Berücksichtigung von Messausfällen

Die Kenngrößen der Schiffswellen werden nur dann ausgewertet, wenn alle Signale der Messkette vollständig vorliegen. Wenn also das Signal des Wasserstands in einem bestimmten Zeitraum aufgrund eines Messausfalls fehlt, werden auch die Signale der Strömung im gleichen Zeitraum verworfen.

Filterung der Daten

Die Filterung der Daten dient zur besseren Erkennung von Primär- und Sekundärwellen. Im Dezember 2009 wurde die Verwendung der Filter auf Grundlage einer von IMS durchgeführten Sensitivitätsanalyse mit der BAW abgestimmt (siehe Anhänge).

Der vorhandene Seegang (vor allem in der Messlokation C *Borkum*) gab Anlass, den *Tiefpass*-Filter zur Erkennung der Primärwelle so anzupassen, dass ein „glatter Verlauf“ der Primärwellendaten erreicht wird. Bei der Filterung der Daten wird nach Abstimmung ein Tiefpass-Filter für die Periode $T \geq 15$ s verwendet (siehe Abbildung 1).

Die Sensitivitätsanalyse ergab außerdem, dass der Bandpass-Filter einen erheblichen Einfluss auf die ermittelte Sekundärwellenhöhe hat. Da keine eindeutige Unterscheidung von Seegang und Sekundärwellen in den vorliegenden Messlokalationen möglich ist, wird darauf verzichtet, den Seegangsanteil aus den Rohdaten zu entfernen. Für die Erkennung der Sekundärwelle dient gemäß Abstimmungsergebnis ein *Bandpass*-Filter ($0,2 \text{ s} \leq T < 15 \text{ s}$), der lediglich zur Verbesserung der Auswertergebnisse das Hintergrundrauschen mit $T < 0,2 \text{ s}$ aus dem Signal eliminiert (siehe Abbildung 1).

Um die Daten für die separat durchgeführte Seegangsanalyse vom Einfluss der Tide und der Primärwellen zu befreien, wurde außerdem ein *Hochpass*-Filter für die Periode $T < 15 \text{ s}$ eingesetzt.

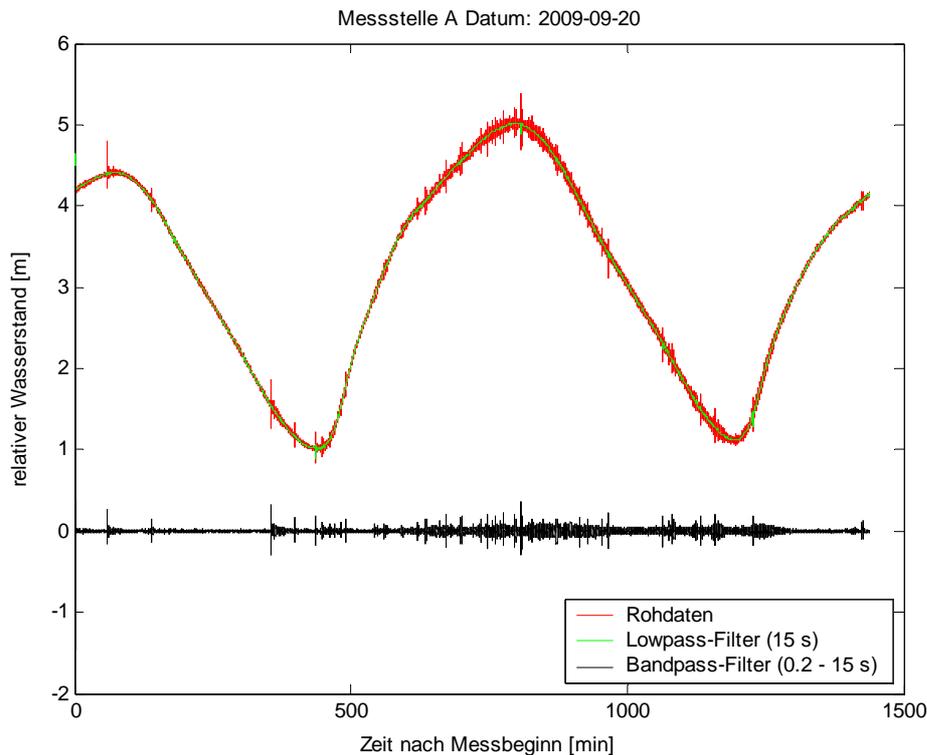


Abbildung 1: Beispiel mit Filterung des Signals zur Erkennung von Primär- (*Tiefpass*) und Sekundärwellen (*Bandpass*)

Bei der Auswertung werden die vollständigen Zeitreihen der Wasserstände in eine Textdatei exportiert, und zwar: Zeit, ungefilterte, tiefpassgefilterte und bandpassgefilterte Daten. Eine weitere Textdatei enthält für die Seegangsanalyse die hochpassgefilterten Daten, d.h. die Wasserstände, die nur noch den kurzperiodischen Schwankungsanteil enthalten.

Festlegung der auszuwertenden Ereignisse

Aus der Tageszeitreihe der Wasserstandsmessungen werden automatisch mögliche Schiffswellenereignisse erkannt, welche für die weitere Auswertung in der Hauptstufe bestätigt werden müssen. Dies erfolgt entweder

- a) durch den automatischen Abgleich mit den Schiffspassagedaten, oder
- b) durch die graphische Darstellung und eine manuelle Bestätigung.

Als notwendiges Kriterium für ein Schiffswellenereignis hat sich für beide Verfahren als sinnvoll heraus gestellt, dass die Wasserstandsschwankung in den ungefilterten Rohdaten innerhalb eines Zeitintervalls von 2 min mind. 5 cm beträgt.

Beim automatischen Abgleich mit den Schiffspassagedaten erfolgt ein Vergleich zwischen der Eintrittszeit des Schiffswellenereignisses mit den registrierten Passagezeiten der Schiffe.

Die Auswertung der Schiffswellen erfolgt lokationsabhängig nur dann, wenn innerhalb einer Zeitspanne von 120 s um die Eintrittszeit mindestens eine Schiffspassage registriert worden ist. Für die Lokation *C Borkum* wurde die Zeitspanne auf Grundlage einer Sensitivitätsanalyse so angepasst, dass die Schiffspassage innerhalb von 120 s vor der Eintrittszeit registriert worden sein muss.

Liegen keine Schiffspassagedaten vor, so erfolgen die graphische Darstellung des Ereignisses und die Bestätigung der Auswertung durch den Betrachter / Bearbeiter.

2.2 Hauptstufe

Die in der Vorstufe erkannten und manuell bestätigten Ereignisse werden automatisch ausgewertet. Die Auswertung bezieht sich auf folgende Kenngrößen, die in Abbildung 2 näher beschrieben sind:

- Eintrittszeit des Ereignisses
- Absenk z_A (inkl. Bugstau s_B)
- Primärwellenhöhe H_P
- Sekundärwellenhöhe H_S
- Periode des Primärwellensystems T_{HP} (soweit möglich)
- Sunkzeit T_{SU} (Bugstau bis Absenk)
- Stiegzeit T_{ST} (Absenk bis Primärwelle)
- Periode der Sekundärwellen T_{HS} .

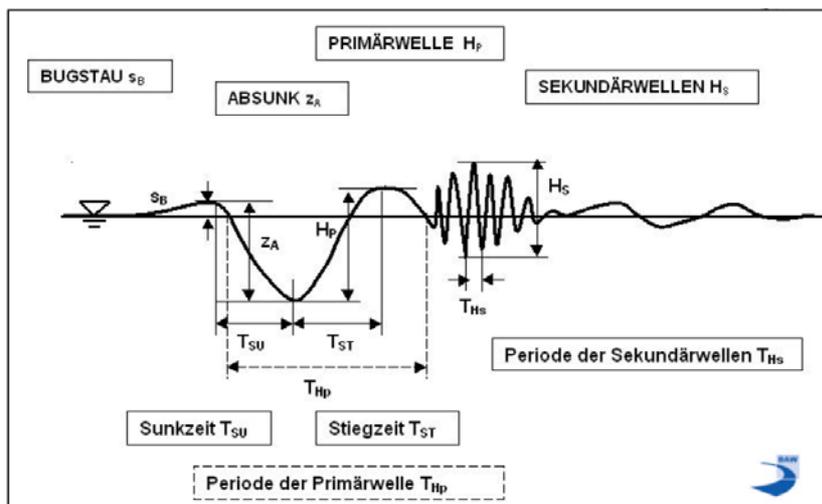


Abbildung 2 Kenngrößen der schiffserzeugten Wellen (schematisch)

Untersuchung der Primärwelle

Bei der Bestimmung der Kenngrößen für die **Primärwelle** wird unter Verwendung der tiefpassgefilterten Daten folgende Vorgehensweise angewandt:

1. Bestimmung des Primärwellentals aus minimalem Wasserstand in Primärwellendaten in einem 2-Minuten-Intervall um den zuvor ermittelten Minimalwert.
2. Als Eintrittszeitpunkt des Schiffereignisses wird der Eintrittszeitpunkt des maximalen Absunks (Primärwellental) definiert.
3. Bestimmung des Bugstaus aus absolutem Maximum des Wasserstands innerhalb von 1,5 min *vor* Auftreten des Primärwellentals.
4. Bestimmung des Absunks z_A und der Sunkzeit T_{SU} aus den zuvor ermittelten Wasserständen und ihren Eintrittszeiten.
5. Bestimmung des Primärwellenbergs aus absolutem Maximum des Wasserstands innerhalb der 1,5fachen Sunkzeit *nach* Auftreten des Primärwellentals.
6. Ermittlung der Primärwellenhöhe H_p und der Stiegzeit T_{ST} aus den zuvor ermittelten Wasserständen und ihren Eintrittszeiten.
7. Bestimmung der Periode der Primärwelle aus den Durchgangszeiten des Wasserstands durch das Nullniveau (*zero-down-crossing*) nach Eintreten des max. Bugstaus. Es kann nur dann bestimmt werden, wenn ein Vorzeichenwechsel in den lokalen Wellenextrema vorliegt.

Abbildung 3 zeigt die Auswertung der Messdaten in einem schematischen Beispiel.

Anmerkungen:

- Die Ermittlung von (potentiellem) max. Bugstau, Primärwellental und –berg erfolgt bei manueller Bestätigung vor der Abfrage der Auswertung (ja/nein), um die Richtigkeit des erkannten Schiffswellenereignisses zu prüfen.
- Die Auswertung wird für solche Schiffswellenereignisse abgebrochen, deren Absunk und Sekundärwellenhöhe folgende Eigenschaften gleichzeitig erfüllen:

Absunk $z_A < 0,05$ m und Sekundärwellenhöhe $H_S < 0,10$ m.

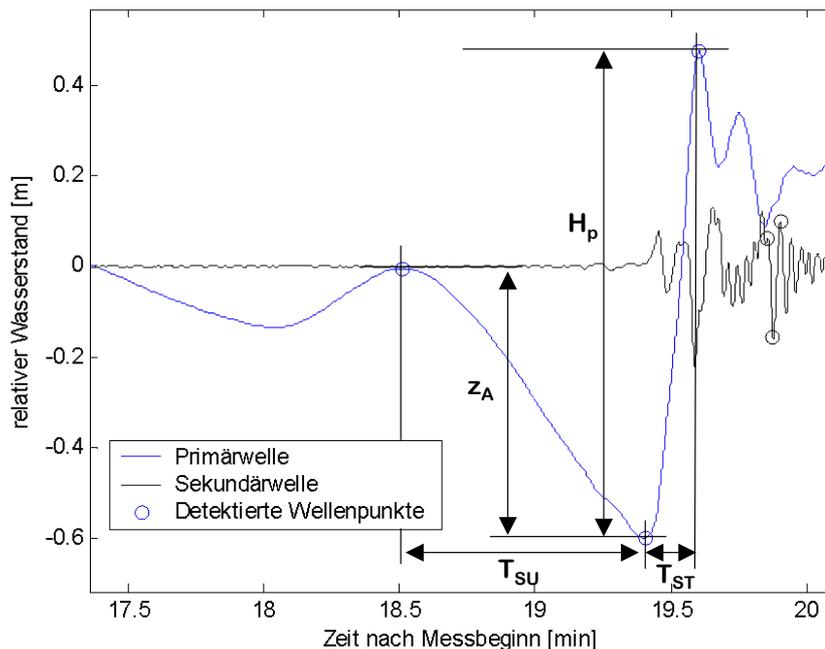


Abbildung 3 Beispiel für Auswertung der hochpassgefilterten Primärwelle in Naturdaten

Untersuchung der Sekundärwelle

Die Vorgehensweise bei der Bestimmung der Kenngrößen für die **Sekundärwelle** unter Verwendung der bandpassgefilterten Daten wurde optimiert und wie folgt ausgelegt:

1. Erkennung lokaler Extrema des Wasserstands im Zeitraum zwischen Auftreten des max. Absinks und einem Zeitpunkt danach. Dieser Zeitpunkt wird für alle Messquerschnitte – auch abhängig vom Vorliegen von Schiffspassagedaten – individuell angepasst und ist abhängig von der möglichen maximalen Laufzeit der Sekundärwellen zwischen Schiff und Messfahl.
2. Ermittlung der maximalen Wasserstandsdifferenz (= Sekundärwellenhöhe) und der Periode.

Ein Auswertebispiel für die Sekundärwellen ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

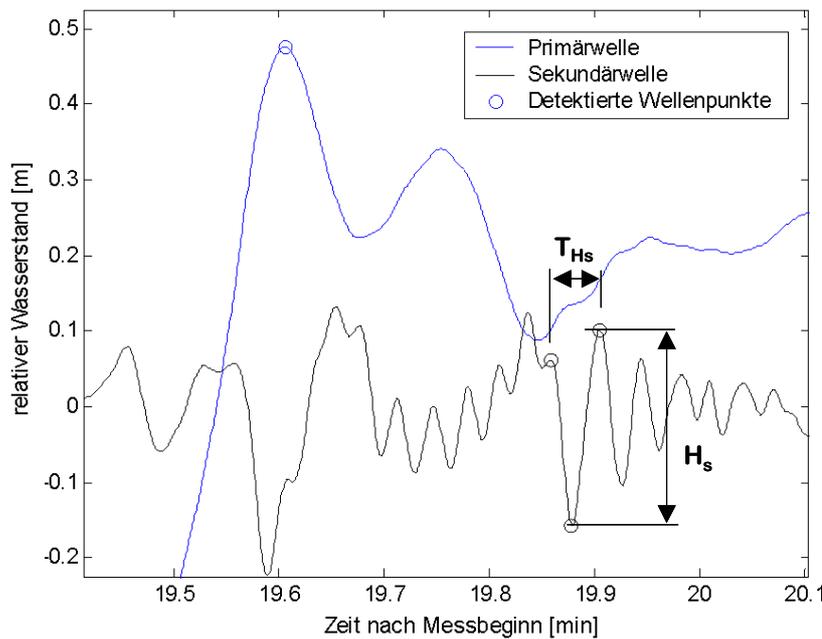
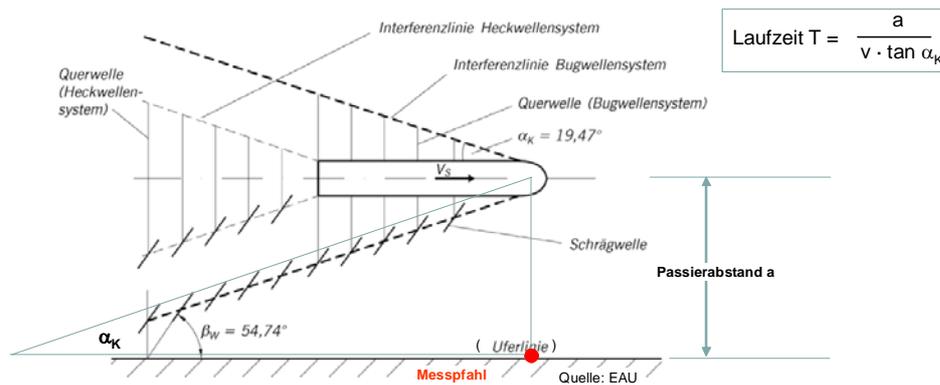


Abbildung 4 Beispiel für Auswertung der bandpassgefilterten Sekundärwelle in Naturdaten

Die Laufzeit wurde einheitlich gemäß Abbildung 5 über den bekannten Passierabstand a und die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit v abgeschätzt. Dabei wird gemäß EAU der Kelvin'sche Winkel von $\alpha_K = 19,47^\circ$ zur Berücksichtigung des am Messpfahl zeitlich verzögert auftretenden Bugwellensystems verwendet.



| Messstelle | A | B | C |
|------------------------|-------------|-------------|---------------|
| max. Passierabstand a: | 250 - 400 m | 400 - 600 m | 1000 - 1200 m |
| max. Laufzeit T: | 70 - 113 s | 113 - 170 s | 283 - 340 s |

mit Wellenausbreitungsgeschwindigkeit: $v = \sqrt{g \cdot h} = 10 \text{ m/s}$

Abbildung 5 Abschätzung der Laufzeiten der Sekundärwellen zwischen Schiff und Messpfahl

Gemäß den so ermittelten maximalen Laufzeiten wird für die Suche nach der maximalen Sekundärwellenhöhe in Lokation A eine Zeitspanne von 120 s, in B von 180 s und in C von 360 s jeweils nach Auftreten des max. Absunks angesetzt. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit wird hier auf der sicheren Seite liegend mit 10 m/s abgeschätzt.

In den Fällen, in denen die Schiffspassagedaten für einzelne Ereignisse konkret vorliegen, wird das Suchintervall für die Sekundärwelle noch weiter eingeschränkt. Die Laufzeit wird individuell mit dem aktuellen Passierabstand ermittelt und anschließend die maximale Sekundärwelle nun in dem 1-min-Intervall um den Endpunkt der konkret ermittelten Laufzeit bestimmt.

Diese zweite Vorgehensweise unterscheidet sich von der erstgenannten dadurch, dass kurzperiodische extreme Wasserstandsschwankungen, die kurz nach dem maximalen Absunk auftreten, nur dann als Sekundärwelle interpretiert werden, wenn der zeitliche Abstand zum Absunk in etwa der geschätzten Laufzeit (± 30 s) der Sekundärwelle bis zum Messpfahl entsprechen.

Anmerkung:

Die Überlagerung der Sekundärwellen mit dem Seegang führt insbesondere für die Lokation C *Borkum* dazu, dass nicht mehr eindeutig von einer Sekundärwellenanalyse gesprochen werden kann. Es handelt sich eher um eine Analyse der kurzperiodischen Schwankungsanteile. Die Trennung der beiden Phänomene ist nicht möglich, was bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

3 Auswertung der schiffserzeugten Strömung

Die in der Vorstufe erkannten und bestätigten Ereignisse werden auch hinsichtlich der schiffserzeugten Strömung ausgewertet.

Zunächst werden die Daten der Einzelkomponenten v_x und v_y gefiltert. Da die Strömungsgrößen direkt mit den Wellen in Zusammenhang stehen, erfolgt die Filterung analog zu Abschnitt 2.

Danach bestimmt das Programm aus den gefilterten und korrigierten Komponenten v_x und v_y Betrag v und Richtung θ der Geschwindigkeit. Diese Reihenfolge von Filterung und Komponentenauswertung verbessert die Qualität der Ergebnisse bei der Bestimmung der Richtung θ der Geschwindigkeit.

Folgende Kenngrößen der schiffserzeugten Strömung werden anschließend ausgewertet (siehe Abbildung 6):

- Grundströmung v_0 (z.B. Tidenströmung)
- Rückströmung v_R
- Primärwellenströmung v_{HP}

- Sekundärwellenströmung v_{HS} .

Sie sind in **Betrag und Richtung** zuzuordnen und auszuwerten. Jede Kenngröße ist daher als zweidimensional zu betrachten.

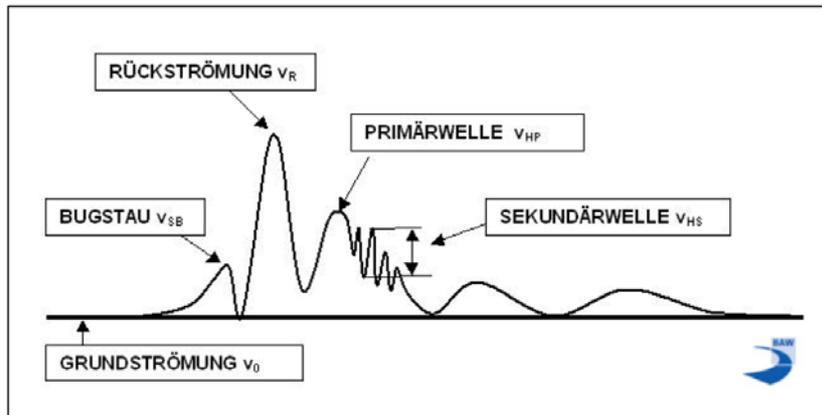


Abbildung 6: Kenngrößen der schiffserzeugten Strömung (schematisch)

Die Analyse der schiffswelleninduzierten Strömung stellt im Rahmen des Projektes einen Schwerpunkt dar, weil die Unterscheidung von Grund-, Rück- und Primärwellenströmung in den Messzeitreihen anspruchsvoll ist.

Die Auswertung der Grundströmung hat ergeben, dass für die Betrachtungsdauer eines Schiffswellenereignisses die Annahme einer stationären Grundströmung ungünstig ist (siehe auch Anhang). Nach Rücksprache mit der BAW wird daher eine linear zeitlich veränderliche Grundströmung v_0 angesetzt. Der lineare Verlauf wird durch Start- und Endwerte festgelegt.

Im optimierten Ansatz wird außerdem bei der schiffsinduzierten Strömung zwischen aufkommendem und abgehendem Schiff unterschieden. Dazu wird zunächst die Richtung der Rückströmung während des maximalen Absunks ermittelt und diese als Kennzeichen für die Fahrtrichtung des Schiffes im Fahrwasser verwendet.

In der Lokation A *Emder Fahrwasser* beträgt die Richtung der Rückströmung für ein Abgänger beispielsweise etwa 110° und für ein Aufkommer 290° . Die Richtung der Primärwellenströmung ist dieser Richtung annähernd entgegengesetzt. Mit diesem Kriterium der Strömungsrichtung lassen sich Rückströmung v_R und Primärwellenströmung v_{HP} genauer bestimmen. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die bei der Auswertung verwendeten Geschwindigkeitsrichtungen zur Festlegung von Aufkommern und Abgängern. Die Richtungen wurden in der Optimierungsphase der Auswertung ermittelt.

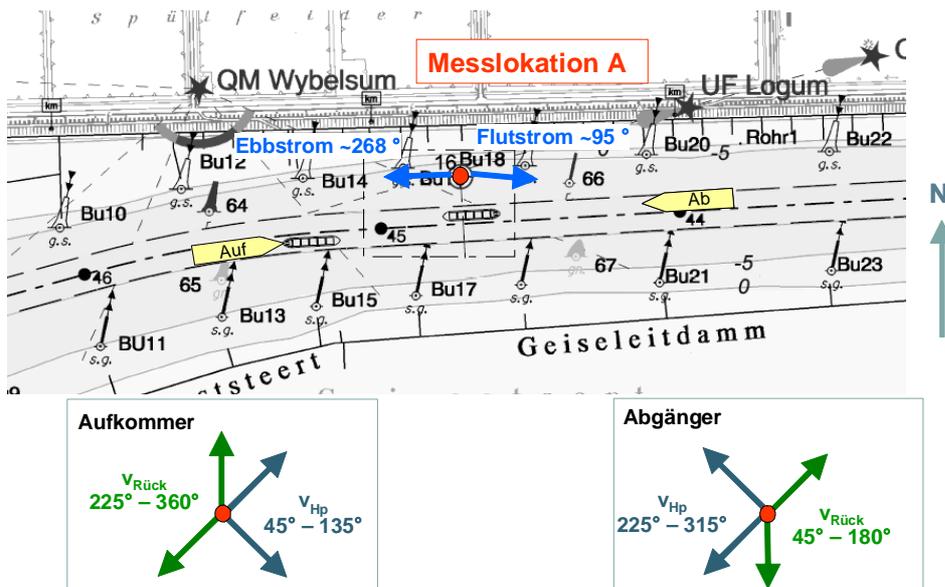


Abbildung 7: Ermittelte Richtungen der Grundströmung sowie der schiffsinduzierten Strömung in Lokation A Emden Fahrwasser

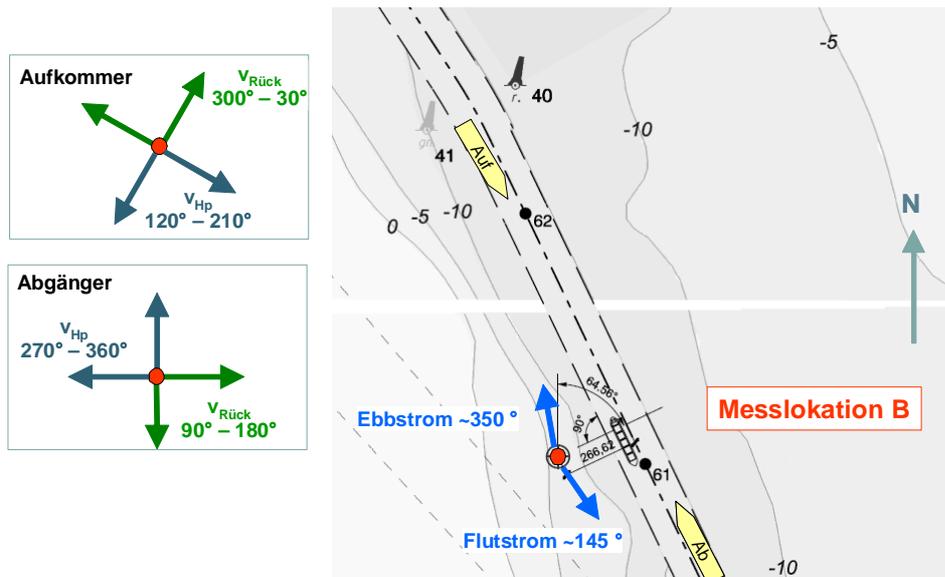


Abbildung 8: Ermittelte Richtungen der Grundströmung sowie der schiffsinduzierten Strömung in Lokation B Paapsand

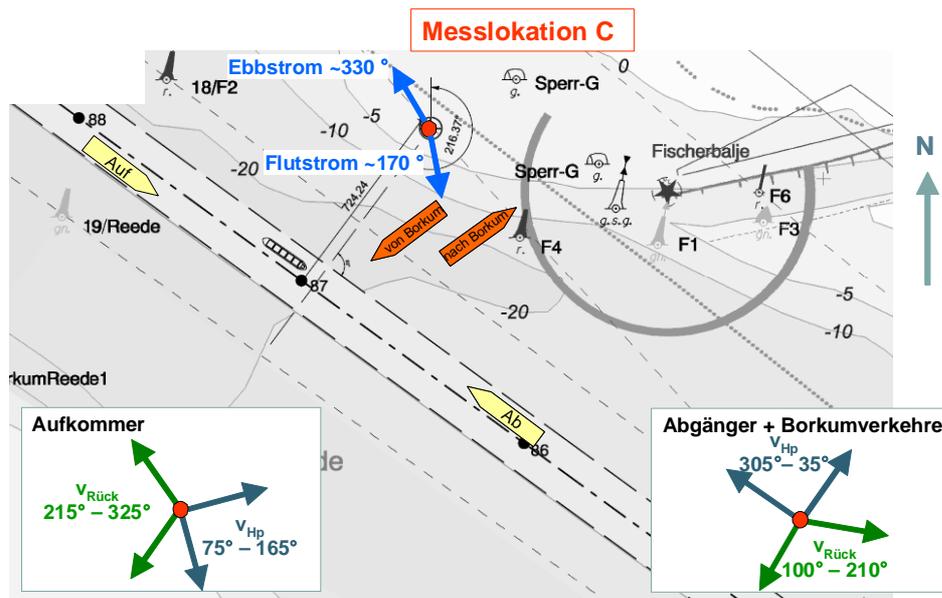


Abbildung 9: Ermittelte Richtungen der Grundströmung sowie der schiffsinduzierten Strömung in Lokation C Borkum

Die genaue Vorgehensweise bei der Ermittlung der Kenngrößen ist im Folgenden dargestellt:

1. Der Startwert der Grundströmung v_0 ergibt sich aus der mittleren Geschwindigkeit innerhalb von 1 min vor dem Bugstau. Der Endwert ergibt sich aus der mittleren Geschwindigkeit innerhalb von 1 min nach der Primärwelle. Der zeitlich veränderliche Vektor der Grundströmung wird für die weitere Analyse der schiffswelleninduzierten Strömung von der tiefpassgefilterten Geschwindigkeit abgezogen.
2. Als Rückströmung v_R wird die maximale Geschwindigkeit betrachtet, welche zwischen Bugstau und 1 min nach maximalem Absunk auftritt. Dieses Kriterium wird je nach Messlokation angepasst. Die Richtung wird zum Zeitpunkt der maximalen Geschwindigkeit bestimmt.
3. Als Primärwellenströmung v_{HP} dient die maximale Geschwindigkeit im Zeitraum zwischen dem Auftreten von max. Absunk und 1 min nach Auftreten der Primärwellenhöhe. Dieses Kriterium wird ebenfalls je nach Messlokation angepasst. Die Richtung wird zum Zeitpunkt der maximalen Geschwindigkeit bestimmt.
4. Aus den bandpassgefilterten Daten wird die Sekundärwellenströmung v_{HS} durch Erkennung lokaler Extrema der Geschwindigkeit im Zeitraum über 1 Minute nach der maximalen Rückströmung ermittelt. Der Zeitraum wird für alle Messquerschnitte individuell angepasst und optimiert. Der Betrag von v_{HS} ergibt sich aus der maximalen Geschwindigkeitsschwankung.

5. Die Richtung der Sekundärwellenströmung v_{HS} wird aus den bandpassgefilterten Daten (kurzperiodische Geschwindigkeiten) bestimmt und zwar zum Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Geschwindigkeitschwankung.

Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für die Auswertung. Neben Betrag und Richtung der Geschwindigkeiten sind oben die Wasserstände der Schiffswelle gezeigt.

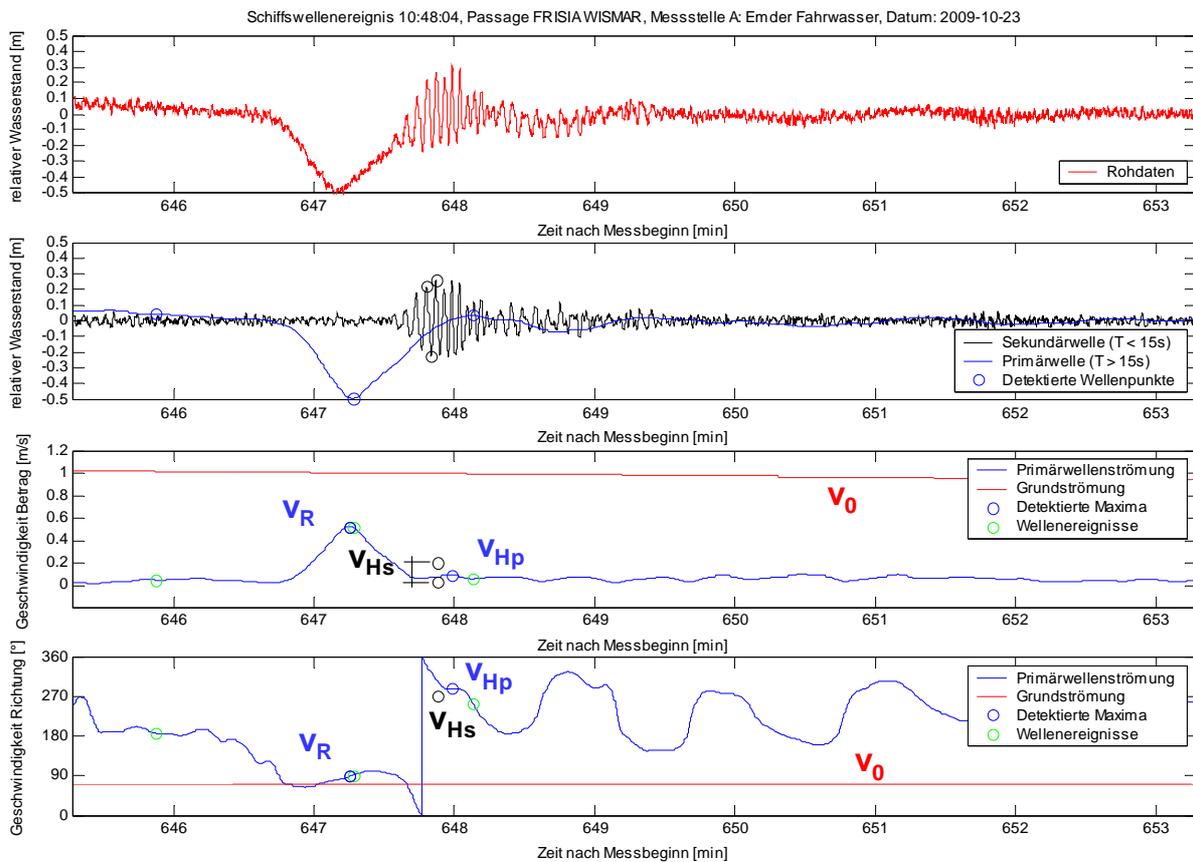


Abbildung 10: Auswertebispiel für die schiffserzeugte Strömung mit relativem Wasserstand sowie Betrag und Richtung der Geschwindigkeit

Im gezeigten Beispiel wird bei der Passage der FRISIA WISMAR am 23.10.09 eine Rückströmung von 0,5 m/s in der Richtung 88° erfasst. Die Schiffspassagedaten weisen für den Abgänger ein Heading von 266° aus. Die Primärwellenströmung erzeugt nur ein geringes lokales Maximum von etwa 0,1 m/s in der Richtung 287°. Während der Passage wurde eine leicht abnehmende Grundströmung von etwa 1 m/s in Richtung 70° (Flutstrom) registriert.

4 Erzeugte Ergebnisdateien

Folgende Ergebnisdateien werden bei der Auswertung der Schiffswellen erzeugt:

- Gefilterte Zeitreihen des Wasserstands für gesamten Tagesdatensatz (ASCII-Datensatz);
- Graphische Darstellung jedes Ereignisses mit Entwicklung von Wasserstand und Strömung (Betrag und Richtung) (Windows-Metafile und pdf-Datei);
- Auszug aus den ungefilterten Zeitreihen der Messdaten eines Messpunktes für jeden Ereigniszeitraum (ASCII -Datensatz);
- Zusammenstellung aller Kenngrößen der Schiffswellen, Strömung und Schiffspassagedaten für alle Ereignisses eines Tages (ASCII -Datensatz) getrennt für jeden Messpunkt zur Weiterverarbeitung.

Hamburg, 15. März 2010

IMS Ingenieurgesellschaft mbH

gez. Baur

gez. Peters

Anhänge

- IMS-Präsentation „Informationen zur Auswertung der Messdaten“ v. 01.12.2009
- IMS-Präsentation „Ergänzende Informationen zur Auswertung der Messdaten“ v. 16.12.2009