

# STRÖMUNGSMESSUNGEN ZUR BESTIMMUNG DER SEDIMENTDYNAMIK

## IM JUISTER HAFEN

von

Knut Krämer<sup>1</sup>  
Anna Zorndt<sup>2</sup>  
Andreas Wurpts<sup>3</sup>  
Torsten Schlurmann<sup>4</sup>

### ABSTRACT

The new marina on the island of Juist is facing a detrimental sedimentation problem. To guarantee minimum depths for safe navigation, both dredging frequencies and amounts emerged to be far higher than anticipated. This study, funded by the Ministry of Economy, Labor and Transport in Lower Saxony, is focused on sediment dynamics in the harbor of Juist. A two-week punctual measurement complemented by two areal measuring campaigns was carried out in fall 2010. Flow velocities and sediment concentration were measured in order to identify the sediment transport mechanisms in the harbor and marina. In a follow-up study, various constructional approaches to the problem can be investigated numerically, using the parameters obtained in the field measurement campaigns.

### 1. EINLEITUNG

Der Hafen der Ostfriesischen Insel Juist kann wegen seiner geografischen Lage nur gezeitenabhängig von Fähren und Sportschiffen angefahren werden. Vor wenigen Jahren wurde an den Gemeindehafen ein neuer Yachthafen mit 150 Liegeplätzen für Sportschiffer angeschlossen. Die erforderlichen Wassertiefen werden durch regelmäßige Unterhaltungsbaggerungen sichergestellt. Während der ersten Betriebsjahre des Hafens zeigte sich jedoch, dass die Verschlickung deutlich stärker ausfällt als bei der Planung der Anlage erwartet.

Im Rahmen einer vom Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr geförderten Studie wurden die Mechanismen des Sedimenteintrags in den Yachthafen mittels hydro- und sedimentdynamischen Messungen untersucht.

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [kraemer@fi.uni-hannover.de](mailto:kraemer@fi.uni-hannover.de)

<sup>2</sup> Dipl.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [zorndt@fi.uni-hannover.de](mailto:zorndt@fi.uni-hannover.de)

<sup>3</sup> Dr.-Ing., NLWKN, An der Mühle 5, 26548 Norderney, [wurpts@fi.uni-hannover.de](mailto:wurpts@fi.uni-hannover.de)

<sup>4</sup> Prof. Dr.-Ing., Franzius-Institut, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover, [schlurmann@fi.uni-hannover.de](mailto:schlurmann@fi.uni-hannover.de)

Zunächst wurden in einer zweiwöchigen Dauermessung im Einfahrtsbereich des Hafens Wasserspiegellage, Sedimentkonzentration sowie Strömungsgeschwindigkeit aufgezeichnet. Auf dieser Grundlage wurde eine näherungsweise Quantifizierung von Sedimenteinträgen in den Yachthafen durchgeführt. Die punktuelle Messung wurde durch zwei Messkampagnen zur Spring- und Nipptide ergänzt, in denen flächendeckend Geschwindigkeiten aufgezeichnet wurden. Dazu wurde zum einen ein neuartiges am Franzius-Institut entwickeltes GPS-gestütztes Schwimmersystem eingesetzt, welches die Messung windunabhängiger Strömungsgeschwindigkeiten im oberen Bereich der Wassersäule erlaubt. Zum anderen wurden mithilfe des Messbootes „OTTO F“ Geschwindigkeitsmessungen mittels ADCP durchgeführt.

Die Analyse der Messdaten stellt eine Grundlage für die Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung der Auflandungsraten im Yachthafen dar. Unterschiedliche konstruktive Maßnahmen können so in einer Folgestudie mittels hydrodynamisch-numerischer Modellierung auf ihre Wirksamkeit untersucht werden

## 2. METHODEN

### 2.1 Dauermessung

Um die Beeinflussung der hydro- und sedimentdynamischen Vorgänge durch den Spring-Nipp-Zyklus erfassen zu können, wurde im Bereich der Yachthafeneinfahrt eine Dauermesseinrichtung installiert. Über einen Zeitraum von zwei Wochen wurden hier Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und -Richtung sowie Konzentration der suspendierten Sedimente gemessen. Der Geräteträger mit den Messinstrumenten wurde am nördlichen Ende der Hafeneinfahrt an einem Holzdalben angebracht, so dass die Instrumente etwa 1,5 m in die Einfahrt hineinragten. Um die Messeinrichtung vor Beschädigung durch Schiffsanprall zu schützen, wurde oberhalb des Wasserspiegels eine Beschilderung angebracht.

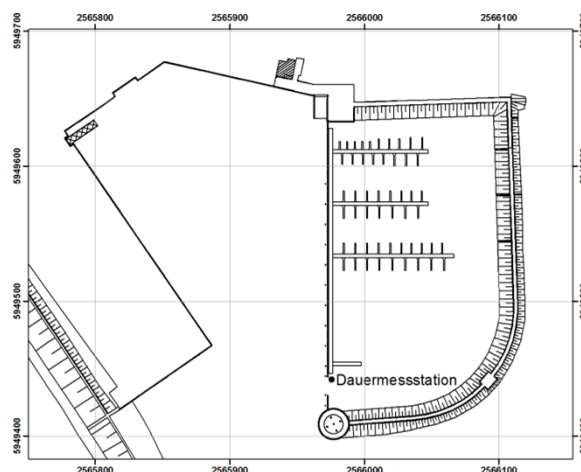


Abbildung 1: Übersicht des Juister Hafens sowie Lage der Dauermessstation an der Einfahrt zum Yachthafen.

Die Messung des Wasserstandes  $h$  [m] erfolgte mittels einer Druckdose vom Typ PDCR 810 des Herstellers GE Sensing mit einem Messbereich von  $\pm 10$  m, welche 14 cm unterhalb des mittleren Tideniedrigwasserstandes von -1,24 mNN angeordnet wurde.

Zur Messung von Strömungsgeschwindigkeit und Richtung  $\vec{u}$  [m/s] wurde eine elektromagnetische Strömungsmesssonde (Electromagnetic Current Meter - ECM) der Norddeutschen Seekabelwerke GmbH mit einem Messbereich von  $\pm 1$  m/s verwendet. Die Konzentration der suspendierten Sedimente  $ssc$  [kg/m<sup>3</sup>] wurde mithilfe zweier optischer Trübungssonden (Optical Backscatter Sensor - OBS) des Herstellers Campbell Scientific vom Typ OBS 3+ in zwei Horizonten bei -0,44 mNN sowie -1,44 mNN gemessen. Das auf Reflexion des vom Sensor ausgesandten Infrarotlichts basierende Messverfahren erfordert eine Kalibrierung mit dem am Messort vorgefundenen Sediment. Daher wurden innerhalb des Messzeitraumes zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Tide Wasserproben an den Sonden entnommen und im Labor auf die Sedimentzusammensetzung und deren Reflexionseigenschaften untersucht. Die von den Sensoren der Dauermessstation erfassten Daten wurden nach der analog-digitalen Wandlung mit einer Rate von 1 Hz von einem Datenlogger gespeichert.

## 2.2 Schwimmermessungen

Zur flächigen Darstellung des Strömungsfeldes eignen sich mit Schwimmern aufgezeichnete Strombahnen. Im Rahmen der Messungen im Juister Hafen kam hierzu ein am Franzius-Institut entwickeltes GPS-gestütztes Schwimmersystem zum Einsatz. Die Schwimmer bestehen aus einem zylindrischen Körper, an dessen Oberseite ein L1-Empfänger des Typs ublox AEK-4 der Firma Antaris angebracht ist. Weiterhin verfügen sie über eine Stromversorgung und eine Kontroll- und Speichereinheit sowie ein Stroboskoplicht zur Warnung der Schifffahrt. Die gesamte Bauhöhe eines Schwimmers beträgt ca. 1,5 m, davon sind oberhalb der Wasserlinie jedoch lediglich etwa 30 cm sichtbar. Zudem verjüngt sich der Querschnitt hier von 20 cm auf 10 cm. Somit ist die Beeinflussung durch Wind auf ein Minimum reduziert und der Schwimmer folgt der Strömung im oberen Bereich der Wassersäule. Der niedrige Schwerpunkt sorgt zudem für eine stabile Schwimmlage und macht den Schwimmer unempfindlich gegenüber einer Anregung durch winderzeugte Kapillarwellen.

Die Ermittlung der Schwimmergeschwindigkeit kann auf zweierlei Art erfolgen. Zum einen können die von der Signalprozessierungseinheit des Empfängers aus der Dopplerverschiebung der Trägerphase des L1-Signals ermittelten Geschwindigkeiten direkt ausgelesen werden. Zum anderen lassen sich aus den Verschiebungsvektoren der Schwimmerpositionen und der Datenaufzeichnungsrate die Geschwindigkeiten der Schwimmers ableiten.

## 2.3 Bootsgestützte Messungen

Neben den Schwimmermessungen wurde zu flächendeckenden Geschwindigkeitsmessung außerdem ein bootsgestütztes Breitband-ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), Modell 'Rio Grande' der Firma Teledyne RD Instruments eingesetzt. Zur absoluten Positionsbestimmung des Messbootes kommt ein echtzeit-kinematisches differentielles GPS System bestehend aus zwei geodätischen GPS- Empfängern Trimble 4700 (Basisstation) und Trimble 5700 (Rover) mit VHF-Link für Echtzeitkommunikation zum Einsatz. Die Bestimmung der Ausrichtung des Bootes bzw. des Sensors in der Messebene erfolgt redundant durch die Auswertung des internen Fluxgate-Kompasses des ADCP, eines externen Kreisel systems (Gyro) sowie eines weiteren externen Fluxgate-Kompasses. Die ADCP-Ensembles werden mit 2,5 Hz aufgezeichnet, dGPS Positionen mit 1 Hz. Das ADCP wurde in einem Modus betrieben, der für den Einsatz in Gebieten mit geringen Wassertiefen und niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten konzipiert ist. Systembedingt können jedoch etwa 1,5 m unterhalb der Memb-

ranen des ADCP und etwa 50 cm über der Gewässersohle keine Geschwindigkeiten ermittelt werden. Die Geschwindigkeitsmessungen des ADCP, die als über die Wassertiefe gemittelte Werte dargestellt werden, bilden damit einen anderen Bereich ab, als die vom zuvor beschriebenen Schwimmersystem erfasste, oberflächennahe Schicht und sind daher in Ergänzung zu den Schwimmermessungen zu sehen.

Neben den Geschwindigkeitsmessungen wurden vom Messboot aus regelmäßige vertikale Profile mit einer Multisonde aufgezeichnet, die neben einem Drucksensor für die Tiefenzuordnung über Trübungs- und Dichtesensoren sowie über Sensorik zur Aufzeichnung der Leitfähigkeit und Wassertemperatur verfügt.

### 3. AUSWERTUNG

#### 3.1 Dauermessung

Während des Betriebs der Dauermessstation wurden insgesamt 71 Tidezyklen erfasst. Hier von entfallen 19 Zyklen auf Springtideereignisse und 20 Tiden auf Nipptide-Ereignisse. Die übrigen 32 Tiden sind der mittleren Gezeit zuzurechnen. Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Tidephasen zeigen sich deutliche Unterschiede in der Dauer der Flut- und Ebbstromphasen sowie im Tidenhub. Der mittlere Tidenhub der Springtiden beträgt 2,84 m. Die Flutstromdauer ist hier im Mittel mit 4 h 50 min deutlich kürzer als die Ebbstromdauer mit 7 h 34 min. Für die Nipptide-Ereignisse ist die Tidesymmetrie bei einer mittleren Flutstromdauer von 5 h 42 min und einer Ebbstromdauer von 6 h 42 min deutlich weniger ausgeprägt. Auch der mittlere Tidenhub ist hier mit 2,07 m deutlich geringer. Die Flutstromdauer beträgt hier 5 h 9 min, die Ebbstromdauer 7 h 16 min. Für die Darstellung der Ergebnisse der Dauermessungen wurden drei repräsentative Tidezyklen für eine Spring- und Nipptide sowie eine Tide der mittleren Gezeit ausgewählt. Für diese Zeiträume wurden die Messungen des Wasserstandes und der Sedimentkonzentration bezüglich einer Bilanzierung der ein- und ausströmenden Wassermengen und der darin transportierten Sedimentfracht ausgewertet.

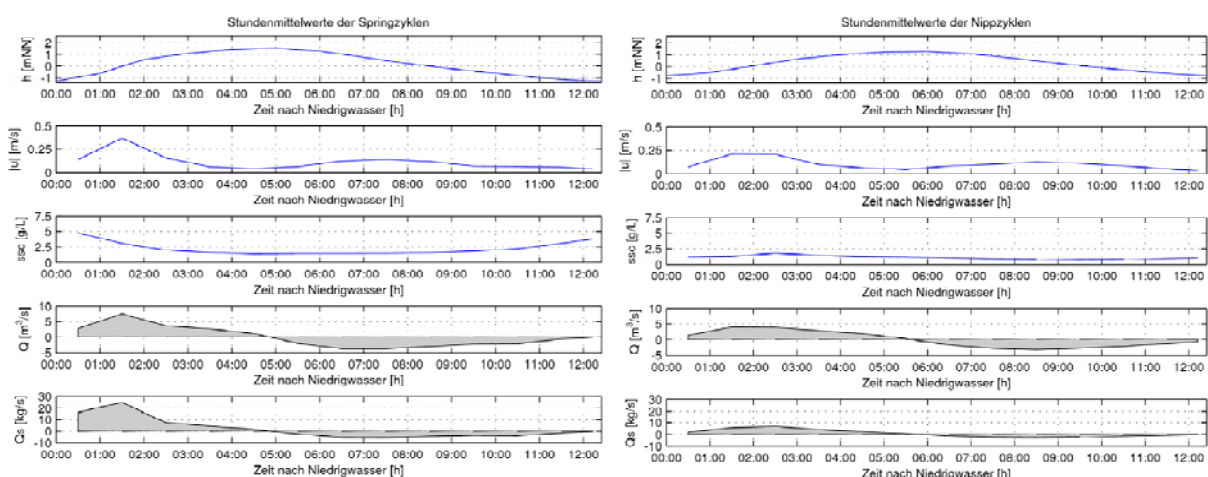


Abbildung 2: Stundenmittelwerte der gemessenen und abgeleiteten Parameter der Dauermessstation. Links für einen charakteristischen Springtidezyklus, rechts für einen charakteristischen Ebbtidezyklus

Der Flutstrom der mittleren Springflut kann in eine erste Phase mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserspiegelanstieg jedoch hohen Konzentrationsgradienten, eine Phase des schnellen Einströmens und zwei Phasen mit zum Tidehochwasser hin abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten bei abnehmender Sedimentkonzentration unterteilt werden. Der Ebbstrom lässt sich mit einem nahezu konstant bleibendem Ausstrom, gepaart mit niedrigen Sedimentkonzentrationen beschreiben. Der Verlauf eines typischen Nipptide-Zyklus stellt sich aufgrund der weniger stark ausgeprägten Tideasymmetrie und des geringeren Tidenhubs deutlich gleichmäßiger dar als der charakteristische Springtidezyklus. Strömungsgeschwindigkeit und Sedimentkonzentration sind innerhalb der ersten Hälfte des Flutstromes niedrig und steigen bis zum Tidehochwasser nur leicht an. Die Ebbphase ist wiederum von konstanten und niedrigen Sedimentkonzentrationen und Strömungsgeschwindigkeiten geprägt. Stündlich gemittelte Werte des Wasserstandes, der Strömungsgeschwindigkeit sowie des Konzentration suspendierten Sediments und der daraus berechnete Volumenstrom des Wassers und der Massenstrom des suspendierten Sediments für einen typischen Spring- und Nipptidezyklus können Abbildung 2 entnommen werden.

Die zeitliche Integration des Massenstroms des suspendierten Sediments kann für eine qualitative Abschätzung der Verteilung des Sedimenteintrags über den Tidezyklus herangezogen werden. Über einen einzelnen Tidezyklus ergibt sich grundsätzlich ein Nettosedimenteintrag in das Yachthafenbecken. Im Mittel ergibt sich über einen 14-tägigen Spring-Nipp-Zyklus ein Eintrag von etwa 70.000 kg pro Tidezyklus. Dabei zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Nipptide-Zyklen mit einem Eintrag von etwa 30.000 kg und Springtidezyklen mit einem Eintrag von etwa 90.000 kg. Mit einer mittleren Eintragsmenge von 70.000 kg und einer geschätzten Trockenrohdichte des Sediments von 2.300 kg/m<sup>3</sup> und einer Porosität von 0,3 ergibt sich verteilt auf die Fläche des Yachthafens die Dicke der abgelagerten Schicht zu etwa 1,5 mm pro Tidezyklus. Dies stimmt mit der Größenordnung der aus zwei im Abstand von 104 Tagen durchgeführten Peilungen ermittelten mittleren Ablagerung von 0,7 mm pro Tidezyklus überein. Die Überschätzung der Sedimenteintragsmenge wird auf die Annahme der Messwerte für den gesamten Füllquerschnitt sowie den relativ kurzen Beobachtungszeitraum von 14 Tagen zurückgeführt.

### **3.2 Schwimmermessungen und bootsgestützte Messungen**

Die Dauermessung wurde durch zwei Messfahrten zu Spring- und Nipptide ergänzt, bei denen flächendeckende Geschwindigkeitsmessungen mit dem oben beschriebenen GPS-Schwimmersystem sowie dem bootsgestützten ADCP durchgeführt wurden. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich des Gemeinde- und Yachthafens weisen signifikante Unterschiede zu Spring- und Nipptide auf. Der Flutstrom der Springtide bringt im engen Zufahrtsschlauch zum Hafenkomplex auf Höhe der Yachthafeneinfahrt zu Beginn der Flutphase Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 0,50 m/s mit sich, welche durch die Aufweitung im Gemeindehafen auf 0,30 m/s absinken und die Randbereiche des Gemeindehafenbeckens mit 0,15 m/s erreichen. Zum Tidehochwasserzeitpunkt hin verringern sich diese Werte auf etwa die Hälfte. Die Einströmung in den Yachthafen erfolgt bei Springtide zeitlich und räumlich sehr instationär. Da die etwa 11 m breite Hafeneinfahrt rechtwinklig zur Hauptfüllströmung des Gemeindehafens angeordnet ist, bilden sich große Zonen mit Ablösewirbeln. Die Befüllung des Yachthafenbeckens erfolgt zunächst über eine tiefe in Nord-Süd-Richtung verlaufende Rinne, bevor auch die hohen Wattflächen überströmt werden. Bei Springebbe sind die Strömungsgeschwindigkeiten deutlich niedriger als bei der zugehörigen Flut und außer-

dem zeitlich und räumlich gleichmäßiger. Bei Nipptide erfolgt die Befüllung der Hafenbecken mit deutlich geringeren Geschwindigkeiten. In der Zufahrt zum Gemeindehafen finden sich auf Höhe der Yachthafeneinfahrt sowie im südlichen Teil des Yachthafenbeckens bei ansteigendem Wasserspiegel Geschwindigkeiten von 0,20 m/s. Abbildung 3 enthält Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen im Bereich der Yachthafeneinfahrt mit dem Schwimmersystem und dem ADCP.

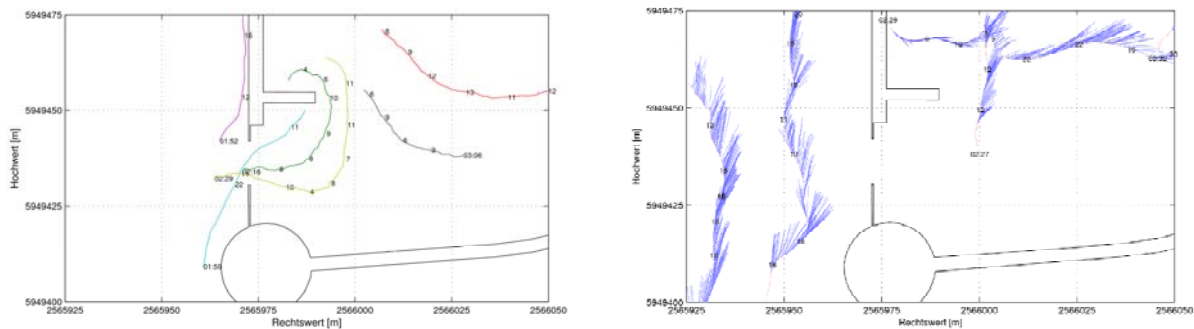


Abbildung 3: Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Yachthafeneinfahrt. Links gemessen mit dem GPS-Schwimmersystem, rechts gemessen mit bootsgestütztem ADCP

Über die Zuordnung zu resultierenden Sohlschubspannungen erlaubt die Auswertung der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten eine Abschätzung der Sedimentdynamik in Abhängigkeit der Korngröße des in Suspension transportierten Sediments. Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 0,5 m/s in der Zufahrt zum Hafenkomplex führen zur Erosion hier vorliegender Mittel- und Feinsande. Durch das Absinken der Strömungsgeschwindigkeit durch die Aufweitung im Einfahrtbereich des Gemeindehafens und die Umlenkung der Strömung in den Yachthafen verringert sich ihr Transportpotential und es kommt zu Deposition der transportierten Sedimente. Dabei werden zunächst die gröberen Sande abgelagert, mit weiter sinkender Strömungsgeschwindigkeit zunehmend auch schlickiges Material. Die Entleerung des Hafens bei Ebbe erfolgt mit deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten als die Befüllung. Die erosionskritischen Werte der Sohlschubspannungen für sandige Sedimente werden nicht überschritten.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Auswertung der Messungen zeigt deutliche Unterschiede in den Sedimenteintragsmengen zur Spring- und Nipptide. Durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten während den ersten Stunden der Springflut werden große Mengen Sediment, insbesondere Feinsande im Bereich der Hafenzufahrt mobilisiert und in den Yachthafens eingetragen. Durch die Aufweitung des Strömungsquerschnitts lagern sich insbesondere diese sandigen Sedimente im Bereich der Hafeneinfahrt ab. Die Strömungsgeschwindigkeiten der Ebbströmung reichen nicht aus, um diese Sande wieder zu mobilisieren. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse konnten in einer Diskussion mit den Hafenbetreibern verschiedene konstruktive Varianten zur Lösung des Sedimentproblems im Juister Hafen entwickelt werden