

Geschwindigkeits- und Turbulenzmessungen am Emssperrwerk

Oliver Lojek, Knut Krümer, Anna Zorndt, Nils Goseberg und Torsten Schlurmann

Zusammenfassung

Vom 14. bis 16. Juli 2012 wurde am Emssperrwerk in Gandersum, Deutschland, von dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zusammen mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSA/WSV) sowie dem Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen (FI) eine gemeinsame Feldmesskampagne durchgeführt. Es wurden Messungen von vertäuten sowie mobilen Plattformen aus durchgeführt. Messergebnisse von 3D-Strömungsgeschwindigkeiten gemessen mittels Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmesser (engl.: Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) sowie ergänzende Leitfähigkeits-, Temperatur- und Tiefenmessungen im Profil mit einer gefierten CTD-Sonde werden hier vorgestellt. Die Ergebnisse eignen sich für die weitere Entwicklung und Kalibrierung eines hydro-numerischen Modells der Ems durch den NLWKN.

Schlagwörter

Ems, Sperrwerk, ADCP, CTD, Reynolds-Spannungen, TKE, Gradient Richardson Zahl

Summary

From July 14th-16th, 2012 a joint measurement campaign was conducted at the Ems barrage in Gandersum, Germany, by The Lower Saxon State Department for Water, Coastal and Nature Conservation (NLWKN), the Water and Shipping Authority (WSA) Emden and the Franzius-Institute for Hydraulic, Waterways and Coastal Engineering (FI). Both, moored and mobile measurements were carried out. Measurement results of mobile 3D-current velocities by Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), complemented by a conductivity, temperature and depth (CTD) sensor for vertical profiling are presented here. Results support the calibration and development of a hydro numerical model by the NLWKN.

Keywords

ems, barrage, ADCP, CTD, Reynolds stresses, TKE, gradient Richardson number

Inhalt

| | | |
|---|----------------------|----|
| 1 | Einleitung..... | 62 |
| 2 | Methoden..... | 62 |
| | 2.1 Messtechnik..... | 63 |
| | 2.2 Messplan..... | 64 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3 | Verschneiden der ADCP- und CTD-Daten..... | 65 |
| 3 | Ergebnisse | 66 |
| 3.1 | ADCP-Messungen | 66 |
| 3.1.1 | Vergleichsmessungen | 66 |
| 3.1.2 | Tidesteuerungsversuch..... | 67 |
| 3.1.3 | Vergleich..... | 68 |
| 3.2 | CTD-Messungen..... | 68 |
| 3.2.1 | Salzgehalt..... | 69 |
| 3.2.2 | Trübung..... | 69 |
| 4 | Turbulenzparameter | 70 |
| 5 | Diskussion und Schlussfolgerungen | 72 |
| 6 | Schriftenverzeichnis..... | 72 |

1 Einleitung

Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) untersucht derzeit Möglichkeiten, das bestehende Sperrwerk an der Unterems zur Beeinflussung des Schwebstofftransports im Ästuar zu nutzen (s. Abb. 1 OBERRECHT und WURPTS 2014). In der Zeit vom 14. bis 16. Juli 2012 wurde ein Versuch der Tidesteuerung des Emssperrwerks in Gandersum durchgeführt. Ziel der Versuchsreihe ist die Untersuchung von Möglichkeiten zur Beeinflussung der Tidedynamik und des Schwebstofftransports im Emsästuar. Dabei werden die in-situ-Messungen durch ein vom NLWKN entwickeltes numerisches Modell ergänzt, mit dem sich sowohl der Betrieb des Emssperrwerks als auch die spezifische Flüssigschlickdynamik der Ems simulieren lässt. Für eine erfolgreiche Kalibrierung und Anwendung des Modells müssen die im Nahbereich des Sperrwerks vorherrschenden lokalen Strömungs- und Turbulenzeigenschaften hinreichend bekannt sein. Mit Hilfe einer bestimmten zeitvariablen Steuerung der Sperrwerkstore wurde die Tideströmung während der Flut leicht verzögert, um die Tidesymmetrie zu verringern.

Mit dem verringerten Wasserspiegelgefälle in Verbindung mit der Verengung des Fließquerschnitts sollte der Impuls des Flutstroms und damit die Sedimenttransportkapazität auf ein Mindestmaß reduziert werden. Der Versuch der Tidesteuerung wurde durch eine umfassende Messkampagne gestützt.

2 Methoden

Zahlreiche Messungen unterschiedlicher Art wurden durch mehrere Forschungsschiffe im Bereich des Sperrwerks vorgenommen. Die Messstationen, die sich sowohl seewärts als auch landwärts des Sperrwerks befinden, wurden durch das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Emden betrieben. Das vertäute Forschungsschiff MS Burchana des NLWKN führte stationäre Turbulenzmessungen mittels eines Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmessers (Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) und – als Referenzmessungen – mit einem ADV-Gerät durch. Das Peilboot Nynorder Oog des NLWKN nahm Tiefenmessungen vor. Darüber hinaus führte das Forschungsschiff des Franzius-Instituts

(FI) in unmittelbarer Nähe des Sperrwerks Strömungs- und Turbulenzmessungen mittels eines ADCP und ergänzende Messungen der Leitfähigkeit, Temperatur und Tiefe mit einer Multisonde (CTD-Sonde) durch. Die Nebenöffnungen des Sperrwerks wurden für den Zeitraum von fünf Tidezyklen für ca. 30 Minuten vor Eintreten des Ebbekenterpunkts geschlossen und während der Flut bis zum folgenden Tidehochwasser geschlossen gehalten. Bereits im Jahr 2009 zeigten Messungen, dass eine Verkleinerung des Fließquerschnitts zu signifikant erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten im Nahbereich der beiden verbleibenden offenen Wehrschütze führt. Das FI führte ADCP-Messungen durch, um die Auswirkungen des Tidesteuerungsversuchs auf die Strömungsgeschwindigkeiten und Strömungsfelder zu überwachen.

2.1 Messtechnik

Die hier bewerteten Messungen wurden vom Forschungsschiff des Franzius-Instituts vorgenommen. Die vektoriellen 3D-Strömungsgeschwindigkeiten wurde mittels eines Workhorse Rio Grande ADCP von Teledyne TD Instruments mit einer Arbeitsfrequenz von 600 kHz durchgeführt. Die Ausrichtung des ADCP wird durch interne Sensoren bestimmt, welche die Intensität der Schiffsbewegungen (Stampfen und Rollen) erfassen. Die absolute Positionsbestimmung des Schiffs erfolgt durch einen geodätischen Differential-GPS-Empfänger von Trimble mit eigener Referenzstation, sodass kinematische Korrekturen der Schiffsposition in Echtzeit (RTK-Korrekturen) möglich sind. So wird eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit im Dezimeter-Bereich erreicht. Die Ausrichtung des Schiffs und des ADCP in der Messebene erfolgt mittels GPS-Kompass. Das Verfahren ist dadurch unempfindlich gegenüber magnetischen Verzerrungen, wie sie beispielsweise im Nahbereich der Verschlussorgane des Sperrwerks oder der Dalben des Sperrwerks auftreten könnten. Für den Fall eines Versagens des GPS-Kompasses wurden auch Sichtlinien-Drehraten (LOS-Raten) mittels des gyroskopischen Systems des Boots erfasst, um Positionsdaten fehlerfrei über Koppelrechnung bestimmen zu können. Die vertikalen Profile von Salzgehalt, Trübung und Temperatur in der Wassersäule wurden mit einer CTD-Sonde gemessen. Die wichtigsten Parameter der eingesetzten Messinstrumente sind in der folgenden Tab. 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der auf dem Schiff des Franzius-Instituts eingesetzten Messinstrumente.

| Instrument | Typ | Hersteller | Testfrequenz | Auflösung |
|---|---------------|--------------|--------------|-----------|
| ADCP | WH Rio Grande | Teledyne RDI | 2,5 Hz | 0,25 m |
| dGPS | Trimble 5700 | Trimble | 1 Hz | 0,1 m |
| Gyro-Sensor | Gyro Plus 2 | Raymarine | 10 Hz | 0,1° |
| GPS-Kompass | LV 100 | Hemisphere | 10 Hz | 0,1° |
| Leitfähigkeits-, Temperatur- und Tiefensensor (CTD) | ECO IV | Grisard | 1 Hz | - |

2.2 Messplan

Der Tidesteuerungsversuch erstreckte sich über einen Zeitraum von vier Tidezyklen vom 14. bis 16. Juli 2012. Vor und nach dem Versuch wurden zusätzliche unbeeinflusste „Null-Tiden“ gemessen, um den Einfluss des Tidesteuerungsversuchs auf die lokalen Strömungsbedingungen zu bewerten. Im Mittelpunkt der Messkampagne standen insbesondere die verschiedenen Flutstromgeschwindigkeiten. Die Messzeiten/-perioden waren von Ebbecenterpunkt bis Mittelwasser an den Tidesteuerungsversuch gebunden. Die Messungen erfolgten in sogenannten Messzyklen (Mz), die aus Profilgruppen mit unterschiedlichen Verfahren für ADCP-Profile und CTD-Messungen bestehen. Die Messstellen sind in Abb. 1 dargestellt.

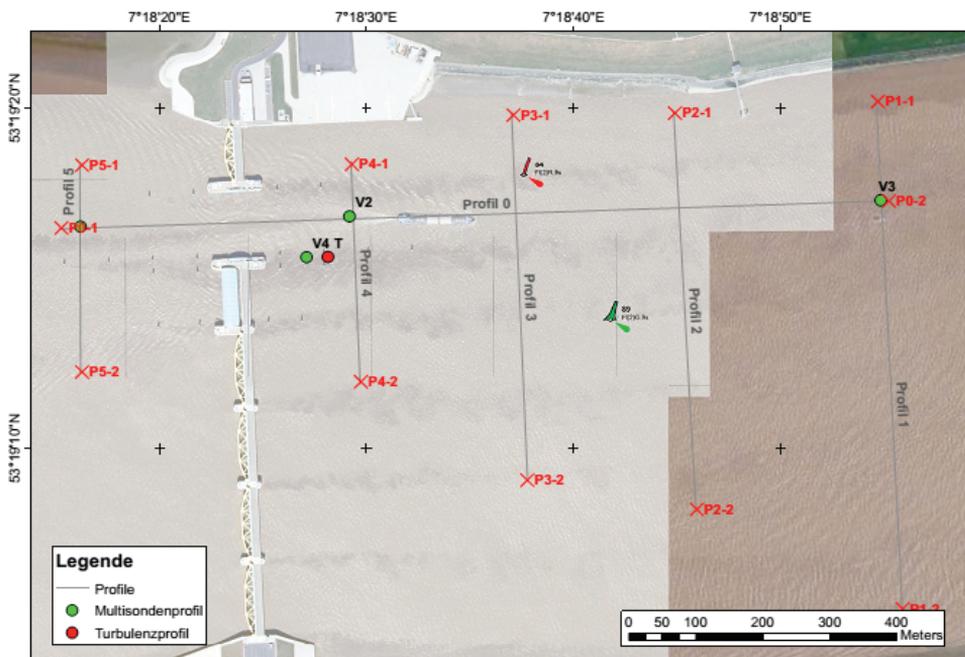


Abbildung 1: Überblick über die Messprofile (—) für das FI-Boot mit Messstellen für die CTD-Messung (●) und die Turbulenz-Messung (●).

Die einmalige Durchführung eines regelmäßigen Messzyklus führt zu einem Längsprofil (P0) und fünf Querschnittsprofilen (P1-5) landseitig und zu einem Profil seeseitig des Sperrwerks. Zusätzliche CTD-Messungen wurden an den Schnittpunkten zwischen den Querschnittsprofilen P1, P4 und P5 mit dem Längsprofil sowie an der Position des Forschungsschiffes Burchana des NLWKN zwischen der ersten und der zweiten Reihe der Dalben auf Höhe des südlichen Pfeilers der Hauptschiffahrtsöffnung (HSÖ) des Sperrwerks vorgenommen (V1-V4). Insgesamt wurden 130 ADCP-Profile und 78 vertikale CDT-Profile gemessen, von denen 17 Paare für eine weitere wissenschaftliche Untersuchung hinsichtlich möglicher Turbulenzparameter geeignet waren.

2.3 Verschneiden der ADCP- und CTD-Daten

Eigenständige ADCP- und CTD-Messungen bilden die Grundlage für die Bewertung lokaler Strömungseigenschaften vor und nach Betrieb der Sperrwerkstore. Ein gemeinsamer Einsatz des ADCP und der CTD-Sonde ermöglicht das anschließende Verschneiden der Daten für einen spezifischen Messort unter Verwendung der Zeitstempel der Messinstrumente. Durch lineare Interpolation der CTD-Daten auf die ADCP-Daten (s. Abb. 2) wird für jede ADCP-Tiefenzelle ein Wert für Salzgehalt, Temperatur und Druck zu einem bestimmten Zeitpunkt bestimmt.

Dieser Ansatz ermöglicht es, Turbulenzparameter wie die turbulente kinetische Energie (TKE) oder die Gradient-Richardson-Zahlen (Ri) für spezifische Messstellen zu bestimmen.

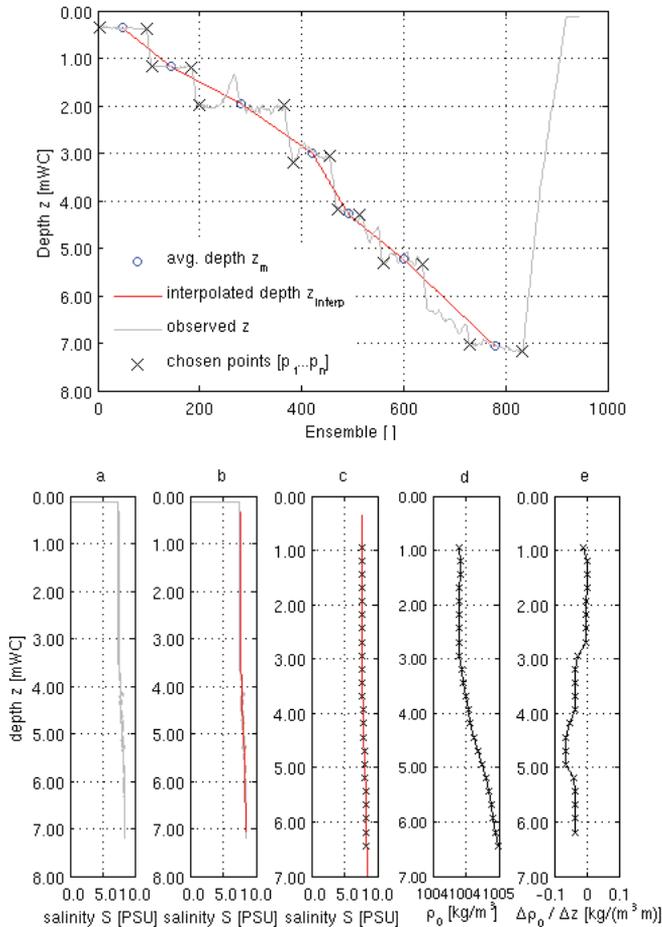


Abbildung 2: Erstes Diagramm: Lineare Interpolation der CTD-Messungen für das Verschneiden mit ADCP-Messungen. Zweites Diagramm: Schrittweise Erzeugung von Eingangsdaten zur Bestimmung der Turbulenzparameter. Beispielhafte Salzgehaltswerte. a) CTD-Messungen des Salzgehalts über die Wassersäule. b) PSU-Funktion basierend auf gemittelten Tiefenwerten. c) Interpolierte PSU-Werte der Zellenmittelpunkte (x). d) Potenzielle Dichte in kg/m³ auf Basis der interpolierten Werte (x). e) Änderung der pot. Dichte über die Tiefe in kg/m³ (x).

3 Ergebnisse

Die in-situ-Messungen von Druck, Temperatur und Leitfähigkeit mittels CTD-Sonde verdeutlichen die Entwicklung der genannten Parameter im Laufe des Tidezyklus. Zusätzlich ist es möglich, durch Verschneiden der durch den ADCP ermittelten Geschwindigkeitsmessdaten mit den CTD-Profildaten für dieselben Messorte die Turbulenzparameter zu berechnen. Die CTD-Daten wurden daher linear auf die vertikalen Positionen der ADCP-Tiefenzellen interpoliert, wodurch sich ein Wert je Variable (Salzgehalt, Druck, Temperatur) je ADCP-Tiefenzelle ergab. Die Reynolds-Spannungen ($R_{i,j}$) wurden anhand der von LOHRMANN et al. (1990) beschriebenen Varianz ermittelt.

Die turbulente kinetische Energie (IKE) wurde gemäß dem Ansatz von LOHRMANN et al. (1990) sowie STACEY et al. (1999a, 1999b) berechnet. Abschließend erfolgte eine Berechnung der Profile von Gradient-Richardson-Zahlen (Ri), die als Hinweis auf die Stabilität der Stratifizierung der Wassersäule dienen. Hier wurde der theoretische Rahmen von LOHRMANN et al. (1990) verwendet, der die Stratifizierung in Beziehung zur räumlichen Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten setzt. Die Untersuchungen ergaben eine deutliche Beeinflussung des örtlichen Turbulenz-Szenarios durch den Versuch der Tidesteuerung. Diese auf Beobachtungen basierenden Ergebnisse unterstützen die Kalibrierung des numerischen Ems-Modells und des vom NLWKN entwickelten und betriebenen Sperrwerks.

3.1 ADCP-Messungen

3D-Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten wurden mittels eines ADCP durchgeführt, der auf dem Schiff des FI betrieben wurde. So waren Strömungsmessungen in einem größeren Gebiet möglich. Die zeitliche Verteilung der durchgeführten Messzyklen (Mz 02-19) und die zugrundeliegende Tide sind in Abb. 3 dargestellt.

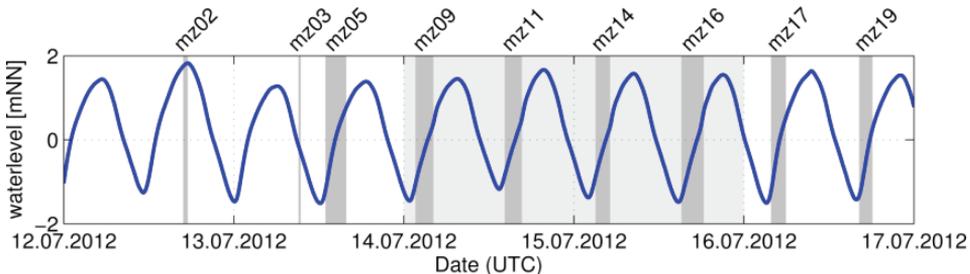


Abbildung 2: Übersicht der ADCP-Messungen, die während der Messkampagne vom 14. bis 16. Juli 2012 mit dem FI-Schiff durchgeführt wurden. Turbulenz-Messzyklen(■), Tidesteuerungsversuch(■), Wasserspiegel am Pegel des Emssperrwerks (—).

3.1.1 Vergleichsmessungen

Dem Tidesteuerungsversuch ging ein Messzyklus (Mz05) zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeiten voraus. Für die Vergleichsmessung wurden alle Tore des Sperrwerks offen gehalten und drei Messzyklen durchgeführt (Mz05a - Mz05c). Die Ergebnisse für Mz05c sind Abb. 4 zu entnehmen.

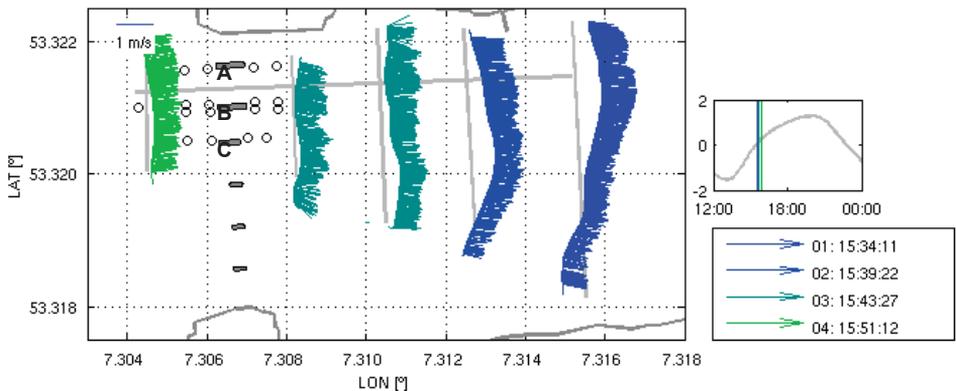


Abbildung 3: ADCP-Geschwindigkeitsmessungen während einer „Null-Tide“. Mz05c, sechs Profile innerhalb des Zeitraums 15:34:11–15:53:59 UTC | 13.07.2012. Die Ems fließt ungehindert und entwickelt ein annähernd konstantes Strömungsfeld A) NÖ1, B) HSÖ, C) BSÖ.

Der erste Messzyklus Mz05a, der am 13.07.2012 zwischen 12:57 und 13:34 UTC aufgezeichnet wurde, erfasst die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Nahbereich des Sperrwerks kurz nach Einsetzen des Flutstroms. Die tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten erreichen 0,3 - 0,6 m/s. Aufgrund des größeren Fließquerschnitts innerhalb des Bereichs NÖ1 (A), HSÖ (B) und BSÖ (C) lässt sich eine Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeiten vom nördlichen Ufer hin zum südlichen Ufer beobachten. Die Messungen für Mz05b erfolgten bei vollständigem Flutstrom zwischen 14:25 und 15:00 UTC mit Geschwindigkeiten von 0,8 m/s bis zu 1,2 m/s. Die zuvor erwähnte Geschwindigkeitsabnahme vom nördlichen hin zum südlichen Ufer ist weniger ausgeprägt. Der Messzyklus Mz05c fiel in den Zeitraum des Tidemittelwassers und ergab Geschwindigkeiten zwischen 0,6 und 0,8 m/s (s. Abb. 4).

3.1.2 Tidesteuerungsversuch

Das Strömungsgeschwindigkeitsfeld, das durch den Tidesteuerungsversuch während Mz09 beeinflusst wurde, der am 14. Juli 2012 mit vier vollständigen Profilgruppen von 01:28 - 04:10 UTC aufgezeichnet wurde, wird hier zur visuellen Beurteilung dargestellt. Die Messergebnisse des ADCP für Mz09b sind in Abb. 5 dargestellt.

Die Aufzeichnungen des Messzyklus Mz09a erfolgten zwischen 01:38 und 02:06 UTC, kurz nach Tideniedrigwasser. Die Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich der Schifffahrtsöffnungen liegen zu Beginn bei 0,7 m/s und erreichen im Verlauf des Messzyklus 1,5 m/s. Infolge der Verengung des Querschnitts der Schifffahrtsöffnungen entwickelt sich unterhalb der geschlossenen Tore eine Rückströmung, die in der südlichen Flusshälfte Geschwindigkeiten von bis zu 0,6 m/s erreichen kann. Im Laufe der Flut steigen die Strömungsgeschwindigkeiten in den Hauptschifffahrtsöffnungen auf bis zu 2,0 m/s im Messzyklus Mz09b an. Zudem nimmt die Rückströmung zu und erreicht Werte von 1,0 m/s. Im Messzyklus Mz09d sind im Fahrwasser immer noch Strömungsgeschwindigkeiten von 2,0 m/s zu beobachten, während sich die Rückströmung leicht abschwächt und auf 0,6 m/s zurückgeht.

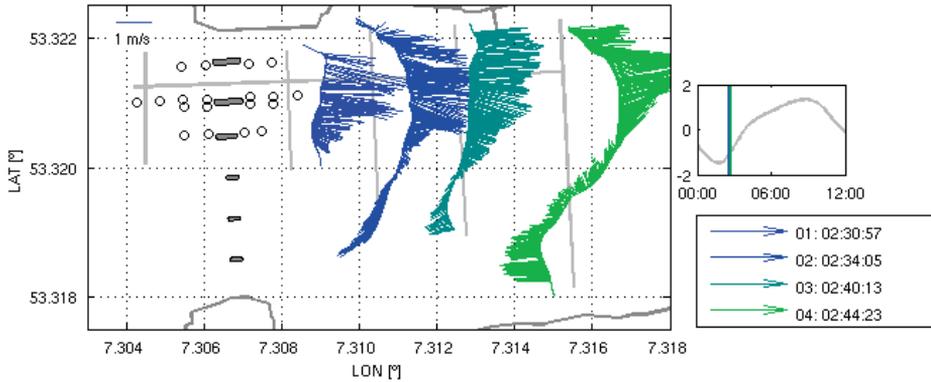


Abbildung 4: ADCP-Geschwindigkeitsmessungen während der Tidesteuerung. Mz09b, vier Profile innerhalb des Zeitraums 02:30:57–02:44:23 UTC|14.07.2012. Landwärts des Sperrwerks zeigt sich deutlich die Entwicklung eines Wirbels und einer Rückströmung in Richtung des südlichen Ufers.

3.1.3 Vergleich

Die dem Tidesteuerungsversuch vorangehende Vergleichsmessung (Mz02, Mz03 und Mz05) ergibt ein einheitliches Strömungsfeld mit einer Tendenz zu geringfügig höheren Geschwindigkeiten im Fahrwasser nahe dem nördlichen Ufer der Ems. Anders als bei der Vergleichsmessung zeigt sich bei der Tidesteuerung deutlich, dass der Flutstrom auf die Haupt- und Binnenschiffahrtsöffnungen begrenzt ist. Dadurch kommt es zu einer starken räumlichen Änderung der Strömungsgeschwindigkeiten zwischen dem nördlichen und südlichen Teil des Flusses sowie zur Entwicklung eines Wirbels im südlichen Flussbereich. Die tiefengemittelten maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser erreichen während des Tidesteuerungsversuchs 2,5 m/s mit Spitzenwerten von mehr als 3,0 m/s. Follow-up-Messungen des Vergleichszustands (Mz17 und Mz18) dokumentieren, dass das zuvor gemessene einheitliche Strömungsfeld wiederhergestellt ist. Es kommt zu keiner Änderung der tiefengemittelten Geschwindigkeitswerte durch den vorangegangenen Tidesteuerungslauf, z. B. infolge eines Rückstaus.

3.2 CTD-Messungen

Messungen des Salzgehalts und der Temperatur wurden mit Hilfe einer CTD-Sonde an verschiedenen Messpunkten und in bestimmten Abständen durchgeführt (s. Abb. 1). Wie erwartet zeigt die Entwicklung der Messwerte über den Tidezyklus eine leichte zeitliche Variabilität.

In den Messwerten ist jedoch keine Stratifizierung erkennbar. Dennoch weisen die Daten zum Salzgehalt die Entwicklung eines vertikalen Salzgradienten auf (s. Abb. 6).

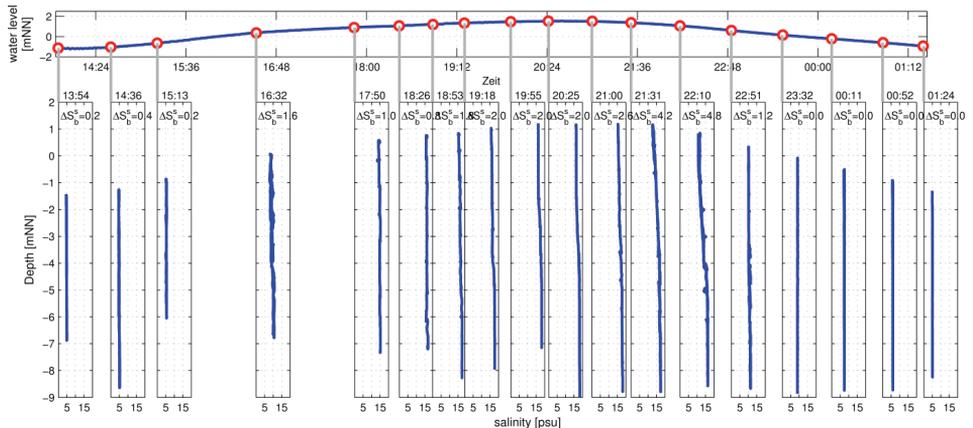


Abbildung 5: CTD-Messungen des Salzgehalts in PSU in der Wassersäule über den Tidezeitraum. Mz11-13, 19 Profile innerhalb der Zeitspanne von 13:51:59, 14.07.2012 bis 15.07.2012, 13:27:03 UTC.

3.2.1 Salzgehalt

Die CTD-Daten für den Salzgehalt lassen sich in vier unterschiedliche Phasen unterteilen. Bei Niedrigwasser erreicht der gemessene Salzgehalt Werte von 5 PSU und die Wassersäule ist vollständig durchmischt, mit einem Unterschied von 0,2 PSU zwischen der obersten und der untersten Schicht. Durch die Einwirkung des Flutstroms kommt es zu einem kontinuierlichen Anstieg der Salzgehaltswerte bis auf 10 PSU bei Tidemittelwasser. Hier beträgt der Unterschied zwischen den Schichten bis zu 1,2 PSU. In der Phase von Mittelwasser bis Tidehochwasser ist eine geringfügige Schichtenausbildung der Salzgehaltswerte in der Wassersäule erkennbar. Nahe der Oberfläche werden 15 PSU gemessen, in Bodennähe sind es 17 PSU. Zu Beginn des Ebbestroms nehmen diese Werte infolge des zunehmenden Abflusses vom Flussoberlauf ab, sodass sich Oberflächenwerte von 10 PSU ergeben und der interne Gradient maximiert wird. Ab Mittelwasser weist der Ebbestrom wieder eine vollständig durchmischte Wassersäule auf. Bei Tideniedrigwasser geht der Salzgehalt kontinuierlich von 10 auf 5 PSU zurück.

3.2.2 Trübung

Die Trübung wird mittels eines Sensors zur Messung der optischen Dämpfung bestimmt; sie beschreibt das Verhältnis von emittiertem zu absorbiertem und gestreutem Licht. Eine Trübung von 0 % bedeutet, dass 100 % des emittierten Lichts am Ende der Messstrecke gemessen werden. Wird das emittierte Licht zu 100 % gestreut bzw. absorbiert, liegt eine Trübung von 100 % vor. Die mit dem Trübungssensor gemessenen Werte wurden durch Wasserproben vor Ort evaluiert. Um eine geeignete Kalibrierung für den Sensor zu gewährleisten, erfolgte anschließend eine schrittweise Verdünnung der Proben mit Süßwasser. Aufgrund der hohen Trübungswerte der Ems wurde die Messstrecke von dem üblichen Standardwert von 135 mm auf 15 mm verkürzt.

Die mit der Sonde gemessenen Trübungswerte lassen sich deutlich vier Phasen zuordnen. In der Phase von Tideniedrigwasser bis Tidemittelwasser wurden hohe Trübungswerte von rund 95 % mit einer vollständig durchmischten Wassersäule beobachtet. In der Phase von Tidemittelwasser bis zum folgenden Tidehochwasser wurde in der oberen Hälfte der Wassersäule ein Rückgang der Trübung auf 70 % gemessen. Dies führte zu einem Gradienten in der Wassersäule, da die Bodenwerte weiterhin bei etwa 90 % lagen. Bei Tidehochwasser sinken die Oberflächenwerte auf 30 - 40 % und die Bodenwerte auf 50 - 60 %. Mit dem Ebbestrom wird die Durchmischung wiederhergestellt und die Werte steigen bis zum nächsten Tideniedrigwasser wieder kontinuierlich auf 95 %.

4 Turbulenzparameter

Ein weiteres Verschneiden der zu derselben Zeit am selben Ort erfassten Messwerte ermöglicht eine Bestimmung der Reynolds-Spannungen, turbulenten kinetischen Energie (TKE) und Gradient-Richardson-Zahlen (Ri) für diese spezifischen Messungen. Insgesamt war das Verschneiden in 17 Messzyklen möglich. Die Berechnung dieser Parameter erfolgte auf der Grundlage des Theorierahmens von LOHRMANN et al. (1990), STACEY et al. (1999a, 1999b), TRUCKENBRODT (2008), MCDUGALL et al. (2010) und LU und LUECK (1999). In den Ergebnissen der Vergleichsmessungen wird eine Entwicklung der Parameter im Verlauf des Flutstroms deutlich. So entwickeln die Reynolds-Spannungen das typische Profil über die gesamte Wassersäule wie in STACEY et al. (1999a,b) (hier nicht dargestellt) beschrieben. Bei den Vergleichsmessungen liegen die Werte zwischen $0,005 - 0,02 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Mit Einsetzen des Flutstroms nehmen diese zu und gehen nach Mittelwasser allmählich wieder zurück. Ein ähnliches Verhalten wurde unter den Bedingungen des Tidesteuerungsversuchs beobachtet, wobei die Werte mit $0,02 - 0,04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ insgesamt geringfügig größer waren.

Die Entwicklung der TKE-Werte verläuft ähnlich: die Werte aus den Vergleichsmessungen steigen mit einsetzendem Flutstrom und nehmen nach Erreichen von Mittelwasser allmählich ab; dabei bewegen sie sich in einem Spektrum von $0,1 - 0,15 \text{ W}/\text{m}^2$. Ähnlich wie bei den Reynolds-Spannungen sind die Werte im Tidesteuerungsversuch höher und liegen in der Spanne von $0,17 - 0,21 \text{ W}/\text{m}^2$. Der Verlauf ändert sich jedoch nicht und bei Erreichen von Mittelwasser ist ein allmählicher Rückgang der Werte zu beobachten.

Durch Bestimmen der Richardson-Zahl Ri wurde schließlich festgestellt, ob die vorhandene turbulente Energie ausreicht, um potenzielle Stratifizierungen der Wassersäule zu überwinden. Die Zahl Ri beschreibt das Verhältnis von potenzieller Energie zu kinetischer Energie. Dabei liegt der kritische Wert bei $Ri_{\text{crit}} = 0,25$. Wird dieser überschritten, ist zu wenig Energie vorhanden und es kann zur Ausbildung einer Stratifizierung kommen. Werte unterhalb Ri_{crit} weisen auf ausreichend Energie zur Überwindung einer möglichen Stratifizierung der Wassersäule hin. Die Ri -Werte wurden in Übereinstimmung mit der internationalen Fachliteratur durch $\log_{10}(Ri/0,25)$ normalisiert, sodass sich Ri_{crit} von $0,25$ auf $0,0$ verlagert und die Auswertung von Plots vereinfacht (STACEY et al. 1999a, 1999b) wird.

Die in den Vergleichsmessungen bestimmten Ri -Werte zeigen ein ähnliches Verhalten wie die beiden anderen Turbulenzparameter: mit Einsetzen des Flutstroms nehmen die Werte zu und mit Erreichen von Mittelwasser gehen sie wieder zurück. Die Werte aus den Vergleichsmessungen liegen zwischen $-3,0$ und $-5,3$, d. h. es ist ausreichend Energie zur Überwindung einer potenziellen Stratifizierung vorhanden. Im Tidesteuerungsversuch

kommt es ebenfalls zu einem Anstieg der Werte mit zunehmendem Flutstrom und einem Rückgang bei Erreichen von Mittelwasser. Die Ri -Werte sind unter den Versuchsbedingungen negativer; sie liegen zwischen -4,3 und -6,0 und weisen auf eine Verlagerung des Verhältnisses zugunsten der kinetischen Energie hin. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse für ein Ri -Profil für den Messzyklus Mz09c (Abb. 7a) sowie Messstelle (Abb. 7b) und zeitlicher Rahmen (Abb. 7c) der Messung dargestellt.

Sämtliche Ri -Werte sind negativ und weisen keine plötzlichen, bedeutenden Varianzen in ihren Profilen auf. Sie können folglich tiefengemittelt werden, ohne dass dadurch wichtige Daten für eine einfachere visuelle Beurteilung verloren gingen (s. Abb. 7d).

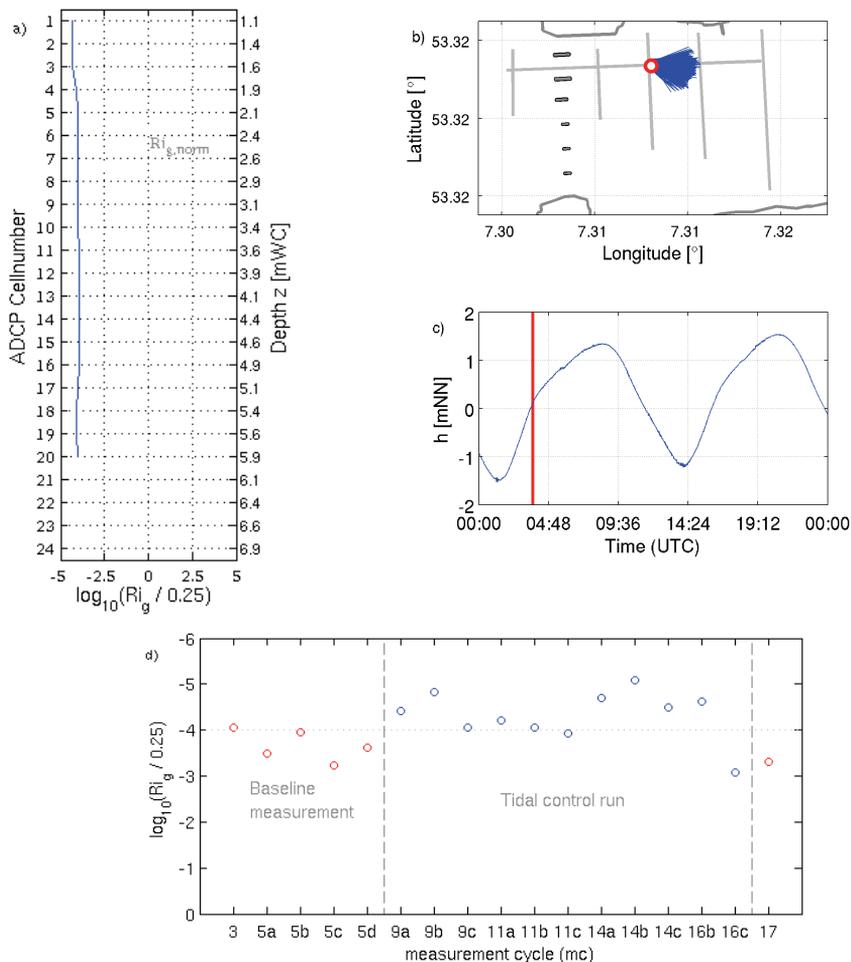


Abbildung 6: a) Normalisierte Gradient-Richardson-Zahl (\rightarrow), über dem Profil Mz09a CTD aufgetragen: 14.07.2012, 02:17:21 – 02:24:01 | ADCP: 14.07.2012, 02:15:49 – 02:25:57 UTC. b) Messstellen in Bezug auf das Sperrwerk mit Position der Multisonde (\circ) und der zusätzlichen ADCP-Messungen (\rightarrow) c) Messperiode innerhalb der Tide. d) Normalisierte tiefengemittelte Gradient-Richardson-Zahlen für die Turbulenz-Messzyklen 3 bis 17, welche durch Verschneiden der ADCP-Messungen mit den CTD-Daten, die durch das FI-Schiff vor Ort erfasst wurden, erhalten werden.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Während des Tidesteuerungsversuchs vom 14. bis 16. Juli 2012 am Emssperrwerk wurden vom Franzius-Institut Messungen der 3D-Strömungsgeschwindigkeiten mittels eines ADCP durchgeführt sowie Messungen des Salzgehalts und der Trübung mit einer CTD-Sonde. Die Durchführung der Messungen erfolgte von einer mobilen Plattform aus, die in der schnell fließenden Ems betrieben wird. Die Messergebnisse konnten erfolgreich bewertet werden. In den hier vorgestellten Ergebnissen sind Änderungen des lokalen Strömungsfeldes erfasst, die in Zusammenhang mit dem Tidesteuerungsversuch stehen.

Die Daten unterstützen außerdem die Kalibrierung und Validierung eines vom NLWKN entwickelten und betriebenen hydronumerischen Modells des Ems-Ästuars.

Aus den ADCP-Messungen geht deutlich eine Erhöhung der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten hervor, die auf die Verengung des Fließquerschnitts durch Beschränkung auf die Schifffahrtsöffnungen zurückzuführen ist.

Während des Flutstroms kommt es zur Bildung eines Wirbels und einer Rückströmung im Nahbereich der geschlossenen Nebenöffnungen.

Vertikale CTD-Messungen des Salzgehalts und der Trübung ergeben einen leichten vertikalen Gradienten für Wasserstände oberhalb von Mittelwasser. In Bezug auf die Trübung beträgt der Unterschied zwischen den Oberflächenwerten und Bodenwerten maximal 30 %. Der höchste vertikale Gradient im Bereich Salzgehalt liegt bei 5 PSU.

Des Weiteren wurden im Nahbereich der Hauptschifffahrtsöffnung bei den Vergleichsmessungen Unvollkommenheiten festgestellt, die auf eine nicht messbare Sohle des Fahrwassers zurückzuführen waren. Dies könnte ein Hinweis auf eine Ansammlung von Schwebstoffen oder Flüssigschlick in diesem Bereich sein.

Die mittels Verschneiden der Messdaten berechneten Turbulenzparameter zeigen eine allgemeine Verstärkung der bereits vorhandenen Turbulenzen, die durch den Tidesteuerungsversuch verursacht wurden. Eine signifikante Zunahme der Turbulenzeigenschaften konnte jedoch nicht beobachtet werden. Nichtsdestoweniger sind die Messungen hilfreich, um zu beurteilen, welche Auswirkungen die Torsteuerung im Rahmen des Versuchs auf die Hydrodynamik im Umfeld des Emssperrwerks hat.

Schließlich wurde ein neues und mobiles Messverfahren für Turbulenzparameter auf Basis von ADCP- und CTD-Messungen erfolgreich angewendet.

6 Schriftenverzeichnis

- LOHRMANN, A.; HACKETT, B. and ROED, L. P.: High Resolution Measurements of Turbulence, Velocity and Stress Using a Pulse-to-Pulse coherent Sonar. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19-37, 1990.
- LU, Y. and LUECK, R. G.: Using a Broadband ADCP in a Tidal Channel. Part I: Mean Flow and Shear. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 1556-1567, 1998a.
- LU, Y. and LUECK, R. G.: Using a Broadband ADCP in a Tidal Channel. Part II: Turbulence. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16, 1568-1579, 1998b.
- MCDougall, T. J.; Feistel, R.; Millero, F. J.; Jackett, D. R.; Wright, D. G.; King, B. A.; Marion, G. M.; Chen, C-T. A.; Spitzer, P. and Seitz, S.: The International Thermodynamic Equation of Seawater 2010 (TEOS-10): Calculation and Use of

- Thermodynamic Properties. In: Global Ship-based Repeat Hydrography Manual, IOCCP Report No, 14, ICPO Publication Series No. 134, 2010.
- OBERRECHT, D. and WURPTS, A.: Impact of Controlled Tidal Barrier Operation on Tidal Dynamics in the Ems Estuary. In: Die Küste, 81, 2014.
- STACEY, M. T.; MONISMITH, S. G. and BURAU, J. R.: Measurements of Reynolds stress profiles in unstratified tidal flow. In: Journal of Geophysical research, 104(C5), 10933-10949, 1999a.
- STACEY, M. T.; MONISMITH, S. G. and BURAU, J. R.: Observations of Turbulences in a Partially Stratified Estuary. In: Journal of Physical Oceanography, 29, 1959-1970, 1999b.
- TRUCKENBRODT, E.: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. In: Fluidmechanik Band 1, doi: 10.1007/978-3-540-79018-1_3, 2008.