Die Strömungsverhältnisse zwischen Sylt und Amrum

Von JAN ROSS

Zusammenfassung

Im Rahmen eines KFKI-Forschungsprojekts fanden im Frühjahr und Herbst 1996 je zwei jeweils achtwöchige Meßkampagnen im Hörnum-Tief statt. Die Ergebnisse der Naturmessungen im Meßprofil zwischen den Inseln Sylt und Amrum werden vorgestellt. Es zeigt sich dabei, daß sich der Schnitt in einen durch Flut- und einen durch Ebbestrom dominierten Teil aufspaltet. Von der Hörnum-Odde bis zur Mitte des Hörnum Tiefs überwiegt der Ebbestrom sowohl hinsichtlich der Geschwindigkeit als auch der Dauer. Im restlichen Teil bis nach Amrum ist die Flutstromgeschwindigkeit höher, aber auch hier ist die Ebbestromdauer deutlich länger als die Flutstromdauer. Die Verteilung der Restströme unterstreicht dieses Muster. Während im Bereich der Hörnum-Odde ein sehr starker Restström unterstreicht dieses Muster. Während im Bereich tritt, erreicht er vom südlichen Teil des Hörnum-Tiefs bis zur Insel Amrum nur Werte bis 2 km/Tide bei unterschiedlichen Richtungen. Mit dieser Strömungsverteilung ist ein kräftiger Wasserversatz aus dem Hörnumer Tidebecken in die Nordsee verbunden. Die Bilanzierungen der Wassermengen für verschiedene Zeiträume ergeben Nettotransporte von bis zu 114 Millionen m³ pro Tide.

Summary

Within the scope of a KFKI research project two measuring campaigns in the Hörnum Deep of 8 weeks duration each took place in spring and also in autumn of 1996. The results of the field investigations carried out in a profile between the islands of Sylt and Amrum are presented. It turns out that the profile is split into a flood- and into an ebb current dominated part. From the Hörnum Odde to the middle of the Hörnum Deep, the ebb current is predominant with regard to velocity as well as duration. In the remaining part up to Amrum, the flood current velocity is higher but the ebb current duration is also significantly longer than the flood current duration. The distribution of the residual currents emphasizes this pattern. While a very strong residual current appears in the region of the Hörnum Odde with more then 13 km/tide in the direction of the North Sea, it only shows values up to 2 km/tide with different directions in the southern part of the Hörnum Deep to the island Amrum. A strong water transport from the Hörnum tidal basin into the North Sea is connected with this current distribution. The balances of these water quantities for different periods result in flows up to 114 millions m³/tide.

Inhalt

1.	Einleitung 111	8
2.	Die Tiefenverteilung zwischen Sylt und Amrum 111	8
3.	Das Meßprogramm 111	8
4.	Ergebnisse der Strömungsmessungen 12	2
	4.1 Strömungsverteilung 12	2
	4.2 Strömungsstatistik 12	5
	4.3 Restströme 130	0
	4.4 Transporte	5
5.	Danksagung 130	8
6.	Schriftenverzeichnis	9

1. Einleitung

In einer Zusammenarbeit zwischen dem Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum (ALW), dem Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie in Hamburg (BSH) und dem Forschungs- und Technologiezentrum Westküste in Büsum (FTZ) entstand die Initiative für das Forschungsvorhaben "Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnum-Tief". Das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) übernahm auf Antrag des ALW vom 15. 6. 95 die finanzielle Förderung des Projektes für den Zeitraum vom 1. August 1995 bis zum 31. März 1998.

In dem Projekt geht es darum, längerfristige Zeitreihen hydrologischer Parameter wie Strömung, Seegang und Schwebstoffgehalt zu erstellen. In einem zweiten Schritt erfolgt die Verknüpfung der hydrologischen Daten mit den meteorologischen Randbedingungen während der Meßkampagnen. Das Ziel innerhalb des Projektes ist es, anhand dieser Meßergebnisse die unterschiedlichen Füll- und Entleerungsvorgänge des Tidebeckens Hörnum-Tief mit den angrenzenden Meeresgebieten in Abhängigkeit von Tidegeschehen und Wetter zu untersuchen. Weiterhin sollen die Daten einerseits dazu dienen, Austauschraten und Austauschbilanzen für das Hörnumer Tidebecken zu berechnen und andererseits als Grundlage für die Validierung lokaler Modelle bereitgestellt werden.

Ausgehend von der Fragestellung des Projektes, die Füll- und Entleerungsvorgänge des Hörnumer Tidebeckens zu untersuchen, wurde eine jeweils achtwöchige Meßkampagne im Frühjahr und Herbst 1996 vom ALW und BSH entlang dreier Querschnitte im Hörnumer Tidebecken durchgeführt. Aufgrund der Fülle von Daten und Informationen wird in diesem Bericht nur auf die Strömungen, Restströme und Transporte in dem Meßprofil 1 zwischen den Inseln Sylt und Amrum eingegangen.

2. Die Tiefenverteilung zwischen Sylt und Amrum

Das Meßprofil zwischen den Inseln Sylt und Amrum zeichnet sich durch seine relativ klare Gliederung aus. In der Abb. 1 ist die Tiefenverteilung in Meter, bezogen auf NN, sowie die Sollpositionen und Kennung der Meßgeräte für diesen Bereich dargestellt. Von der Hörnum-Odde aus folgt in südlicher Richtung das Hörnum Tief. Dabei ist in diesem Teil des Meßprofils ein sehr starker Tiefengradient vorhanden; Innerhalb von nur ca. 600 m nimmt die Wassertiefe vom Strandbereich der Hörnum-Odde bis auf maximal 27 m unter NN zu. Weiter in Richtung Amrum steigt der Boden zunächst stark an, wobei die südliche Flanke der Rinne aber einen geringeren Gradienten der Tiefe aufweist als die nördliche Flanke. Im weiteren Verlauf, ungefähr ab der Position 1.7, verringert sich die Wassertiefe bis zur Amrum-Odde nur noch langsam. Im Bereich der Meßlokation 1.10 wird die Tiefe dann so gering, daß der dortige Strömungsmesser im Wechsel der Gezeiten trockenfällt.

3. Das Meßprogramm

Um die Strömungsverhältnisse in dem Schnitt zwischen Sylt und Amrum nicht nur zeitlich sondern auch räumlich so genau wie möglich zu erfassen, wurde von den drei beteiligten Institutionen ein möglichst dichtes Meßnetz mit bis zu 15 Strommesser auf 10 bzw. 11 Positionen vorgesehen. Eine Übersicht der Kennung und Koordinaten der Meßpositionen und der Verteilung der Meßgeräte während der beiden Meßkampagnen gibt die Tab. 1.



Abb. 1: Tiefenverteilung [m NN] und Lageplan der Meßpositionen mit Stationskennung zwischen Sylt und Amrum

Der Zeittakt für die Aufzeichnung der Geschwindigkeit betrug bei allen Geräten einheitlich fünf Minuten. Dabei waren die Geräte so programmiert, daß die aufgezeichneten Daten fünfminütige Mittelwerte repräsentieren. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit und der Strömungsrichtung kamen vier Typen von Strömungsmeßgeräten unterschiedlicher Bauart zum Einsatz:

- Mechanische Strömungsmeßgeräte von Aanderaa Instruments (RCM7). Sie messen die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe von angeströmten Rotoren. Die Instrumente sind in den Geräteträgern frei drehend aufgehängt und registrieren mit dem im Gehäuse befindlichen Kompaß die Strömungsrichtung. Aufgrund des Meßprinzips wird mit diesen Geräten die Geschwindigkeit nur an einem Punkt in der Wassersäule gemessen.
- Akustische Meßgeräte von RD-Instruments, sogenannte ADCP's (Acoustic Doppler Current Profiler). Die Geräte werden in ein flaches Bodengestell montiert und messen von dort

nahezu in der gesamten Wassersäule die Komponenten der Geschwindigkeit mit Ultraschall. Mit Hilfe der Geschwindigkeitskomponenten ist es dann möglich, die Strömungsgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung zu berechnen.

- Strömungsmesser mit magnetisch-induktiven Strömungssensoren (Nessy) der Firma 4H Jena Engineering. Diese Geräte werden an vorher eingespülten Pfählen montiert und messen die Strömung in nur einem Tiefenhorizont.
- Induktive Orbitalströmungsmesser (Pacer). Sie registrieren zusätzlich zur Strömungsgeschwindigkeit die Orbitalgeschwindigkeit des Seegangs. Allerdings sind aufgrund von Softwarefehlern erhebliche Datenausfälle aufgetreten, so daß von diesen Geräten keine Strömungsdaten vorliegen. Daher wird auf diese Positionen und Geräte im weiteren Verlauf des Berichts nicht mehr eingegangen.

Pos. Nr. Rechtswert Hochwert			Bemerkungen					
		Fr	ühjahrskampagne					
1.1	3454508.7	6068091.7	1 Aanderaa (RCM7) auf eingespültem Rohr					
1.2	3454686.7	6067997.2	1 RCM7 im Korb					
1.3	3454809.1	6067717.6	1 RCM7 5 m über Grund, 1 RCM7 1 m unter Oberfläche,					
			1 RCM7 mit Trübungssonde im Korb					
1.4	3455005.0	6067622.9	ADCP					
1.5	3455217.3	6067373.4	2 RCM7, 5 m und 10 m über Grund, 1 RCM7 im Korb					
1.6	3455538.2	6067246.6	1 RCM7 mit Trübs. im Korb und 1 Orbitalstrommesser					
1.7	3456068.4	6066561.0	1 RCM7 im Korb					
1.8	3456493.5	6066093.1	1 RCM7 im Korb					
1.9	3457022.2	6065222.1	1 RCM7 im Korb					
1.10	3457550.9	6064320.4	1 RCM7 auf Wattgestell					
		H	I e r b s t k a m p a g n e					
1.0	3454494.9	6068088.9	1 Nessy auf eingespültem Pfahl					
1.1	3454508.7	6068091.7	1 Nessy auf eingespültem Pfahl					
1.2	3454686.7	6067997.2	1 RCM7 im Korb					
1.3	3454809.1	6067717.6	1 ADCP					
1.4	3455005.0	6067622.9	1 ADCP					
1.5	3455217.3	6067373.4	1 ADCP					
1.6	3455538.2	6067246.6	1 ADCP					
1.7	3456068.4	6066561.0	1 Orbitalstrommesser (Pacer)					
1.8	3456493.5	6066093.1	1 RCM7 im Korb					
1.9	3457022.2	6065222.1	1 RCM7 mit Trübungssonde im Korb					
1.10	3457550.9	6064320.4	1 RCM7 auf Wattgestell					

Tab. 1: Kennung, Positionen und Verteilung der Meßgeräte während der Frühjahrs- und Herbstkampagne

Während der Frühjahrskampagne wurden insgesamt 13 RCM7 und ein Breitband-ADCP zwischen Sylt und Amrum ausgebracht. Wie die Abb. 2 schematisch darstellt, kamen für die Auslegungen der Meßgeräte unterschiedliche Methoden zur Anwendung. Bei tieferen Meßpunkten erfolgte die Ausbringung der RCM7 in speziell für diesen Zweck gefertigten Körben (Bild I), die auf dem Grund abgestellt und mit einem Ankerstein gesichert werden. Die Entfernung der Rotoren zum Boden beträgt in den Körben ca. 1 m. In sehr flachen (Wassertiefe < ca. 2.0 m) oder trockenfallenden Gebieten wurden spezielle Wattgestelle für die RCM7 auf dem Boden verankert. Um in diesen Gebieten auch noch bei sehr geringen Wasserständen (bis ca. 0.3 m) Daten zu erhalten, wurden die RCM7 mit dem Rotor nach unten aufgehängt (Bild II). An flachen Meßlokationen mit besonders hohen Strömungsgeschwindigkeiten, wie z. B. an der Hörnum-Odde, war es nicht möglich, Wattgestelle aufzustellen. An diesen Positionen wurden statt dessen Pfähle oder Rohre eingespült und die Meßgeräte darauf montiert. Für das Aufstellen der ADCP am Boden standen vom BSH gebaute Gestelle zur Verfügung (Bild III). Bei den Stationen im Hörnum Tief waren zum Teil mehrere RCM7 in verschiedenen Ebenen der Wassersäule übereinander angebracht. Die Befestigung der Geräte am Boden erfolgte durch einen Ankerstein. Über Taue verbunden wurden die Geräte von einem Auftriebskörper in der Schwebe gehalten (Bild IV).





Abb. 2: Schematische Darstellung der verschiedenen Verankerungstechniken

IV.

Die Küste, 60 (1998), 117-139 122

In der zweiten Hälfte der Frühjahrsmeßkampagne traten starke Beeinträchtigungen bei der Registrierung der Daten durch Treibsel, Seegras und Bewuchs bei den mechanischen Aanderaa Geräten auf. Die meisten Datenausfälle waren dabei an den beiden Meßlokationen nahe der Hörnum-Odde (1.1 und 1.2) zu verzeichnen. Die ohne Rotoren arbeitenden ADCP hingegen wurden nicht durch äußere Einflüsse beeinträchtigt.

Da sich die Positionierung der Meßgeräte in der ersten Kampagne bewährt hatte, wurden die Meßpositionen während der zweiten Kampagne beibehalten und nur im Bereich der Hörnum-Odde aufgrund der komplexen Strömungsverhältnisse und der hohen Beanspruchung der Geräte um die Position 1.0 erweitert. Um die Datenausfälle durch Treibgut und Bewuchs zu verringern, wurden bei den Stationen 1.1, 1.3, 1.5 und 1.6 die mechanischen Aanderaa Strömungsmesser durch induktiv (Nessy) oder akustisch (ADCP) messende Geräte ausgewechselt.

Aufgrund zweier Stürme sind in der Herbstkampagne einige Geräteverluste aufgetreten. Durch den starken Seegang hatten sich die Markierungsbojen bei den Positionen 1.3, 1.4, 1.5 und 1.9 losgerissen. Weiterhin waren die Geräteträger der Positionen 1.0 und 1.1 wegen starker Sandumlagerungen an der Hörnum-Odde weggespült worden. Aus diesem Gründen waren an diesen sechs Positionen die Strömungsmeßgeräte nicht auffindbar und konnten bis Ende 1996 nicht geborgen werden.

Durch den Verlust der gesamten Meßgeräte und wegen der schon oben erwähnten Beeinträchtigungen der Geräte durch Treibsel, Pflanzenteile oder Bewuchs, sind zum Teil erhebliche Lücken in den Zeitreihen beider Kampagnen entstanden. Daher stehen für eine "flächendeckende" Auswertung der einzelnen Meßprofile nur wenige genügend große Zeitfenster zur Verfügung. Außerdem hatte sich während der Bearbeitung der Daten gezeigt, daß eine Analyse der Strömungsverhältnisse zwischen Sylt und Amrum ohne Informationen über die Strömungen im Bereich der Hörnum-Odde (Pos. 1.0 bis 1.3) nicht möglich ist. Da aber bei der Herbstkampagne die Meßgeräte von drei dieser vier Positionen verschollen sind, beschränken sich die Beschreibung der Strömungsverhältnisse und die Bilanzierung der Wassertransporte in erster Linie auf die Frühjahrskampagne.

4. Ergebnisse der Strömungsmessungen

4.1 Strömungsverteilung

Um einen Einblick in die Strömungsverhältnisse zwischen Sylt und Amrum zu bekommen, sind in Abb. 3 die Strömungsrichtung [Grad] (unteres Bild) und die Strömungsgeschwindigkeit [m/s] (oberes Bild) für 4 Tiden in Isoliniendarstellung aufgetragen. Der Grad der Farbabstufungen dient dabei als Maß für die Richtung bzw. die Geschwindigkeit. In der Abb. gibt die x-Achse den Zeitverlauf [Stunden] und die y-Achse die Entfernung [m] der Positionen untereinander an. Weiterhin sind am rechten Bildrand die Nummer und die Lage der in das Bild eingehenden Positionen angegeben. Die in die Abb. für die horizontalen Geschwindigkeits- und Richtungsverteilungen eingeflossenen Daten stammen ausschließlich aus Messungen mit Aanderaa-Geräten, d. h. aus Punktmessungen innerhalb Wassersäule, die teilweise unterschiedliche Abstände vom Boden aufweisen (vergl. Tab. 1 bzw. den Text zur Abb. 2).

Betrachtet man die Richtung der Strömung, so zeigt sich, daß zwei Strömungsrichtungen vorherrschen: Dies ist zum einen der Ebbestrom, erkennbar an den dunklen Farbschattierungen, und zum anderen der, mit den hellen Farbschattierungen gekennzeichnete Flutstrom. Die Verteilung der Richtung ist über das gesamte Profil konstant. Deutlich ist auch zu sehen, daß der Ebbestrom einige Zeit länger andauert als der Flutstrom. Die Ebbestromdauer ist aber nicht im gesamten Profil überall gleich lang. Von Position 1.5 an nimmt sie in Richtung auf Position 1.3 zu. Sie ist dort ca. eine Stunde länger als im restlichen Profil. Besonders kurz ist die Ebbestromdauer an der Position 1.10. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die im Flachwasser gelegene Meßlokation mit abnehmendem Wasserstand trockenfällt.

Ein sehr viel komplexeres Schema zeigt die Geschwindigkeitsverteilung im oberen Bild der Abb. 3. Obwohl die Maximalwerte von Ebbe- und Flutstrom mit ca. 1.1 m/s nahezu identisch sind, zeigen sie in der räumlichen Verteilung sehr unterschiedliche Muster. Beim Ebbestrom sind die höchsten Geschwindigkeiten bei der Position 1.3, also nahe der Hörnum-Odde, zu erkennen. Zur Position 1.10 hin nimmt die Geschwindigkeit stetig ab und beträgt an der Amrum-Odde nur noch 0.2 bis 0.3 m/s. Der Flutstrom hingegen hat sein Maximum in der Geschwindigkeit bei der Position 1.5. Diese Position befindet sich an der südlichen Flanke des Hörnum-Tiefs. Von dort aus nimmt die Geschwindigkeit sowohl zur Amrum-Odde als auch zur Hörnum-Odde hin ab. Die Abnahme zur Amrum-Odde geschieht relativ langsam, und die Flutstromgeschwindigkeit beträgt dort, ähnlich wie die Ebbestromgeschwindigkeit, nur noch 0.2 bis 0.3 m/s. Von der Position 1.5 in Richtung Position 1.3 nimmt die Geschwindigkeit auf einer Distanz von rund 450 Metern sehr schnell ab und beträgt in der Nähe der Hörnum-Odde noch ca. 0.1 bis 0.2 m/s. Allgemein läßt sich daher feststellen, daß im Bereich Hörnum-Odde bis zur Mitte des Hörnum-Tiefs der Ebbestrom dominiert. Im restlichen Teil zwischen Sylt und Amrum, mit Ausnahme der Flachwasserbereiche an der Amrum-Odde, überwiegen die Flutstromgeschwindigkeiten.

Neben dem Strömungsgeschehen in der Horizontalen sind auch die Strömungsmuster in der Vertikalen von Interesse. Die in der Abb. 4 gezeigten Daten stammen aus einer ADCP-Zeitserie im Frühjahr 1996 von der Position 1.4. Die Wassertiefe an dieser Stelle beträgt, bezogen auf NN, ca. 26 Meter. Der ADCP war so eingestellt, daß die vertikale Auflösung 1 m betrug. Insgesamt standen damit 23 Tiefenhorizonte mit Strömungsdaten zur Verfügung. In der Darstellung gibt die x-Achse wieder die Zeit [Stunden] und die y-Achse die Wassertiefe [m] bezogen auf NN an. In unterschiedlichen Farbabstufungen ist im unteren Bild die Strömungsrichtung [Grad] und im oberen Bild die Strömungsgeschwindigkeit [m/s] geplottet.

Bei der Strömungsrichtung ist, genau wie in Abb. 3, sehr deutlich der Wechsel zwischen dem Ebbe- (dunkler Farbton) und Flutstrom (heller Farbton) zu erkennen. Die Dauer des Ebbestroms ist dabei wiederum größer als die des Flutstroms. Große Richtungsabweichungen innerhalb der Wassersäule sind nicht erkennbar. Allerdings sind an der Wasseroberfläche beim Flutstrom kleine auf Windeinflüsse zurückzuführende Richtungsänderungen zu sehen. Auch in der Nähe des Bodens sind sowohl beim Flut- als auch beim Ebbestrom geringe Richtungsschwankungen vorhanden. Sie sind wohl in erster Linie auf die Wirkung der Bodenreibung zurückzuführen, da sie hauptsächlich in den Tiefenhorizonten auftreten, in denen sich das Bodenprofil der Strömung auszubilden beginnt.

Die vertikale Strömungsverteilung weist einige Unterschiede zwischen Ebbe- und Flutstrom auf. Der Ebbestrom beginnt nach dem Kenterpunkt des Flutstroms mit sehr geringen Geschwindigkeiten und nimmt im Verlauf der Tide langsam zu. Die maximalen Geschwindigkeiten von ca. 1.2 m/s werden dann nach ungefähr 1.0 bis 1.5 Stunden erreicht und bleiben über 1 und 3 Stunden bestehen. Gegen Ende der Ebbe geht die Geschwindigkeit wieder fast auf Null zurück. Diese Verteilung findet sich so gut wie in der gesamten Wassersäule. Erst in größeren Wassertiefen von ca. 17 bis 19 m setzt allmählich eine Verringerung der Geschwindigkeit aufgrund der Bodenreibung ein. Dabei sind selbst in 22 m Wassertiefe, d. h. ca. 4 m über Grund, noch Geschwindigkeiten von 0.8 bis 1.0 m/s zu finden.





Abb. 4: Vertikale Strömungsverteilung zwischen Sylt und Amrum an der Position 1.4

Der Flutstrom hingegen setzt nach dem Kenterpunkt des Ebbestroms sehr schnell ein und erreicht die maximalen Geschwindigkeiten von 1.2 m/s schon innerhalb der ersten Stunde. Dabei reichen die hohen Geschwindigkeiten aber nur bis in Tiefen zwischen 10 und 15 m. Darunter ist die Strömung etwas schwächer und bis ungefähr 20 m konstant. Die großen Geschwindigkeiten in den oberen Schichten sind aber nur von relativ kurzer Dauer. Nach ca. einer Stunde geht die Geschwindigkeit in den oberen 5 bis 10 m auf Werte zwischen 0.4 bis 0.8 m/s zurück, so daß die höchsten Flutstromgeschwindigkeiten während des größten Teils der Tide in Tiefen zwischen 10 und 20 m auftreten. Gegen Ende des Flutstroms gleichen sich die Geschwindigkeiten innerhalb der Wassersäule wieder an und gehen bis zum Kenterpunkt fast auf Null zurück.

4.2 Strömungsstatistik

Eine umfassende statistische Auswertung der Strömungsdaten für das ganze Profil konnte wegen der großen Lücken in den Zeitreihen der Herbstkampagne, nur für die Frühjahrskampagne durchgeführt werden. Für die Dauer der Herbstkampagne wurden daher nur die vorhandenen ADCP-Zeitreihen analysiert.

Eine statistische Auswertung der Daten bezüglich Flut- und Ebbestrom war allerdings nicht für alle Stationen möglich. Das folgende Beispiel soll die Gründe dafür aufzeigen.

Die Abb. 5 zeigt die Strömungsverhältnisse für 10 Tiden an der Position 1.2 während der Herbstkampagne. Die Wassertiefe an dieser Position beträgt 2.5 m unter NN. Das herausragende Merkmal in der Zeitreihe ist eine Strömung mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 0.9 m/s nach Südwesten (250°). Aufgrund der Lage des Profils läßt sich diese eindeutig als Ebbeströmung identifizieren, da das Wasser bei fallendem Wasserstand aus dem Hörnumer Tidebecken hinausfließt. Jeweils nach diesem Ereignis folgt bei der Geschwindigkeit ein kleiner Peak mit bis zu 0.6 m/s nach Nordosten (70°). Aus der Richtung läßt sich erkennen, daß dies der Flutstrom ist. Allerdings ist dieser mit einer Dauer von nur einer Stunde sehr kurz. Nach dem Flutstrom geht die Geschwindigkeit für ungefähr drei Stunden fast auf Null zurück und die Richtung ist aufgrund der geringen Geschwindigkeit stark schwankend. Für diesen Zeitraum ist eine Einteilung der Strömung in Flut- oder Ebbestrom nicht mehr möglich und auch der Beginn des nächsten Ebbestroms läßt sich nicht eindeutig ermitteln.



Abb. 5: Strömungsgeschwindigkeit [m/s] (Plot A) und -richtung [°] (Plot B) an der Nähe der Hörnum-Odde (Pos. 1.2) während der Herbstkampagne

Die Küste, 60 (1998), 117-139 126

Die Tab. 2 und 3 zeigen die berechneten statistischen Parameter für die maximalen Ebbeund Flutstromgeschwindigkeiten sowie die maximale Dauer des Flut- bzw. Ebbestromes während der beiden Meßzeiträume. Die Abkürzungen in den Tabellen richten sich soweit wie möglich nach DIN und haben folgende Bedeutung: v_e steht für eine Ebbeströmung, v_f für den Flutstrom und *Dir* für die Richtung der Strömung. Der Fußzeiger *max* gibt den Maximalwert einer Größe an, *min* den Minimalwert und *M* den Mittelwert. Die Standardabweichung wird mit σ bezeichnet und der Medianwert mit *med*.

_				Frühj	ahr				Herbst	
	Position Wassertiefe [m] Beginn Ende	1.1 1.5 19.03 22.03	1.3 11 20.03 15.04	1.4 26 2.04 20.05	1.5 21 19.03 06.05	1.8 3.5 19.03 10.04	1.9 2.5 18.03 02.05	1.4 26 10.10 07.12	1.5 21 10.10 07.12	1.6 17 10.10 07.12
Ebbestrom	$\begin{array}{l} \mbox{Anzahl Werte} \\ \mbox{V}_{emax} \ [m/s] \\ \mbox{V}_{emin} \ [m/s] \\ \mbox{V}_{eM} \ \ [m/s] \\ \mbox{\sigma} \ \ [m/s] \\ \mbox{V}_{emed} \ \ [m/s] \\ \mbox{Dir}_{mit} \ \ [^o] \\ \mbox{\sigma} \ \ \ [^o] \\ \mbox{Dir}_{med} \ \ [^o] \end{array}$	6 1.24 1.00 1.15 0.08 1.17 268.6 1.6 268.4	50 1.25 0.87 1.09 0.11 1.12 207.9 1.8 208.0	92 0.95 0.66 0.84 0.07 0.85 209.5 1.2 209.3	89 1.00 0.69 0.86 0.07 0.87 211.2 2.0 211.5	27 0.56 0.44 0.51 0.03 0.50 208.7 2.2 208.4	86 0.47 0.18 0.40 0.05 0.41 216.4 1.7 216.2	113 1.29 0.72 1.00 0.10 1.01 210.7 1.3 210.4	113 1.25 0.74 1.03 0.11 1.04 219.3 1.8 219.0	113 1.38 0.70 1.13 0.13 1.14 211.7 1.6 211.5
Flutstrom	$\begin{array}{c c} Anzahl Werte \\ v_{fmax} [m/s] \\ v_{fmin} [m/s] \\ \sigma [m/s] \\ \sigma [m/s] \\ v_{fmed} [m/s] \\ \hline Dir_{mit} [^o] \\ \sigma [^o] \\ Dir_{med} [^o] \end{array}$	5 0.79 0.63 0.69 0.06 0.68 131.0 2.2 131.4	51 0.51 0.28 0.42 0.05 0.43 21.7 5.4 21.0	92 1.00 0.68 0.84 0.07 0.83 30.6 2.8 30.7	89 1.41 0.97 1.22 0.09 1.23 31.3 4.1 31.9	26 0.82 0.56 0.70 0.06 0.68 26.7 1.0 26.6	86 0.63 0.31 0.49 0.07 0.50 36.2 2.0 36.1	112 1.20 0.64 0.96 0.10 0.97 33.0 3.0 32.9	112 1.57 0.79 1.31 0.14 1.34 39.0 2.8 38.8	112 1.77 0.77 1.43 0.17 1.47 33.3 1.6 33.3

Tab. 2: Statistik der Flut- und Ebbestromverteilungen

Betrachtet man die Medianwerte der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten in der Tab. 2, so fällt auf, daß die Geschwindigkeiten von der Position 1. 1 zu der Position 1.9, also von Sylt nach Amrum stetig abnehmen. Die größten Ebbestromgeschwindigkeiten treten demnach an der Hörnum-Odde und die kleinsten an der Amrum-Odde auf. Die Flutstromgeschwindigkeiten hingegen zeigen ein etwas komplizierteres Muster. Sie haben ihr Maximum an der Position 1.5 und nehmen nach Süden stetig ab. Nach Norden hingegen werden sie bis zur Position 1.3 geringer und nehmen zur Position 1.1¹ wieder ein wenig zu. Dabei treten große Unterschiede in den maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten auf

¹ Die Position 1.1 nimmt allerdings eine Sonderstellung in dem Profil ein, da sie nicht direkt zwischen Sylt und Amrum liegt, sondern westlich von der Hörnum Odde (vergl. Abb. 1). Die besondere Lage der Station wird z. B. deutlich, wenn man die Richtungen der Strömungen in der Tab. 2 betrachtet.

sehr engem Raum auf. Der Abstand zwischen der Position 1.3 und 1.5 beträgt nur ca. 450 Meter, so daß auf dieser kurzen Distanz große Stromscherungen vorkommen. Insgesamt gesehen sind die Flutstromgeschwindigkeiten von der Position 1.4 in Richtung Amrum deutlich höher als die Ebbestromgeschwindigkeiten, während sie nördlich davon sehr viel geringer sind. Zur Verdeutlichung ist die Verteilung der Medianwerte der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten für das Meßprofil 1 während der Frühjahrskampagne in Abb. 6 dargestellt.



Abb. 6: Medianwerte der maximalen Flut- (gestrichelt) und Ebbestromgeschwindigkeiten (durchgezogen) [m/s] zwischen Sylt und Amrum während der Frühjahrskampagne

Ein Vergleich der Statistik aus der Frühjahrs- und Herbstkampagne zeigt, daß im Herbst die Medianwerte der Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten zum Teil deutlich über denen im Frühjahr liegen. Dies ist in den unterschiedlichen Wetterbedingungen begründet, die während der Messungen vorlagen. Im Frühjahr waren die Winde meist nur schwach mit Windgeschwindigkeiten bis maximal 13 m/s und kamen verhältnismäßig oft aus östlichen Richtungen. Mit den östlichen Winden ist ein negativer Windstau verbunden (Franzius Institut, 1992), d. h., die Flut läuft nicht so hoch auf. Im Herbst hingegen traten zumeist Winde aus westlichen Richtungen auf. Die Windgeschwindigkeit in Westerland lag mit 8.6 m/s noch über dem langjährigen Mittelwert von 7.8 m/s an der Station List (KIRSCHNING et al., 1993). Durch westliche Winde jedoch entsteht ein positiver Windstau (Franzius Institut, 1992). Die Hochwasser fallen dabei besonders hoch aus. Durch die erhöhten Wasserstände steigt das mittlere Wasservolumen, das sogenannte Tideprisma, des Hörnumer Tidebeckens von 0.52 km³ auf 0.62 km³ an. Aufgrund des größeren Tideprismas nehmen die mittleren Durchflußmengen pro Tide über die Grenzen des Hörnumer Tidebeckens zu, was durch im Mittel höhere Strömungsgeschwindigkeiten zum Ausdruck kommt.

Ältere Messungen bestätigen die vorliegenden Ergebnisse. So zeigen Messungen des ALW Husum (ALW, 1994) aus den Jahren 1991 und 1993 an unterschiedlichen Stellen im Hörnum-Tief ein Überwiegen des Flutstroms im südlichen Teil des Tiefs und einen stärkeren Ebbestrom im nördlichen Teil. Auch KNOB (1961) findet in seinen Messungen im südlich gelegenen Teil des Hörnum-Tiefs einen Flutstrom, der höhere Geschwindigkeiten aufweist als der Ebbestrom. Interessanterweise ist auch bei einer Messung von SCHUMACHER von 1922 (SCHUMACHER, 1923), also noch vor dem Bau des Hindenburgdammes, ein Überwiegen des Flutstromes im südlichen Teil des Hörnum-Tief zu erkennen. Es muß allerdings hinzugefügt werden, daß zwar bei allen Messungen eine gute Übereinstimmung der Strömungscharakteristik vorhanden ist, die Geschwindigkeiten aber große Unterschiede aufweisen. Während SCHUMACHER eine Flutstromgeschwindigkeit von 1.46 m/s und eine Ebbestromgeschwindigkeit von 0.97 m/s angibt, sind es bei KNOB 1.72 m/s bzw. 1.63 m/s. Die jüngeren Messungen des ALW zeigen bei ablaufendem Wasser Geschwindigkeiten von bis zu 1.5 m/s und 0.5 m/s bei auflaufendem Wasser. Ein direkter Vergleich der einzelnen Meßergebnisse ist wegen fehlender Informationen über die Wetterbedingungen während der Messung, der morphologischen Veränderungen sowie der unterschiedlichen Meßlokationen und -apparaturen nicht möglich. Es macht aber deutlich, in welchem Rahmen die Geschwindigkeiten in dem Profil zwischen Sylt und Amrum schwanken können.

Die Richtungen der Strömung im Profil 1 sind durch die topographischen Gegebenheiten vorgegeben. Sie läuft während der Flutphase in nordöstlicher Richtung und in der Ebbephase nach Südwesten. Eine Ausnahme hiervon ist die Position 1.1. Durch ihre Lage westlich der Hörnum-Odde ist der Flutstrom nach Südosten und der Ebbestrom nach Westen gerichtet. Große Richtungsschwankungen sind aufgrund der starken topographischen Führung der Strömung bei beiden Kampagnen nicht zu beobachten.

Neben den Geschwindigkeiten ist auch die Dauer des Ebbe- und des Flutstroms eine, für das Verständnis des Strömungsgeschehens, wichtige Größe. Genau wie die Strömungsgeschwindigkeit sind auch die Ebbestromdauer und die Flutstromdauer ortsabhängig und können durch äußere Einflüsse, wie z. B. die Witterung, verändert werden.

				Früh	ahr				Herbst	
	Position Wassertiefe [m] Beginn Ende	1.1 1.5 19.03 22.03	1.3 11 20.03 15.04	1.4 26 02.04 20.05	1.5 21 19.03 06.05	1.8 3.5 19.03 10.04	1.9 2.5 18.03 02.05	1.4 26 10.10 07.12	1.5 21 10.10 07.12	1.6 17 10.10 07.12
Ebbestromdauer	$\begin{array}{l} Anzahl \ Werte \\ T_{emax} \ [Std] \\ T_{emin} \ [Std] \\ T_{eM} \ [Std] \\ \sigma \ [Std] \\ T_{emed} \ [Std] \end{array}$	6 8.67 6.75 7.94 0.81 8.21	50 8.00 6.83 7.25 0.25 7.25	92 7.42 6.00 6.65 0.27 6.67	89 6.92 5.75 6.44 0.23 6.50	27 6.92 5.92 6.56 0.19 6.58	86 7.42 5.33 6.77 0.29 6.75	113 7.58 4.25 6.56 0.4 6.58	113 7.50 4.33 6.47 0.37 6.50	113 7.58 4.00 6.63 0.41 6.67
Flutstromdauer	$\begin{array}{l} \mbox{Anzahl Werte} \\ T_{fmax} \ [Std] \\ T_{fmin} \ [Std] \\ T_{fM} \ [Std] \\ \sigma \ [Std] \\ T_{fmed} \ [Std] \end{array}$	5 5.17 3.33 4.35 0.66 4.33	51 5.83 4.67 5.06 0.76 5.08	92 6.25 5.33 5.77 0.21 5.75	89 6.67 5.67 5.96 0.22 5.92	26 6.25 5.50 5.74 0.14 5.75	86 6.67 5.17 5.65 0.23 5.58	112 6.75 5.33 5.86 0.24 5.83	112 6.92 5.25 5.94 0.26 5.92	112 7.17 5.08 5.78 0.31 5.75

Tab. 3: Statistik über die Dauer von Flut- und Ebbestrom

In der Tab. 3 sind die gemittelten Zeiten für die Dauer des Flut- und Ebbestroms während der Meßkampagne dargestellt. Die hier verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung: T_e ist die Ebbestromdauer und T_f die Flutstromdauer. Die Fußzeiger haben die gleiche Bedeutung wie in Tab. 2. Die Meßpositionen zwischen Sylt und Amrum weisen unterschiedlich lange Zeiten mit Flut- und Ebbestrom auf. So ist die aus dem Tidebecken hinaus gerichtete Strömung eine Stunde (Pos. 1.9) bis vier Stunden (Pos. 1.1) länger als der Flutstrom. Außerdem zeigen die Zahlen einen Anstieg der Ebbestromdauer im Ebbestrom dominierten Teil, während die Zeiten im Flutstrom dominierten Abschnitt recht einheitlich sind. Die Unterschiede zwischen der Frühjahrs- und Herbstkampagne sind dabei trotz verschiedener Strömungsgeschwindigkeiten äußerst gering. Allerdings sind die Standardabweichungen von T_e im Herbst deutlich höher als im Frühjahr, was auf größere Schwankungen im Untersuchungszeitraum hindeutet.

Die unterschiedlich lang andauernden Flut- und Ebbeströme sind ein Indiz dafür, daß mit jeder Tide ein gewisser Wassertransport aus dem Hörnumer Tidebecken in die Nordsee, oder umgekehrt, verbunden ist. Auf diesen Aspekt wird später im Abschnitt "Restströme" noch ausführlich eingegangen.

Neben dem mittleren Verhalten der Strömung ist auch von Interesse, wie sich die Geschwindigkeiten und die Dauer des Ebbe- und Flutstroms bei extremen Wetterbedingungen verändern. Wie schon erwähnt, traten gegen Ende Oktober sowie Anfang November zwei über längere Zeit anhaltende starke Stürme mit Windgeschwindigkeiten um 25 m/s aus westlichen Richtungen auf. Der erste Sturm wies dabei höhere Windgeschwindigkeiten auf, während der zweite Sturm von längerer Dauer war.

Die Abb. 7 zeigt in den Bildern A und B die Auswirkungen des Sturms am 29. und 30. Oktober auf die Tideströmung an der Position 1.4. Weiterhin sind die Windgeschwindigkeit und -richtung (Bild D und E) in Westerland sowie der Wasserstand am Pegel Amrum-Odde (Bild C) dargestellt. Um den Vergleich der Winddaten mit den Strömungsdaten zu vereinfachen, ist die Windrichtung in ozeanographischen Koordinaten aufgezeichnet, d. h., die angegebene Richtung ist die, in die der Wind weht!

Anhand der Winddaten ist der Verlauf des Sturms deutlich zu erkennen. Nach einer Phase mit relativ gleichmäßigen Wind aus südwestlicher Richtung, dreht der Wind in den Morgenstunden des 29. Oktober nach Nordwest, und die Windgeschwindigkeit nimmt in zwei Etappen bis 25 m/s zu. Aufgrund des starken Westwinds ist der Wasserstand des folgenden Hochwassers ca. 0.5 m höher als der des vorhergehenden. Ein Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten des Flutstroms zeigt, daß nur eine geringfügige Erhöhung der Geschwindigkeit damit verbunden ist. Die Flutstromdauer hingegen ist mit ca. 7 Stunden mehr als eine Stunde länger als im Mittel. Ganz ähnlich verhält es sich mit der Ebbestromgeschwindigkeit und der Ebbestromdauer am Ende des Sturms. Am 30. Oktober läßt der Wind wieder nach und das Tideniedrigwasser fällt wieder unter NN. Obwohl in dieser Phase ein ungewöhnlich großer Tidehub² vorhanden ist, liegt die Ebbestromgeschwindigkeit nur geringfügig über dem mittleren Wert von 1.01 m/s. Dagegen ist die Ebbestromdauer mit ca. 8 Stunden ungefähr 1.5 Stunden länger als im Mittel. Es läßt sich daher feststellen, daß in diesem Fall ein windbedingter Anstieg des Tidehubs nicht zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, sondern zu einer Verlängerung der Stromdauer führt.

Eine weitere Besonderheit zeigt das Niedrigwasser während des Sturms. Zum einen ist das Tideniedrigwasser mit ca. 1 m über NN nur wenig tiefer als das mittlere Hochwasser, und zum anderen ist der Ebbestrom bei dieser Tidephase zwischen Sylt und Amrum außerordentlich schwach ausgeprägt. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit liegt mit 0.75 m/s

² In dem Zeitraum vom 1. Oktober bis zum 9. Dezember 1996 betrug das MThw am Sommertidepegel auf der Amrum Odde +1.01 m NN und das MTnw –1.01 m NN. Daraus ergibt sich ein mittlerer Tidehub von 2.02 m.

deutlich unter dem mittleren Wert und auch die Ebbestromdauer ist mit nur 4.5 Stunden fast 2 Stunden kürzer als im Mittel. Der darauf folgende Flutstrom ist ungeachtet des sehr geringen Tidehubs stark ausgebildet. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen mit bis zu 1.3 m/s weit über dem Mittel und auch die Flutstromdauer ist mit 6.5 Stunden länger als gewöhnlich.

Die Gründe für diese Strömungsverteilung sind in erster Linie darin zu sehen, daß sich bei dieser Wetterlage die Zirkulation im Hörnumer Tidebecken umkehrt. Während bei einer "normalen" Wetterlage zwischen Föhr und Amrum und über die Föhrer Schulter im Laufe einer Tide ein starker Wasserversatz aus dem Gebiet der Norderaue in Richtung Norden stattfindet, ist bei dieser Starkwindwetterlage ein starker Transport aus dem Hörnumer Tidebecken Richtung Süden zu verzeichnen. Für weitergehende Ausführungen zu diesem Thema wird auf den Abschlußbericht dieses Projektes verwiesen.

Am 5. November folgte ein zweiter Sturm (s. Abb. 8). Die Windgeschwindigkeiten lagen nur wenig unter denen des Sturms von Ende Oktober. Dafür dauerte er fast 60 Stunden. Der Wind kam dabei aus südwestlicher Richtung. Auch in diesem Fall hatten die hohen Windgeschwindigkeiten einen lang anhaltenden Wasserspiegelanstieg zur Folge. Die Tidehoch- und niedrigwasser lagen in dieser Zeit ca. 2 m über den mittleren Werten. Im Unterschied zum ersten Sturm stieg die Windgeschwindigkeit diesmal nur allmählich an, so daß der Wasserspiegelanstieg über mehrere Tiden erfolgte. Dies hatte zur Folge, daß der Tidehub während des Anstiegs mit ca. 1.6 m unter den mittleren Werten lag. Am Ende des Sturms tritt jedoch ein mit 3 m sehr großer Tidehub auf. Infolge des langsamen Anstiegs des Wasserstandes sind auch keine signifikanten Veränderungen der Flut- und Ebbedauer in dieser Zeit zu beobachten. Nur zusammen mit dem stark erhöhten Tidehub tritt eine mit 7.5 Stunden verlängerte Ebbephase auf. Entsprechend zur Verringerung des Tidehubs verhalten sich auch die Strömungsgeschwindigkeiten. Sie sind, ungeachtet des Wasserspiegelanstiegs, zu Beginn des Ereignisses mit ungefähr 0.8 m/s etwas geringer als im Mittel und, verbunden mit dem vergrößerten Tidehub am 7. November, stark erhöht.

4.3 Restströme

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse lassen aufgrund der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsdauern erkennen, daß das Wasser entlang des Meßprofils nicht nur eine Pendelbewegung ausführt, sondern daß mit jeder Tide ein gewisser räumlicher Versatz des Wassers vorhanden sein muß. Dieser Versatz wird auch als Reststrom bezeichnet. Der Reststrom berechnet sich aus dem vektoriellen Integral der Strömung über eine komplette Periode der M2-Gezeit (s. z. B. DICK, 1987).

Die Gleichung mit der der Reststrom berechnet wird lautet:

$$\vec{V}_R = \int_T \vec{v} \, dt$$

In der Gleichung steht V_R für den Reststromvektor, \vec{v} für den Strömungsvektor und t stellt die Zeit dar. Integriert wird die Strömung über eine Tideperiode T. Das Ergebnis ist der Dimension nach eine Geschwindigkeit und wird entweder in m/s oder in km/Tide (1.0 m/s = 44.71 km/Tide) angegeben.

In der Abb. 9 sind die über vier Tiden berechneten Restströme für das Untersuchungsgebiet als Strompfeile dargestellt. Der Zeitraum für die Berechnung der Restströme entspricht dabei dem aus der Abb. 3. Aufgetragen sind alle Stationen, bei denen zu dieser Zeit lückenlose Datenreihen vorlagen. Um die Stärke und Richtungen der Restströme zu ver-



Abb. 7: Strömungsgeschwindigkeit [m/s] und -richtung [°] an der Position 1.4 (Bild A und B), Wasserstand [m NN] am Pegel Amrum Odde (Bild C), Windgeschwindigkeit [m/s] und -richtung [°] in Westerland (Bild D und E) für eine Starkwindsituation vom 29. bis 31. Oktober 1996



Abb. 8: Strömungsgeschwindigkeit [m/s] und -richtung [°] an der Position 1.4 (Bild A und B), Wasserstand [m NN] am Pegel Amrum Odde (Bild C), Windgeschwindigkeit [m/s] und -richtung [°] in Westerland (Bild D und E) für eine Starkwindsituation vom 5. bis 8. November 1996

deutlichen, sind zusätzlich die groben Umrisse der Inseln sowie die Isolinien der Tiefenverteilung [m NN] dargestellt. In der Legende der Abb. sind der genaue Zeitraum für die Berechnung des Reststroms, die Stärke und Richtung des vektoriell gemittelten Windes (in ozeanographischen Koordinaten!) und die Skalierung der Reststrompfeile angegeben.

Für den untersuchten Zeitraum ist zwischen Sylt und Amrum eine deutliche Zweiteilung der Restströme zu erkennen. Von der Hörnum-Odde bis etwa zur Mitte der Hörnum-Tiefs (Position 1.1 und 1.3) ist ein kräftiger Wasserversatz in Richtung Nordsee zu verzeichnen. Die Reststromgeschwindigkeiten in diesem Bereich betragen bis zu 13.4 km/Tide. Weiter in Richtung Amrum verringert sich der Reststrom auf Werte um 2.5 km/Tide (Position 1.8, 1.9 und 1.10). Teilweise dreht sich Reststrom sogar um (Pos. 1.5) und ist in das Hörnumer Tidebecken hineingerichtet. In diesen Bereichen gleicht somit die höhere Flutstromgeschwindigkeit die längere Ebbestromdauer fast völlig aus. Über das gesamte Profil betrachtet überwiegt aber der Ebbestrom und der Wassertransport ist aus dem Hörnumer Tidebecken hinaus gerichtet.



Abb. 9: Über vier Tiden gemittelte Reststromverteilung. Für Einzelheiten siehe Text

Frühere Meßkampagnen des ALW Husum aus den Jahren 1985, 1991 und 1993 (BERG, pers. Mitteilung) bestätigen das Reststrommuster und zum Teil auch die Reststromgeschwindigkeiten. Allerdings tritt bei den älteren Messungen ein Unterschied an der südlichen Flanke des Hörnum Tiefs auf. Während bei der Meßkampagne 1996 an der Position 1.5 ein in das Hörnumer Tidebecken hinein gerichteter Reststrom auftritt, zeigen die älteren Messungen dort einen Wasserversatz in Richtung Nordsee. Allerdings ist ein genauer Vergleich dieser Daten nur bedingt möglich, da aufgrund der hohen räumlichen Variabilität der Strömungen in diesem Gebiet, schon geringe Unterschiede bei der Positionierung der Meßgeräte große Auswirkungen auf die Ergebnisse haben können.

Die Betrachtung der Strömungen während der beiden Starkwindsituationen im Oktober/November 1996 hatte gezeigt, daß aufgrund der Wetterbedingungen Veränderungen sowohl bei der Strömungsrichtung als auch bei der Strömungsgeschwindigkeit auftreten. Dies führt natürlich auch zu einer geänderten Reststromverteilung. Wie sich die Änderungen der Strömungsmuster auf die Restströme auswirken, ist in den folgenden Bildern 10 und 11 zu sehen. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Restströme ist die Skalierung der Reststrompfeile mit der in der Abb. 9 identisch. Dargestellt sind wieder alle Positionen, an denen lückenlose Zeitreihen vorlagen. Wegen des Sturmes sind allerdings die mechanischen Aanderaa-Geräte fast komplett ausgefallen, so daß in erster Linie nur Daten von den ADCP-Geräten im Bereich des Hörnum-Tiefs zur Verfügung stehen.

Die Reststromverteilung (Abb. 10) während des Sturms im Oktober 1996 unterscheidet sich deutlich von der Verteilung im März. So sind an den drei verfügbaren Positionen große Änderungen bei der Reststromrichtung zu erkennen. Die Reststromgeschwindigkeiten sind dabei etwas geringer und erreichen Werte von bis zu 10 km/Tide. Während im März in der Nähe der Hörnum-Odde ein Transport aus dem Hörnumer Tidebecken in die Nordsee vorhanden war (vergl. Abb. 9), findet aufgrund des Sturms nur noch ein kräftiger Wasserdurchsatz in das Hörnumer Tidebecken hinein statt.

Ganz andere Auswirkungen hat der Sturm Anfang November (Abb. 11) auf das Reststrommuster. Im Schnitt zwischen Sylt und Amrum lassen die über 5 Tiden gemittelten Strömungen in erster Linie eine Abschwächung bei den Reststromgeschwindigkeiten erkennen. Sie sind mit Werten zwischen 1 und 4 km/Tide sehr viel geringer als im März. Eine Ausnahme davon bildet die Station an der 4-Meter-Tiefenlinie (Position 1.8). Dort tritt in diesem Fall eine geringfügig höhere Reststromgeschwindigkeit auf. Die Richtungen jedoch sind denen in der Abb. 9 sehr ähnlich und zeigen keine signifikante Änderung im Vergleich mit den Ergebnissen vom 20. bis 22. März.

Vergleicht man die Restströme in den drei Abb. 9, 10 und 11, so zeigen sich in allen Bildern deutliche Unterschiede. Zieht man jedoch von den Restströmen der Abb. 10 und 11 den Reststrom der Abb. 9 ab, so erhält man die vom Wind induzierte Strömung, den sogenannten Triftstrom. Dieser ist zwar bei beiden Starkwindwetterlagen in das Hörnumer Tidebecken hineingerichtet, aber von der Stärke her sehr unterschiedlich. Im Fall des Sturms im Oktoker, ist der Triftstrom stark genug, um die Reststromrichtung in der Rinne des Hörnum-Tiefs umzukehren, während beim zweiten Sturm im November die Reststromgeschwindigkeit dort durch den Triftstrom nur verringert wird.

Faßt man die Ergebnisse über die Veränderungen der Strömungen und der Restströme bei Sturmwetterlagen zusammen, so zeigt sich, daß bei den beiden untersuchten Ereignissen jeder Sturm andere Auswirkungen hat. Es läßt sich daher feststellen, daß nicht nur die Windgeschwindigkeit eine wichtige Größe ist, sondern auch die Windrichtung und der zeitliche Verlauf des Sturms eine entscheidende Rolle für die Verteilung der (Rest-)Strömungsmuster spielen. Überraschenderweise hat dabei der Tidehub nur einen relativ geringen Einfluß auf



Abb. 10: Über 2 Tiden gemittelte Reststromverteilung während eines Sturms im Oktober 1996. Für Einzelheiten siehe Text

die Strömungen, so daß der Wasserstand im Hörnumer Tidebecken nur sehr bedingt als ein Indikator für die Strömungsverteilung verwendet werden kann. Eine generelle Aussage über die Auswirkungen von starken Winden auf die Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen kann natürlich nicht aufgrund der Auswertung von nur zwei Ereignissen abgeleitet werden.

4.4 Transporte

Die im vorangegangenen Abschnitt berechneten Restströme machen deutlich, daß ein Wassertransport über die Grenzen des Hörnumer Tidebeckens mit den umliegenden Gebieten stattfindet. Im Folgenden soll nun dieser Massentransport anhand der Messungen der Frühjahrs- und Herbstkampagne näher untersucht und quantifiziert werden.



Abb. 11: Über 5 Tiden gemittelte Reststromverteilung während eines Sturms im November 1996. Für Einzelheiten siehe Text

Da sich der Wassermassentransport aus der Strömungsgeschwindigkeit multipliziert mit der Durchflußfläche errechnet, war es zunächst notwendig, die Querschnitte aller drei Meßprofile genau zu bestimmen. Ausgehend von den Vermessungen des ALW in Husum im Sommer 1996 wurde daher in einem ersten Schritt die Tiefenverteilung, mit Abständen von 1 m zwischen den einzelnen Tiefenpunkten, erstellt. Die hohe räumliche Auflösung war nötig, um die sich im Laufe einer Tide ständig verlagernden Übergänge zwischen trockenen und nassen Wattflächen möglichst genau zu bestimmen. Als zweites muß der Wasserstand für die Flächenberechnung bereit gestellt werden. Zu diesem Zweck hatte das ALW auf der Amrum Odde einen Sommertidepegel aufgestellt. Die Wasserstandsdaten wurden für die Rechnung als konstant über den gesamtem Schnitt angenommen.

Desweiteren mußten für die Bilanzrechnungen einige Annahmen bezüglich der Strömungsdaten getroffen werden. Bei den Messungen mit den Aanderaa-Geräten handelt es sich um Punktmessungen innerhalb der Wassersäule. Je nach Art der Verankerung befanden sich die Geräte dabei in unterschiedlichen Abständen vom Boden. Aus Mangel an Kenntnis über das tatsächliche Strömungsprofil wurden daher die gemessenen Strömungsdaten als charakteristisch für die gesamte Wassersäule angesehen und unverändert für die Transportrechnungen verwendet. Bei den Positionen mit ADCP-Geräten wurden die gemessenen Daten vertikal gemittelt für die Transportrechnung verwendet.

Um die Meßprofile auch in der Horizontalen abdecken zu können, wurden zuerst die Entfernungen der Meßpositionen untereinander oder bis zum nächsten Landpunkt berechnet. Die gemessenen Strömungswerte der einzelnen Geräte galten dann in einem Bereich links- und rechtsseitig vom Meßpunkt bis zum Land bzw. die Hälfte der Strecke bis zum nächsten Meßgerät als homogen.

Mit Hilfe der Querschnittsflächen und den Ergebnissen aus den Strömungsmessungen können die Beträge des Massentransports durch die einzelnen Meßprofile abgeschätzt werden. Aufgrund der zum Teil sehr komplexen Strukturen der Strömung sind nur Zeiträume in Betracht gezogen worden, in denen möglichst viele Positionen mit lückenlosen Meßzeitreihen zur Verfügung standen.

In der Abb. 12 sind die horizontal integrierten Transportraten für einen Zeitraum von 4 Tagen im April 96 dargestellt. Die Transportskala wurde in dem Plot so gewählt, daß positive Werte einen Fluß in das Hörnumer Tidebecken und negative Transportraten einen Fluß aus dem Hörnumer Tidebecken anzeigen. Die Transporte spiegeln dabei das Verhalten der Tideströmung wider. Im Rhythmus der Tide strömt das Wasser aus der Nordsee in das Hörnumer Tidebecken und wieder heraus. Die Transportraten erreichen dabei Werte von fast 35 000 m³/s, wobei Ebb- und Flutstromtransporte ungefähr gleich groß sind. Obwohl das Wasser im Verlauf einer Tide eine Art Pendelbewegung ausführt, überwiegt aufgrund geringfügig höherer Transportraten und vor allem wegen der längeren Transportdauer der Ebbestromtransport, so daß insgesamt ein Wasserversatz in Richtung Nordsee zu vorhanden ist.

Summiert man die positiven und negativen Äste der Transportraten über eine Tideperiode auf, so bekommt man den Gesamttransport in die jeweilige Richtung und kann daraus den Nettotransport bestimmen. In der Tab. 4 sind die mittleren Gesamttransporte für drei Zeiträume im Frühjahr und einen im Herbst aufgelistet. Mit + gekennzeichnete Werte stehen



Abb. 12: Berechnete Wassertransporte [[≈]10⁶ m³/s] zwischen Sylt und Amrum. (+ in das Hörnumer Tidebecken hinein, – aus dem Hörnumer Tidebecken hinaus)

Die Küste, 60 (1998), 117-139 138

für einen Transport in das Hörnumer Tidebecken (\rightarrow H. T.), während mit – gekennzeichnete Werte einen Transport aus dem Hörnumer Tidebecken (\leftarrow H. T.) bedeuten.

Bei der Betrachtung der vier untersuchten Zeiträume fällt auf, daß die Gesamttransporte aber auch die Abweichungen von den Mittelwerten in jedem Profil mit der Zeit stark variieren. Die Schwankungen werden zum einen durch periodische Ereignisse, wie die tägliche Ungleichheit der Tide oder die Variationen des Wasserstandes durch den Nipp-Springzyklus ausgelöst. Zum anderen sind die Transporte sehr stark von den meteorologischen Bedingungen abhängig, da durch den Wind große Wasserstandsänderungen hervorgerufen werden können. So schwanken die Werte zwischen Sylt und Amrum (alle folgenden Angaben über Wassertransporte sind in Millionen m³ pro Tide) im Bereich von +364.9 bis +481.8 während der Flutphase und zwischen –396.1 und –535.4 bei ablaufenden Wasser. Die Transporte sind damit etwas geringer als die Ergebnisse der Modellrechnungen für verschiedene Wettersituationen von DICK (DICK et al., 1996) mit Durchflußmengen zwischen +495 und +586 sowie –586 bis –696 und den Modellergebnissen des ALW Husum (ALW, 1996) mit Mengen von +534 bzw. –630.

Tab. 4: Mittlere Wassertransporte [*106 m3/Tide] der einzelnen Meßprofile und Gesamtbilanz

		Herbst		
Datum	3.4.96 - 14.4.96	17.4.96 - 22.4.96	25.4.96 - 29.4.96	21.11.96 - 24.11.96
\rightarrow H. T.	$+408.1 \pm 22.6$	$+481.8 \pm 19.4$	$+364.9 \pm 20.9$	$+417.9 \pm 65.4$
←H. T.	-488.1 ± 53.7	-535.4 ± 20.4	-396.1 ± 44.8	-532.6 ± 71.4
Σ	- 80.0 ± 40.4	- 53.6 ± 36.4	-31.2 ± 36.7	- 114.7 ± 114.4

Die Zahlen für den Nettofluß aus dem Hörnumer Tidebecken in die Nordsee hingegen liegen, trotz einer sehr großen Schwankungsbreite, sowohl bei den Meßergebnissen des Projektes als auch bei den Modellergebnissen von DICK und vom ALW innerhalb der gleichen Größenordnung. So betragen die Nettoflüsse bei den vorliegenden Messungen zwischen –31.2 und –114.7 und bei den Modellrechnungen von DICK und vom ALW zwischen –86 bis –110 bzw. bei –96. Auch die Abschätzung der Differenzwassermengen von RICKLEFS (RICK-LEFS et al., 1994), basierend auf Strömungsmessungen im Hörnum Tief aus dem Jahr 1988 zeigt, daß sich zwar die Nettoflüsse von Tide zu Tide mit Werten von –21 bis –76 stark unterscheiden, aber die Übereinstimmung mit den anderen Ergebnissen gut ist.

5. Danksagung

Ich danke Herrn H. May, Herrn H. Klein und Herrn S. Petersen für die äußerst tatkräftige Unterstützung in allen gerätetechnischen Dingen. Für die Hilfestellung und Gastfreundschaft auf See und an Bord möchte ich mich bei den Besatzungen der Schiffe "Oland", "Habel" und "Hooge" vom ALW sowie bei der Besatzung der "Wega" vom BSH bedanken. Weiterhin möchte mich an dieser Stelle bei all denjenigen ganz herzlich bedanken, die die Durchführung des Projektes ermöglicht haben.

6. Schriftenverzeichnis

- Abschlußbericht für das KFKI-Projekt " Der Wasseraustausch im Tidebecken Hörnum Tief", Förderkennzeichen: 610-3892-MTK 40 582, 1998 (in Vorbereitung).
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Husum: Gesamt-Schlußbericht zum BMFT-Forschungsvorhabens "Untersuchungen zur Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt – Phase II" (unveröffentlicht), 1994.
- Amt für Land- und Wasserwirtschaft (ALW) Husum: Untersuchung zum Wattsicherungsdamm Festland - Pellworm, Zwischenbericht, Stand von 27. 2. 1996.
- DICK, S.: Gezeitenströmungen um Sylt Numerische Untersuchungen zur halbtägigen Hauptmondtide (M2), Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Vol. 40, H. 1, S. 25–44, 1987.
- DICK, S. u. SCHÖNFELD, W.: Water transport and mixing in the North Frisian Wadden Sea Results of numerical Investigations, Deutsche Hydrgraphische Zeitschrift, Vol. 48, No. 1, p. 27–48, 1996.
- FRANZIUS-INSTITUT: 3. Zwischenbericht Phase II des BMBF Forschungsvorhabens "Optimierung des Küstenschutzes auf Sylt" (unveröffentlicht), 1992.
- KIRSCHNING, E. u. LEISTNER, W.: Das Klima der Nordseeinsel Föhr 1888–1992, Nordfriisk Instituut Bräist/Bredstedt, Nordfriesland, S. 195 ff., 1993.
- KNOB, F.: Untersuchungen über Gezeitenbewegung und morphologische Veränderungen im nordfriesischen Wattgebiet als Vorarbeiten für Dammbauten, Mitteilungen aus dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau und Grundbau der Technischen Hochschule Braunschweig, H. 1961/1.
- RICKLEFS, K. u. AUSTEN, G.: Ergebnisse von Schwebstoff- und Strömungsmessungen in den Rückseitenwatten der Insel Sylt (Nordsee/Deutsche Bucht), Meyniana, Nr. 46, S. 91–106, 1994.
- SCHUMACHER, A.: Die Gezeiten der Sylter Gewässer, Aus dem Archiv der deutschen Seewarte, XLI Jahrgang 1923, Nr. 2, S. 3–22, 1923.