

7 Ergebnisse der durchgeführten Messungen

Die ersten ortsfesten Messungen im Untersuchungsgebiet wurden ab dem 29. Juni 2006 durchgeführt. Die letzten Messgeräte wurden am 8. September 2009 aus dem Neufelder Watt abgezogen. Über einen großen Zeitraum der Untersuchung wurden kontinuierliche Messungen durchgeführt. Dennoch gab es planmäßige und unplanmäßige Unterbrechungen der ortsfesten Messungen. In den Wintermonaten war die Erreichbarkeit des Untersuchungsgebietes durch erhöhte Sturmaktivität eingeschränkt, was zum Teil sehr lange Wartungsintervalle zur Folge gehabt hätte. Darüber hinaus wäre die rechtzeitige Bergung der Geräte bei Eisgang nicht gewährleistet gewesen. Um das Risiko des Geräteverlustes im Winter zu reduzieren, wurden die ortsfesten Messungen in der Natur zwischen Mitte Dezember und März unterbrochen. Zudem mussten die Wartungsintervalle in einigen Fällen witterungsbedingt verlängert werden. Zum Teil wurden dabei die Batterie- bzw. Akkulaufzeiten überschritten, so dass Lücken in der Datenerfassung entstanden.

Abbildung 48 gibt eine Übersicht über die Zeiten, zu denen an einer oder mehreren Positionen Messungen durchgeführt wurden. Die Fächerecholotmessungen (MBES = Multibeam Echo Soundings) markieren jeweils Einzelereignisse. Die Strömungsmessungen (ADCP), Schwebstoffmessungen (ASM) und Wasserstands- bzw. Seegangsmessungen (WIDL) beschreiben die jeweilige Messperiode. Nicht verwendbare Daten (z.B. witterungsbedingt abgebrochene Peilungen) sind nicht aufgeführt. Eine Unterscheidung der verschiedenen Messpositionen ist in Abbildung 48 aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

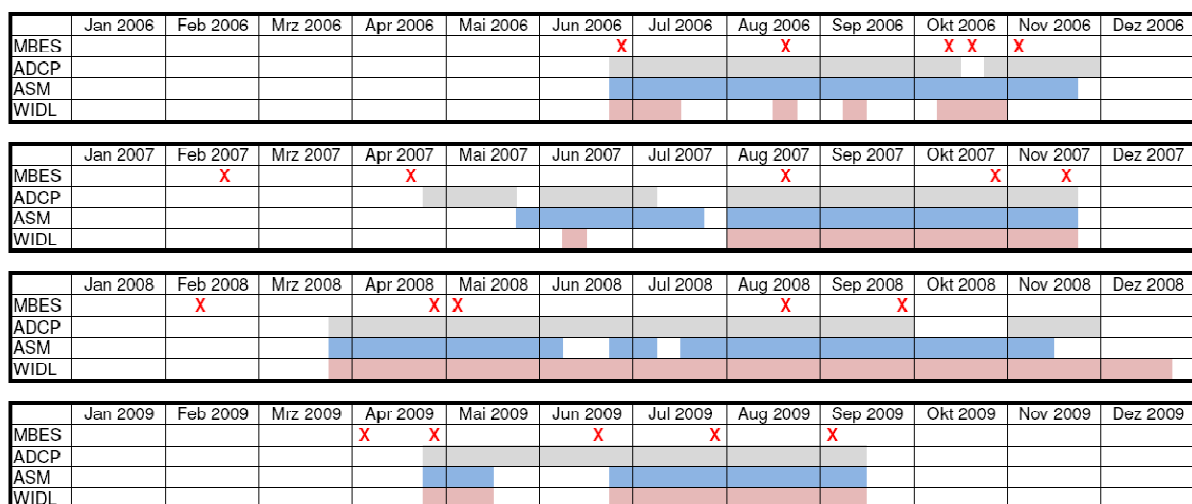


Abbildung 48: Übersicht über die Messzeiten (MBES = Fächerecholotmessung, ADCP = Strömungsmessung, ASM = Messung der Sedimentkonzentration, WIDL = Wasserstand- bzw. Seegangsmessung)

Probleme bestanden zunächst in der Akkulaufzeit der Drucksonden. Erst ab der Umstellung auf die eigens konstruierten Drucksonden im August 2007 konnten kontinuierlich Daten aufgezeichnet werden. Durch die Verwendung von zwei Drucksonden an einer Messposition konnte das Risiko der Entstehung von Datenlücken reduziert werden. Der spätere Beginn der Messungen im Jahr 2007 ist der Umstellung auf leichtere Geräteträger geschuldet, die jedoch notwendig waren, um die Messpositionen verlagern zu können.

7.1 Sedimentinventar

Zur Bestimmung verschiedener sedimentologischer Parameter wurden Sedimentproben aus dem Untersuchungsgebiet ausgewertet. Zunächst wurden im Jahr 2006 im Bereich des Messquerschnittes (MQ) in der Neufelder Rinne drei Proben entnommen und im Labor analysiert (MQ 1 bis MQ 3). Im Jahr 2007 wurden weitere 16 Proben in einem 500 m-Raster im Neufelder Watt (Probe 1.1 bis 4.1) sowie eine weitere im Bereich des Messquerschnittes (MQ 4) genommen. Abbildung 49 zeigt die Positionen der Proben, die im näheren Umfeld der ortsfesten Messungen liegen.

Für jede der Proben wurde die Korngrößenverteilung bestimmt, für ausgewählte Positionen wurden zudem weitere Parameter wie die Sedimentdichte, die Lagerungsdichte und der organische Anteil untersucht.

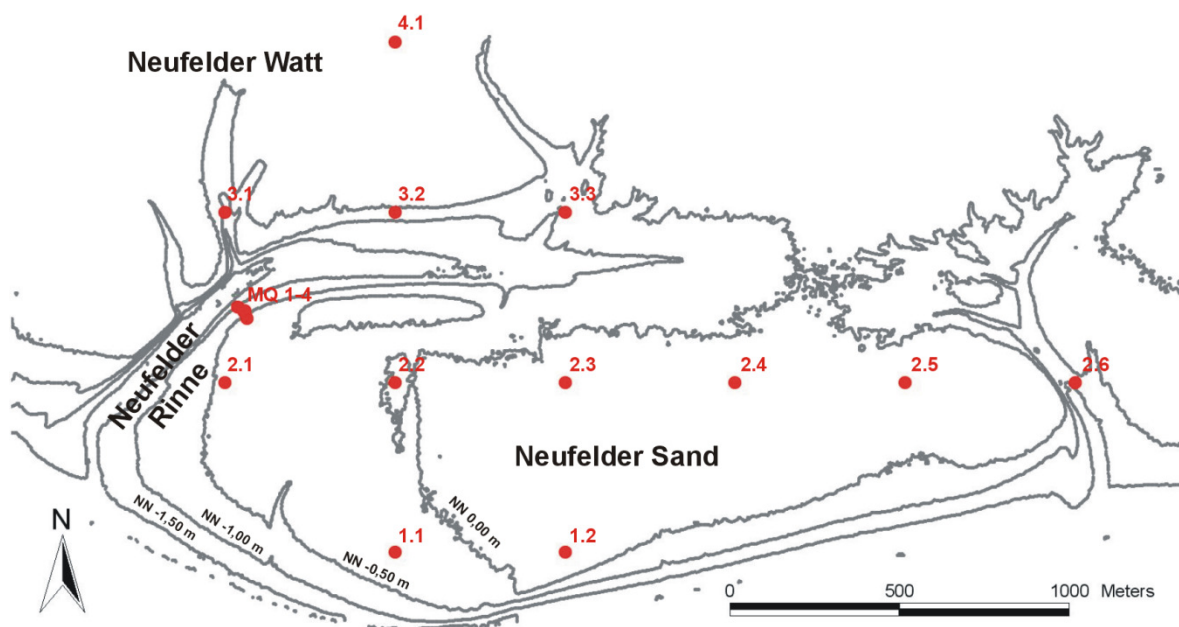


Abbildung 49: Übersicht über die Entnahmestellen der Sedimentproben

7.1.1 Korngrößenverteilung

Die in einem Boden enthaltenen Körnungsgruppen können nach DIN 18123 (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 2010a) über die Korngrößenverteilung beschrieben werden. Dabei werden die Sedimente nach der Größe der in ihnen enthaltenen Körner unterteilt. Durch Siebung werden Körner voneinander getrennt, deren Durchmesser größer als 0,063 mm sind. Korngrößen von weniger als 0,125 mm werden durch Sedimentation unterschieden.

Tabelle 10 zeigt zusammengefasst die Ergebnisse der Untersuchung der Korngrößenverteilungen der Proben, deren Lage in Abbildung 49 dargestellt ist.

In der zweiten Spalte der Tabelle wird die Bodenart nach EN ISO 14688 – Teil 1 (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 2003) benannt. Jeder Sedimentprobe ist das Kurzzeichen der Bodenart zugewiesen. Nach Tabelle 11 handelt es sich bei allen untersuchten Sedimentproben um Feinsande, die sich lediglich in den Nebenanteilen unterscheiden. In den meisten Fällen enthalten die Proben (schwache) Anteile von Schluff und Mittelsand. Nur in einem Fall ist der Feinsand stark schluffig (Position 2.1), der Boden an den Positionen 2.1, 2.6 und 3.1 enthält zudem schwache Anteile von Grobsand. Bei Proben mit einem Feinkornanteil von mehr als 10 % bestehen auch Nebenanteile aus Mittel- und Grobsanden. Die Korngrößenverteilungen an diesen Positionen sind somit weit gestuft und besitzen eine höhere Ungleichförmigkeit.

Tabelle 10: Korngrößenverteilungen der Sedimentproben

Position	Korngrößenverteilung						
	Bodenart	Feinkornanteil (<0,063 mm)	Größtkorn	Kleinstkorn	D ₃₅	D ₅₀	D ₉₀
		[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1.1	fS	4,09	1,60	0,0630	0,104	0,112	0,154
1.2	fS	1,64	1,25	0,0630	0,127	0,134	0,159
2.1	fS,ū,ms',gs'	30,96	2,00	0,0016	0,067	0,094	0,695
2.2	fS,u',ms'	4,99	2,00	0,0630	0,093	0,106	0,209
2.3	fS,u'	7,88	2,00	0,0016	0,120	0,137	0,194
2.4	fS	4,84	1,25	0,0630	0,113	0,125	0,156
2.5	fS	3,31	2,00	0,0630	0,119	0,130	0,157
2.6	fS,u',ms',gs'	10,96	4,00	0,0016	0,107	0,122	0,570
3.1	fS,u,ms',gs'	16,09	2,00	0,0016	0,084	0,098	0,721
3.2	fS,u',ms'	5,69	2,00	0,0630	0,111	0,124	0,232
3.3	fS	2,90	2,00	0,0630	0,110	0,121	0,155
4.1	fS,u',ms'	13,83	2,00	0,0016	0,098	0,111	0,198
MQ1	fS	1,0	2,00	0,0630	0,122	0,131	0,159
MQ2	fS, ms', u'	8,25	4,00	0,0016	0,142	0,167	0,236
MQ3	fS, ms'	3,04	4,00	0,0630	0,091	0,104	0,223
MQ4	fS, ms'	4,76	2,00	0,0630	0,089	0,102	0,201

Tabelle 11: Benennung der Bodenarten nach EN ISO 14688-1 (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 2003)

Kurzzeichen	Bodenart
fS	Feinsand
fS,u'	Feinsand, schwach schluffig
fS, ms, u'	Feinsand, mittelsandig, schwach schluffig
fS,u',ms'	Feinsand, schwach schluffig, schwach mittelsandig
fS,u',ms',gs'	Feinsand, schwach schluffig, schwach mittelsandig, schwach grobsandig
fS,u,ms',gs'	Feinsand, schluffig, schwach mittelsandig, schwach grobsandig
fS,ū,ms',gs'	Feinsand, stark schluffig, schwach mittelsandig, schwach grobsandig

In Abbildung 50 sind die Korngrößenverteilungen verschiedener Sedimentproben als Körnungs- oder Summenlinien nach DIN 18123 (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 2010a) dargestellt. Proben mit einem geringen Feinkornanteil von weniger als 5 % wurden nur gesiebt, wobei Korngrößen kleiner als 0,063 mm nicht erfasst wurden. Das Schlämmkorn wird daher für diese Fälle nicht angezeigt. Bei Proben mit einem Feinkornanteil über 5 % wurde eine kombinierte Sieb- Schlämmanalyse durchgeführt. Die Summenlinie weist daher Schlämm- und Siebkornanteile auf.

Bei einem Feinkornanteil von weniger als 5 % sind keine Einflüsse mehr auf die geotechnischen Bodeneigenschaften zu erwarten (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, 2005). Dieser Wert wird auch als Grenze für die Ausprägung signifikanter kohäsiver Eigenschaften erachtet.

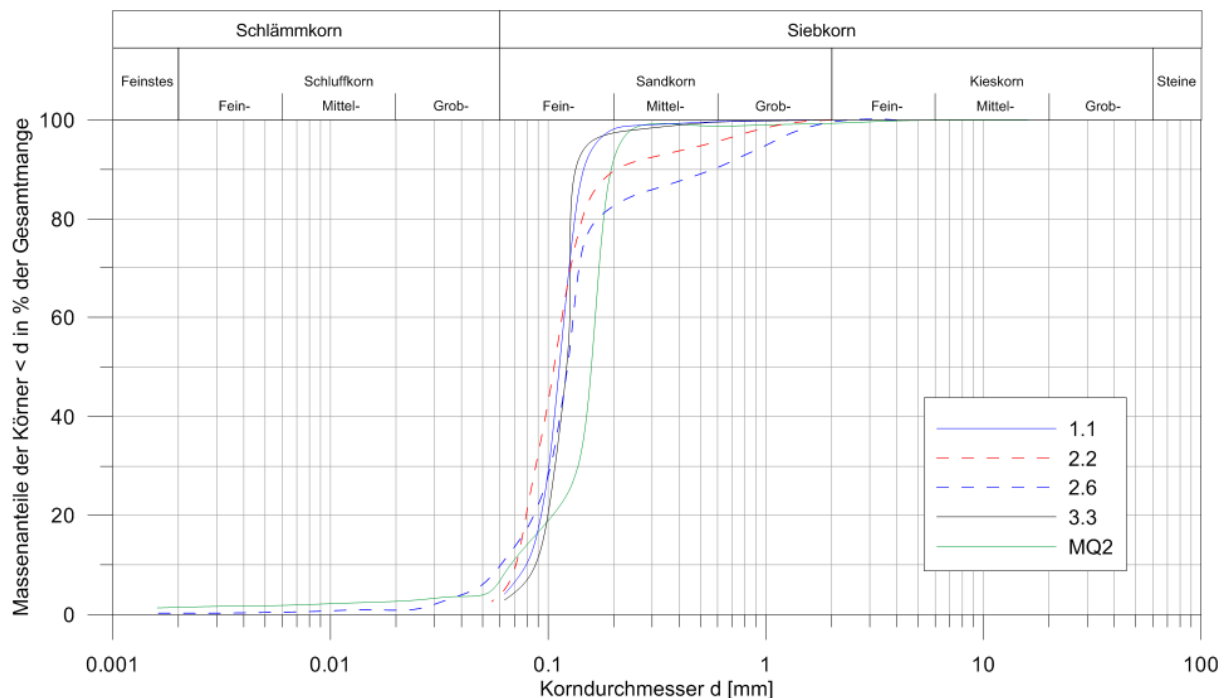


Abbildung 50: Korngrößenverteilungen der Sedimentproben 1.1, 2.2, 2.6, 3.3 und MQ2

Bei Böden aus Feinsanden ohne nennenswerte Nebenanteile haben die Summenlinien einen sehr einheitlichen Verlauf (z.B. 1.1 und 3.3). Abweichungen von diesem Verlauf zeigen sich erst bei Proben mit schwachen Nebenanteilen von Schluff, Mittel- oder Grobsand (z.B. Positionen 2.2, 2.6) oder bei Proben gleicher Bodenart, jedoch mit größeren Korndurchmessern d_{35} , d_{50} und d_{90} (z.B. Position MQ2).

Die Auswertung der Korngrößenverteilungen zeigt, dass das Untersuchungsgebiet Neufelder Watt vorwiegend aus Feinsand besteht. Abweichungen ergeben sich aus den Nebenanteilen. Dabei ist entlang der Nord-Süd- bzw. Ost-West-Achse, die aus den Auswertungen hervorgehen, kein deutliches Muster erkennbar. Weist eine Probe jedoch signifikante Nebenanteile auf, sind es zugleich Nebenanteile mehrerer Kornfraktionen und die Summenlinie ist weiter gestuft. Diese Ergebnisse stimmen mit Angaben in der Literatur überein (AHREND ET AL., 2006). Dabei besitzt der obere Bodenhorizont der Feinsande in etwa eine Mächtigkeit von 30 Metern.

7.1.2 Korndichte, Lagerungsdichte und weitere Größen

Für einige der Sedimentproben wurden die Korndichte bzw. die Lagerungsdichte des Bodens untersucht. Die Auswahl der Positionen für die Bestimmung der Korndichte ist dabei gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilt. Die Lagerungsdichte wurde für ausgewählte Positionen bestimmt, an denen sich bei der Sedimentbeprobung Auffälligkeiten in der Trittfestigkeit ergaben. Für alle Positionen wurde zudem der Anteil organischen Materials bestimmt. Tabelle 12 gibt eine Übersicht über die ermittelten Parameter.

Tabelle 12: Organischer Anteil und Dichteigenschaften der Sedimentproben

Position	Dichte			Organischer Anteil
	Korndichte	Trockendichte des Bodens	Bezogene Lagerungsdichte	
	ρ_s [g/cm ³]	ρ [g/cm ³]	D [-]	
1.1	-	-	-	0,0141
1.2	-	-	-	0,0101
2.1	2,585	1,773	0,047	0,0550
2.2	-	-	-	0,0398
2.3	-	1,888	0,757	0,0248
2.4	-	-	-	0,0144
2.5	2,622	1,932	-	0,0176
2.6	-	-	-	0,0509
3.1	-	1,651	-0,028	0,0331
3.2	-	1,602	-	0,0358
3.3	-	-	-	0,0163
4.1	2,614	-	-	0,0391
MQ1	-	-	-	0,0159
MQ2	-	-	-	-
MQ3	-	-	-	-
MQ4	-	-	-	-

Die Korndichte bezeichnet die Rohdichte der festen Einzelbestandteile (Körner) eines Bodens. Für Sande wird die Korndichte gewöhnlich durch den Wert $2,65 \text{ g/cm}^3$ abgeschätzt, der für das Mineral Quarz gilt (WITT, 2008). Die Bestimmung der Korndichte erfolgt mit dem Kapillarpyknometer-Verfahren nach DIN 18124 (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 2007).

An den Proben 2.1, 2.5 und 4.1 wurde die Korndichte ermittelt, wobei sich im Mittel ein Wert von $2,607 \text{ g/cm}^3$ ergab.

Die bezogene Lagerungsdichte wird mit dem Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18125-2 bestimmt (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 2010b). Dieses Verfahren eignet sich vorwiegend für bindige Bodenarten ohne nennenswerten Grobkornanteil sowie für nichtbindige Böden aus Fein- bis Mittelsanden. Für die Bestimmung der Dichte müssen die verwendeten Bodenproben mindestens der in DIN 4021 definierten Güteklasse 2 entsprechen (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 1990). Ihre Eigenschaften bezogen auf die Dichte, den Wassergehalt, die Kornzusammensetzung und den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert dürfen durch die Entnahme nicht verändert werden. Die Versuche zur Bestimmung der Dichte bei lockerster und dichtester Lagerung nach DIN 18126 liefern Werte für die Grenzen der Lagerungsdichte des Probenmaterials (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 1996). Aus den Dichten bei lockerster und dichtester Lagerung lassen sich unter Verwendung der Korndichte die minimalen bzw. maximalen Porenzahlen sowie die minimalen bzw. maximalen Porenanteile bestimmen. Mit den Extremwerten der Dichte lässt sich, unter Verwendung der Trockendichte in der natürlichen Lagerung, ein Verhältnismaß errechnen.

Die so genannte bezogene Lagerungsdichte D schwankt je nach Trockendichte zwischen Null und Eins. Beträgt die bezogene Lagerungsdichte Null, so entspricht die Trockendichte der lockersten Lagerung. Liegt der Wert bei Eins, so befindet sich der Boden in der dichtesten möglichen Lagerung. Nach DIN 18126 ist eine Einteilung der Bezeichnung rolliger Böden, in Abhängigkeit ihrer bezogenen Lagerungsdichte, entsprechend Tabelle 13 möglich.

Tabelle 13: Bezeichnungen der bezogenen Lagerungsdichte D nach DIN 18126 (vgl. GRABE, 2001)

D	Bezeichnung
0,00 – 0,15	Sehr locker
0,15 – 0,30	Locker
0,30 – 0,50	Mittel dicht
0,50 – 1,00	Dicht

An fünf Proben wurde die Trockendichte bestimmt. Sie liegt zwischen $1,60 \text{ g/cm}^3$ und $1,93 \text{ g/cm}^3$. Durch weitere Untersuchung und die anschließende Bestimmung der Dichten bei lockerster und bei dichtester Lagerung wird eine Berechnung der bezogenen Lagerungsdichte möglich. Einer der drei Werte liegt unterhalb des theoretisch möglichen Wertebereiches

von Null bis Eins (Position 3.1). Dieses weist auf eine extrem lockere Lagerung hin. Position 2.1 besitzt eine bezogene Lagerungsdichte von 0,047. Sie ist also genau wie die Position 3.1 sehr locker gelagert. Diese Proben mit sehr lockerer Lagerung sind eher im Umfeld der Neufelder Rinne anzutreffen, in dem es verstärkt zu Sedimentumlagerungen kommt. An der Entnahmestelle 2.3 auf dem Neufelder Sand außerhalb des Einflussbereiches der Neufelder Rinne ist die bezogene Lagerungsdichte mit 0,757 vergleichsweise hoch. Die Sedimentkörner des Bodens sind deutlich stärker verdichtet als die der anderen Proben. Aus der dichten Lagerung lässt sich ein höherer Konsolidierungsgrad und somit eine längere Konsolidierungsdauer des Materials ableiten.

Der organische Gehalt der Sedimentproben wird durch den Glühverlust bestimmt (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN, 2002). Der Versuch beruht auf der Annahme, dass die im Boden enthaltenen mineralischen Komponenten im Gegensatz zu den organischen Bestandteilen nicht verglühen. Der Masseverlust während des Versuchs entspricht damit dem organischen Anteil der Probe.

Der organische Anteil beträgt im Mittel 3,2 %. Das Maximum wird mit 5,5 % in Probe 2.1 vorgefunden. In dem Material der Entnahmestelle 1.2 liegt mit 1,0 % der geringste Massenanteil vor. Allgemein nimmt der Anteil organischer Substanzen unter unregelmäßigen Schwankungen mit abnehmender Korngröße zu. Der Gehalt an organischen Substanzen beträgt im Sandwatt etwa 1 %, im Schlickwatt 5 - 10 % (REINECK, 1982). Die im Untersuchungsgebiet bestimmten Werte liegen überwiegend in einem für Sand- bzw. Mischwatt üblichen Bereich. Nur in zwei Proben (2.1 und 2.6) werden Gehalte über 5 % (Schlickwatt) festgestellt. Der Feinkornanteil dieser Proben ist mit 30,96 % und 10,96 % vergleichsweise hoch.

7.1.3 Bewegungsbeginn und Suspensionsbeginn aus Laboruntersuchungen

Zur Bestimmung des Bewegungsbeginns und des Suspensionsbeginns von Sedimenten aus dem Neufelder Watt wurden experimentelle Untersuchungen in einer Strömungsrinne durchgeführt (vgl. Kapitel 6.1.3).

In Abbildung 51 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe mit 0,11 m Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,05 m/s und 0,30 m/s dargestellt. Dabei werden die von den Sensoren aufgezeichneten Werte verwendet, ohne eine Kalibrierung zur Umrechnung in Sedimentkonzentrationen zu hinterlegen. Für die Sensoren des ASM im Messbereich wird ein Mittelwert verwendet. Gleiches gilt für die zwei Sensoren der WOBS. Um die Vergleichbarkeit von WOBS und ASM gewährleisten zu können, werden auf der linken y-Achse die Messwerte relativ zum jeweiligen Höchstwert der Versuchsreihe aufgetragen. Die Messrei-

hen beider optischer Messgeräte, dargestellt durch die blauen bzw. schwarzen Kreuze, stimmen gut überein.

Im rot markierten Bereich mit tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,16 m/s und 0,19 m/s ist ein Anstieg der Messwerte der Sensoren deutlich erkennbar. Die Versuche wurden mit stationärer Strömung ohne Welleneinfluss durchgeführt. Durch diese Randbedingung kann der Anstieg der Messwerte – und somit der Anstieg der Sedimentkonzentration – mit dem Moment des Bewegungsbeginns gleichgesetzt werden. Die experimentellen Ergebnisse lassen daher den Schluss zu, dass der Bewegungsbeginn der Sedimente bei einer kritischen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit von 0,17 m/s einsetzt. Dieser Wert liegt im Bereich der nach Zanke (1977) theoretisch berechneten kritischen Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 3).

Auf der rechten y-Achse ist die relative Änderung der Sensorwerte zwischen zwei Strömungsgeschwindigkeiten verdeutlicht und im Diagramm durch blau bzw. schwarz schraffierte Balken dargestellt. Bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,19 m/s und 0,24 m/s ist ein besonders deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Dieser starke Anstieg der relativen Sedimentkonzentration lässt auf den Moment des Übergangs vom sohnahen in den suspensiven Transport schließen, woraus eine tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit für den Suspensionsbeginn $\bar{u}_c = 0,22 \text{ m/s}$ resultiert. Dies stimmt in etwa mit dem Suspensionsbeginn nach Bagnold überein (vgl. Abbildung 7).

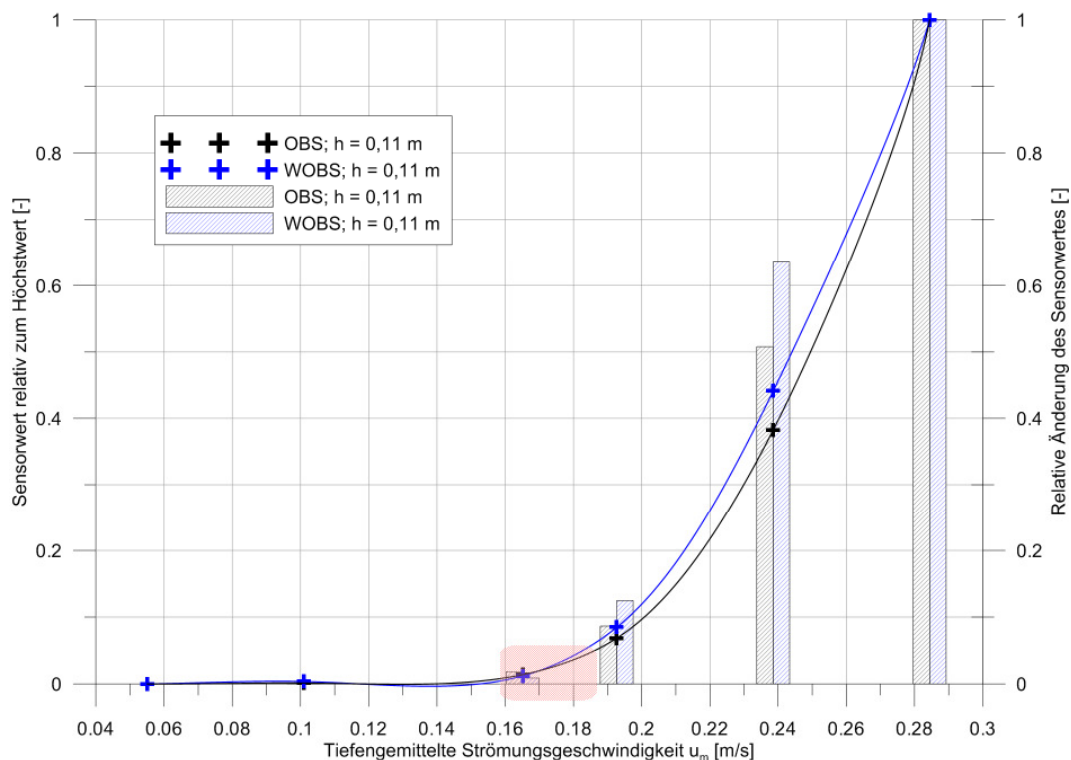


Abbildung 51: Ableitung des Bewegungs- und Suspensionsbeginns aus den Laboruntersuchungen

7.2 Hydrologische Randbedingungen des Untersuchungsgebietes

7.2.1 Wasserstände

Die Pegel Otterndorf und Osteriff liegen auf der südlichen Seite des Fahrwassers der Elbe westlich bzw. östlich des Untersuchungsgebietes (vgl. Abbildung 20). Die Daten und Tidekennwerte dieser Pegel können verwendet werden, um eine erste Abschätzung der im Neufelder Watt auftretenden Wasserstände vorzunehmen. Die wichtigsten Tidekennwerte sind in Tabelle 14 aufgeführt. Am Pegel Osteriff ist die mittlere Flutdauer 10 Minuten kürzer als am Pegel Otterndorf. Die mittlere Ebbedauer ist analog dazu 10 Minuten länger. Die übrigen Tidekennwerte unterscheiden sich nicht nennenswert. Des Weiteren sind in Tabelle 14 das mittlere Tidehochwasser, das höchste Tidehochwasser und das niedrigste Tidehochwasser im Neufelder Watt, ermittelt aus den Messungen zwischen dem 29.06.2006 und dem 08.09.2006, dargestellt. Durch die Dauer der Messungen sind insbesondere die Extremwerte von weitaus geringerer Aussagekraft als die entsprechenden Werte der Pegel Otterndorf und Osteriff, das Mittlere Tidehochwasser liegt jedoch im Bereich der Werte der beiden Pegel. Dadurch, dass die Messpositionen im Neufelder Watt in der Regel für eine längere Zeit um das Tideniedrigwasser herum trockenfallen, erlauben die eigenen Messungen keine Aussagen zum Tideniedrigwasser bzw. damit einhergehend keine Bestimmung der Tidedauern und des Tidehubs. Zur Abschätzung dieser Werte wird auf die Pegel Otterndorf und Osteriff zurückgegriffen, wobei dies nur zu logistischen Zwecken, z.B. zur Bestimmung der Trockenfalldauern notwendig wird.

Tabelle 14: Tidekennwerte an den Pegeln Otterndorf und Osteriff sowie der Messungen im Neufelder Watt

	Otterndorf ⁶	Osteriff ⁶	Neufelder Watt ⁷
MThw [m NN]	1,50	1,47	1,53
HThw [m NN]	5,42	5,42	4,37
NThw [m NN]	-0,75	-0,86	0,17
MTnw [m NN]	-1,39	-1,34	-
HTnw [m NN]	2,82	2,84	-
NTnw [m NN]	-3,80	-3,70	-
Mittlere Ebbedauer [Min.]	409	419	-
Mittlere Flutdauer [Min.]	336	326	-
Mittlere Tidedauer [Min.]	745	745	-
Mittlerer Tidehub [m]	2,89	2,81	-
Höchster Tidehub [m]	4,72	4,56	-
Niedrigster Tidehub [m]	0,51	0,48	-

⁶ Datenherkunft: Beweissicherung Tideelbe (<http://www.portal-tideelbe.de>); verfügbarer Datenzeitraum: 01.01.1960 bis 30.09.2009

⁷ Datenherkunft: Eigene Messungen; verfügbarer Datenzeitraum: 29.06.2006 bis 08.09.2009

Abbildung 52 zeigt die aus den Messungen im Neufelder Watt berechnete Häufigkeitsverteilung der Tidehochwasserstände im Untersuchungszeitraum. Die meisten Werte liegen im Bereich zwischen +1,30 m NN und +1,60 m NN bei einem Mittleren Tidehochwasser von +1,53 m NN. Lediglich zwei Tidereignisse führten zu Scheitelwasserständen, die deutlich höher sind. Das höchste Tidehochwasser im Untersuchungszeitraum lag bei +4,37 m NN. Das niedrigste Tidehochwasser lag bei +0,17 m NN.

In Abbildung 53 ist ein Geländeschnitt durch das Untersuchungsgebiet exemplarisch dargestellt. Dieser verläuft von Südost von der Wattkante über den Neufelder Sand und die Neufelder Rinne zum Neufelder Watt nach Nordwesten. Neben der Höhenlage einiger Messpositionen, die auf diesen Schnitt projiziert sind, sind das Mittlere Tidehochwasser, das höchste Tidehochwasser sowie das niedrigste Tidehochwasser der Messungen aus dem Neufelder Watt und das Mittlere Tideniedrigwasser des Pegels Otterndorf angegeben. Die Darstellung verdeutlicht, dass die Messpositionen – bis auf die Position in der Mitte der Neufelder Rinne – über verschieden lange Zeiträume trockenfallen. Auch die Wasserstände über den Messgeräten lassen sich abschätzen. Gerade die höher gelegenen Positionen haben auch bei Tidehochwasser nur eine geringe Wasserüberdeckung.

Aus den Geländehöhen sowie den mittleren Tidekennwerten wurde die mittlere Trockenfalldauer der Flächen im Untersuchungsgebiet ermittelt. Diese Information war zur logistischen Planung der Messungen hilfreich, des Weiteren kann sie auch zur Beurteilung von Konsolidierungsprozessen an den Messpositionen herangezogen werden. Abbildung 54 zeigt die Linien gleicher Trockenfalldauer bei mittleren Tidebedingungen. Die Trockenfalldauer reicht von 160 Minuten an der Wattkante sowie in der Nähe der Neufelder Rinne bis hin zu 410 Minuten bei den höher gelegenen Positionen auf dem Neufelder Watt. Nach Norden hin nimmt die Dauer weiter zu.

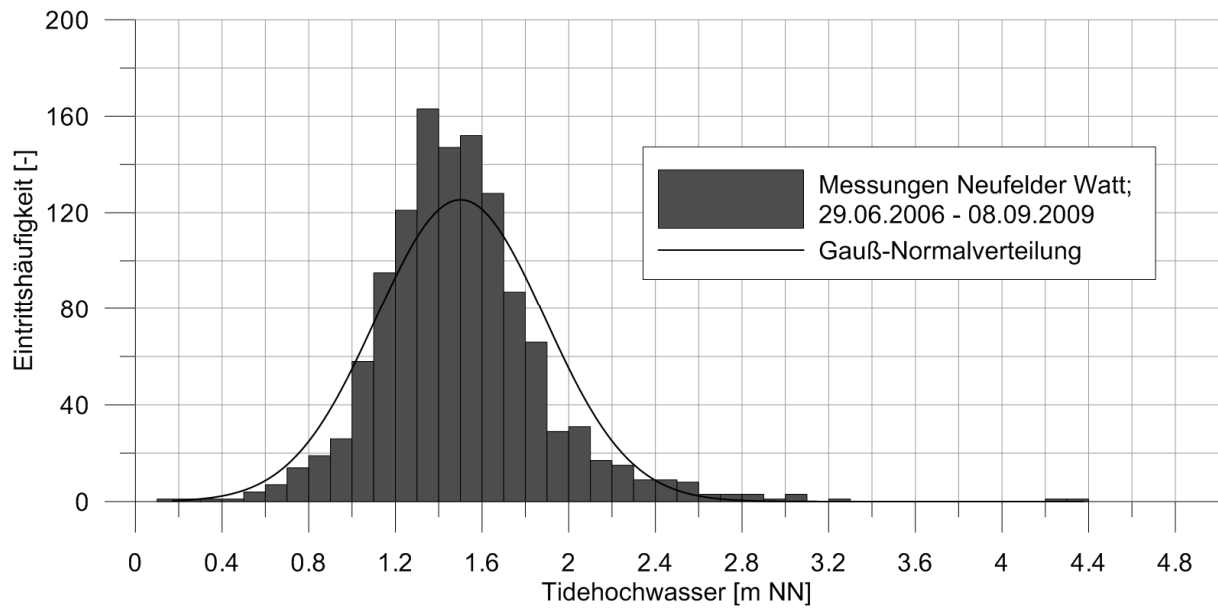


Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Tidehochwasserstände im Neufelder Watt im Untersuchungszeitraum 29.06.2006 bis 08.09.2009

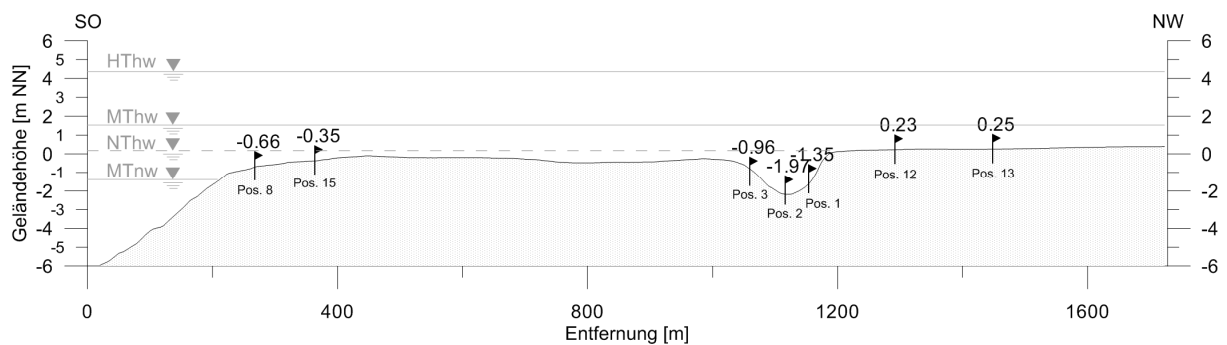


Abbildung 53: Exemplarischer Geländeschnitt durch das Untersuchungsgebiet mit der Höhenlage verschiedener Messpositionen und Tidewasserstände

Die Tidekurven der Messpositionen auf den Wattflächen wiesen untereinander keine signifikanten Unterschiede auf. Eine Auffälligkeit wurde jedoch entlang der Neufelder Rinne festgestellt. Durch das schnellere Absinken des Wasserstandes im Ästuar im Vergleich zu den Prielen der Wattflächen stellt sich ein Wasserspiegelgefälle vom nordöstlichen Bereich der Neufelder Rinne (Position 92) zum südwestlichen Bereich der Rinne (Position 91) ein. In Abbildung 55 sind die Wasserstände an den Positionen 92 und 91 (vgl. Abbildung 47) sowie die Wasserstandsunterschiede zwischen diesen Positionen dargestellt. Bei einem Wasserstand von ca. +0,25 m NN in der Ebbephase ist die Differenz mit 0,08 m bis 0,12 m am größten. Dies hat eine starke Strömung in der Neufelder Rinne und insbesondere im verengten Einfahrtbereich der Rinne in der Ebbephase zur Folge.

Bei der Darstellung muss beachtet werden, dass die Genauigkeit der Drucksonden umgerechnet $\pm 0,02$ m beträgt.

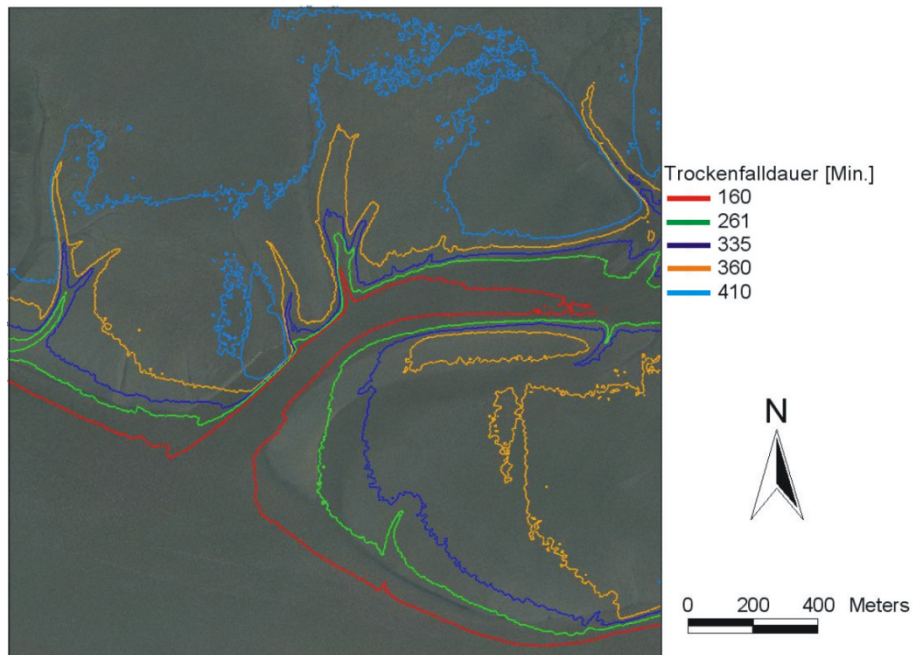


Abbildung 54: Linien gleicher Trockenfalldauer im Untersuchungsgebiet

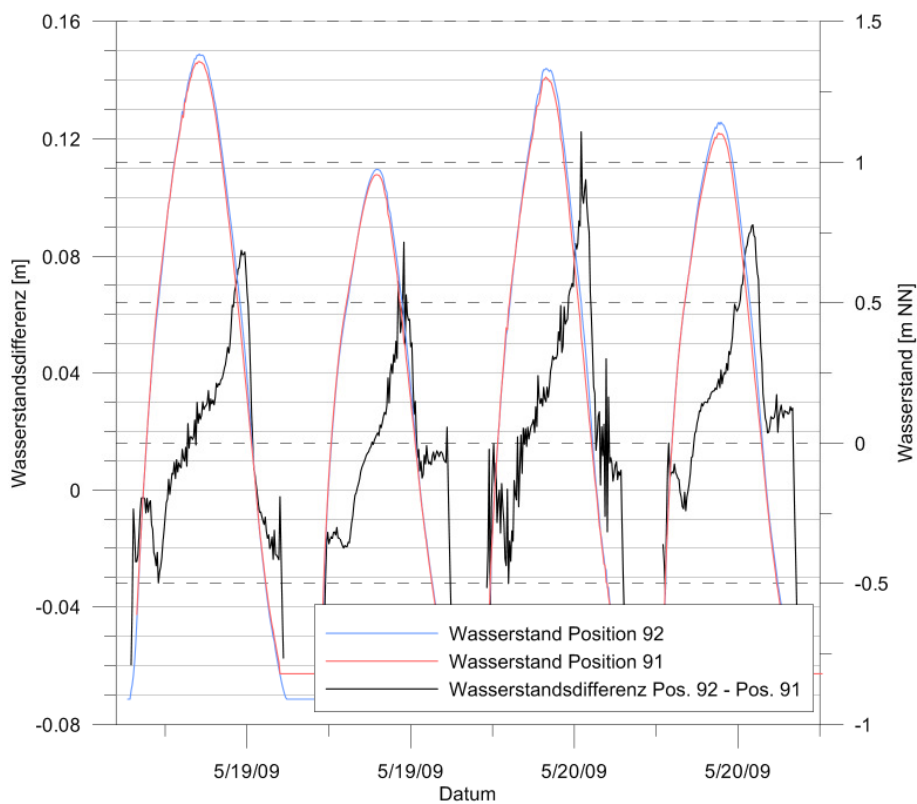


Abbildung 55: Wasserstandsdifferenzen in der Neufelder Rinne

7.2.2 Strömungen

Der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten und der Strömungsrichtungen unterscheidet sich deutlich an verschiedenen Messpositionen. Im Wesentlichen müssen Positionen in der Neufelder Rinne, auf höher gelegenen Wattflächen und an der Wattkante unterschieden werden. Insgesamt wurden zur Auswertung der Strömungsparameter an den verschiedenen Messpositionen 1.840 Tiden herangezogen.

7.2.2.1 Auswertung der Strömungsmessungen

Wie in Kapitel 6.1.1.1 beschrieben, werden über alle untersuchten Tiden 5-Minuten-Ensembles aufgezeichnet. Eine erfolgreiche Messung der Strömungsparameter erfolgt dabei, sobald reflektierende Partikel im Bereich der ersten Tiefenzelle vorhanden sind, also sobald der Wasserstand oberhalb des Blanking-Bereiches liegt. Es erfolgt keine automatische Erfassung des Wasserspiegels durch das Strömungsmessgerät, wodurch die Schallwandler solange Echos des ausgesandten Signals aufzeichnen und auswerten, bis theoretisch auch die letzte eingestellte Tiefenzelle das Signal reflektiert hat. Als höchste Tiefenzelle wird ein Wert eingestellt, der im Falle einer Sturmflut an der jeweiligen Messposition erreicht wird. In den meisten Fällen liegt der tatsächliche Wasserspiegel allerdings deutlich unter diesem Wert, zudem variiert der Wasserstand tidebedingt. Das Strömungsmessgerät zeichnet aus diesem Grund auch mehrfach von der Wasseroberfläche und vom Wattboden reflektierte Echos auf. Um diese Reflexionen tatsächlich vorhandener Tiefenzellen zu eliminieren, wird der Effekt genutzt, dass das akustische Signal von der Wasseroberfläche stärker reflektiert wird als von den Reflektoren im Wasser. Dieser Sprung im Intensitätssignal wird verwendet, um alle Tiefenzellen zu eliminieren, die oberhalb des Wasserspiegels liegen. In einigen Fällen ist der Intensitätssprung, der durch die zweite Reflexion des akustischen Signals an der Wasseroberfläche entsteht, größer als der erste. Dadurch wird die Wasseroberfläche falsch erkannt und es werden zu viele Tiefenzellen angezeigt. Durch einen Vergleich des durch die an der jeweiligen Position des Strömungsmessgerätes installierten Drucksonde ermittelten Wasserstandes mit den Tiefenzellen der Strömungsmessung, werden die irrtümlicherweise berücksichtigten Tiefenzellen in einem weiteren Schritt eliminiert.

Ein wesentlicher Kontrollparameter zur Überprüfung der Qualität von ADCP-Messungen ist der Wert „Percent Good“, der den Anteil von einzelnen Messungen angibt, der verschiedene Fehler-Grenzwerte über- bzw. unterschreitet. Für jede Tiefenzelle werden vier verschiedene Werte berechnet: 1) Der Anteil von Messungen, der den erforderlichen Korrelations-Grenzwert nicht erreicht; 2) Der Anteil von Messungen, bei dem der Grenzwert der Fehlergeschwindigkeit überschritten wird; 3) Der Anteil von Messungen, von denen mehr als ein

Beam keine verwendbaren Ergebnisse liefert; und 4) Der Anteil von Messungen, der vier Beams zur Lösungsermittlung verwendet (RD INSTRUMENTS, 2005b).

Aufgrund der geringen Wassertiefen und des hohen Schwebstoffgehaltes im Wasser können für alle Messungen vier Beams zur Bestimmung der Strömungsparameter herangezogen werden und der erforderliche Korrelations-Grenzwert wird immer erreicht.

Bei Gewässern mit größeren Wassertiefen und geringen Schwebstoffgehalten wird das reflektierte Signal zu schwach, so dass einige Tiefenzellen keine Daten liefern können. Dann können unter Umständen nur drei Beams zur Ermittlung der Strömungsparameter herangezogen werden. Als Korrelations-Grenzwert sind im Gerät 64 Counts (= geräteinterne Einheit) voreingestellt. Ein festes Objekt im Wasser würde den Wert 255 Counts liefern. Der voreingestellte Wert wurde im Watt beibehalten.

Die Messdaten werden intern im ADCP hinsichtlich der Kontrollparameter überprüft und unbrauchbare Messungen eliminiert. Insgesamt wiesen die Daten eine sehr gute Qualität auf, so dass nur sehr wenige Werte herausfielen.

Aus den bereinigten Daten wurden Zeitreihen erstellt, die für jedes Ensemble die Strömungsgeschwindigkeit und die Strömungsrichtung für jede einzelne Tiefenzelle beinhalten. Aus diesen Daten konnten Profile und tiefengemittelte Werte der Strömungsparameter für jeden einzelnen Zeitschritt berechnet werden.

7.2.2.2 Neufelder Watt

Die höher und geschützter liegenden Flächen auf dem Neufelder Watt nordwestlich der Neufelder Rinne (Positionen 11, 12 und 13), aber auch die Messpositionen hoch auf dem Neufelder Sand (Positionen 93 und 94) weisen charakteristische Merkmale auf, die sich deutlich von den anderen Messpositionen unterscheiden (vgl. Abbildung 47 sowie Klappkarte im Anhang C).

Des Weiteren unterscheidet sich der Verlauf der Strömungsparameter je nach Scheitelwert der jeweiligen Tide. Abbildung 56 zeigt mittlere Tideverläufe sowie mittlere Verläufe von Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsrichtungen an den Positionen 11, 12 und 13. Es werden Tiden mit niedrigem Tidehochwasser, mit mittlerem Tidehochwasser und mit erhöhtem Tidehochwasser unterschieden. Um die Unterschiede zwischen den Verläufen besser zu verdeutlichen, sind zwischen den Abstufungen 0,15 m bzw. 0,11 m Differenz. Extremereignisse mit Wasserständen von mehr als 1,00 m über MThw bzw. mehr als 0,75 m unter MThw gehen nicht in die Darstellung ein. Pro Abstufung werden aus 10 bis 19 Tiden, deren Tide-

hochwasserstand im jeweiligen Bereich liegt, Wasserstände und Strömungsparameter für eine mittlere Tide berechnet.

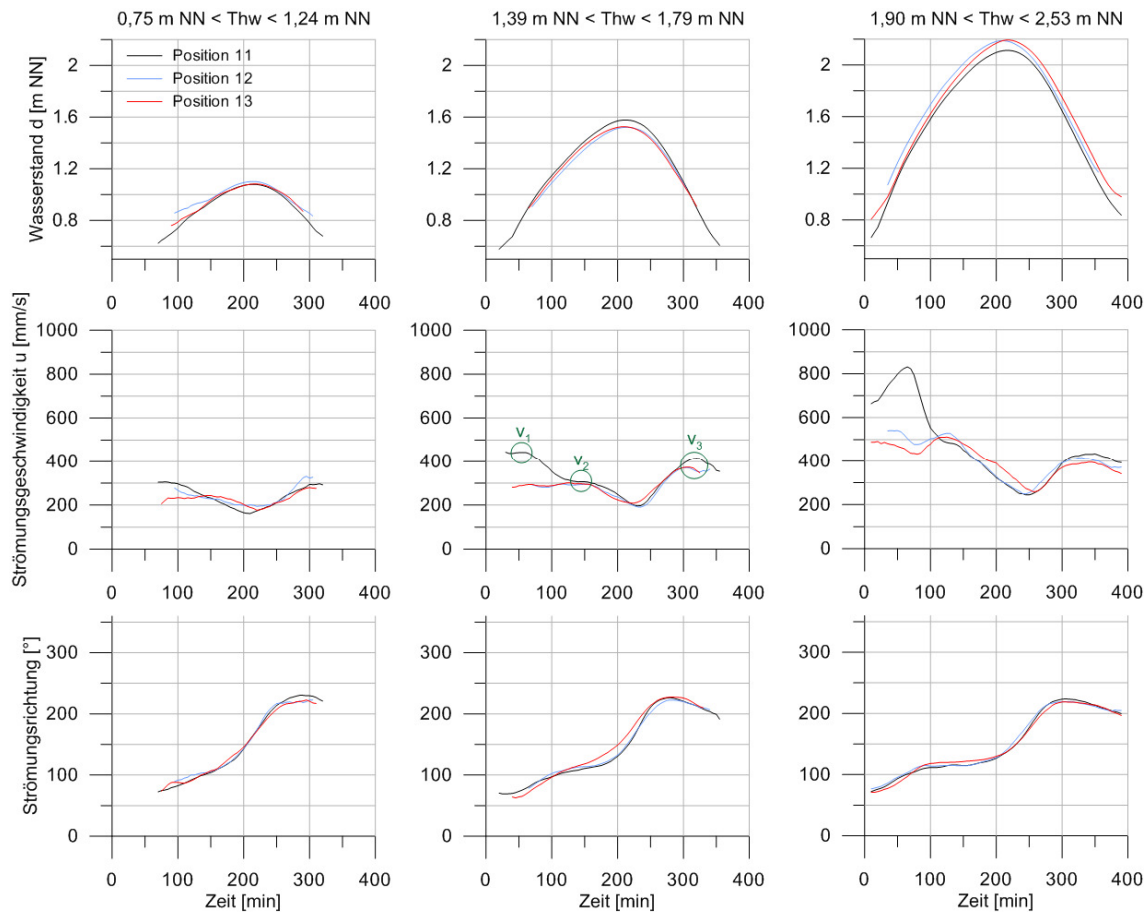


Abbildung 56: Mittlere Tidewasserstände und Strömungsparameter an den Messpositionen 11, 12 und 13 (v_1 = maximale Flutstromgeschwindigkeit, v_2 = Sattelpunkt der Flutstromgeschwindigkeit, v_3 = maximale Ebbestromgeschwindigkeit)

Die Strömungsverläufe für die Positionen 12 und 13 sind nahezu deckungsgleich. Position 11 weist geringe Unterschiede auf, die auf die etwas tiefere Lage der Messposition und die südlichere Lage näher zur Wattkante zurückzuführen sind. Bei Tiden, deren Tidehochwasser im Bereich des mittleren Tidehochwassers liegen, ist an den Positionen 12 und 13 zu Beginn der Aufzeichnung in der Flutphase ein langgestreckter Sattelpunkt zu erkennen. Dessen Maximalwert v_2 liegt im Mittel etwa bei 365 mm/s (vgl. Tabelle 15). Nach der Phase des Stauwassers mit Strömungsgeschwindigkeiten von etwa 200 mm/s kurz nach der Tidehochwasserzeit steigen die Strömungsgeschwindigkeiten in der Ebbephase bis zu einem Maximalwert v_3 von im Mittel rund 350 mm/s an, bevor die Strömungsgeschwindigkeit wieder abnimmt und die Messungen dann bei zu geringen Wasserständen unterbrochen werden. An Position 11 ist der Verlauf ähnlich. Zu Beginn der Aufzeichnung in der Flutphase erreichen die Strömungsgeschwindigkeiten jedoch ein erstes Maximum v_1 , bevor diese auf den Sattel-

punkt mit der Geschwindigkeit v_2 zurückgehen. Der Wert v_1 liegt mit 470 mm/s im Mittel über den anderen Hochpunkten. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit v_3 in der Ebephase erreicht ähnliche Werte, wie an den Positionen 12 und 13. Abbildung 56 zeigt für v_3 an Position 11 eine höhere Geschwindigkeit als an den Positionen 12 und 13. Dies liegt an der Auswahl von 11 Tiden, aus denen ein mittlerer Verlauf berechnet wurde. In Tabelle 15 gehen für Position 11 alle 50 Tiden ein, die in den entsprechenden Bereich fallen. Je nach Dauer der Messungen an der jeweiligen Position gehen in Tabelle 15 unterschiedlich viele Tiden ein. An Position 13 sind das für Tiden mit einem mittleren Tidehochwasser z.B. 238 Tiden.

Der Verlauf der Strömungsrichtung ist an allen drei Positionen nahezu identisch. Die Aufzeichnung der Strömungsrichtung beginnt bei ca. 60° und steigt innerhalb von 50 Minuten auf 100° an. Dann dreht die Strömung über eine Dauer von etwa 75 Minuten langsam und kontinuierlich auf 110° bis 115° und schwenkt dann innerhalb von 100 Minuten auf ca. 230° . Fallen die Wasserstände unter $+1,00$ m NN, verändert sich die Strömungsrichtung leicht zurück auf 190° .

Bei Tiden mit erhöhten Scheitelwerten wird der Sattelpunkt an den Positionen 12 und 13 zum Hochpunkt, wobei v_2 auf 540 mm/s ansteigt. Der Wert v_3 steigt ebenfalls auf etwa 465 mm/s an. An Position 11 ist der Hochpunkt v_1 mit 871 mm/s deutlich stärker ausgeprägt. Der Punkt v_2 ist weniger stark ausgebildet, die zugehörige Geschwindigkeit steigt auf 475 mm/s an. Insgesamt sind die Hochpunkte bei erhöhten Tiden stärker ausgeprägt. Der Verlauf der Strömungsrichtung unterscheidet sich in diesem Fall im Wesentlichen dadurch von dem mittlerer Tiden, dass die Phase der wenig veränderlichen Strömungsrichtung von 110° bis 115° zeitlich länger ausgedehnt ist.

Tabelle 15: Charakteristische Strömungsgeschwindigkeiten [mm/s] an den Messpositionen 11, 12 und 13

	Position 11			Position 12		Position 13	
	v_1	v_2	v_3	v_2	v_3	v_2	v_3
Gesamt	n = 107			n = 159		n = 504	
Mittelwert	532	354	428	395	430	363	418
Maximalwert	1258	603	583	1445	868	1603	803
Minimalwert	278	222	235	206	211	116	148
$0,75 < Thw < 1,24$	n = 20			n = 23		n = 98	
Mittelwert	371	308	349	277	352	262	355
Maximalwert	546	447	452	369	525	422	582
Minimalwert	278	222	235	206	211	116	148
$1,39 < Thw < 1,79$	n = 50			n = 72		n = 238	
Mittelwert	470	340	436	370	440	366	439
Maximalwert	752	460	560	534	567	551	749
Minimalwert	333	233	282	276	344	252	277
$1,90 < Thw < 2,53$	n = 19			n = 24		n = 45	
Mittelwert	871	475	498	541	478	542	460
Maximalwert	1258	603	583	1081	570	1262	651
Minimalwert	599	370	417	306	398	352	347

Bei Tiden mit geringeren Tidehochwasserständen sind die Hochpunkte insgesamt deutlich schwächer ausgeprägt. An Position 12 und 13 liegen die Maxima in der Flutphase zwischen 360 und 400 mm/s, in der Ebbephase mit etwa 425 mm/s leicht darüber. Der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit an Position 11 gleicht dem Verlauf an den Positionen 12 und 13 bei mittleren Tiden, wobei der Wert v_2 nur noch schwach ausgeprägt ist. Der Mittelwert für v_1 liegt bei etwa 370 mm/s. Der Verlauf der Strömungsrichtung ist steiler als bei mittleren Tiden. Der Bereich, in dem die Strömungsrichtung über einen längeren Zeitraum bei 110° bis 115° verläuft, fehlt.

Die Ergebnisse der Messungen an den Positionen 93 und 94, die im Jahr 2009 über einen kürzeren Zeitraum auf dem Neufelder Sand südlich der Neufelder Rinne vorgenommen wurden, sind mit den zuvor genannten Positionen zu vergleichen und bestätigen die getroffenen Aussagen (Abbildung 57). Aufgrund der Höhenlage der Messposition sind die Ergebnisse denen der Position 11 am ähnlichsten. Die charakteristischen Strömungsgeschwindigkeiten gleichen sich, wobei die Messungen an den Positionen 93 und 94 weniger Tiden beinhalten (Tabelle 16).

Der größte Unterschied zu den Daten an den Positionen 11, 12 und 13 ist die kontinuierliche Strömungsrichtung von 230° in der Ebbephase bei Wasserständen unterhalb +1,10 m NN an den Positionen 93 und 94. Dieses liegt in der lenkenden Wirkung der Neufelder Rinne, insbesondere bei Ebbe und niedrigen Wasserständen, begründet. Die Messpositionen 93 und 94 befinden sich demnach noch im Einflussbereich der Rinne.

Aufgrund der zeitlichen Beschränkung der Messungen an den Positionen 93 und 94 liegen für Tiden mit erhöhten Wasserständen keine bzw. nur sehr wenige Ereignisse vor.

Der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten auf höher gelegenen Ästuarwattflächen ähnelt einem Ausschnitt des Verlaufes im Ästuar, wobei der Betrag der Strömungsgeschwindigkeiten auf den Wattflächen jedoch deutlich unter denen des Ästuars liegt. Zudem besitzt die Bathymetrie einen Einfluss auf die Strömungsparameter, wenn die Verbindung zum Hauptstrom abreißt und die lokale Geländeneigung Strömungsrichtung und -geschwindigkeit bestimmt. Auf höher gelegenen Ästuarwattflächen kann kein klarer Flutstromkenterpunkt ausgemacht werden. Die Strömungsgeschwindigkeiten bei Stauwasser liegen deutlich über denen im Ästuar.

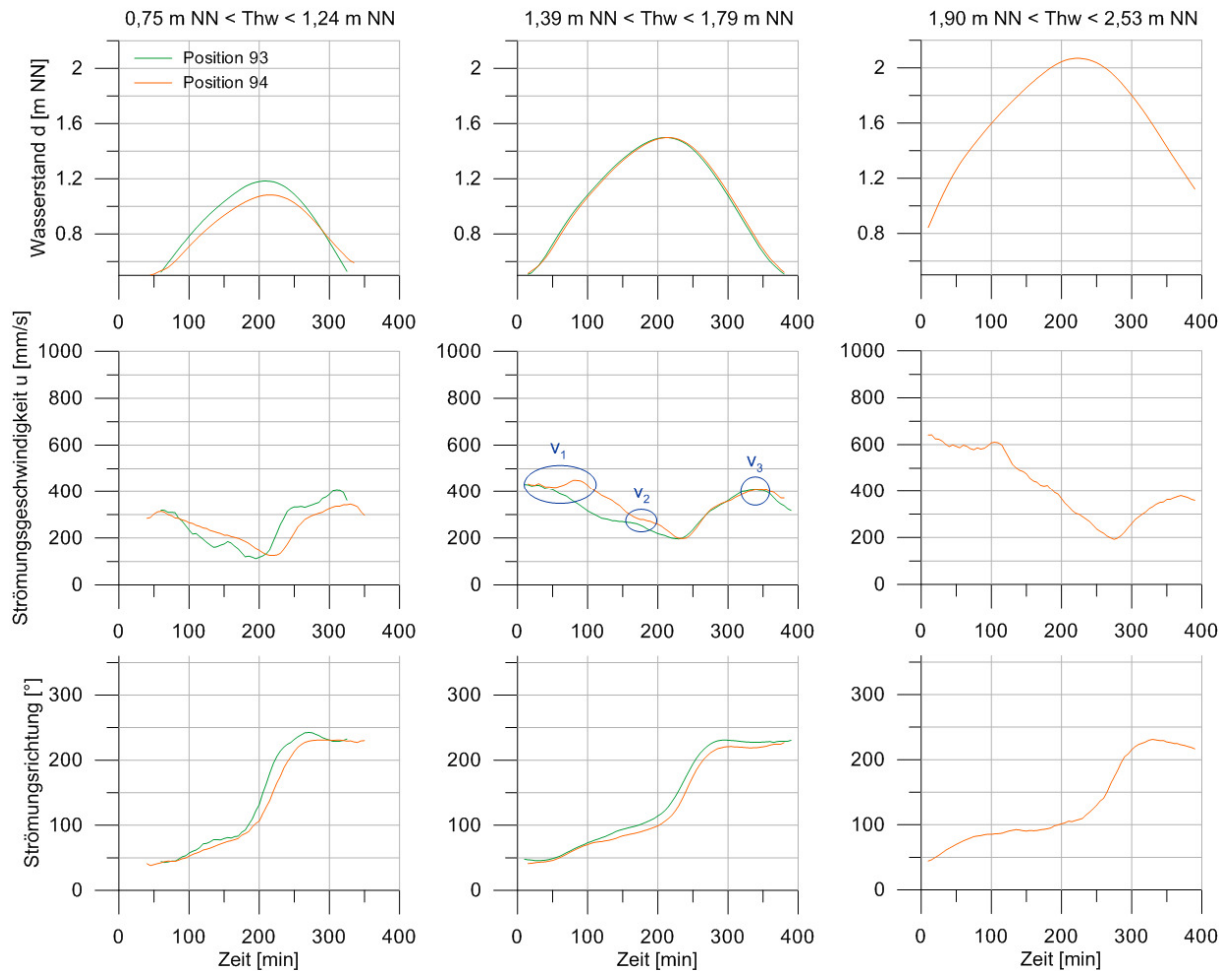


Abbildung 57: Mittlere Tidewasserstände und Strömungsparameter an den Messpositionen 93 und 94 (v_1 = maximale Flutstromgeschwindigkeit, v_2 = Sattelpunkt der Flutstromgeschwindigkeit, v_3 = maximale Ebbe-stromgeschwindigkeit)

Tabelle 16: Charakteristische Strömungsgeschwindigkeiten [mm/s] an den Messpositionen 93 und 94

	Position 93			Position 94		
	v_1	v_2	v_3	v_1	v_2	v_3
Gesamt	n = 40			n = 78		
Mittelwert	455	287	432	526	359	434
Maximalwert	981	436	523	1049	585	615
Minimalwert	316	184	321	316	214	267
0,75 < Thw < 1,24	n = 10			n = 18		
Mittelwert	359	223	403	373	295	407
Maximalwert	407	262	472	418	430	533
Minimalwert	316	184	325	316	214	300
1,39 < Thw < 1,79	n = 19			n = 39		
Mittelwert	521	323	452	539	374	449
Maximalwert	981	436	523	906	585	615
Minimalwert	408	239	393	362	247	313
1,90 < Thw < 2,53	n = 0			n = 4		
Mittelwert	-	-	-	791	466	433
Maximalwert	-	-	-	1049	524	504
Minimalwert	-	-	-	570	434	385

7.2.2.3 Wattkante

Abbildung 58 stellt die mittleren Verläufe der Strömungsparameter an den Positionen 8 und 15, die an der Wattkante gelegen sind, dar. An beiden Positionen sind die Maxima in der Flut- und in der Ebbephase deutlicher erkennbar als auf höher gelegenen Wattflächen. Durch die Lage näher zur Wattkante ist das Maximum in der Flutphase an Position 8 etwas stärker ausgeprägt ($v_1 = 770$ mm/s; vgl. Tabelle 17) als an Position 15 ($v_1 = 675$ mm/s). An beiden Positionen sind diese Maxima größer als die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Ebbephase (Position 8: $v_2 = 389$ mm/s, Position 15: $v_2 = 431$ mm/s). An Position 8 ist der Unterschied zwischen v_1 und v_2 größer als an Position 15.

Der Verlauf der Strömungsrichtung ist an beiden Positionen nahezu identisch. Die Aufzeichnung der Strömungsrichtung beginnt bei ca. 40° und steigt innerhalb von 200 Minuten auf 100° an. Dann verändert sich die Strömung über eine Dauer von etwa 120 Minuten kontinuierlich auf 230° bis 240° und schwenkt dann innerhalb von 180 bis 200 Minuten auf ca. 200° . An Position 8 dreht die Strömungsrichtung gegen Ende der Aufzeichnung auf etwa 150° zurück, was dem Gefälle des Watts nach Süden in diesem Bereich entspricht.

Tiden mit erhöhten Scheitelwerten konnten nur an Position 15 in aussagekräftiger Anzahl aufgezeichnet werden. In diesen Fällen steigt v_1 im Mittel auf 1.112 mm/s an; v_2 steigt auf 487 mm/s an, so dass die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Flutphase deutlicher überwiegt als während Tiden mit mittleren Scheitelwerten. Die Strömungsrichtung ist im Vergleich zu mittleren Tiden in der Flutphase über einen Zeitraum von etwa 120 Minuten nahezu konstant bei 100° wenn die Wattflächen des Neufelder Watts von West nach Ost überströmt werden.

Bei Tiden, deren Scheitelwerte geringere Höhen erreichen als mittlere Tiden, sind an beiden Positionen die Strömungsmaxima in der Flutphase deutlich reduziert. Die Maxima in der Ebbephase sind nur wenig geringer als während Tiden mit mittleren Scheitelwasserständen (Position 15) bzw. sogar etwas erhöht (Position 8). Der Unterschied zwischen den maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Flut- und Ebbephase nimmt somit ab. Im Verlauf der Strömungsrichtung ist im Vergleich zu mittleren Tiden kein nennenswerter Unterschied zu erkennen.

Strömungsgeschwindigkeiten an der Wattkante liegen über denen höher gelegener Wattflächen, jedoch noch unter den Strömungsgeschwindigkeiten im Ästuar. Wie auch auf höher gelegenen Wattflächen sind die Strömungsgeschwindigkeiten an der Wattkante bei Stauwasser deutlich höher als im Ästuar. An der Wattkante kann kein eindeutiger Flutstromkenterpunkt bestimmt werden. Bei geringen Tidewasserständen beeinflusst die lokale Bathymetrie die Strömungsparameter.

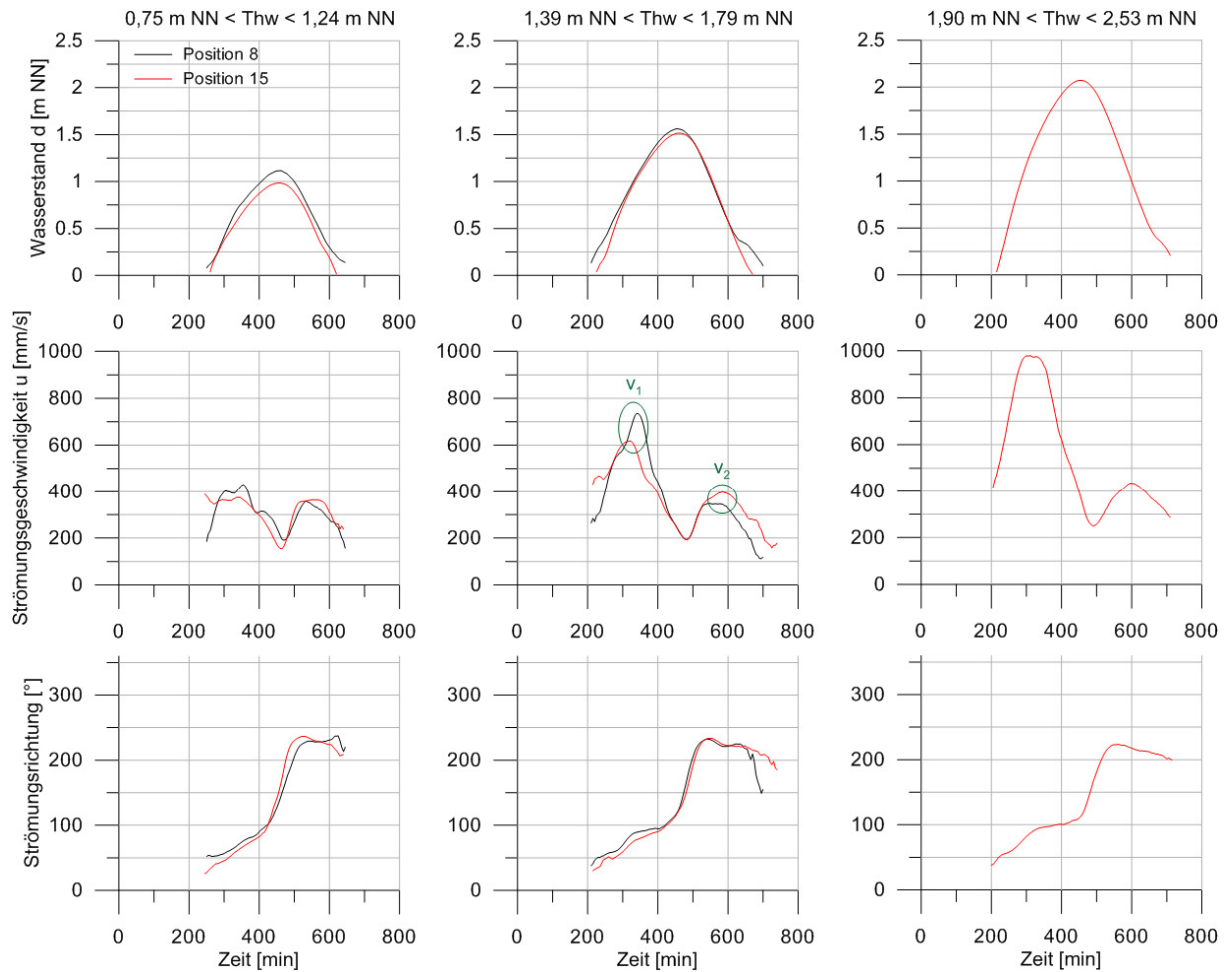


Abbildung 58: Mittlere Tidewasserstände und Strömungsparameter an den Messpositionen 8 und 15
(v_1 = maximale Flutstromgeschwindigkeit, v_2 = maximale Ebbestromgeschwindigkeit)

Tabelle 17: Charakteristische Strömungsgeschwindigkeiten [mm/s] an den Messpositionen 8 und 15

	Position 8		Position 15	
	v_1	v_2	v_1	v_2
Gesamt	n = 49		n = 372	
Mittelwert	667	386	614	423
Maximalwert	1.182	754	1.499	697
Minimalwert	355	254	217	237
0,75 < Thw < 1,24	n = 17		n = 94	
Mittelwert	463	365	459	402
Maximalwert	576	516	871	549
Minimalwert	355	254	217	265
1,39 < Thw < 1,79	n = 21		n = 162	
Mittelwert	770	389	675	431
Maximalwert	1.030	474	977	507
Minimalwert	504	325	423	305
1,90 < Thw < 2,53	n = 2		n = 14	
Mittelwert	1.160	539	1.112	487
Maximalwert	1.182	754	1.499	539
Minimalwert	1.138	323	763	424

7.2.2.4 Neufelder Rinne

Abbildung 59 zeigt die mittleren Strömungsverläufe an den Positionen 1, 2 und 3 in der Neufelder Rinne. Position 1 liegt am nördlichen Rand der Rinne, Position 2 in der Mitte und Position 3 am südlichen Rand. Im Jahr 2008 wurde die Position 3 wieder besetzt, unterlag aber durch die veränderte Lage des Hauptteils der Neufelder Rinne (vgl. Kapitel 7.3) leicht veränderten Randbedingungen. Daher sind die Daten der Position 3 aus dem Jahr 2008 kenntlich gemacht.

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten in der Flut- und Ebbephase sind während mittlerer Tiden deutlich ausgeprägt. Im Allgemeinen sind die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten größer als die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten. Im Jahr 2008 sind diese Unterschiede besonders deutlich.

Die Verläufe der Strömungsrichtungen sind an den Positionen 1, 2 und 3 nahezu identisch. Die Aufzeichnung der Strömungsrichtung beginnt bei ca. 60° und verläuft über etwa 120 Minuten konstant entlang der Achse der Neufelder Rinne. Nach Überströmen der Wattflächen westlich der Rinne dreht die Strömung auf 90° bis 100° und folgt diesem Verlauf für ca. 60 Minuten. Anschließend kentert der Flutstrom und die Strömungsrichtung dreht innerhalb von ca. 60 Minuten auf ca. 240° . Der Achse der Rinne folgend fließt der Ebbestrom bis zum Ende der Aufzeichnung in diese Richtung.

Bei Tiden mit erhöhten Scheitelwerten steigen die Strömungsmaxima in der Flutphase v_1 an allen Positionen an und sind an allen Positionen größer als die maximale Strömungsgeschwindigkeit in der Ebbephase. In der Mitte der Rinne sowie am nördlichen Rand sind diese Unterschiede am größten. Im Verlauf der Strömungsrichtungen gibt es keine wesentlichen Unterschiede. Lediglich die Phase der konstanten Strömungsrichtungen in der Flutphase nach Überströmen der Wattflächen ist zeitlich ausgedehnter.

Während Tiden mit verringerten Scheitelwasserständen sinkt die maximale Flutstromgeschwindigkeit v_1 an allen Positionen im Vergleich zu mittleren Tiden. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit v_2 bleibt nahezu unverändert. Dies hat zur Folge, dass die maximale Ebbestromgeschwindigkeit größer wird als die maximale Flutstromgeschwindigkeit. Im Verlauf der Strömungsrichtung gibt es im Vergleich zu mittleren Tiden keine nennenswerten Unterschiede.

Insgesamt ist die richtungsbestimmende Wirkung der Neufelder Rinne bei niedrigen Wasserständen in der Flutphase und insbesondere während der Ebbephase deutlich erkennbar. Nur während Tiden mit erhöhten Scheitelwasserständen sind die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in der Neufelder Rinne größer als die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten.

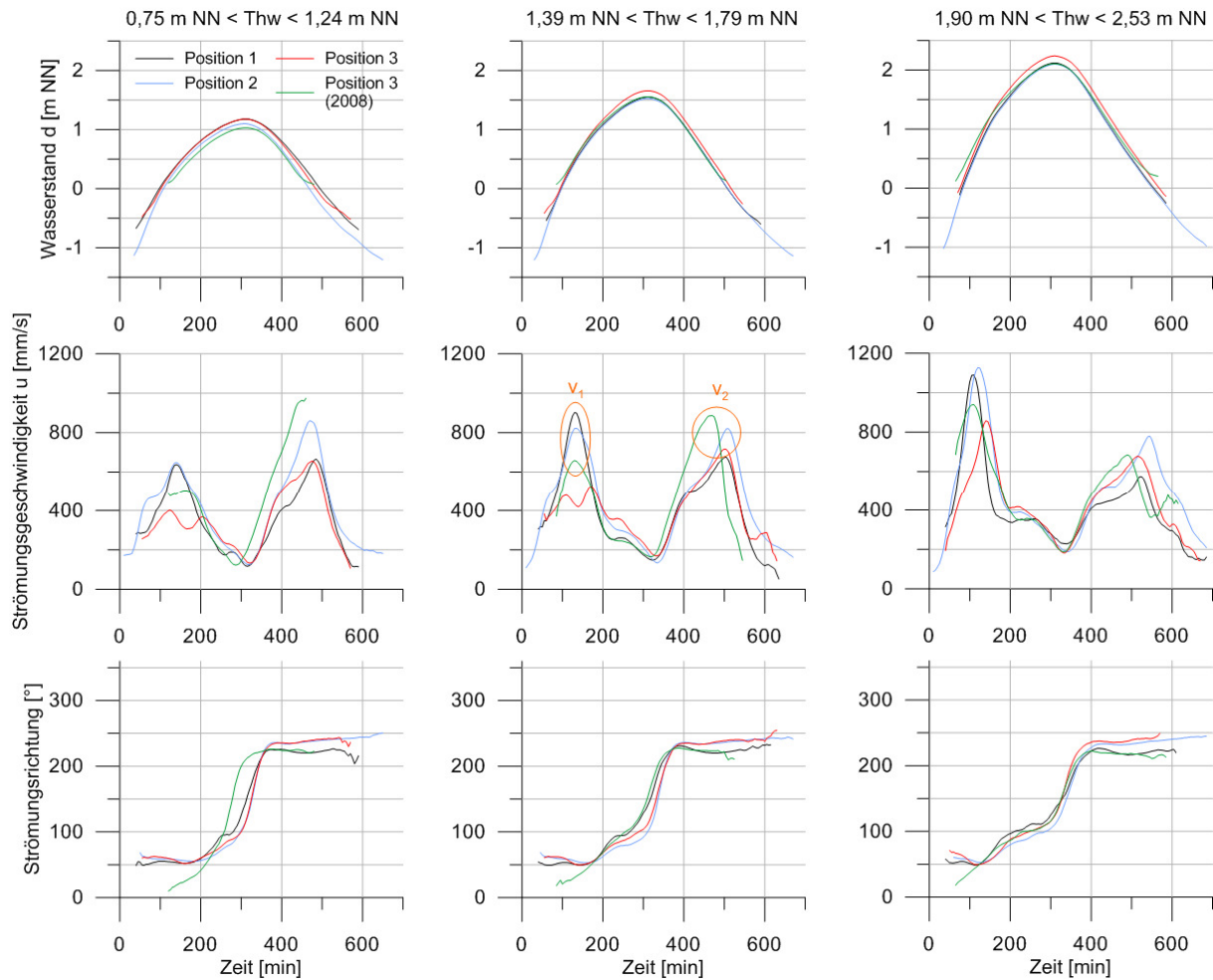


Abbildung 59: Mittlere Tidewasserstände und Strömungsparameter an den Messpositionen 1, 2, 3 und 3 (2008)

Tabelle 18: Charakteristische Strömungsgeschwindigkeiten [mm/s] an den Messpositionen 1, 2, 3 und 3 (2008)

	Position 1		Position 2		Position 3		Position 3 (2008)	
	v_1	v_2	v_1	v_2	v_1	v_2	v_1	v_2
Gesamt	n = 57		n = 80		n = 119		n = 237	
Mittelwert	993	743	868	909	630	665	686	831
Maximalwert	1.297	979	1.290	1.269	1.350	945	1.289	1.434
Minimalwert	638	517	545	635	346	261	245	338
0,75 < Thw < 1,24	n = 6		n = 14		n = 106		n = 64	
Mittelwert	721	713	699	967	593	680	547	807
Maximalwert	821	797	823	1.234	1.223	945	727	1.434
Minimalwert	638	664	548	691	346	352	339	338
1,39 < Thw < 1,79	n = 35		n = 43		n = 53		n = 102	
Mittelwert	1.008	752	872	886	562	714	743	869
Maximalwert	1.169	979	1.044	1.269	916	911	1.243	1.305
Minimalwert	808	623	662	635	384	488	510	461
1,90 < Thw < 2,53	n = 6		n = 6		n = 32		n = 14	
Mittelwert	1.212	711	1.176	885	712	621	1.028	776
Maximalwert	1.297	840	1.290	976	1.223	855	1.176	1.168
Minimalwert	1.001	517	1.068	703	447	352	820	574

Im Jahr 2009 wurden zwei weitere Messstationen in der Neufelder Rinne installiert. Im Wesentlichen sollten die Unterschiede des Sedimenttransportes entlang der Rinne ermittelt werden. Die Daten können jedoch zur Überprüfung der aus den Positionen 1, 2 und 3 abgeleiteten Aussagen dienen. Die lenkende Wirkung der Neufelder Rinne ist auch an den Positionen 91 und 92 erkennbar (Abbildung 60). Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich die Lage der Rinne im Vergleich zu den Messungen im Jahr 2006 leicht verändert hat. Auch die Messpositionen 91 und 92 haben unterschiedliche Lagen in der Rinne. Daher sind die Verläufe der Strömungsrichtungen nicht deckungsgleich. Die oben getätigten Aussagen werden jedoch bestätigt. Weiterhin sind die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten an beiden Positionen geringer als die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten. Im Vergleich zu den Messungen aus dem Jahr 2006 sind die Unterschiede zwischen diesen beiden Maxima jedoch deutlich größer. Im Untersuchungszeitraum 2009 war die Dominanz des Ebbestroms größer als im Untersuchungszeitraum des Jahres 2006.

Position 91 liegt im nordöstlichen Bereich des Hauptteils der Neufelder Rinne. Die Strömungsrichtung ist in der Flut- aber insbesondere in der Ebbephase vom Verlauf der Achse der Rinne gelenkt. Weiterhin sind die Strömungsmaxima deutlich ausgeprägt. Position 92 liegt im südwestlichen Bereich des Hauptteils der Rinne am Übergang zum Einfahrtbereich. Diese Lage beeinflusst die Strömungsrichtung sowohl während des Flut- als auch des Ebbestroms. Insbesondere das Maximum der Strömungsgeschwindigkeit in der Flutphase ist breiter als an Position 91 und in zwei einzelne Hochpunkte unterteilt. Der erste entsteht zu Beginn der Flut, wenn die Bewässerung der Rinne zunächst durch die enge Einfahrt erfolgt. Der zweite Hochpunkt kommt dann zustande, wenn die Wattflächen im Einfahrtbereich überströmt werden. Das Maximum in der Ebbephase tritt später ein als an Position 91 und wird im Wesentlichen durch das von den Wattflächen ablaufende Wasser beeinflusst.

Bei geringeren Wasserständen besitzt die Bathymetrie von Prielen auf Ästuarwatten eine lenkende Wirkung auf die Strömungsrichtung. Im Priel bildet sich ein eindeutiges Maximum der Flutstromgeschwindigkeit sowie der Ebbestromgeschwindigkeit aus. Priele auf Ästuarwatten werden durch den Ebbestrom geprägt. Bei höheren Wasserständen wird der Priel entsprechend der Strömungsrichtung auf den ihn umgebenden Wattflächen überströmt. Die Strömungsgeschwindigkeiten in der Stauwasserphase sind größer als im Ästuar, der Flutstrom kentert schneller als auf den Wattflächen.

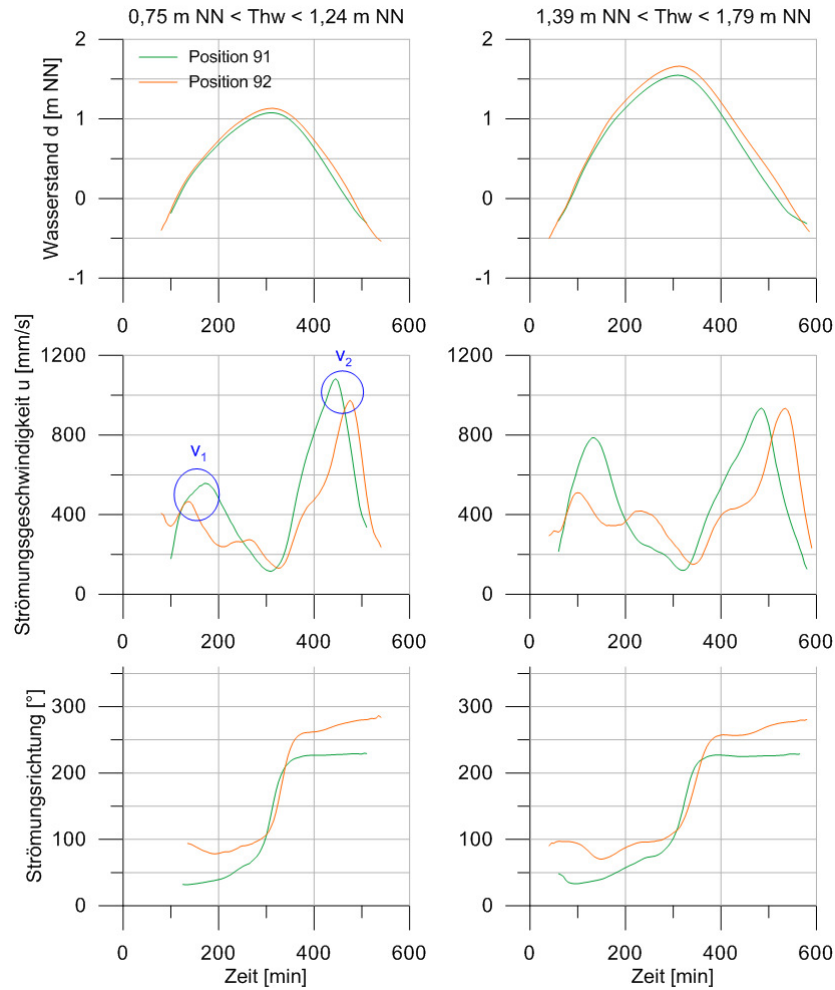


Abbildung 60: Mittlere Tidewasserstände und Strömungsparameter an den Messpositionen 91 und 92

Tabelle 19: Charakteristische Strömungsgeschwindigkeiten [mm/s] an den Messpositionen 91 und 92

	Position 91		Position 92	
	v_1	v_2	v_1	v_2
Gesamt	n = 21		n = 19	
Mittelwert	772	1.028	577	1.003
Maximalwert	1.161	1.312	896	1.172
Minimalwert	486	709	495	754
0,75 < Thw < 1,24	n = 5		n = 3	
Mittelwert	580	1.174	521	968
Maximalwert	686	1.305	537	1.075
Minimalwert	486	1.076	495	912
1,39 < Thw < 1,79	n = 10		n = 12	
Mittelwert	845	1.053	561	980
Maximalwert	936	1.312	640	1.172
Minimalwert	752	709	499	754
1,90 < Thw < 2,53	n = 0		n = 1	
Mittelwert	-	-	896	1.017
Maximalwert	-	-	-	-
Minimalwert	-	-	-	-

7.2.3 Wind

Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind maßgebende Parameter für die Entwicklung und Ausprägung von Seegang, aber auch für die jeweils auftretenden Tidewasserstände. Aufgrund der Nähe zum Untersuchungsgebiet werden die Daten der Windmessstation Cuxhaven des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Abbildung 61 zeigt die entsprechende Windstatistik über den Untersuchungszeitraum vom 29.06.2006 bis zum 26.10.2009.

Die vorherrschende Windrichtung im untersuchten Zeitraum und Gebiet ist Südwest, wobei Windgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s aus diesen Richtungen selten vorkommen. Windereignisse aus westlichen bis west-nordwestlichen Richtungen sorgen mit häufiger auftretenden Windgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s für erhöhte Wasserstände und Sturmfluten.

Bei allgemein seltener auftretenden Windrichtungen aus Ost kommt es im Vergleich gesehen häufiger zu höheren Windgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s. Diese Ereignisse sorgen für niedrigere Wasserstände im Untersuchungsgebiet.

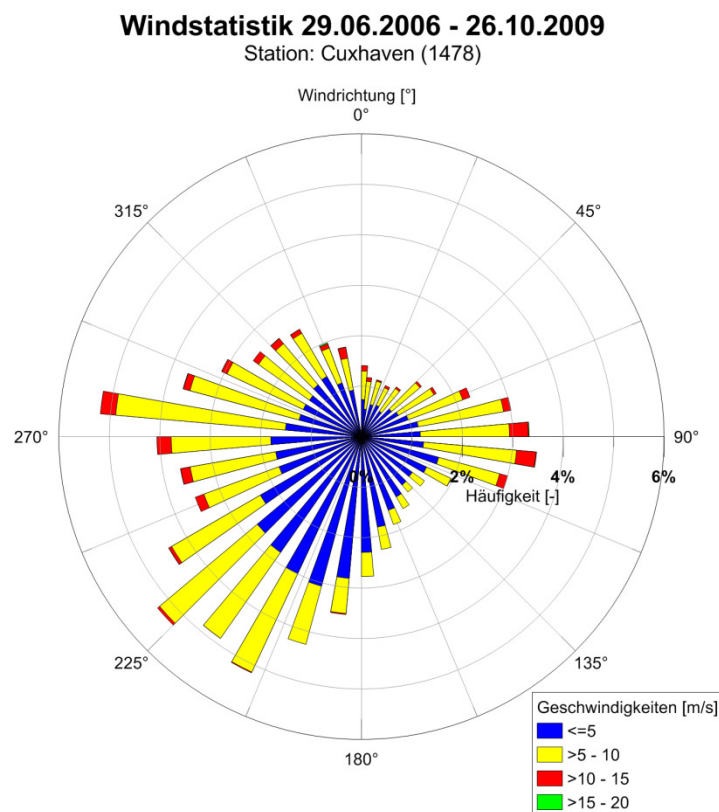


Abbildung 61: Windstatistik der Station Cuxhaven (Daten: Deutscher Wetterdienst)

7.2.4 Seegang

Wie eingangs dieses Kapitels beschrieben, gelang es nach Umstellung auf die eigens konstruierten Drucksonden, mehr oder weniger kontinuierlich hochfrequente Daten zur Wasserspiegelauslenkung aufzuzeichnen. Die Druckmessungen wurden zunächst gemäß Kapitel 6.1.1.3 umgerechnet. Durch eine Auswertung im Frequenzbereich konnten aus diesen Daten Informationen zum Seegang gewonnen werden. Für Auswertungen im Frequenzbereich wird der Seegang als Überlagerung von sinusförmigen Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen angesehen. Mittels einer Fourier-Analyse können die Amplituden der in einer Zeitreihe der Wasserspiegelauslenkung enthaltenen Schwingungen und deren phasenmäßige Zuordnung bestimmt werden. Das Ergebnis liefert die Verteilung der Amplituden und Phasen über die Frequenz. Die Resultate der Frequenzanalyse werden in der Regel als Energiedichtespektrum dargestellt, aus dem die gewünschten Seegangparameter als Momente n-ter Ordnung des Spektrums abgeleitet werden können (EAK, 2002).

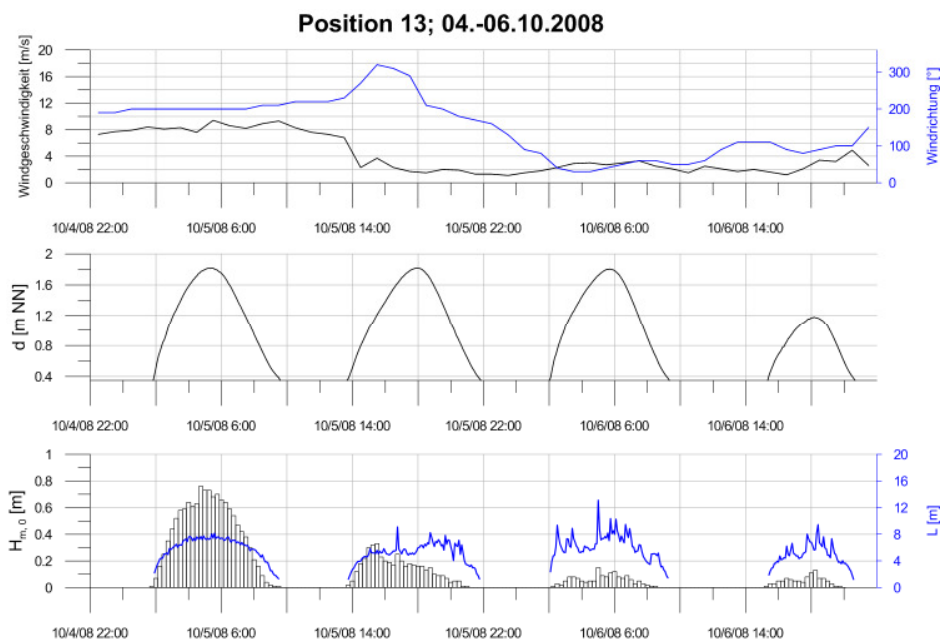


Abbildung 62: Seegangparameter, Windverhältnisse und Wasserstände an Position 13 vom 04.-06.10.2008

Abbildung 62 zeigt exemplarisch den Verlauf der signifikanten Wellenhöhen⁸ sowie der mittleren Wellenlängen über vier Tiden an Position 13 im Oktober 2008. Im obersten Graphen der Abbildung sind zudem Windrichtung und Windgeschwindigkeit aufgetragen. Im mittleren Graphen ist der Tidewasserstand dargestellt. Während der Morgentide des 05. Oktober 2008 führen Windgeschwindigkeiten von etwa 8 m/s im Stundenmittel aus süd-südwestlichen Richtungen zu signifikanten Wellenhöhen von bis zu 0,80 m und Wellenlän-

⁸ Die signifikante Wellenhöhe entspricht dem Mittelwert des Drittels der höchsten Wellen.

gen von ca. 8 m. Die Abhängigkeit der Wellenhöhen von der Tide ist deutlich erkennbar. Die höchsten Wellen entwickeln sich erst bei höheren Wasserständen, wenn sowohl die Wattflächen des Neufelder Watts als auch der südwestlich des Untersuchungsgebietes gelegene Medemgrund überflutet sind. Am Nachmittag des 05. Oktober 2008 nehmen die Windgeschwindigkeiten ab. Die Windrichtung dreht zunächst auf Nordwest. Während der Abendtide führen die dadurch resultierenden größeren Windwirklängen erst noch zu Wellenhöhen von etwa 0,30 m, bevor der Wind auf östliche Richtungen schwenkt und sich die Wellenhöhen auf ca. 0,20 m reduzieren. Wellenlängen liegen während dieser Tide zwischen 6 m und 8 m. Während der Folgetiden am 06. Oktober 2008 weht der Wind aus nordöstlichen bis östlichen Richtungen mit Geschwindigkeiten von 2 bis 4 m/s. Dies führt zu geringen signifikanten Wellenhöhen von 0,10 m und weniger.

Die signifikanten Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet hängen von der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung und der damit verbundenen entstehenden Windwirklänge sowie dem Tidewasserstand ab. Die Windbedingungen haben darüber hinaus einen weiteren, mittelbaren Einfluss auf die Wellenhöhen, da der resultierende Windstau die Tidewasserstände und damit die möglichen Wellenhöhen beeinflusst.

Die oberen drei Graphen der Abbildung 63 zeigen die Verteilung relativer Häufigkeiten aller gemessenen signifikanten Wellenhöhen an den Messpositionen 13, 15 und 3 (2008). Darin enthalten sind auch die geringen Wellenhöhen zu Beginn der Flut und gegen Ende der Ebbe, die einen großen Anteil besitzen. Die meisten Wellen treten im Bereich zwischen 0,05 m und 0,30 m auf. Das arithmetische Mittel aller Wellenhöhen liegt an Position 13 bei 0,17 m, an Position 15 bei 0,20 m und an Position 3 (2008) bei 0,19 m. Die etwas tiefere Lage der Messposition 15 erhöht den Anteil der Wellen im Bereich zwischen 0,05 m und 0,30 m im Vergleich zu den anderen beiden Positionen. Die unteren drei Graphen zeigen die relativen Häufigkeiten des Drittels der größten signifikanten Wellenhöhen jeder einzelnen Tide an den verschiedenen Messpositionen. Die Häufigkeitsverteilungen gleichen denen der Berücksichtigung aller gemessenen signifikanten Wellenhöhen, die geringen Wellenhöhen unter 0,05 m sind in der zweiten Betrachtung jedoch nicht enthalten. Das arithmetische Mittel der größten Wellenhöhen jeder einzelnen Tide liegt an Position 13 bei 0,27 m, an Position 15 bei 0,28 m und an Position 3 (2008) bei 0,27 m. Bei Wasserständen um das Tidehochwasser herum gleichen sich die Wellenhöhen aller Messpositionen. Werden alle signifikanten Wellenhöhen im Verlauf einer Tide berücksichtigt, erhöht eine tiefere Lage der Messposition den Anteil der Wellen zwischen 0,05 m und 0,30 m leicht.

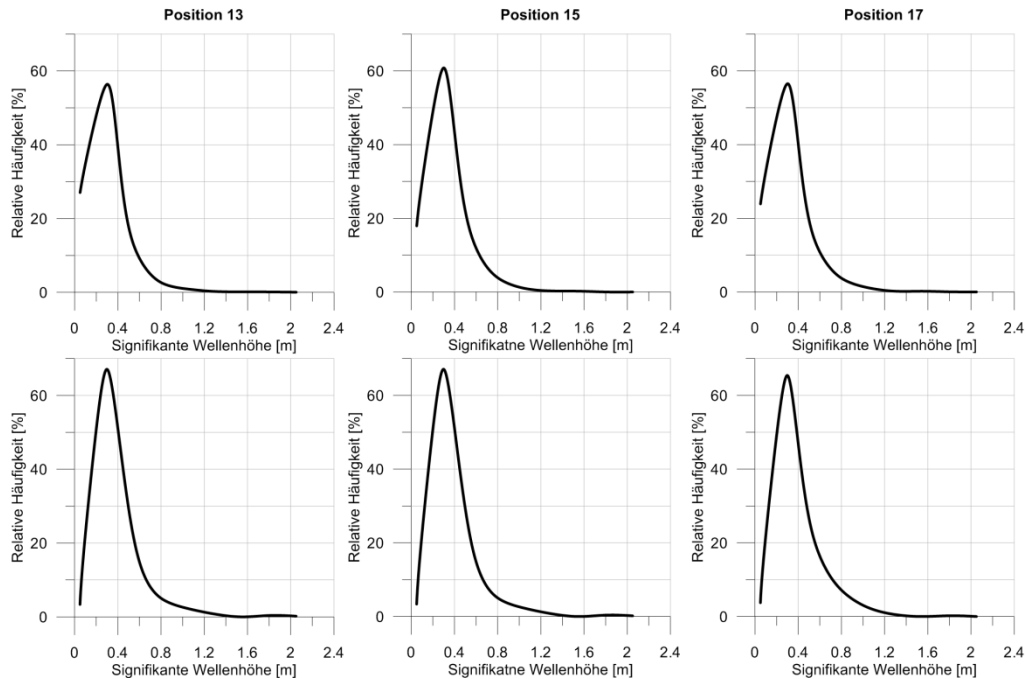


Abbildung 63: Verteilung relativer Häufigkeiten aller gemessenen signifikanten Wellenhöhen (oben) sowie der größten signifikanten Wellenhöhen jeder einzelnen Tide (unten) an verschiedenen Messpositionen

Abbildung 64 zeigt die gemessenen signifikanten Wellenhöhen in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit und -richtung an Position 13. Im oberen Bereich der Abbildung ist die Verteilung der signifikanten Wellenhöhen über alle Windrichtungen dargestellt. Die größten Wellenhöhen treten bei westlichen bis nordwestlichen Windrichtungen auf. Im unteren Teil der Abbildung ist die Abhängigkeit der Wellenhöhen von der Windgeschwindigkeit für die Windrichtungsklassen $75^\circ \leq \theta_{\text{Wind}} < 105^\circ$ (Wind aus östlichen Richtungen) und $215^\circ \leq \theta_{\text{Wind}} < 245^\circ$ (Wind aus westlichen Richtungen) dargestellt.

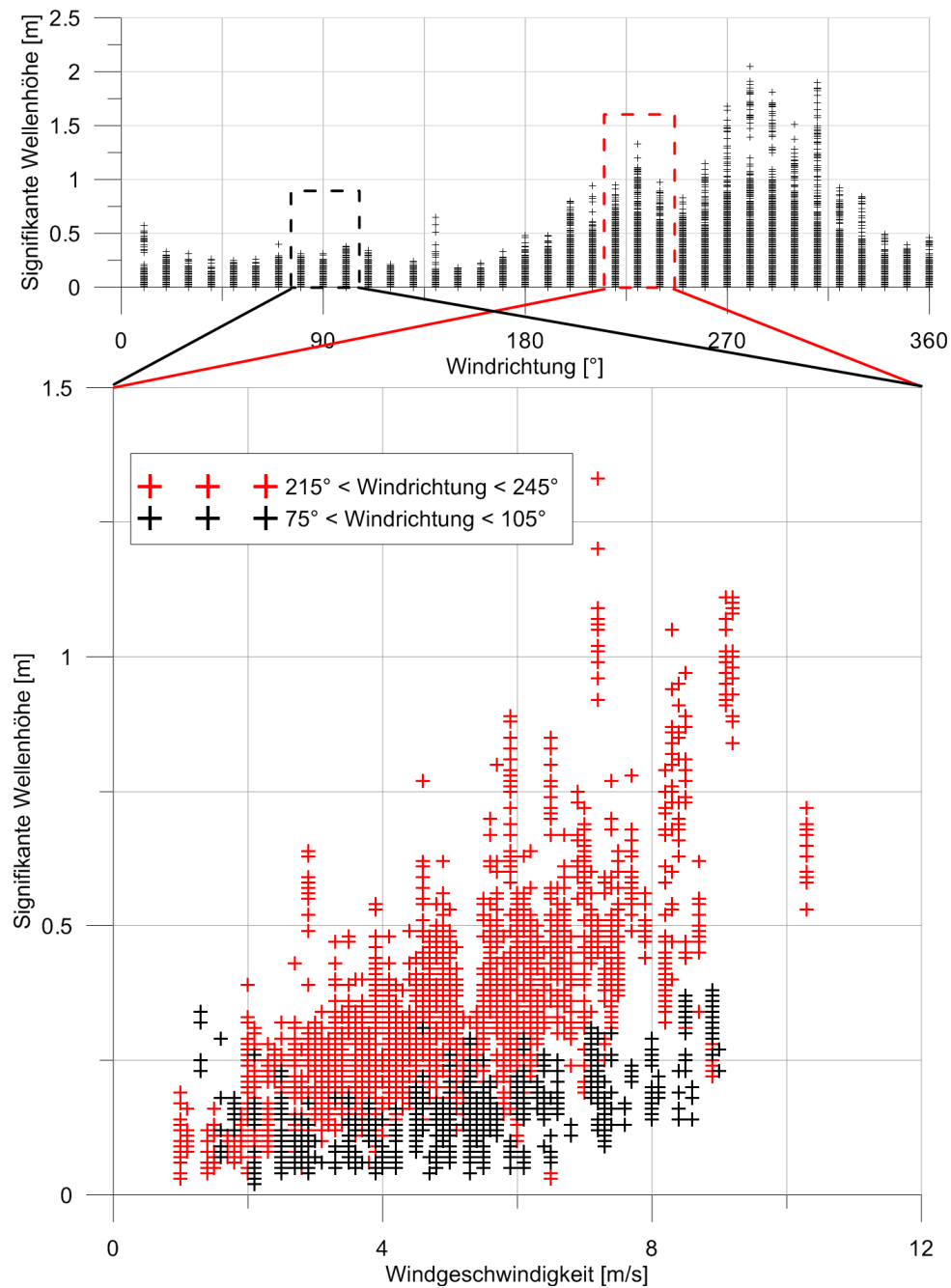


Abbildung 64: Gemessene signifikante Wellenhöhen in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit an Position 13. Beispiele für die Windrichtungsklassen $75^\circ \leq \theta_{\text{Wind}} < 105^\circ$ und $215^\circ \leq \theta_{\text{Wind}} < 245^\circ$

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt die signifikante Wellenhöhe erwartungsgemäß an. Im Richtungssektor zwischen 215° und 245° ist dieser Anstieg deutlich steiler als im Richtungssektor zwischen 75° und 105° . In letzterem Sektor östlicher Windrichtungen ist die Windwirklänge stark reduziert und höhere Windgeschwindigkeiten sorgen in der Regel für geringere Tidewasserstände, die die möglichen Wellenhöhen limitieren.

Abbildung 65 zeigt die Verteilung der an Position 13 gemessenen signifikanten Wellenhöhen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten, verteilt über alle Windrichtungen. Bei Windrichtungen zwischen 0° und 180° treten nur vereinzelt Wellenhöhen von mehr als 0,25 m auf. Wellenhöhen von mehr als 0,50 m werden bei Windrichtungen zwischen 200° und 330° generiert, die größten Wellenhöhen von bis zu 1,6 m ausschließlich bei Windrichtungen zwischen 280° und 310° .

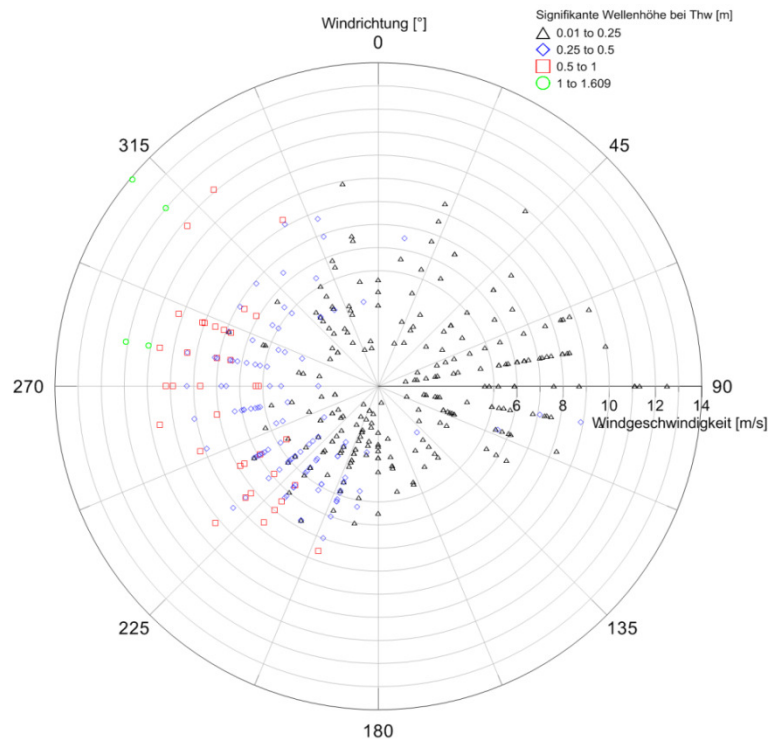


Abbildung 65: Verteilung der an Position 13 gemessenen Wellenhöhen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten über die Windrichtung

7.3 Bathymetrische Veränderungen

Im Laufe der Untersuchungen wurden die Neufelder Rinne sowie die angrenzenden Wattflächen 22-mal mit dem Fächerecholot aufgenommen. Aufgrund der Größe des gesamten Untersuchungsgebietes sowie der geringen Wassertiefen selbst bei Tidehochwasser wurde die regelmäßig gepeilte Fläche auf die Prielstruktur begrenzt. Wie in diesem Kapitel beschrieben, konnten mit diesem Vorgehen die wesentlichen morphologischen Veränderungen erfasst werden.

Durch die exponierte Lage des Untersuchungsgebietes sowie die Beschaffenheit des Messbootes waren Peilungen nicht bei jeder Wetterlage möglich. Angestrebt wurden regelmäßige Messungen in Abständen von sechs bis acht Wochen sowie so bald wie möglich nach

Extremereignissen. Aufgrund von Tide- und Wetterbedingungen war dies nicht immer möglich und die Peilintervalle wurden entsprechend verkürzt oder verlängert.

Wegen der schwierigen äußeren Umstände der Peilungen durch geringe Wassertiefen, Tide und Seegang sowie der grundsätzlichen Eigenschaften der Fächerecholotmessungen (vgl. Kapitel 6.1.2), wurden die aufgezeichneten Daten einer umfassenden Prüfung unterzogen. Zur weiteren Verwendung der Daten war zudem eine Ausdünnung sinnvoll.

7.3.1 Auswertung der Peildaten

Unabhängig von der in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Genauigkeit des Messsystems kann ein Teil der mit einem Fächerecholot erhobenen Daten aufgrund verschiedener Fehlerquellen von der tatsächlichen Lage der einzelnen Punkte abweichen. Während der Messungen im Neufelder Watt haben sich folgende Fehlerquellen als möglich herausgestellt:

1. Ungenaue GPS-Position
2. Falsche Schallgeschwindigkeit in Wasser
3. Zu starke Bewegungen des Messbootes
4. Falsche Interpretation der Schallreflexion

Bei der satellitengestützten Positionsbestimmung gibt es immer Schwankungen der absoluten Genauigkeit. Bei freier Sicht auf den Himmel und durch die Verwendung einer festen Basisstation können die Abweichungen zwar minimiert werden, durch variierende Azimutwinkel und Anzahl der verfügbaren Satelliten ist eine zeitweise Überschreitung der tolerierbaren Abweichung aber möglich. In diesen Perioden, die im Neufelder Watt nur vereinzelt auftraten, wurden die Peilungen jeweils unterbrochen.

Das Profil der Schallgeschwindigkeit in Wasser wurde mehrfach während der Peilungen gemessen. Die Peilungen wurden zudem um den Zeitpunkt des Tidehochwassers herum durchgeführt, also zu einem Zeitpunkt, zu dem eine gute Durchmischung von Temperatur und Salinität gegeben ist. Dennoch kann es örtlich begrenzt über die Wassertiefe zu Temperatur- und Salinitätsschwankungen und somit zu Abweichungen vom verwendeten Schallprofil kommen. Dies führt insbesondere bei den äußeren Schallstrahlen des Echolotes zu falsch berechneten Brechungswinkeln und so zu Fehlmessungen.

Bei starken Schiffbewegungen kann zwischen dem Aussenden und dem Empfangen des Schallsignals eine signifikante Winkeländerung der Schallwandlerplatten auftreten, die zu einer falschen Annahme des Reflexionspunktes auf der Sohle führen kann. Bei zu starkem Seegang trat dies im Neufelder Watt wiederholt auf, so dass einige Messungen abgebrochen werden mussten.

Eine weitere Fehlerquelle ist eine Reflexion des Schallsignals nicht an der Sohle, sondern an Feststoffen, zum Beispiel an Sedimentwolken oder an Luftblasen im Wasser. Durch die verkürzte Laufzeit des Schallsignals ist eine korrekte Bestimmung der Sohlage dann nicht mehr möglich. Dieses Phänomen trat zum Teil bei 180° Richtungswechseln des Bootskurses auf, so dass bei diesen Manövern die Datenaufzeichnung unterbrochen wurde.

Die aufgezeichneten Daten bestehen aus Millionen von Koordinaten, bei deren Prüfung entsprechende Software verwendet werden muss. Neben der automatischen Datenbereinigung muss eine detaillierte visuelle Kontrolle erfolgen, um die Grenzen der verwendeten numerischen Filter richtig zu wählen und so weder gute Messdaten zu löschen, noch offensichtliche Fehlmessungen beizubehalten.

Bei guten Wetterbedingungen erlaubt die Genauigkeit des Fächerecholotes, auch Feinstrukturen wie Riffel in der Größenordnung einiger Zentimeter aufzulösen. Schon bei geringen Windstärken verursacht Seegang jedoch Bootsbewegungen, die trotz geringer Bootsgeschwindigkeiten die Datendichte soweit reduzieren, dass sich diese Feinstrukturen nicht mehr sicher detektieren lassen. Bei der Auswertung der Peildaten und der Wahl der Filtergrenzen wird somit in Kauf genommen, dass Riffel unter Umständen geglättet werden. Größere Strukturen, wie z.B. Wattrinnen und dünenähnliche Strukturen werden aber in jedem Fall erkannt.

Zur Auswertung der Fächerecholotdaten wird das Auswertungsprogramm MBMax verwendet, welches Teil des Softwarepaketes Hypack ist. Hypack wird auch zur Navigation des Messbootes sowie zur Datenerhebung verwendet. MBMax stellt eine Reihe von Filtern bereit, von denen die im Rahmen der Auswertung eingesetzten im Folgenden kurz erläutert werden:

- GPS Pre-Filter: Das eingesetzte GPS-System gibt zusätzlich zur Lage und Höhe die Genauigkeit in Metern sowie einen Wert für die Qualität der Messung aus. Dieser Wert kann genutzt werden, um Messungen einer geringeren Qualität bereits vor der weiteren Auswertung auszuschließen.
- Angle: Alle Punkte, die durch Schallstrahlen mit einem größeren Öffnungswinkel als dem angegebenen erfasst wurden, werden gelöscht. Durch diesen Filter können die äußeren Schallstrahlen herausgefiltert werden, die gerade bei schlechteren Wetterbedingungen einen größeren Fehler aufweisen.
- Spike Limit: Die Messungen werden in Blöcke mit jeweils 16 Einzelmessungen (4 Schallstrahlen, 4 hintereinander liegende Messungen) zusammengefasst. Alle Punkte, deren Höhe mehr als die angegebene Grenze vom Mittelwert abweichen, werden gelöscht.

- Quality Limit: Ähnlich wie das GPS liefert auch das Fächerecholot einen Wert für die Qualität der Messung. Durch diesen Filter werden alle Messungen gelöscht, deren Qualität nicht dem angegebenen Grenzwert entspricht.
- Filter Overhang and Undercut Topography: Dieser Filter beseitigt verstreut liegende Messpunkte, die überhängende oder unterhöhlende topographische Strukturen verursachen würden.

Die Wahl der einzelnen Parameter hängt allgemein sehr stark vom Untersuchungsgebiet ab. Im Untersuchungsgebiet Neufelder Watt treten kaum plötzliche bathymetrische Veränderungen auf, so dass die Grenzen entsprechend eng gesetzt werden können. Tabelle 20 gibt eine Übersicht über die in der Regel verwendeten Filtereinstellungen. Bei stärkeren Bootsbewegungen wurden die Angle Limits auf 70° reduziert, um die fehleranfälligeren Randstrahlen unberücksichtigt zu lassen. Zur Abdeckung der gleichen Fläche sind so jedoch die Fahrspuren der Peilung enger aneinander zu legen.

Tabelle 20: Verwendete Filtereinstellungen für die Auswertung der Fächerecholotdaten

Filter	Wert
GPS Pre-Filter	1 [-]
Port Angle Limit (Backbord)	75 [°]
Starbord Angle Limit (Steuerbord)	75 [°]
Spike Limit	0,15 [m]
Quality Limit	5 [-]
Filter Overhang and Undercut Topography	aktiv

Für die weitere Auswertung in Form von Berechnungen von Höhendifferenzen oder die Erstellung von Geländeschnitten, empfiehlt sich eine Reduktion auf ein gleichmäßiges Raster. Die Rastergröße darf dabei nicht so groß sein, dass Strukturen wie Übergänge zu Prielen verwischt werden. Andererseits kann durch eine zu kleine Rastergröße keine nennenswerte Reduktion der Datenmenge erzielt werden. Im Rahmen der Untersuchungen im Neufelder Watt erwies sich eine Rastergröße von 0,50 m × 0,50 m als ideal.

7.3.2 Ergebnisse der Peilungen

Im Rahmen der Fächerecholotpeilungen im Untersuchungsgebiet Neufelder Watt folgten die Messungen jeweils dem Verlauf der Neufelder Rinne. Durch die auftretenden Verschiebungen der Rinne war die genaue Lage vor der Vermessung niemals klar. An der erwarteten Position der Einfahrt zur Neufelder Rinne wurde dem Verlauf der Wattkante so lange gefolgt, bis eine Verschiebung der Höhenlinien in Richtung Süden festgestellt wurde. Dieses Ebbdelta markierte stets die Lage der Einfahrt. Von hier aus folgten die Peilungen der Neufelder

Rinne nach Nordosten, bis deren Achse in einen West-Ost-Verlauf übergang. Ab dieser Stelle traten keine nennenswerten Veränderungen mehr auf. Im Anschluss wurde die gesamte Breite der Rinne gepeilt, wobei als nördliche bzw. südliche Begrenzung die -0,50 m NN Linie gewählt wurde.

Abbildung 66 zeigt das Ergebnis der Fächerecholotmessung vom 27. Juli 2009. Das beschriebene Ebbdelta ist am südlichen Ende der Einfahrt deutlich erkennbar. Es schließt sich der als Einfahrt bezeichnete Bereich an, der im Verlaufe der Untersuchung den größten Veränderungen unterlag. Der tiefere, als Hauptteil bezeichnete Abschnitt der Neufelder Rinne hat eher einen Südwest-Nordost-Verlauf. Im sich anschließenden Bereich mit einem West-Ost-Verlauf, der nach Osten hin flach ausläuft, traten während der Untersuchungen nur geringe Veränderungen auf. Die weiteren Auswertungen konzentrieren sich daher auf die Einfahrt, den Hauptteil sowie das Längsprofil der Neufelder Rinne. Die Veränderungen werden in den Kapiteln 7.3.3, 7.3.4 und 7.3.5 anhand der in Abbildung 66 eingezeichneten Profile erläutert.

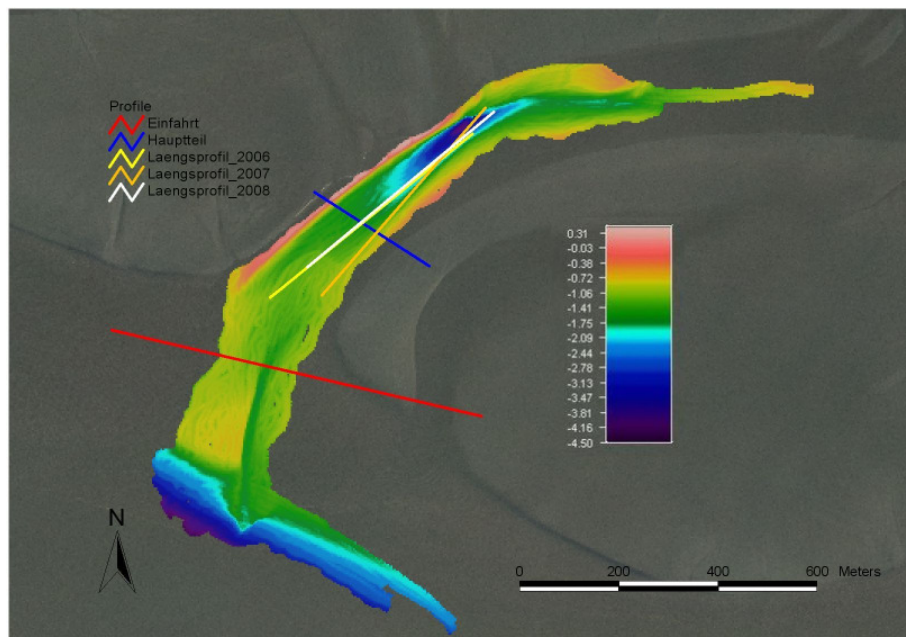


Abbildung 66: Ergebnis der Fächerecholotmessung vom 27.07.2009 mit Lage der Profile; Höhenangaben in m NN

Tabelle 21 zeigt eine Übersicht von 8 der 22 Peilungen zwischen Juni 2006 und September 2009. Es ist jeweils der gleiche Bildausschnitt dargestellt. In den ersten vier Aufnahmen ist deutlich die Veränderung des Hauptteils der Neufelder Rinne erkennbar. Der Verlauf ändert sich von einer WSW-ONO-Ausrichtung im Sommer 2006 bis zu einer SSW-NNO-Ausrichtung zu Beginn des Jahres 2008. Im Anschluss folgt eine entgegengesetzte Bewegung bis wieder ein SW-NO-Verlauf erreicht ist.

Eine Auffälligkeit im Hauptteil ist die Vertiefung im nordöstlichen Abschnitt. Sie resultiert aus einer von Norden an dieser Stelle in die Neufelder Rinne mündenden Watrinne. Je nach Ausprägung dieses Priels verändern sich die Tiefe und Ausdehnung der Vertiefung. Dieses Phänomen ist nicht Bestandteil der weiteren Betrachtungen.

Die Veränderungen der Einfahrt sind in den Aufnahmen fünf bis acht aus dem Jahr 2009 erkennbar. Während der Hauptteil über diesen Zeitraum relativ lagestabil bleibt, treten im Bereich der Einfahrt große Veränderungen auf. Im April 2009 zweigt der Einfahrtsbereich in einem relativ steilen Winkel vom Hauptteil ab. Im südwestlichen Abschnitt des Hauptteils ist die Ausbildung des durch den Ebbestrom in der Rinne verursachten Prallhangs deutlich erkennbar. Wird dieser Prallhang durchstoßen, bildet sich ein neuer Verlauf der Einfahrt aus, der in der Folge in Richtung Osten zu wandern beginnt (Juni bis Juli 2009). Der alte Verlauf der Einfahrt verlandet bald nach der Ausbildung der neuen Einfahrt. Im Februar 2008 wurde ein Zustand dokumentiert, bei dem die neue Einfahrt bereits entstanden ist und der alte Verlauf verlandet.

Anhand der zeitlichen Zuordnung der Peilungen werden bereits die unterschiedlichen Perioden der beschriebenen Veränderungen deutlich.

Tabelle 22 zeigt die Höhendifferenzen zwischen einzelnen Peilungen. Bedingt durch die Verlagerung der Neufelder Rinne wurde nicht immer der gleiche Bereich gepeilt. Eine Berechnung der Höhendifferenzen ist daher nicht immer möglich bzw. sinnvoll. Die ersten drei Aufnahmen mit Vergleichen aus den Jahren 2006 und 2007 zeigen jeweils am östlichen Hang des Hauptteils der Neufelder Rinne Erosion (in rot dargestellt) sowie am westlichen Hang Deposition (in grün dargestellt) – der westliche Hang schiebt sich somit nach Osten vor und die Achse des Hauptteils wandert nach Osten. Durch eine Fixierung des Hauptteils im nordöstlichen Bereich an dem Punkt, an dem der aus Norden kommende Priel mündet und die Ausrichtung der Rinne in einen West-Ost-Verlauf übergeht, erfolgt eine Drehung entgegen dem Uhrzeigersinn. In der Mitte des Jahres 2008 kehrt sich diese Entwicklung um. Im Bereich der Einfahrt liegt auf allen Aufnahmen eine langgestreckte Auflandungsfläche unmittelbar westlich neben einer Erosionsstrecke. Dies zeigt die Migration der Achse der Einfahrt nach Osten an. Auch die damit einhergehende Verlagerung des Ebbdeltas ist erkennbar.

Die wesentlichen Merkmale der Neufelder Rinne können durch die -1,50 m NN Isobathe dargestellt werden. Tabelle 23 zeigt verschiedene Verläufe aus den Jahren 2006 bis 2009 und vergleicht diese miteinander. Dadurch werden die getroffenen Aussagen noch einmal verdeutlicht.

Tabelle 21: Darstellung der Peilergebnisse von 8 Peilungen zwischen Juni 2006 und September 2009; Höhenangaben in m NN

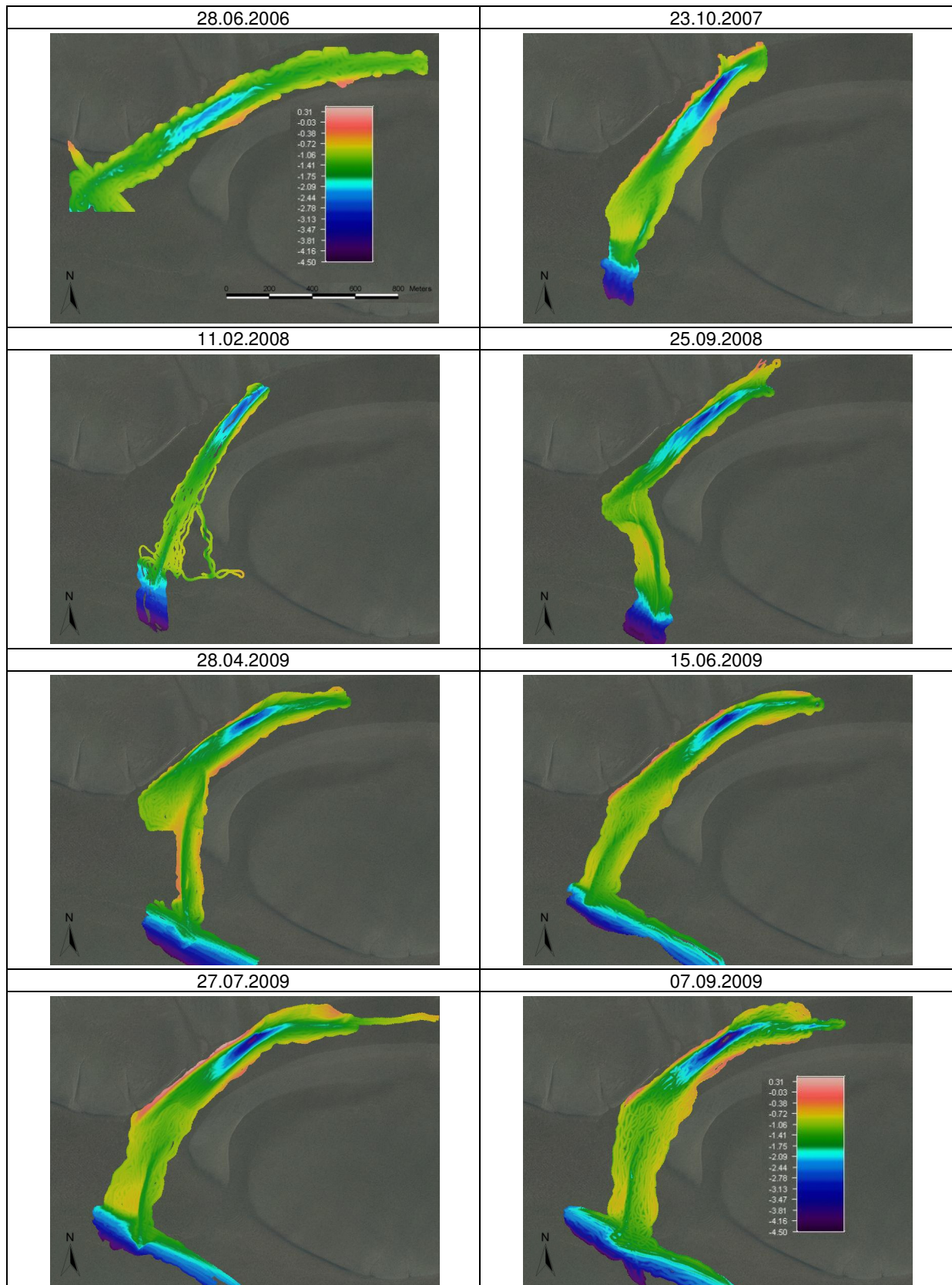
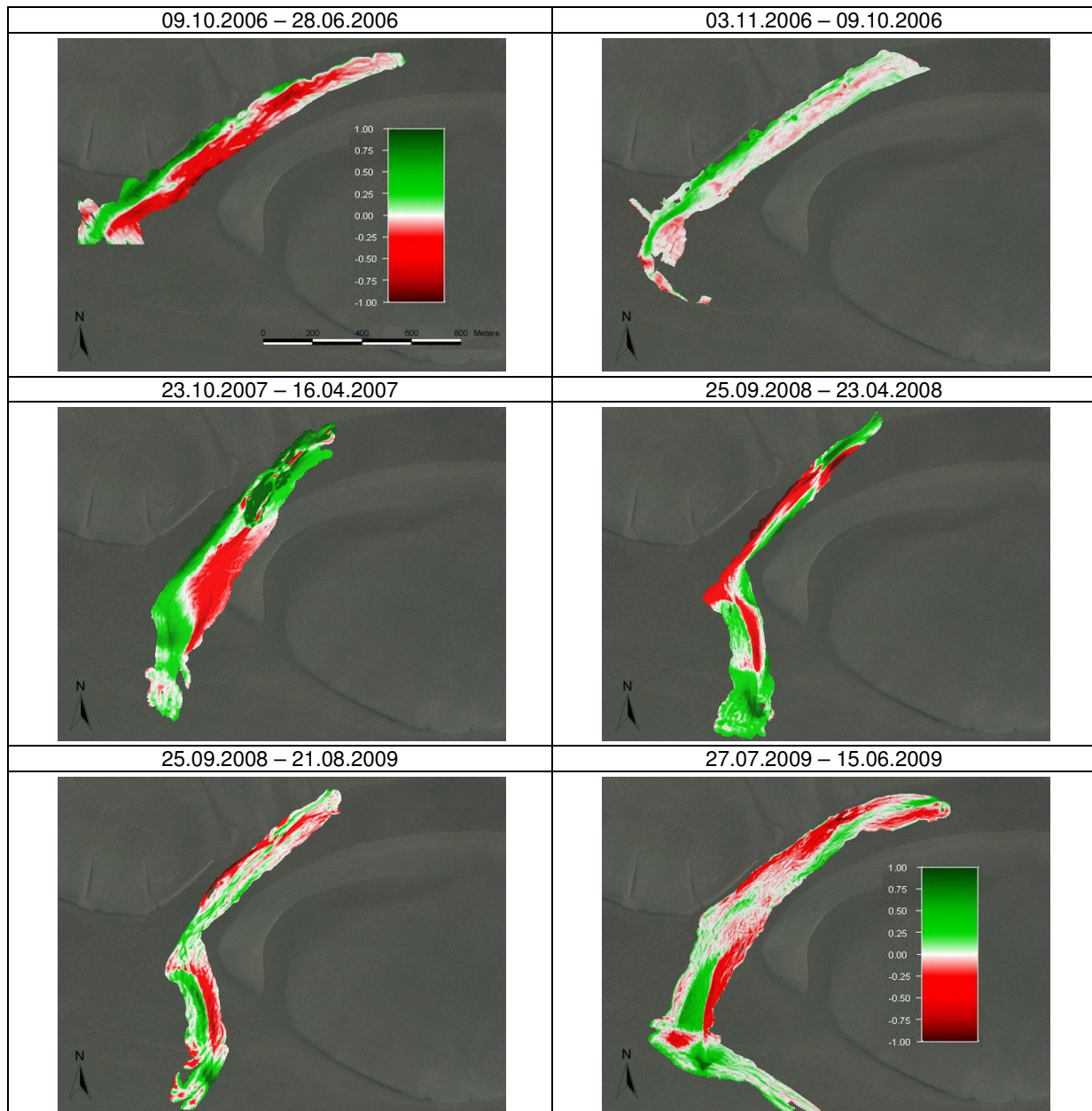


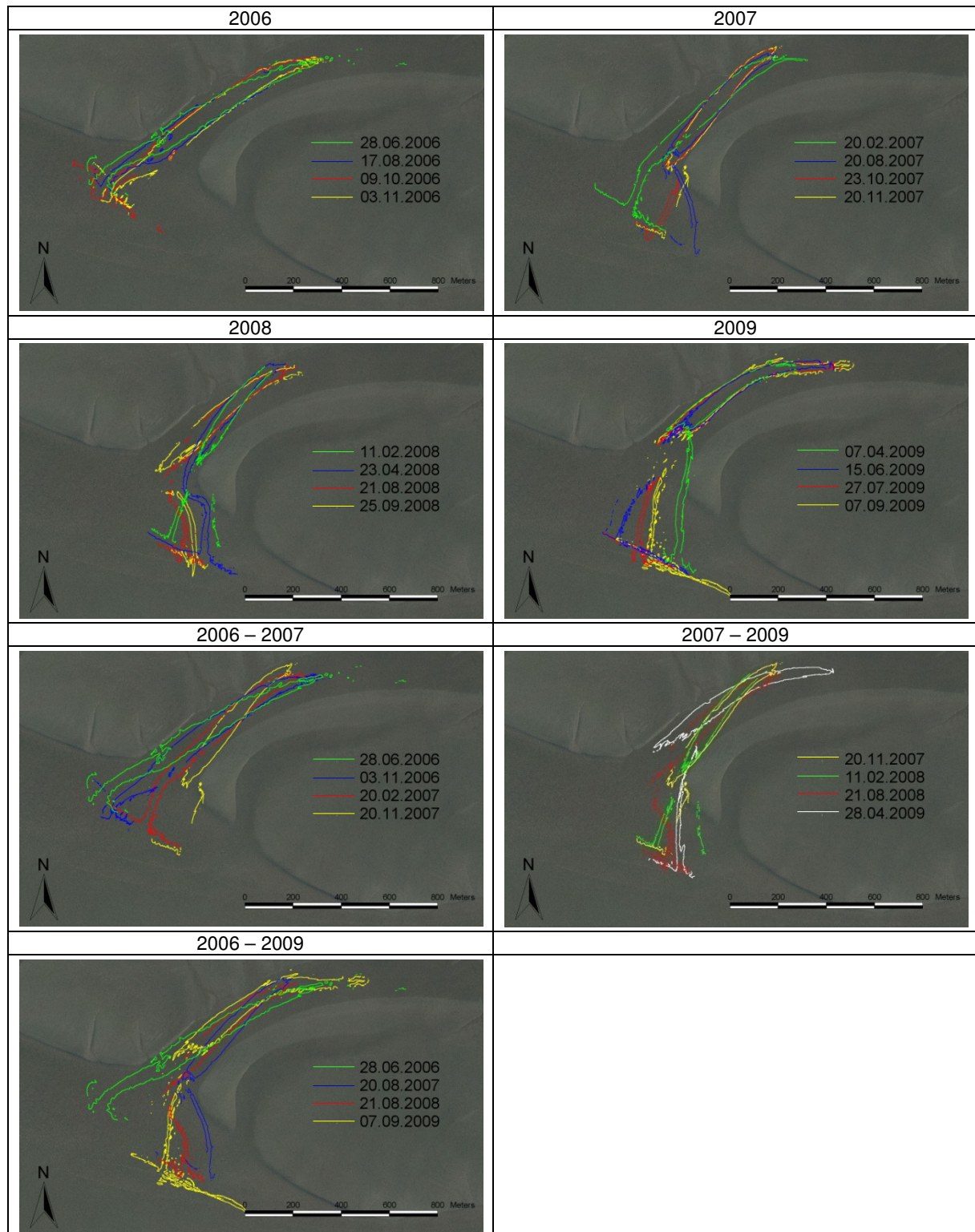
Tabelle 22: Darstellung der Höhendifferenzen zwischen verschiedenen Peilungen; Höhenangaben in m



Die Lage der Einfahrt ist nicht unabhängig von der Ausrichtung des Hauptteils der Neufelder Rinne. Je mehr sich die Achse des Hauptteils einem Süd-Nord-Verlauf nähert, desto weiter östlich kann sich die Achse der Einfahrt befinden.

Wie bereits festgestellt, finden die Veränderungen im Hauptteil sowie im Einfahrtbereich der Neufelder Rinne auf unterschiedlichen Zeitskalen statt. Im Folgenden werden diese Veränderungen anhand von Geländeprofilen näher untersucht.

Tabelle 23: Darstellung der -1,50 m NN Isobathen verschiedener Peilungen



7.3.3 Kurzperiodische Änderungen

Abbildung 67 zeigt die verschiedenen Profile der Einfahrt zur Neufelder Rinne in den Jahren 2006 bis 2009. Die Lage des Geländeschnittes ist in Abbildung 66 dargestellt. Aufgrund der Verlagerungen umfasst das Profil nicht immer die ganze Ausdehnung des Geländeschnittes. Der Startpunkt (0 m) des Geländeschnittes liegt westlich. Die übergeordnete Verlagerung der Einfahrt von Bereichen um 100 m des Geländeschnittes auf etwa 500 m und zurück auf 300 m ist der Drehung des Hauptteils geschuldet und wird in Kapitel 7.3.4 näher untersucht. An dieser Stelle wird die Veränderung der Profile der Einfahrt zueinander thematisiert. Die Achse der Einfahrt wird dabei durch den tiefsten Punkt des Profils definiert und die vertikalen Veränderungen werden vernachlässigt.

Im Jahr 2006 findet eine kontinuierliche Verschiebung nach Südosten statt, die sich in den Wintermonaten 2006/2007 beschleunigt. Im Jahr 2007 wird zwischen August und Oktober die Bildung eines neuen Verlaufes durch die weiter nordwestliche gelegene Position der Einfahrt ersichtlich. Im November 2007 ist die Einfahrt nicht aus den Peilungen erkennbar. Durch die Lage des Ebbdeltas, das auf den Peilungen erkennbar ist, kann jedoch die Lage abgeschätzt werden und so auf eine erneute Migration nach Südosten geschlossen werden. Zwischen November 2007 und Februar 2008 kann ein erneutes Durchstoßen des Prallhanges des Hauptteils der Rinne festgestellt werden. Im südöstlichen Bereich des Profils vom Februar 2008 ist der verlandende alte Arm der Einfahrt erkennbar. Auch im Jahr 2008 ist die Verlagerung der Rinne mit einer Rückverlegung zwischen Mai und August ebenso deutlich erkennbar, wie im Jahr 2009.

Abbildung 68 zeigt die Veränderung der Lage der Einfahrt über die Zeit und die daraus abgeleiteten Verlagerungsraten. Im oberen Teil der Abbildung ist die Lage des tiefsten Punktes der Einfahrt auf dem Geländeschnitt als Funktion der Zeit aufgetragen. Eine negative Steigung zwischen zwei Punkten zeigt somit eine Rückverlegung der Einfahrt an, eine positive Steigung eine Verschiebung nach Südosten. Im unteren Teil der Abbildung ist die resultierende Verlagerungsrate der Einfahrt zwischen zwei Peilungen dargestellt. Die schwarzen Kreuze stellen gemessene tiefste Punkte dar. Ergänzt wurden diese durch abgeleitete tiefste Punkte, die blau dargestellt sind. Zur Ableitung der Punkte wurden so viele Informationen aus den Messdaten extrahiert, wie möglich:

- Zwischen den Messungen im April 2009 und Juni 2009 ist nur wenig Zeit vergangen. Beide Messungen im April deuten darauf hin, dass bereits ein Grenzzustand vorliegt und die neue Einfahrt kurze Zeit später entstehen wird. Eine weitere Verschiebung der alten Einfahrt nach Südosten wird ausgeschlossen. Daher ist die aus der Rück-

verlegung der Achse der Einfahrt zwischen dem 15. Juni 2009 und dem 28. April 2009 berechnete negative Steigung ein gutes Maß für diesen Prozess.

- Aus der Peilung vom 11. Februar 2008 ist neben der Position der aktuellen Einfahrt auch die Position der alten Einfahrt bekannt, bevor sich der neue Durchstich ergab und der alte Verlauf verlandete. Über die unter dem vorangegangenen Absatz ermittelte negative Steigung kann die zeitliche Koordinate des abgeleiteten Punktes vom 2. Januar 2008 abgeschätzt werden.
- Über die bekannten Rückverlagerungen der Einfahrt aus dem Januar 2008, dem Mai 2008 und dem April 2009 kann ein kritischer Winkel zwischen Hauptteil der Neufelder Rinne und der Einfahrt ermittelt werden, der erreicht wird, bevor die Rückverlagerung stattfindet. Dieser liegt zwischen 122° und 128° . Die Verlagerung des Hauptteils erfolgt im Vergleich zur Einfahrt langsam, wodurch eine zeitweise konstante Lage angenommen werden kann. Für die Zeit nach August 2007 kann so die kritische Position der Einfahrt abgeschätzt werden. Verwendet man die zusätzliche Information zur negativen Steigung der Rückverlagerung, ergibt sich der Punkt vom 14. September 2007. Gleiches Vorgehen führt zum abgeleiteten Punkt vom 24. Oktober 2008.
- Die Position der neu gebildeten Einfahrt hängt von der jeweiligen Ausrichtung des Hauptteils ab. Die relativ konstante Entwicklung des Hauptteils erlaubt die Abschätzung der Position der Einfahrt nach Erreichen der kritischen Lage am 6. Mai 2008 und am 24. Oktober 2008. Über die angesetzte negative Steigung können auch die Punkte vom 18. Juni 2008 und vom 8. Dezember 2008 abgeleitet werden.

Aus diesen Informationen ergibt sich ein periodisches Verhalten der Position der Einfahrt. Die Periode der Oszillation liegt im Herbst und Winter 2007 bei 108 Tagen und nimmt dann über 124 Tage im Winter 2007/2008 auf 168 Tage im Sommer 2008 zu.

Die variierende Dynamik wird auch aus den Verlagerungsraten ersichtlich. Zwischen August 2007 und April 2008 führen Verlagerungsraten von ca. 2 Meter pro Tag zu den größten Veränderungen im Bereich der Einfahrt. Zuvor, aber auch danach, liegen die Verlagerungsraten mit ca. 1 Meter pro Tag darunter.

Zur Verifizierung der hohen Verlagerungsraten von mehr als 1 Meter pro Tide wurden während verschiedener Aufenthalte im Untersuchungsgebiet um Tideniedrigwasser herum Foto- und Videoaufnahmen angefertigt, die die fortschreitende Erosion am östlichen Hang der Einfahrt dokumentieren.

In unregelmäßigen Abständen liegen aus den vergangenen zehn Jahren georeferenzierte Luftaufnahmen des Untersuchungsgebietes vor. Die darauf erkennbare Position der Neufelder Rinne und deren Einfahrt passen in das beschriebene Muster.

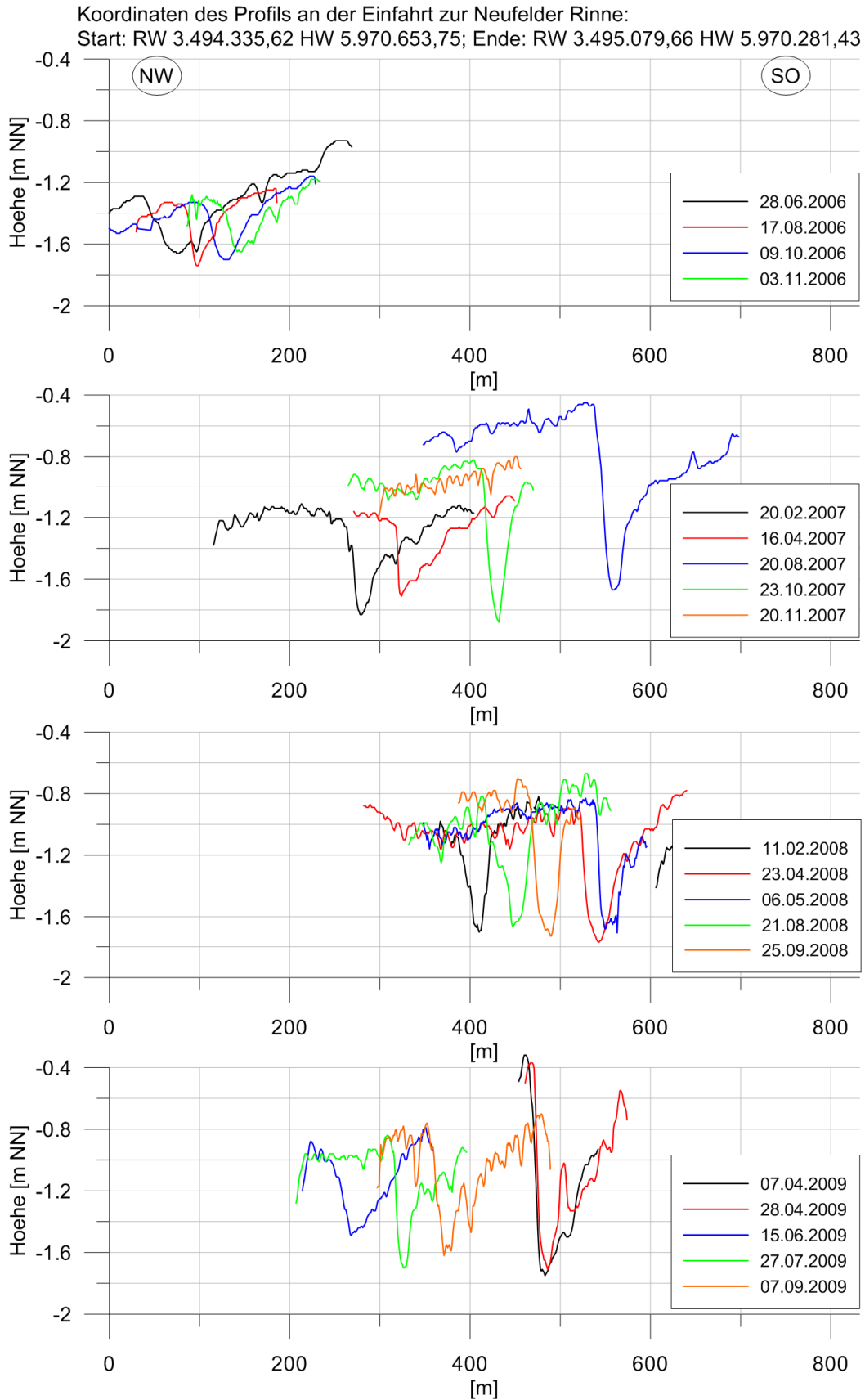


Abbildung 67: Veränderungen des Profils an der Einfahrt zur Neufelder Rinne

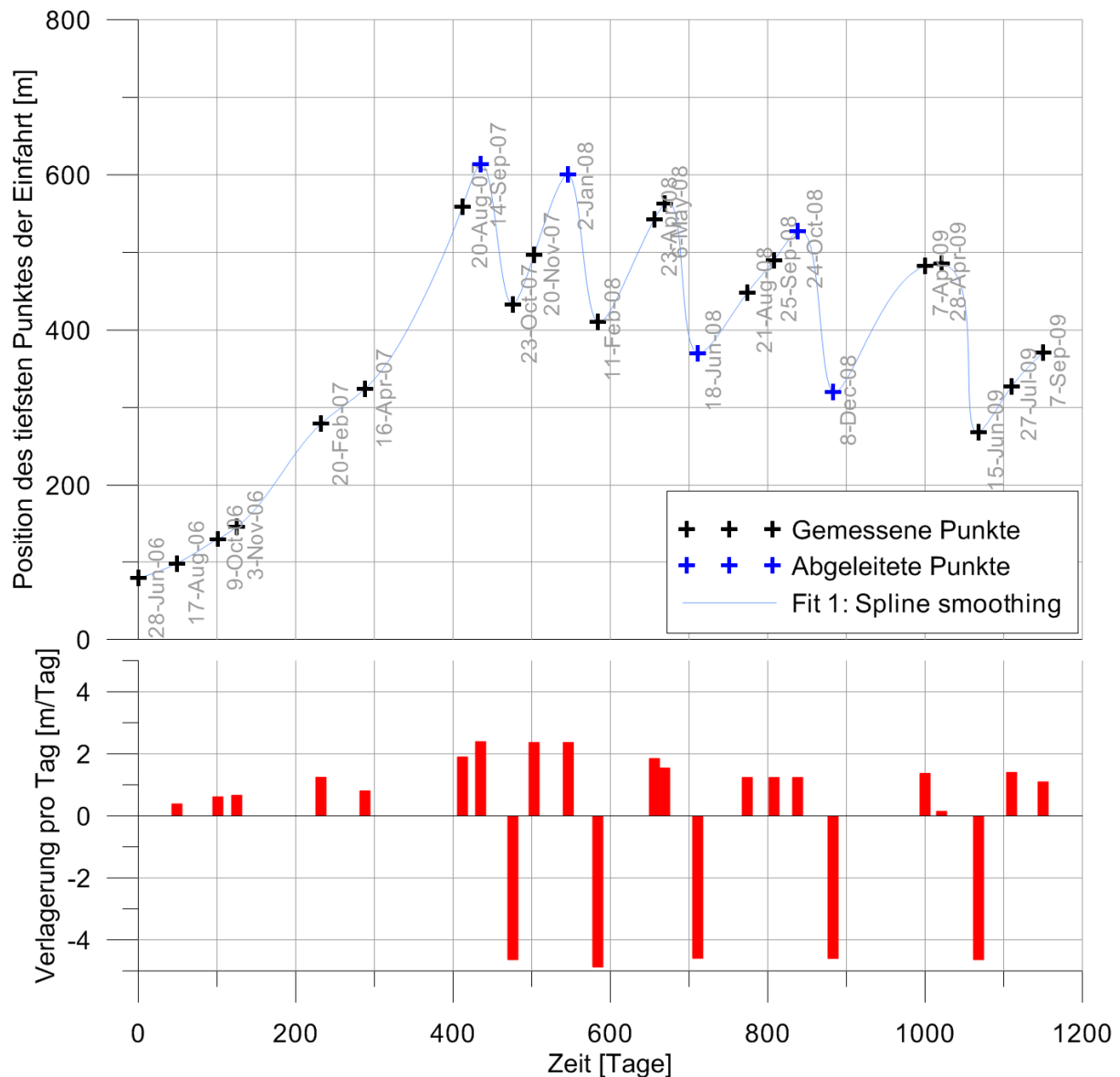


Abbildung 68: Veränderung der Lage der Einfahrt und daraus abgeleitete Verlagerungsraten

7.3.4 Langperiodische Änderungen

Abbildung 69 zeigt die Veränderungen des Geländeschnittes im Hauptteil der Neufelder Rinne. Der Geländeschnitt ist in Abbildung 66 verortet. Die Verlagerung der Achse des Hauptteils wird bei größeren Vergleichsintervallen am deutlichsten. Bis zum 11. Februar 2008 erfolgt eine langsame, fortschreitende Verlagerung nach Südosten. Dabei treten lokal in dem Profil und zeitlich begrenzt Vertiefungen und Erhöhungen auf. Ab Februar 2008 findet eine entgegengesetzte Verlagerung statt, bei der sich die Achse zurück Richtung Nordwesten verschiebt. Dabei können zeitlich aufeinander folgende Profile kurzzeitig auch einer gegenläufigen Entwicklung unterliegen. Es dominiert jedoch der übergeordnete Trend der Verlagerung.

Koordinaten des Profils im Hauptteil der Neufelder Rinne:
 Start: RW 3.494.744,02 HW 5.970.931,39; Ende: RW 3.494.974,56 HW 5.970.782,34

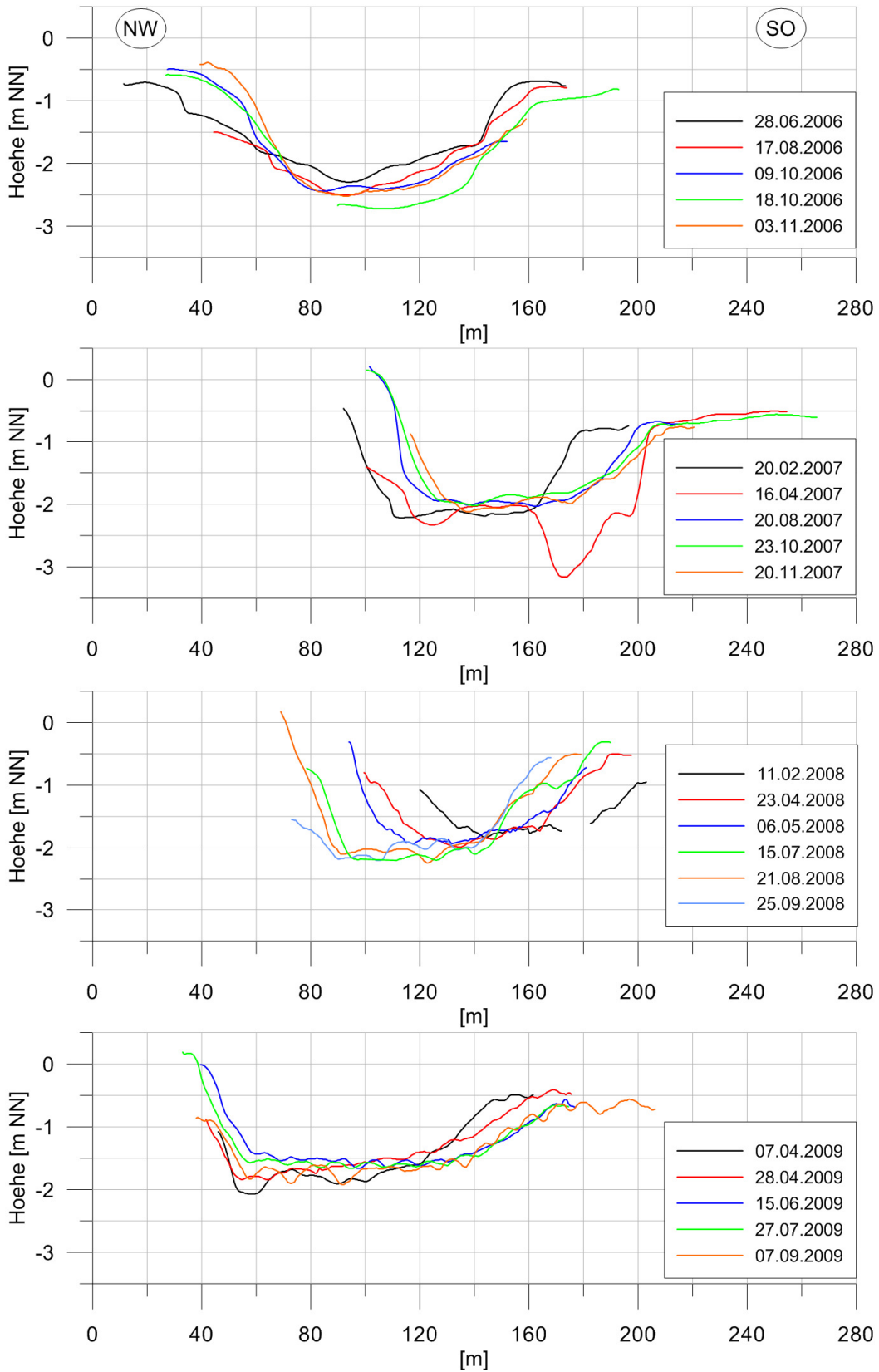


Abbildung 69: Veränderungen des Profils im Hauptteil der Neufelder Rinne

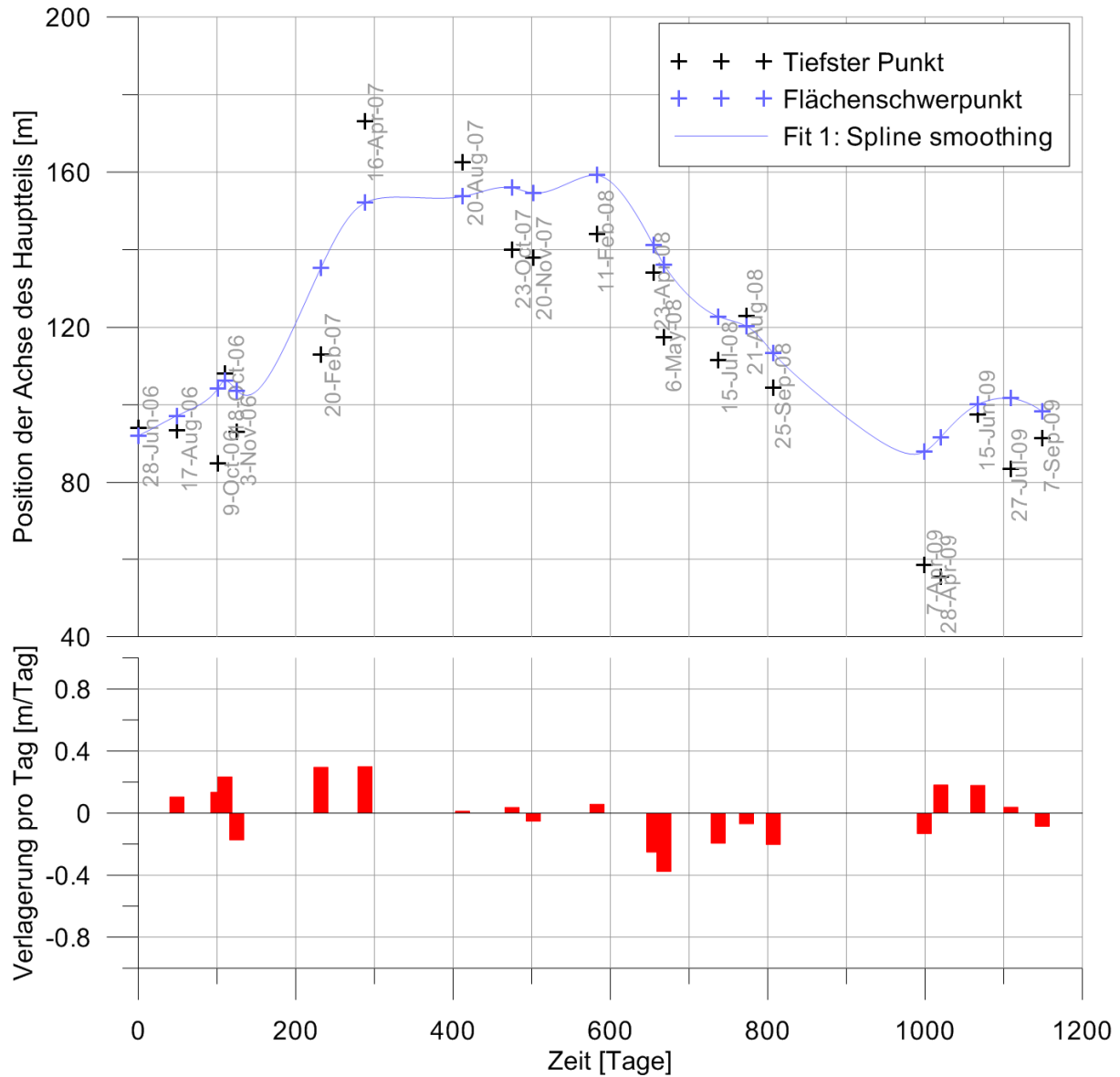


Abbildung 70: Veränderungen der Achse des Hauptteils der Neufelder Rinne und daraus abgeleitete Verlagerungsraten

Analog zu Kapitel 7.3.3 zeigt Abbildung 70 die Position der Achse des Hauptteils als Funktion der Zeit. Im unteren Teil der Abbildung ist wiederum die Verlagerungsrate aufgetragen. Dadurch, dass im Profil des Hauptteils, anders als im relativ schmalen Profil der Einfahrt, lokal Vertiefungen oder Erhöhungen auftreten können, die jedoch zeitlich nur begrenzt eine Existenz besitzen, ist hier die Darstellung des tiefsten Punktes des Profils zur Definition der Achse nicht sinnvoll. Beispielsweise ist die Vertiefung vom 16. April 2007 auf unter -3,00 m NN zeitlich beschränkt und kann langfristig nicht als Achse des Hauptteils angesehen werden. Die Verwendung des Flächenschwerpunktes zur Bestimmung der Achse des Hauptteils gibt die Bewegung des Hauptteils besser wieder. Dazu wird das jeweilige Profil durch ein Polygon 4. Ordnung approximiert, was eine gute Beschreibung des tatsächlichen Sohlverlau-

fes darstellt. Im Anschluss wird über die Gleichung 69 die Lage des Flächenschwerpunktes des von dem Polygon beschriebenen Profils berechnet, wobei x die örtliche Variable des Profils darstellt.

$$x_S = \frac{1}{A} \int_A x dA \quad (69)$$

Die weiteste Verschiebung nach Südosten ist am 11. Februar 2008 zu erkennen. Bis dorthin findet eine relativ kontinuierliche Bewegung bis zum 16. April 2007 statt, gefolgt von einer stabilen Phase bis zum 11. Februar 2008. Im Anschluss kehrt sich die Richtung bis zum 07. April 2009 um.

Die Oszillation von Nordwest nach Südost und zurück zeichnet sich deutlich ab. Nach April 2009 scheint eine erneute Bewegung nach Südost eingesetzt zu haben. Um dies sicher zu belegen, müssten jedoch weitere Messungen ausgeführt werden. Die Periode der Oszillation kann mit etwa 1.050 Tagen abgeschätzt werden.

Zwischen einzelnen Peilungen treten zum Teil Verlagerungsraten (ermittelt aus der Verschiebung der Flächenschwerpunkte) von bis zu 0,40 m pro Tag auf, in der Regel liegen diese aber deutlich darunter und sind damit geringer als die Verlagerungsraten der Einfahrt. Zu Beginn der Pendelbewegung sind die Verlagerungsraten in beide Richtungen am größten und schwächen sich dann bei zunehmender Verlagerung ab. Die erhöhten Verlagerungsraten decken sich nicht mit den in Kapitel 7.3.3 ausgemachten Perioden beschleunigter Verlagerungen der Einfahrt.

7.3.5 Einfluss von Extremereignissen

Abbildung 71 zeigt die in Abbildung 66 dargestellten Längsprofile durch die Neufelder Rinne. Durch die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Veränderungen der Querprofile hat eine langfristige Betrachtung eines Längsprofils keine Aussagekraft. Vielmehr deckt ein festgelegtes Längsprofil bereits nach einigen Monaten die Neufelder Rinne gar nicht mehr ab. Sinnvoll ist nur die Betrachtung zeitlich benachbarter Peilungen, wobei auch hier der Bereich der Einfahrt ausgenommen werden muss, da hier bereits innerhalb weniger Wochen größerer Veränderungen auftreten. Liegen größere Zeiträume zwischen den untersuchten Längsprofilen, muss eine Anpassung der Lage durchgeführt werden. Ein Vergleich über längere Zeiträume kann daher nicht stattfinden. Für die Jahre 2006, 2007 und 2008 wurden drei verschiedene Längsprofile durch den Hauptteil der Neufelder Rinne gelegt, die jeweils die Veränderung der Ausrichtung berücksichtigen. Ein Vergleich kann jeweils nur für eines dieser Profile und zwei Peilungen erfolgen. Zur Beurteilung der Auswirkungen von kurzfristigen Ereignissen, wie Sturmfluten, sind Längsprofile geeignet.

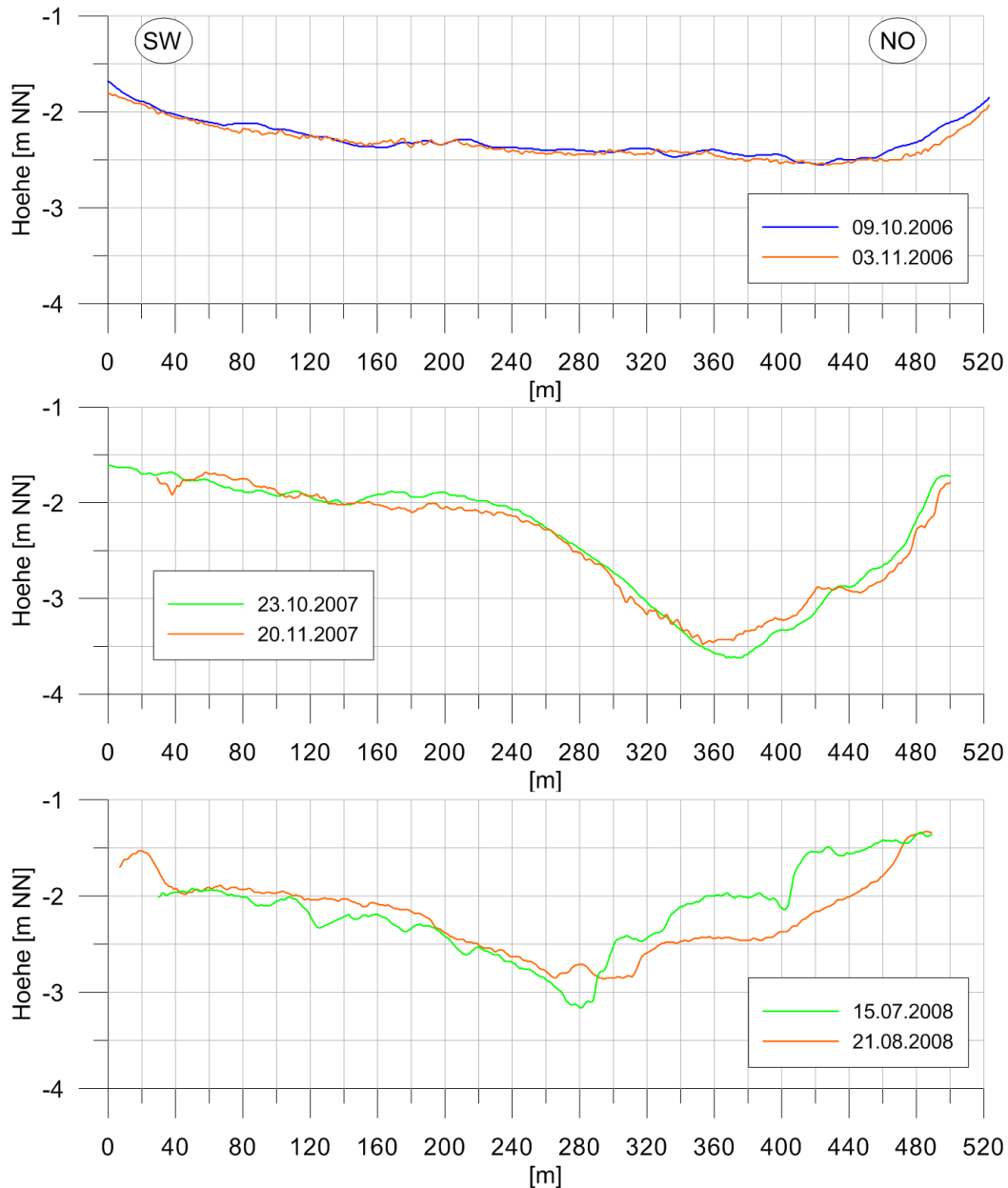


Abbildung 71: Veränderungen des Längsschnittes der Neufelder Rinne (vgl. Abbildung 66)

Am 1. November 2006 trat in der Elbmündung bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s im Stundenmittel aus nordwestlichen Richtungen eine Sturmflut mit Wasserständen von bis zu 3 m über dem Mittleren Tidehochwasser auf. Im oberen Teil der Abbildung 71 sind die Peilungen vor bzw. unmittelbar nach dieser Sturmflut berücksichtigt. Die Veränderungen des Querprofils der Neufelder Rinne können aufgrund der zeitlichen Nähe der Peilungen vernachlässigt werden. Zwischen den beiden Profilen vom 9. Oktober 2006 und dem 3. November 2006 können keine signifikanten Änderungen festgestellt werden. Die mittlere Abweichung der beiden Profile voneinander beträgt 0,04 m bei einer maximalen Abweichung

von 0,18 m. Dies entspricht normalen Veränderungen ohne Einfluss eines Extremereignisses und liegt im Bereich der Messgenauigkeit des Fächerecholotes.

Am 9. November 2007 gab es eine weitere Sturmflut mit Scheitelwasserständen von 3 m über dem Mittleren Tidehochwasser bei Windgeschwindigkeiten von ca. 17 m/s aus nord-westlichen Richtungen. Die beiden nächstliegenden Peilungen stammen vom 23. Oktober und vom 20. November 2007. Die im Vergleich zu den Längsschnitten von 2006 erkennbaren Veränderungen, insbesondere im hinteren Teil der Rinne, resultieren aus der stärkeren Ausprägung der Vertiefung in der Neufelder Rinne, die durch die Aufweitung der von Norden mündenden Watrinne bedingt ist. Zwischen den beiden Peilungen aus dem Oktober 2007 und November 2007 sind wiederum keine nennenswerten Veränderungen erkennbar. Die mittlere Abweichung der beiden Profile voneinander beträgt 0,10 m bei einer maximalen Abweichung von 0,33 m.

Am 21. Juli 2008 sowie am 4. August 2008 gab es jeweils eine Sturmflut mit Wasserständen von etwa 1 m über dem Mittleren Tidehochwasser. Zwischen den Peilungen vom 15 Juli und vom 21. August 2008 sind im hinteren Teil der Neufelder Rinne Veränderungen des Längsprofils erkennbar. Die mittlere Abweichung der beiden Profile voneinander beträgt 0,15 m bei einer maximalen Abweichung von 0,66 m. Die maximale Abweichung resultiert aus einer Ausdehnung der Vertiefung im Hauptteil der Neufelder Rinne in Richtung Nordosten. Der Grund hierfür liegt in der Verschiebung der von Norden einmündenden Watrinne nach Osten. Die Veränderung des Längsprofils im hinteren Bereich ist somit keine direkte Folge der Sturmfluten. Dennoch hatte der Zeitraum mit zwei schwächeren Sturmfluten Auswirkungen auf die Morphologie der angrenzenden Wattflächen.

Priele auf eulitoralischen Wattflächen unterliegen starken Veränderungen. Am deutlichsten werden diese im Bereich der Wattkante. Hier verlagern sich die Achsen der Priele um mehrere Dezimeter pro Tide. Es existieren Phasen beschleunigter Veränderungen. Sturmfluten haben dabei keinen signifikanten Einfluss. Die Veränderungen sind reversibel und folgen einer Oszillation, deren Periode für verschiedene Teile der Priele variiert.

7.4 Messungen der Konzentrationen suspendierter Sedimente

7.4.1 Datenauswertung

Die Messungen der Sedimentkonzentrationen werden wie in Kapitel 6.1.1.2 beschrieben durchgeführt. Dabei zeichnen immer alle 96 Sensoren einen Messwert auf, ganz gleich, ob ein Sensor sich im Wasser oder an der Luft befindet. Zunächst werden demnach über einen

Abgleich mit den durch die Drucksonde an der jeweiligen Messposition aufgezeichneten Wasserständen alle Sensorwerte eliminiert, die oberhalb des Wasserspiegels liegen.

Totalreflexionen rufen den höchsten möglichen Messwert an den Sensoren hervor. Dieser Fall tritt dann auf, wenn ein Sensor sich unterhalb der Geländeoberkante befindet oder von etwas verdeckt ist. Diese Werte werden ebenfalls eliminiert.

Von einem Sensorwert zum zeitlich nächsten oder sogar zum darüber oder darunter liegenden Sensor können durchaus große Anstiege der Sedimentkonzentrationen entstehen, wenn sich etwa eine Sedimentwolke vor den Sensoren bewegt. Daher dürfen hohe Sensorwerte im Umfeld geringerer Werte nicht pauschal als Fehlmessungen interpretiert werden. Hier besitzt die visuelle Kontrolle der Daten eine große Bedeutung.

Die weitere Auswertung der Daten wird in Form von Konzentrationsprofilen, anhand derer Absink- und Resuspensionsprozesse beschrieben werden, vorgenommen. Zur Ermittlung von Sedimenttransportraten, zur Berechnung des residualen Transportes sowie zur Untersuchung des Einflusses der Strömung, des Seegangs und des Windes werden jedoch in der Regel tiefengemittelte Sedimentkonzentrationen verwendet.

7.4.2 Konzentrationsprofile

Abbildung 72 zeigt die Veränderung der Konzentrationsprofile über eine Tide am Beispiel von Messposition 8. Oben in der Abbildung ist der Verlauf der Tidewasserstände und der Strömungsgeschwindigkeit dargestellt. Für den rot hervorgehobenen Bereich sind darunter die Profile der Suspensionskonzentration und der Strömungsgeschwindigkeit in 10 Minuten-Schritten abgebildet. Der unterste Sensor befindet sich auf Höhe der Wattoberkante.

Die Darstellung beginnt nach dem Maximum der Strömungsgeschwindigkeit. Die Konzentration suspendierter Sedimente ist über alle Sensoren gut durchmischt und liegt zwischen 200 mg/l und 1.000 mg/l, mit etwas höheren Werten an der Sohle als in oberen Bereich der Wassersäule. In der Folgezeit sinkt die Strömungsgeschwindigkeit. Ab 05:30 Uhr bis ca. 06:10 Uhr reduziert sich die Sedimentkonzentration in oberen Bereichen der Wassersäule bei gleichzeitigem Anstieg der sohlnahen Konzentrationen. Die suspendierten Sedimente sinken zu Boden. Gegen 06:20 Uhr haben sich die meisten Sedimentpartikel abgesetzt, bevor sie mit steigenden Strömungsgeschwindigkeiten wieder resuspendiert werden. Zunächst erhöhen sich dabei die sohlnahen Konzentrationen, bevor sich eine gute Durchmischung der Wassersäule einstellt (ab 07:00 Uhr).

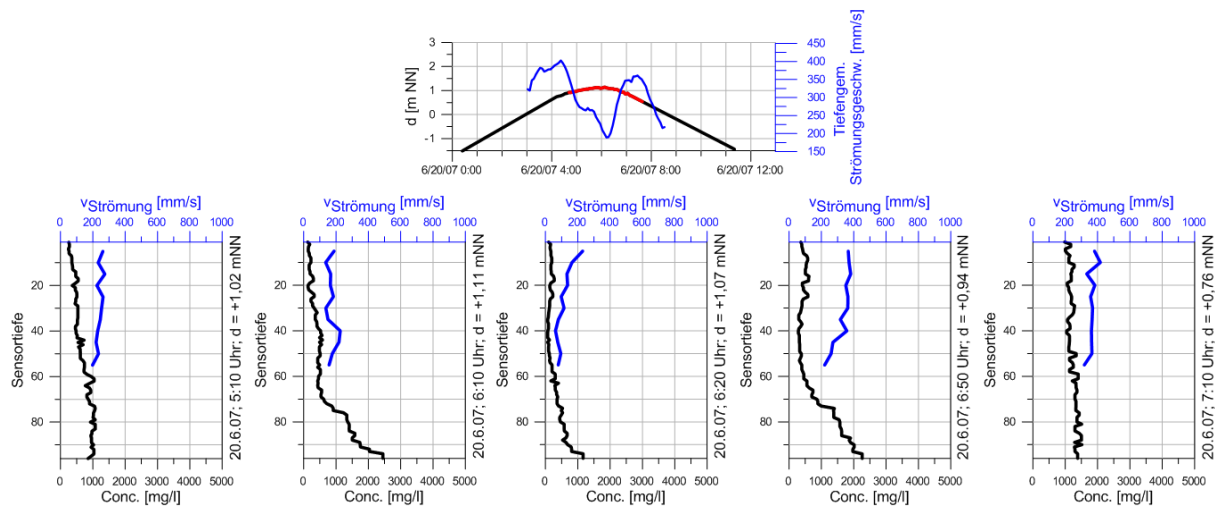


Abbildung 72: Veränderung der Profile der Sedimentkonzentrationen über eine Tide an Position 8

Abbildung 73 stellt farblich kodiert die Sedimentkonzentrationen aller Messungen über zwei Tiden an Position 13 dar. In rot ist die Windgeschwindigkeit eingezeichnet. Die Maxima der Sedimentkonzentrationen in der Flutphase sind bei beiden Tiden ausgeprägt, wobei die Konzentration nahezu konstant über die Wassersäule ist. Um den Zeitpunkt des Tidehochwassers herum sinken die Sedimente zu Boden und erhöhen dort die Konzentration. Bei der Resuspension der Partikel steigen zunächst auch wieder die sohnahen Konzentrationen. Insgesamt sind die Sedimentkonzentrationen während der Nachmittagstide des 25. April 2008 höher als während der Tide am Morgen desselben Tages. Dies weist auf den Einfluss des Seegangs hin, der sich aufgrund steigender Windgeschwindigkeiten im Laufe des Tages verändert.

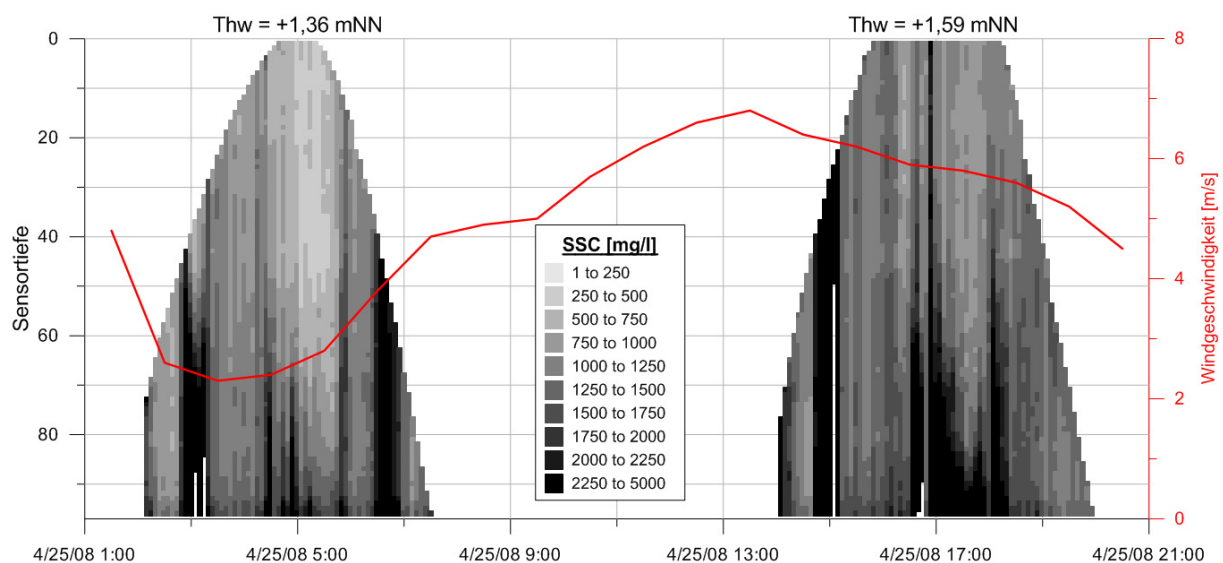


Abbildung 73: Exemplarische Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Sedimentkonzentrationen über zwei Tiden an Position 13

7.4.3 Tiefengemittelte Sedimentkonzentrationen

Abbildung 74 zeigt die charakteristischen Verläufe der Sedimentkonzentrationen über eine Tide an den Messpositionen 11, 12 und 13. Analog zu Kapitel 7.2.2 wird eine Unterteilung in Tiden mit verschiedenen Tidehochwasserständen beibehalten. Die in der Abbildung dargestellten Verläufe des Wasserstandes, der Strömungsgeschwindigkeit und der Sedimentkonzentrationen wurden jeweils aus zehn bis zwölf einzelnen Tiden berechnet.

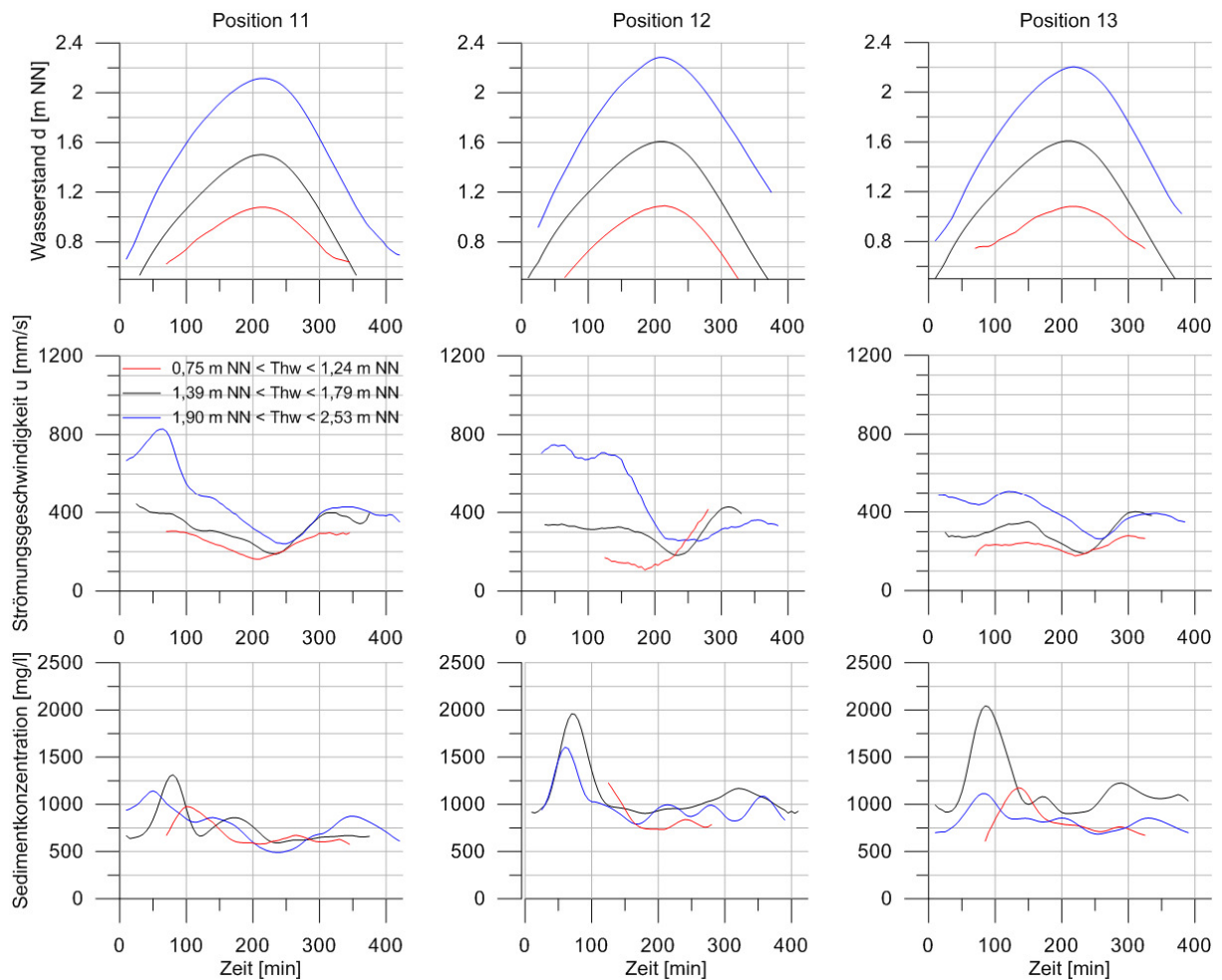


Abbildung 74: Charakteristische Verläufe der Sedimentkonzentrationen über eine Tide an den Messpositionen 11, 12 und 13

Bei mittleren Tiden tritt an allen Positionen ein Maximum der Sedimentkonzentration etwa in der Mitte des Sattelpunktes der höchsten Flutstromgeschwindigkeit auf. Liegt in der Strömungsgeschwindigkeit ein weiterer Sattelpunkt vor, bildet sich ein sekundäres Maximum der Sedimentkonzentration in der Flutphase aus, welches jedoch geringer ist als das erste und bei fehlendem zweiten Sattelpunkt der Strömungsgeschwindigkeit auch ganz verschwinden kann (s. Position 12). Die geringsten Sedimentkonzentrationen treten um Tidehochwasser herum auf. Im Anschluss steigen die Sedimentkonzentrationen mit steigenden Strömungs-

geschwindigkeiten wieder an. Das Maximum in der Sedimentkonzentration in der Ebbephase, das etwa bei Erreichen der größten Ebbestromgeschwindigkeit auftritt, ist jedoch an allen Positionen deutlich geringer als das Maximum der Konzentrationen in der Flutphase. An Position 11 ist dieses Maximum nur sehr schwach ausgeprägt.

Während Tiden mit geringeren Tidehochwasserständen ist der Verlauf der Sedimentkonzentration wie oben beschrieben, der zeitliche Verlauf ist dem der Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten entsprechend jedoch gestaucht. Die Sedimentkonzentrationen liegen allesamt unter denen einer mittleren Tide.

Bei Tiden mit erhöhten Wasserständen kann ebenfalls der beschriebene Verlauf festgestellt werden. Die Unterschiede zwischen den Peaks der Sedimentkonzentrationen, insbesondere zwischen Flut- und Ebbephase, werden geringer. Die Sedimentkonzentrationen liegen unter denen einer mittleren Tide.

Insgesamt folgt der Verlauf der Sedimentkonzentration dem Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit mit Maxima in der Flut- und Ebbephase. Sattelpunkte in der Strömungsgeschwindigkeit führen zu sekundären Maxima der Sedimentkonzentration. Am deutlichsten ist dieser Verlauf bei mittleren Tiden zu erkennen, während bei Tiden mit geringeren oder erhöhten Tidewasserständen die Ausprägung der Peaks geringer wird. Deutlich erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten führen nicht zwangsläufig zu höheren Sedimentkonzentrationen. Vielmehr liegen die Sedimentkonzentrationen während einer mittleren Tide über denen der Tiden mit erhöhten oder geringeren Scheitelwerten. Neben der Strömungsgeschwindigkeit besitzen auf Wattflächen also weitere Einflussgrößen maßgebliche Bedeutung. Dies wird bereits durch die Unterschiede in den Verläufen bei Tiden mit unterschiedlichen Tidehochwasserständen deutlich, die durch variierende Windbedingungen und dadurch induzierte veränderte Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Seegangsverhältnisse entstehen.

Insbesondere an den Positionen 12 und 13 bildet sich ein sehr deutliches Maximum der Sedimentkonzentration in der Flutphase heraus, das nicht nur durch die Strömungsgeschwindigkeit und den Seegang bedingt sein kann. Dabei fällt auf, dass die Konzentrationen ab einem Wasserstand von etwa +0,80 m NN stark ansteigen. Bei diesem Wasserstand werden auch die höchsten Wattflächen nordwestlich der Neufelder Rinne überströmt (vgl. Abbildung 46), die Strömungsrichtung dreht auf Südost (vgl. Abbildung 56) und Sedimente werden über das Klotzenloch in das Untersuchungsgebiet eingetragen.

Abbildung 75 zeigt die charakteristischen Verläufe der Sedimentkonzentrationen an den Messpositionen 8 und 15. An diesen Messpositionen an der Wattkante ist die Ausprägung

der Maxima der Sedimentkonzentration, einschließlich der sekundären Maxima, stärker als an den Positionen auf dem Watt. Ihr Verlauf ist gemäß der obigen Beschreibung am Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit orientiert. Die Maxima der Sedimentkonzentration in der Flutphase sind größer als die in der Ebbephase. Auffällig sind erhöhte Sedimentkonzentrationen etwa zum Zeitpunkt des Tidehochwassers während Tiden mit erhöhten Tidehochwasserständen (Position 15). Diese weisen auf die Bedeutung von Seegang auf die Konzentrationen suspendierter Sedimente hin.

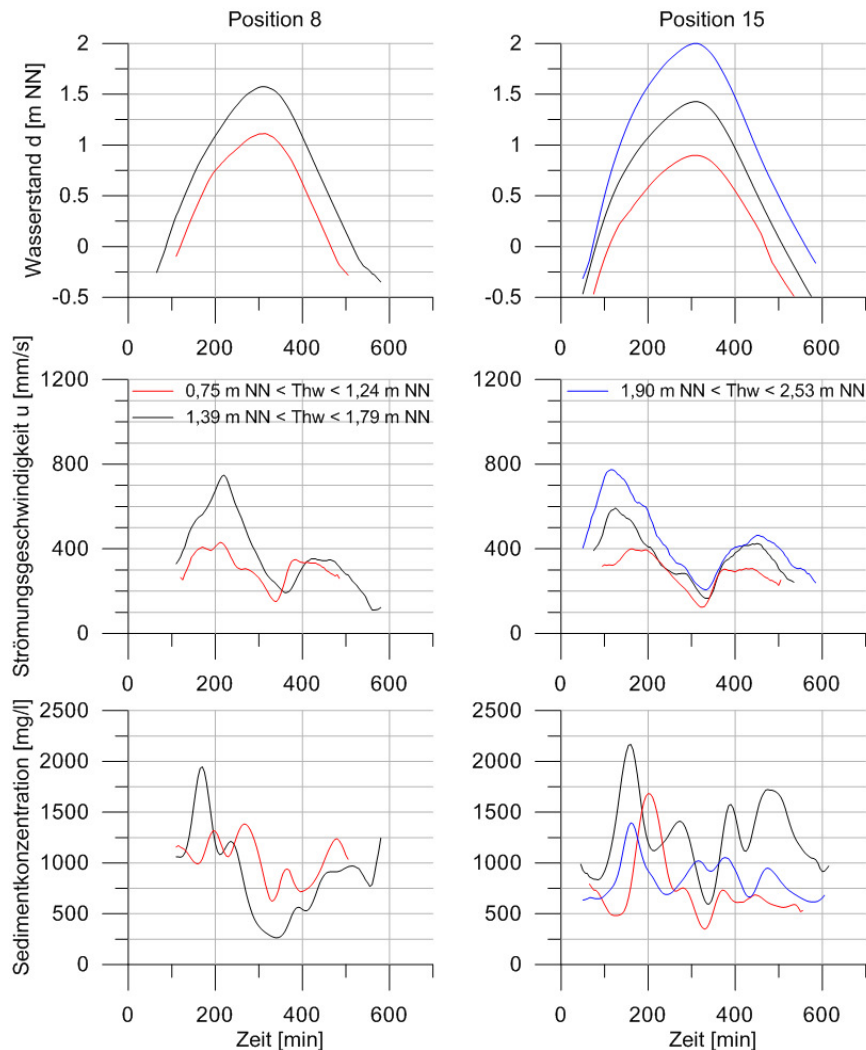


Abbildung 75: Charakteristische Verläufe der Sedimentkonzentrationen über eine Tide an den Messpositionen 8 und 15

Abbildung 76 zeigt die charakteristischen Verläufe der Sedimentkonzentrationen an den Messpositionen 2 und 3 (2008). Auch hier folgt der Verlauf der Sedimentkonzentration dem Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit, und es bilden sich die bereits beschriebenen Maxima und sekundären Maxima in der Sedimentkonzentration aus. Die Maximalwerte der Sedimentkonzentrationen sind bei mittleren Tiden und niedrigeren Tiden in der Ebbephase etwas

höher als in der Flutphase. Bei erhöhten Tiden überwiegt das Maximum in der Flutphase. Auffällig sind die höheren Sedimentkonzentrationen sowie die stärkere Ausprägung der Maxima an Position 3 aus dem Jahr 2008. Die Messungen an dieser Position fallen in eine Phase einer hohen Dynamik des Hauptteils der Neufelder Rinne (vgl. 7.3.4).

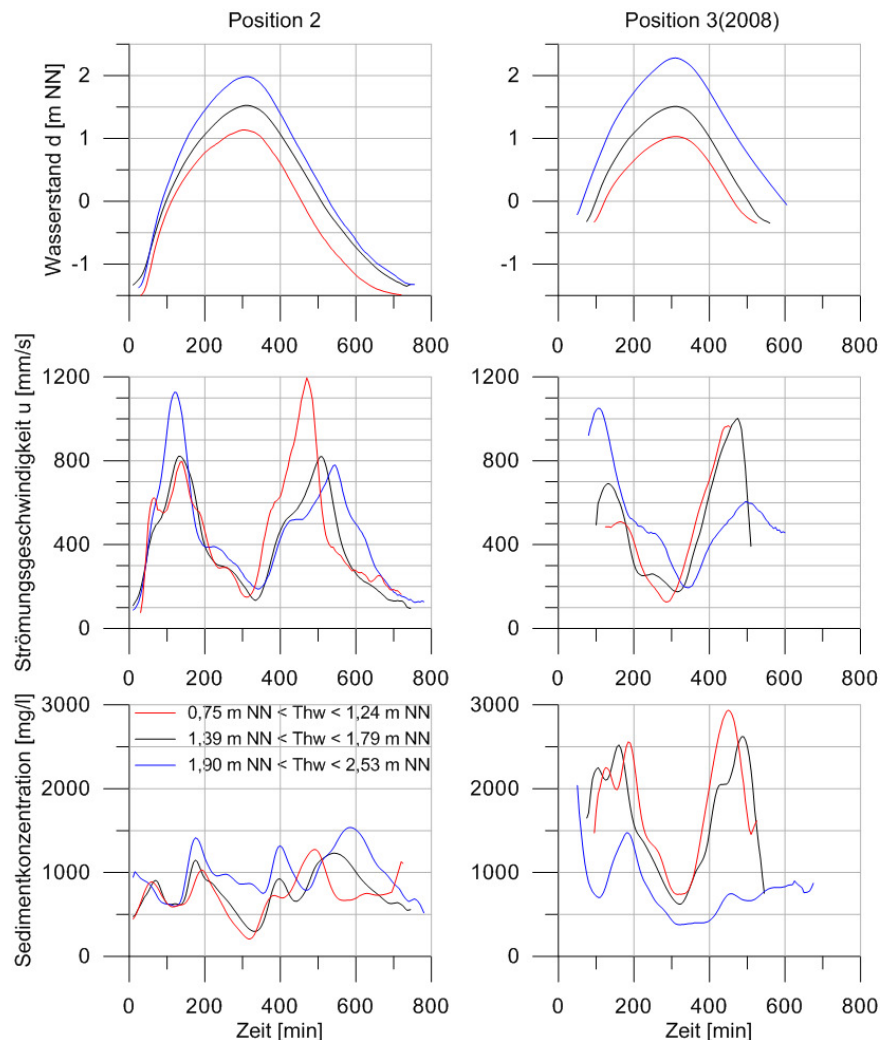


Abbildung 76: Charakteristische Verläufe der Sedimentkonzentrationen über eine Tide an den Messpositionen 2 und 3 (2008)

7.5 Sedimenttransportraten

Aus den Konzentrationen suspendierter Sedimente und den Strömungsgeschwindigkeiten können die jeweiligen Sedimenttransportraten als Produkt der beiden Eingangsgrößen berechnet werden. Diese Größe besitzt mehr Aussagekraft als die reinen Sedimentkonzentrationen, da z.B. bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten trotz hoher Sedimentkonzentrationen nur wenig Material transportiert wird.

Abbildung 77 zeigt die charakteristischen Sedimenttransportraten an den Messpositionen 11, 12 und 13 auf dem Watt nordwestlich der Neufelder Rinne. Der Verlauf der Sedimenttransportrate wird durch ein Maximum in der Flut- und eines in der Ebbephase dominiert. In der Flutphase folgt dem Maximalwert ein Sattelpunkt der Transportkapazität. In der Ebbephase ist nur ein Maximalwert zu erkennen. Während einer mittleren Tide überwiegt der Sedimenttransport in der Flutphase, wobei dieser Effekt an Position 11, die näher zur Wattkante liegt als die Positionen 12 und 13, am deutlichsten ist. An allen drei Positionen erreichen die Sedimenttransportraten dabei vergleichbare Maximalwerte zwischen 0,50 und 0,70 kg/m²·s. Während Tiden mit niedrigeren Tidewasserständen sinkt auch die Sedimenttransportrate. Das Maximum in der Flutphase ist dabei nur noch geringfügig größer als das in der Ebbephase (Positionen 11 und 13). An Position 12 überwiegt der Sedimenttransport in der Ebbephase leicht. Während Tiden mit erhöhten Scheitelwerten steigt auch die Sedimenttransportrate, wobei das Maximum in der Flutphase deutlich überwiegt.

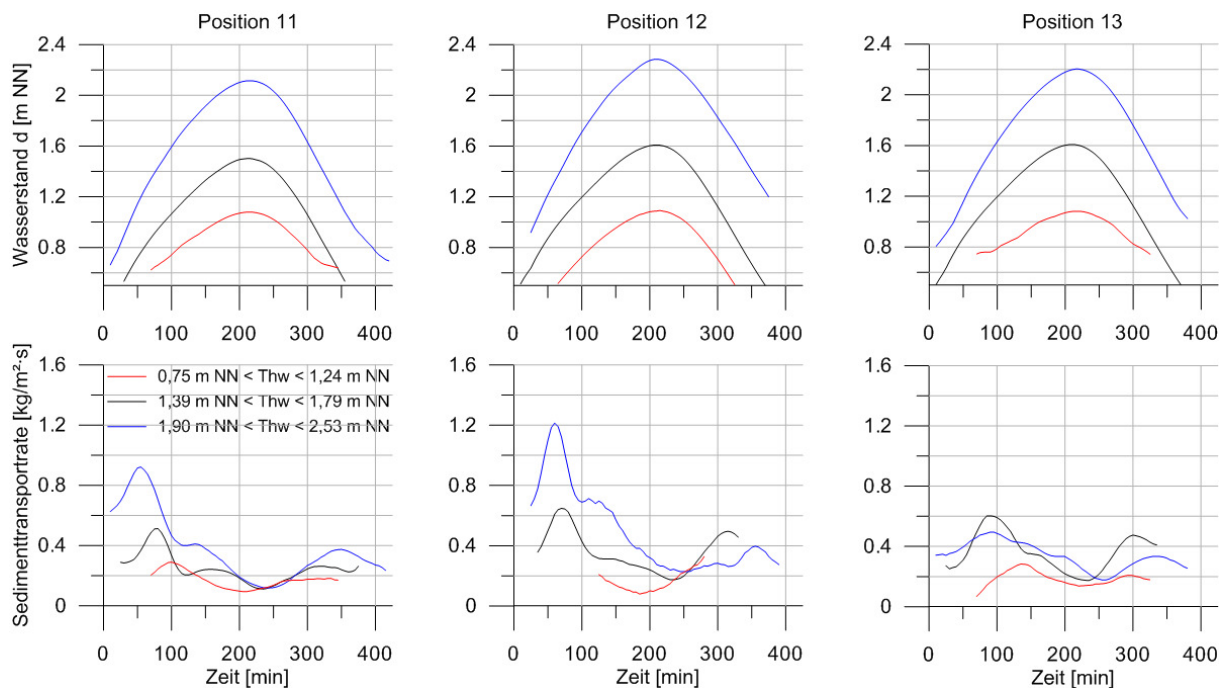


Abbildung 77: Charakteristische Sedimenttransportraten an den Messpositionen 11, 12 und 13

Abbildung 78 zeigt die Sedimenttransportraten an den Positionen 8 und 15. Auch hier sind die beschriebenen Maxima im Verlauf der Transportrate zu erkennen, wobei diese in der Flutphase deutlich überwiegen. Bei Tiden mit niedrigeren Tidehochwasserständen reduziert sich an Position 8 das Verhältnis von maximaler Transportrate in der Flutphase zu maximaler Transportrate in der Ebbephase. Die Sedimenttransportraten sind während dieser Tiden insgesamt geringer. An Position 15 ist das Verhältnis weitestgehend stabil, mit den höchsten

Transportraten bei mittleren Tiden. Das Maximum der Sedimenttransportraten in der Ebbe-phase ist breiter und besteht dabei aus zwei einzelnen Hochpunkten.

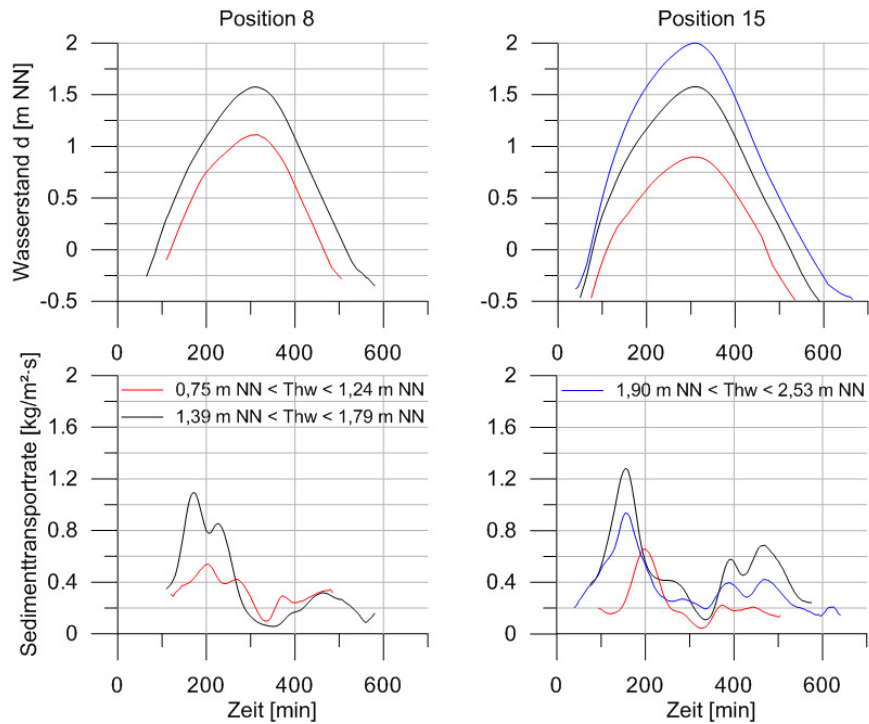


Abbildung 78. Charakteristische Sedimenttransportraten an den Messpositionen 8 und 15

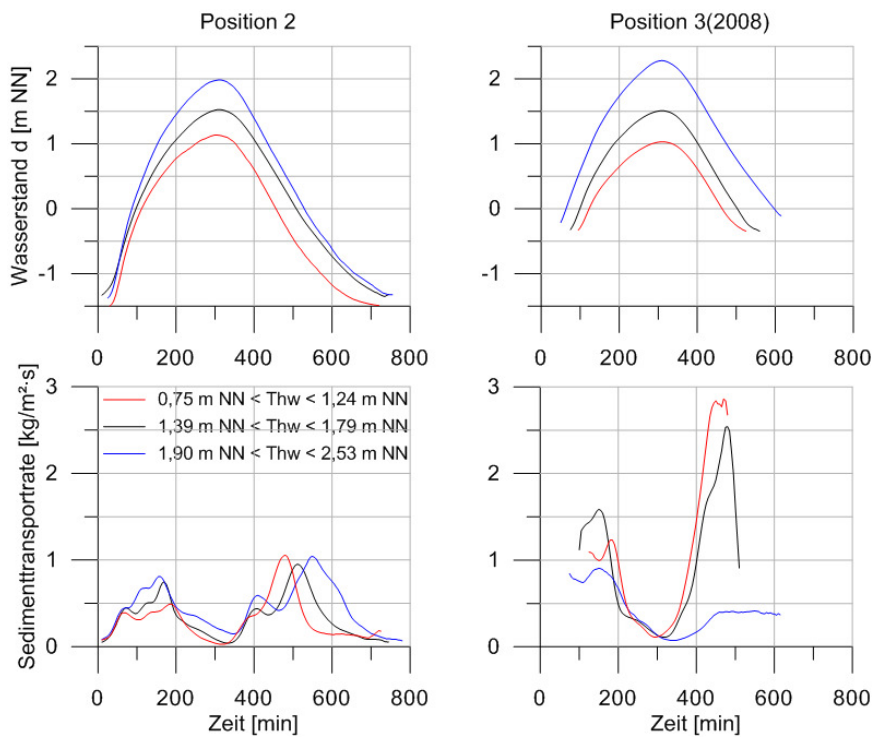


Abbildung 79: Charakteristische Sedimenttransportraten an den Messpositionen 2 und 3 (2008)

An Messposition 2 in der Neufelder Rinne überwiegt die Transportrate in der Ebbephase (vgl. Abbildung 79). Dies ist bei Tiden mit geringeren Tidehochwasserständen am deutlichsten der Fall. An Position 3 erreichen die Sedimenttransportraten im Jahr 2008 die höchsten aufgezeichneten Werte von bis zu $3,00 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$. Die Transportraten in der Ebbephase sind dabei um das 2 bis 2,5-fache größer als in der Flutphase. Nur bei Tiden mit höheren Tidehochwasserständen überwiegt die Transportrate in der Flutphase. Die Maxima der Sedimenttransportraten sind an Position 3 größer und dabei spitzer im Verlauf als an Position 2.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Verläufe der Sedimenttransportraten an den verschiedenen Messpositionen wie auch die Verläufe der Sedimentkonzentrationen maßgeblich von der Strömung beeinflusst werden. Die Mengen des suspensiv transportierten Materials variieren dabei je nach Position der Messungen und weiter zu untersuchenden Einflussgrößen, wie z.B. Strömungsgeschwindigkeit und Seegang (s. Kapitel 8).

Abbildung 80 zeigt die jeweils über eine Tide gemittelten Sedimenttransportraten über den gesamten Untersuchungszeitraum an den Messpositionen 11, 12, 13 und 93. Des Weiteren sind die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit in der Abbildung aufgetragen.

In allen ausgewerteten Zeiträumen ist zu erkennen, dass sich die Sedimenttransportraten mit ansteigenden Windgeschwindigkeiten erhöhen (z.B. 15.09.2007, 12.10.2007, 07.08.2009). Liegen für einen Zeitraum Messungen an mehreren Positionen auf höher gelegenen Wattflächen vor, verlaufen die Sedimenttransportraten weitestgehend parallel. Dabei ist zu erkennen, dass die Sedimenttransportraten an Position 11 leicht über denen der Position 12 und 13 liegen.

Dass auch die Windrichtung einen Einfluss auf die Transportraten besitzt, wird an zwei Extremereignissen aus dem dritten Quartal des Jahres 2008 deutlich. Am 04./05.08.2008 steigen die Windgeschwindigkeiten auf bis zu 12 m/s im stündlichen Mittel an. Der Wind weht dabei aus westlichen bis nordwestlichen Richtungen. Die Sedimenttransportrate steigt kurzzeitig auf $0,75 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$, was in etwa der dreifache Wert der angrenzenden Tage mit geringeren Windgeschwindigkeiten von ca. 6 m/s ist.

Am 12./13.09.2008 treten Windgeschwindigkeiten von bis zu 16 m/s aus östlichen Richtungen auf. Die Sedimenttransportrate nimmt mit $0,35 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ zwar wiederum kurzzeitig einen erhöhten Wert an, erreicht dabei aufgrund der durch die Ostwindlage geringen Wasserstände und geringen Strömungsgeschwindigkeiten keinen so hohen Wert wie während eines Westwindereignisses mit größeren Windgeschwindigkeiten.

In der Mitte des vierten Quartals 2007 sowie insbesondere in der ersten Hälfte des zweiten Quartals 2008 sind die Sedimenttransportraten insgesamt gegenüber dem dritten Quartal

2007, dem dritten Quartal 2008 und dem dritten Quartal 2009 deutlich erhöht. Diese saisonale Schwankung deutet unter anderem auf einen Einfluss der Temperatur hin und wird in Kapitel 8.2 näher untersucht.

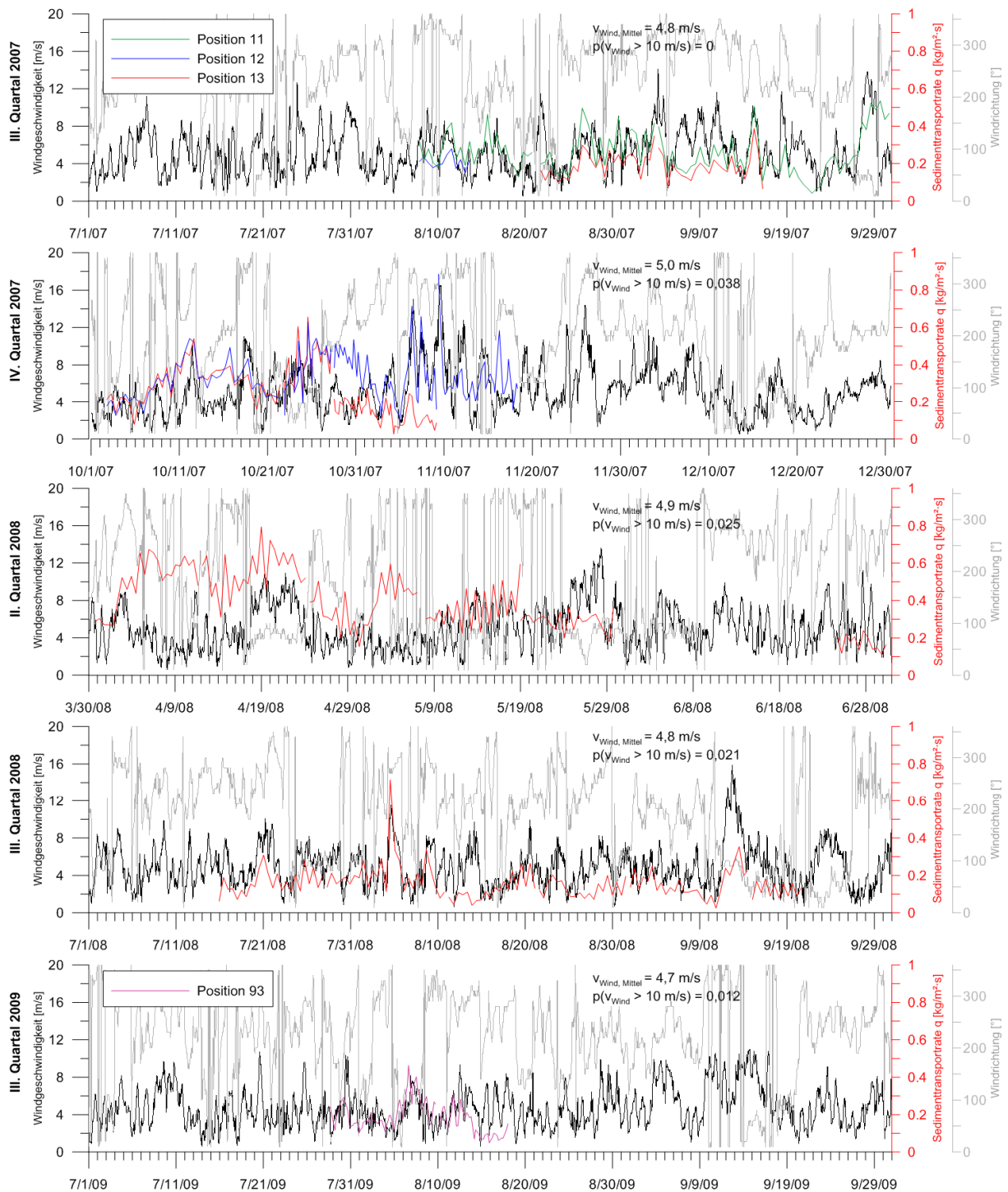


Abbildung 80: Tidegemittelte Sedimenttransportraten und Windparameter an den Positionen 11, 12 und 13 über den gesamten Untersuchungszeitraum

Im Falle der deutlich erhöhten Sedimenttransportraten in der ersten Hälfte des zweiten Quartals 2008 kommt der Einfluss einer stürmischen Phase im ersten Quartal 2008, vor Beginn der Messungen in diesem Jahr, hinzu. Der prozentuale Anteil der Windgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s ist in diesem Quartal mit 8,8 % ($v_{\text{Wind, Mittel}} = 6,1 \text{ m/s}$) gegenüber anderen Quartalen deutlich größer (vgl. Abbildung 80). Selbst bei einem Rückgang des Anteils höherer Windgeschwindigkeiten von mehr als 10 m/s im zweiten Quartal 2008 auf 2,5 % bleiben die Sedimentkonzentrationen im Untersuchungsgebiet noch etwa einen Monat lang deutlich erhöht. Die temperaturbedingt größere Viskosität des Wassers in dieser Jahreszeit trägt zum Erhalt höherer Sedimentkonzentrationen bei. Phasen erhöhter Sturmaktivität haben somit insbesondere in den Wintermonaten auch über das Ende dieser Phasen hinaus einen maßgebenden Einfluss auf die Sedimenttransportraten.

Die Auswertungen der Sedimenttransportraten an den übrigen Messpositionen, die im Anhang E zu finden sind, bestätigen diese Ergebnisse.

Weht der Wind über längere Zeit mit höheren Geschwindigkeiten beständig aus einer Richtung, insbesondere bei östlichen und nordwestlichen Windrichtungen, werden die Wasserstände und damit die Strömungsgeschwindigkeiten maßgeblich beeinflusst. Zudem nehmen die Wellenhöhen mit steigenden Windgeschwindigkeiten aus westlichen Richtungen zu. Der Wind hat demnach eine mittelbare Wirkung auf die Sedimenttransportraten. Der Einfluss des Windes auf die Sedimentkonzentrationen sowie deren Zusammenhang mit den Parametern Strömung und Seegang werden in der Folge weiter untersucht.

Der Einfluss von äolischem, das heißt durch Wind verursachten, Sandtransport auf trocken-gefallenen Wattflächen wird in dieser Arbeit nicht untersucht.

Insgesamt wird der Verlauf der Sedimentkonzentration auf Ästuarwattflächen durch die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt. Der Betrag, den die Sedimentkonzentration annimmt, wird u.a. durch die Strömungsgeschwindigkeit, Seegang sowie lokale Besonderheiten, wie dem Sedimenteintrag aus benachbarten Wattgebieten, beeinflusst. An der Wattkante sind die Sedimentkonzentrationen größer als auf höher gelegenen Wattflächen. Auch in Prielen treten hohe Sedimentkonzentrationen auf. Höher auflaufende Tiden induzieren eine erhöhte Sedimenttransportrate durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten. Diese Ereignisse können die Dominanz des Ebbestromes in den Prielen vorübergehend aufheben. Phasen mit höheren Windgeschwindigkeiten können in Abhängigkeit von der Windrichtung die Sedimenttransportrate signifikant verändern.

8 Ableitung von Prozessen des Sedimenttransportes

Aus den Betrachtungen in den Kapiteln 7.4.3 und 7.5 kann abgeleitet werden, dass die Strömung maßgeblich den Verlauf der Sedimentkonzentration bzw. der Sedimenttransportrate bestimmt. Es zeigt sich jedoch auch, dass weitere Einflussfaktoren den Betrag der Sedimentkonzentration und damit der Transportrate verändern können. Hier sei übergeordnet der Wind genannt, der die Wasserstände, den Tidehub und damit einhergehend die Strömungsgeschwindigkeiten sowie den Seegang beeinflusst.

Für die aus dem Sedimenttransport resultierenden Veränderungen morphologischer Strukturen im untersuchten Wattgebiet sind neben den transportierten Sedimentmengen auch die Richtungen wichtig, in die das Sediment transportiert wird. Im folgenden Kapitel findet demnach die aufgezeichnete Strömungsrichtung Berücksichtigung.

8.1 Residualer Sedimenttransport

Aus den in Kapitel 7.5 dargestellten Ergebnissen der Messungen kann abgeleitet werden, dass auf den Wattflächen und an der Wattkante der Sedimenttransport während der Flutphase überwiegt. Innerhalb der Neufelder Rinne werden dagegen mehr Sedimente in der Ebephase transportiert. Während Tiden mit Scheitelwasserständen unter MThw verstärkt sich dieser Effekt, wogegen sich der durch den Flutstrom dominierte Transport auf den Wattflächen in der Regel während Tiden mit erhöhten Tidehochwasserständen verstärkt.

Die Berechnung des residualen – des „als Rest verbleibenden“ – Sedimenttransportes erlaubt eine detaillierte Betrachtung der Transportmengen und -richtungen. Dabei werden die Produkte aus der Strömungsgeschwindigkeit (u) und der Sedimentkonzentration (c) über die Wassertiefe (d) und das Messintervall (t) integriert. Die von der Strömungsrichtung (x, y) abhängigen vektoriellen Sedimentfrachten (r) werden über eine Tide aufsummiert. Der Vektor R gibt den resultierenden Betrag und die Richtung der über einen Meter Breite und eine Tide im Watt transportierten Sedimentfracht an.

$$\vec{r}(x, y) = \int_t \int_d u \cdot c \, dd \, dt \quad (70)$$

$$\vec{R}(x, y) = \sum_1^n \vec{r}_i \quad (71)$$

In Abbildung 81 sind die residualen Transporte im Untersuchungsgebiet dargestellt (vgl. Anhand D). Bei mittleren Tiden ist an den Messpositionen auf den Wattflächen nordwestlich der Neufelder Rinne der residuale Transport nach Südosten auf die Rinne gerichtet. An Position 13 ist der Transport dem natürlichen Gefälle des Wattbodens an dieser Stelle folgend etwas weiter nach Süd-Südost verschoben. Die während einer Tide transportierten Mengen liegen zwischen drei und vier Tonnen Sediment pro Meter Breite. Bei Tiden mit geringeren Tidehochwasserständen reduziert sich die Sedimentfracht bei gleichbleibenden Richtungen auf maximal eine Tonne Sediment pro Meter Breite. Während Tiden mit erhöhten Tidehochwasserständen vergrößert sich die Sedimentfracht auf bis zu 8 t/m, bei vereinzelt Ereignissen auf bis zu 16 t/m. Eine kürzere Messkampagne an Position 93 auf dem Neufelder Sand etwas südlich der Neufelder Rinne ergab Sedimentfrachten von ca. 2 t/m in ost-südöstliche Richtungen bei mittleren Tiden.

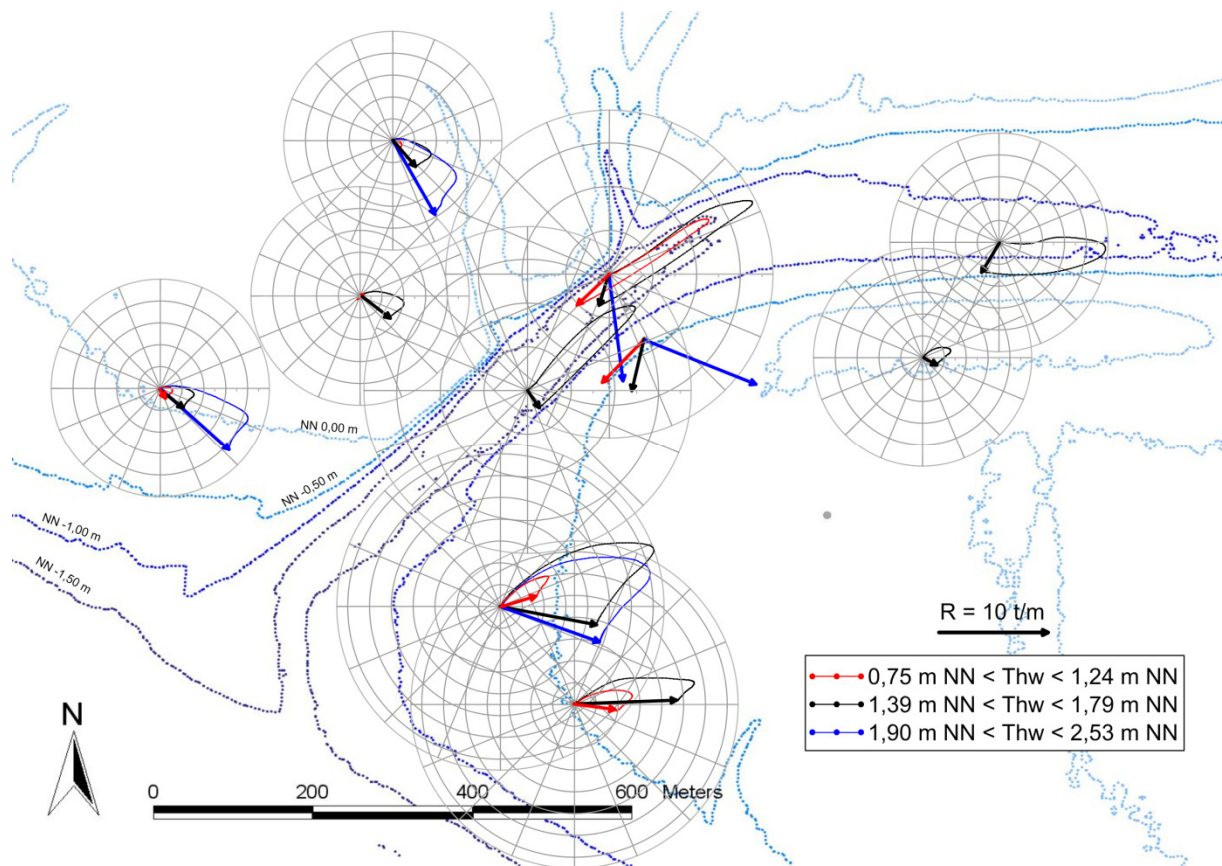


Abbildung 81: Verteilung der residualen Sedimentfrachten im Untersuchungsgebiet

An der Wattkante an den Messpositionen 8 und 15 werden während mittlerer Tiden 9 bis 10 t/m in östliche (Position 8) bzw. ost-südöstliche Richtungen (Position 15) transportiert. Bei Tiden mit geringeren Tidehochwasserständen reduziert sich die Fracht auf ca. 4 t/m.

Innerhalb der Neufelder Rinne (Positionen 2, 3, 91 und 92) sind die während der Flut- und Ebbeperiode entlang der Achse der Rinne transportierten Sedimentfrachten erkennbar. Diese Transportachsen haben an den Positionen 91, 2 sowie 3 einen Verlauf von Südwest nach Nordost und an Position 92 einen West-Ost-Verlauf. In der Flutphase werden bis zu 10 t/m Richtung Nordosten bzw. Osten transportiert, in der Ebbeperiode etwa die gleiche Sedimentfracht in südwestliche bzw. westliche Richtung. Unmittelbar nach Tidehochwasser wird die Neufelder Rinne zunächst in östliche, dann in südöstliche Richtungen quer überströmt, bevor der lenkende Einfluss der Rinne wieder einsetzt. In der Summe weisen die Messpositionen 2, 3 und 92 eine residuale Transportrichtung nach Süd-Südwesten auf, wobei 3 bis 5 t/m transportiert werden und die größten Werte wiederum an der Position 3 im Jahr 2008 erreicht werden. Während der kürzeren Messkampagne an Position 91 wurden eher geringere Sedimentfrachten von ca. 2 t/m in süd-südöstliche Richtungen festgestellt. Bei Tiden mit geringeren Scheitelwasserständen verändert sich die Richtung des residualen Transportes dem Ebbestrom der Rinne folgend nach Südwesten. Die Sedimentfracht erhöht sich dabei auf 5 bis 6 t/m. Bei Tiden mit erhöhten Tidehochwasserständen dominiert der Transport während der Flutphase und kurz nach Tidehochwasser in östliche Richtungen. Der residuale Transport weist dann nach Süd-Südost (Position 2) bzw. nach Ost-Südost mit Sedimentfrachten von 10 bis 12 t/m.

Insgesamt ist der Sedimenttransport auf den Wattflächen im Untersuchungsgebiet durch den Flutstrom dominiert. Während mittlerer Tiden weist der residuale Transport auf den Wattflächen nordwestlich der Neufelder Rinne nach Südosten in Richtung Rinne. An der Wattkante östlich der Rinne ist der Transport nach Osten gerichtet. An diesen exponierter gelegenen Positionen werden zudem größere Sedimentmengen transportiert als auf den höher und geschützter liegenden Wattflächen nordwestlich der Neufelder Rinne aber auch auf dem Neufelder Sand südlich der Rinne. Bei Tiden mit erhöhten Wasserständen und damit einhergehenden größeren Strömungsgeschwindigkeiten und oftmals größeren Wellenhöhen, vergrößert sich die Menge des transportierten Materials bei nahezu unveränderten Richtungen. Bei Tiden mit geringen Tidehochwasserständen reduziert sich die Menge des transportierten Sedimentes. Innerhalb der Neufelder Rinne ist eine leichte Dominanz des Ebbestromes erkennbar. Diese Dominanz verstärkt sich bei Tiden mit geringen Scheitelwasserständen und verringert sich bei höher auflaufenden Tiden.

Die gemessenen Sedimentfrachten und Transportrichtungen erklären die aufgezeichneten morphologischen Veränderungen (vgl. Kapitel 7.3). Über die Wattflächen westlich der Neufelder Rinne werden Sedimente in Richtung der Rinne transportiert und schließlich in die Rinne eingetragen. Durch den sohnahen Transport lagern sich die Sedimente am West-

bzw. Nordwesthang der Neufelder Rinne an und verengen den Querschnitt. Der dominierende Ebbestrom in der Neufelder Rinne erhält den für den Abfluss erforderlichen Querschnitt durch Erosion der Ost- bzw. Südostufer der Rinne, an denen der Sedimentnachschieb deutlich geringer ist als am Westufer. Es resultiert eine West-Ost-Migration der Neufelder Rinne, die im Bereich des höchsten Sedimenttransportes – also an der Wattkante – am größten ist. Wie in Kapitel 7.3.2 beschrieben, setzt sich diese Bewegung fort, bis sich am Prallhang des Ebbestroms in der Rinne ein Durchstich zu einem neuen Verlauf der Einfahrt einstellt. Durch die hohen Sedimenttransportraten und die fehlende erodierende Ebbströmung sedimentiert der alte Arm der Einfahrt in der Folge schnell zu und verschwindet. Auch im Bereich des Hauptteils der Neufelder Rinne findet eine Verschiebung der Prielachse nach Südosten statt. Aufgrund der längeren Periode dieser Oszillation konnte dieser Prozess nur einmal während des Untersuchungszeitraumes festgestellt werden. Es wird jedoch angenommen, dass die Verschiebung durch die von Westen und Nordwesten sohnah eingetragenen Sedimente nur so lange dominant ist, bis der Verlauf der Achse der Rinne eine zu starke Nord-Süd-Ausrichtung besitzt und der von Osten kommende Ebbestrom den West- bzw. Nordwesthang der Rinne erodiert. Es folgt eine Rückverschiebung der Achse des Hauptteils der Rinne.

Teile der von Nordwesten in die Neufelder Rinne eingetragenen Sedimente werden mit dem Ebbestrom aus der Rinne transportiert. Die südwestliche Komponente des residualen Transportes in der Rinne ist dabei gering und führt zur Ausbildung eines nicht sehr ausgedehnten Ebbdeltas am Übergang der Einfahrt der Rinne zu tieferem Wasser.

Dieses Schema des residualen Transportes erklärt die Morphodynamik im Untersuchungsgebiet bei mittleren Tiden. Bei Tiden mit geringeren Tidehochwasserständen reduziert sich der Sedimenteintrag über die Wattflächen. In der Neufelder Rinne hingegen wird die Ebbestromdominanz größer. Bei Tiden mit höheren Tidehochwasserständen vergrößert sich die Menge des über die Wattflächen nach Osten transportierten Materials.

Es bleibt zu klären, ob diese Ereignisse eine Beschleunigung der morphodynamischen Prozesse verursachen und falls ja, was neben den erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten die treibenden Kräfte dieser Prozesse sind.

8.2 Einfluss von Temperatur und Salzgehalt auf die Sedimentkonzentration

In Kapitel 7.5 wurde eine saisonale Schwankung der Sedimenttransportrate festgestellt. Dabei wurde ein Zusammenhang mit der Wassertemperatur vermutet, wobei geringere Temperaturen eine höhere kinematische Viskosität ergeben, die die Sinkgeschwindigkeiten der Sedimente geringer werden lässt (vgl. Kapitel 4.5.3).

Die kinematische Viskosität ist definiert als Quotient der dynamischen Viskosität und der Dichte des Fluids:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (72)$$

η = Dynamische Viskosität [N·s/m²]

Es existiert ein Zusammenhang zwischen der Dichte reinen Wassers und der Temperatur T in Grad Celsius, der nach MALCHEREK (2010) basierend auf dem „Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards“ (UNESCO, 1987) wie folgt approximiert werden kann:

$$\rho(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 \quad (73)$$

wobei

$$a_0 = +999,842594$$

$$a_1 = +6,793952 \cdot 10^{-2}$$

$$a_2 = -9,095290 \cdot 10^{-3}$$

$$a_3 = +1,001685 \cdot 10^{-4}$$

$$a_4 = -1,120083 \cdot 10^{-6}$$

$$a_5 = +6,536332 \cdot 10^{-9}$$

Temperaturänderungen beeinflussen die kinematische Viskosität somit durch eine veränderte Dichte. Zusätzlich wirken sich Temperaturänderungen auf die dynamische Viskosität aus⁹.

VAN RIJN (1993) gibt folgende Approximation der kinematischen Viskosität als Funktion der Temperatur T in Grad Celsius an:

$$\nu = (1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2) \cdot 10^{-6} \quad (74)$$

DILLO (1960) führte Untersuchungen zum Zusammenhang von Wassertemperaturen und Sedimentkonzentrationen durch, in denen eine Umlaufrinne bei gleichbleibender Wasser- und Sandfüllung über mehrere Tage mit einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von 0,69 m/s betrieben wurde. Als Sohlmaterial wurde ein Sand mit einem mittleren Korndurchmesser von 0,20 mm verwendet. Nachdem sich eine stationäre Strömung mit gleichbleibendem Sandtransport eingestellt hatte, wurde die Wassertemperatur in mehreren Phasen

⁹ Die dynamische Viskosität der meisten Fluide nimmt mit steigender Temperatur ab (STREET ET AL., 1996).

steigender und sinkender Temperaturen zwischen 0,3 °C und 40 °C variiert. In regelmäßigen Zeitabständen wurden 0,20 m über der Sohle Schwebstoffproben entnommen.

Die Ergebnisse der Studie zeigen eine Abnahme der Schwebstoffmengen mit zunehmender Temperatur. Abbildung 82 zeigt die von Dillo berechnete Näherung an die Versuchsergebnisse (schwarze Linie). Im Untersuchungszeitraum wurden auf den Wattflächen des Neufelder Watts mit Hilfe der Temperatursensoren der ADCP-Geräte Wassertemperaturen zwischen 5 °C und 25 °C aufgezeichnet (vgl. Anhang F). Dabei sorgt Sonneneinstrahlung auf den Wattflächen dafür, dass die Wassertemperatur selbst bei geringeren Lufttemperaturen diese deutlich übersteigt. Die blaue Kurve in Abbildung 82 gibt die temperaturbedingte Abweichung der Sedimentkonzentration von der Konzentration bei einer gewählten Referenztemperatur von 10 °C an. Bei den Versuchen von Dillo lag die Sedimentkonzentration bei einer Wassertemperatur von 5 °C bei dem 1,4-fachen der Konzentration von 10 °C. Bei einer Wassertemperatur von 25 °C lag die Sedimentkonzentration bei 63 % der Konzentration von 10 °C.

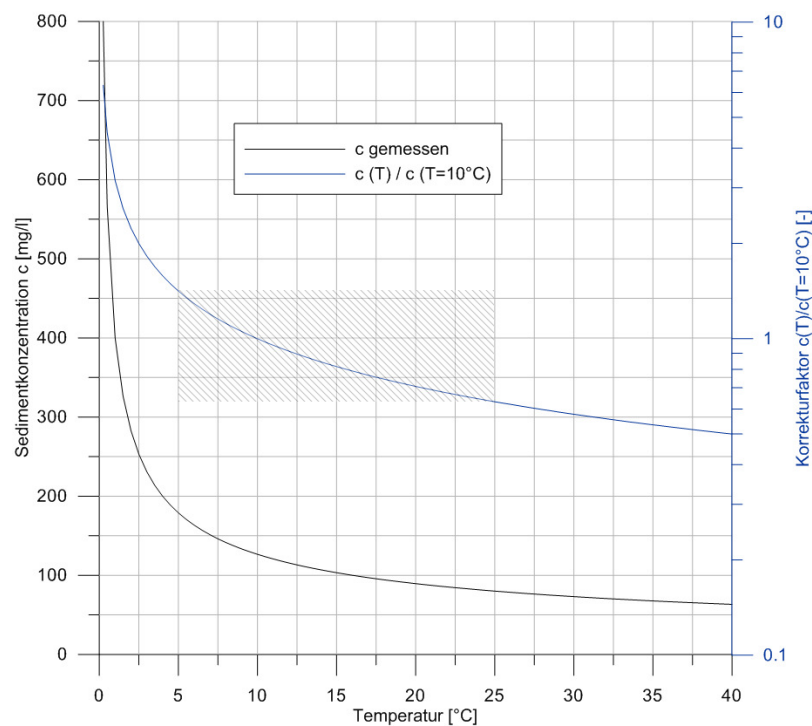


Abbildung 82: Schwebstoffkonzentration in Abhängigkeit von der Wassertemperatur

Des Weiteren stellte DILLO (1960) einen Einfluss des Salzgehaltes des Wassers auf den Sedimenttransport fest.

Das Neufelder Watt liegt am seeseitigen Ende der Brackwasserzone der Elbe, in der der Salzgehalt je nach Tide- und Abflussbedingungen örtlich und zeitlich variabel ist. Im Rahmen der Untersuchungen im Neufelder Watt wurden keine kontinuierlichen Messungen der

Salzgehalte des Wassers vorgenommen. Zur Abschätzung der Salinität wurden Messungen an zwei Dauermessstationen der Beweissicherung Tideelbe südlich des Neufelder Sandes herangezogen (<http://www.portal-tideelbe.de>), die für die Jahre 2005 und 2006 (bis September) für den Messpfahl LZ2 – Neufelder Sand sowie für die Jahre 2008 (ab Mai) und 2009 für die Messboje LZ2a – Neufeldreedee vorlagen.

Der Salzgehalt an diesen Messstationen schwankt über den Verlauf einer Tide um etwa 10 ‰. Im Verlauf eines Jahres erreicht der Tagesmittelwert des Salzgehaltes zu Zeiten des höchsten Oberwasserabflusses zwischen Februar und April minimale Werte zwischen 1 ‰ und 5 ‰. Dann steigt der Salzgehalt an und erreicht zwischen Juni und Dezember deutlich höhere Tagesmittelwerte zwischen etwa 8 ‰ und 18 ‰. Spitzenwerte erreichen zum Zeitpunkt des Hochwassers etwa 25 ‰ (vgl. Darstellung im Anhang G).

Während der Fächerecholotmessungen wurden im Bereich des Wattsockels der Neufelder Rinne Schallgeschwindigkeitsprofile aufgezeichnet. Dabei geht der aus der gemessenen Leitfähigkeit berechnete Salzgehalt in die Berechnung der Schallgeschwindigkeit ein. Die gemessenen Salzgehalte decken sich gut mit den Werten der Dauermessstationen.

Aufgrund der veränderten Strömungssituation im Wattbereich, im Vergleich zu tieferen Bereichen im Hauptstrom der Elbe, lassen sich keine detaillierten Aussagen aus den Daten der Dauermessstationen für den Wattbereich ableiten. Des Weiteren sind die vorhandenen Zeitreihen der Dauermessstationen über den Untersuchungszeitraum unvollständig.

Der Einfluss veränderter Salzgehalte auf die Sedimentkonzentrationen wird in dieser Untersuchung somit vernachlässigt.

8.3 Einfluss von Wind auf die Sedimentkonzentration

In Kapitel 7.5 wurde ein Einfluss der Windgeschwindigkeit sowie der Windrichtung auf die Sedimenttransportrate festgestellt. Dabei war die Strömungsgeschwindigkeit, die ihrerseits durch den Wind beeinflusst wird, bereits in der Sedimenttransportrate enthalten. Dies hat allerdings den Nachteil, dass Änderungen des Tidehubs und damit die Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten den Windereignissen mit einer Phasenverschiebung folgen, was zu einer größeren Streuung der Ergebnisse führt. Im flachen Wasser auf dem Watt werden die Windkräfte schneller in entsprechende Wellen und Strömungen umgesetzt, als dies durch die Abweichungen von mittleren Tideverhältnissen erfolgt.

In diesem Kapitel wird der mittelbare Zusammenhang von Wind und Sedimentkonzentration untersucht. In Abbildung 83 sind die über jeweils eine Tide gemittelten Suspensionskonzentrationen der Messungen an Position 13 in Abhängigkeit von der Windstärke aufgetragen.

Dabei ist die Sedimentkonzentration, die durch die durchgezogenen Linien dargestellt ist, das arithmetische Mittel aus den einzelnen Messwerten bei einer Windstärke. Die gestrichelten Linien geben die Maximal- und Minimalwerte der jeweiligen Messungen an. Die Sedimentkonzentrationen wurden außerdem nach DILLO (1960) auf 10 °C bezogen (vgl. 8.2). In grüner Farbe sind die Suspensionskonzentrationen bei Wind aus westlichen Richtungen dargestellt, in blauer Farbe die Suspensionskonzentrationen bei Wind aus östlichen Richtungen.

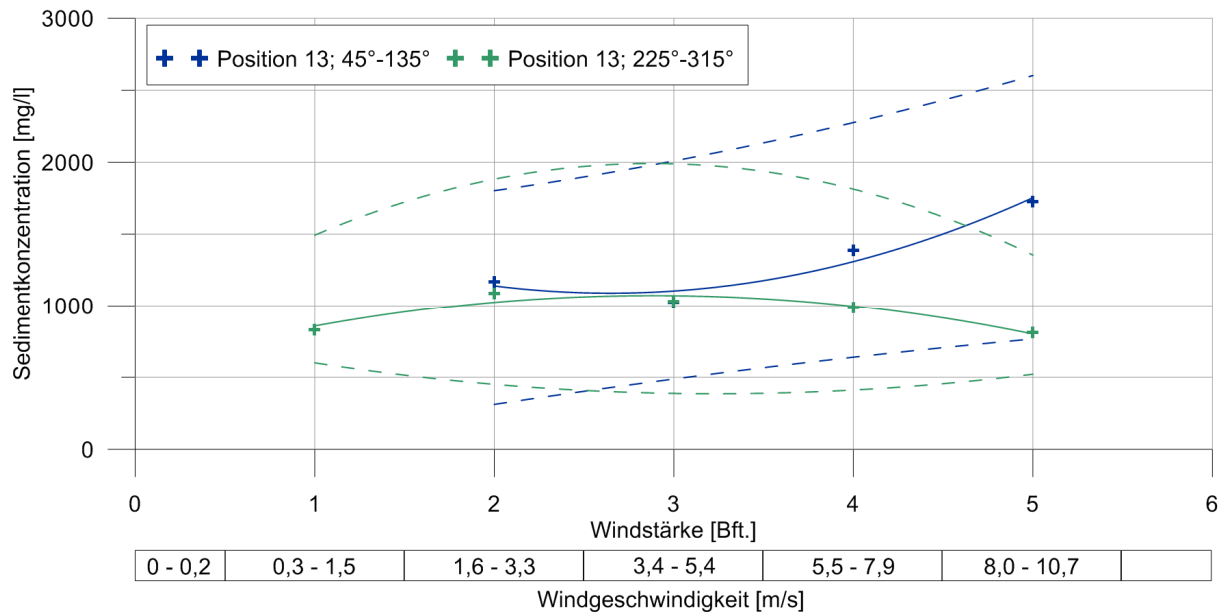


Abbildung 83: Veränderungen der Sedimentkonzentrationen mit der Windstärke; Mittelwerte (durchgezogene Linien), Maximal- und Minimalwerte (gestrichelte Linien) aller Messungen für verschiedene Windstärken an Position 13; Unterteilung nach Wind aus westlichen und östlichen Richtungen

Bei Wind aus westlichen Richtungen bleibt die Sedimentkonzentration selbst bei zunehmenden Windgeschwindigkeiten nahezu unverändert. Dabei weichen die tidegemittelten Konzentrationen innerhalb eines Windstärkesektors zum Teil bis zu Faktor 2 von den Mittelwerten ab.

Bei Wind aus östlichen Richtungen verläuft die Sedimentkonzentration bei 2 bis 3 Windstärken ebenfalls nahezu konstant. Ab Windstärke 3 steigt die Sedimentkonzentration deutlich an. Die Minimal- und Maximalwerte der Tiden steigen parallel dazu an, wobei sich auch hier Abweichungen bis zu Faktor 2 von den Mittelwerten einstellen.

Westwind hat somit keinen relevanten Einfluss auf die Sedimentkonzentrationen. Die bei größeren Windgeschwindigkeiten erhöhten Sedimenttransportraten sind auf größere Strömungsgeschwindigkeiten zurückzuführen. Dies stimmt mit den Ergebnissen des Kapitels 7.4.3 überein, wonach die Sedimentkonzentrationen bei Tiden mit erhöhten Wasserständen,

die in der Regel durch stärkere Westwinde hervorgerufen werden, gegenüber mittleren Tiden nicht erhöht sind. Die bei höheren Windgeschwindigkeiten wachsenden Wellenhöhen treffen in der Regel mit höheren Wasserständen zusammen, was den Einfluss der Wellen auf die Suspensionskonzentration geringer werden lässt.

Bei stärkerem Ostwind steigen die Sedimenttransportraten trotz dann in der Regel geringer Strömungsgeschwindigkeiten leicht an. Dies deutet auf erhöhte Sedimentkonzentrationen in diesen Phasen hin. Abbildung 83 bestätigt dies durch ansteigende Sedimentkonzentrationen bei größeren Windstärken. Hier nimmt der Einfluss von Wellen deutlich zu.

Die Ergebnisse an Position 15 auf dem Neufelder Sand und Position 3 (2008) am südlichen Hang der Neufelder Rinne bestätigen diese Aussagen (vgl. Anhang H).

Eine präzise Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Windgeschwindigkeit und Sedimentkonzentration kann nicht vorgenommen werden. Hierzu ist die Interaktion der Einflüsse Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Seegang zu komplex. Im Folgenden werden jetzt die direkten Auswirkungen der letzten beiden Faktoren auf die Sedimentkonzentrationen untersucht.

8.4 Einfluss von Strömung auf die Sedimentkonzentration

Abbildung 84 zeigt den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentration an Messposition 13. Dabei sind 16.403 Einzelmessungen der Sedimentkonzentration und die zum jeweiligen Zeitpunkt gemessene Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt. Die Sedimentkonzentrationen sind dabei bereits auf die Referenztemperatur von 10 °C bezogen. Bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 150 und 400 mm/s, die am häufigsten auftreten (vgl. oberer Teil der Abbildung 84), ergibt sich eine Punktwolke von Messungen der Sedimentkonzentrationen. So können bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 300 mm/s Sedimentkonzentrationen von 50 mg/l bis 5.000 mg/l auftreten.

Bereits aus den Darstellungen in Kapitel 7.4.3 geht hervor, dass die Strömungsgeschwindigkeit nicht die einzige Größe ist, die die Sedimentkonzentration bestimmt.

Im unteren Teil der Abbildung 84 sind die Strömungsgeschwindigkeiten in Klassen von 50 mm/s eingeteilt (wegen der geringeren Anzahl von Messungen ab 1.100 mm/s in Klassen mit der Breite 200 mm/s). Die Kreuze markieren die Mittelwerte aller Messungen einer Klasse, die durchgezogene Linie den linearen Trend der Mittelwerte. Die gestrichelten Linien zeigen den linearen Trend der 25 %-Quantile (untere Linie) und der 75 %-Quantile (obere Linie) aller Messungen einer Klasse. Die meisten Messungen der Sedimentkonzentrationen liegen in einem Bereich mit dem Faktor 2 um die Mittelwerte der Klassen. Mit steigenden

Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich nur ein schwacher Anstieg der Sedimentkonzentrationen. Vielmehr gibt es eine Grundkonzentration von etwa 1.000 mg/l, die bereits bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten vorhanden ist und aus einer Resuspendierung der am Ende der vorangegangenen Ebbe abgelagerten feinsten Sedimentpartikel resultiert. Ab einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 250 mm/s findet ein beschleunigter Anstieg der Sedimentkonzentrationen statt. In diesen Bereich fällt auch das Maximum der tiefengemittelten Sedimentkonzentrationen über den Verlauf einer Tide (vgl. Kapitel 7.4.3).

Ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 800 mm/s liegen deutlich weniger Messungen innerhalb der jeweiligen Klassen, wodurch sich eine größere Abweichung der Mittelwerte vom linearen Trend ergibt.

Mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,29$ liegt an Position 13 ein nicht-signifikanter linearer Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentkonzentration vor. Das Bestimmtheitsmaß gibt den Prozentanteil der Varianz der Sedimentkonzentration an, der durch eine lineare Regression erklärt wird.

Ähnliche Ergebnisse liefert die Auswertung der Sedimentkonzentrationen und Strömungsgeschwindigkeiten an Position 15, wobei insgesamt jedoch höhere Konzentrationen erreicht werden. Die Punktwolke der Messungen ist weiter gestreckt und liegt zwischen 100 und 500 mm/s. Die Mittelwerte der verschiedenen Klassen der Strömungsgeschwindigkeit unterliegen größeren Schwankungen als Position 13 (Abbildung 85). Demnach ergibt sich auch an Position 15 ein nicht-signifikanter linearer Zusammenhang zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentkonzentration ($R^2 = 0,09$).

An Messposition 3 ist die Punktwolke zwischen Strömungsgeschwindigkeiten von 100 mm/s und 900 mm/s gestreckt und dabei über einen kleineren Sedimentkonzentrationsbereich verteilt. Zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der Sedimentkonzentration besteht ein sehr guter linearer Zusammenhang ($R^2 = 0,94$). Eine Verdreifachung der Strömungsgeschwindigkeit führt dabei zu einer Verdopplung der Sedimentkonzentration.

Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentration ist je nach Messposition unterschiedlich stark ausgeprägt. So besteht an Position 3 in der Neufelder Rinne ein deutlicher linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen, während dies auf dem Neufelder Watt (Position 13) und dem Neufelder Sand (Position 15) nicht der Fall ist. An diesen beiden Positionen haben andere Faktoren, wie z.B. Seegang oder Sedimenteintrag über das Klotzenloch, einen entscheidenden Einfluss auf die Sedimentkonzentration. Im folgenden Kapitel wird der Einfluss des Seegangs auf die Sedimentkonzentration geprüft.

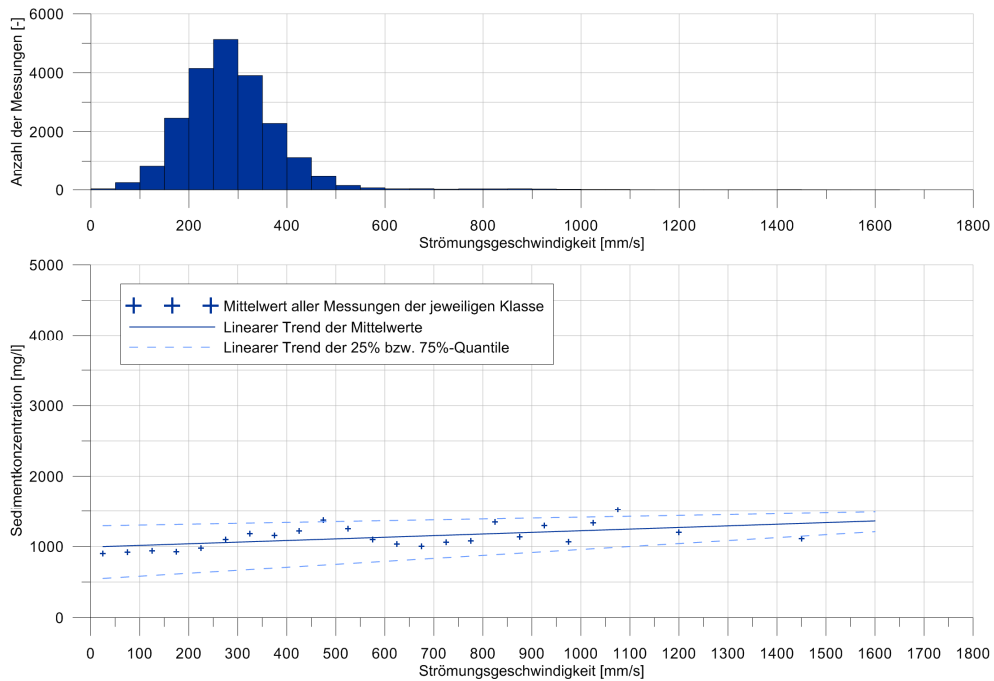


Abbildung 84: Darstellung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentration an Messposition 13

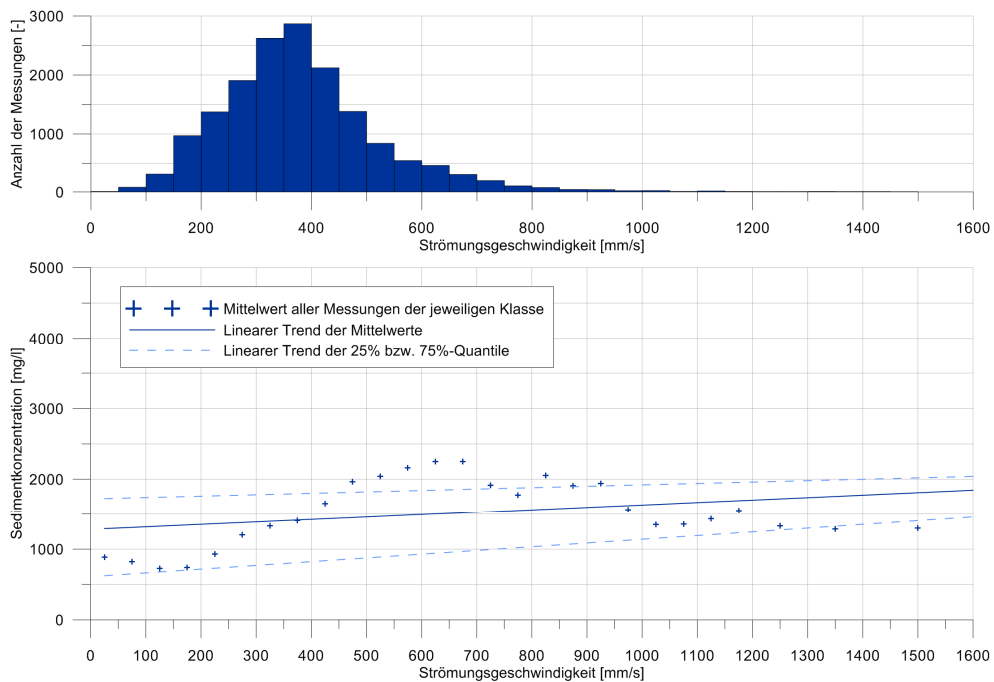


Abbildung 85: Darstellung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentration an Messposition 15

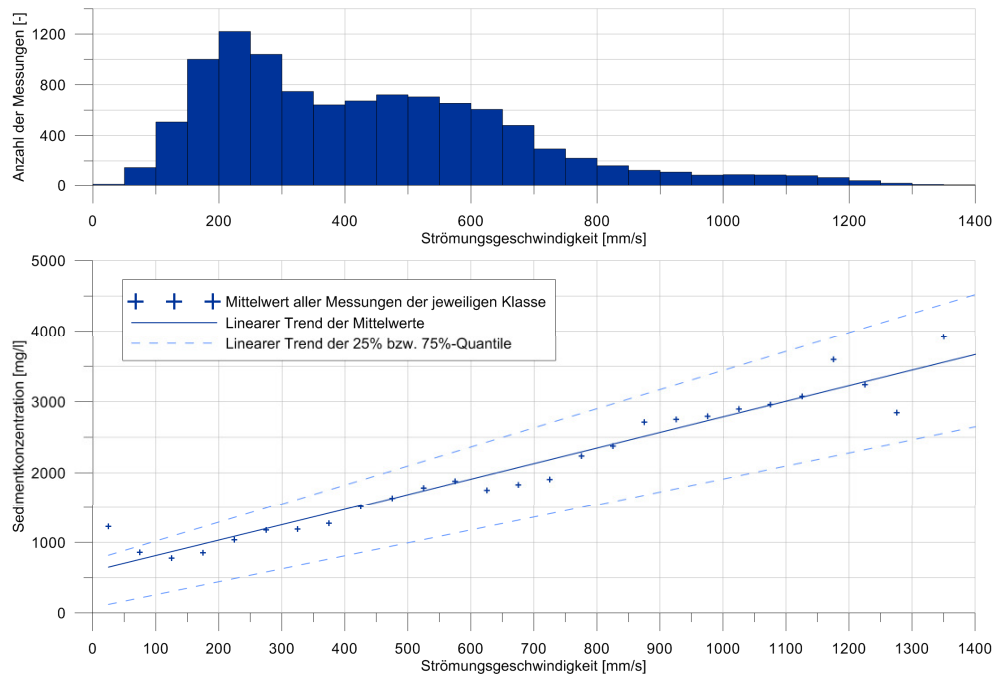


Abbildung 86: Darstellung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentration an Messposition 3 (2008)

8.5 Einfluss von Seegang auf die Sedimentkonzentration

Die maßgebliche Größe zur Untersuchung des Einflusses von Seegang auf die Sedimentkonzentration ist die sohlnahe horizontale Orbitalgeschwindigkeit unter Wellen, die nach der linearen Wellentheorie berechnet werden kann.

$$u_{\text{Orbital,hor.}} = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cdot \cos\theta \quad (75)$$

mit:

$$\cos\theta = kx - \omega x \text{ (Phasenwinkel)}$$

Dabei werden sowohl die Wellenhöhe, die Wellenlänge und die Wellenperiode als auch die Wassertiefe berücksichtigt und somit dem Umstand Rechnung getragen, dass im Watt Wellen gleicher Länge und Höhe bei verschiedenen Tidewasserständen unterschiedliche Schubspannungen an der Sohle hervorrufen können.

Für alle Messungen der Sedimentkonzentrationen, für die zum gleichen Zeitpunkt auch Messungen der Strömungsgeschwindigkeit sowie Seegangsmessungen vorliegen, wurden aus der für diesen Zeitabschnitt signifikanten Wellenhöhe und der mittleren Wellenperiode sowie dem entsprechenden Wasserstand die maximalen horizontalen Orbitalgeschwindigkeiten berechnet. Diese lagen an Position 13 im Wesentlichen zwischen 0 mm/s und 600 mm/s, an Position 15 zwischen 0 mm/s und 300 mm/s und an Position 17 zwischen 0 mm/s und

300 mm/s. Die jeweiligen Messzeiträume sind jedoch nicht identisch. An Position 13 wurde deutlich länger aufgezeichnet, wodurch mehr Starkwindereignisse berücksichtigt werden konnten. Aus den Auswertungen ergeben sich Punktwolken im jeweiligen Bereich der Orbitalgeschwindigkeiten mit stark schwankenden Sedimentkonzentrationen (vgl. Anhang I). Da der Einfluss der Tidedrömung dem Einfluss der Orbitalgeschwindigkeit an dieser Stelle jedoch überlagert ist, ist kein deutlicher Zusammenhang zu erwarten.

In Abbildung 87, Abbildung 88 und Abbildung 89 sind die gemessenen Sedimentkonzentrationen als Funktion der addierten richtungsgleichen Tidedstrom- und Orbitalgeschwindigkeiten aufgetragen. In dieser Darstellung sind also die temperaturbereinigten Sedimentkonzentrationen unter Berücksichtigung von Tidedrömung und durch Seegang induzierter Orbitalbewegungen ausgewertet. Im Vergleich zu den Darstellungen in Kapitel 8.4 verlagern sich viele Messpunkte höherer Sedimentkonzentrationen durch die Addition der Orbitalgeschwindigkeiten nach rechts und lösen die Punktwolke auf. An den Messpositionen 13 und 17 sind jetzt begründete lineare Zusammenhänge zwischen Orbital- und Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentkonzentrationen erkennbar ($R^2 = 0,47$ für Position 13; $R^2 = 0,44$ für Position 15). Im Vergleich zur Auswertung des Einflusses der Strömungsgeschwindigkeiten ohne Berücksichtigung der Orbitalgeschwindigkeiten steigt das Bestimmtheitsmaß an Position 15 sehr deutlich. Hier ist der Einfluss des Seegangs auf die Sedimentkonzentrationen größer als an Position 13, an der weitere, bisher nicht berücksichtigte Effekte die Sedimentkonzentration beeinflussen.

An Position 3 steigt das Bestimmtheitsmaß durch die Berücksichtigung von Seegang auf $R^2 = 0,95$.

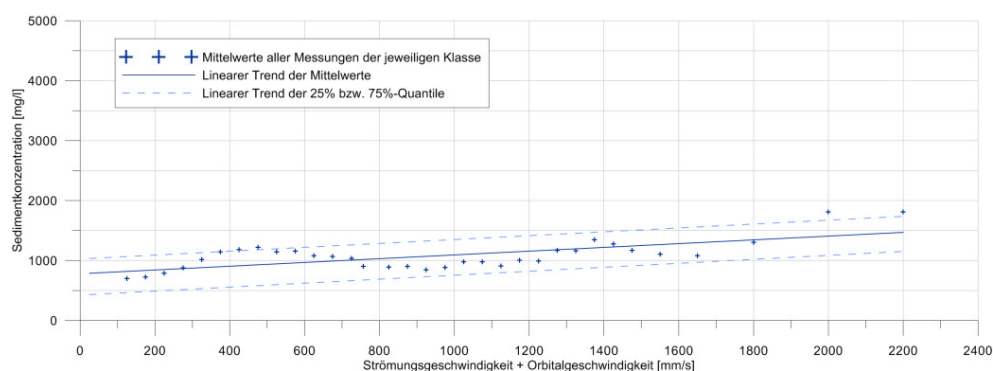


Abbildung 87: Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit und Orbitalgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentrationen an Position 13

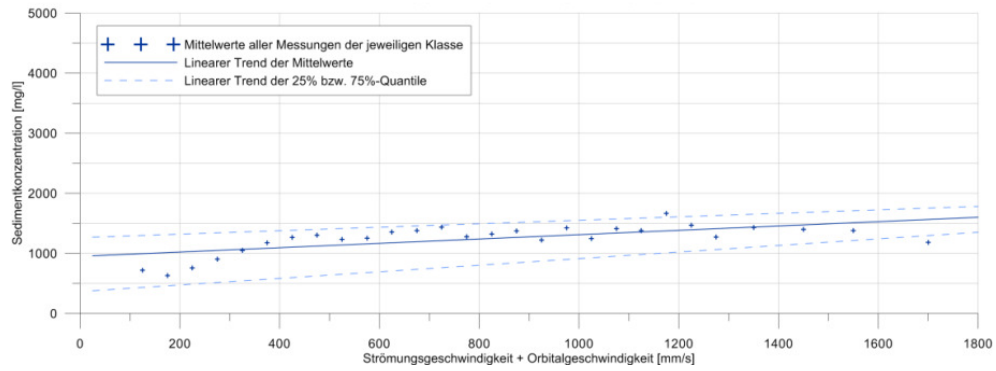


Abbildung 88: Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit und Orbitalgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentrationen an Position 15

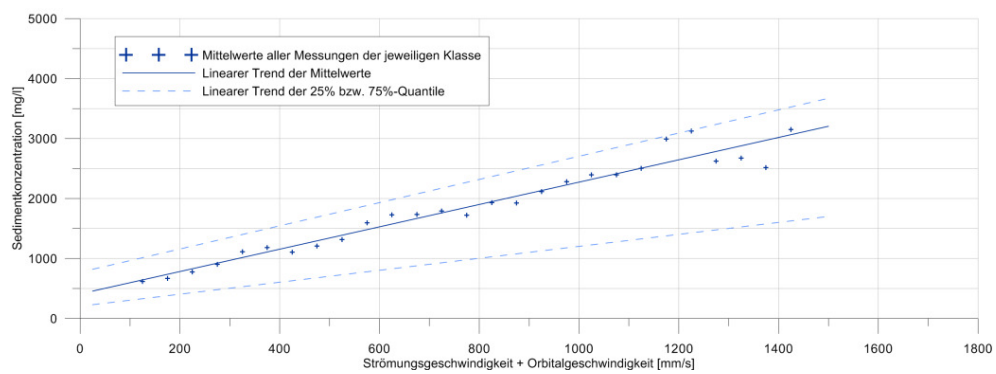


Abbildung 89: Einfluss von Strömungsgeschwindigkeit und Orbitalgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentrationen an Position 3 (2008)

9 Anwendungsmöglichkeiten

Vor dem Hintergrund eines stetig wachsenden Interesses an einem nachhaltigen „Wattmanagement“ gewinnt die Erfassung und Beschreibung hydrodynamischer und morphodynamischer Prozesse in Wattgebieten an Bedeutung. Als offene Fragestellungen sind dabei das Verhalten von Wattflächen bei durch einen Klimawandel verursachten steigenden Wasserständen und häufigeren Stürmen, der Einfluss anthropogener Aktivitäten auf die Sedimentdynamik, die Rolle von Wattflächen als Sedimentquelle oder -senke oder die Verlagerung von Wattstrukturen unter variierenden Einflüssen zu nennen. Während die erste Fragestellung im schlimmsten Fall den Küstenschutz betrifft, können letztere Aspekte das Sedimentmanagement in Ästuaren beeinflussen. So sind Informationen von Bedeutung, unter welchen äußeren Umständen Sedimente im Wattenmeer mobilisiert werden und in die Fahrrinnen eingetragen werden können. Auch die Stabilität von Sedimentablagerungsflächen kann besser abgeschätzt werden. Nicht zuletzt kann ein besseres Verständnis der Verlagerung von Wattstrukturen die Aufrechterhaltung von Wattfahrwassern sowie die Standsicherheit baulicher Anlagen im Watt verbessern. Diese Erkenntnisse können Eingang in bestehende Sedimentmanagementkonzepte finden und zur Optimierung von Unterhaltungsbaggerungen sowie zur Aufrechterhaltung von Fahrwassertiefen beitragen. Dabei können zum einen ermittelte empirische Zusammenhänge helfen, zum anderen können die gewonnenen Informationen genutzt werden, um die Verwendung numerischer Modelle zu optimieren.

Die Hydrodynamik von Wattflächen wurde in wenigen bestehenden Untersuchungen beschrieben, wobei nur ein Teil davon den eulitoralischen Bereich abdeckt. Demnach ermöglicht diese Arbeit ergänzende Aussagen zu Tidenströmungen und Seegang im Watt, die in ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung sowie in der Dauer der Messungen einen wesentlichen Informationsgewinn bedeuten.

Bei der Beschreibung morphodynamischer Prozesse auf Wattflächen auf kleineren Raum- und Zeitskalen bestehen Defizite. So gibt es deutliche Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Sedimenttransportraten (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3). Veränderungen von Wattstrukturen und deren Ursachen bzw. auslösende Kräfte sind nicht ausreichend dokumentiert. Die umfangreichen Messungen im Rahmen dieser Arbeit tragen dazu bei, die für morphologische Veränderungen im Watt wesentlichen Parameter und entscheidenden Phasen zu benennen.

Es existieren diverse Berechnungsansätze für Sedimenttransportraten, von denen jedoch keine explizit für Wattgebiete entwickelt wurde. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen

Datensätze und Erkenntnisse können genutzt werden, um einige dieser Ansätze auf ihre Anwendbarkeit in Wattgebieten zu prüfen und wichtige Hinweise zur Verwendung in numerischen Modellen zu geben.

9.1 Hinweise zur Verwendung von Berechnungsansätzen

Die Berechnung des residualen Transportes zeigt, dass der Sedimenttransport bei mittleren Tiden die morphologischen Strukturen im Untersuchungsgebiet bestimmt (vgl. Kapitel 8.1). Bei Tiden, deren Tidehochwasser über dem Mittleren Tidehochwasser liegen ($1,90 \text{ m NN} < \text{Thw} < 2,53 \text{ m NN}$), steigt die Sedimentfracht auf höher gelegenen Wattflächen auf das 2,5- bis 3-fache der Sedimentfracht bei mittleren Tiden an. Die Richtung ändert sich dabei nicht signifikant. In der Neufelder Rinne beträgt die Sedimentfracht bei erhöhten Tiden ebenfalls das 2,5- bis 3-fache, wobei sich die Richtung jedoch deutlich gegen den Uhrzeigersinn nach Osten verschiebt. An der Wattkante erhöht sich die Sedimentfracht nur unwesentlich, auch die Richtung bleibt nahezu unverändert.

Bei Tiden mit Scheitelwasserständen unter dem Mittleren Tidehochwasser ($0,75 \text{ m NN} < \text{Thw} < 1,24 \text{ m NN}$) wird auf höher gelegenen Wattflächen nur etwa ein Drittel der Sedimentmenge von mittleren Tiden transportiert. Die Transportrichtungen weichen zum Teil von denen der mittleren Tiden ab, folgen dabei aber keinem eindeutigen Muster. In der Neufelder Rinne bewirken Tiden mit geringen Scheitelwasserständen, die in der Regel bei Ostwindlagen entstehen, leicht erhöhte Sedimentfrachten (Faktor 1,1 bis 1,3), wobei sich die Richtung jedoch deutlich verändert. Der Transport folgt dann dem Ebbestrom entlang der Achse der Rinne nach Südwesten.

Sturmtiden, wie zum Beispiel vom 06. November 2007 mit einem Tidehochwasserstand von etwa 1,3 m über dem Mittleren Tidehochwasser, verursachen Sedimentfrachten, die das 7,5-fache der normalen Sedimentfracht betragen. Die Richtung folgt deutlicher dem Flutstrom nach Osten, als dies während einer mittleren Tide der Fall ist.

Die Häufigkeit solcher Ereignisse ist jedoch gering. So traten Tiden mit einem Tidehochwasserstand von mehr als 2,53 m NN nur 21-mal bei 1.225 aufgezeichneten Tiden auf, was einer relativen Häufigkeit von 1,7 % entspricht. Tiden mit Scheitelwasserständen zwischen 1,90 m NN und 2,53 m NN (erhöhte Tiden) treten dagegen über den untersuchten Zeitraum verteilt mit einer relativen Häufigkeit von 14,6 % auf, mittlere Tiden mit einer Häufigkeit von 61,7 %.

Mittlere Tiden bestimmen somit die langfristige Morphodynamik. Erhöhte Tiden sorgen für größere Transportmengen und beschleunigen die entsprechenden Entwicklungen.

Dies wird bei Betrachtung der in Kapitel 7.3.3 ausgemachten dynamischen Phasen deutlich. So betrug die relative Häufigkeit von erhöhten Tiden im Zeitraum zwischen dem 23. Oktober 2007 und dem 10. November 2007 24,1 %, bei einer relativen Häufigkeit von mittleren Tiden von 51,8 % im gleichen Zeitraum.

Bei einer Analyse der morphologischen Veränderungen sind diese dynamischen Phasen größeren Sedimenttransportes bei erhöhten Tiden von besonderer Bedeutung. Berechnungsansätze sollten neben der Sedimentdynamik bei mittleren Tiden insbesondere den Sedimenttransport bei erhöhten Tiden gut abbilden. Sturmfluten spielen wegen ihrer geringen Eintrittshäufigkeit eine untergeordnete Rolle. Vielmehr zeigte sich, dass selbst durch einzelne Extremereignisse verursachte, sehr große Sedimentfrachten keine nennenswerten Auswirkungen auf die Bathymetrie der untersuchten Flächen hatten (vgl. Kapitel 7.3.5). Größere Veränderungen traten erst bei längeren Phasen erhöhten Transportes auf.

In Kapitel 4 wurden maßgebliche Einflussgrößen für den Sedimenttransport auf Wattflächen herausgearbeitet. Berechnungsansätze sollten möglichst viele dieser Parameter berücksichtigen. Als wichtigste Größe ist die Strömungsgeschwindigkeit zu nennen, die auf Ästuarwattflächen sowie in Prielen den größten Einfluss auf die Sedimentkonzentrationen besitzt. Seegang verändert auf Wattflächen und insbesondere an der Wattkante den Betrag der Sedimentkonzentrationen. Längerfristige Veränderungen der Sedimentkonzentrationen bis hin zu saisonalen Effekten können durch die Wassertemperatur, die ihrerseits die kinematische Viskosität des Wassers verändert, sowie durch den Salzgehalt, der die Dichte des Wassers verändert, bestimmt sein.

Zudem bestehen weitere Effekte, wie der Sedimenteintrag in das Neufelder Watt über das Klotzenloch ab einem bestimmten Wasserstand (vgl. Kapitel 7.4.3). Eine Abbildung dieser lokalen Besonderheiten in allgemein anwendbaren Formeln kann nicht erfolgen.

9.2 Bewertung von Berechnungsansätzen

In diesem Kapitel wird zunächst überprüft, wie gut verschiedene Berechnungsansätze den Verlauf und die Größenordnung der Sedimenttransportrate an verschiedenen Messpositionen bei mittleren und erhöhten Tiden beschreiben können. Dabei werden die in Kapitel 7 bestimmten mittleren Randbedingungen verwendet.

Zuerst erfolgt eine Abschätzung der Güte des Ansatzes der Berechnung des Gesamttransportes nach Engelund & Hansen (1967, vgl. Gleichung 48) sowie nach dem Ansatz von Bagnold (1966), der sich aus der Berechnung des sohnahen Transportes (vgl. Gleichung 15) und des Schwebstofftransportes (vgl. Gleichung 44) zusammensetzt.

Engelund & Hansen entwickelten ursprünglich eine Formel zur Berechnung des Geschiebetransportes über Dünen bei unidirektionaler Strömung auf der Basis einer Energiebilanz. Später wurde die Formel auch zur Bestimmung des Gesamttransportes unter Strömung und Seegang verwendet. Bei Vorhandensein gestufter Korngrößenverteilungen mit größeren Anteilen an feinen Sedimenten ist die Anwendbarkeit der Formel begrenzt, da die berechneten Transportraten deutlich geringer sind als die tatsächlichen Transportraten. Der Ansatz beinhaltet zudem keinen Grenzwert des Bewegungsbeginns und keine Unterscheidung von regelmäßigem und unregelmäßigem Seegangs (BAYRAM ET AL., 2001).

Der Ansatz von Engelund & Hansen wird maßgeblich durch die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Daneben gehen die Dichte des Wassers, die Sedimentdichte, der mittlere Korndurchmesser sowie über den Chézy-Koeffizienten die Wassertiefe und der Rauheitsbeiwert der Sohle in die Gleichung ein. Der Ansatz von Bagnold berücksichtigt darüber hinaus noch die Effizienzfaktoren des Geschiebes und der Schwebstoffe sowie die Sinkgeschwindigkeit der Sedimentpartikel.

Abbildung 90 zeigt den gemessenen Verlauf sowie den nach den beiden Ansätzen berechneten Verlauf der Sedimenttransportraten. Die gemessenen Sedimenttransportraten liegen um Faktor 1.000 über den nach Engelund-Hansen berechneten Sedimenttransportraten. Die Werte nach Bagnold liegen noch einmal um Faktor 10 unter den nach Engelund-Hansen berechneten. Beide Ansätze sind demnach nicht geeignet, den Sedimenttransport im Küstenbereich bzw. in Wattgebieten zu beschreiben und werden daher nicht weiter betrachtet.

Des Weiteren wird der Gesamttransport nach dem Ansatz von Ackers & White (1973) berechnet (vgl. Formel 47). Dieser Ansatz wurde als Berechnungsformel für den Gesamttransport grober und feiner Sedimente unter unidirektionaler Strömung entwickelt. Es wird dabei angenommen, dass grobe Sedimente als Geschiebe proportional zur Schubspannung transportiert werden, feine Sedimente dagegen als durch Turbulenz erzeugte Schwebstoffe. Das Maß der Turbulenz wird durch die durch Bodenreibung generierte Energiedissipation abgeschätzt, was zu einer Abhängigkeit der Schwebstofftransportrate von der Sohlschubspannung führt. Die empirischen Koeffizienten der Ackers-White-Formel (im Folgenden auch A&W abgekürzt) wurden mit einem Feld- und Labormessungen umfassenden Datensatz kalibriert (SOULSBY, 1997). Der Berechnungsansatz von Ackers & White von 1973 verändert sich bei Berücksichtigung des Einflusses von Wellen nach dem Ansatz von GRAAFF & VAN OVEREEM (1979) zu der in BAYRAM ET AL. (2001) dargestellten Form (vgl. Anhang J). Neben der Dichte und der kinematischen Viskosität des Wassers berücksichtigt die Formel die Sedimentdichte, den mittleren Korndurchmesser sowie den Korndurchmesser d_{35} und die Porosität des Bodens. Des Weiteren finden die nach Shields berechnete kritische Sohl-

schubspannung, die Wassertiefe und die Strömungsgeschwindigkeit Eingang in den Berechnungsansatz. Der Einfluss von Seegang wird durch die Amplitude der Orbitalgeschwindigkeit an der Sohle in der Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit bzw. Schubspannungsgeschwindigkeit berücksichtigt.

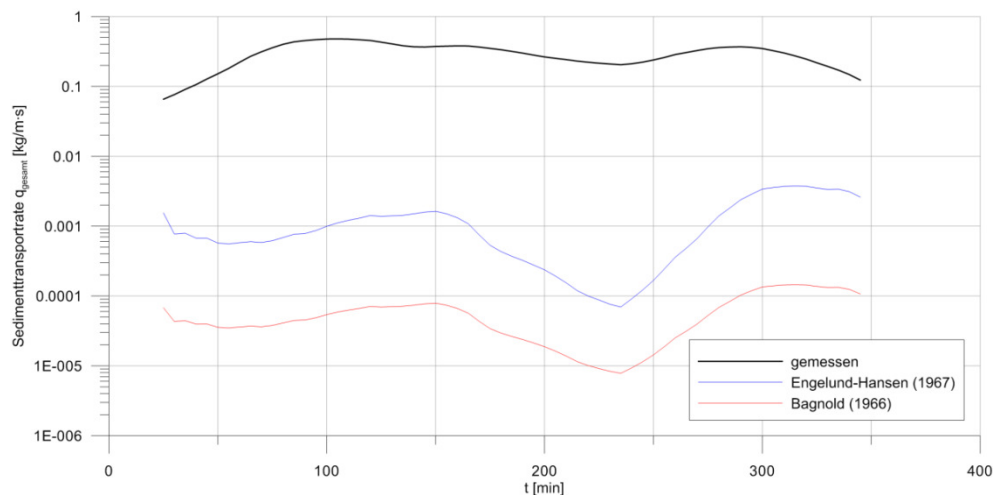


Abbildung 90: Vergleich der gemessenen Sedimenttransportrate und der nach Engelund-Hansen und Bagnold berechneten Sedimenttransportrate für eine mittlere Tide an Position 13

Die berechneten Sedimenttransportraten liegen in etwa in der Größenordnung der gemessenen Werte (vgl. Abbildung 91) und folgen qualitativ auch dem Verlauf der gemessenen Sedimenttransportrate. Dabei werden die Transportraten insgesamt jedoch deutlich überschätzt (ca. Faktor 25).

Bailard & Inman (1981) erweiterten den von Bagnold (1966) eingeführten Ansatz um durch Wellen induzierte oszillierende Strömungen bei gleichmäßiger Strömung über einem geneigten Sedimentbett. Bagnold nahm an, dass die durch den Sedimenttransport verrichtete Arbeit ein fixer Anteil der durch die Strömung abgebauten Gesamtenergie ist. Durch Mittelung über eine Wellenperiode enthält die Gesamttransportrate Wellen- und Strömungsanteile. Bailard vereinfachte den Ansatz 1984 unter der Annahme, dass die Sohlneigung im Küstenbereich im Allgemeinen vernachlässigt werden kann, zu der im Anhang J dargestellten Form. Die Bailard-Inman-Formel wurde vielfach für ingenieurtechnische Fragestellungen eingesetzt, da sie effizient in der Rechenintensivität ist und dabei Geschiebe- und Schwebstofftransport beinhaltet. Der Ansatz nach Bailard & Inman bei Seegang (1981/84; in BAYRAM ET AL., 2001) berücksichtigt Wellen ebenfalls in Form der Amplitude der Orbitalgeschwindigkeit in Sohlhöhe. Neben den Effizienzwerten des Geschiebes und der Schwebstoffe, geht auch die Sinkgeschwindigkeit der Sedimente in die Berechnung ein. Damit sind alle in Kapitel 9.1 genannten Parameter berücksichtigt. Als typische Werte für die Effizienzfaktoren werden $e_b = 0,1$ und $e_s = 0,02$ verwendet (vgl. Gleichung 44). Trotz der allgemeinen Annah-

me, dass die Effizienzfaktoren konstant sind, haben bestehende Arbeiten gezeigt, dass sie sich bei verschiedenen Sohlschubspannungen und Partikeldurchmessern verändern können (BAYRAM ET AL., 2001). Die Sinkgeschwindigkeit wird zunächst nach dem Ansatz von Oliver (1961 in VAN RIJN, 1993; vgl. Kapitel 4.5.3) bei einer Sedimentkonzentration von 1000 mg/l berechnet. Durch die Variation der Effizienzparameter kann in geringem Maße eine Anpassung der berechneten an die gemessenen Werte erfolgen. Die berechnete Sedimenttransportrate stimmt dabei gut mit der gemessenen überein (vgl. Abbildung 91). Lediglich in der Stauwasserphase (Faktor 7) und in der Flutphase (Faktor 3) wird die Sedimenttransportrate unterschätzt. In der Flutphase kann dabei der Sedimenteintrag über das Klotzenloch nicht in der Berechnung enthalten sein.

Die von Watanabe 1992 vorgeschlagene Formel (vgl. Anhang J) wurde zur Abschätzung des Küstenlängstransportes als kombinierter Transport von Geschiebe und Schwebstoffen entwickelt. Das Volumen der in Bewegung gesetzten Sedimente pro Flächeneinheit ist proportional zur aus Strömung und Seegang zusammengesetzten Schubspannung, sobald ein kritischer Wert für den Bewegungsbeginn überschritten wird. Dieses Volumen wird dann mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit transportiert. Die Formel wurde im Wesentlichen in Japan, z.B. zur Abschätzung von Deposition in Häfen und Fahrrinnen, verwendet. Eine Kalibrierung und Verifizierung der Formel und ihrer Koeffizienten wurden mit Hilfe verschiedener Datensätze aus Labor- und Felduntersuchungen vorgenommen (z.B. WATANABE, 1992). Bislang wurde noch nicht abschließend ermittelt, ob der Wert des dimensionslosen Koeffizienten A konstant oder abhängig von Seegangsbedingungen und sedimentologischen Werten ist. Bei der Anwendung für Labor- oder Feldbedingungen ergaben sich verschiedene Werte, je nachdem ob regelmäßige und unregelmäßige Wellen vorlagen. Watanabe (1992, in BAYRAM ET AL., 2001) berücksichtigt in seiner Formel zur Beschreibung des Gesamttransportes die aus Strömung und Seegang resultierende Gesamtschubspannung, die kritische Schubspannung, die Strömungsgeschwindigkeit und den Parameter zur Unterscheidung zwischen regelmäßigem und unregelmäßigem Seegang. Der nach Watanabe berechnete Sedimenttransport liegt maximal um einen Faktor 3 über den gemessenen Sedimenttransportraten (vgl. Abbildung 91) und wird dabei stärker als die anderen Berechnungsansätze durch den Seegang bestimmt. Zum Zeitpunkt geringer Wasserstände in der Flutphase liegt die berechnete Sedimenttransportrate deutlicher über den gemessenen Werten.

Van Rijn entwickelte diverse Berechnungsansätze für Sedimenttransportraten in Flüssen unter Berücksichtigung physikalischer Gesetze und empirischer Untersuchungen. Der Anwendungsbereich der Formeln wurde auf Ästuare ausgeweitet und in VAN RIJN (1993) zusammengefasst. Geschiebetransport und Sedimenttransport in Suspension werden

getrennt voneinander berechnet, wobei ein modifizierter Ansatz von Bagnold verwendet wird, um den Geschiebetransport zu bestimmen. Der suspensive Transport wird durch die Integration des Produktes der vertikalen Sedimentkonzentration und des Geschwindigkeitsprofils berechnet, wobei das Konzentrationsprofil in drei Ebenen über empirische Funktionen bestimmt wird (vgl. Anhang J). Die Verifikation der Formel erfolgte im Korngrößenbereich zwischen 0,1 mm und 0,2 mm, der in der Größenordnung der Korndurchmesser des Neufelder Watts liegt. Die nach van Rijn berechneten Sedimenttransportraten stimmen im Fall einer mittleren Tide an Position 13 insbesondere in der Ebephase sehr gut mit den gemessenen überein. Zu Beginn der Flutphase werden die Transportraten leicht über-, im weiteren Verlauf der Flutphase leicht unterschätzt (vgl. Abbildung 91).

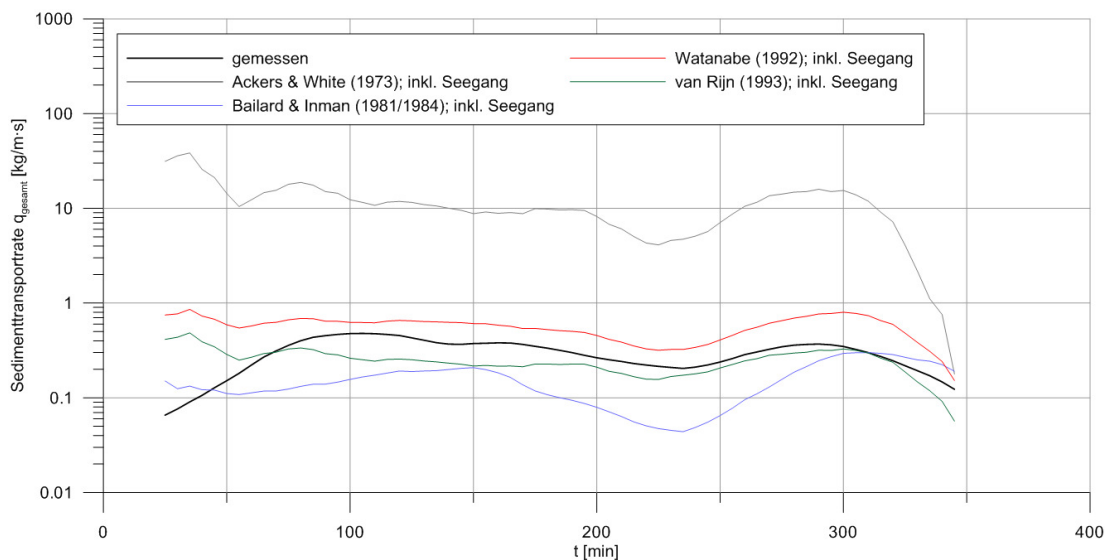


Abbildung 91: Vergleich der gemessenen Sedimenttransportrate und der nach Ackers & White, Bailard & Inman, Watanabe und van Rijn berechneten Sedimenttransportrate für eine mittlere Tide an Position 13

Abbildung 92 zeigt den Vergleich gemessener und berechneter Transportraten für eine erhöhte Tide an Position 13. Der Berechnungsansatz nach Bailard & Inman bildet die gemessene Sedimenttransportrate insbesondere in ihrem Verlauf, aber auch in der Größenordnung gut ab. In der Flut- und in der Ebephase wird die Transportrate leicht überschätzt. Die Berechnungsansätze nach Watanabe und van Rijn überschätzen die gemessenen Transportraten, bilden dabei den Verlauf aber immer noch relativ gut ab. Der Ansatz nach Ackers & White überschätzt die Transportraten sehr deutlich und ist nicht abgebildet.

In Abbildung 93 sind die Ergebnisse für Position 15 zusammengefasst für eine mittlere Tide und eine erhöhte Tide dargestellt. Insgesamt liegen die gemessenen und berechneten Werte enger zusammen, weshalb auf eine logarithmische Darstellung der Ordinate verzichtet werden kann. An Position 15 unterschätzen die Berechnungsansätze nach Watanabe und

van Rijn die gemessenen Sedimenttransportraten sowohl bei mittleren Tiden als auch bei erhöhten Tiden. Der Berechnungsansatz nach Bailard & Inman unterschätzt die gemessenen Sedimenttransportraten ebenfalls, wobei der Verlauf der Transportrate aber gut abgebildet wird.

In der Neufelder Rinne an Position 3 (Jahr 2008) unterschätzt der Ansatz von Watanabe die gemessenen Werte bei mittleren Tiden wiederum (vgl. Abbildung 94). Bei erhöhten Tiden liegen die berechneten Werte nach Watanabe sehr deutlich über den gemessenen Werten außerhalb des im Diagramm dargestellten Bereiches. Der Ansatz von Bailard & Inman gibt den Verlauf der gemessenen Werte bei mittleren Tiden wiederum gut wieder. In der Flutphase und bei Stauwasser werden die gemessenen Werte unterschätzt, wogegen in der Ebbephase die gemessenen Werte überschätzt werden. Bei erhöhten Tiden werden die Werte insgesamt, in der Flutphase dabei sehr deutlich, überschätzt. Der Ansatz nach van Rijn liefert in der Flutphase ähnlich wie der Ansatz nach Watanabe zu geringe Transportraten. In der Ebbephase werden die gemessenen Werte ähnlich wie mit dem Ansatz von Bailard & Inman überschätzt.

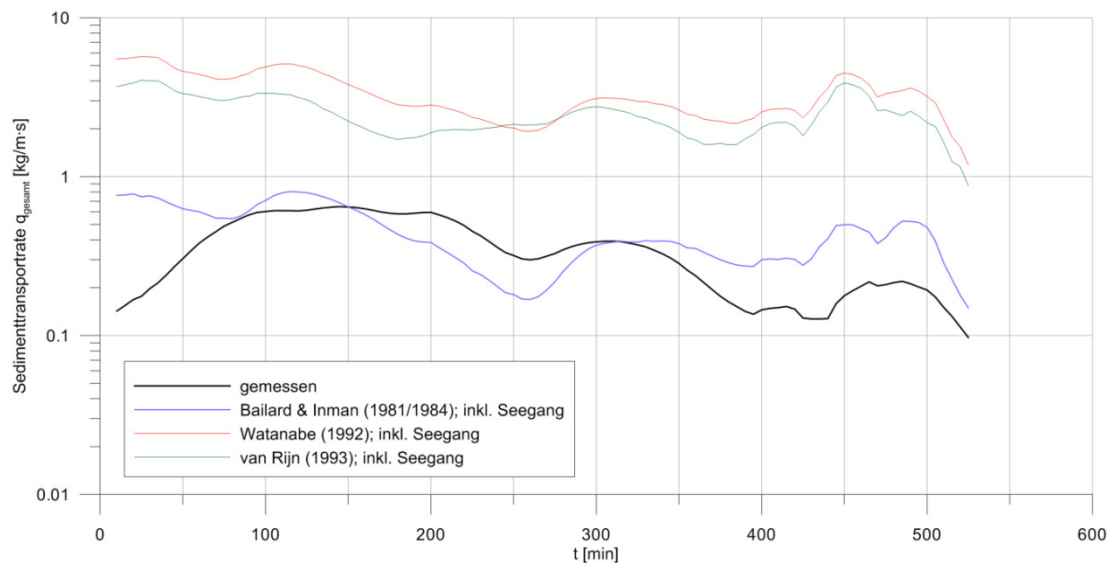


Abbildung 92: Vergleich der gemessenen Sedimenttransportrate und der nach Bailard & Inman, Watanabe und van Rijn berechneten Sedimenttransportrate für eine erhöhte Tide an Position 13

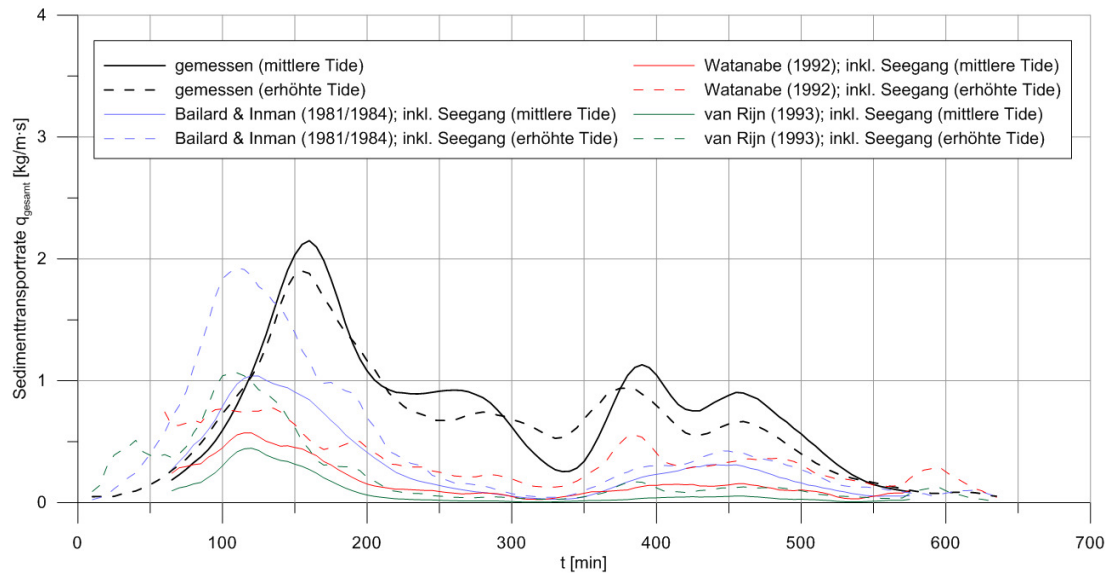


Abbildung 93: Vergleich der gemessenen und der nach Bailard & Inman, Watanabe und van Rijn berechneten Sedimenttransportrate für eine mittlere Tide und eine erhöhte Tide an Position 15

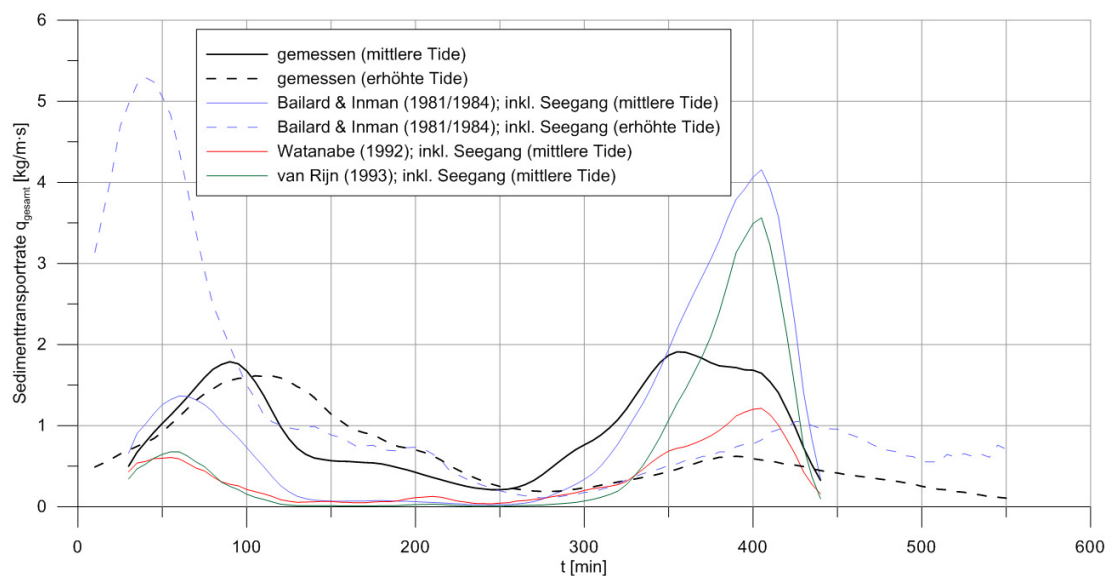


Abbildung 94: Vergleich der gemessenen und der nach Bailard & Inman, Watanabe und van Rijn berechneten Sedimenttransportrate für eine mittlere Tide und eine erhöhte Tide an Position 3 (2008)

Bei dem Vergleich gemessener und berechneter Sedimenttransportraten für mittlere Tiden sowie erhöhte Tiden zeigt sich die allgemeine Anwendbarkeit verschiedener Berechnungsansätze. Dabei stellt sich die Berechnungsformel nach Bailard & Inman als diejenige heraus, die den Verlauf der Sedimenttransportrate am besten beschreibt und die Größenordnung der Transportrate am besten abbildet. Zur Bestimmung der Qualität der Berechnungsansätze werden in einem nächsten Schritt für die Messpositionen 13, 3 (2008) und 15 die Einzelmessungen verschiedener Tiden mit berechneten Werten verglichen, wobei die Unterscheidung

in mittlere Tiden und erhöhte Tiden beibehalten wird. Abbildung 95 zeigt diesen Vergleich für den Berechnungsansatz nach Bailard & Inman (im Folgenden auch B&I abgekürzt) für die verschiedenen Positionen. Die entsprechenden Darstellungen für die Berechnungsansätze nach Watanabe (im Folgenden auch Wa abgekürzt) und van Rijn (vR) sind im Anhang K zu finden. Die Winkelhalbierende zeigt die genaue Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Werten an ($q_{\text{berechnet}}/q_{\text{gemessen}} = 1$). Die parallel zu dieser Linie verschobenen gestrichelten Linien zeigen den Bereich an, in dem $q_{\text{berechnet}}/q_{\text{gemessen}} \leq 2$ bzw. $q_{\text{berechnet}}/q_{\text{gemessen}} \geq 1/2$. Eine maximale Abweichung von berechneten und gemessenen Werten um den Faktor 2 wird allgemein als gut bezeichnet (vgl. Kapitel 4.6). Daher ist der Berechnungsansatz umso besser einzustufen, je mehr Werte in diesem Bereich liegen. Abbildung 95 zeigt, dass der Ansatz nach Bailard & Inman für unterschiedliche Messpositionen sowie für mittlere Tiden und erhöhte Tiden unterschiedlich gut funktioniert. Allgemein werden die gemessenen Werte bei mittleren Tiden unter- sowie bei erhöhten Tiden überschätzt.

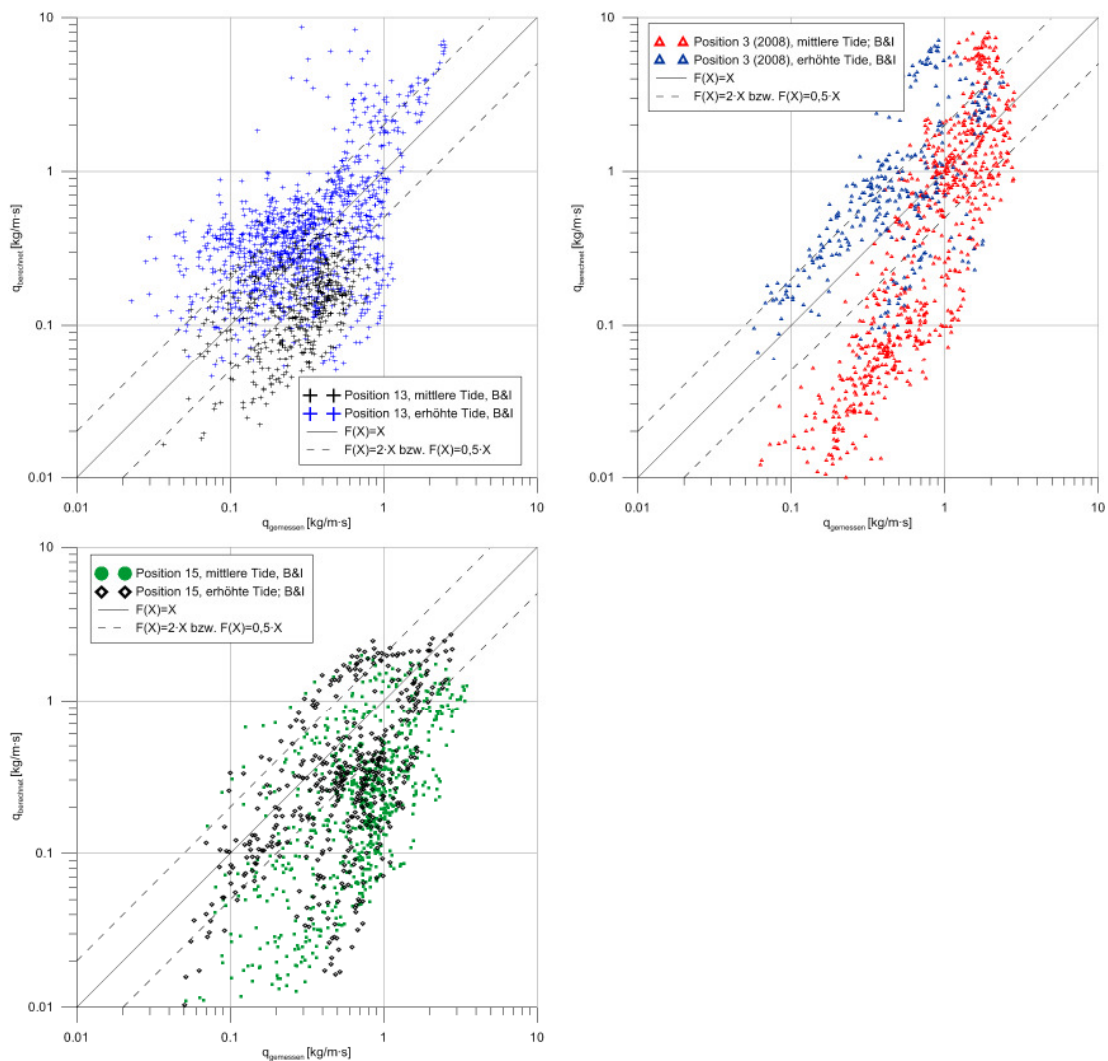


Abbildung 95: Vergleich der gemessenen und der nach Bailard & Inman berechneten Sedimenttransportraten für Einzelmessungen bei Tiden verschiedener Scheitelwasserstände für die Positionen 13, 3 (2008) und 15

Zur Quantifizierung der Güte der verschiedenen Berechnungsansätze sind in Tabelle 24 die Anteile der Messungen im Bereich $\frac{1}{2} \geq q_{\text{berechnet}}/q_{\text{gemessen}} \leq 2$ bzw. $\frac{1}{5} \geq q_{\text{berechnet}}/q_{\text{gemessen}} \leq 5$ sowie das quadratische Mittel des Fehlers angegeben, der sich als Maß der Streuung der Werte wie folgt berechnet:

$$\sigma_{\text{rms}} = \left[\frac{\sum_1^N [\log(q_{\text{berechnet}}) - \log(q_{\text{gemessen}})]^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (76)$$

Dabei ist N die Anzahl der Datenpunkte. Kleinere Werte für σ_{rms} zeigen eine geringere Streuung an.

In einigen Veröffentlichungen wird der Bereich der maximalen Abweichung von berechneten und gemessenen Werten um den Faktor 5 als vertrauenswürdig angesehen (z.B. BAYRAM ET AL., 2001). Daher sind diese Werte in Tabelle 24 aufgenommen.

Neben den bereits erläuterten Ansätzen ist in Tabelle 24 zudem ein modifizierter Berechnungsansatz nach Engelund & Hansen berücksichtigt, der aufbauend auf Gleichung 48 zusätzlich den Einfluss von Seegang einschließt (vgl. Anhang J).

Tabelle 24: Zusammenfassung der Genauigkeit der betrachteten Sedimenttransportformeln (A&W = Ackers & White, 1973; B&I = Bailard & Inman, 1981/84; Wa = Watanabe, 1992; vR = van Rijn, 1993; E&H = Engelund & Hansen, 1967); Aufteilung nach Messpositionen, mittleren Tiden (MT) und erhöhten Tiden (ET)

Formel	13 (MT)			13 (ET)			3 (2008) (MT)			3 (2008) (ET)			15 (MT)			15 (ET)		
	Streuung	Daten im Bereich Faktor ... [%]		Streuung	Daten im Bereich Faktor ... [%]		Streuung	Daten im Bereich Faktor ... [%]		Streuung	Daten im Bereich Faktor ... [%]		Streuung	Daten im Bereich Faktor ... [%]		Streuung	Daten im Bereich Faktor ... [%]	
	σ_{rms}	2	5	σ_{rms}	2	5	σ_{rms}	2	5	σ_{rms}	2	5	σ_{rms}	2	5	σ_{rms}	2	5
A&W	1,92	4	15	3,72	2	4	2,23	13	33	3,74	2	3	2,47	12	26	1,60	25	45
B&I	0,41	41	95	0,40	59	92	0,61	37	66	0,41	51	88	0,65	22	64	0,51	47	84
Wa	0,42	53	91	1,03	7	27	0,81	24	55	0,93	9	31	0,95	11	40	0,56	37	58
vR	0,57	42	76	0,59	14	38	1,22	14	39	0,96	10	38	1,41	6	15	0,95	22	42
E&H	3,15	6	12	1,26	5	13	1,58	6	19	1,20	10	30	1,69	4	14	1,19	9	32

Insgesamt liefert der Berechnungsansatz von Bailard & Inman an allen Messpositionen bei mittleren Tiden und bei erhöhten Tiden die besten Ergebnisse mit 22 % bis 59 % der berechneten Transportraten im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten. Im Bereich Faktor 5 um die gemessenen Transportraten liegen sogar zwischen 66 % und 95 % der berechneten Daten. Die Streuung der Daten ist mit diesem Berechnungsansatz für alle betrachteten Fälle die geringste unter den untersuchten Berechnungsformeln. Am besten deckt die Bailard-Inman-Formel die Messposition 13 auf dem Neufelder Watt ab. Hier besteht zudem nur ein geringer Unterschied der Güte der Formel bei mittleren und erhöhten Tiden. Auch in der Neufelder Rinne an Position 3 (2008) liefert die Formel noch gute Ergeb-

nisse mit geringen Unterschieden zwischen mittleren und erhöhten Tiden. An der Wattkante an Position 15 liefert die Formel bei erhöhten Tiden gute Ergebnisse. Bei mittleren Tiden ist die Streuung jedoch größer, bei einem geringeren Anteil von berechneten Werten im Vertrauensbereich.

Die zweitbeste Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werte liefert der Berechnungsansatz nach Watanabe, wobei nur an Position 13 bei mittleren Tiden und an Position 15 bei erhöhten Tiden mehr als 37 % der Werte im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten liegen.

Nach dem Berechnungsansatz van Rijn ist die Streuung der berechneten Sedimenttransportraten allgemein höher als bei Watanabe. Es liegen generell weniger Werte im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten. Im Bereich Faktor 5 um die gemessenen Transportraten sind beide Ansätze vergleichbar.

Der Berechnungsansatz nach Ackers & White liefert die größte Streuung der Werte. Maximal 25 % der berechneten Werte liegen im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten. Ähnlich ist der modifizierte Ansatz nach Engelund & Hansen zu bewerten.

Über alle Messpositionen gemittelt lagen nach Bailard & Inman 43 % aller berechneten Werte im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten bei einer Streuung von $\sigma_{rms} = 0,50$ (A&W 10 %, $\sigma_{rms} = 2,61$; Wa 24 %, $\sigma_{rms} = 0,78$; vR 18 %, $\sigma_{rms} = 0,95$; E&H 7 %, $\sigma_{rms} = 1,68$).

Für die obigen Berechnungen wurden gemessene hydrologische Größen (Strömungsgeschwindigkeit, Sedimentkonzentration, Wasserstand, Wellenhöhe, Wellenperiode, Wassertemperatur) und sedimentologische Größen (d_{35} , d_{50} , d_{90} , Sedimentdichte) bzw. daraus abgeleitete Werte (z.B. Orbitalgeschwindigkeit in Sohlnähe, dimensionslose Korndurchmesser) verwendet. Für in den einzelnen Formeln vorhandene Koeffizienten wurden zunächst typische, in der Literatur angegebene Werte verwendet. Werden diese Koeffizienten im erlaubten Rahmen verändert, ändern sich auch die Parameter zur Abschätzung der Qualität der Berechnungsansätze.

Wird so z.B. in der Formel von Bailard & Inman der Effizienzfaktor des Geschiebes von $e_b = 0,10$ auf $e_b = 0,15$ verändert, steigt der Anteil aller berechneten und über die Messpositionen gemittelten Werte im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten auf 44 %, die Streuung sinkt auf $\sigma_{rms} = 0,46$. Der Einfluss des Effizienzfaktors der Schwebstoffe ist geringer. Wird dieser von $e_s = 0,01$ auf $e_s = 0,02$ erhöht, sinkt Anteil der berechneten und über die Messpositionen gemittelten Werte im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten auf 42 %, die Streuung bleibt bei $\sigma_{rms} = 0,50$. Verbessern sich die über alle Mess-

positionen gemittelten Werte, kann dies für einzelne Messpositionen bzw. Tidebedingungen dennoch eine Verschlechterung bedeuten.

Die in der Formel verwendete Sinkgeschwindigkeit variiert je nach zu Grunde gelegtem Ansatz bei einer Wassertemperatur von 10 °C zwischen ca. 0,75 cm/s (Ansatz nach Stokes bzw. Oseen) und 0,93 cm/s (Zaki & Richardson bei $c = 1.000 \text{ mg/l}$) bzw. 0,88 cm/s (Oliver, $c = 1.000 \text{ mg/l}$). Wird statt des sinnvollsten Wertes für die Sinkgeschwindigkeit mit Berücksichtigung einer mittleren Sedimentkonzentration, die die Sinkgeschwindigkeit beeinflusst, die höchste Sinkgeschwindigkeit verwendet, führt dies zu keiner signifikanten Veränderung der Ergebnisse.

Bei Variation des empirischen Koeffizienten A in der Formel von Watanabe (s. Anhang J) ändert sich im Wesentlichen die Streuung der über alle Messpositionen gemittelten Werte. Für einige Messpositionen liefert $A = 0,5$ die besten Ergebnissen, für andere $A = 2,0$. Des Weiteren gibt es tidebedingte Unterschiede, wobei die Änderungen der Qualität des Berechnungsansatzes über alle Positionen gemittelt gering sind (max. 2 % bei Werten im Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten), an einzelnen Standorten jedoch deutliche Änderungen von bis zu 37 % auftreten.

In BAYRAM ET AL. (2001) werden verschiedene Berechnungsansätze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Abschätzung des Sedimenttransportes im Küstenbereich geprüft, darunter auch Engelund & Hansen, Ackers & White, Bailard & Inman und Watanabe. Als Gütekriterium wird der Bereich Faktor 5 um die gemessenen Transportraten angegeben. Dieser Bereich liegt bei unterschiedlichen Untersuchungsgebieten je nach Berechnungsansatz zwischen 4 % und 38 % (A&W 20 % bzw. 22 %, B&I 16 % bzw. 24 %, Wa 38 % bzw. 4 %). Für das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Gebiet sind die entsprechenden Berechnungsansätze demnach besser geeignet.

Berücksichtigt man die Art des Untersuchungsgebietes, liegen die in Tabelle 24 zusammengefassten Werte im Bereich bestehender Qualitätsabschätzungen, die sich auf den Bereich Faktor 2 um die gemessenen Transportraten beziehen (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3 in Kapitel 4.6).

Trotz zum Teil größerer Streuung und Abweichung der berechneten Sedimenttransportraten von den gemessenen Transportraten sind einige der untersuchten Berechnungsansätze generell geeignet, den Sedimenttransport in Wattgebieten abzubilden. Dabei variiert die Qualität der Abschätzung nicht nur in Abhängigkeit von der betrachteten Position, sondern auch vom Tideverlauf. Wird über ein größeres Gebiet und einen längeren Zeitraum variierender Tidesituationen eine Berechnungsformel angewendet, wie es z.B. in numerischen

Modellen der Fall ist, muss klar sein, dass es diese Abweichungen gibt. Umso wichtiger ist die Beurteilung der Ergebnisse der Berechnungen.

Diese Arbeit liefert einen Beitrag, um geeignete Berechnungsansätze für Wattgebiete auszuwählen und die Ergebnisse zu bewerten bzw. eine sinnvolle Fehlerabschätzung vorzunehmen.

9.3 Wanderung von Prielen

Priele gleichen Festlandsflüssen in ihrem Verhalten, ihre Betten kontinuierlich zu verlagern. Im Gegensatz zu Festlandsflüssen unterliegt die natürliche Entwicklung von Prielen in Wattgebieten in der Regel keinen Restriktionen durch bauliche Maßnahmen. Untersuchungen zur Migration von Prielen lassen sich jedoch nur dort vornehmen, wo ausreichend zuverlässige und zeitlich nicht zu weit auseinanderliegende Messungen zum Verlauf der Priele vorliegen.

Eine der ersten dokumentierten Untersuchungen zu diesem Thema erfolgte durch LÜDERS (1934) im Wattgebiet südlich von Wangerooge. Anhand von acht Peilplänen der Marinewerft, die einen Zeitraum von 25 Jahren abdecken, wurde die Entwicklung eines 6 km² großen Wattgebietes beschrieben, das von zwei größeren Prielen durchzogen ist. Das Hauptinteresse lag dabei auf den Prielen, die sich mit Wassertiefen zwischen 2 und 10 m bei Mittlerem Tideniedrigwasser jedoch von der Neufelder Rinne unterscheiden. Das betrachtete Wattgebiet veränderte sich im Laufe des untersuchten Zeitraumes durch die Verlagerung der Priele erheblich. Die mittlere Wandergeschwindigkeit der Priele wurde zu 25 bis 30 m/Jahr bestimmt, wobei zum Teil auch wesentlich größere Geschwindigkeiten von bis zu 100 m/Jahr festgestellt wurden. Als Ursache für das Wandern der Priele gibt Lüders „die lebendige Kraft“ an, „die dem Wasser innewohnt“.

In den letzten Jahren beruhten Auswertungen zur Verlagerung von Prielen im Wattenmeer auf luftfahrzeuggestützten Laserscanneraufnahmen, wobei eine Hauptaufgabe in der Identifikation der Wasserflächen lag, die bei Tideniedrigwasser im Wesentlichen die Lage der größeren Priele kennzeichnen (BRZANK, 2009). Durch den größeren zeitlichen Abstand einzelner Befliegungen können Aussagen wiederum nur zu Verlagerungen größerer Wattströme getroffen werden. Für die Bestimmung der Wandergeschwindigkeit kleinerer Priele ist die zeitliche Auflösung der bestehenden Aufnahmen nicht hoch genug.

EHLERS (1988) schreibt zwar, dass Beobachtungen kleinerer Priele Verlagerungen von bis zu einigen Dezimetern pro Tide zeigen, spezifiziert dies jedoch nicht und nennt keine Quellen.

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit quantifizieren die von EHLERS (1988) vermuteten Werte. Im Bereich der Einfahrt der Neufelder Rinne wurden maximale Verlagerungsraten von 2 m pro Tag festgestellt, wobei dieser Wert aus Peilungen im Abstand von einigen Tagen bzw. wenigen Wochen abgeleitet wurde. Vereinzelt können die Verlagerungsraten demnach sogar noch größer sein. Im Bereich des größten Sedimenttransportes an der Wattkante sind die Veränderungen der Rinne am deutlichsten erkennbar.

Bei einer Querüberströmung von Prielen kommt es zu einer Wanderung der Prielachse in Haupttransportrichtung, die durch bestimmte Wetterlagen beschleunigt werden kann. Durch den Gradienten der Sedimenttransportrate von der Wattkante landwärts, sind die Verschiebungen unterschiedlich groß. Bei daraus resultierender zunehmender Krümmung des Priels im Mündungsbereich kann es zu einer Rückverlagerung der Prielachse kommen.

Diese Erkenntnisse sind für bauliche Maßnahmen auf Wattflächen, z.B. für den Kolkschutz der Ölbohrplattform Mittelplate A im nordfriesischen Wattenmeer, für die Installation von Messpfählen oder für Maßnahmen am Gewässerbett (vgl. Ausgleichsrinne im Mühlenberger Loch, ALBERS ET AL., 2010b) von Bedeutung. Auch bei langen Außentiefs können größere Verlagerungen die Sielleistung verringern. Bei der Planung der Unterhaltung der Außentiefs sollten die natürlichen Verlagerungen und reversiblen Verschiebungen beachtet werden.

10 Diskussion der Ergebnisse

Zu Beginn der Untersuchung wurden die wichtigsten Prozesse des Sedimenttransportes auf Wattflächen und die zugehörigen Parameter beschrieben. Des Weiteren wurden allgemeine Eigenschaften von Wattflächen erläutert. Auf dieser Basis wurde ein Untersuchungsgebiet ausgewählt und ein entsprechendes Messprogramm entwickelt, um bestehende Fragestellungen zu Prozessen des Sedimenttransportes auf Wattflächen so weit wie möglich zu beantworten.

Bei der Beschreibung von Teilprozessen des Sedimenttransportes existieren mehrere theoretische Ansätze nebeneinander, die bei gleichen Eingangsdaten deutlich unterschiedliche Ergebnisse liefern. Ein Ziel der Untersuchung war es, Variablen soweit wie möglich zu bestimmen und einige der vorhandenen Ansätze bezüglich ihrer Anwendbarkeit zu überprüfen.

Die morphologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes Neufelder Watt in den vergangenen sechs Jahrzehnten wurde anhand von Volumenbilanzen analysiert. Langfristig unterlagen die Flächen dabei einem kontinuierlichen Zuwachs. Bei kürzeren Betrachtungszeiträumen kamen jedoch durchaus größere Abweichungen vom langfristigen Trend vor. So gab es neben Phasen, in denen ein deutlicher Höhenzuwachs stattfand, auch Zeiträume, in denen über die gesamte Fläche gemittelt Erosion auftrat. In den letzten Jahren fanden nur sehr geringe Volumenänderungen im Neufelder Watt statt. Das Untersuchungsgebiet besitzt demnach zurzeit eine ausgeglichene Sedimentbilanz. Dem Untersuchungszeitraum und den Messungen ist somit kein dominanter morphologischer Trend übergeordnet und das Neufelder Watt ist dazu geeignet, Untersuchungen zu kurz- und mittelfristigen morphodynamischen Prozessen durchzuführen.

Die Betrachtung von Volumenbilanzen ermöglicht, Wattgebiete morphodynamisch zu charakterisieren und deren morphologische Aktivität abzuschätzen. Das Neufelder Watt ist dabei ein relativ junges Wattgebiet, das sich erst mit Veränderung der Strömungsverläufe in der Elbmündung zu Beginn des letzten Jahrhunderts entwickelte. Erst in der letzten Dekade kam diese Entwicklung zum Stillstand.

Die Auswertung der langfristigen Entwicklung basiert auf Wattgrundkarten, Peilplänen und Laserscannerbefliegungen. Gerade ältere Daten weisen dabei zum Teil geringe Genauigkeiten auf. Durch Vergleiche der Bathymetrien verschiedener Zeitpunkte im Zuge der Analyse

werden Fehlmessungen jedoch erkennbar und können aus der Auswertung eliminiert werden. Für das Untersuchungsgebiet Neufelder Watt liegen genug Aufnahmen vor, um auch nach Ausschluss fehlerhafter Daten eine fundierte Auswertung vornehmen zu können.

In der jüngsten Zeit fanden regelmäßig Laserscannerbefliegungen der Wattflächen der Elbmündung im Zuge der Beweissicherung der Fahrrinnenanpassung statt. Diese liefern in ihrer räumlichen Auflösung sowie in ihrer Genauigkeit sehr gute Daten. Zukünftige Datensätze sollten in die bestehende Auswertung integriert werden. Dadurch kann z.B. bestätigt werden, dass im Neufelder Watt eine Grenzhöhe erreicht ist und die Höhenentwicklung des Gebietes damit weitestgehend abgeschlossen ist. Eine solche großräumige und langfristige Analyse auf der Basis von Methoden der Fernerkundung sollte fester Bestandteil eines zukünftigen Monitoring von Wattgebieten sein.

Insbesondere vor dem Hintergrund geplanter Strombaumaßnahmen im Rahmen des Tideelbekonzeptes, das z.B. Unterwasserablagerungsflächen im Randbereich des Untersuchungsgebietes Neufelder Watt vorsieht, gewinnen die Ergebnisse dieser Studie an Bedeutung und stellen eine umfassende Datenbasis zur Beurteilung der Auswirkung geplanter baulicher Maßnahmen dar.

Zur Aufzeichnung der wesentlichen die Morphodynamik beeinflussenden Parameter wurden im Untersuchungsgebiet ortsfeste Messstationen eingerichtet. Die Installation wurde dabei flexibel gehalten, um die Positionen der Messungen bei Bedarf verändern zu können und die Gerätewartung während eines Tideniedrigwassers durchführen zu können. Strömungsparameter wurden mit akustischen Strömungsmessgeräten aufgezeichnet. Zur Seegang- und Wasserstandmessung wurden Drucksonden verwendet und zur Bestimmung der Schwebstoffkonzentrationen optische Backscatter-Sensoren. Alle Geräte arbeiteten autark bis zu einer Dauer von ca. 12 Wochen.

Die eingesetzte Messtechnik, die gewählten Konfigurationen sowie die entwickelte Installation sind gut geeignet, um ortsfeste Messungen im Watt durchzuführen. Aufgetretene Schwierigkeiten und Herausforderungen wurden dabei im Laufe des Messprogramms beseitigt. Aufgrund der limitierten Geräteanzahl, die für derartige Messungen in der Regel zur Verfügung steht, muss eine geeignete Auswahl der Messpositionen erfolgen. Die Aufteilung der Messpositionen im Neufelder Watt, die in den letzten beiden Dritteln der Untersuchung verwendet wurde, ergab sich aus den Ergebnissen des ersten Drittels des Messprogramms. Dieses Vorgehen erwies sich als sinnvoll. Die Wartungsintervalle von etwa acht Wochen waren praktikabel. Eine maßgebliche Einflussgröße war dabei das gewählte Messintervall der Strömungs- und Trübungsmessungen. Zur Identifikation von zeitlich beschränkten Maxima der Sedimentkonzentration sollte ein Zeitintervall von fünf Minuten nicht überschrit-

ten werden. Eine höhere zeitliche Auflösung der Messungen, die zeitweise durchgeführt wurde, ergab keinen nennenswerten Informationszuwachs. Die Wartung der Geräte erfolgte im Zeitraum um das Tideniedrigwasser herum. In der Regel wurden während des danach auflaufenden Tidehochwassers oder am nächsten Tag Fächerecholotpeilungen durchgeführt. Weitere Peilungen in zeitlich unregelmäßigen Abständen erwiesen sich als gut, um Veränderungen unterschiedlicher Periodizität einwandfrei identifizieren zu können.

Besondere Bedeutung kommt der Verifikation der Messergebnisse der optischen Backscatter-Sensoren zu. Dabei sollten entsprechende Schwebstoffmessungen verschiedene Positionen, Tidephasen und auch Jahreszeiten umfassen, um lokale, tidebedingte und saisonale Effekte auszuschließen. Im Rahmen des hier beschriebenen Messprogramms wurden so häufig wie möglich entsprechende Messungen durchgeführt. Wegen der schlechten Erreichbarkeit der Messpositionen außerhalb der Zeiten des Trockenfallens der Geräte, bieten sich zusätzliche Laboruntersuchungen zum Verhalten der Sensoren unter verschiedenen Randbedingungen an. Ergänzend zur Auswertung von Schwebstoffproben konnte ein Vergleich der Ergebnisse der Trübungsmessungen untereinander verwendet werden, um die Messungen zu verifizieren. Durch die sorgfältige und für einige ASM-Geräte wiederholte Kalibrierung im Labor konnten insgesamt verlässliche Daten aufgezeichnet werden.

Die ASM-Geräte decken über den größten Teil einer Tide die gesamte Wassersäule und für Zeiten, in denen der Wasserstand über dem obersten Sensor liegt, den für den Sedimenttransport wichtigsten Teil der Wassersäule ab. Dennoch sind auch Informationen über die Sedimentkonzentration im oberen Teil der Wassersäule bei hohen Wasserständen von Interesse. Aufgrund der deutlich höheren Investitionskosten für längere ASM-Sonden ist eine Beschaffung dieser Geräte jedoch nicht gerechtfertigt. Vielmehr kann eine mögliche Korrelation vom akustischen Signal der ADCP-Geräte mit den optischen Signalen der ASM-Geräte im unteren Bereich der Wassersäule geprüft werden, um daraus auf Bereiche oberhalb des obersten optischen Sensors zu extrapolieren.

Bestehende Beschreibungen von Teilprozessen des Sedimenttransportes in der Literatur zeigen einen Einfluss der Salinität auf die Sedimentkonzentration. Um die Auswirkung variierender Salzgehalte auf die Messdaten abschätzen zu können, wird die Aufzeichnung der Salinität als weiterem Parameter an den ortsfesten Messstationen empfohlen.

Bestimmte standortspezifische Parameter lassen sich nicht durch in-situ Messungen bestimmen. Als eine solche Größe ist die Sinkgeschwindigkeit zu nennen, die sich am besten im Labor untersuchen lässt. Bestehende theoretische Ansätze zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit liefern eine relativ enge Bandbreite an Ergebnissen. Bei der Weiterverwendung eines Ergebnisses in Berechnungsansätzen zur Bestimmung der Transportrate sind

der Einfluss der gewählten Sinkgeschwindigkeit und damit auch der Fehler gering. Dies wurde im Rahmen einer Parameterstudie in Kapitel 9.2 untersucht.

Im Rahmen einer Versuchsreihe in einer Laborrinne wurde für Sedimente aus dem Neufelder Watt der Bewegungs- bzw. Suspensionsbeginn unter gleichförmiger, stationärer Strömung bestimmt. Die ermittelten Werte der jeweiligen kritischen Strömungsgeschwindigkeit stimmen gut mit theoretischen Betrachtungen überein. Weitere Einflüsse wie biogene Faktoren konnten aufgrund der gestörten Probenahme in den Versuchen jedoch nicht berücksichtigt werden. Im Anschluss wurde die Versuchsanordnung aus dem Labor in die Natur übertragen. Dabei wurde ein Kanal aus Kunststoffplanen auf dem Neufelder Sand aufgebaut und Messtechnik analog zum Laborversuch installiert (waagerechte ASM-Sonde, weitere OBS-Sensoren, punktuelle magnetisch-induktive Strömungsgeschwindigkeitsmessung, vgl. Kapitel 6.1.3). Ein Betrieb über mehrere Tiden war nicht vorgesehen. Aufgrund der Tidebedingungen zum Versuchszeitpunkt wurden jedoch nur kurzzeitig Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb des Bewegungsbeginns erreicht. Ein eindeutiger Bewegungs- bzw. Suspensionsbeginn konnte im Rahmen der kurzen Untersuchung nicht ausgemacht werden. Um den Bewegungs- und Suspensionsbeginn in der Natur zu bestimmen und somit den Einfluss biogener Faktoren abschätzen zu können, empfiehlt sich die Installation einer derartigen Versuchseinrichtung über mehrere Tiden.

In einem festgelegten Raster wurden im Untersuchungsgebiet Sedimentproben entnommen. Dabei zeigte sich ein einheitliches Bild von Feinsand mit geringen Unterschieden in den Nebenanteilen. Diese leicht veränderten Korngrößenverteilungen sowie zum Teil sehr lockere Lagerungsdichten des Bodens traten im Wesentlichen im dynamischen Bereich der Einfahrt der Neufelder Rinne auf. Weitere sedimentologische Parameter wie die Sedimentdichte wurden an einzelnen Proben bestimmt. Die ermittelten Werte wurden in den untersuchten Berechnungsansätzen verwendet und ersetzen sonst übliche Annahmen, was zu realitätstreuen Randbedingungen führte.

Eine sehr lockere Lagerung des Bodens führt zu einem deutlich früheren Bewegungsbeginn. Derartige Abweichungen vom übrigen Sedimentkataster des Untersuchungsgebietes sind jedoch lokale Besonderheiten, die zudem temporal variabel sind. Eine Berücksichtigung in der Auswertung der Messdaten sowie in der Anwendung verschiedener Berechnungsansätze erfolgt nicht.

Die aufgezeichneten Strömungsparameter ermöglichen eine detaillierte Beschreibung des Verlaufes der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung für verschiedene Messpositionen und Tideereignisse. Auf den höher gelegenen Wattflächen des Neufelder Watts und des Neufelder Sandes werden Strömungsgeschwindigkeiten von 0,50 m/s nur selten überschritten. An

der Wattkante werden etwas höhere Geschwindigkeiten erreicht. In der durch den Ebbestrom dominierten Neufelder Rinne liegen die Strömungsgeschwindigkeiten auch bei mittleren Tiden insbesondere bei Ebbe deutlich über 0,90 m/s.

Diese Ergebnisse stimmen in der Größenordnung gut mit den Resultaten der Untersuchungen von GÖHREN (1969) und DÜCKER (1982) überein.

Die Messungen bieten eine umfangreiche Datenbasis für Strömungsverläufe auf trockenfallenden Wattflächen, die in Auflösung und zeitlichem Umfang sämtliche bestehenden Studien übertrifft. Die Daten können zur Verifizierung von Ergebnissen numerischer Modelle verwendet werden.

Die Windstatistik und die Wasserstandstatistik zeigen, dass der Untersuchungszeitraum die Gesamtheit aller vorkommenden Wetter- und Tideereignisse gut abdeckt.

Die Wellenhöhen im Untersuchungsgebiet werden außer durch den Wind maßgeblich durch den Wasserstand bestimmt. Dadurch ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Tide. Maximale signifikante Wellenhöhen ergeben sich um Tidehochwasser herum, wobei die meisten Wellen eine Höhe von ca. 0,40 m besitzen. Signifikante Wellenhöhen von mehr als 0,80 m werden selten erreicht. Dabei besteht eine klare Abhängigkeit von der Windrichtung. Bei östlichen Windrichtungen werden selbst bei hohen Windgeschwindigkeiten signifikante Wellenhöhen von 0,40 m nicht überschritten. Zum einen hängt dies mit der begrenzten Windwirklänge zusammen, zum anderen induzieren starke Ostwinde geringe Wasserstände in der Elbmündung, die ihrerseits wieder die Wellenhöhen deutlich limitieren.

Insgesamt stimmen die im Neufelder Watt aufgezeichneten Seegangparameter sowie die erkannten Abhängigkeiten gut mit früheren Erkenntnissen, z.B. von DÜCKER (1982) überein.

Bei der Auswertung der Messungen suspendierter Sedimente wurden Konzentrationsprofile und tiefengemittelte Sedimentkonzentrationen ausgewertet. Tide und Seegang sorgen für eine gute Durchmischung der Wassersäule. Ein Rouse-Profil stellt sich nur zu bestimmten Phasen der Tide ein. Der Verlauf der tiefengemittelten Sedimentkonzentration über eine Tide ist auf dem Neufelder Watt, an der Wattkante und in der Neufelder Rinne jeweils ähnlich. Es kann eine Abhängigkeit der tiefengemittelten Sedimentkonzentration von der Strömung und vom Seegang ausgemacht werden. Je nach Messposition verändert sich diese Abhängigkeit jedoch. Hinzu kommen lokale Phänomene, wie der Sedimenteintrag über das Klotzenloch.

Der Wind beeinflusst sowohl den Seegang als auch den Tidehub und damit die Tideströmungen. Es konnte ein Zusammenhang der Sedimentkonzentration mit der Windgeschwindigkeit ausgemacht werden, der sich jedoch wiederum bei verschiedenen Windrichtungen unterschied. Dabei sind die Ergebnisse mit denen von DÜCKER (1982) vergleichbar.

Bei Vergleichen mit den von DÜCKER (1982) ermittelten Sedimentkonzentrationen fällt auf, dass die Werte aus dem Neufelder Watt im Allgemeinen höher sind. Dies gilt insbesondere für gemessene Maxima der Sedimentkonzentration über den Tideverlauf.

Über eine sorgfältige Kalibrierung der Trübungsmessgeräte, über eine Verifizierung durch Schwebstoffproben sowie über Plausibilitätskontrollen durch Ergebnisvergleiche der Sonden untereinander wurde die Richtigkeit der Ergebnisse der Messungen der Sedimentkonzentrationen aus dem Neufelder Watt sichergestellt. Darüber hinaus wurden eigens konstruierte und wiederholt im Labor kalibrierte OBS-Sensoren sowie vereinfachte Verfahren, wie die Ermittlung der Sichttiefe zu verschiedenen Zeitpunkten einer Tide, eingesetzt, um die Ergebnisse zu überprüfen. Die Unterschiede der Konzentrationen ergeben sich aus den verschiedenen Messverfahren. DÜCKER (1982) entnahm die Schwebstoffproben 0,30 m über der Wattsohle. Die Auswertung von Konzentrationsprofilen im Watt zeigt, dass selbst bei großen tiefengemittelten Sedimentkonzentrationen ein deutlicher Anstieg der Konzentration erst im unteren Drittel der Sensoren des ASM-Gerätes stattfindet. Gerade bei geringen Wasserständen ist es somit wichtig, auch die Konzentrationen in diesem Bereich zu kennen. Darüber hinaus entstehen Maxima der Sedimentkonzentrationen häufig zeitlich sehr begrenzt. Bei einer Mittlung von Schwebstoffproben über eine Stunde verschwinden die Maxima aus den Daten.

Aus den aufgezeichneten Größen Strömung und Sedimentkonzentration konnten die Sedimenttransportraten abgeleitet werden. Bei mittleren Tiden ist der residuale Sedimenttransport auf den Wattflächen nordwestlich der Neufelder Rinne nach Südosten gerichtet. An der Wattkante ist der Sedimenttransport nach Osten gerichtet und größer als auf den Wattflächen. Die Neufelder Rinne ist durch den Ebbestrom geprägt. Demnach weist der residuale Transport nach Süden bzw. Südwesten. Erhöhte Tiden steigern die Menge des transportierten Materials. In der Neufelder Rinne nimmt die Dominanz des Ebbestroms ab und auch die Transportrichtung ändert sich. Bei Tiden mit niedrigeren Scheitelwasserständen wird der residuale Transport auf den Wattflächen und an der Wattkante sehr gering. Nur in der Neufelder Rinne steigt der Transport während der Ebbe an.

Das Bild, das sich durch die Verteilung des residualen Transports ergibt, kann die Morphodynamik im Untersuchungsgebiet erklären. Durch Peilungen wurden die Veränderungen der quer überströmten Neufelder Rinne dokumentiert. Es konnten dynamische Phasen großer Veränderungen ausgemacht werden, in denen der Sedimenttransport besonders groß war. In diesen Phasen wurde eine größere Häufigkeit erhöhter Tiden festgestellt, die die morphologischen Veränderungen der Neufelder Rinne beschleunigten. Des Weiteren konnte ein

Einfluss niedriger Wassertemperaturen ausgemacht werden, die über die kinematische Viskosität des Wassers die Sinkgeschwindigkeit der Sedimentpartikel verändern.

Gerade im Winter ist daher die Wirkung der erhöhten Sedimenttransportraten auf die Morphologie besonders groß. Letztlich konnte die Bedeutung und Wirkung saisonaler Effekte jedoch nicht abschließend geklärt werden. Hierzu bedarf es der Erfassung mehrerer der beschriebenen langzeitlichen Ereignisse.

Die aufgezeichneten Daten wurden verwendet, um verschiedene Berechnungsansätze zur Abschätzung der Sedimenttransportrate auf ihre Anwendbarkeit in Wattgebieten zu prüfen. Einige der Ansätze erwiesen sich als ungeeignet, andere lieferten eine relativ gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Sedimenttransportraten. Die Anwendbarkeit der Ansätze ist stark von den Randbedingungen abhängig, unter denen sie entwickelt wurden. Generell sollte ein Berechnungsansatz alle im Rahmen dieser Untersuchung ermittelten Einflussgrößen berücksichtigen. In der Literatur wird als gutes Ergebnis bezeichnet, wenn mindestens 70 % der berechneten Transportraten in einem Bereich mit dem Faktor 2 um die gemessenen Werte liegen (VAN RIJN, 1993, CAMENEN & LARROUDÉ, 2003). Einige Autoren dehnen diesen Bereich auf den Faktor 5 aus (BAYRAM ET AL., 2001). Die bestehenden Ansätze können dabei oft nur einen Teil einer Tide oder bestimmte Tidesituationen gut beschreiben.

Insbesondere bei der Anwendung numerischer Modelle, in denen große Flächen abgedeckt werden, müssen die Ansätze gewählt werden, die im Mittel über alle Standorte und Tidebedingungen die besten Übereinstimmungen liefern. Der daraus entstehenden Fehler und Unsicherheiten muss sich der jeweilige Anwender stets bewusst sein.

Auch Messungen in der Natur beinhalten Unsicherheiten. Während die Genauigkeit bei den Strömungsmessungen (± 3 mm/s bzw. $\pm 2^\circ$), Wasserstandmessungen (± 20 mm) und Seeegangsmessungen (± 200 Pa) sowie bei den Peilungen bei geeigneten äußeren Umständen (7 bis 10 cm absolute Genauigkeit) sehr hoch ist, erreichen Messungen der Sedimentkonzentrationen bei sorgfältiger Kalibrierung und Verifizierung der Ergebnisse Genauigkeiten von ± 20 %. Alle Ergebnisse, die auf Messungen von Sedimentkonzentrationen basieren, müssen vor dem Hintergrund dieser Genauigkeit beurteilt werden.

In Kapitel 3 ist die Zielsetzung dieser Arbeit formuliert. Dieser Vorgabe folgend wurden in den vorangegangenen Ausführungen zunächst die wichtigsten Prozesse des Sedimenttransportes auf Wattflächen zusammengefasst. Im Anschluss wurden die geologischen und morphologischen Eigenschaften von Wattflächen im Allgemeinen und des ausgewählten Untersuchungsgebietes im Speziellen beschrieben. Dabei wurde auch die langfristige Ent-

wicklung des Neufelder Watts untersucht. Zur Erfassung aller wichtigen morphodynamischen Einflussgrößen wurde ein umfassendes Messprogramm entwickelt, auf dessen Basis hochauflösende Langzeitmessungen von Konzentrationen suspendierter Sedimente, Strömungsparametern, Seegang und Wasserständen durchgeführt wurden. Zur Aufzeichnung der bathymetrischen Veränderungen wurden in regelmäßigen Abständen sowie nach Extremereignissen Peilungen entlang des Verlaufes der Neufelder Rinne durchgeführt. Auf Basis der aufgezeichneten Daten konnten sedimentologische und hydrologische Randbedingungen zusammengefasst werden. Die morphologischen Veränderungen wurden über den Untersuchungszeitraum ausgewertet und sämtliche Daten hinsichtlich der Sedimenttransportprozesse im Untersuchungsgebiet unter verschiedenen Randbedingungen analysiert.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um Beobachtungen zur Morphodynamik von Wattstrukturen aus vorangegangenen Arbeiten zu quantifizieren. Die Lage von querüberströmten Prielen auf eulitoralischen Wattflächen kann sich um mehrere Dezimeter pro Tide verändern. Die Verlagerung folgt der Haupttransportrichtung und ist im Bereich der Wattkante größer als im Bereich höher gelegener Wattflächen. Dies führt zu einer Verkrümmung im Mündungsbereich der Priele. Der in diesen Prielen dominierende Ebbestrom verursacht Erosion am entstehenden Prallhang des Mündungsbereiches und führt zur Entstehung einer neuen Prielachse, die sodann wieder der obigen Entwicklung unterliegt. Dieser Zyklus findet mit einer Periodizität weniger Wochen statt und wird unter bestimmten Bedingungen beschleunigt.

Auch Bereiche der Priele auf höher gelegenen Wattflächen unterliegen einer sich wiederholenden Entwicklung, jedoch mit längeren Perioden. Das Erscheinungsbild von Prielen kann sich demnach innerhalb weniger Tiden deutlich verändern. Diese Veränderungen sind reversibel, so dass die ungefähre Position der Priele langfristig konstant bleibt. Die beschriebene Entwicklung ist aus gängigen Messverfahren (Laserscannerbefliegungen, Peilungen) aufgrund der in der Regel verwendeten Messintervalle nicht ersichtliche. Kenntnisse über die hohe Dynamik von Prielen sind wichtig, wenn bauliche Anlagen oder Messpfähle in diesem Bereich errichtet werden sollen. Eine Installation sollte erst ab einem Abstand mehrerer hundert Meter erfolgen. Gleiches gilt für die Ausführung von Unterwasserablagerungsflächen.

Die Strömungsgeschwindigkeiten auf Ästuarwattflächen liegen deutlich unter denen im Hauptstrom des Ästuars. Von der Wattkante nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten mit steigenden Geländehöhen zum Land hin weiter ab. Der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit ist ein Ausschnitt des Verlaufes der Strömungsgeschwindigkeit im Hauptstrom des Ästuars, wird jedoch bei geringen Wasserständen maßgeblich durch die Bathymetrie verän-

dert. Insbesondere in Prielen ist die Strömung dem Verlauf der Prielachse entsprechend gelenkt. Dabei sind Priele durch den Ebbestrom dominiert.

Auf Ästuarwattflächen gibt es keine klaren Kenterpunkte und keine ausgeprägte Stauwasserphase. Vielmehr findet eine kontinuierliche Änderung der Strömungsrichtung mit minimalen Geschwindigkeiten von ca. 0,20 m/s statt.

Der Verlauf der Sedimentkonzentration auf Ästuarwattflächen ist durch den Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit geprägt. Der Betrag der Sedimentkonzentration ergibt sich durch die Strömungsgeschwindigkeit, den Seegang sowie durch lokale Besonderheiten, wie dem Sedimenteintrag aus benachbarten Wattgebieten. Dabei findet eine Interaktion der verschiedenen Einflussgrößen statt, die sich wechselseitig verstärken oder abschwächen können. So nehmen die Sedimentkonzentrationen bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten nicht zwangsläufig zu, da bei Tiden mit größerem Tidehub auch die Wassertiefen zunehmen, was den Einfluss der Orbitalbewegungen unter Wellen auf die Sohle in der Regel geringer werden lässt.

In Prielen besitzt die Strömungsgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Sedimentkonzentration. An der Wattkante ist ein erheblicher Einfluss der sohnahen Orbitalgeschwindigkeit unter Wellen festzustellen. Auf höher gelegenen Wattflächen können neben der Strömungsgeschwindigkeit und dem Seegang unter Umständen auch lokale Besonderheiten die Sedimentkonzentration beeinflussen.

Die Sedimentkonzentrationen an der Wattkante und in Prielen liegen über denen auf höher gelegenen Wattflächen. Auf Wattflächen und an der Wattkante sind die Konzentrationen in der Flutphase größer, in Prielen in der Ebbephase.

Morphologische Veränderungen resultieren aus hohen Sedimenttransportraten, nicht aus hohen Sedimentkonzentrationen. Große Transportraten werden dabei insbesondere bei erhöhten Tiden durch höhere Strömungsgeschwindigkeiten verursacht. In Prielen sorgen größere Strömungsgeschwindigkeiten in der Ebbephase bei Tiden mit geringeren Scheitelwasserständen für hohe Sedimenttransportraten.

In länger anhaltenden Phasen erhöhter Windgeschwindigkeiten steigt die Sedimenttransportrate deutlich an. Dabei besteht eine Abhängigkeit von der Windrichtung. Diese Phasen stimmen mit den Zeiten der größten Verlagerungsraten der Priele überein. Insbesondere die Verlagerung von Prielen in ihrem Mündungsbereich an der Wattkante kann als Maß für die morphodynamische Aktivität eines Wattgebietes angesehen werden.

Der Einfluss von Sturmfluten auf die Morphologie von eulitoralischen Wattflächen ist gering. Zwar steigen die Sedimenttransportraten aufgrund erhöhter Strömungsgeschwindigkeiten kurzfris-

tig an, dies reicht jedoch nicht aus, um signifikante morphologische Veränderungen hervorzurufen. Einen maßgeblichen Einfluss auf die Gestalt der Wattflächen haben dagegen erhöhte Tiden mit Tidehochwasserständen von bis zu 1 m über MThw. In Phasen, in denen der Anteil dieser Tiden höher ist als im Mittel, kann eine beschleunigte Morphodynamik festgestellt werden. Für aktuelle Forschungsprojekte, die sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie von Ästuaren und Küstengewässern befassen, bedeutet dies, dass nicht nur die steigende Quantität und Intensität von Sturmfluten untersucht werden muss, sondern auch die veränderte Tidedynamik im Bereich erhöhter Tiden.

Die erhobenen Daten lassen eine Bewertung bestehender Ansätze zur Berechnung von Sedimenttransportraten auf Wattflächen zu. Dabei variiert die Qualität der Berechnungsansätze in verschiedenen Bereichen im Watt (Wattkante, höher gelegene Wattflächen, Priel) sowie bei verschiedenen Tiden (mittlere Tiden, erhöhte Tiden). Insgesamt liefert der Berechnungsansatz nach Bailard & Inman die besten Ergebnisse. Unter Berücksichtigung der angegebenen Genauigkeiten der Messungen liegen je nach Betrachtungsort und Tide zwischen 22 % und 59 % (im Mittel 43 %) der nach dem Ansatz von Bailard & Inman berechneten Sedimenttransportraten im Bereich mit dem Faktor 2 um die gemessenen Werte. Andere untersuchte Ansätze sind weniger geeignet, um den Sedimenttransport auf Wattflächen abzubilden. Werden die untersuchten Ansätze zur Berechnung der Sedimenttransportrate auf Wattflächen in numerischen Modellen verwendet, müssen die Ergebnisse vor dem Hintergrund der bestehenden Unsicherheiten interpretiert werden.

Des Weiteren erlauben die Ergebnisse dieser Arbeit Aussagen zur Optimierung zukünftiger Messprogramme im Wattenmeer hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Auflösung. Soll die langfristige Entwicklung von größeren Wattflächen, aber auch Wattströmen oder Sandbänken untersucht werden, ist der mehrjährige Rhythmus von Laserscannerbefliegungen oder großflächiger Peilungen ausreichend.

Auf Basis dieser Messungen lassen sich jedoch keinerlei Aussagen über die mittelfristige Morphodynamik ableiten. Um die kurz- und mittelfristigen Veränderungen von Wattflächen und Prielen zu erfassen, muss das gewählte Messintervall in der Größenordnung weniger Wochen liegen. Dies ist mit teuren Laserscannerbefliegungen oder großflächigen Peilungen nicht realisierbar. Vielmehr sollte bei gezielten Fragestellungen das in dieser Arbeit beschriebene Konzept zur Anwendung kommen. An wenigen Messpositionen (Wattkante, höher gelegenen Wattflächen und Priele) sollten die wichtigsten Einflussgrößen in entsprechend hoher Auflösung aufgezeichnet werden. Peilungen des wichtigsten Priels und der angrenzenden Wattflächen sollten in variierenden Abständen von ein bis zehn Wochen wiederholt werden. Die Messungen sollten lange genug fortgesetzt werden, um eine reprä-

sentative Anzahl niedriger, mittlerer und erhöhter Tiden (jeweils ca. 300 bis 400 Tiden), einige Sturmfluten (ca. 4 bis 5) sowie mindestens eine Periode der Veränderung des Priel-systems aufzeichnen zu können. Basierend auf den Erfahrungen im Untersuchungsgebiet Neufelder Watt liegt die Dauer der Messungen unter Berücksichtigung von Unterbrechungen des Messprogramms und von Datenlücken dann in etwa bei drei Jahren.

Die Zielsetzung nach Kapitel 3 dieser Arbeit wurde somit erreicht. Die Ergebnisse konnten bereits einen Beitrag dazu leisten, den Kenntnisstand zu morphodynamischen Prozessen auf Wattflächen auf kleineren Raum- und Zeitskalen zu verbessern. So fanden die Ergebnisse der ortsfesten Messungen Eingang in die Dissertation von E. Falke mit dem Titel „Numerische Modellierbarkeit hoch aufgelöster physikalischer Prozesse“, die vor dem Abschluss steht und als Modellgebiet das Neufelder Watt behandelt (ALBERS ET AL., 2009). Die Bewertung bestehender Berechnungsansätze für Sedimenttransportraten kann die Auswahl und Verwendung geeigneter Formeln in numerischen Modellen von Wattflächen unterstützen.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Wattflächen in den Mündungsgebieten von Ästuaren sind durch eine intensive Morphodynamik gekennzeichnet. Sedimentation und Erosion treten im Wechsel auf unterschiedlichen Zeitskalen auf. Angesichts der zunehmenden Bedeutung eines integrativen Sedimentmanagements in den internationalen Tideflüssen sind die theoretischen Grundlagen der Morphodynamik von Wattflächen in Ästuaren zu erweitern. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund des Einflusses des Klimawandels auf die hydrologischen Randbedingungen sowie der Beurteilung wasserbaulicher Maßnahmen mit Hilfe numerischer Modelle.

Die vorliegende Arbeit setzt hier an und verbessert das Prozessverständnis der Morphodynamik von Ästuarwatten auf der Basis umfangreicher Messungen in der Natur.

Es lagen bislang keine Studien zur detaillierten Erfassung und Analyse der Hydro- und Morphodynamik von eulitoralen Wattflächen auf kleinen bis mittleren Raum- und Zeitskalen vor. Aus dem Wunsch, einen Beitrag zur Schließung dieser Wissenslücken zu leisten, leiten sich die Ziele dieser Arbeit ab, zu denen u.a. die Analyse von Sedimenttransportprozessen unter dem Einfluss verschiedener Randbedingungen auf der Basis umfangreicher Messungen in der Natur, die Identifizierung treibender Kräfte morphologischer Veränderungen sowie die Bewertung bestehender theoretischer Berechnungsansätze zählen.

Zunächst wurden die wichtigsten Prozesse des Sedimenttransportes auf Wattflächen zusammengefasst und erläutert. Die geologischen und morphologischen Eigenschaften von Wattflächen wurden beschrieben. Es folgte die Auswahl einer Wattfläche als Untersuchungsgebiet sowie eine Untersuchung der Langzeitentwicklung dieser Fläche anhand vorhandener bathymetrischer Daten auf der Basis von Volumenbilanzen. Das Ergebnis gab Aufschluss über den Systemzustand des Untersuchungsgebietes und wies die generelle Eignung für die weiteren Untersuchungen nach.

Zur Erfüllung der Zielsetzung dieser Arbeit wurde ein Messprogramm entworfen, das die kontinuierliche und hochauflösende Aufzeichnung von Konzentrationen suspendierter Sedimente, Strömungsparametern, Seegang und Wasserständen an verschiedenen Messpositionen auf der gewählten Ästuarwattfläche erlaubte. Auf der Fokusfläche im Neufelder Watt in der Elbmündung wurden dann mit modernsten Messmethoden langjährige Messungen in der Natur durchgeführt. Dabei wurden morphologische Veränderungen auf unterschiedlichen Zeitskalen, angefangen von Umlagerungen während eines Tidezyklus bis hin zu saisonalen

Schwankungen, dokumentiert, ausgewertet und in den Gesamtkontext der Veränderung der Fokusfläche in den vergangenen Dekaden eingeordnet. Sämtliche den Sedimenttransport und damit die Morphodynamik bestimmenden Einflussgrößen wurden kontinuierlich aufgezeichnet und anschließend analysiert. Dabei wurden auch standortabhängige Unterschiede herausgearbeitet. In regelmäßigen Intervallen und nach Extremereignissen wurde die Bathymetrie im Untersuchungsgebiet mit einem Fächerecholot aufgenommen. So konnte der Zusammenhang zwischen auslösenden Einflüssen und morphologischen Veränderungen dokumentiert werden, wobei die Bedeutung von Extremereignissen aber auch von lang anhaltenden mittleren Wetter- und Tideverhältnissen analysiert wurde.

Die aufgezeichneten Daten wurden hinsichtlich der Sedimenttransportprozesse auf Ästuarwattflächen unter dem Einfluss verschiedener Randbedingungen ausgewertet. Auf der Basis der Felduntersuchungen wurden strömungsabhängige Muster im Verlauf der Sedimentkonzentrationen und der Sedimenttransportraten herausgearbeitet. Der Betrag der Sedimentkonzentrationen weist eine Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und dem Seegang auf. Je nach Position im Watt ist der Einfluss dieser Parameter unterschiedlich groß. Tiden mit erhöhten Tidehochwasserständen lassen die Sedimenttransportraten deutlich ansteigen. Beschleunigte morphodynamische Aktivität, als deren Maß die Verlagerung von Prielen identifiziert wurde, findet im Wesentlichen in diesen ausgewiesenen Zeiträumen statt. Die Auswirkungen einzelner Extremereignisse von kurzer Dauer haben dagegen keinen nennenswerten Einfluss auf die Bathymetrie. Aktuelle Forschungsprojekte, die sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie von Ästuaren und Küstengewässern befassen, sollten nicht nur die steigende Quantität und Intensität von Sturmfluten berücksichtigen, sondern auch die veränderte Eintrittshäufigkeit von erhöhten Tiden mit Scheitelwasserständen bis 1 m über dem Mittleren Tidehochwasser.

Es wurden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse dieser Arbeit erläutert. Auf der Basis der gewonnenen Erkenntnisse konnten Hinweise zur Verwendung von Berechnungsansätzen zum Sedimenttransport auf Wattflächen ausgesprochen werden. Dabei variiert die Qualität der geprüften Berechnungsansätze in verschiedenen Bereichen im Watt sowie bei unterschiedlich hoch auflaufenden Tiden. Bei Anwendung des am besten geeigneten Ansatzes liegen im Mittel 43 % der berechneten Sedimenttransportraten im Bereich mit dem Faktor 2 um die gemessenen Werte. Bei Anwendung der untersuchten Ansätze zur Berechnung der Sedimenttransportrate auf Wattflächen in numerischen Modellen müssen die Ergebnisse vor Hintergrund dieser bestehenden Unsicherheiten interpretiert werden.

Querüberströmte Priele auf eulitoralen Wattflächen können sich um mehrere Dezimeter pro Tide verlagern. Die Verlagerung folgt der Haupttransportrichtung und ist im Bereich der

Wattkante größer als im Bereich höher gelegener Wattflächen. Das Erscheinungsbild von Prielen kann sich demnach innerhalb weniger Tiden deutlich verändern. Kenntnisse über die hohe Dynamik von Prielen sind wichtig, wenn bauliche Anlagen oder Messpfähle in diesem Bereich errichtet werden sollen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit erlauben Aussagen zur Optimierung der zeitlichen und räumlichen Auflösung zukünftiger Messprogramme im Wattenmeer. Zur Erfassung der langfristigen Entwicklung von Wattflächen ist der mehrjährige Rhythmus von Laserscannerbefliegungen oder großflächiger Peilungen ausreichend. Aus diesen Messungen lassen sich jedoch keinerlei Aussagen zur mittelfristigen Morphodynamik ableiten. Um die kurz- und mittelfristigen Veränderungen von eulitoralischen Wattflächen und Prielen zu erfassen, muss das gewählte Intervall bathymetrischer Messungen in der Größenordnung weniger Wochen liegen.

Eine Implementierung der Ergebnisse dieser Arbeit in aktuelle Sedimentmanagementkonzepte von Ästuaren und Wattflächen erscheint wünschenswert. Sollen Auswirkungen strombaulicher Maßnahmen oder die Ablagerung von Sedimenten im Wattbereich mit numerischen Modellen abgeschätzt werden, sollten soweit wie möglich die am besten geeigneten Berechnungsansätze verwendet werden. Dabei sollte insbesondere der Einfluss erhöhter Tiden mit Tidehochwasserständen bis zu 1 m über MThw untersucht werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnene Datenbasis kann verwendet werden, um durch eine spätere temporäre Wiederholung der Messungen die Auswirkungen eventueller anthropogener Eingriffe oder – langfristig – des Klimawandels und damit einhergehender Veränderungen der Randbedingungen abschätzen zu können.

Die in bestehenden Berechnungsansätzen und damit auch in den Ergebnissen numerischer morphodynamischer Modelle enthaltenen Unsicherheiten und limitierten Genauigkeiten zeigen die Bedeutung und Notwendigkeit von Messungen in der Natur. Zur weiteren Verbesserung der Modelle, zur Interpretation der Simulationsergebnisse sowie zur Einführung eines holistischen Wattmanagements ist ein umfassendes Monitoring von großer Bedeutung. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse können helfen, dieses effektiv zu gestalten.

Zur großflächigen Erfassung der Bathymetrie, aber auch der Sedimentkonzentrationen und Strömungen, sollten neben Peilungen bzw. ortsfesten Messungen auch moderne Verfahren der Fernerkundung zum Einsatz kommen. Hierzu laufen entsprechende Forschungsanträge, z.B. zur Überprüfung der Anwendbarkeit des so genannten „Airborne Hydromapping“ in Küstengewässern. Bei diesem Verfahren wird luftfahrzeuggestützte Lasertechnik verwendet,

bei der der Laserstrahl in die Wassersäule eindringt und so Informationen über Wassertiefe, Trübung oder Strömung liefern kann.

Schrifttum

- AHREND, K., EPEL, D., LUDWIG, S. (2006): Wattenmeersedimente: Sedimentinventar Nordfriesisches Wattenmeer (Abschlussbericht zum KFKI-Projekt 03KIS037), GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, 2006
- ALBERS, T., LIEBERMAN, N. VON, FALKE, E. (2009): Morphodynamic Processes on Tidal Flats in Estuaries. In: Journal of Coastal Research, Special Issue 56, ISSN 0749-0208, pp. 1325-1329
- ALBERS, T., LIEBERMAN, N. VON (2010): Morphodynamics of Wadden Sea Areas – Field Measurements and Modeling. In: International Journal of Ocean and Climate Systems (IJOCS), Volume 1, Number 3, Publishers Multi-Science, UK, ISSN 1759-3131, pp. 123-132
- ALBERS, T., LIEBERMAN, N. VON, SAN, D.C., SCHMITT, K. (2010a): Current and Erosion Survey in the Coastal Zone of Soc Trang Province, Vietnam. In: Proceedings of the 78th Annual Meeting of the International Commission on Large Dams (ICOLD), Hanoi, Vietnam
- ALBERS, T., MUCH, D., OHLE, N., LIEBERMAN, N. VON, FALKE, E. (2010b): Morphodynamic Processes in Estuaries – Comparison of Marine and Limnic Tidal Flats. In: Proceedings of the 32nd International Conference on Coastal Engineering, Shanghai, China
- ANDERSEN, T.J., PEJRUP, M. (2001): Suspended Sediment Transport on a temperate, microtidal Mudflat, the Danish Wadden Sea. In: Marine Geology 173, 69-85
- ANDERSEN, T.J., PEJRUP, M. (2002): Biological Mediation of the Settling Velocity of Bed Material Eroded from an Intertidal Mudflat, the Danish Wadden Sea. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science 54, 737-745
- ARGUS GESELLSCHAFT FÜR UMWELTMESSTECHNIK MBH (Hrsg.) (2010): ASM Reference. Onlinequelle: www.argusnet.de
- ATV-DVWK-ARBEITSBERICHT (2003): Feststofftransportmodelle für Fließgewässer. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- BARTHOLDY, J. (2006): A simple Model for Estimating Current Velocity in Tidal Inlets: Example from Grådyb in the Danish Wadden Sea. In: Geo-Marine Letters 26, 133-140
- BARTHOLOMÄ, A., KUBICKI, A., BADEWIEN, T., FLEMMING, B. (2009): Suspended Sediment Transport in the German Wadden Sea – Seasonal Variations and Extreme Events. In: Ocean Dynamics 59, 213-225

- BAYRAM, A., LARSON, M., MILLER, H.C., KRAUS, N. (2001): Cross-shore distribution of long-shore sediment transport: comparison between predictive formulas and field measurements. In: *Coastal Engineering* 44, pp. 79-99
- BMU – BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2006): Integriertes Küstenzonenmanagement in Deutschland (IKZM) – Nationale Strategie mit Bestandsaufnahme. Kabinettsbeschluss vom 22. März 2006, Bonn
- BÖHLICH, M.J., STROTMANN, T. (2008): The Elbe Estuary. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 74*. Heide in Holstein : Boyens, 2008, S. 288–306
- BREUER, R. (2010): Sedimentmanagement für die Tideelbe. In: Proelß, A., König, D., Wilhelmssen, T.-L. (Hrsg.): *Studies in International Law of the Sea and Maritime Law – Internationales Seerecht und Seehandelsrecht, Band 1*, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden
- BROWNLIE, W.R. (1982): Prediction of flow depth and sediment discharge in open channels. Dissertation at California Institute of Technology, Pasadena, California
- BRZANK, A., HEIPKE, C., GÖPFERT, J., SÖRGEL, U. (2009): Ableitung Digitaler Geländemodelle im Wattenmeer aus luftgestützten Laserscannerdaten. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 76*. Heide in Holstein : Boyens
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Hannover
- CAMENEN, B., LARROUDÉ, P. (2003): Comparison of Sediment Transport Formulae for the Coastal Environment. In: *Coastal Engineering* 48, pp. 111-132
- CHANG, T.S., FLEMMING, B.W. (2006): Sedimentation on a Wave Dominated, Open-coast Tidal Flat, South-western Korea: Summer Tidal Flat – Winter Shoreface – Discussion. In: *Sedimentology* 53, 687-691
- CHRISTIANSEN, C., VOLUND, G., LUND-HANSEN, L.C., BARTHOLDY, J. (2006): Wind influence on tidal flat sediments: field investigations in the Ho Bugt, Danish Wadden Sea. In: *Marine Geology* 235, pp. 75-86
- CHU, K. (2009): Process-based and Surrogate Modelling of Fine Sediment Transport in the Dutch Coastal Zone. MSc Thesis, UNESCO-IHE, Institute for Water Education
- DAVIES, A.G., RIJN, L.C. VAN, DAMGAARD, J.S., GRAAFF, J. VAN DE, RIBBERINK, J.S. (2002): Intercomparison of Research and Practical Sand Transport Models. In: *Coastal Engineering* 46, 1-23

- DEINES, K.L. (1999): Backscatter estimation using Broadband acoustic Doppler current profilers. In: OCEANS '99 – MTS/IEEE Conference Proceedings. September 13-16, 1999, Seattle, Washington
- DEWEY, R.K., STRINGER, S. (2005): Higher Moment Flow Parameters from various ADCP Transducer Configurations. Teledyne RDI Library and Reference Center. Marine-Measurements – Coastal and Deep Water ADCP's and Waves Array. Technical Report
- DIECKMANN, R. (1985): Geomorphologie, Stabilitäts- und Langzeitverhalten von Wattenzugsgebieten der Deutschen Bucht. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 60, Eigenverlag, Hannover, S. 133-361
- DILLO, H.-G. (1960): Sandwanderung in Tideflüssen. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Grund- und Wasserbau der Technischen Hochschule Hannover, Heft 17, Eigenverlag, Hannover
- DOROW, C., MILBRADT, P. (2008): ImTG – Identifikation morphologischer Tendenzen und Geschwindigkeiten im Küstennahbereich. 3. Zwischenbericht. Institut für Bauinformatik, Leibniz Universität Hannover
- DRONKERS, J. (2005): Dynamics of Coastal Systems. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 25, World Scientific, Singapore
- DÜCKER, H.P. (1982): Suspensionsgehalte in Flachwassergebieten – Messungen im Watt von Scharhörn. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 37*. Heide in Holstein : Boyens
- DYER, K.R., CHRISTIE, M.C., FEATES, N., FENNESSY, M.J., PEJRUP, M., LEE, W. VAN DER (2000): An Investigation into Processes Influencing the Morphodynamics of an Intertidal Mudflat, the Dollard Estuary, The Netherlands: I. Hydrodynamics and Suspended Sediment. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 50, 607–625
- EAK (2002): Empfehlungen des Ausschusses für Küstenschutzwerke – Empfehlungen für Küstenschutzwerke. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 65*. Heide in Holstein : Boyens, Korrigierte Ausgabe 2007
- EHLERS, J. (1988): The Morphodynamics of the Wadden Sea. Rotterdam, A. A. Balkema
- EISMA, D. (1998): Intertidal Deposits – River Mouths, Tidal Flats and Coastal Lagoons. CRC Press, Boca Raton u.a.
- ELIAS, E. (2006): Morphodynamics of Texel Inlet. IOS Press, The Netherlands
- EPPEL, D., KAPITZA, H., ONKEN, R., PLESKACHEVSKI, A., PULS, W., RIETHMÜLLER, R., VAESSEN, B. (2006): Wathydrodynamik: Die hydrodynamische Belastung von Wattgebieten (Ab-

- schlussbericht zum KFKI-Projekt 03KIS038 (BELAWATT)), GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, Geesthacht, 2006
- FICKERT, M., STROTMANN, T. (2007): Hydrodynamische Entwicklung der Tideelbe. In: Gönner, G., Pflüger, B., Bremer, J.A. (Hrsg.): Von der Geoarchäologie über die Küstendynamik zum Küstenzonenmanagement. *Coastline Reports* 9, S. 59-68
- FIGGE, K. (1984): Das Schlickuntersuchungsprogramm des KFKI – Anlass und Arbeitskonzept. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 40*. Heide in Holstein: Boyens
- FREITAG, C., OHLE, N., STROTMANN, T., GLINDEMANN, H. (2007): Concept of a sustainable development of the Elbe estuary. In: Dohmen-Janssen, C.M., Hulscher, S. (Hrsg.): *International Symposium of River Coastal and Estuarine Morphodynamics*. 2007, S. 1085–1092
- FRÖHLE, P. (2000): Messung und statistische Analyse von Seegang als Eingangsgröße für den Entwurf und die Bemessung von Bauwerken des Küstenwasserbaus. Dissertation. Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Rostock.
- FÜHRBÖTER, A. (1967): Zur Mechanik der Strömungsriffel - Ein Ansatz zur Berechnung der Höhe der Transportkörper und ihres Einflusses auf den Feststofftransport. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 29, Eigenverlag, Hannover
- GÄTJE, CH., REISE K. (Hrsg.) (1998): Ökosystem Wattenmeer - Austausch-, Transport- und Stoffumwandlungsprozesse. Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 1998
- GEER, P.F.C. VAN (2007): Long-term Morphological Evolution of the Wadden Sea. Report, Delft Hydraulics
- GÖHREN, H. (1969): Die Strömungsverhältnisse im Elbmündungsgebiet. In: Hamburger Küstenforschung, Heft 6, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Verkehr, Strom- und Hafengebäude, Hamburg
- GÖHREN, H. (1970): Studien zur morphologischen Entwicklung des Elbmündungsgebietes. In: Hamburger Küstenforschung, Heft 14, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Verkehr, Strom- und Hafengebäude, Hamburg
- GÖHREN, H. (1971): Untersuchungen über die Sandbewegung im Elbmündungsgebiet. In: Hamburger Küstenforschung, Heft 19, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Verkehr, Strom- und Hafengebäude, Hamburg
- GÖHREN, H. (1973): Ein automatisches Schwebstoff-Dauermessgerät für den Einsatz im Wattenmeer und in Brandungszonen. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 24*. Heide in Holstein: Boyens

- GÖHREN, H. (1974a): Über Strömungsverhältnisse und Sandtransport in den Flachwassergebieten vor der südöstlichen Nordseeküste. In: Hamburger Küstenforschung, Heft 29, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Verkehr, Strom- und Hafenbau, Hamburg
- GÖHREN, H. (1974b): Strombeobachtungen an Langzeit-Messstationen im Watt. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 25*. Heide in Holstein : Boyens
- GÖHREN, H. (1975): Die Sedimente im küstennahen Watt zwischen und Elbe und Weser. In: Hamburger Küstenforschung, Heft 33, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Verkehr, Strom- und Hafenbau, Hamburg
- GÖNNERT, G. (1995): Mäandrierung und Morphodynamik im Eider Ästuar. In: Hofmeister, B., Voss, F. (Hrsg.): *Berliner geographische Schriften, Band 41*. Berlin: TU Berlin, S. 1–195
- GORDON, R.L. (1996): Acoustic Doppler Current Profiler - Principles of Operation. A Practical Primer. Second Edition for Broadband ADCP's. RD Instruments. 9855 Businesspark Ave. San Diego, California 92131 USA.
- GRAAFF, J. VAN DE, OVEREEM, J. VAN (1979): Evaluation of Sediment Transport Formulae in Coastal Engineering Practice. In: Coastal Engineering 3, pp. 1-32
- GRABE, J. (2001): Bodenmechanik und Grundbau. Veröffentlichungen des Arbeitsbereiches Geotechnik und Baubetrieb, Technische Universität Hamburg-Harburg
- GRASS, A.J. (1970): The Initial Instability of Fine Sands. In: Proceedings ASCE, Vol. 96, HY 2
- GREEN, M.O., COCO, G. (2007): Sediment transport on an estuarine intertidal flat: Measurements and conceptual model of waves, rainfall and exchange with a tidal creek. In: Estuarine, Coastal and Shelf Science 72, pp. 553-569
- HAAS, H. DE, EISMA, D. (1993): Suspended-sediment transport in the Dollard estuary. Netherlands Journal of Sea Research 31 (1), pp. 37-42
- HENSEN, W. (1958): Die Berechnung von Tidewellen in Tideflüssen. Beschreibung und Kritik verschiedener Verfahren. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 7*. Heide in Holstein: Boyens
- HEYER, H., HEWER, R., SÜNDERMANN, J. (1986): Die numerische Modellierung von Strömung und Sedimenttransport in Wattgebieten. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 43*. Heide in Holstein: Boyens
- HOFFMANN, D. (1992): Erdgeschichtliche Entwicklung der Küstengebiete an Nord- und Ostsee. In: Kramer, J. & Rhode, H.: *Historischer Küstenschutz – Deichbau, Inselerschutz und Binnenentwässerung an Nord- und Ostsee*. Stuttgart, Verlag Konrad Wittwer

- HOFSTEDDE, J. (1991): Hydro- und Morphodynamik im Tidebereich der Deutschen Bucht. In: Hofmeister, B., Voss, F. (Hrsg.): *Berliner geographische Schriften, Band 31*. Berlin: TU Berlin, S. 1–112
- HPA (HAMBURG PORT AUTHORITY) & WSV (WASSER- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES) (2008): Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe. In: Breuer, R.: *Sedimentmanagement für die Tideelbe. Studies in International Law of the Sea and Maritime Law – Internationales Seerecht und Seehandelsrecht, Band 1, 2010*, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden
- HUGHES, G.H., MASSELINK, G., BRANDER, R.W. (1997): Flow velocity and sediment transport in the swash zone of a steep beach. *Marine Geology* 138, 91-103
- HUNDT, C., KÖNIG, D., REINECK, H.-E. (1977): Die voraussichtlichen sedimentologischen Veränderungen im Neuwerker Watt infolge der geplanten Dammbauten für das Hafenprojekt Scharhörn. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 30*. Heide in Holstein: Boyens
- IHO – INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (2008): IHO Standards for Hydrographic Surveys. 5th Edition, Special Publication No. 44, International Hydrographic Bureau, Monaco
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2007): *Climate Change 2007 - The 4th Assessment Report. Arbeitspapier IPCC, 2007*
- JENSEN, F.B. (2008): *Sonar Acoustics Handbook*. NURC (Ed.), La Spezia, Italy
- JI, Z.-G. (2008): *Hydrodynamics and water quality: Modeling rivers, lakes, and estuaries*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey
- JO, H.R., LEE, H.J. (2008): Bedform Dynamics and Sand Transport Pathways in the Garolim Bay Tidal Flat, West Coast of Korea. In: *Geosciences Journal*, Vol. 12, No. 3, p. 299-308
- KAPPENBERG, J., FANGER, H.-U. (2007): *Sedimenttransportgeschehen in der tidebeeinflussten Elbe, der Deutschen Bucht und in der Nordsee*. GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 2007/20
- KLÜNDER, A. (1988): Laborversuche zur Flockenbildung und Sinkgeschwindigkeit von Elbschwebstoffen. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, GKSS 88/E/64
- KOHLUS, J. (1998): Elemente des Wattenmeeres. In: Landesamt für den Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Umweltbundesamt: *Umweltatlas Wattenmeer, Band I – Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer*. Stuttgart, Ulmer Verlag
- KRAMER, J. (1989): *Kein Deich, kein Land, kein Leben – Geschichte des Küstenschutzes an der Nordsee*. Leer, Verlag Gerhard Rautenberg

- LAUCHT, H., GÖHREN, H. (1967): Zwischenbericht über die Forschungsarbeiten im Wattengebiet Neuwerk/Scharhörn. Schriftenreihe der Behörde für Wirtschaft und Verkehr der Freien und Hansestadt Hamburg, Heft 2
- LETTMANN, K.A., WOLFF, J.-O., BADEWIEN, T.H. (2008): Modeling the impact of wind and waves on suspended particulate matter fluxes in the East Frisian Wadden Sea (southern North Sea). In: *Ocean Dynamics* 59, 239-262
- LIEBERMAN, N. VON, MATHEJA, A., SCHWARZE, H., ZIMMERMANN, C. (1998): Interdisziplinäres Forschungsvorhaben „Optimierung von Küstensicherungsarbeiten im Küstenvorfeld der Nordseeküste“: Untersuchungen zur Wirksamkeit von Lahnungen durch Simulation der hydromechanisch-morphodynamischen Wechselwirkungen in physikalischen und numerischen Modellen. In: *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover*, H. 82, Hannover, S. 1-351
- LIEBERMAN, N. VON (1999): Leitbildmodell für den Küstenschutz der Nordseeküste am Beispiel der Vorländer. Dissertation. In: *Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover*, H. 83, Hannover, S. 1-291
- LÜDERS, K. (1934): Über das Wandern der Priele. In: *Abhandlungen des naturwissenschaftlichen Vereins zu Bremen*, Bd. 29, Heft 1/2, Sonderabdruck, Bremen
- LÜDERS, K., LUCK, G. (1976): *Kleines Küstenlexikon – Natur und Technik an der deutschen Norseeküste*. Hildesheim, Verlagsbuchhandlung August Lax
- MALCHEREK, A. (2006): *Sedimenttransport und Morphodynamik*. Vorlesungsskript. Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Institut für Wasserwesen
- MALCHEREK, A. (2010): *Gezeiten und Wellen – Die Hydromechanik der Küstengewässer*. Vieweg+Teubner GWV Fachverlage, Wiesbaden
- MANZENRIEDER, H. (1983): Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus Sicht des Ingenieurs. *Mitteilungen des Leichtweiß-Institutes für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*, Heft 79, 137-193
- MAYERLE, R., ZIELKE, W. (2005): Project Overview and Executive Summary. In: *Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): PROMORPH - Predictions of Medium-Scale Morphodynamics*. Heide in Holstein : Boyens, 2005, S. 1–24
- MEDWIN, H. (1975): Speed of sound in water: a sample equation for realistic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 58: 1318-1319
- MIGNIOT, C.; BOULAC, J.; BOUTITIE, J. MEYER, J.; FILLIAT, G.; ROCHMANN, J. (1981): *La pratique des sols et fondations: captage, rabattement, drainage – mouvements de terrain – ero-*

- sion et sedimentation en mer et en rivière – traitement des terrains. Editions du Moniteur, Paris
- MORGENSCHWEIS, G. (2002): ADCP – Einführung einer neuen Messtechnik in den Durchflussmessdienst. Aus: Sonderdruck Jahresbericht Ruhrwassermenge 2001. Ruhrverband Essen
- NIEMEYER, H.D., GOLDENBOGEN, R., SCHROEDER, E., KUNZ, H. (1995): Untersuchungen zur Morphodynamik des Wattenmeeres im Forschungsvorhaben WADE. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 57*. Heide in Holstein: Boyens
- NIEMEYER, H.D. (2000): Forschungsvorhaben WADE – Synthese und Ausblick. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 62*. Heide in Holstein: Boyens
- NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN (NAW) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1987): Deutsches Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Summarische Wirkungs- und Stoffkenngrößen (Gruppe H), Bestimmung des Gesamttrockenrückstandes, des Filtrattrockenrückstandes und des Glühverlustes (H 1), DIN 38409, Teil 1
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1990): Baugrund – Aufschluss durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben, DIN 4021
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1996): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung, DIN 18126
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2002): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Glühverlustes, DIN 18128
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2003): Geotechnische Erkundung und Untersuchung, Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1: 2002), Deutsche Fassung EN ISO 14688-1: 2002
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2007): Baugrund und Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korndichte (Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer), DIN 18124

- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010a): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Korngrößenverteilung, DIN 18123
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (2010b): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens (Teil 2: Feldversuche), DIN 18125-2
- NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN (NAW) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1979): Hydrologie – Teil 1: Begriffe, quantitativ, DIN 4049
- NORMENAUSSCHUSS WASSERWESEN (NAW) IM DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (1988): Landwirtschaftlicher Wasserbau – Teil 2: Begriffe Hochwasserschutz, Küstenschutz, Schöpfwerke, DIN 4047
- PFEIFFER, H. (1996): Die geohydraulische Kontakterosion in wassergesättigten Mischwattbereichen. Dissertation, RWTH Aachen
- PLÖGER, W. (2007): Sohlformen bei instationären Strömungen - Messung und Simulation. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2007, Eigenverlag
- PLÜß, A., HEYER, H. (2007): Morphodynamic Multi-Model Approach for the Elbe Estuary. In: Dolmen-Janssen, C.M., Holster, S. (Hers.): *International Symposium of River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, 2007, S. 113–118
- POERBANDONO, MAYERLE, R. (2005): Composition and Dynamics of Sediments in Tidal Channels of the German North Sea Coast. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 69*. Heide in Holstein: Boyens, 2005, S. 63–92
- POSTMA, H. (1982): Hydrography of the Wadden Sea: Movements and Properties of Water and Particulate Matter. Wadden Sea Working Group, Report 2, Balkema, The Netherlands
- PROJEKTBURO FAHRRINNENANPASSUNG (2007): *Fahrrinnenanpassung Unter- und Außenelbe - Das Projekt im Überblick*. Arbeitspapier WSA Hamburg, 2007
- RAUDKIVI, A.J. (1982): Grundlagen des Sedimenttransports. Springer-Verlag, Berlin
- RD INSTRUMENTS (2005a): WorkHorse Monitor, Sentinel, Rio Grande and Mariner – Acoustic Doppler Current Profiler Technical Manual
- RD INSTRUMENTS (2005b): WorkHorse Monitor, Sentinel, Mariner, Rio Grande, Quartermaster, H-ADCP, Navigator and Long Ranger ADCPs – Commands and Output Data Format
- REINECK, H.-E., SIEFERT, W. (1980): Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuwerker Watt. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 35*. Heide in Holstein: Boyens

- REINECK, H.-E. (1982): Das Watt – Ablagerungs- und Lebensraum. Frankfurt am Main, Verlag von Waldemar Kramer
- RENGER, E., PARTENSCKY, H.-W. (1974): Stabilitätsverhalten von Watteinzugsgebieten. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 25*. Heide in Holstein: Boyens
- RIDDERINKHOF, H., HAM, R. VAN DER, LEE, W. VAN DER (2000): Temporal variations in concentration and transport of suspended sediments in a channel-flat system in the Ems-Dollard estuary. In: *Continental Shelf Research* 20, pp. 1479-1493
- RIJN, L.C. VAN (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, The Netherlands
- RIJN, L.C. van (2005): Principles of sedimentation and erosion engineering in rivers, estuaries and coastal seas. Aqua Publications, The Netherlands
- RIJN, L.C. VAN (2007): Manual Sediment Transport Measurements in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Rijkswaterstaat/RIKZ, Aqua Publications, The Netherlands
- ROCKEL, B., WOTH, K. (2007): Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of RCM simulations. In: *Climatic Change*, 10 (2007), S. 100–158
- SCHRÖDER, E. (1994): Parametrisierung morphodynamischer Strukturen von Watteinzugsgebieten für empirisch-konzeptionelle Modellierungen. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 56*. Heide in Holstein: Boyens
- SCHÜLLER, A., HOFSTEDE, J. (1992): Untersuchungen über die Morphodynamik im Wattgebiet der inneren Deutschen Bucht (Abschlussbericht des KFKI-Projektes MORAN, Teil 2). In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 53*. Heide in Holstein: Boyens
- SHIELDS, A. (1936): Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. In: Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Heft 26, Eigenverlag, Berlin
- SIEFERT, W. (1971): Untersuchung des Seegangs in flachem Wasser. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 21*. Heide in Holstein: Boyens, 1971, S. 17–28
- SIEFERT, W. (1983): Morphologische Analysen für das Knechtsand Gebiet (Pilotstudie des KFKI-Projektes MORAN). In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 38*. Heide in Holstein: Boyens, 1983, S. 1–58

- SIEFERT, W. (1987): Umsatz- und Bilanz-Analysen für das Küstenvorfeld der Deutschen Bucht – Grundlagen und erste Auswertungen. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 45*. Heide in Holstein : Boyens, 1987, S. 1-57
- SIMPSON, M.R. (2001): Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler. United States Geological Survey. Open-file report 01-1. Sacramento, California
- SOULSBY, R. (1997): Dynamics of Marine Sands – A Manual for Practical Applications. Thomas Telford Publications, London, UK
- SPINGAT, F.M. (1997): Analyse der Schwebstoffdynamik in der Trübungszone eines Tideflusses. Dissertation im Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Mitteilungen aus dem Leichtweiß Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Heft 139
- STREET, R.L., WATTERS, G.Z., VENNARD, J.K (1996): Elementary fluid mechanics. 7th Edition, Wiley, New York
- STREIF, H. (1978): Zur Geologie der deutschen Nordseeküste. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 32*. Heide in Holstein : Boyens, 1978, S. 30–49
- STREIF, H. (1990): Das Ostfriesische Küstengebiet – Nordsee, Inseln, Watten und Marschen. Sammlung Geologischer Führer, 57
- TALKE, S.A., STACEY, M.T. (2008): Suspended sediment fluxes at an intertidal flat: The shifting of wave, wind, tidal and freshwater forcing. In: *Continental Shelf Research* 28, pp. 710-725
- ULRICK, R.J. (1983): Principles of Underwater Sound. 3rd Edition. McGraw-Hill Book Company
- UNESCO (1987): International Oceanographic Tables, Vol. 4. UNESCO Technical Papers in Marine Science, No. 40
- VEENSTRA, H. (1977): Struktur und Dynamik des Gezeitenraumes. In: ABRAHAMSE, J. et al.: *Wattenmeer – Ein Naturraum der Niederlande, Deutschlands und Dänemarks*. 2. Auflage, Wachholtz Verlag, Neumünster
- VOLLMERS, H., PERNECKER, L. (1967): Beginn des Feststofftransportes für feinkörnige Materialien in einer richtungskonstanten Strömung. In: *Die Wasserwirtschaft*, Heft 6
- WAAL, R.-J. VAN DE (2007): Sediment Transport Patterns in the Dutch Wadden Sea. Report, WL Delft Hydraulics
- WATANABE, A. (1992): Total rate and distribution of longshore sand transport. In: Proceedings of the 23rd Coastal Engineering Conference, pp. 2528 - 2541

- WIELAND, P. (1984): Fernerkundung als Hilfsmittel in der Wattenforschung. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 40*. Heide in Holstein: Boyens
- WINTER, C., POERBANDONO, HOYME, H., MAYERLE, R. (2005): Modelling of Suspended Sediment Dynamics in Tidal Channels of the German Bight. In: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hrsg.): *Die Küste, Heft 69*. Heide in Holstein: Boyens
- WITT, K.J. (Hrsg.) (2008): Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen. 7. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin
- WITTMER, H.-G. (1958): Tideänderungen durch Einbauten in Tideflüssen. In: Mitteilungen des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover, Heft 13, Eigenverlag, Hannover
- WOTH, K., WEISSE, R., VON STORCH, H. (2006): Climatic Change and North Sea storm surge extremes: An ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. In: *Ocean Dynamics*, 56 (2006), S. 3–15
- YANG, B.C, DALRYMPLE, R.W., CHUN, S.S. (2005): Sedimentation on a Wave Dominated, Open-coast Tidal Flat, South-western Korea: Summer Tidal Flat – Winter Shoreface. In: *Sedimentology* 52, 235-252
- ZANKE, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer Verlag Berlin, Heidelberg

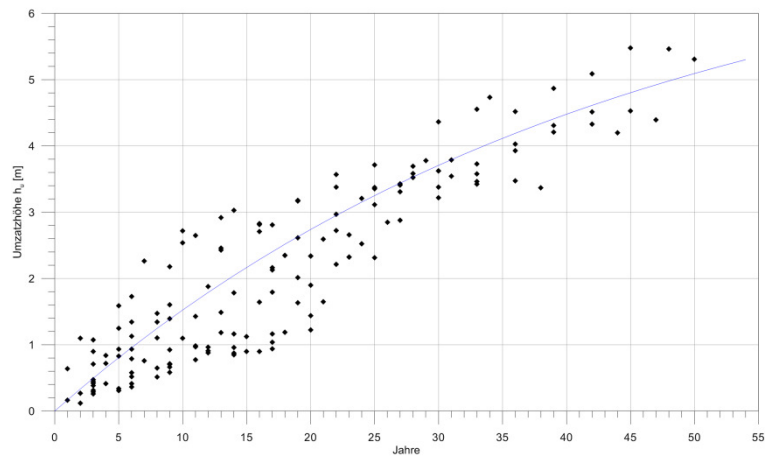
Anhang

A Karte der deutschen Nordseeküste

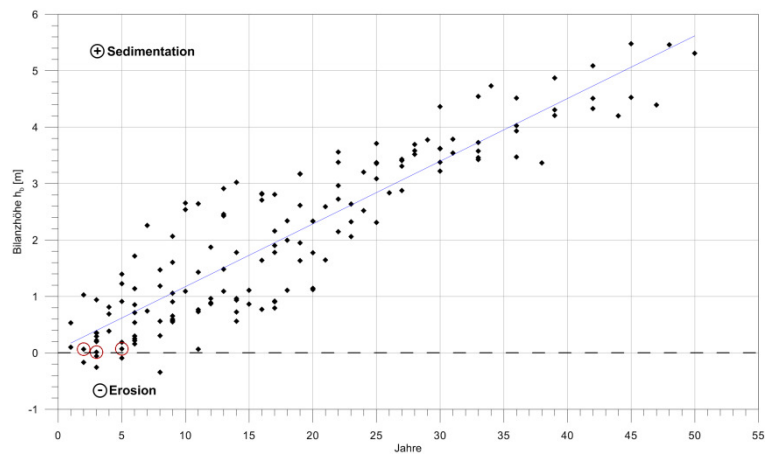


Übersicht über die in Kapitel 2 genannten Projektgebiete

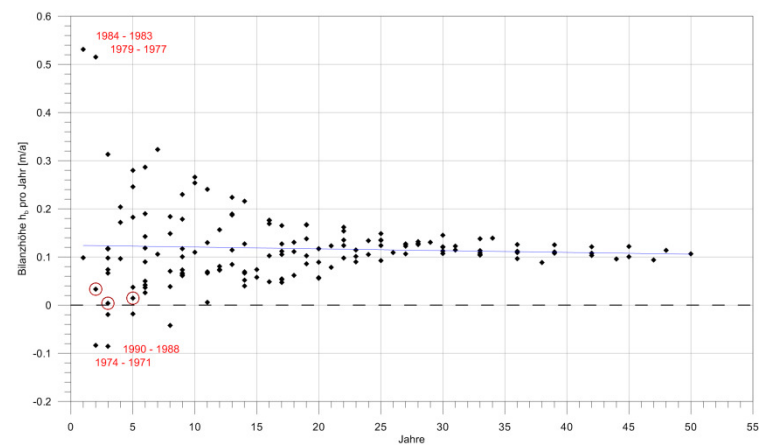
B Auswertung der Volumenbilanzen



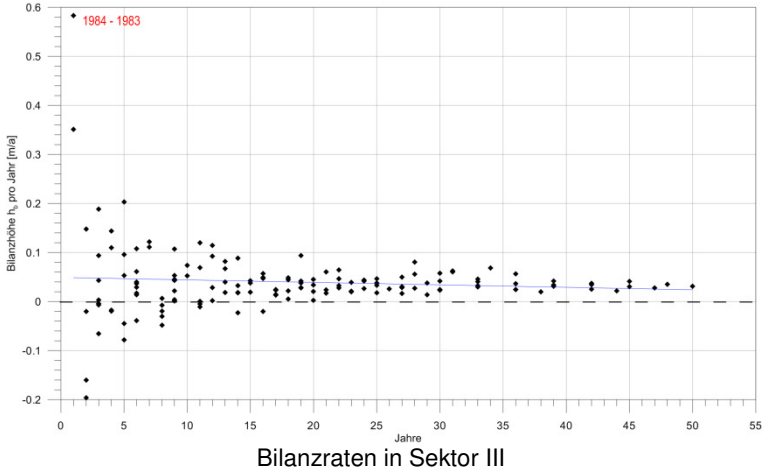
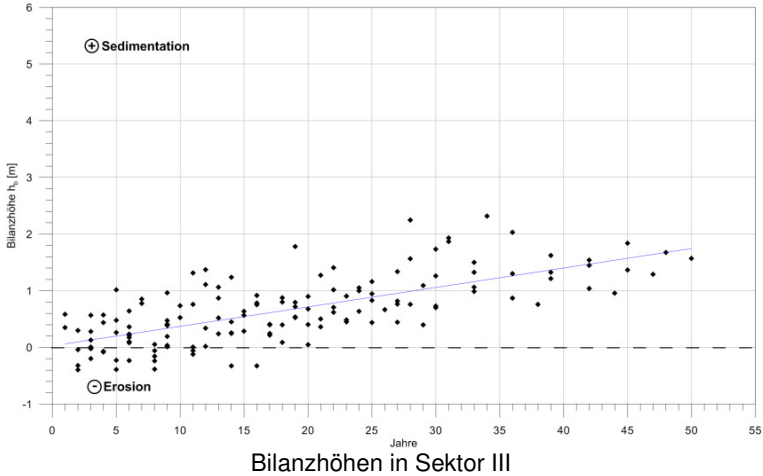
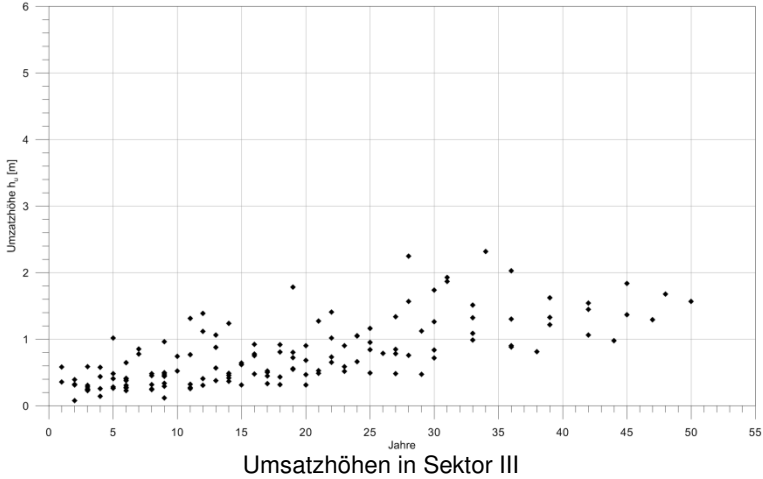
Umsatzhöhen in Sektor II

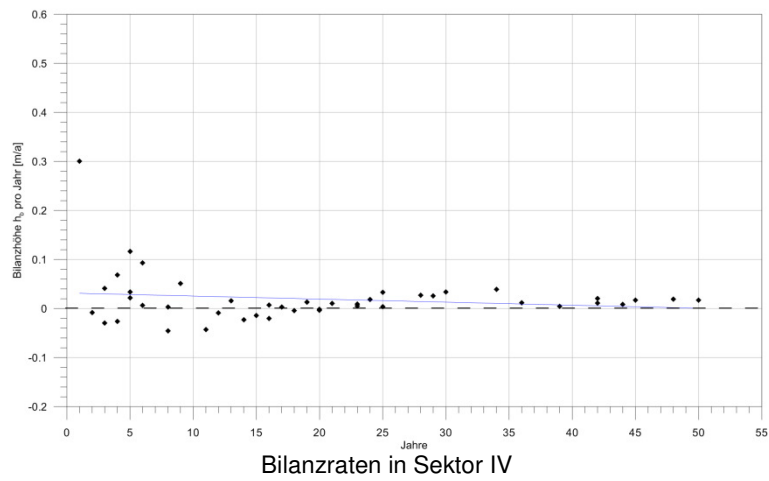
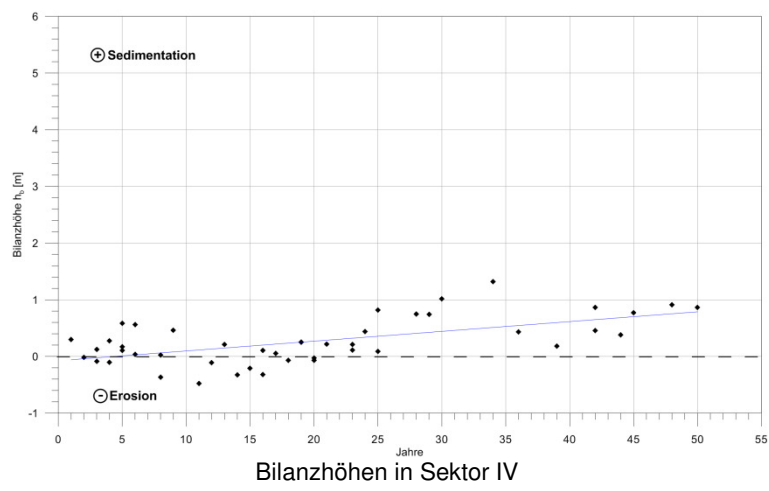
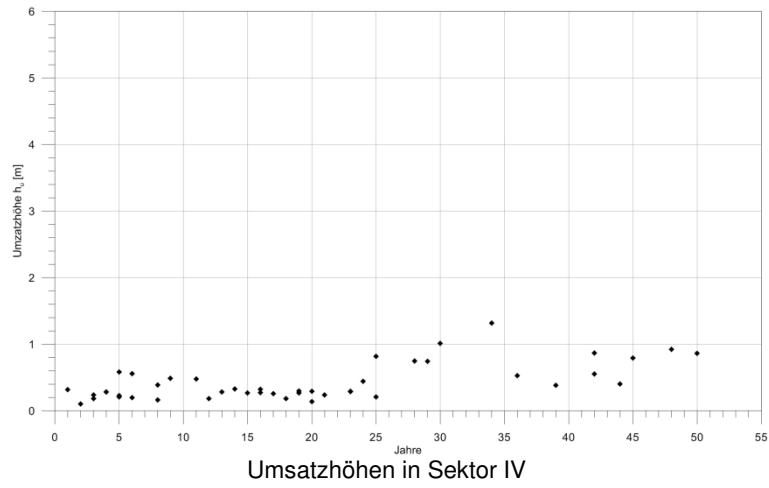


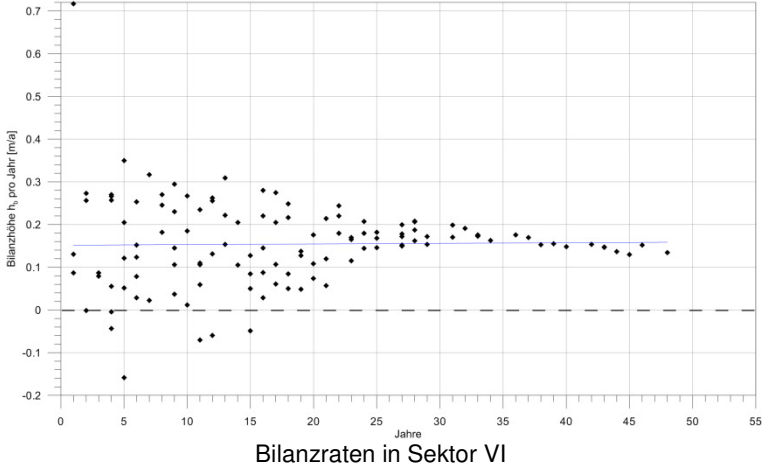
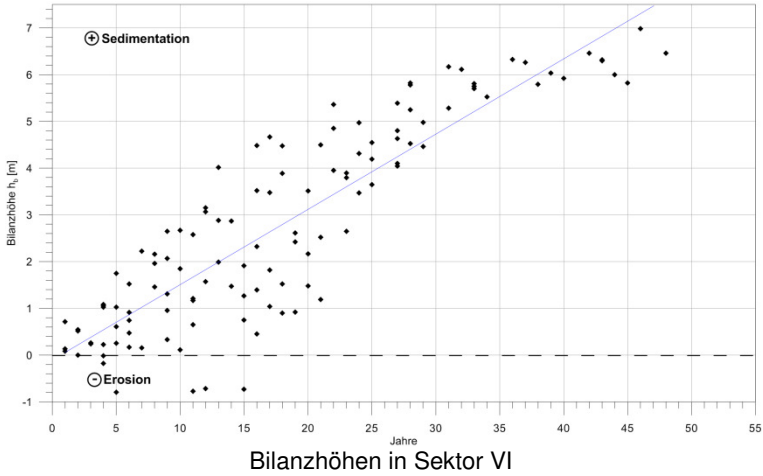
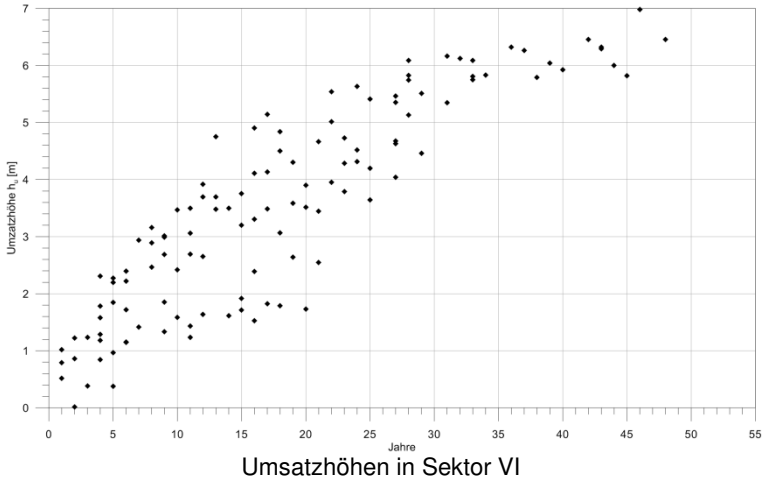
Bilanzhöhen in Sektor II

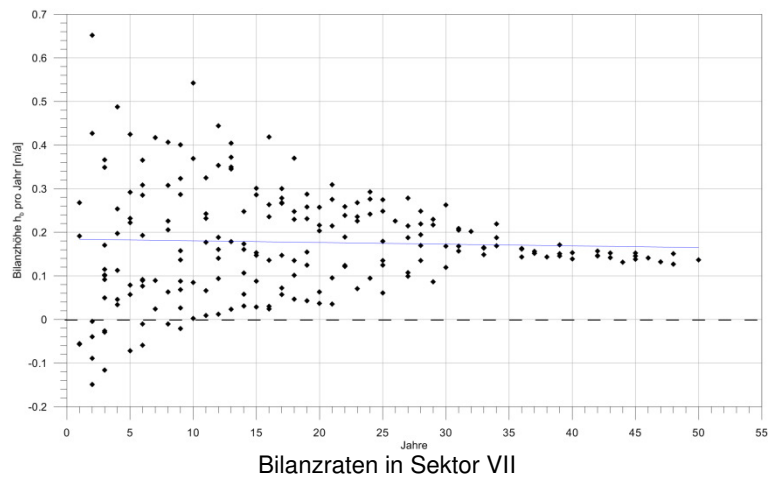
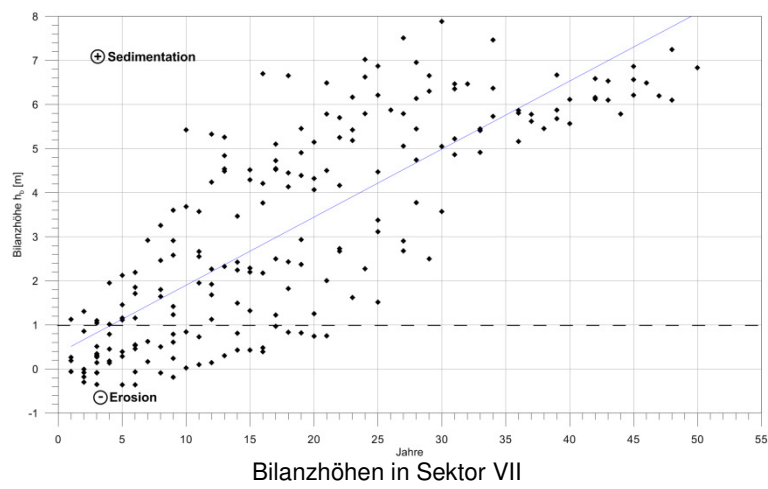
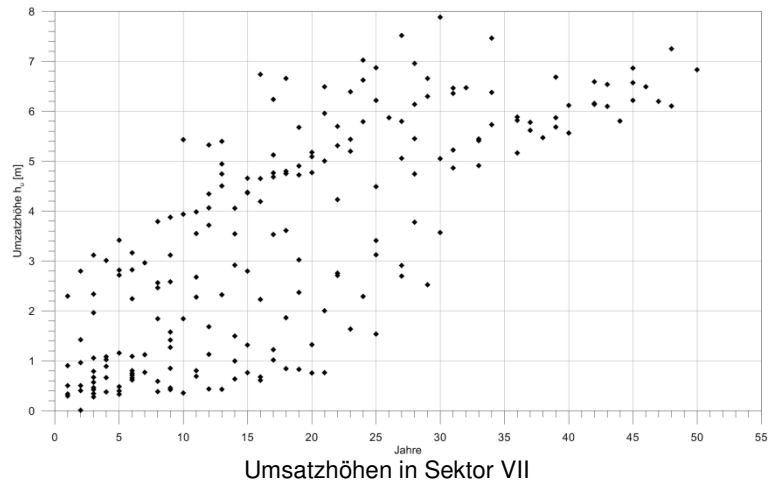


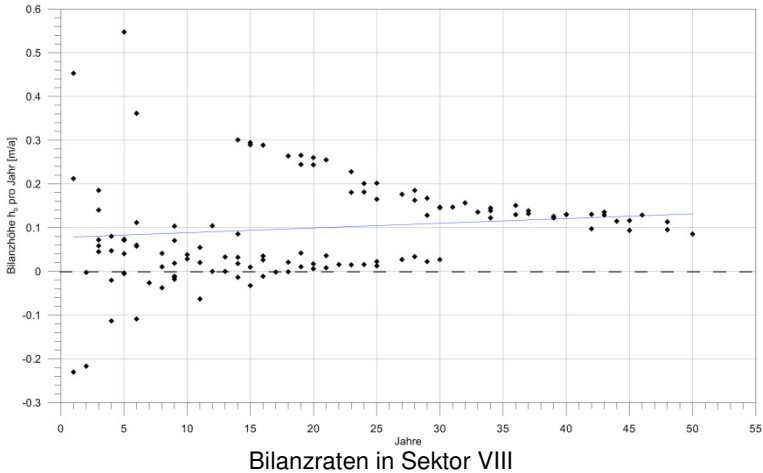
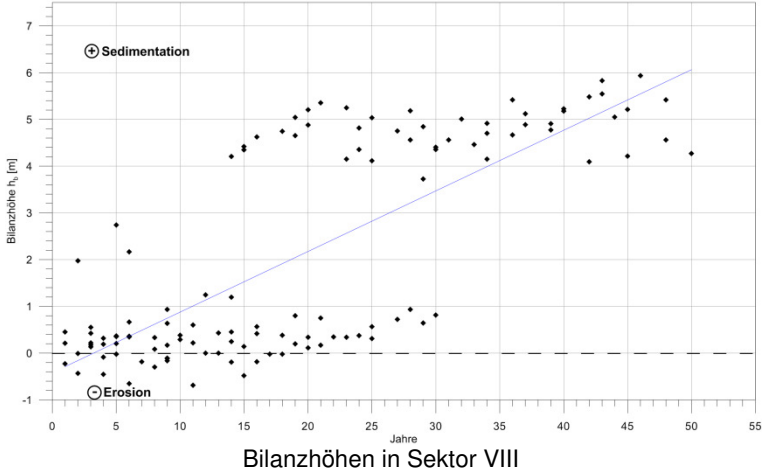
Bilanzraten in Sektor II



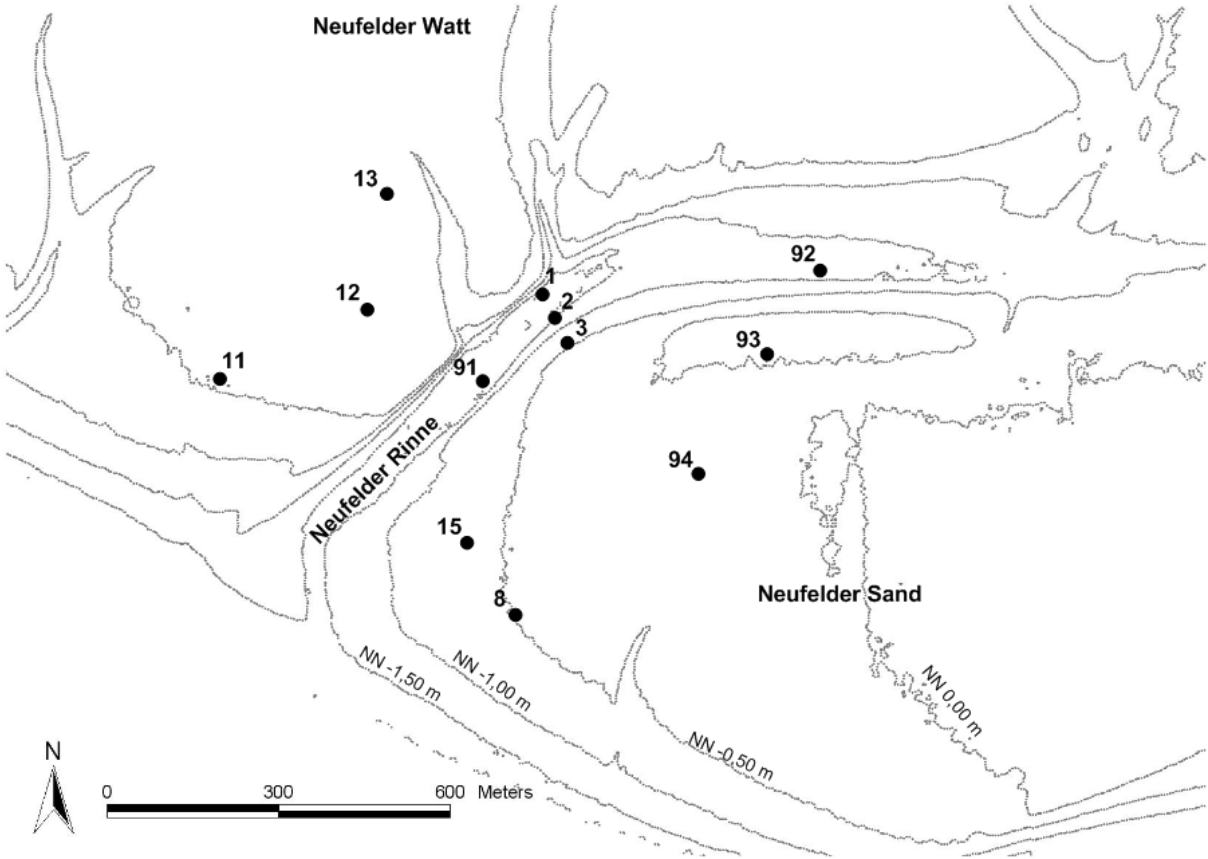




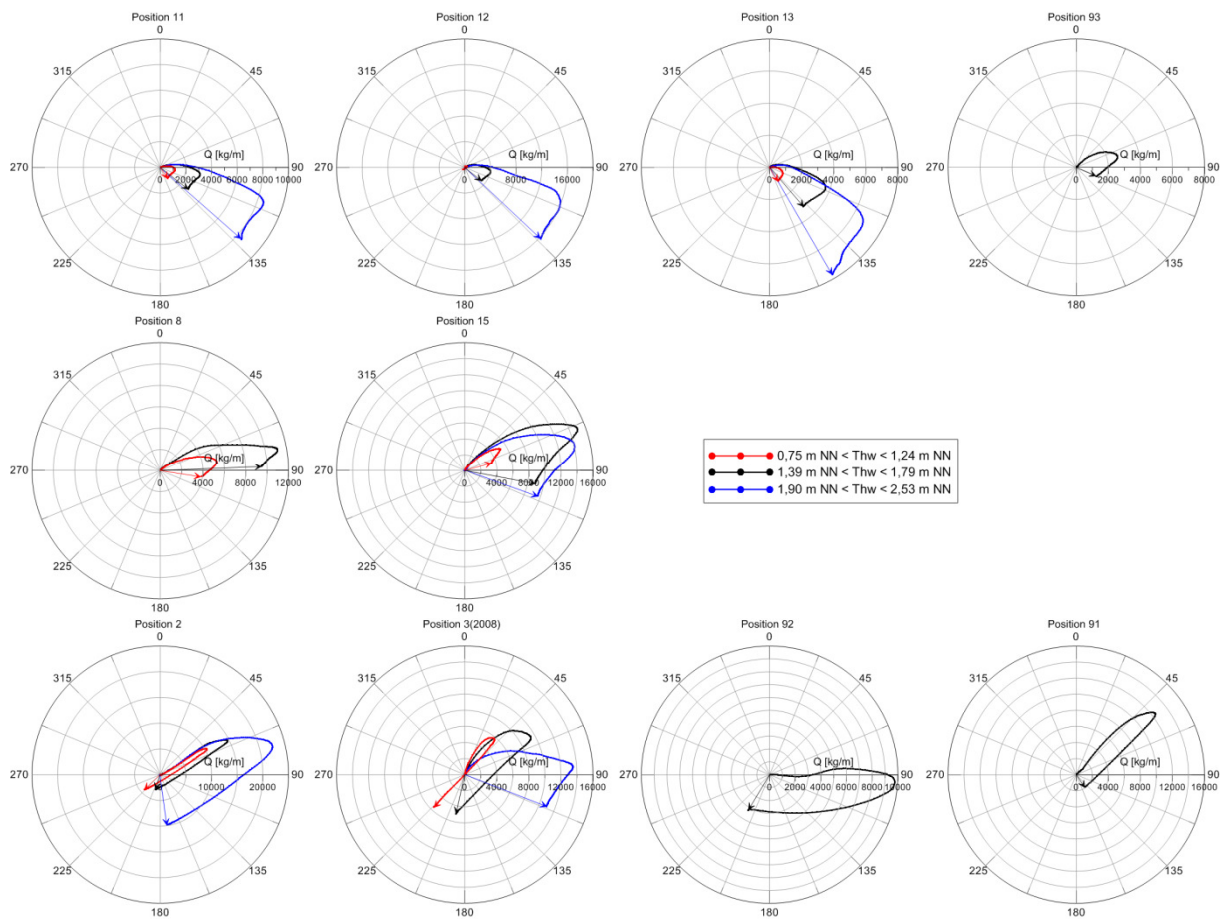




C Übersicht über die Messpositionen

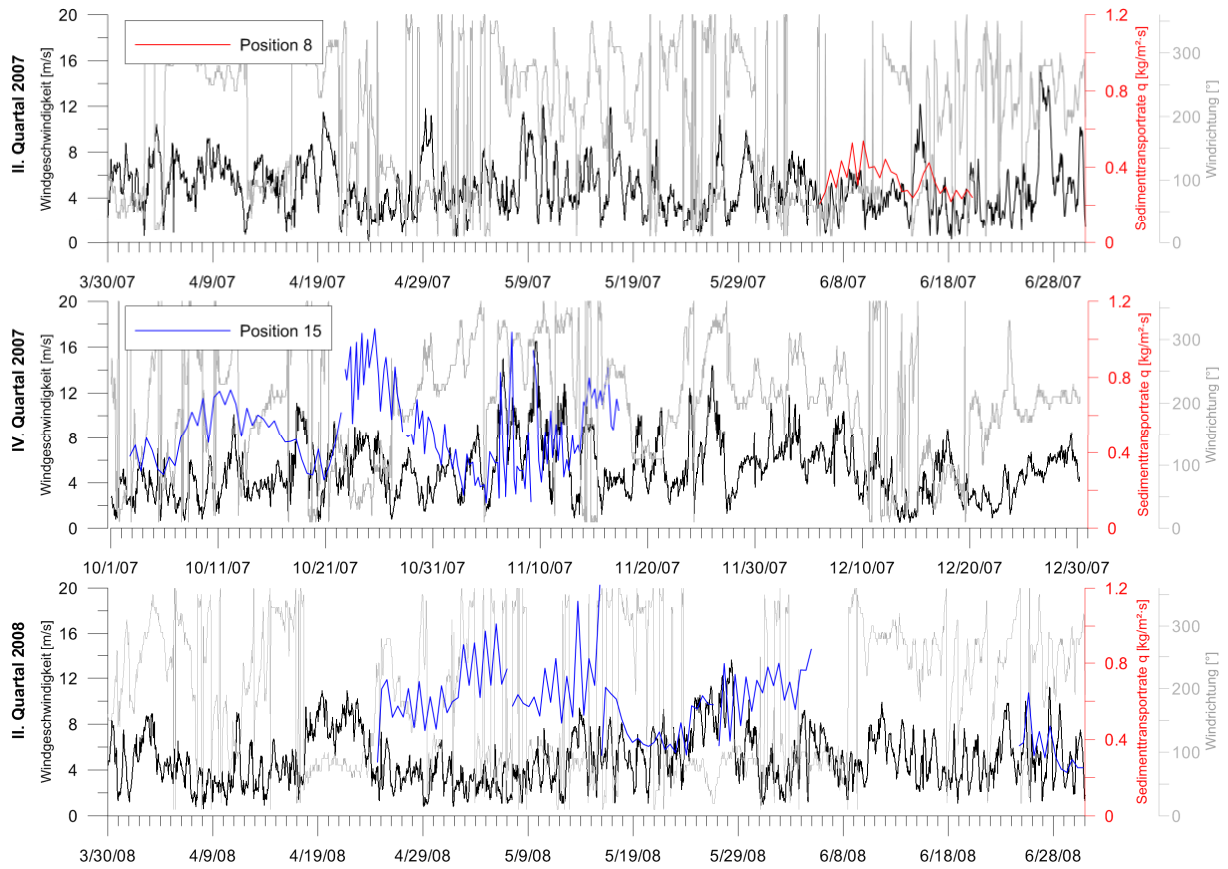


D Residualer Sedimenttransport

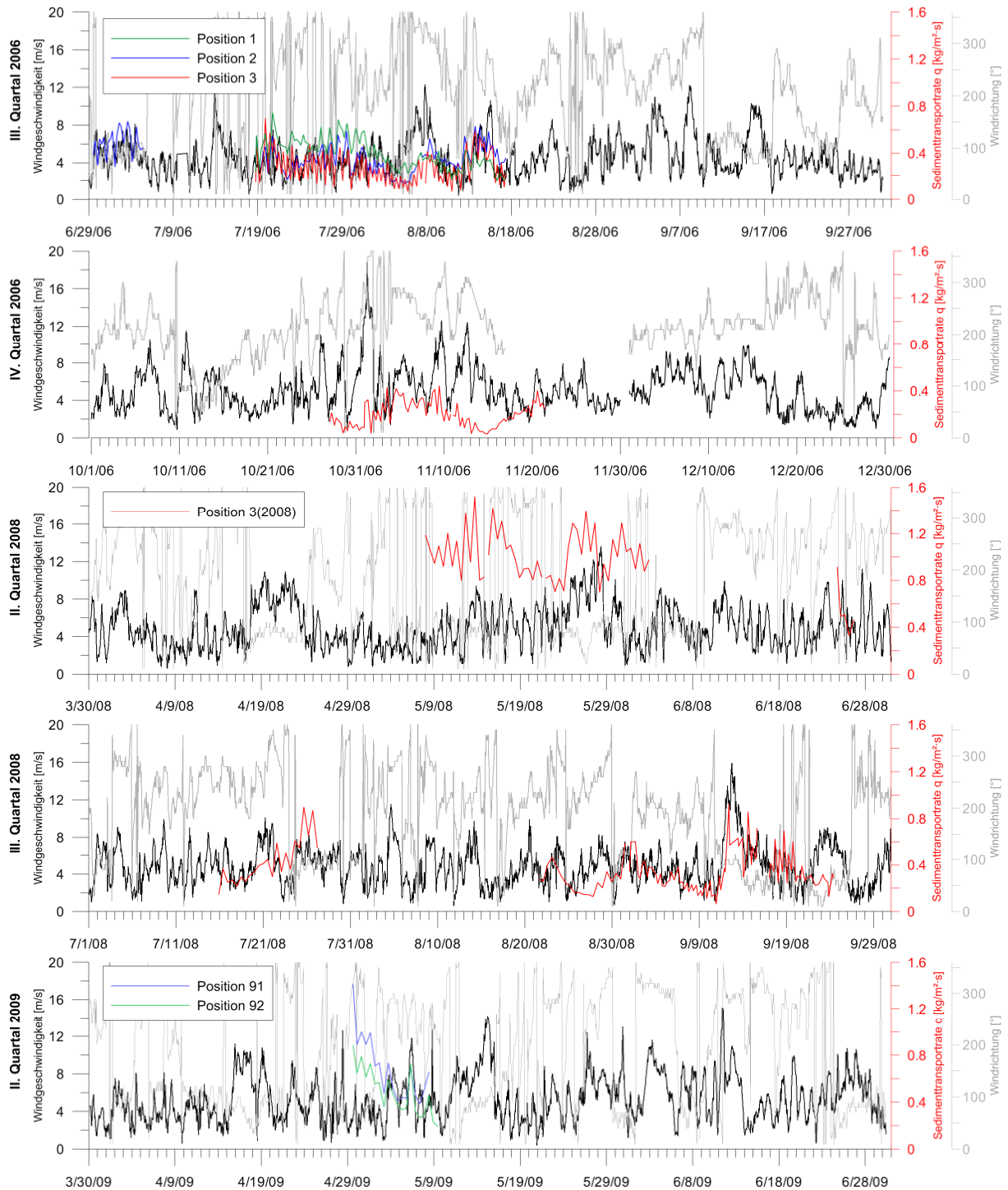


Residualer Sedimenttransport an den Messpositionen im Untersuchungsgebiet bei niedrigen Tiden, mittleren Tiden und erhöhten Tiden

E Sedimenttransportraten

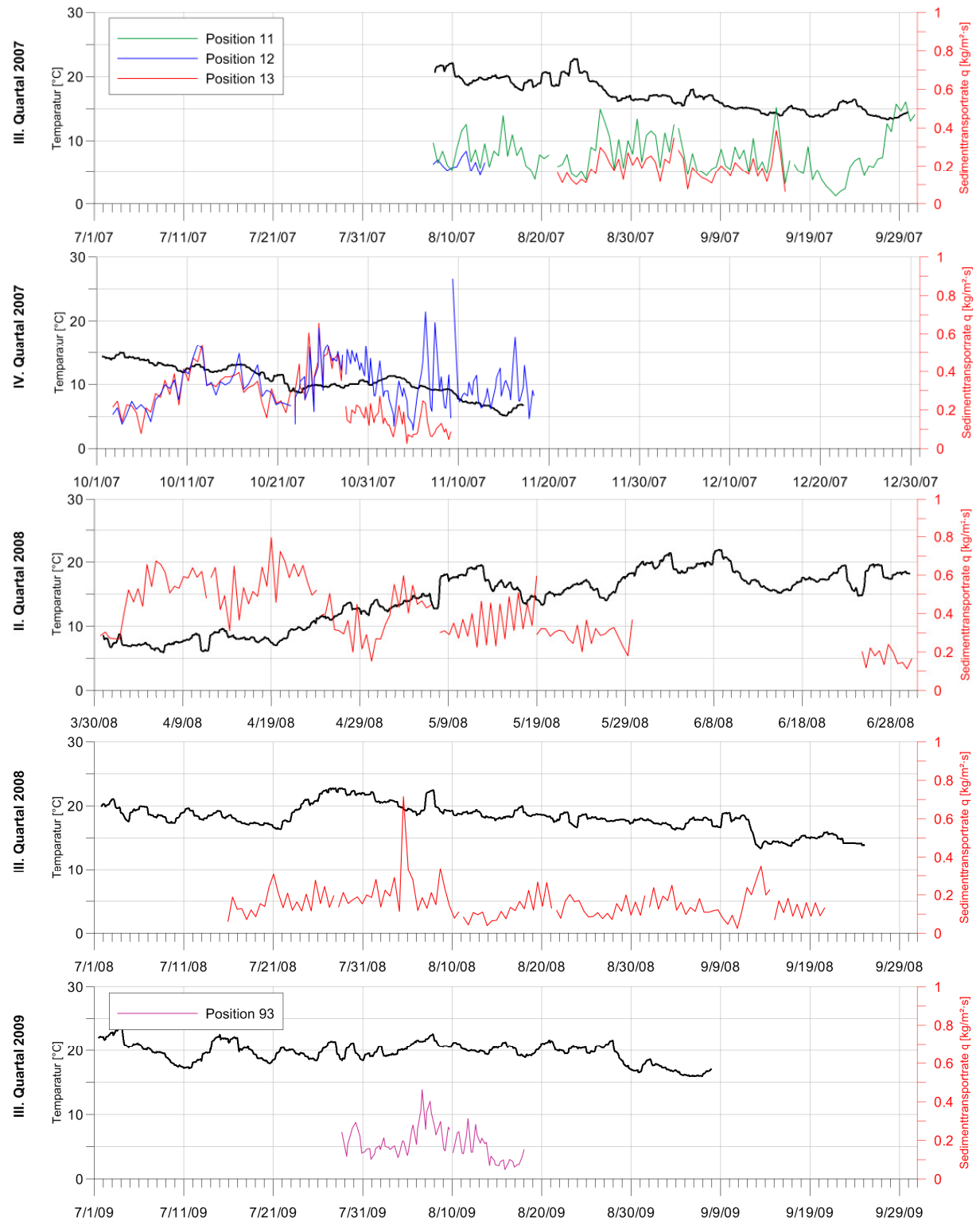


Tidegemittelte Sedimenttransportraten und Windparameter an den Positionen 8 und 15 über den gesamten Untersuchungszeitraum



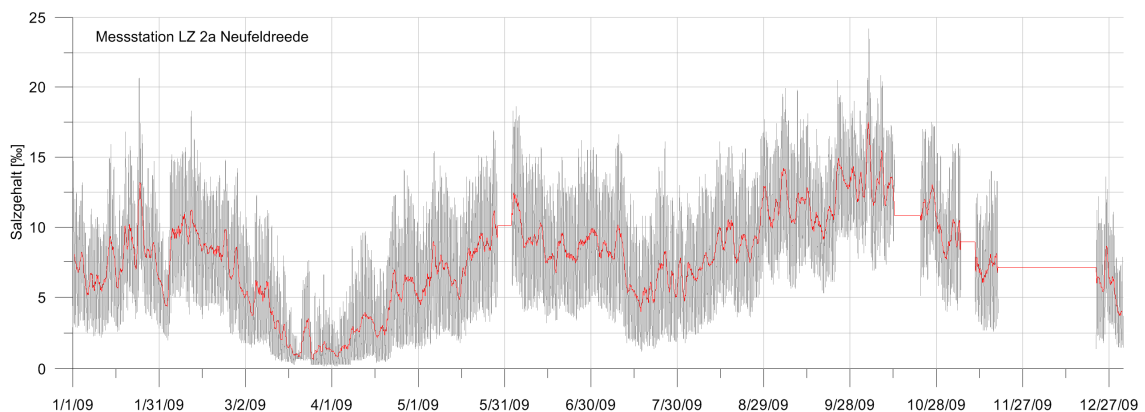
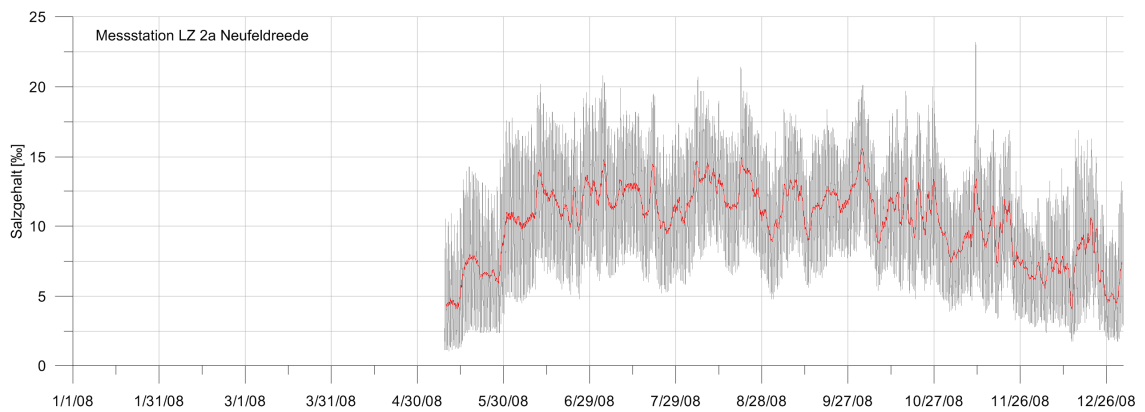
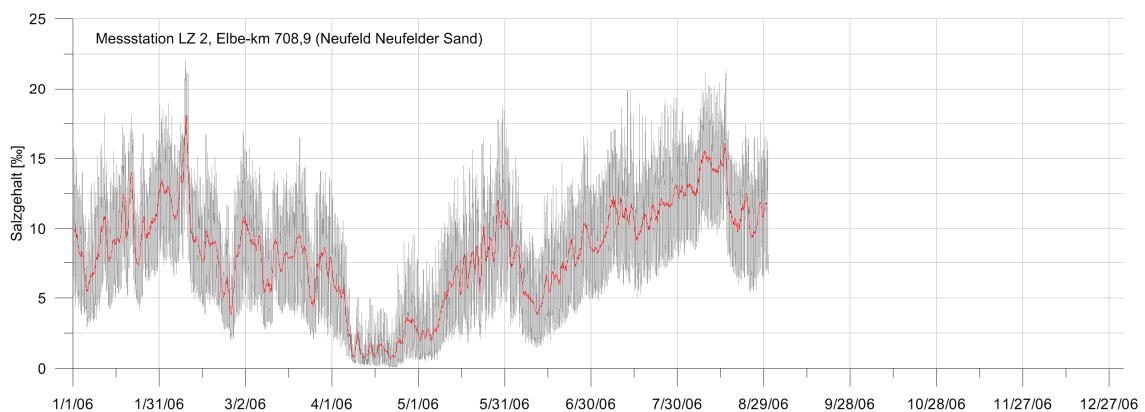
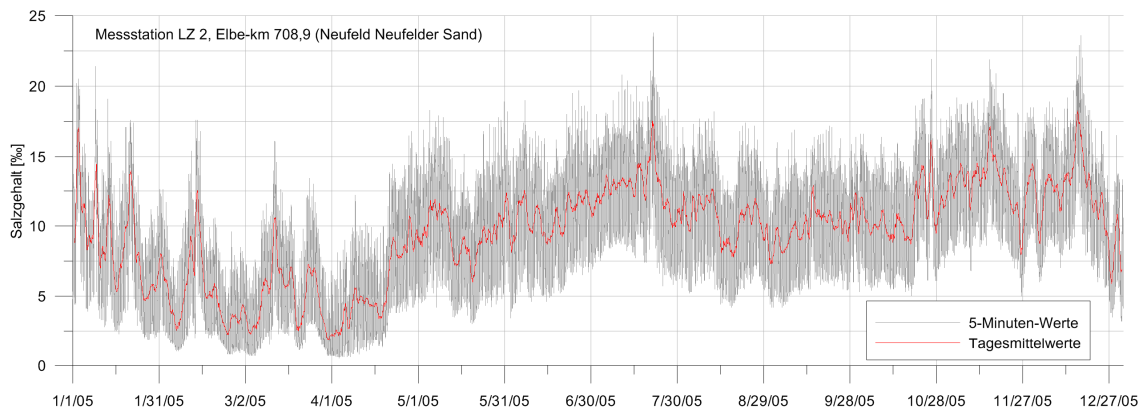
Tidegemittelte Sedimenttransportraten und Windparameter an den Positionen 1, 2, 3, 3 (2008), 91 und 92 über den gesamten Untersuchungszeitraum

F Einfluss von Temperatur



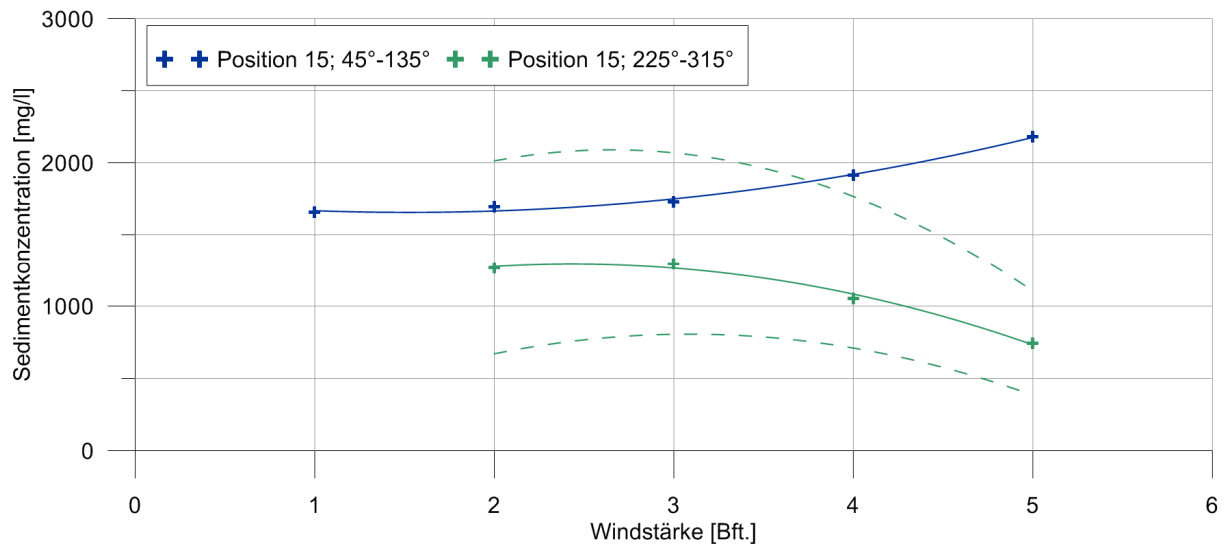
Wassertemperaturen (Tagesmittel) und tidegemittelte Sedimenttransportraten an den Positionen 11, 12, 13 und 93 über den gesamten Untersuchungszeitraum

G Einfluss von Salzgehalt

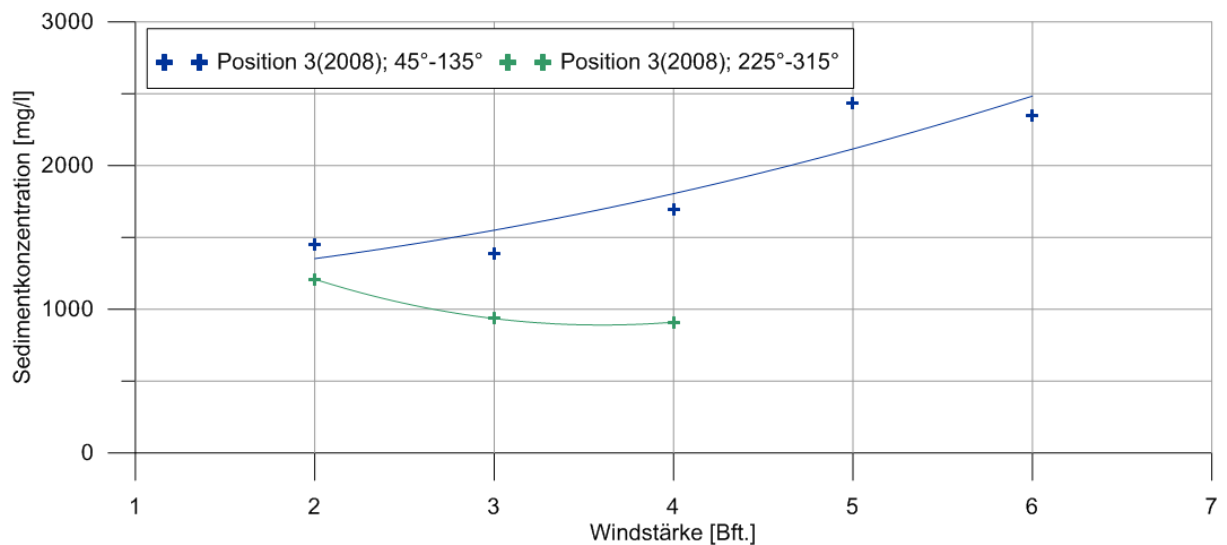


Salzgehalte an den Dauermessstationen LZ2 (Neufelder Sand) und LZ2a (Neufeldreede); 5-Minuten-Werte und Tagesmittelwerte; Datenherkunft: Beweissicherung Tidelbe (<http://www.portal-tidelbe.de>)

H Tiefengemittelte Sedimentkonzentrationen

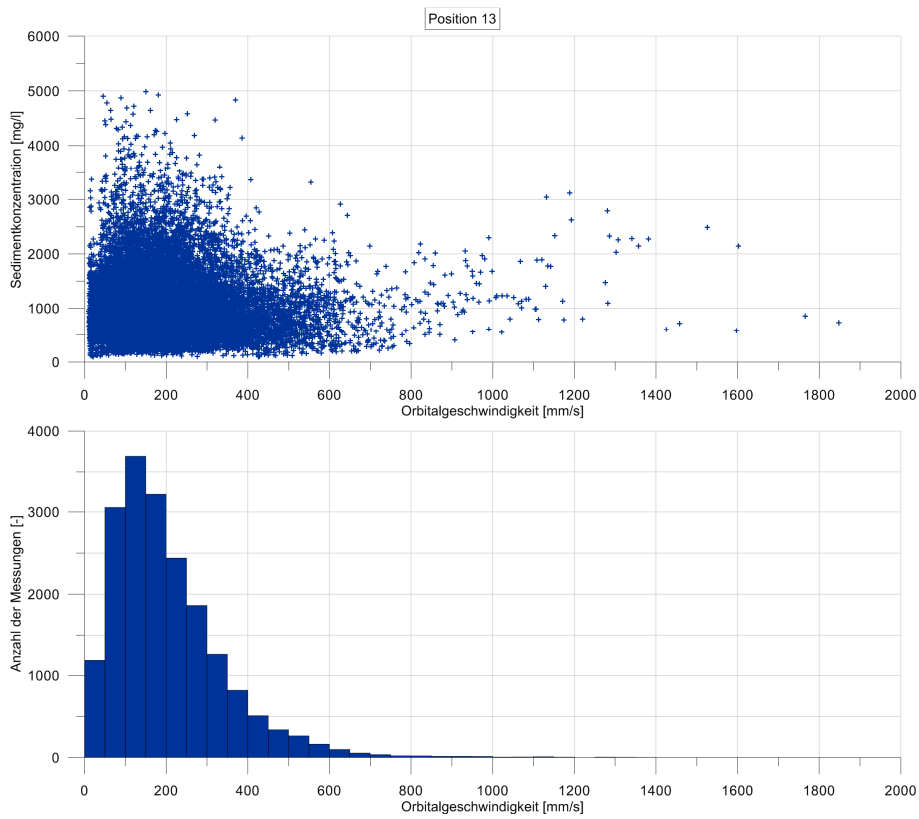


Veränderungen der Sedimentkonzentrationen mit der Windstärke; Mittelwerte (durchgezogene Linien), Maximal- und Minimalwerte (gestrichelte Linien) aller Messungen für verschiedene Windstärken an Position 15; Unterteilung nach Wind aus westlichen und östlichen Richtungen

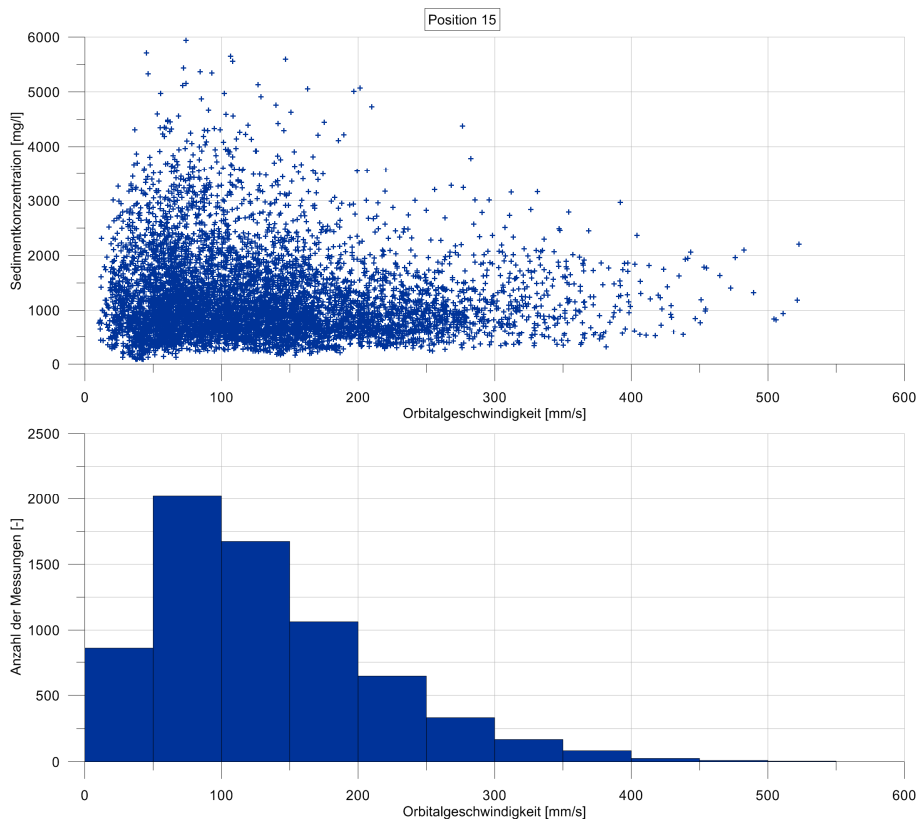


Veränderungen der Sedimentkonzentrationen mit der Windstärke; Mittelwerte (durchgezogene Linien), Maximal- und Minimalwerte (gestrichelte Linien) aller Messungen für verschiedene Windstärken an Position 3 (2008); Unterteilung nach Wind aus westlichen und östlichen Richtungen

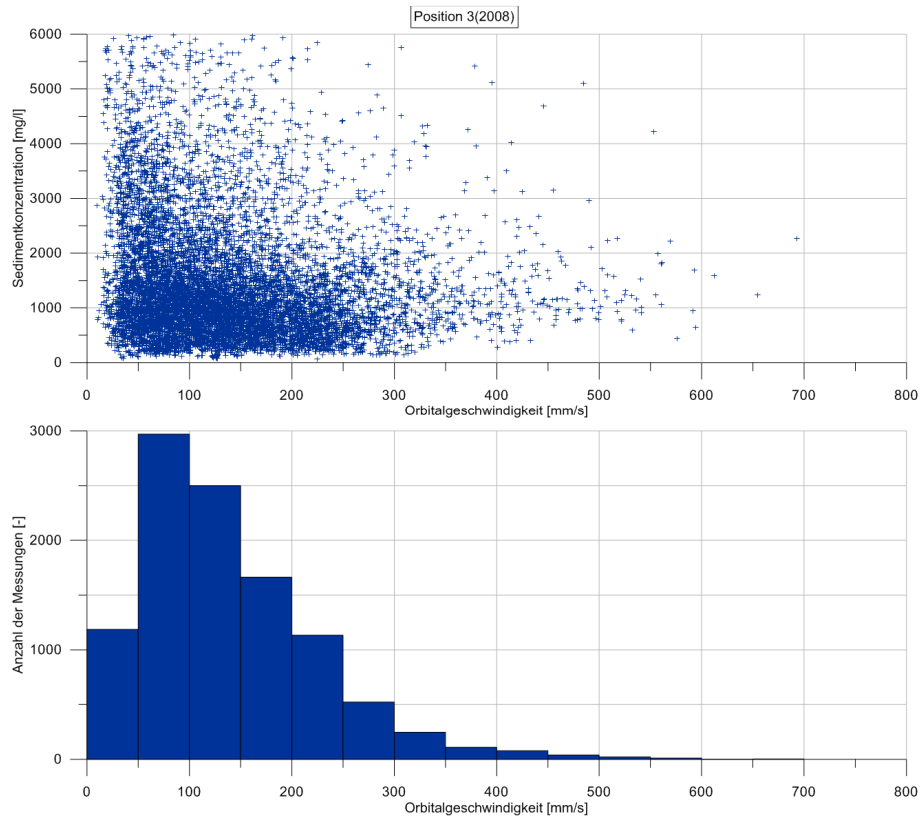
I Einfluss von Seegang auf die Sedimentkonzentration



Einfluss der sohnahen horizontalen Orbitalgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentrationen an Messposition 13



Einfluss der sohnahen horizontalen Orbitalgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentrationen an Messposition 15



Einfluss der sohnahen horizontalen Orbitalgeschwindigkeit auf die Sedimentkonzentrationen an Messposition 3 (2008)

J Transportgleichungen

a. Gesamttransport nach Ackers & White (1973)

aus BAYRAM ET AL. (2001)

$$q_{t,AW} = \bar{u} \cdot \frac{1}{1-p} \cdot d_{35} \cdot \left(\frac{\bar{u}}{v_c^*}\right)^n \cdot \frac{C_{D35}^*}{A^m} \cdot (F_C - A)^m \quad [\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}] \quad (\text{A1})$$

mit den Parametern:

$$p = 1 - \frac{\rho_{\text{trocken}}}{\rho_s} \quad [-] \quad (\text{A2})$$

$$v_c^* = \sqrt{\tau_{\text{crit}} \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \cdot g \cdot d_{50}} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{A3})$$

$$\tau_{\text{crit}} = (\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d_{50} \cdot \theta_{\text{crit}} \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{A4})$$

$$n = 1 - 0,2432 \cdot \ln(D_{35}^*) \quad [-] \quad (\text{A5})$$

$$\theta_{\text{crit}} = 0,24 \cdot \frac{1}{D^*} \quad [-] \quad (\text{A6})$$

$$D^* = \left[\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \cdot \frac{g}{v^2} \right]^{1/3} \cdot d_{50} \quad [-] \quad (\text{A7})$$

$$D_{35}^* = \left[\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \cdot \frac{g}{v^2} \right]^{1/3} \cdot d_{35} \quad [-] \quad (\text{A8})$$

$$C_{D35}^* = \exp(2,86 \cdot \ln(D_{35}^*) - 0,4343 \cdot (\ln(D_{35}^*))^2 - 8,128) \quad [-] \quad (\text{A9})$$

$$A = \frac{0,23}{\sqrt{D_{35}^*}} + 0,14 \quad [-] \quad (\text{A10})$$

$$m = \frac{9,66}{D^*} + 1,34 \quad [-] \quad (\text{A11})$$

$$F_C = \frac{\bar{u} \cdot \left(\frac{v_c^*}{\bar{u}}\right)^n \cdot C_D^n}{C_D \cdot g^{n/2} \cdot \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \cdot d_{50}}} \quad [-] \quad (\text{A12})$$

$$C_D = 18 \cdot \log\left(\frac{10 \cdot h}{d_{35}}\right) \quad [-] \quad (\text{A13})$$

Unter der Einwirkung von Wellen und Strömung verändert sich (A1) nach VAN DE GRAAFF & OVEREEM (1979) zu:

$$q_{t,AW,wc} = \bar{u} \cdot \frac{1}{1-p} \cdot d_{35} \cdot \left(\frac{v_{wc}}{v_{c,wc}^*}\right)^n \cdot \frac{C_{D35}^*}{A^m} \cdot (F_{C,wc} - A)^m \quad [\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}] \quad (\text{A14})$$

$$v_{wc} = \bar{u} \cdot \sqrt{1 + 0,5 \cdot \left(\xi' \cdot \frac{\hat{u}_0}{\bar{u}} \right)^2} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{A15})$$

$$v_{c,wc}^* = v_c^* \cdot \sqrt{1 + 0,5 \cdot \left(\xi \cdot \frac{\hat{u}_0}{\bar{u}} \right)^2} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{A16})$$

$$\xi = C \cdot \sqrt{\frac{f_w}{2 \cdot g}} \quad [-] \quad (\text{A17})$$

$$\xi' = C_D \cdot \sqrt{\frac{f'_w}{2 \cdot g}} \quad [-] \quad (\text{A18})$$

$$F_{C,wc} = \frac{v_{wc} \cdot \left(\frac{v_{c,wc}^*}{v_{wc}} \right)^n \cdot C_D^n}{C_D \cdot g^{n/2} \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \cdot d_{35}} \quad [-] \quad (\text{A19})$$

Annahme: $f_w = f'_w = 0,3$

f_w ist der Wellen-Reibungs-Faktor (wave friction factor), der auf dem Rauigkeitsbeiwert basiert.

C_D nach Gleichung (A13)

b. Gesamttransport nach Bailard & Inman bei Seegang (1981/84)

aus BAYRAM ET AL. (2001)

$$q_{t,BI} = \left(0,5 \cdot \rho \cdot f_w \cdot \hat{u}_0^3 \cdot \frac{e_b}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot \tan(\gamma)} \cdot \left(\frac{\delta_v}{2} + \delta_v^3 \right) \right) + \left(0,5 \cdot \rho \cdot f_w \cdot \hat{u}_0^4 \cdot \frac{e_s}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot w_s} \cdot \delta_v \cdot u_3^* \right) \quad [\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}] \quad (\text{A20})$$

mit den Parametern:

$$\delta_v = \frac{\bar{u}}{\hat{u}_0} \quad [-] \quad (\text{A21})$$

$$u_3^* = \frac{v_{wc}^*{}^3}{\hat{u}_0} \quad [-] \quad (\text{A22})$$

\hat{u}_0 = maximale Orbitalgeschwindigkeit in Sohlhöhe

$\tan(\gamma) = 0,63$

$v_{c,wc}^*$ nach Gleichung (A16)

c. Gesamttransport nach Watanabe (1992)

aus BAYRAM ET AL. (2001)

$$q_{t,Wa} = A \cdot \left(\frac{(\tau_{b,wc} - \tau_{crit}) \cdot \bar{u}}{\rho \cdot g} \right) \quad [m^3/m \cdot s] \quad (A23)$$

mit den Parametern:

$$A = \begin{cases} 0,5 & \text{regelmäßiger Seegang} \\ 2,0 & \text{unregelmäßiger Seegang} \end{cases} \quad [-] \quad (A24)$$

$$\tau_{b,wc} = \tau_b \left[1 + 0,5 \cdot \left(\xi \cdot \frac{\hat{u}_0}{\bar{u}} \right)^2 \right] \quad [N/m^2] \quad (A25)$$

d. Gesamttransport nach van Rijn (1993)

aus BAYRAM ET AL. (2001) und VAN RIJN (1993)

$$q_{b,VR} = 0,25 \cdot \gamma \cdot \rho_S \cdot d_{50} \cdot D_*^{-0,3} \cdot \sqrt{\frac{\tau'_{b,wc}}{\rho}} \left[\frac{\tau'_{b,wc} - \tau_{b,cr}}{\tau_{b,cr}} \right]^{1,5} \quad [m^3/m \cdot s] \quad (A26)$$

$$q_{s,VR} = c_a \cdot v_{wc} \cdot h \cdot F \cdot v_{wc} \cdot h \cdot c_a \quad [m^3/m \cdot s] \quad (A27)$$

mit den Parametern:

$$\gamma = 1 - \sqrt{\frac{H_s}{h}} \quad [-] \quad (A28)$$

$$\tau'_{b,wc} = \tau_R \left[1 + 0,5 \left(\xi \cdot \frac{\hat{u}_0}{v_m} \right)^2 \right] \quad [N/m^2] \quad (A29)$$

$$\tau_R = \rho \cdot g \cdot \left(\frac{v_m}{c'} \right)^2 \quad [N/m^2] \quad (A30)$$

$$C' = 18 \cdot \log \left(\frac{4 \cdot h}{d_{90}} \right) \quad [m^{0,5}/s] \quad (A31)$$

$$F = \frac{\left(\frac{a}{h} \right)^{Z'} - \left(\frac{a}{h} \right)^{1,2}}{\left(1 - \frac{a}{h} \right)^{Z'} \cdot (1,2 - Z')} \quad [-] \quad (A32)$$

für $0,01 \leq \frac{a}{h} \leq 0,1$ und $0,3 \leq Z' \leq 3$

$$Z' = \frac{w_s}{\beta \cdot \kappa \cdot u^*} + 2,5 \cdot \left(\frac{w_s}{u^*} \right)^{0,8} \cdot \left(\frac{c_a}{c_0} \right)^{0,4} \quad [-] \quad (A33)$$

$$c_a = 0,015 \cdot \frac{d_{50}}{a} \cdot \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,3}} \quad [-] \quad (A34)$$

$$u^* = \frac{\sqrt{g}}{c} \cdot v_m \quad [m/s] \quad (A35)$$

$a \approx k_s =$ obere Schichtgrenze des Geschiebetransportes [m]

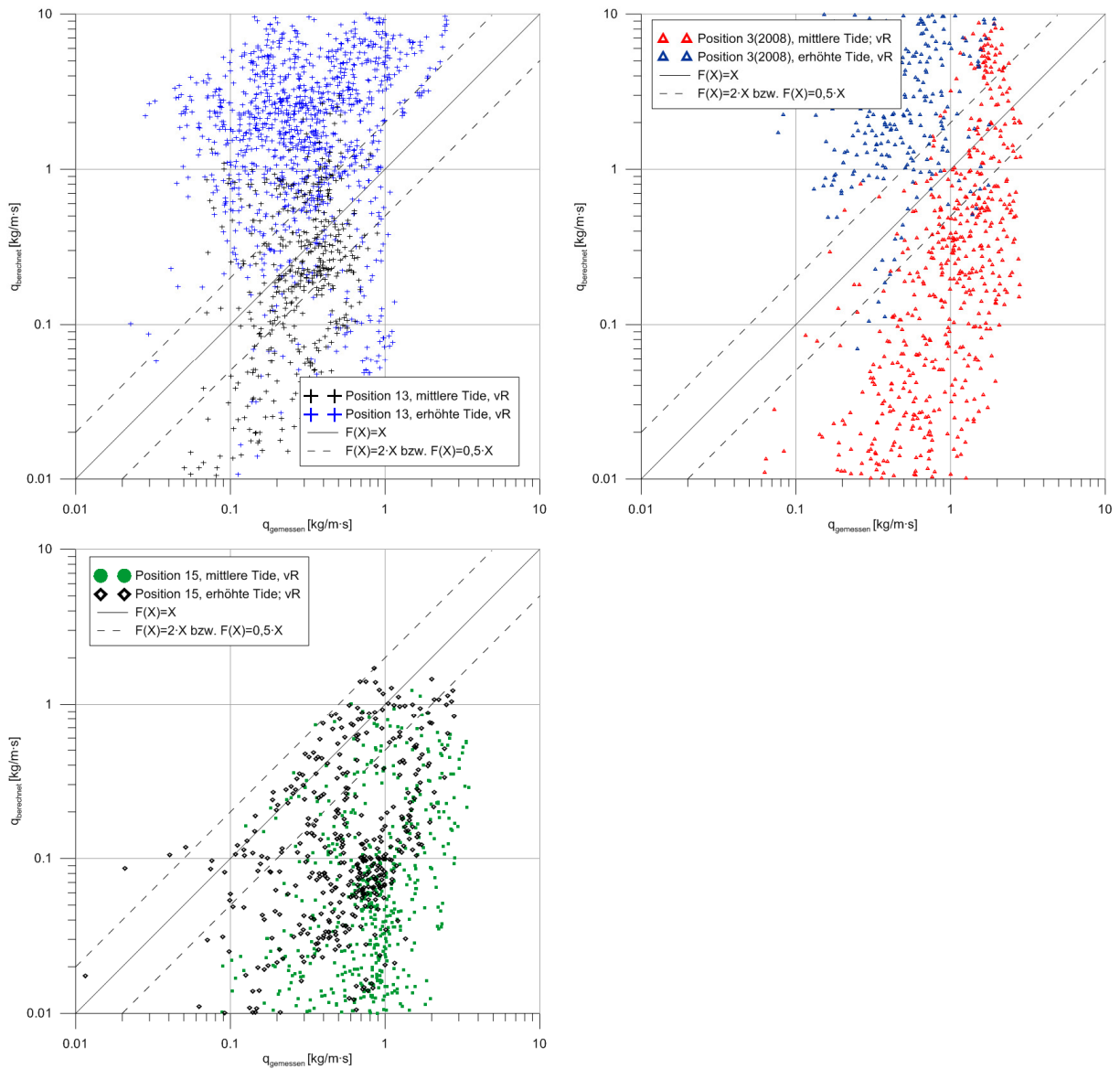
$c_0 = 0,65$ [-] maximale sohlnahe Sedimentkonzentration

e. Gesamttransport nach Engelund & Hansen (modifizierte Formel inkl. Seegang, 1967)

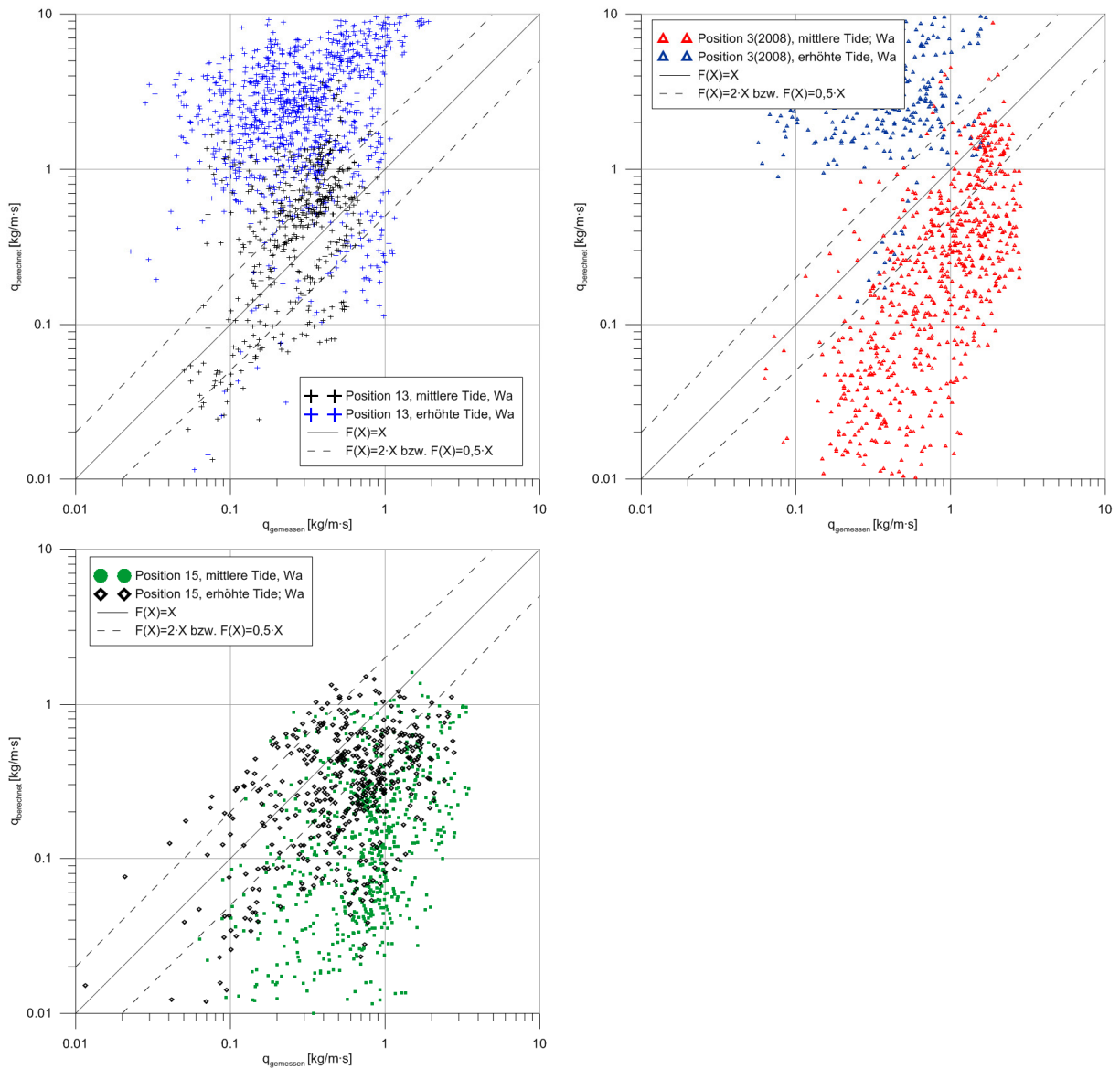
aus BAYRAM ET AL. (2001)

$$q_{t,EH} = v_m \cdot \frac{0,05 C \tau_{b,c}^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{\hat{u}_0}{v_m} \right)^2 \right]^2}{(s-1)^2 d_{s0} \rho^2 g^{5/2}} \quad [\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}] \quad (\text{A26})$$

K Bewertung von Berechnungsansätzen



Vergleich der gemessenen und der nach van Rijn berechneten Sedimenttransportraten für Einzelmessungen bei Tiden verschiedener Scheitelwasserstände für die Positionen 13, 3 (2008) und 15



Vergleich der gemessenen und der nach Watanabe berechneten Sedimenttransportraten für Einzelmessungen bei Tiden verschiedener Scheitelwasserstände für die Positionen 13, 3 (2008) und 15



ISBN 978-3-941492-43-1

TUHH
Technische Universität Hamburg-Harburg