

Validierungsdokument Ems-Modell 2015

B3955.03.10.10208

Validierungsdokument Ems-Modell 2015

Auftraggeber: Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ems-Nordsee
Am Eisenbahndock 3, 26725 Emden

Auftrag vom: 7. Juli 2008, Az.: 2P-231.2/AuEm/9 SA4

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.10.10208

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
Referat: Ästuarsysteme II (K3)
Bearbeitung: Anton Rosenhagen M.Sc.
Dipl.-Ing. (FH) Jens Jürges

Hamburg, Februar 2022

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Das vorliegende Dokument beschreibt die Validierung eines ortsspezifischen numerischen Modells der Hydrodynamik (HN-Modell) sowie des Transports von Salz und suspendiertem Sediment für die Tideems. Das entwickelte Modell wird darauf untersucht, wie genau dessen Ergebnisse den Messungen verschiedener Parameter entsprechen. Dafür wird eine Simulation über ein Jahr durchgeführt und dessen Mittelwerte sowie vier Spring-Nipp-Zeiträume mit unterschiedlichen Randbedingungen ausgewertet. Die Vergleiche erfolgen im Anschluss anhand des Skill-Wertes von Willmott (1981). Die ermittelten Skill-Werte werden mit Angaben aus der Referenz-Literatur verglichen und abschließend bewertet.

Die Validierungsergebnisse belegen die Prognosefähigkeit des verwendeten numerischen Modells für unterschiedliche Randbedingungen. Entsprechend den geplanten Anforderungen an das HN-Modell erfolgt die Abbildung der dominierenden physikalischen Prozesse hinreichend genau. Modellergebnisse in Teilen des Leda-Jümme-Gebiets, sowie Salzgehalte in Bereichen mit niedrigen Mittelwerten ($\leq 2 \text{ ‰}$) und Schwebstoffgehalte im Bereich der flüssigschlickreichen Unterems sind mit Bezug auf Referenzergebnisse, vorrangig qualitativ zu interpretieren.

(1) Titel		Validierungsdokument Ems-Modell 2015	
(2) Ort	(3) Wasserstr.-Nr.	(4) Kilometer	
Außenems und Unterems	1100	von DEK km 213	bis Ems km 113
(5) Unterzeichner	Dr. Jessica Kelln		
(6) Bearbeiter	Anton Rosenhagen M. Sc.; Dipl.-Ing. (FH) Jens Jürges		
(7) Mitarbeiter			
(8) Auftraggeber	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Ems-Nordsee Am Eisenbahndock 3, 26725 Emden		
(9) Auftrags-Nr.	B3955.03.10.10208	(10) aufgestellt am	17.02.2022
(11) Seitenzahl	56	(12) Sonderhinweise	
(13) Kurzfassung			
<p>Das vorliegende Dokument beschreibt die Validierung eines ortsspezifischen numerischen Modells der Hydrodynamik (HN-Modell) sowie des Transports von Salz und suspendiertem Sediment für die Tideems. Das entwickelte Modell wird darauf untersucht, wie genau dessen Ergebnisse den Messungen verschiedener Parameter entsprechen. Dafür wird eine Simulation über ein Jahr durchgeführt und dessen Mittelwerte sowie vier Spring-Nipp-Zeiträume mit unterschiedlichen Randbedingungen ausgewertet. Die Vergleiche erfolgen im Anschluss anhand des Skill-Wertes von Willmott (1981). Die ermittelten Skill-Werte werden mit Angaben aus der Referenz-Literatur verglichen und abschließend bewertet.</p> <p>Die Validierungsergebnisse belegen die Prognosefähigkeit des verwendeten numerischen Modells für unterschiedliche Randbedingungen. Entsprechend den geplanten Anforderungen an das HN-Modell erfolgt die Abbildung der dominierenden physikalischen Prozesse hinreichend genau. Modellergebnisse in Teilen des Leda-Jümme-Gebiets, sowie Salzgehalte in Bereichen mit niedrigen Mittelwerten ($\leq 2 \text{ ‰}$) und Schwebstoffgehalte im Bereich der flüssigschlickreichen Unterems sind mit Bezug auf Referenzergebnisse, vorrangig qualitativ zu interpretieren.</p>			
(14) Standort	(15) Archiv-Nr.		

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
1.1	Anforderungen an das Modellsystem	1
1.1.1	Geplante Anwendungen	1
1.1.2	Untersuchungsgebiet	1
1.1.3	Untersuchungszeitraum	1
1.1.4	Zielgrößen und Anforderungen an die Genauigkeit	1
2	Unterlagen und Daten	2
3	Systembeschreibung des Ems-Ästuars	3
4	Modellaufbau	4
4.1	Modellierungsverfahren	4
4.2	Modelltopographie	5
4.2.1	Modellgebiet	5
4.2.2	Horizontale und vertikale Auflösung	6
4.3	Anfangsbedingungen	6
4.3.1	Wasserstand / Strömungsgeschwindigkeit	6
4.3.2	Salzgehaltsverteilung	6
4.3.3	Sedimentinventar	6
4.4	Randbedingungen	7
4.4.1	Wasserstand	7
4.4.2	Oberwasser	7
4.4.3	Salzgehalt	7
4.4.4	Schwebstoffgehalt	8
4.4.5	Windgeschwindigkeit	8
4.4.6	Parameterwahl	8
5	Modellkalibrierung und -validierung für das Ems-Ästuar	9
5.1	Kalibrierungs- und Validierungszeitraum	9
5.2	Analysegrößen zur Beschreibung der Modellgüte	11
5.2.1	Wasserstände	11
5.2.2	Strömungsgeschwindigkeiten	12
5.2.3	Salzgehalte	12
5.2.4	Schwebstoffgehalt	12
5.2.5	Hinweis zum Vergleich von Messungen und berechneten Größen	12
5.3	Zielwerte	14
5.4	Modellkalibrierung	15
5.4.1	Wasserstände	15
5.4.2	Strömungsgeschwindigkeiten	19
5.4.3	Salzgehalte	23
5.4.4	Schwebstoffgehalt	27
5.5	Modellvalidierung	30

5.5.1	Wasserstände	30
5.5.2	Strömungsgeschwindigkeiten	32
5.5.3	Salzgehalte	33
5.5.4	Schwebstoffgehalt	34
6	Bewertung	36
6.1	Anwendbarkeit	36
6.2	Hinweise zur Interpretation der Modellergebnisse	36
7	Literaturverzeichnis	38

Bildverzeichnis		Seite
Bild 1:	Das Modellgebiet des HN-Modells der Tideems	5
Bild 2:	Kalibrierungs- und Validierungszeiträume	10
Bild 3:	Statistische Werte der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume	10
Bild 4:	Lage der analysierten Wasserstandspegel im Ems-Ästuar	15
Bild 5:	Gemessene und modellierte Wasserstände am Pegel Emshörn	16
Bild 6:	Gemessene und modellierte Wasserstände am Pegel Emden – Emspier	16
Bild 7:	Gemessene und modellierte Wasserstände am Pegel Papenburg	17
Bild 8:	Lage der analysierten Strömungsmessgeräte im Ems-Ästuar	19
Bild 9:	Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten am Pegel Emshörn-O	20
Bild 10:	Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten am Pegel Emden	20
Bild 11:	Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten am Pegel Papenburg	21
Bild 12:	Lage der analysierten Leitfähigkeitsmessgeräte im Ems-Ästuar	23
Bild 13:	Gemessene und modellierte Salzgehalte am Pegel Emshörn	24
Bild 14:	Gemessene und modellierte Salzgehalte am Pegel Emden	24
Bild 15:	Gemessene und modellierte Salzgehalte am Pegel Papenburg	25
Bild 16:	Lage der analysierten Trübungsmessgeräte im Ems-Ästuar	27
Bild 17:	Gemessene und modellierte Schwebstoffgehalte am Pegel Knock	28
Bild 18:	Gemessene und modellierte Schwebstoffgehalte am Pegel Gandersum	28
Bild 19:	Boxplot der Skill-Werte der Wasserstände aller Zeiträume	31
Bild 20:	Boxplot der Skill-Werte der Wasserstände aller Pegel	31
Bild 21:	Normierte Kennwerte des Schwebstoffgehalts am Pegel Papenburg	35

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Charakteristiken des Ems-Ästuars	3
Tabelle 2: Mittlerer Korndurchmesser der verwendeten Sedimentfraktionen und Anteil	7
Tabelle 3: Parameter-Einstellungen des verwendeten HN-Modells für die Ems	8
Tabelle 4: Daten der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume im Jahr 2015.	9
Tabelle 5: Modell-Genauigkeit nach dem Skill-Wert von Willmott (1981)	14
Tabelle 6: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Kalibrierung	18
Tabelle 7: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Kalibrierung	22
Tabelle 8: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Kalibrierung	26
Tabelle 9: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Kalibrierung	29
Tabelle 10: Skill-Werte der Wasserstands-Zeitreihen	30
Tabelle 11: Skill-Werte der Strömungsgeschwindigkeits-Zeitreihen	32
Tabelle 12: Skill-Werte der Salzgehalts-Zeitreihen	33
Tabelle 13: Skill-Werte der Schwebstoffgehalts-Zeitreihen	34
Tabelle 14: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_1	40
Tabelle 15: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_2	41
Tabelle 16: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_3	42
Tabelle 17: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_4	43
Tabelle 18: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Jahr 2015	44
Tabelle 19: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_1	45
Tabelle 20: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_2	46
Tabelle 21: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_3	47
Tabelle 22: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_4	48
Tabelle 23: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_1	49
Tabelle 24: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_2	50
Tabelle 25: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_3	51
Tabelle 26: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_4	52
Tabelle 27: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Jahr 2015	53
Tabelle 28: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_1	54
Tabelle 29: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_2	54
Tabelle 30: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_3	55

Tabelle 31: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_4	55
Tabelle 32: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Jahr 2015	56

Anlagenverzeichnis	Seite
Anlage 1: Validierungsergebnisse Wasserstände	40
Anlage 2: Validierungsergebnisse Strömungsgeschwindigkeiten	45
Anlage 3: Validierungsergebnisse Salzgehalte	49
Anlage 4: Validierungsergebnisse Schwebstoffgehalt	54

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Ziel dieses Dokuments ist es die Validierung eines ortsspezifischen numerischen Modells der Hydrodynamik (HN-Modell) sowie des Transports von Salz und suspendiertem Sediment für die Tideems darzustellen.

Das entwickelte Modell soll die Möglichkeit bieten, naturähnliche Simulationen für Zeiträume bis zu einem Jahr durchführen zu können. Geplant ist, das Modell in nachfolgenden Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) für Fragestellungen bezüglich der Hydrodynamik sowie des Transports von Salz und suspendiertem Sediment zu nutzen. Die Modellvalidierung und die Struktur des Dokumentes erfolgen in Anlehnung an die Richtlinien zur „Good Modelling Practice“ für hydro-numerische Modellverfahren (van Waveren, 1999).

Aufbauend auf diesem hydrodynamischen Basis-Modell können weiterführende Validierungen erfolgen, um das Modell beispielsweise für morphodynamische Untersuchungen, Sturmflutuntersuchungen oder kleinskalige Fragestellungen zu ertüchtigen.

1.1 Anforderungen an das Modellsystem

1.1.1 Geplante Anwendungen

Als Anwendungsbereiche, für die das vorliegende Modellsystem genutzt werden soll, sind bisher geplant:

- Prognose ausbaubedingter Änderungen der Fahrrinnenvertiefung der Außenems.
- Systemstudien zur Wirksamkeit der flexiblen Tidesteuerung mit dem Emssperrwerk im Rahmen des Projekts Masterplan Ems 2050.

In diesen Projekten werden Kenngrößen der Hydrodynamik und der Transporte in idealisierten Szenarien verglichen. Zu treffende Aussagen beruhen auf der Änderung dieser Kenngrößen im Vergleich zweier Zustände (z. B. Ist- und Ausbauzustand). Ähnliche Fragestellungen, z. B. zu Unterhaltungsbaggermaßnahmen, können gegebenenfalls auch mit diesem Modell beantwortet werden.

1.1.2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist das Ems-Ästuar, von seiner landseitigen Grenze am Wehr Herbrum bis zum seeseitigen Abschluss seewärts von Borkum und Juist.

1.1.3 Untersuchungszeitraum

Die geplanten Untersuchungszeiträume umfassen zwischen einem Spring-Nipp-Zyklus und einem Jahr. In einem Spring-Nipp-Zyklus mit 28 Tiden werden die von der Tide dominierten Phänomene in seiner üblichen Variabilität abgebildet. Saisonale Effekte werden in Form von mehreren Untersuchungszeiträumen zu unterschiedlichen Abfluss-Situationen betrachtet. Zusätzlich werden mittlere Verhältnisse eines Jahres untersucht. Die Zeiträume werden in Kapitel 5.1 beschrieben.

1.1.4 Zielgrößen und Anforderungen an die Genauigkeit

Die geplanten Anwendungen erfordern die naturnahe Abbildung der relevanten physikalischen Prozesse. Das Modell muss zudem auf veränderte Randwerte geeignet reagieren ohne signifikante

Abnahmen der in der Kalibrierung erreichten Genauigkeit. Im Speziellen muss die Genauigkeit für Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salz- und Schwebstoffgehalt nachgewiesen werden. Zielwerte für die einzelnen Ergebnisgrößen sind in Kapitel 5.3 angegeben. Die Berechnung von Schwebstoffgehalten in flüssigschlickreichen Wasserkörpern, wie der Unterems, ist momentan noch Stand der Forschung und wurde noch nicht in den Stand der Technik überführt. Diese Modellergebnisse sind daher in geringerem Maße belastbar und es werden für diesen Bereich keine Zielwerte angegeben. Für eine qualitative Nutzung müssen aber grundlegende funktionale Abhängigkeiten nachgewiesen werden.

2 Unterlagen und Daten

Topographische Daten für die Erstellung der Modelltopographie:

Digitales Geländemodell des Wasserlaufes 2015 (DGMW, 2015) des WSA Ems-Nordsee (Arbeitsgemeinschaft (ARGE) smile consult GmbH - Inphoris GmbH, 2016) mit Grundlage Peilung und Befliegung 2015.

Zur Steuerung des HN-Modells werden folgende Daten verwendet:

- Wasserstandsentwicklung am Pegel Huibertgat für 2015 in 10-Minuten-Werten.
- Gemessener Oberwasserzufluss der Ems bei Versen
- Geschätzter Oberwasserzufluss aus dem Leda-Jümme-Gebiet. Abflussspende der Teileinzugsgebiete und hochgerechnet auf Gesamteinzugsgebiet (NLWKN)
- Windgeschwindigkeiten des COSMO-EU Modells (DWD).

Zusätzlich lagen folgende Daten vor, die durch das WSA Ems-Nordsee, das NLWKN und die BfG zur Verfügung gestellt wurden:

- Wasserstandsmessungen des Jahres 2015 an den Pegelstandorten Huibertgat (NL), Borkum / Südstrand, Borkum / Fischerbalje, Norderney (Riffgat), Emshörn, Eemshaven (NL), Dukegat, Delfzijl (NL), Knock, Nieuwe Statenzijl (NL), Emden / Emspier, Emden / Neue Seeschleuse, Pogum, Emssperrwerk, Terborg, Leerort, Weener, Papenburg, Rhede, Ledasperrwerk (Leda), Westringaburg (Leda), Dreyschloot (Leda), Nortmoor (Jümme), Holtland (Jümme), Stickhausen (Jümme) und Barge (Jümme)
- Strömungsmessungen des Jahres 2015 an den Pegelstandorten Emshörn, Knock, Emden, Ditzum, Terborg, Soltborg, Leerort, Grotegaste, Weener, Mark, Papenburg und Rhede
- Salzgehaltsmessungen des Jahres 2015 an den Pegelstandorten Borkum / Südstrand, Emshörn, Knock, Emden / Emspier, Emden, Ditzum, Pogum, Gandersum, Terborg, Soltborg, Leerort, Weekeborg, Grotegaste, Weener, Mark, Papenburg, Rhede und Leer (Leda)
- Trübungsmessungen des Jahres 2015 an den Pegelstandorten Knock, Emden / Emspier, Pogum, Gandersum, Terborg, Leerort, Leer (Leda), Weener und Papenburg
- Bodenproben: Niederländisches Kataster für Außenems und Dollart (RIKZ) und Proben entlang der Unterems und des Emders Fahrwassers für jeden Ems-Kilometer von Papenburg bis Ems-KM-55 (WSA Ems-Nordsee, 2005)

3 Systembeschreibung des Ems-Ästuars

Die Ems mündet nach ca. 370 Kilometern bei Borkum in die Nordsee. Von dort bis zum Wehr Herbrum ist die Ems tidebeeinflusst. Schutz vor Sturmfluten sowie Unterstützung bei Schiffsüberführungen bietet seit 2002 das Emssperrwerk bei Gandersum.

Die Morphologie des Ems-Ästuars in seiner heutigen Form entstand mit der Transgression infolge eines Meeresspiegelanstiegs vor ca. 10.000 Jahren. Charakteristisch für die Ems-Mündung inmitten der durch die Ostfriesischen Inseln geprägten Küste sind große Wattgebiete, die Teil des Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer sind. Stromauf, südlich von Emden, schließt sich der Dollart an, eine 100 km² große Bucht, die durch Sturmfluten im Mittelalter entstanden ist (Krebs und Weilbeer, 2008).

Auf Höhe des Dollarts beginnt die deutlich schmalere Unterems und ab Papenburg der Dortmund-Ems-Kanal (DEK). Deren Lauf wurde im letzten Jahrhundert vom Menschen stark verändert. Tidedynamik und Transportcharakteristiken reagierten darauf und führten zu einem in weiten Teilen hyperturbiden System (van Maren et al., 2015). In der folgenden Tabelle werden einige wichtige Charakteristiken des Ems-Ästuars zusammengefasst.

Tabelle 1: Charakteristiken des Ems-Ästuars, angelehnt an Papenmeier et al. (2013)

Länge (km) Gesamt Tidebeeinflusst	370 ~100
Form Außenems Unterems und DEK	Trichter Fluss, teilweise kanalisiert
Zulässiger Tiefgang der Hafenzufahrt (m) Emden Papenburg Herbrum	10.5 6.0 2.7
Gezeiten Tidehubvariation Emden (m) Mittlerer Tidehub (m)	halbtägig, flutdominant 2.9 (Nipp) - 3.7 (Spring) 2.2 (Huibertgat) - 3.7 (Papenburg)
Abfluss in Versen (m ³ /s) Mittlerer (MQ) Mittlerer niedriger (MNQ) Mittlerer hoher (MHQ)	Zeitraum 1942-2015 79 17 358
Trübungszone Lage	Teilweise durchmischt, teilweise starke Schichtung gesamte Unterems
Schwebstoffgehalt (kg/m ³) Außenems Unterems	0.1 - 0.8 0.1 - >40
Bodenmaterial Außenems Unterems	Schluffiger Sand Sandiger Schluff
Flüssigschlickschicht	Bis zu mehreren Metern in der Unterems

4 Modellaufbau

4.1 Modellierungsverfahren

Für diese Untersuchung wird das bei der BAW-DH entwickelte HN-Modell der Tideems eingesetzt. Die Auswahl eines geeigneten mathematischen Verfahrens, die Vollständigkeit und Genauigkeit der für den Modellbetrieb benötigten Datensätze (z. B. Rand- und Anfangswerte), die Festlegung eines für die Aufgabenstellung angemessenen Modellgebietes sowie die Wahl geeigneter Parameter für die Modellierung bestimmen die Qualität der erzielbaren Modellergebnisse und beeinflussen damit die Prognosefähigkeit des Verfahrens.

Das HN-Modell der Tideems basiert auf dem mathematischen Verfahren UnTRIM (Casulli, 2009). UnTRIM ist ein dreidimensionales, semi-implizites Finite-Differenzen- / Finite-Volumen-Verfahren auf unstrukturierten orthogonalen Gittern zur Lösung der reynoldsgemittelten Navier-Stokes-Gleichung. Die Modelltopographie kann in untergliederten Berechnungszellen und -kanten mit höherer Auflösung abgebildet werden (Subgrid-Technologie). Dabei werden die folgenden Prozesse zur Bestimmung von Wasserstand und Strömungsgeschwindigkeit berücksichtigt:

- lokale Beschleunigung (Massenträgheit) und advektive Beschleunigung
- Coriolisbeschleunigung
- Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen
- Oberwasserzufluss
- Barotroper und barokliner Druckgradient
- hydrostatische Druckverteilung
- horizontale turbulente Viskosität (lokal isotrop)
- turbulente vertikale Viskosität unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung: k - ϵ -Modell (Rodi, 1987)
- Bodenreibung (zeit- und ortsvariabel)
- Impulseintrag durch den Wind
- Quellen und Senken

Der massenkonservierende Transport von Tracern (Salzgehalt, Schwebstoffkonzentration) wird unter Berücksichtigung der folgenden Prozesse berechnet:

- lokale Veränderung
- advektiver Transport durch die Strömung
- horizontale turbulente Diffusivität (lokal isotrop)
- turbulente vertikale Diffusivität unter Berücksichtigung der vertikalen Dichteschichtung: k - ϵ -Modell (Rodi, 1987)
- für Schwebstoffe: Sinkgeschwindigkeit, Deposition und Erosion
- Wärmeaustausch mit der Atmosphäre und der Gewässersohle
- Quellen und Senken
- Senken mit unmittelbarer Wiedereinleitung an einem anderen Ort mit der Möglichkeit zur Abwandlung z. B. der Einleitungstemperatur sowie des Einleitungssalzgehalts gegenüber den entsprechenden Entnahmewerten

Als Ergebnis werden vom HN-Modell UnTRIM in Kopplung mit dem Modell SediMorph für die Berechnung der zeitvariablen Bodenzusammensetzung die hydrodynamischen Zustandsgrößen

(Wasserstand, Strömungsvektor, Salzgehalt und Schwebstoffgehalt) in diskreten Tiefen für einen ausgewählten Zeitraum ermittelt.

4.2 Modelltopographie

4.2.1 Modellgebiet

Das Gebiet des ortsspezifischen HN-Modells ist so gewählt worden, dass die maßgebenden physikalischen Prozesse (hier Tidedynamik, Salz- und Schwebstofftransport bei mittleren Tiden) hinsichtlich der Auswirkungen z. B. für einen geplanten Ausbau simuliert werden können. Das Modellgebiet umfasst einen Bereich zwischen der Deutsche Bucht, dem Wehr Herbrum und dem Leda-Jümme-System. Der seeseitige Rand liegt nördlich der Inselkette Simonszand – Borkum – Juist – Norderney, der Oberwasserzufluss wird für die Ems am Wehr Herbrum und für Leda, Jümme und Westerwoldsche Aa eingesteuert.

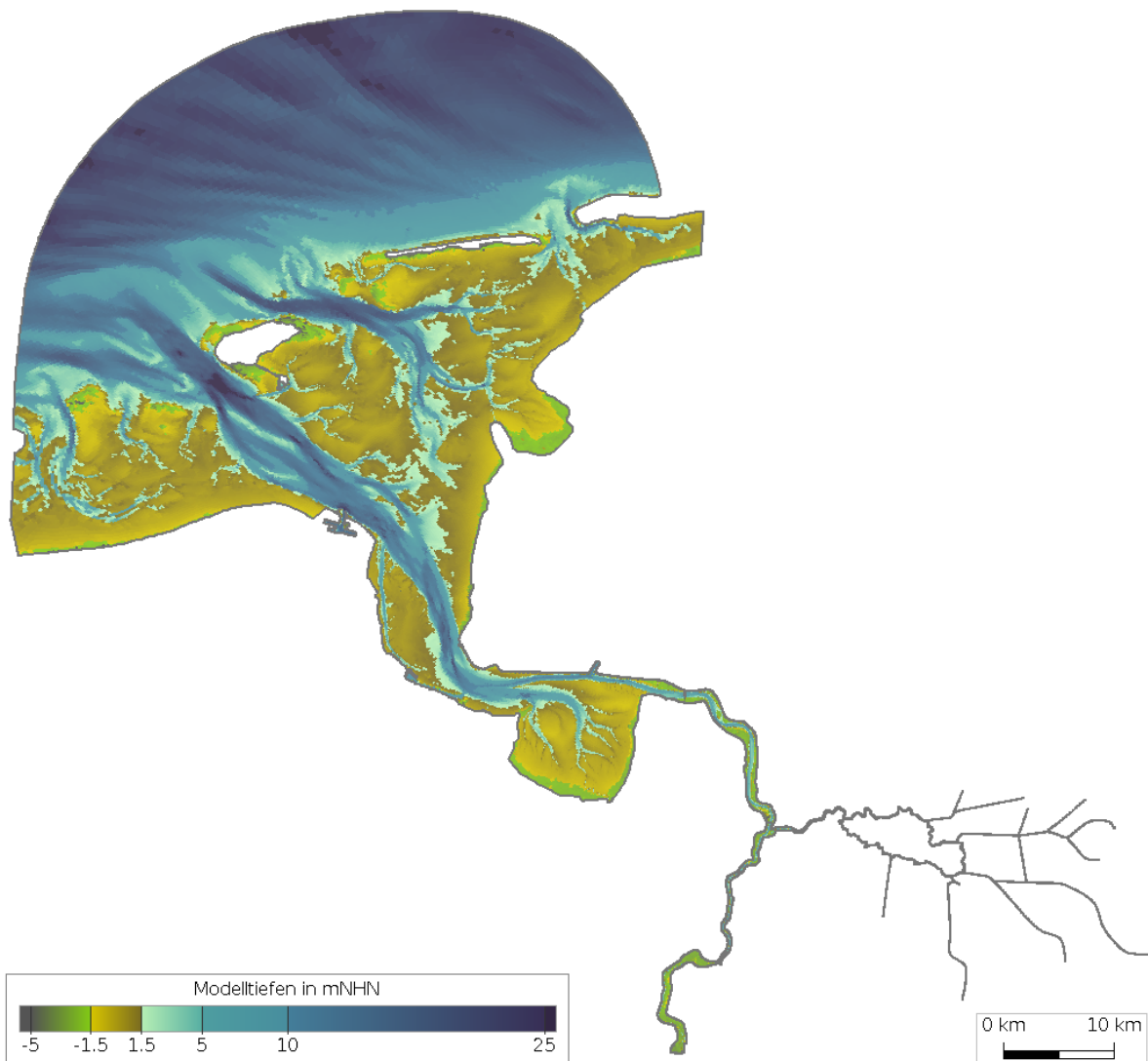


Bild 1: Das Modellgebiet des HN-Modells der Tideems von der Nordsee bis zum Wehr Herbrum inklusive der Nebenflüsse Leda und Jümme und der tidebeeinflussten Tiefs stromauf von Leda und Jümme. Der Farbverlauf gibt die Tiefenverteilung des Modells auf der Basis des DGMW 2015 wieder.

Die Bathymetrie des Gitternetzes basiert auf dem digitalen Geländemodell 2015 der Ems, das von den Firmen inphoris und smile in Zusammenarbeit mit der BfG und dem WSA Ems-Nordsee erstellt worden ist (Arbeitsgemeinschaft (ARGE) smile consult GmbH - Inphoris GmbH, 2016).

4.2.2 Horizontale und vertikale Auflösung

Das Modellgebiet ist mit einem unregelmäßigen Gitternetz aus Drei- und Viereckselementen überzogen. Dieses unregelmäßige Netz erlaubt eine an die Topographiegradienten angepasste Auflösung und ermöglicht so einen wirtschaftlichen Umgang mit Speicherplatz und Rechenzeit. Die Gesamtanzahl der Elemente beträgt in der Horizontalen etwas mehr als $221 \cdot 10^3$. Die Kantenlängen des Netzes variieren von ca. 10 m im Bereich der Fahrrinne des Dortmund-Ems-Kanals bis zu 1 km am seeseitigen Modellrand. Die häufigste Kantenlänge der Elemente beträgt ca. 30 m. Die Fläche der Elemente variiert dabei von 33 m^2 bis zu $0,5 \text{ km}^2$, wobei die häufigste Elementfläche ca. 200 m^2 beträgt. Die Vertikale wird in 37 z-Schichten von jeweils 1 m Schichtdicke aufgelöst. Daraus ergibt sich eine Diskretisierung in über 1,6 Million dreidimensionalen Zellen.

4.3 Anfangsbedingungen

Für das gesamte Modellgebiet müssen Anfangsbedingungen vorgegeben werden. Hierfür werden, wo möglich, Messungen interpoliert. Um daraus entstehende Ungenauigkeiten zu vermeiden wird das Modell für 6 Tage vor dem Analysezeitraum eingeschwungen.

4.3.1 Wasserstand / Strömungsgeschwindigkeit

Das Modell wird „kalt“ gestartet mit einheitlichem Wasserstand entsprechend der Randbedingung und ohne Strömung im Modellgebiet.

4.3.2 Salzgehaltsverteilung

Der Salzgehalt zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort ist nicht nur von intratidalen advektiven Prozessen, sondern auch von langsamer wirkenden Prozessen abhängig. So steigt z. B. der Salzgehalt im Ästuar nicht sofort mit abnehmendem Oberwasserzufluss an, sondern es wird residuell Tide für Tide Salz nach stromauf transportiert, bis sich ein neues Gleichgewicht zwischen reduziertem barotropen Druckgradienten und der baroklinen Zirkulation einstellt. Aus diesem Grund wird die Salzanfangsverteilung aus Messwerten abgeleitet.

4.3.3 Sedimentinventar

Bei Sedimenttransportuntersuchungen wird das modellierte Sedimentverhalten entscheidend durch die Anfangsverteilung des Sedimentinventars am Boden bestimmt.

Gegenwärtig wird das Sedimentinventar der Außenems und des Dollart auf der Grundlage von 1816 Sedimentproben beschrieben, die vom RIKZ für dieses Gebiet analysiert wurden. Das Sedimentinventar der Unterems wird auf der Grundlage von Bodenproben des WSA Ems-Nordsee entlang der Fahrrinne der Unter- und Außenems von Herbrum bis Ems-Kilometer 55 beschrieben. Aus diesen Daten wird für die Modellrechnungen dieser Untersuchung ein Datensatz konstruiert, der das Sedimentinventar flächenhaft mittels 2 Fraktionen für die Geschiebefracht (Grobsand und

Feinsand) und einer Fraktion für den Transport in Suspension (Schluff, Sinkgeschwindigkeit ca. 0.3 mm/s) beschreibt (s.a. Tabelle 2). Die Sedimentdichte beträgt einheitlich 2650 kg/m³, die Mächtigkeit des erodierbaren Bodens beträgt einheitlich 25 cm.

Tabelle 2: Mittlerer Korndurchmesser der verwendeten Sedimentfraktionen und Anteil am Bodenvorrat zu Beginn des Simulationszeitraums

	mittlerer Korndurchmesser (µm)	Außenems und Dollart	Unterems
Grobsand	500	6 %	0 %
Feinsand	125	73,9 %	21 %
Schluff	20	20,1 %	79 %

4.4 Randbedingungen

Ästuarmodelle sind immer nur Ausschnittsmodelle, an deren offenen Rändern zeitabhängige Randwerte für den Wasserstand oder die Strömungsgeschwindigkeit und für die transportierten Substanzen vorgegeben werden müssen. In der Regel wird ein Ästuarmodell seeseitig durch Vorgabe der Wasserspiegelauslenkung und an der oberstromseitigen Grenze durch die Vorgabe eines Zuflusses gesteuert, der über den aktuellen Wasserstand und die lokale Tiefe in Strömungsgeschwindigkeiten umgerechnet wird. An diesen Rändern müssen auch Massenkonzentrationen für Salz und Schwebstoffe vorgegeben werden.

4.4.1 Wasserstand

Entlang des Seerandes müssen die Wasserstandswerte für alle Elemente und für den gesamten Simulationszeitraum vorgegeben werden. Dies erfolgt für dieses Modell mit Hilfe der Messung am Pegel Huibertgat, denn der Modellrand ist so gewählt, dass der Standort des Pegels Huibertgat auf dem Seerand liegt.

4.4.2 Oberwasser

Der Oberwasserzufluss der Ems wird am Wehr Herbrum eingesteuert. Für das Modell werden die Tagesmittelwerte der Messung Versen (gesamt) verwendet und mit 1,1 multipliziert, um seitliche Zuflüsse zwischen Versen und Herbrum zu berücksichtigen.

Der Oberwasserzufluss von Leda und Jümme ist vom NLWKN aus der Differenz der Flut- und Ebbestromvolumen am Pegel Leer / Leda ermittelt worden und wird zu gleichen Teilen an zwei Stellen im oberstromigen Abschnitt des Leda-Jümme-Systems im Modell eingesteuert.

4.4.3 Salzgehalt

Am seeseitigen Rand wird ein konstanter Salzgehalt von 32 PSU eingesteuert, der Salzgehalt des Oberwasserzuflusses im Leda-Jümme-Gebiet beträgt konstant 0,4 PSU. Für den Salzeintrag der Ems am Wehr Herbrum werden Messungen der Messtation Herbrum des WSA Ems-Nordsee verwendet.

4.4.4 Schwebstoffgehalt

Am seeseitigen Rand und den Oberwasserzuflüssen wird ein konstanter Schwebstoffgehalt von $0,1 \text{ kg/m}^3$ für die Fraktion Schluff eingesteuert.

4.4.5 Windgeschwindigkeit

Für die Windgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche des Modells werden die Vorhersagewerte des COSMO-EU Modells (DWD) verwendet. Dazu werden die Daten mit einer Maschenweite von 7 km auf das HN-Modellgitter interpoliert.

4.4.6 Parameterwahl

Für diese Untersuchung werden die Parameter der Bodenreibung und des horizontalen Impuls- und Stoffaustausches angepasst, um eine bestmögliche Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Messungen zu erlangen. Die Ergebnisse dieser Parameterstudien und viele andere Modelleinstellungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Parameter-Einstellungen des verwendeten HN-Modells für die Ems

Parameter	HN-Modell des Ems-Ästuars
HN-Verfahren	UnTRIM 2009 gekoppelt mit SediMorph
Dimension	3D; z-Schichten; vertikale Auflösung 1 m
Zeitschritt	30 Sekunden
Horizontaler Impulsaustausch	konstant $0,2 \text{ m}^2/\text{s}$
Vertikaler Impulsaustausch	k- ϵ -Turbulenzmodell (Rodi, 1987)
Bodenreibung	Nikuradse (zeitvariabel, abhängig von der mittleren Korngröße)
Zusätzliche Reibungs-Koeffizienten	Außenems: 8 mm; Unterems: 0 mm
Salztransport	Ja
Horiz. Stoffaustausch	konstant $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$
Vertikaler Stoffaustausch	k- ϵ -Turbulenzmodell
Schwebstofftransport	Ja, eine Fraktion
- Schluff	mittl. Korndurchm. $20 \mu\text{m}$; Sinkgeschw. nach Stokes
Horiz. Stoffaustausch	konstant $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$
Vertikaler Stoffaustausch	k- ϵ -Turbulenzmodell
Geschiebetransport	Ja, zwei Fraktionen
- Feinsand	mittlerer Korndurchmesser $125 \mu\text{m}$
- Grobsand	mittlerer Korndurchmesser $500 \mu\text{m}$

5 Modellkalibrierung und -validierung für das Ems-Ästuar

Kalibrierung bezeichnet die Vorgehensweise mit der beim Anpassen verschiedener Parameter eines numerischen Modells ein möglichst naturähnliches Modellverhalten erzielt wird. Das ortsspezifische numerische Modell wird dabei noch bewusst verändert.

„Validierung“ wird der Nachweis genannt, dass die Ergebnisse eines numerischen Modells für einen gewissen Anwendungsbereich innerhalb eines bestimmten Genauigkeitsbereiches für die beabsichtigte Modellanwendung liegen. Das numerische Modell wird dabei nicht verändert.

Der Nachweis der Naturähnlichkeit muss prinzipiell für alle vom Modell simulierten Größen wie Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte und Schwebstoffkonzentrationen geführt werden. Für das Gebiet des Ems-Dollart-Ästuars stehen dazu die an den gewässerkundlichen Stationen gemessenen Daten des WSA Ems-Nordsee, des NLWKN und von niederländischer Seite (Rijkswaterstaat) zur Verfügung.

5.1 Kalibrierungs- und Validierungszeitraum

Der Untersuchungszeitraum für diese Validierung beträgt einen Spring-Nipp-Zyklus (siehe Kapitel 1.1.3). Für die vorliegende Modelltopographie, basierend auf dem DGMW des Jahres 2015, bieten sich die zusätzlichen Randwerte des gleichen Jahres an. In diesem Jahr kommen alle Zeiträume von 28 Tiden mit konsistenter Messdatenlage für eine Kalibrierung und Validierung in Frage. Für diese Untersuchung sind ein Kalibrierungs- und vier Validierungszeiträume festgelegt worden.

Die Kalibrierung für das Ems-Modell wird in einem Spring-Nipp-Zyklus mit mittleren Tidebedingungen des Jahres 2015 durchgeführt. Der Zeitraum ist durch besonders niedrigen Abfluss gekennzeichnet. Dies beruht auf der Annahme, dass ausbaubedingte Änderungen im Salzgehalt in diesen Szenarien besonders weit stromauf reichen und somit für viele Fragestellungen als kritisch angesehen werden. Die Validierungszeiträume wiederum spiegeln unterschiedliche Abflusssituationen wieder. Durch die Verwendung von besonders heterogenen Abflusssituationen kann so der Gültigkeitsbereich des Modells genauer untersucht werden. Für mittlere Jahresverhältnisse wird zusätzlich das gesamte Kalenderjahr 2015 ausgewertet.

In Bild 2 sind die ausgewählten Zeiträume und die Abflussganglinie von Versen dargestellt. Zusätzlich ist der Tidehub in Huibertgat geplottet, der sowohl das Spring-Nipp-Signal als auch jahreszeitlich und meteorologisch bedingte Variationen beinhaltet. In Bild 3 sind die Zeiträume in statistischen Größen zusammengefasst. Dabei wird deutlich, dass während des Kalibrierungszeitraums die geringsten Abflüsse herrschen. Die aufsteigende Nummerierung der Validierungszeiträume ist entsprechend steigender mittlerer und maximaler Abflüsse gewählt.

Tabelle 4: Daten der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume im Jahr 2015.

Zeitraum	Beginn	Ende
Kalibrierung	14.06 00:00	28.06 18:00
Validierung_1	30.09 03:00	14.10 20:00
Validierung_2	12.03 20:00	27.03 12:00
Validierung_3	21.01 00:00	04.02 20:00
Validierung_4	06.01 00:00	20.01 20:00

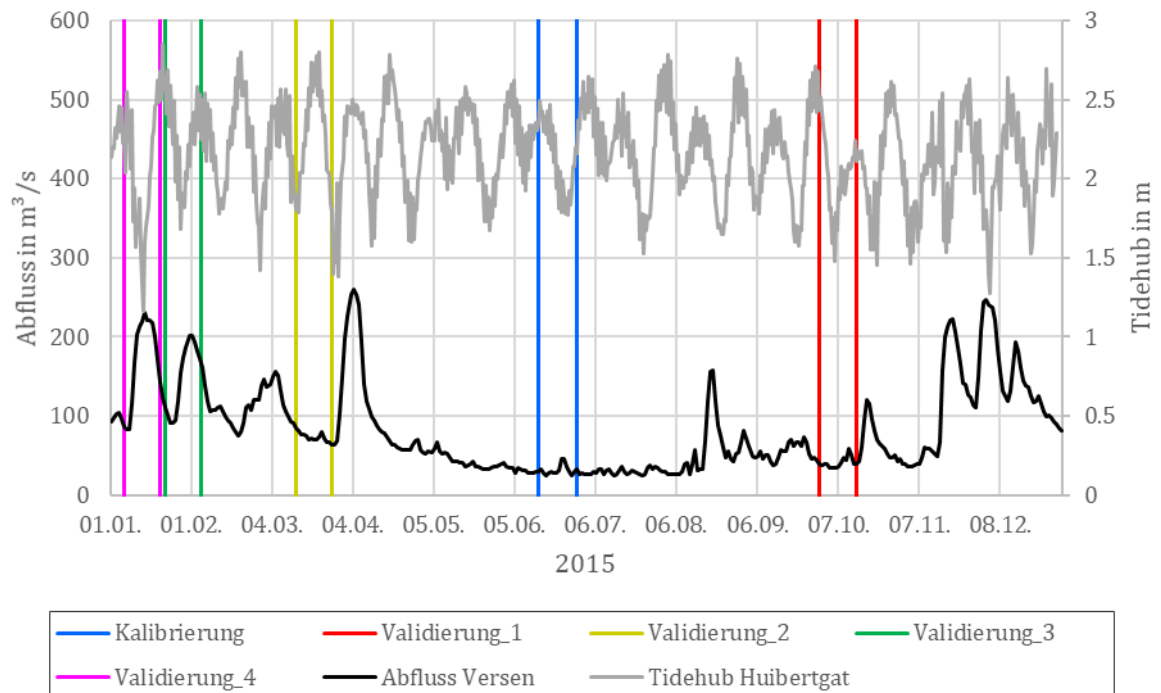


Bild 2: Kalibrierungs- und Validierungszeiträume.

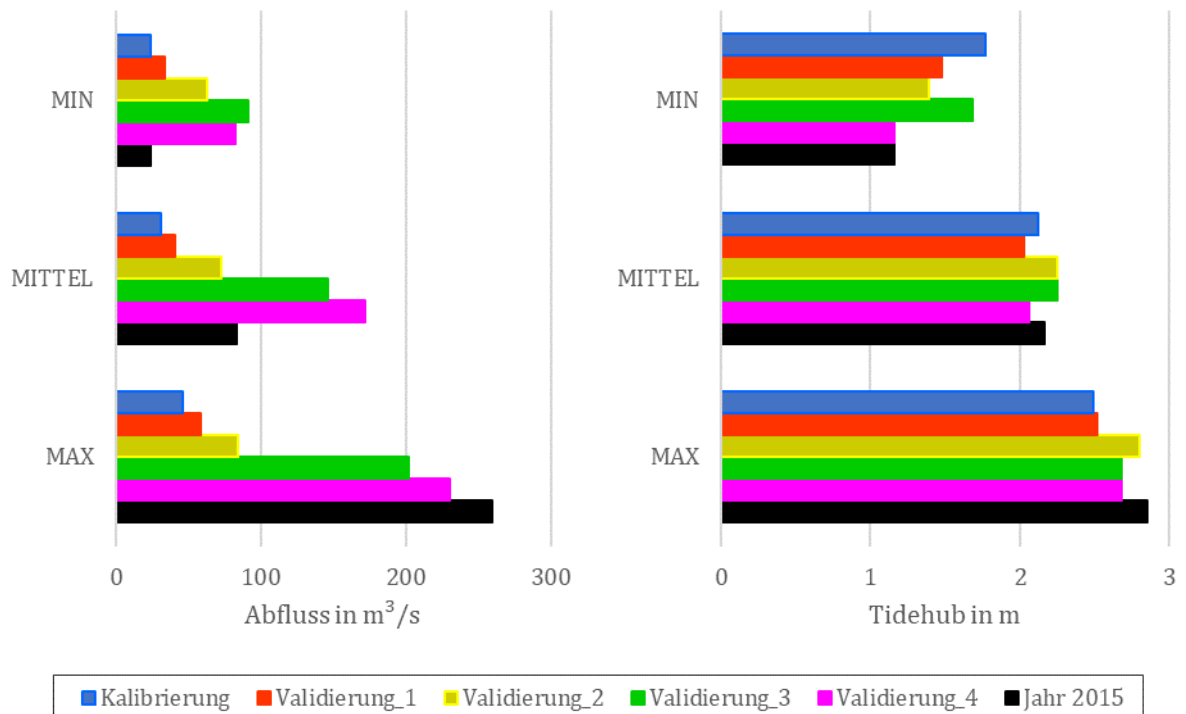


Bild 3: Statistische Werte des gemessenen Abflusses in Versen (links) und des gemessenen Tidehubs in Huibertgat (rechts) der Kalibrierungs- und Validierungszeiträume und des Jahres 2015 zum Vergleich. Dargestellt sind Minimalwerte (MIN), Mittelwerte (MITTEL) und Maximalwerte (MAX).

5.2 Analysegrößen zur Beschreibung der Modellgüte

Für die Bewertung des Modells und dessen Einstellungen ist es zwingend notwendig, Abweichungen detailliert zu dokumentieren und für die wissenschaftliche Gemeinschaft vergleichbar darzustellen. Die dazu verwendeten Analysegrößen werden hier beschrieben.

Fringer et al. (2019) fassen den Stand der Technik der hydrodynamisch-numerischen Modellverfahren zusammen und stellen fest, dass die Festlegung eines gemeinsamen Parameters der Modellgüte immer noch aussteht. Neben dem Skill-Wert nach Murphy (1988) wird die Kalibrierung von MacWilliams et al. (2015) als besonders detailliert hervorgehoben, die den Skill-Wert nach Willmott (1981) nutzt. In dieser Untersuchung klassifizieren MacWilliams et al. die erreichten Skill-Werte anhand von Referenzdaten internationaler Veröffentlichungen. Diese Klassifizierung ermöglicht einen quantitativen Vergleich anhand einer einzigen Analysegröße mit internationalen Validierungsergebnissen.

Der Skill-Wert nach Willmott (1981) berechnet sich wie folgt:

$$Skill = 1 - \left[\sum_{i=1}^N |X_{Mi} - X_{Oi}|^2 \right] / \left[\sum_{i=1}^N (|X_{Mi} - \bar{X}_O| + |X_{Oi} - \bar{X}_O|)^2 \right]$$

wo X die zu validierende Größe ist, M das Modellergebnis und O die Messung zum Zeitpunkt i . Die Residuenquadratsumme im Zähler wird ins Verhältnis zum Abweichungspotential im Nenner gesetzt und von eins abgezogen. Das Abweichungspotential wird ähnlich der Kovarianz um einen gemeinsamen „wahren“ Mittelwert \bar{X}_O gebildet. Es ergeben sich so Werte zwischen 1 für perfekte Übereinstimmung bis zum unteren Grenzwert von 0. Der untere Grenzwert kann erreicht werden, wenn z. B. alle $X_{Mi} = \bar{X}_O$ oder alle $(X_{Mi} - \bar{X}_O) = -(X_{Oi} - \bar{X}_O)$, also bei Phasenverschiebung um 180° .

Dieser Skill-Wert wird für alle zu validierenden Modellgrößen berechnet. Darüber hinaus werden spezielle Kennwerte für Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte und Schwebstoffgehalt verglichen und tabellarisch zusammengefasst.

5.2.1 Wasserstände

Für die Wasserstände werden folgende Tidekennwerte analysiert:

- mittleres Tidehochwasser (Thw)
- mittleres Tideniedrigwasser (Tnw)
- mittlerer Tidehub (Thb)
- mittlere Eintrittszeit des Tidehochwassers und Tideniedrigwassers

Die Wasserstands-Zeitreihen werden mit folgenden Parametern untersucht:

- systematische Abweichung (Bias)
- Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE)
- Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill)

5.2.2 Strömungsgeschwindigkeiten

Für die Strömungsgeschwindigkeiten werden folgende Tidekennwerte analysiert:

- mittlere Tidestromgeschwindigkeit (Tide)
- mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Flut)
- mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Ebbe)
- Verhältnis der mittleren Flutstromgeschwindigkeit zur mittleren Ebbestromgeschwindigkeit (Flut/Ebbe)

Die Strömungs-Zeitreihen werden mit folgenden Parametern untersucht:

- Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE)
- Skill-Wert nach Willmott (Skill)

5.2.3 Salzgehalte

Für die Salzgehalte werden folgende Tidekennwerte analysiert:

- mittlerer Salzgehalt (Mittel)
- maximaler Salzgehalt (Max)
- minimaler Salzgehalt (Min)
- mittlere Salzgehaltsvariation (Variation)

Die Salzgehalts-Zeitreihen werden mit folgenden Parametern untersucht:

- Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE)
- Skill-Wert nach Willmott (Skill)

5.2.4 Schwebstoffgehalt

Für Schwebstoffgehalte werden folgende Tidekennwerte analysiert:

- mittlerer Schwebstoffgehalt (Mittel)
- maximaler Schwebstoffgehalt (Max)
- minimaler Schwebstoffgehalt (Min)
- mittlere Schwebstoffgehaltsvariation (Variation)

Die Schwebstoffgehalts-Zeitreihen werden mit folgenden Parametern untersucht:

- Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE)
- Skill-Wert nach Willmott (Skill)

5.2.5 Hinweis zum Vergleich von Messungen und berechneten Größen

Um grundsätzliche Unterschiede zwischen gemessenen und modellierten Größen herauszustellen, folgen hier ein paar Hinweise.

Messungen bilden das Ergebnis der Gesamtheit der in der Natur vorkommenden Einflussfaktoren ab, während in der konzeptionellen Modellierung Prozesse vereinfacht oder vernachlässigt werden können. Ein Beispiel ist die vertikale Beschleunigung, die in diesem Modell nicht berücksichtigt ist (hydrostatische Druckapproximation).

Ein weiterer Unterschied ist die notwendige Modell-Diskretisierung für die Berechnung der Differentialgleichungen. So kommt es, dass die abgebildeten Phänomene abhängig von der Auflösung des Modells sind. Prozesse, die sich auf kleineren Skalen als dem Modell-Zeitschritt oder der

Berechnungsgitterweiten abspielen, können nicht simuliert werden. Ein Beispiel ist die Rolle der Turbulenz, die bis in kleinste Zeit- und Raumdimensionen wirkt, im Modell aber parametrisiert werden muss.

Eine andere Besonderheit gilt für die Größen der Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte und Schwebstoffgehalte. Im Gegensatz zu Wasserständen, einer nur von der horizontalen Lage abhängigen Größe, variieren diese über die Wassersäule. Die Messungen in bestimmten Wassertiefen stellen daher nur einen tiefenspezifischen Wert dar. Wenn sich mehrere Messgeräte an der gleichen Messstation befinden, wird die relative Tiefenlage mit O (Oben), M (Mitte) oder U (Unten) gekennzeichnet.

An einigen Pegeln sind die Messgeräte als Mitschwimmer befestigt. Die Angabe der Messtiefe erfolgt in diesen Fällen in Metern unter Wasseroberfläche. Das bedingt einen Vergleich mit den Modellergebnissen in verschiedenen z-Schichten, je nachdem wie sehr der Wasserspiegel schwankt. In der hier verwendeten Lösung werden die Messungen mit den vertikal gemittelten Modellergebnissen verglichen. Obwohl vertikale Schichtungen und Phasenverschiebungen so nicht dargestellt werden können, werden diesbezügliche systematische Abweichungen vereinfachend hingenommen.

5.2.5.1 Messgenauigkeit

Für den Vergleich mit Modellergebnissen ist es wichtig, die den Messungen zugrundeliegende Genauigkeit zu kennen. Diese ist einerseits geräteabhängig bestimmt, kann aber in Kombination mit der Qualität der Messinstallation und Instandhaltung nicht immer klar quantifiziert werden. Daher hier nur einige allgemeine Anmerkungen.

Um Beobachtungen in der Natur zu quantifizieren, können sehr unterschiedlich Messtechniken eingesetzt werden. Oft beruht die Quantifizierung auf Kalibrierungen des Messgeräts in Laboren. So wird der Salzgehalt anhand der Leitfähigkeit des Wassers bestimmt. Dieser anerkannte Zusammenhang, kann mittels einer empirischen Formel dargestellt werden (Lewis und Perkin, 1981). Die Gültigkeit dieser Formel ist allerdings eingeschränkt auf Salzgehalte zwischen 2 und 42 psu. Schwebstoffkonzentrationen werden analog über die gemessene Trübung berechnet. Entscheidend für die Genauigkeit der Messgeräte ist hier auch der eingestellte Messbereich. So können Messungen von stark schwankender Trübung ungenauer sein, als Messungen, die nur eine geringe Variabilität an Trübung abdecken.

5.3 Zielwerte

Die Anforderungen an die Genauigkeit eines Modells hängen maßgeblich von der spezifischen Aufgabenstellung ab. Die Anforderungen für dieses Modell sind in Kapitel 1.1.4 zusammengefasst. Um die Güte eines Modells quantifizierbar bewerten zu können, werden Zielwerte festgelegt, die Abweichungen zwischen Messung und Modellergebnis abbilden.

In Anbetracht der notwendigen Vereinfachungen eines Modells und von Messfehlern sind Abweichungen zwischen den Daten erwartungsgemäß. Die Abweichungsspanne, in der Modellergebnisse als „valide“ bewertet werden können, ist abhängig von der Aufgabenstellung, der verglichenen Größe und der Messgenauigkeit. Daher ist die Definition von allgemeinen Zielwerten für die Modellgenauigkeit impraktikabel.

Für internationale Vergleichbarkeit und einfache Interpretation mithilfe der Klassifizierung von MacWilliams et al. (2015) werden Zielwerte für Kalibrierung und Validierung anhand des Skill-Werts nach Willmott (1981) festgelegt.

Neben der von MacWilliams et al. (2015) zusammengestellten Klassifizierung für Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte werden Skill-Zielwerte für Schwebstoffgehalte anhand von erzielten Skill-Werten aus internationalen Veröffentlichungen festgelegt (Tabelle 5). So kommen Bever und MacWilliams (2013) für Schwebstoffgehalte zu Skill-Werten von 0.63 bis 0.89 und bescheinigten gute Übereinstimmung des Modells mit Messungen. Bever et al. (2018) berechnen Skill-Werte zwischen 0.54 und 0.82. Aus diesen Vergleichswerten und aufgrund erhöhter Komplexität durch zusätzliche Prozesse wie Erosion, Sedimentation, Flokkulation und Hindered Settling werden für die nachfolgenden Untersuchungen die in Tabelle 5 angegebenen Zielwerte gewählt.

Für die Bewertung der Validierungsergebnisse ist entscheidend, wie viele der Messtationen einer Messgröße, z. B. aller verglichenen Wasserstandszeitreihen, mit der Modell-Genauigkeit „Genau“ oder „Annehmbar“ abgebildet werden. Einschränkungen der geplanten Anwendungen können erforderlich sein, wenn im Modell zu viele Messtationen „Ungenau“ sind. Für das Maß der Einschränkungen ist zu beachten, ob dominante physikalische Prozesse erhalten bleiben und Randwertänderungen qualitativ plausibel abgebildet werden. Falls das der Fall ist, können die Modellergebnisse in Teilabschnitten mit „ungenauen“ Modell-Genauigkeiten nur qualitativ interpretiert werden. Die Validität des Modells bleibt in diesem Fall erhalten.

Tabelle 5: Modell-Genauigkeit nach dem Skill-Wert von Willmott (1981) für Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte und Schwebstoffgehalte. Die Bewertung ist angelehnt an MacWilliams (2015).

Modell-Genauigkeit	Wasserstände	Strömungsgeschw.	Salzgehalte	Schwebstoffgehalte	
Skill-Score	Genau	>0.975	>0.9	>0.85	>0.75
	Annehmbar	0.95 - 0.975	0.8 - 0.9	0.7 - 0.85	0.6 - 0.75
	Ungenau	<0.95	<0.8	<0.7	<0.6

5.4 Modellkalibrierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Kalibrierung detailliert dargestellt. Die Auswertung für die Validierungszeiträume geschieht im Anschluss als Zusammenfassung der hier benutzten Kennwerte.

5.4.1 Wasserstände

In Bild 4 sind die 29 Positionen der verfügbaren und ausgewerteten Wasserstandspegel im Modellgebiet eingezeichnet. Bedingt durch mehrmonatige Ausfälle der Messungen im Jahr 2015 werden die Pegel Herbrum und Memmert nicht für die Kalibrierung und Validierung verwendet.

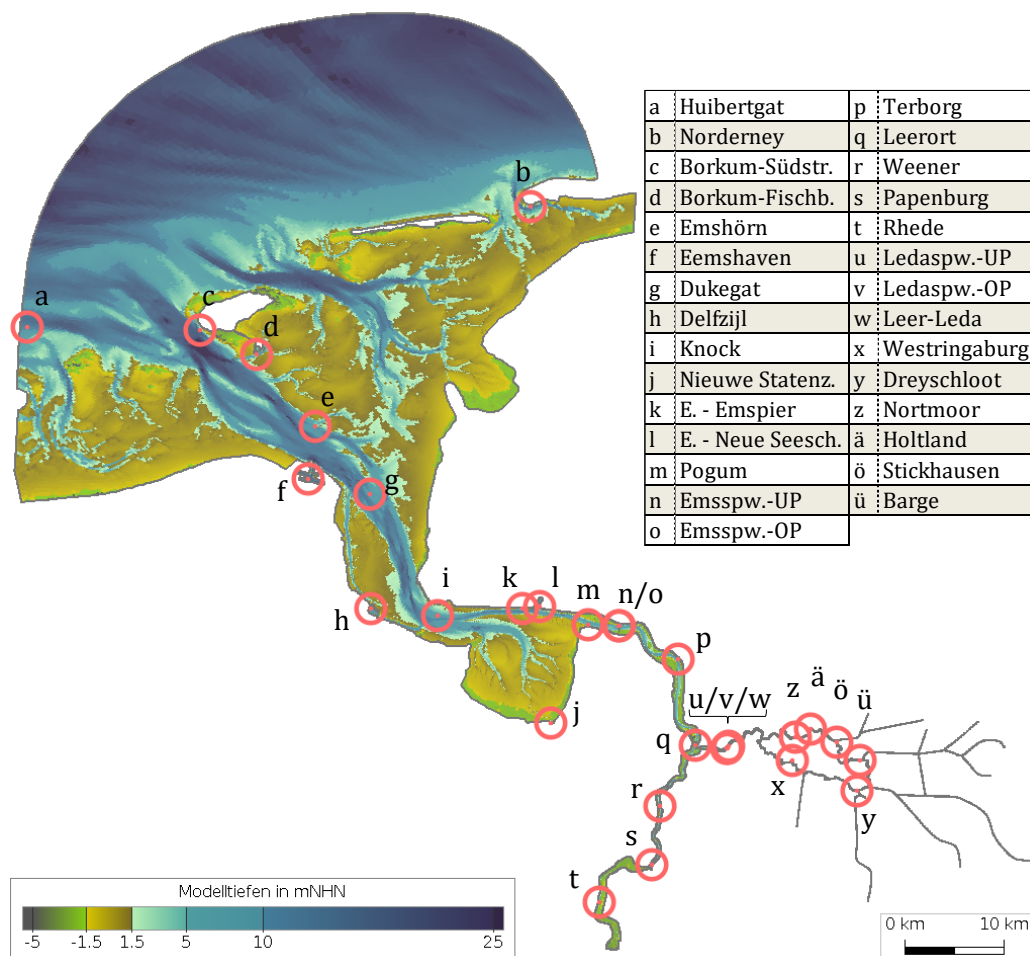


Bild 4: Lage der analysierten Wasserstandspegel im Ems-Ästuar.

Exemplarisch werden in den folgenden Bildern die gemessenen und modellierten Wasserstände an repräsentativen Pegeln für die Außenems (Emshörn), das Emder Fahrwasser (Emden – Espier) und die Unterems (Papenburg) dargestellt. Die Daten können in den Zeitreihen des gesamten Kalibrierungszeitraums kaum unterschieden werden. In der Vergrößerung eines Tages können geringe Unterschiede in Hoch-, Niedrigwasser und Phase ausgemacht werden, die sich im Streudiagramm widerspiegeln.

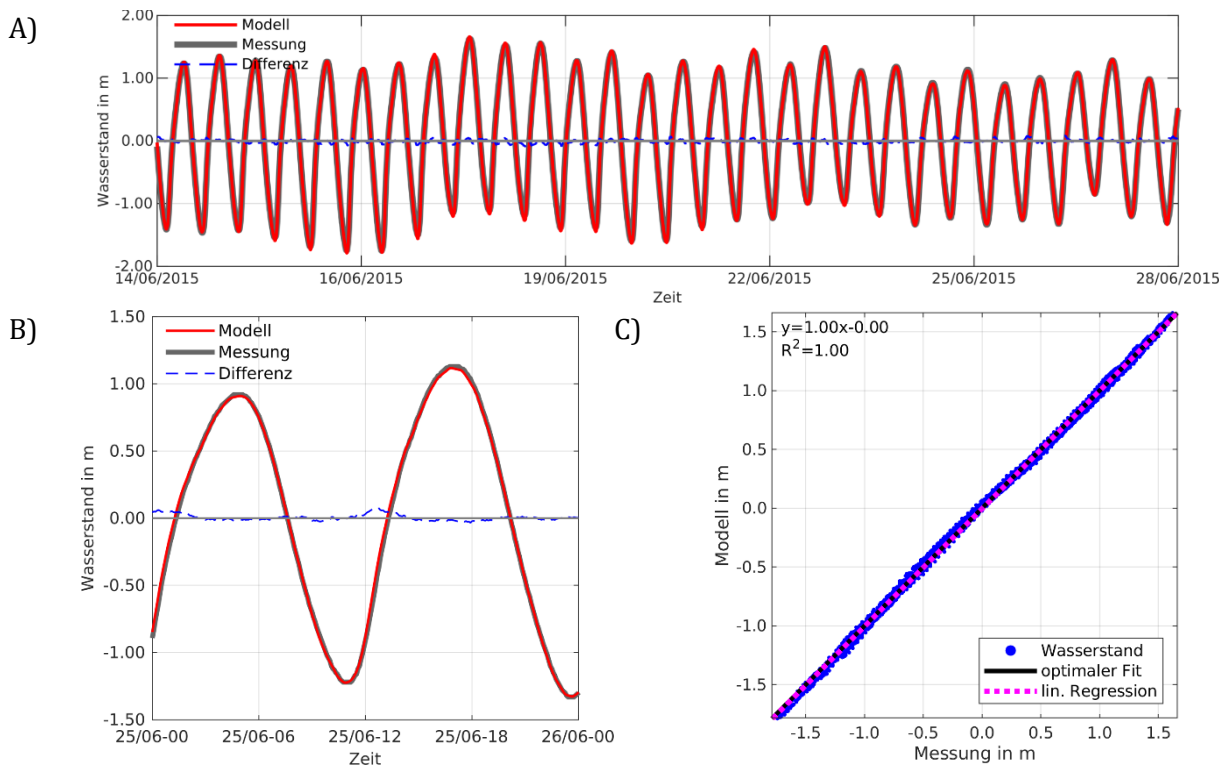


Bild 5: Gemessene und modellierte Wasserstände am Pegel Emshörn. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C).

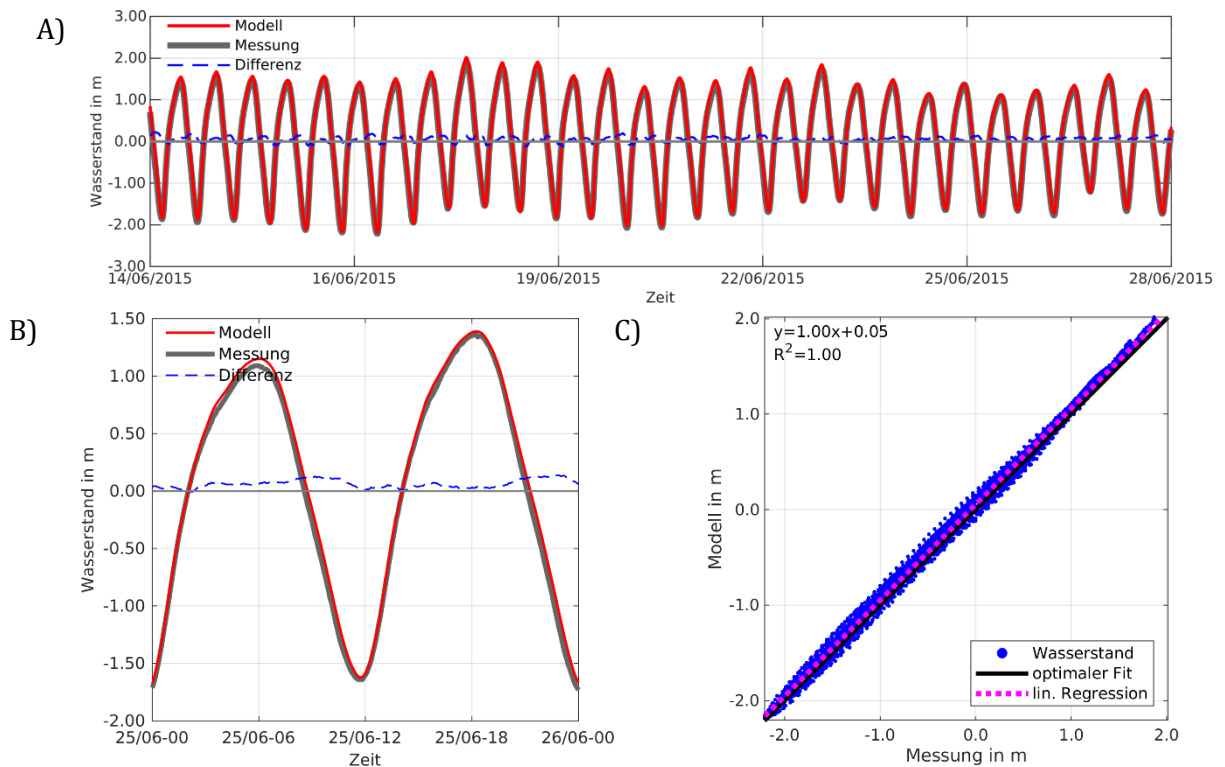


Bild 6: Gemessene und modellierte Wasserstände am Pegel Emden – Emspier. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C).

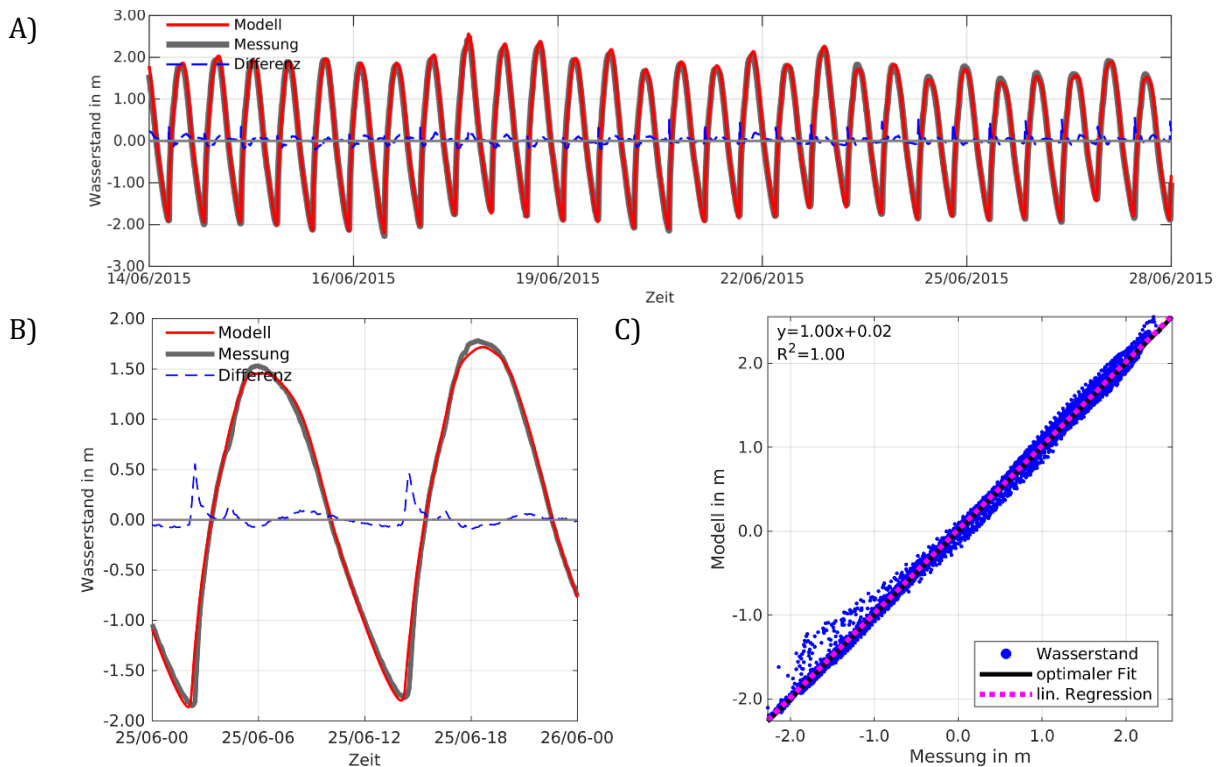


Bild 7: Gemessene und modellierte Wasserstände am Pegel Papenburg. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C).

Um eine quantitative Beurteilung der Pegel zu ermöglichen, sind in Tabelle 6 Kennwerte des Wasserstands dargestellt. Die berechneten Kennwerte sind in Kapitel 5.2.1 beschrieben.

Anhand der Zielwerte für Wasserstände aus Tabelle 5 werden die meisten Pegel „genau“ vom Modell wiedergegeben. Einzig Dreyschloot und Barge im oberstromigen Teil des Leda-Jümme-Systems werden als „ungenau“ klassifiziert. Der hier schon deutlich abgeschwächte Tidehub verringert das Abweichungspotential (Definition in Kapitel 5.2). So können bereits geringe absolute Abweichungen von 11-13 cm im RMSE zu einem „ungenauen“ Skill-Wert führen.

Bei den in Bild 5, Bild 6 und Bild 7 dargestellten repräsentativen Pegeln, bestätigt sich für Emshörn eine sehr gute Übereinstimmung der Daten, die durch Rundung zu einem perfekten Skill-Wert berechnet wird. In Emden kommen Abweichungen insbesondere im Hochwasser zustande, das um 8 cm im Mittel überschätzt wird. Die stark deformierte Tidekurve in Papenburg (siehe Bild 7), mit Plateaubildung um das Tidehochwasser und kurzer Stauwasserdauer bei Ebbestromkenterung, bildet das Modell insgesamt „genau“ ab, mit erkennbaren Phasenabweichungen im Bereich des Tideniedrigwassers.

Tabelle 6: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Kalibrierung. Mittleres Tidehochwasser (Thw), mittleres Tideniedrigwasser (Tnw) und mittlerer Tidehub (Thb) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Mittlere Abweichung der Eintrittszeit (Eintritt) jeweils für Tidehochwasser (Δ Thw) und Tideniedrigwasser (Δ Tnw). Negative Abweichungen bedeuten eine frühere Modelleintrittszeit. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als systematische Abweichung (Bias), Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill).

Pegel	Thw		Tnw		Thb		Eintrittszeit		Zeitreihe		
	cmNHN		cmNHN		cmNHN		min		cm		-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Δ Thw	Δ Tnw	Bias	RMSE	Skill
Huibertgat	102	0	-114	0	216	0	4	1	0	1	1.000
Norderney	122	2	-125	-10	246	12	-2	-5	6	13	0.994
Borkum-Südstr.	102	10	-128	6	230	3	4	9	8	9	0.997
Borkum-Fischb.	113	6	-125	-2	238	7	9	11	3	5	0.999
Emshörn	123	1	-133	-3	256	5	5	6	0	3	1.000
Eemshaven	122	7	-138	-3	259	10	-5	2	3	6	0.999
Dukegat	127	4	-144	-4	271	8	0	3	1	5	0.999
Delfzijl	140	4	-166	-4	306	8	2	1	1	5	0.999
Knock	141	0	-159	-9	300	9	6	5	-2	6	0.999
Nieuwe Statenz.	158	4	-148	-4	305	8	4	12	-2	24	0.988
E. - Emspier	145	8	-178	2	323	7	8	7	5	8	0.999
E. - Neue Seesch.	146	10	-181	3	327	7	10	8	6	9	0.998
Pogum	155	6	-178	-2	332	8	8	7	4	7	0.999
Emssp.-UP	161	3	-175	-4	336	8	7	4	2	6	0.999
Emssp.-OP	162	2	-175	-5	337	7	5	4	1	5	0.999
Terborg	171	2	-177	-7	347	9	9	3	0	6	0.999
Leerort	180	2	-183	1	363	1	16	1	1	6	0.999
Weener	182	5	-189	4	371	1	23	0	4	8	0.999
Papenburg	187	3	-188	0	375	3	32	-5	2	9	0.999
Rhede	190	3	-178	-2	369	5	36	-12	0	12	0.998
Ledaspw.-UP	178	5	-164	1	342	4	9	2	0	8	0.999
Ledaspw.-OP	177	4	-168	5	344	-1	12	1	1	8	0.999
Leer-Leda	178	2	-165	1	343	1	10	3	1	9	0.998
Westringaburg	151	17	-55	0	206	17	8	1	9	11	0.993
Dreyschloot	128	4	22	12	106	-8	21	14	6	13	0.965
Nortmoor	170	-2	-52	-19	222	17	1	-2	-7	10	0.996
Holtland	161	1	-43	-11	203	13	11	-1	-2	7	0.997
Stickhausen	150	3	-19	-5	169	8	3	-2	0	7	0.996
Barge	124	0	20	9	105	-9	22	2	5	11	0.971

5.4.2 Strömungsgeschwindigkeiten

In Bild 8 sind die 14 Positionen der verfügbaren und ausgewerteten Strömungsmessgeräte im Modellgebiet eingezeichnet. Bedingt durch mehrmonatige Ausfälle der Messungen im Jahr 2015 werden die Pegel Borkum Südstrand und Weekeborg nicht für die Kalibrierung und Validierung verwendet. Die Strömungsgeschwindigkeit wird an den meisten Pegeln unter Einsatz von mit-schwimmenden Messgeräten gemessen. Die verwendete Methodik zum Vergleich mit Modellergebnissen ist in Kapitel 5.2.5 erläutert.

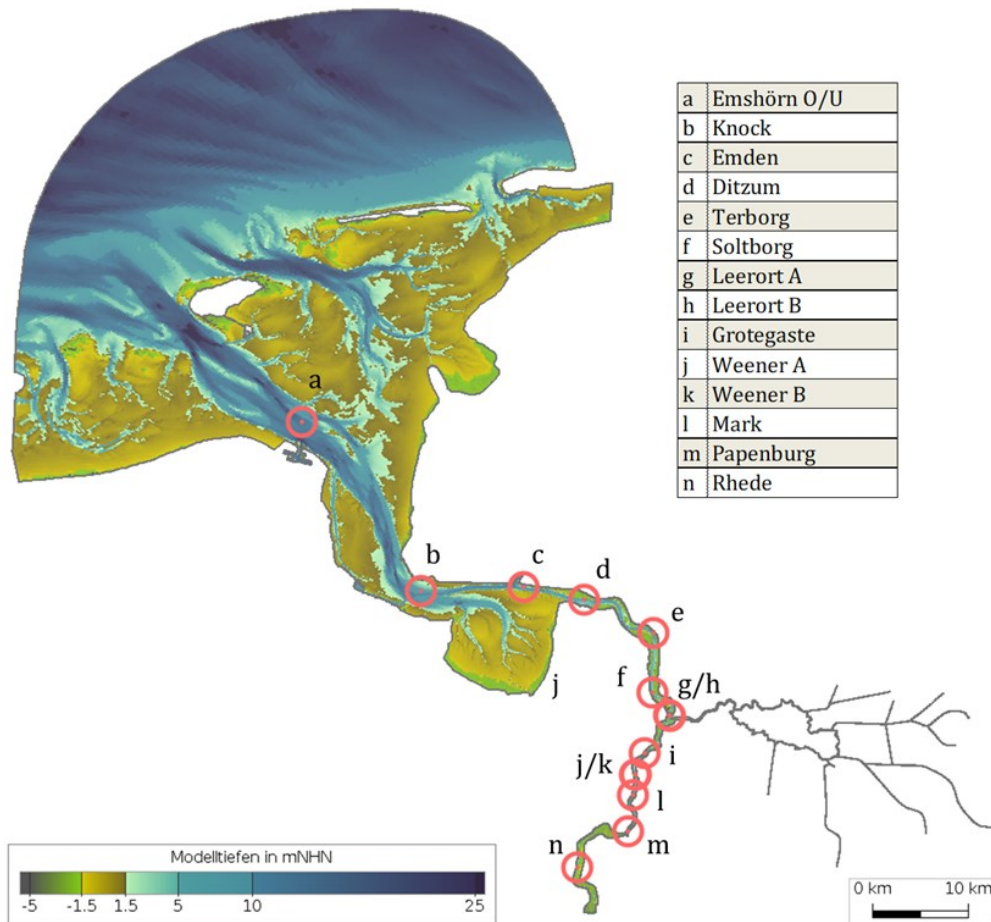


Bild 8: Lage der analysierten Strömungsmessgeräte im Ems-Ästuar.

Exemplarisch werden in den folgenden Bildern die gemessenen und modellierten Strömungsgeschwindigkeiten an repräsentativen Pegeln für die Außenems (Emshörn-O), das Emders Fahrwasser (Emden) und die Unterems (Papenburg) dargestellt. Der stetige Verlauf der Modellergebnisse im Vergleich zu den unruhigen Messkurven ergibt sich aus der Parametrisierung der Turbulenz in den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen. Ansonsten zeigen Messungen und Modellergebnisse ein sehr ähnliches Phasenverhalten. So sind Flut- und Ebbestrom in beiden Datensätzen charakteristisch zu unterscheiden. Besonders deutlich wird dies anhand des kurzen und stärkeren Flutstroms in Papenburg. In der Magnitude gibt es teilweise größere Abweichungen. Neben im Modell nicht aufgelösten Zeit- und Raumskalen können auch die Messdaten mit Fehlern behaftet sein. Messfehler sind beispielsweise in Emshörn ab dem 21.06.2015 eine mögliche Erklärung für plötzlich abnehmende Strömungsmaxima.

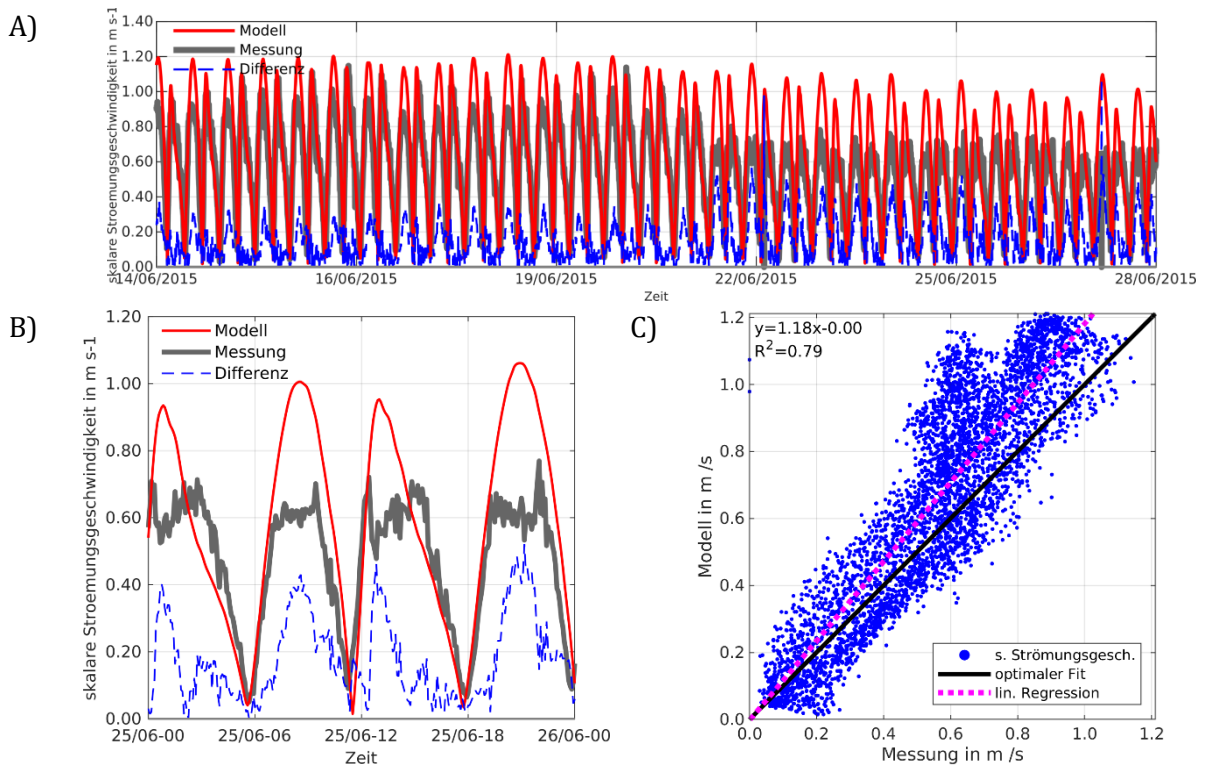


Bild 9: Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten am Pegel Emshorn-O. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

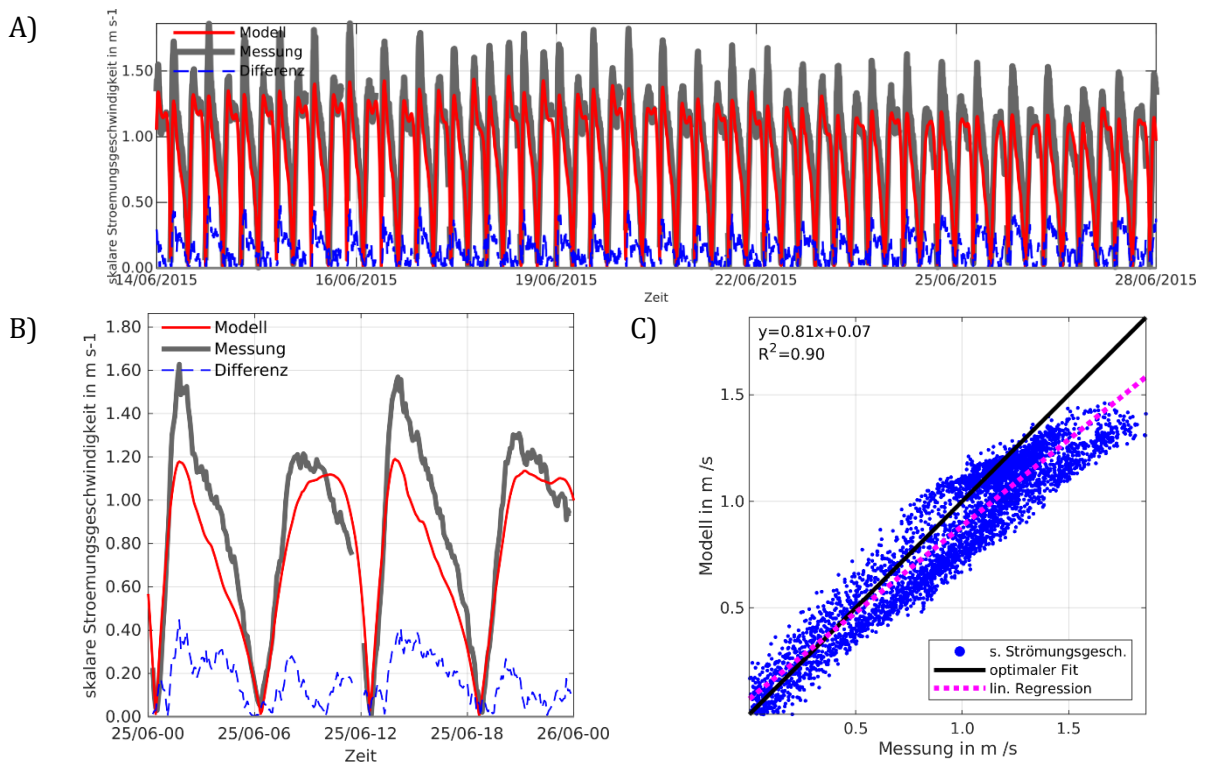


Bild 10: Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten am Pegel Emden. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

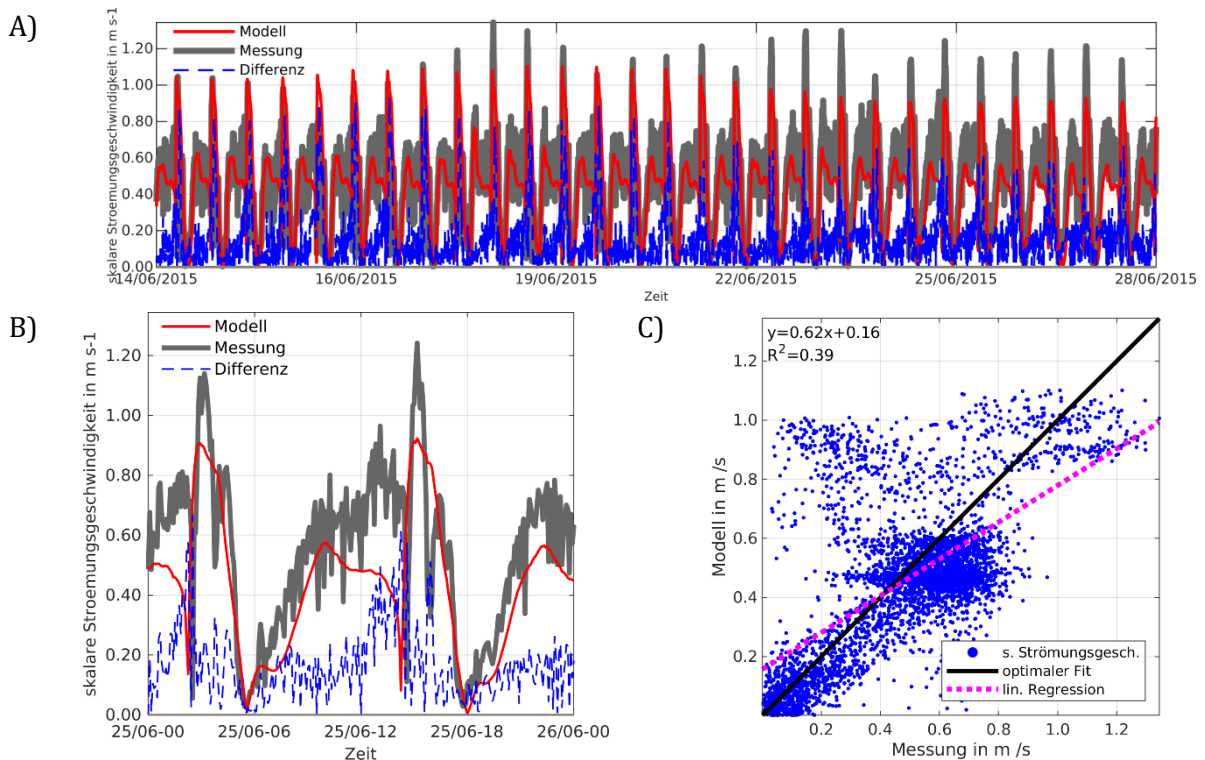


Bild 11: Gemessene und modellierte Strömungsgeschwindigkeiten am Pegel Papenburg. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

Um eine quantitative Beurteilung der Pegel zu ermöglichen, sind in Tabelle 7 Kennwerte der Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die berechneten Kennwerte sind in Kapitel 5.2.2 beschrieben. Anhand der Zielwerte für Strömungsgeschwindigkeiten aus Tabelle 5 werden die meisten Pegel „annehmbar“ getroffen. Einzig Leerort_B und Weener_A, in der Unterems werden als „ungenau“ klassifiziert.

Bei den in Bild 9, Bild 10 und Bild 11 dargestellten repräsentativen Pegeln ist am Pegel Emshörn-O zu vermuten, dass die Abweichungen in der zweiten Hälfte des Analysezeitraums zu dem insgesamt nur „annehmbaren“ Skill-Wert führen. Pegel Emden wird „genau“ getroffen, mit Abweichungen besonders im mittleren Flutstrom, wie in Bild 10 bereits zu erkennen. Am Pegel Papenburg zeigt sich, dass der mittlere Ebbestrom leicht unterschätzt wird.

*Tabelle 7: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Kalibrierung. Mittlere Tidestromgeschwindigkeit (Tide), mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Flut), mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Ebbe) und Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit (Flut/Ebbe) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer).*

Messstation	Tide		Flut		Ebbe		Flut/Ebbe		Zeitreihe	
	m/s		m/s		m/s		-		m/s	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Emshörn-O*	0.6	0.0	0.6	0.0	0.6	0.1	1.0	-0.2	0.2	0.899
Emshörn-U	0.5	0.1	0.5	0.1	0.5	0.2	1.0	-0.1	0.2	0.835
Knock*	0.8	0.0	0.9	-0.2	0.6	0.1	0.2	0.9	0.2	0.894
Emden*	0.9	-0.1	0.9	-0.2	0.9	0.0	1.0	-0.2	0.2	0.951
Ditzum*	0.7	0.0	0.8	-0.1	0.7	0.0	1.1	-0.2	0.1	0.969
Terborg*	0.8	-0.2	0.9	-0.4	0.7	-0.1	1.3	-0.4	0.3	0.818
Soltborg-O*	0.8	-0.3	0.8	-0.2	0.8	-0.4	1.0	0.3	0.2	0.827
Leerort_A*	0.8	-0.2	0.7	-0.1	0.8	-0.2	0.9	0.2	0.2	0.879
Leerort_B*	0.7	-0.2	0.7	-0.3	0.7	-0.2	1.1	-0.3	0.3	0.768
Grotegaste*	0.6	0.0	0.8	-0.2	0.4	0.1	2.5	-1.1	0.3	0.859
Weener_A*	0.6	-0.2	0.7	-0.3	0.5	-0.2	1.4	0.1	0.3	0.792
Weener_B*	0.4	0.1	0.6	-0.1	0.3	0.2	2.2	-1.0	0.2	0.814
Mark*	0.5	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	1.2	0.0	0.2	0.829
Papenburg*	0.5	0.0	0.5	0.1	0.5	-0.1	1.1	0.3	0.2	0.812
Rhede*	0.3	0.1	0.3	0.2	0.3	0.0	1.2	0.4	0.2	0.810

5.4.3 Salzgehalte

In Bild 12 sind die 22 Positionen der verfügbaren und ausgewerteten Leitfähigkeitsmessgeräte im Modellgebiet eingezeichnet. Aus der Leitfähigkeit kann der Salzgehalt anhand empirischer Formeln bestimmt werden. Bedingt durch mehrmonatige Ausfälle der Messungen im Jahr 2015 wird der Pegel Huibertgat nicht für die Kalibrierung und Validierung verwendet. Die Messstationen Terborg und Leerort_B und Papenburg des WSV sind aufgrund der starken Ähnlichkeit mit nahelegenden Messstationen nicht berücksichtigt.

Die Leitfähigkeit wird an vielen Pegeln unter Einsatz von mitschwimmenden Messgeräten gemessen. Die verwendete Methodik zum Vergleich mit Modellergebnissen ist in Kapitel 5.2.5 erläutert.

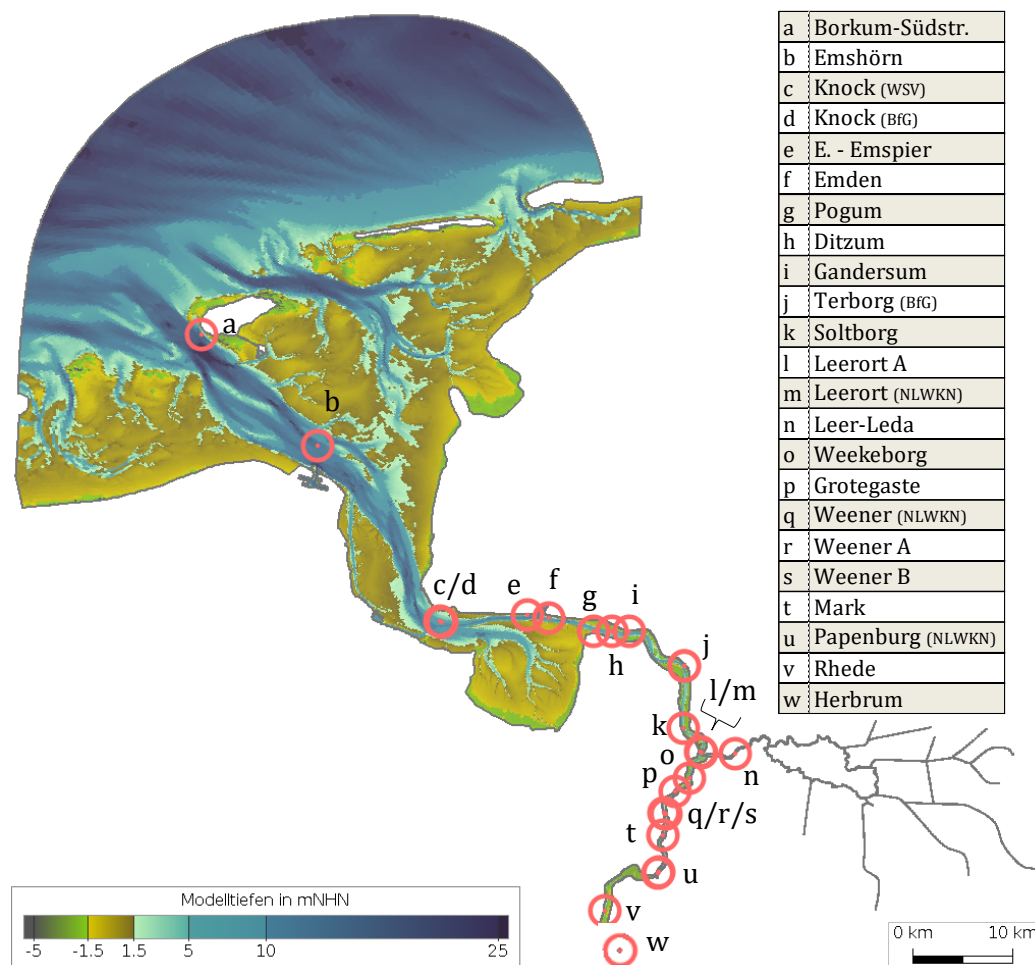


Bild 12: Lage der analysierten Leitfähigkeitsmessgeräte im Ems-Ästuar.

Exemplarisch werden in Bild 13, Bild 14 und Bild 15 die gemessenen und modellierten Salzgehalte an repräsentativen Pegeln für die Außenems (Emshörn-O), das Emders Fahrwasser (Emden) und die Unterems (Papenburg) dargestellt. Messungen und Modellergebnisse zeigen Schwankungen um einen Mittelwert in ähnlicher Größenordnung. Die Salzgehaltsvariation ist in Emden am größten und nimmt in Richtung Emshörn und Papenburg ab. Während am Pegel Emshörn der Salzgehalt vorrangig von Randwerten am offenen Seerand bestimmt wird, sind die Modellergebnisse in Papenburg besonders sensibel für Veränderungen im Abfluss. Über die Umrechnung aus der Leitfähigkeit wird hier auch ein schwaches Tidesignal registriert, das im Modell kaum noch zu erkennen ist.

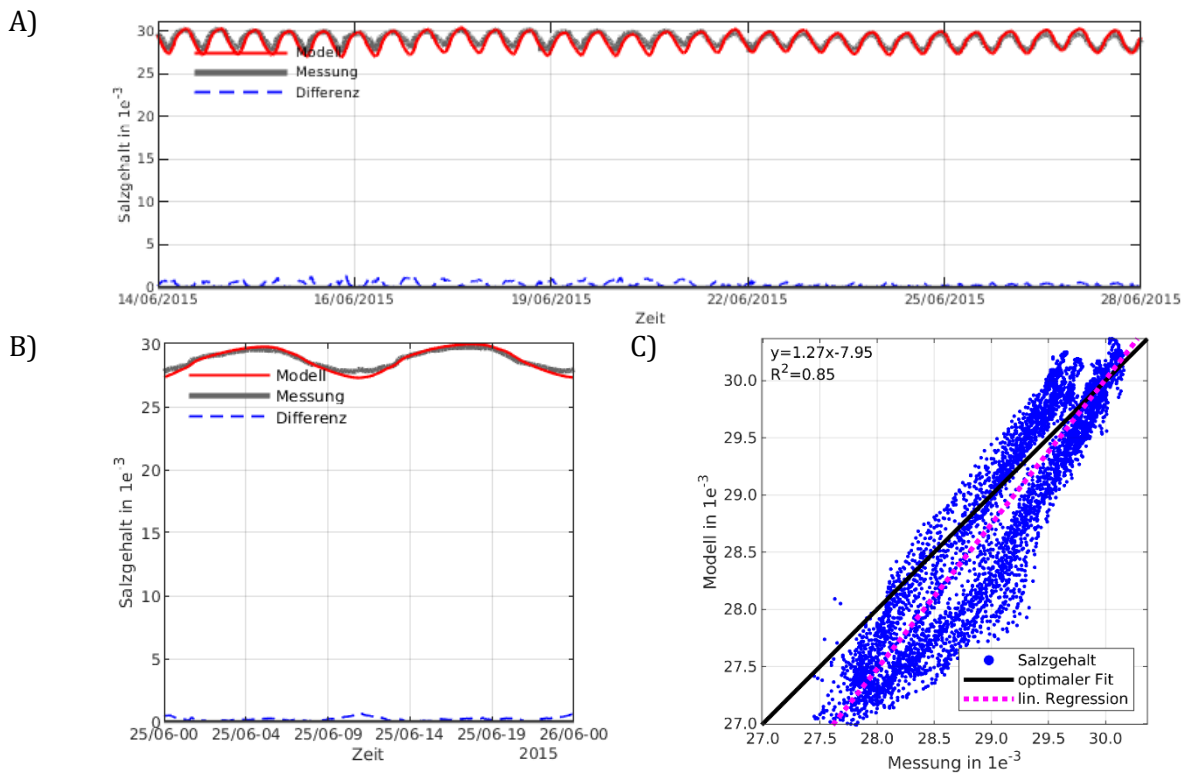


Bild 13: Gemessene und modellierte Salzgehalte am Pegel Emshörn. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

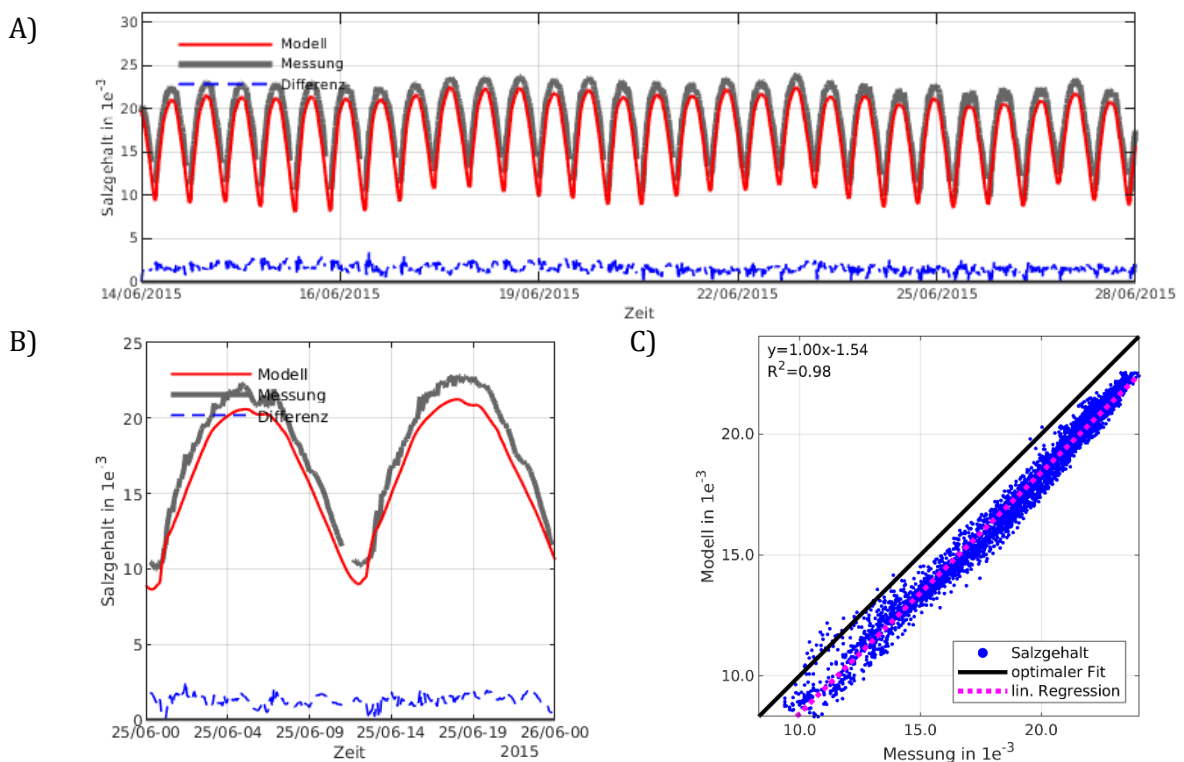


Bild 14: Gemessene und modellierte Salzgehalte am Pegel Emden. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

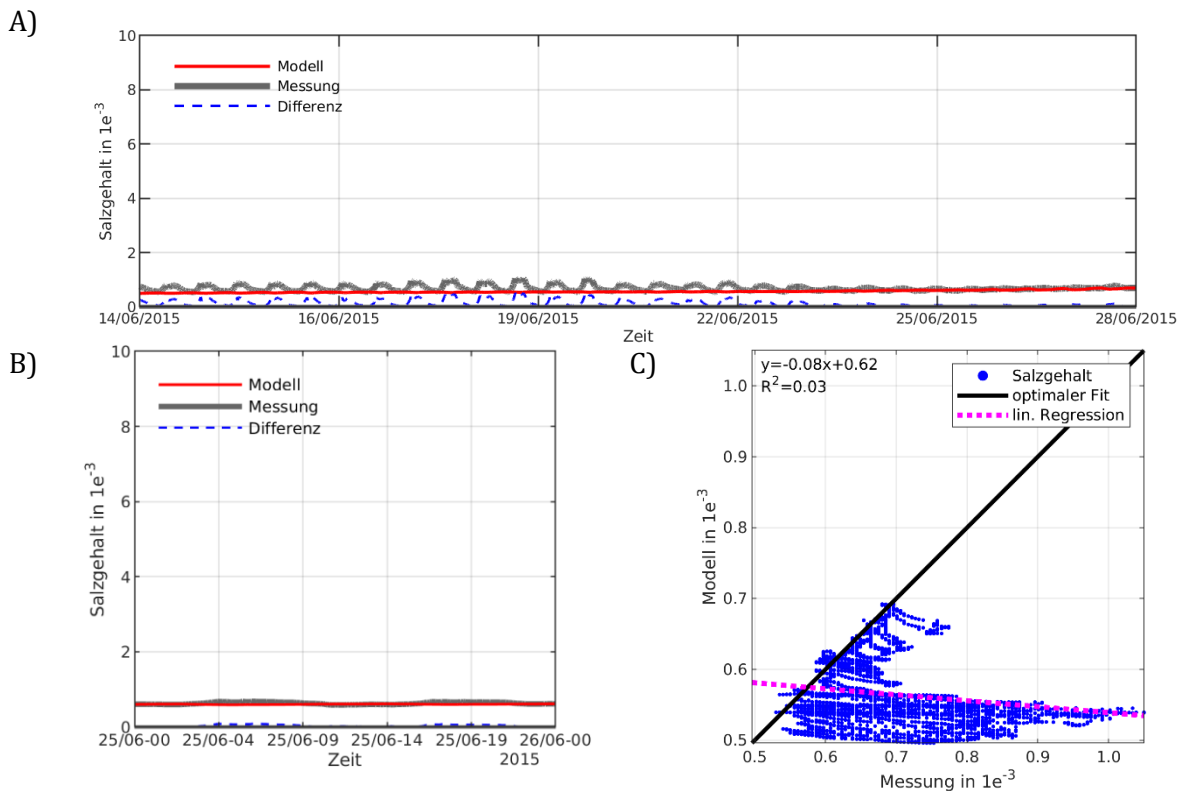


Bild 15: Gemessene und modellierte Salzgehalte am Pegel Papenburg. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

Um eine quantitative Beurteilung der Pegel zu ermöglichen, sind in Tabelle 8 Kennwerte der Salzgehalte dargestellt. Anhand der Zielwerte für Salzgehalte aus Tabelle 5 werden die meisten Pegel „ungenau“ getroffen. Der Übergang von „genauen“ zu „ungenauen“ Werten befindet sich zwischen den Pegeln Terborg und Soltborg. Auffällig in diesem Emsabschnitt ist der starke horizontale Gradient in den Kennwerten. Sowohl maximale als auch minimale Salzgehalte sind in Soltborg etwa halb so groß wie in Terborg, mit einer deutlich geringeren Variation. Weiter stromauf werden Salzgehalte zunehmend unterschätzt, was zu den „ungenauen“ Skill-Werten führt.

Bei den in Bild 13, Bild 14 und Bild 15 dargestellten, repräsentativen Pegeln wird der Pegel Emshörn-O durch den Skill-Wert als „genau“ getroffen klassifiziert. Auch der Pegel Emden wird „genau“ getroffen mit Abweichungen im mittleren Salzgehalt, wie in Bild 14 bereits zu erkennen. Am Pegel Papenburg zeigt sich, dass auch kleine absolute Abweichungen zu einem niedrigen Skill-Wert führen, wenn das Abweichungspotential entsprechend noch geringer ist. Bei den Kennwerten mit solch kleiner Variation spielen Rundungseffekte auch eine Rolle. Der maximale modellierte Salzgehalt in Papenburg erscheint daher in Tabelle 8 kleiner als der mittlere Salzgehalt.

Tabelle 8: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Kalibrierung. Mittlerer Tidesalzgehalt (Mittel), maximaler Tidesalzgehalt (Max), minimaler Tidesalzgehalt (Min), mittlere Tidesalzgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	‰		‰		‰		‰		‰	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Borkum-Südstr.	**									
Emshörn-O*	29.2	-0.4	30.0	0.0	27.8	-0.5	2.2	0.5	0.5	0.919
Emshörn-U	28.9	0.4	27.7	-0.4	1.9	0.7	0.4	0.9	0.4	0.946
Knock (WSV)*	23.8	-0.8	25.8	-0.4	21.2	-1.4	4.6	1.0	1.0	0.924
Knock (BfG)	24.3	-1.3	26.6	-1.2	21.6	-1.9	5.0	0.7	1.4	0.875
E. - Emspier	18.3	0.2	23.3	-0.7	12.1	-0.2	11.2	-0.5	2.2	0.916
Emden*	18.6	-1.6	23.1	-1.5	11.2	-1.7	11.9	0.2	1.7	0.958
Pogum	15.4	-1.4	21.6	-2.1	7.1	-0.3	14.6	-1.7	1.6	0.972
Ditzum*	13.6	-1.6	19.7	-1.7	5.5	-1.6	14.2	-0.1	1.7	0.972
Gandersum-O*	**									
Gandersum-U	**									
Terborg (BfG)	6.2	-1.7	11.0	-1.8	3.1	-2.0	7.9	0.2	1.8	0.912
Soltborg-O*	3.5	-1.6	4.5	-0.7	2.1	-1.5	2.4	0.9	1.8	0.593
Soltborg-M	3.2	-1.3	3.8	0.1	2.2	-1.7	1.5	1.8	1.7	0.521
Soltborg-U	3.3	-1.3	3.8	0.1	2.4	-1.9	1.3	2.0	1.8	0.474
Leerort_A*	3.1	-2.0	4.9	-2.7	1.1	-0.6	3.9	-2.1	2.1	0.613
Leerort (NLWKN)	3.2	-2.0	4.9	-2.9	1.1	-0.7	3.8	-2.1	2.2	0.597
Leer-Leda*	2.4	-1.8	4.2	-3.0	0.4	-0.2	3.8	-2.8	2.1	0.579
Weekeborg-O*	2.2	-1.4	3.3	-2.1	0.9	-0.5	2.4	-1.6	1.5	0.534
Weekeborg-M	2.0	-1.3	3.3	-2.1	0.9	-0.4	2.5	-1.7	1.4	0.546
Weekeborg-U	2.1	-1.4	2.6	-1.4	1.2	-0.7	1.4	-0.7	1.4	0.460
Grotegaste*	2.0	-1.4	3.5	-2.7	0.7	-0.2	2.9	-2.5	1.7	0.538
Weener (NLWKN)	1.3	-0.7	2.2	-1.5	0.6	-0.1	1.6	-1.4	0.9	0.508
Weener_A*	1.5	-1.0	2.7	-2.1	0.6	-0.2	2.1	-1.9	1.3	0.508
Weener_B*	1.5	-0.9	2.6	-2.0	0.6	-0.1	2.0	-1.9	1.2	0.511
Mark*	1.1	-0.6	2.0	-1.5	0.6	-0.1	1.4	-1.3	0.8	0.482
Papenburg (NLWKN)	0.7	-0.1	0.8	-0.3	0.6	0.0	0.3	-0.2	0.2	0.458
Rhede*	0.5	0.1	0.5	0.0	0.2	0.4	0.3	-0.3	0.2	0.570
Herbrum*	0.6	0.0	0.6	0.0	0.5	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.959

5.4.4 Schwebstoffgehalt

In Bild 16 sind die 9 Positionen der verfügbaren Trübungsmessgeräte im Modellgebiet eingezeichnet. Aus der Trübung kann der Schwebstoffgehalt anhand empirischer Formeln bestimmt werden. Entsprechend der Anforderungsdefinition in Kapitel 1.1.4 wird nur der Ästuar-Abschnitt ohne dominantes Flüssigschlickvorkommen (Pegel a-e) in der Kalibrierung analysiert, für den Zielwerte definiert wurden (Kapitel 5.3).

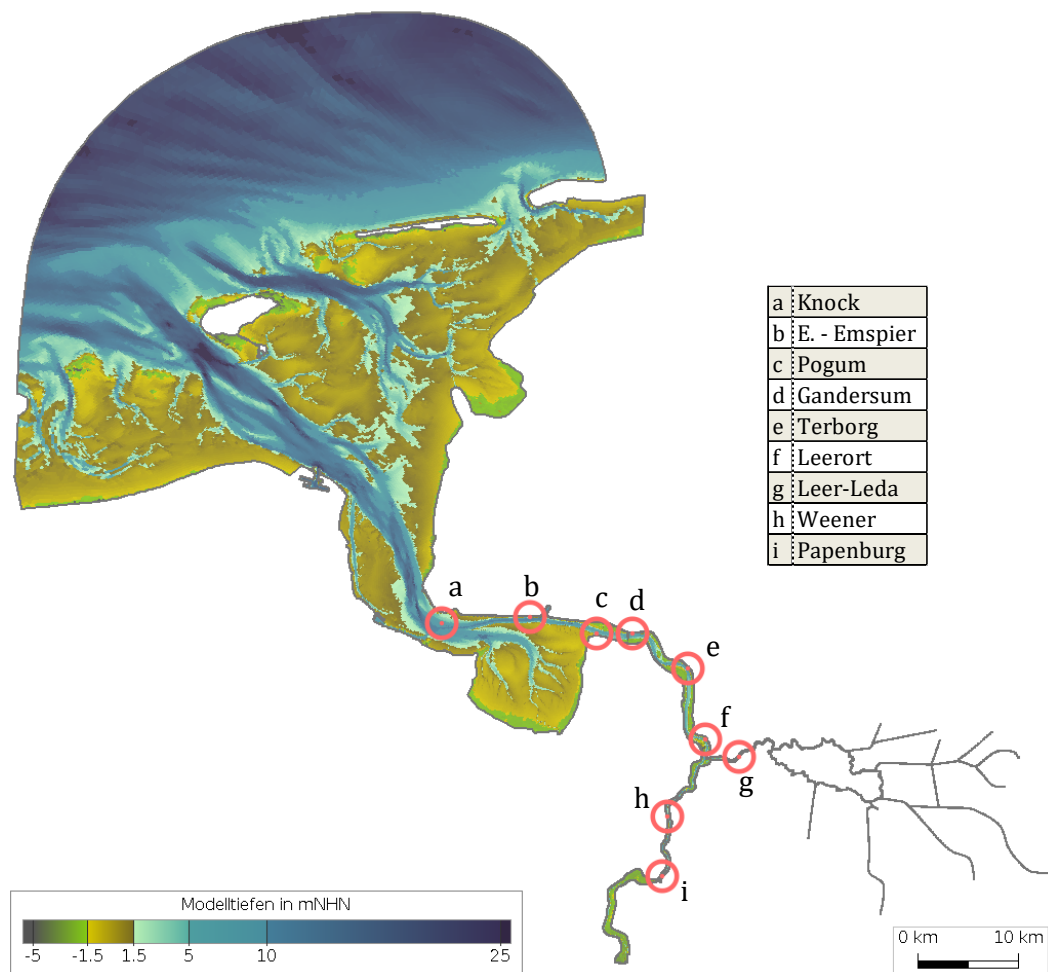


Bild 16: Lage der analysierten Trübungsmessgeräte im Ems-Ästuar.

Exemplarisch werden in Bild 17 und Bild 18 die gemessenen und die modellierten Schwebstoffgehalte an repräsentativen Pegeln für die Außenems (Knock) und die untere Unterems (Gandersum) dargestellt.

Der Mittelwert am Pegel Knock wird gut getroffen ohne die Konzentrationsmaxima im Flutstrom zu erreichen. Am Pegel Gandersum wird die Phase des Schwebstoffgehalts sehr gut getroffen, der Mittelwert leicht überschätzt.

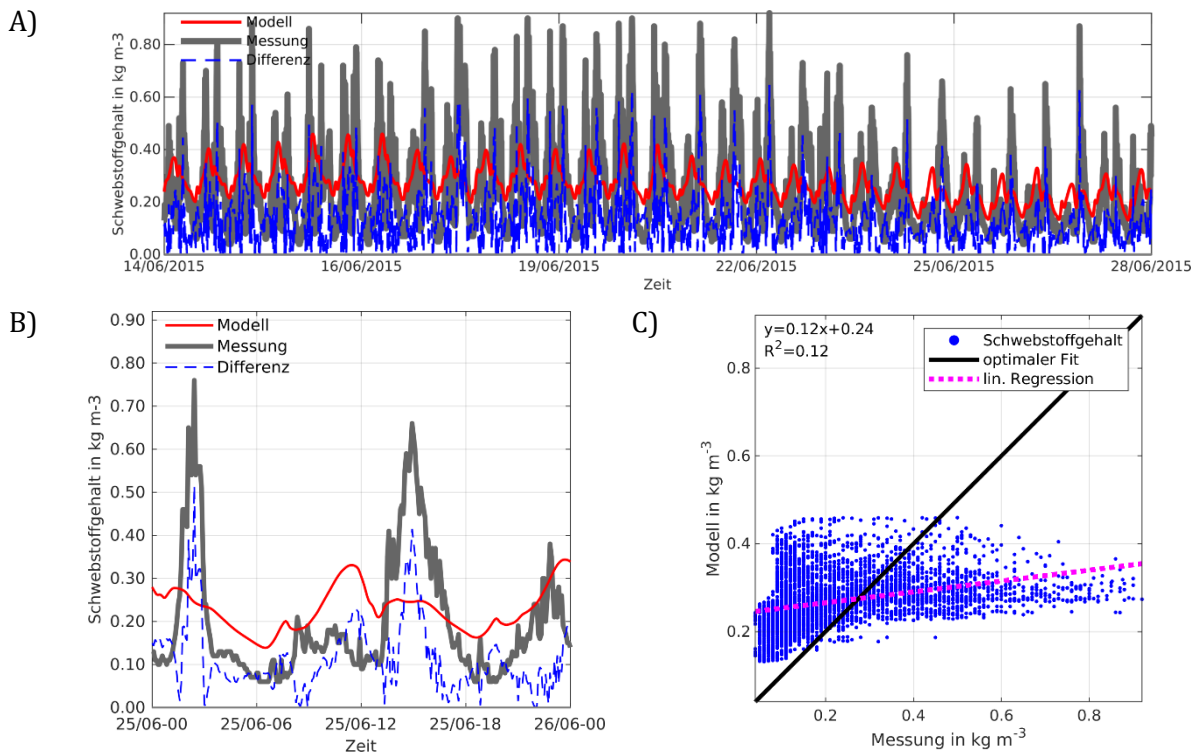


Bild 17: Gemessene und modellierte Schwebstoffgehalte am Pegel Knock. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

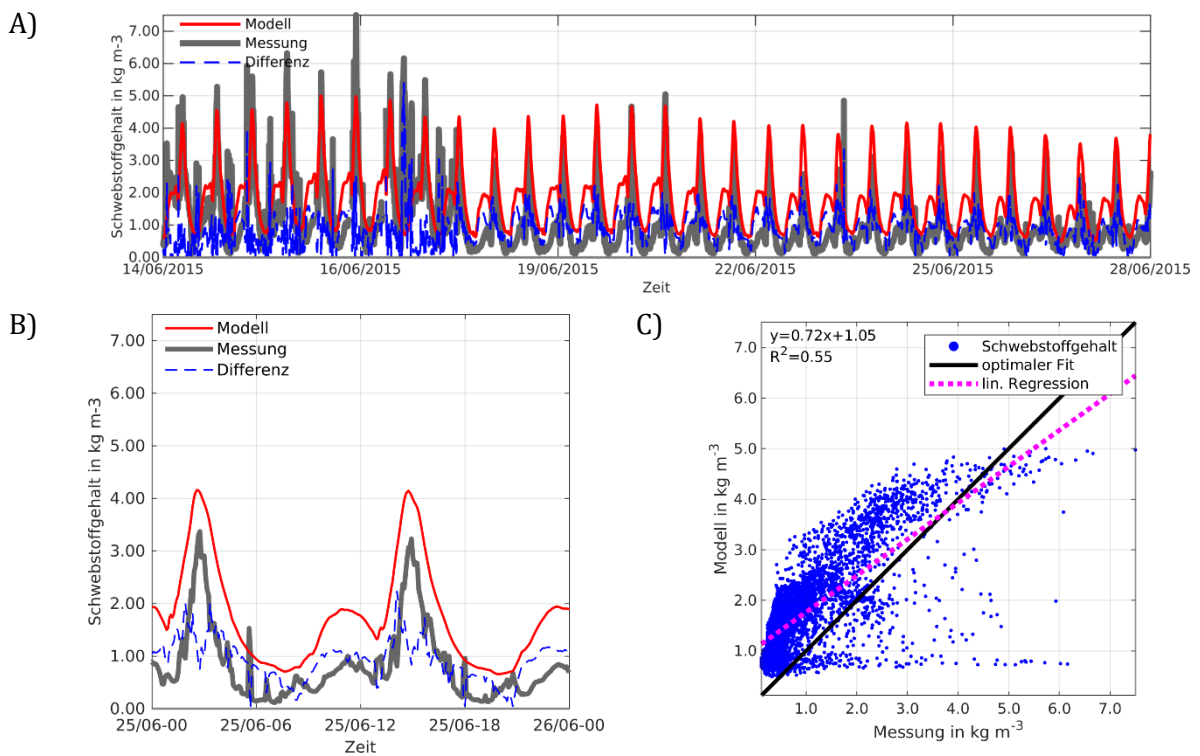


Bild 18: Gemessene und modellierte Schwebstoffgehalte am Pegel Gandersum. Zeitreihen für den Kalibrierungszeitraum (A) und einen Tag (B) sowie Streudiagramm (C). Differenz: Absolut.

Um eine quantitative Beurteilung der Pegel zu ermöglichen, sind in Tabelle 9 Kennwerte der Schwebstoffgehalte dargestellt. Die errechneten Skill-Werte sind, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, deutlich niedriger als für die anderen verglichenen Ergebnisgrößen.

Bei den in Bild 17 und Bild 18 dargestellten, repräsentativen Pegeln ist Knock als „ungenau“ klassifiziert. Dies lässt sich vor allem mit der geringeren Variation in den Modellergebnissen erklären. Pegel Gandersum wird trotz Überschätzung des Mittelwerts, aufgrund der gut abgebildeten Variation, als „genau“ getroffen kategorisiert.

*Tabelle 9: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Kalibrierung. Mittlerer Tideschwebstoffgehalt (Mittel), maximaler Tideschwebstoffgehalt (Max), minimaler Tideschwebstoffgehalt (Min), mittlere Tideschwebstoffgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).*

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Knock	0.2	0.0	0.8	-0.4	0.1	0.1	0.7	-0.6	0.2	0.533
E. - Emspier	**									
Pogum	0.5	1.1	1.4	1.6	0.1	0.2	1.3	1.4	1.3	0.388
Gandersum	1.1	0.8	4.3	0.3	0.1	0.6	4.1	-0.3	1.1	0.784
Terborg	1.6	1.5	6.7	-1.9	0.3	1.2	6.4	-3.1	1.8	0.672

5.5 Modellvalidierung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Validierung dargestellt. Um die verschiedenen Zeiträume zu vergleichen wird die Auswertung anhand des Skill-Wertes vorgenommen. Die Auflistung der Kennwerte für jeden Pegel und Zeitraum ist in den Anlagen zu finden.

5.5.1 Wasserstände

Wasserstände werden in allen Analysezeiträumen an 91 % der Pegel „genau“ abgebildet. Die unterschiedlichen Randwerte können mit annähernd unveränderter Qualität modelliert werden. Einzig der Zeitraum Validierung_4 mit dem höchsten Abfluss ist an mehr als einem Pegel „ungenau“ (Tabelle 10a)). In Tabelle 10b) wird das Ems-Ästuar in den Abschnitten Außenems (AE: Pegel a-l), Unterems (UE: Pegel m-t) und Leda-Jümme (LJ: Pegel u-ü) getrennt analysiert. Die Pegelbezeichnungen können Bild 4 entnommen werden. Daraus ergibt sich eine genauere örtliche Verteilung der Modellgenauigkeit. Pegel in AE und UE sind in jedem analysierten Zeitraum „genau“ getroffen. Im oberen Leda-Jümme-Gebiet kommt es zu Abweichungen, die wie bereits erwähnt bei höheren Abflüssen auftreten.

Tabelle 10: Skill-Werte der Wasserstands-Zeitreihen aller Pegel, untergliedert in a) Zeiträume Kalibrierung (CAL), Validerung_1-4 (VAL1-4) und Jahr 2015 und b) Ästuarabschnitte Außenems (AE), Unterems (UE) und Leda-Jümme (LJ). Die Modell-Genauigkeit der Spalte ergibt sich aus den Wasserstands-Zielwerten der Validierung in Tabelle 5. Die Summe der verfügbaren Wasserstands-Zeitreihen ist in der rechten Spalte angegeben. Die unterste Zeile gibt den prozentualen Mittelwert in Bezug auf die verfügbaren Wasserstands-Zeitreihen an.

	Zeitraum	Genau	Annehmbar	Ungenau	Σ
a)	CAL	27 (93%)	2 (7%)	0 (0%)	29
	VAL1	27 (93%)	2 (7%)	0 (0%)	29
	VAL2	27 (93%)	2 (7%)	0 (0%)	29
	VAL3	26 (93%)	1 (4%)	1 (4%)	28
	VAL4	23 (79%)	2 (7%)	4 (14%)	29
	Jahr 2015	27 (90%)	1 (6%)	1 (3%)	29
	GESAMT	157 (91%)	10 (6%)	6 (3%)	173

	Abschnitt	Genau	Annehmbar	Ungenau	Σ
b)	AE	71 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	71
	UE	48 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	48
	LJ	39 (72%)	9 (17%)	6 (11%)	54
	GESAMT	158 (91%)	9 (5%)	6 (3%)	173

Zur Verdeutlichung der räumlichen Verteilung der Skill-Werte ist in Bild 19: der Längsschnitt entlang des Ems-Ästuars und des Leda-Jümme-Gebiets als Boxplot der Skill-Werte aller analysierten Zeiträume dargestellt. Die blau gerahmte Box stellt den Bereich der mittleren 50 % der Werte dar. Bei maximal sechs Werten pro Pegel ergibt sich die Box als Bereich der drei mittleren Skill-Werte. Der Median ist als roter Balken in der Box dargestellt. Die Whisker enthalten durch die geringe

Datenanzahl maximal einen Wert und sind maximal einundeinhalb Mal so lang wie die Box. Sollten die Werte weiter gestreut sein, werden diese als Ausreißer mit einem roten Kreuz markiert.

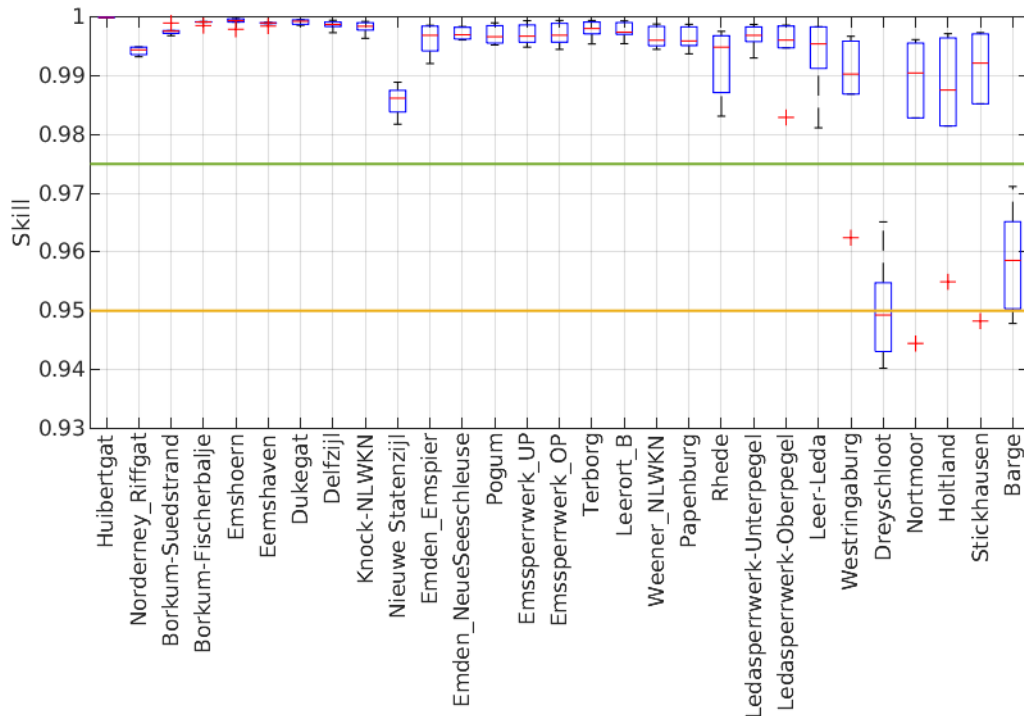


Bild 19: *Boxplot der Skill-Werte der Wasserstände aller Zeiträume der Kalibrierung und der Validierung an allen Pegeln. Grenzen der Zielwerte gemäß Tabelle 5.*

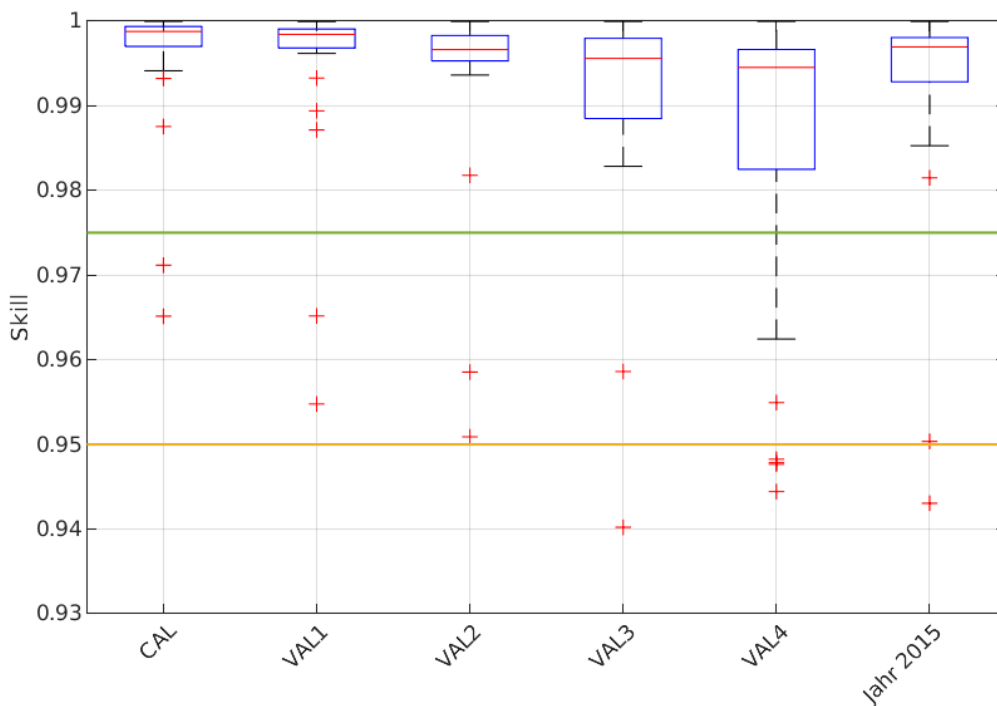


Bild 20: *Boxplot der Skill-Werte der Wasserstände aller Pegel während der Zeiträume der Kalibrierung und der Validierung. Grenzen der Zielwerte gemäß Tabelle 5.*

5.5.2 Strömungsgeschwindigkeiten

Strömungsgeschwindigkeiten werden in allen Analysezeiträumen an 80 % der Pegel „annehmbar“ bis „genau“ abgebildet. Die unterschiedlichen Randwerte können mit annähernd unveränderter Qualität modelliert werden (Tabelle 11a)). Der Vergleich mit den Skill-Scores der Jahreszeitreihen ist aufgrund der vielen Messlücken im Jahresverlauf nicht dargestellt.

In Tabelle 11b) wird das Ems-Ästuar in den Abschnitten Hartbodenems (HBE: Pegel a-e) und Flüssigschlickems (FSE: Pegel f-n) getrennt analysiert. Die Pegelbezeichnungen können Bild 8 entnommen werden. Daraus ergibt sich eine genauere örtliche Verteilung der Modellgenauigkeit. Pegel in der HBE werden im Mittel aller analysierten Zeitraum zu 41 % „genau“ getroffen. Im Bereich der FSE kommt es zu größeren Abweichungen. Hier spielt neben den großen horizontalen Gradienten und stärkerer Abflussabhängigkeit auch die genaue Lage der Flüssigschlickschicht und deren Auswirkung auf das Strömungsprofil eine Rolle.

Tabelle 11: Skill-Werte der Strömungsgeschwindigkeits-Zeitreihen aller Pegel, untergliedert in a) Zeiträume Kalibrierung (CAL) und Validierung_1-4 (VAL1-4) und b) Ästuarabschnitte Hartbodenems (HBE) und Flüssigschlickems (FSE). Die Modell-Genauigkeit der Spalte ergibt sich aus den Wasserstands-Zielwerten der Validierung in Tabelle 5. Die Summe der verfügbaren Strömungsgeschwindigkeits-Zeitreihen ist in der rechten Spalte angegeben. Die unterste Zeile gibt den prozentualen Mittelwert in Bezug auf die verfügbaren Strömungsgeschwindigkeits-Zeitreihen an.

	Zeitraum	Genau	Annehmbar	Ungenau	Σ
a)	CAL	2 (13%)	11 (73%)	2 (13%)	15
	VAL1	2 (15%)	6 (46%)	5 (38%)	13
	VAL2	2 (40%)	2 (40%)	1 (20%)	5
	VAL3	2 (20%)	7 (70%)	1 (10%)	10
	VAL4	2 (25%)	5 (63%)	1 (13%)	8
	GESAMT	10 (20%)	31 (61%)	10 (20%)	51
b)	Abschnitt	Genau	Annehmbar	Ungenau	Σ
	HBE	7 (41%)	8 (47%)	2 (12%)	17
	FSE	3 (9%)	23 (68%)	8 (24%)	34
	GESAMT	10 (20%)	31 (61%)	10 (20%)	51

5.5.3 Salzgehalte

Salzgehalte werden in allen Analysezeiträumen an 60 % der Pegel „annehmbar“ bis „genau“ abgebildet. Bei zunehmenden Abflüssen in den Zeiträumen Validierung_2 bis Validierung_4 kann der Salzgehalt noch „genauer“ modelliert werden (Tabelle 12a)).

In Tabelle 12b) wird das Ems-Ästuar in Abhängigkeit von den mittleren gemessenen Salzgehalten analysiert. Die Pegelzeitreihen werden entsprechend dem Grenzwert von 2 ‰ sortiert. Pegel im Bereich >2 ‰ werden im Mittel aller analysierten Zeiträume zu 83 % „genau“ oder „annehmbar“ getroffen. Im Bereich <2 ‰ kommt es zu „ungenauen“ Modellergebnissen an 58 % der Pegel. In diesem Bereich sind die Änderungen im Salzgehalt sehr gering und die horizontale Verschiebung der Salzintrusion sehr abflusssensibel. Abweichungen sind hier auch bedingt möglich durch die Abhängigkeit von korrekten Abflussrandwerten und die abnehmende Gültigkeit der Umrechnung von gemessener Leitfähigkeit zu Salzgehalt für niedrige Salzgehalte (Lewis und Perkin, 1981).

Tabelle 12: Skill-Werte der Salzgehalts-Zeitreihen aller Pegel, untergliedert in a) Zeiträume Kalibrierung (CAL), Validerung_1-4 (VAL1-4) und Jahr 2015 und b) Zeitreihen mit mittleren gemessenen Salzgehalten von größer und kleiner gleich 2 ‰. Die Modell-Genauigkeit der Spalte ergibt sich aus den Salzgehalts-Zielwerten der Validierung in Tabelle 5. Die Summe der verfügbaren Salzgehalts-Zeitreihen ist in der rechten Spalte angegeben. Die unterste Zeile gibt den prozentualen Mittelwert in Bezug auf die verfügbaren Salzgehalts-Zeitreihen an.

Zeitraum	Genau	Annehmbar	Ungenau	Σ
CAL	10 (38%)	0 (0%)	16 (62%)	26
VAL1	6 (25%)	4 (17%)	14 (58%)	24
VAL2	9 (50%)	6 (33%)	3 (17%)	18
VAL3	8 (44%)	2 (11%)	8 (44%)	18
VAL4	8 (50%)	5 (31%)	3 (19%)	16
Jahr 2015	11 (40%)	4 (17%)	4 (43%)	19
GESAMT	52 (43%)	21 (17%)	48 (40%)	121

a)

Mittel(Mess.)	Genau	Annehmbar	Ungenau	Σ
>2‰	39 (72%)	6 (11%)	9 (17%)	54
<=2‰	13 (19%)	15 (22%)	39 (58%)	67
GESAMT	52 (43%)	21 (17%)	48 (40%)	121

b)

5.5.4 Schwebstoffgehalt

Entsprechend der Anforderungsdefinition in Kapitel 1.1.4 wird das Ems-Ästuar in den Abschnitten Hartbodenems (HBE: Pegel a-e) und Flüssigschlickems (FSE: Pegel f-i) getrennt analysiert. Die Pegelbezeichnungen können Bild 16 entnommen werden.

Tabelle 13 zeigt 83 % „genaue“ oder „annehbare“ Ergebnisse für Pegel in der HBE im Mittel aller analysierten Zeiträume. Die unterschiedlichen Randwerte können mit annähernd unveränderter Qualität modelliert werden.

Tabelle 13: Skill-Werte der Schwebstoffgehalts-Zeitreihen im Ästuarabschnitt Hartbodenems (HBE), für die Zeiträume Kalibrierung (CAL), Validerung_1-4 (VAL1-4) und Jahr 2015. Die Modell-Genauigkeit der Spalte ergibt sich aus den Zielwerten der Validierung für Schwebstoffgehalt in Tabelle 5. Die Summe der verfügbaren Schwebstoff-Zeitreihen ist in der rechten Spalte angegeben. Die unterste Zeile gibt den prozentualen Mittelwert in Bezug auf die verfügbaren Schwebstoff-Zeitreihen an.

Zeitraum	Genau	Annehmbar	Ungenau	Σ
CAL	1 (25%)	1 (25%)	2 (50%)	4
VAL1	3 (75%)	1 (25%)	0 (0%)	4
VAL2	2 (50%)	2 (50%)	0 (0%)	4
VAL3	1 (33%)	1 (33%)	1 (33%)	3
VAL4	1 (25%)	2 (50%)	1 (25%)	4
Jahr 2015	3 (75%)	1 (25%)	0 (0%)	4
GESAMT	11 (48%)	8 (35%)	4 (17%)	23

Im Bereich der FSE kommt es vorhersehbar zu größeren Abweichungen der Daten. Es wird darauf hingewiesen, dass das verwendete Modell die charakteristischen Prozesse bodennah hochkonzentrierter Schwebstoffe, auch Flüssigschlick genannt, nicht modelliert, sondern nur über die Bodenreibung parametrisiert. Hierzu zählen die rheologische Viskosität und die Turbulenzdämpfung an der Lutokline, also am Dichtesprung zwischen Wasserkörper und Flüssigschlick, sowie dessen Erosions- und Konsolidierungsverhalten.

Um die qualitativ richtige Veränderung von Schwebstoffgehalten unter unterschiedlichen Randwerten nachzuweisen, sind in Bild 21 die normierten Kenngrößen des Schwebstoffgehalts für die unterschiedlichen Zeiträume der Kalibrierung und Validierung am Pegel Papenburg dargestellt. Der mittlere Abfluss nimmt vom Zeitraum der Kalibrierung (CAL) zum Validierungszeitraum 4 (VAL4) zu, wie in Kapitel 5.1 dargestellt. Die Abnahme der Konzentration und Variation mit zunehmendem Abfluss wird vom Modell qualitativ richtig abgebildet. Einzig VAL2 sticht bei dieser Analyse aus dem gemessenen Zusammenhang. Zu beachten ist bei dieser Art Analyse, dass sich neben dem mittleren Abfluss im Zeitraum andere Effekte überlagern, wie zum Beispiel erhöhter Abfluss kurz vor VAL2 und erhöhter Tidehub während VAL2 (siehe Kapitel 5.1). Über alle Zeiträume betrachtet spiegelt das Modell die funktionale Abhängigkeit der Schwebstoffgehalte vom Abfluss in der Unterems im Mittel korrekt wider.

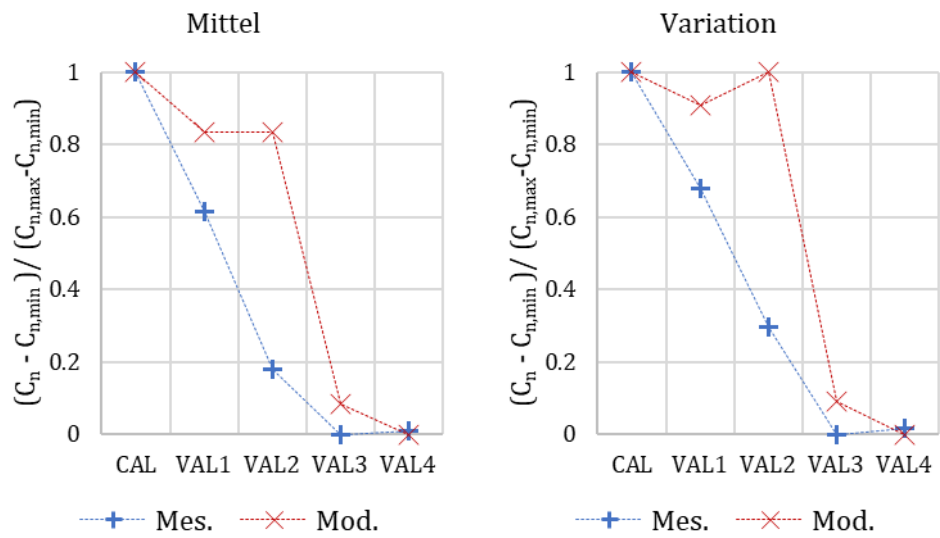


Bild 21: Normierte Kennwerte des Schwebstoffgehalts am Pegel Papenburg für die Zeiträume der Kalibrierung und Validierung. Links: Mittlerer Schwebstoffgehalt; Rechts: Variation des Schwebstoffgehalts.

6 Bewertung

Die nach der Modellkalibrierung noch verbleibenden Abweichungen zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen können im Wesentlichen auf nicht erfasste lokale Windeffekte, Ungenauigkeiten in der Pegel- und Strömungsmessung, Folge der Diskretisierung und hydrodynamische Parametrisierung des Flüssigschlicks zurückgeführt werden. Diese Abweichungen zwischen Messung und HN-Modell haben keine Auswirkungen auf die Prognosefähigkeit der verwendeten numerischen Modelle, solange die in der Natur dominanten physikalischen Prozesse und die durch einen geplanten Ausbau veränderten physikalischen Prozesse im HN-Modell enthalten sind. Das HN-Modell ist keine vollkommen exakte Nachbildung eines bestimmten hydrodynamischen Zustandes, sondern ein mathematisch-numerisches Ersatzsystem für alle relevanten physikalischen Prozesse.

6.1 Anwendbarkeit

Die Anwendbarkeit für Systemstudien, in denen die quantitative Wirkung von Randwertänderungen (Abflussszenarien, Ausbauvorhaben, etc.) bewertet werden soll, ist gegeben. Die in Kapitel 1.1.4 festgelegten Anforderungen werden erfüllt:

- Die relevanten physikalischen Prozesse werden naturnah abgebildet.
- Das Modell reagiert plausibel auf Änderungen in den Abfluss- und Tideverhältnissen (veränderte Randwerte). Die kalibrierte Modellgenauigkeit bleibt dabei annäherungsweise erhalten.
- Die Genauigkeit für Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalte und Schwebstoffgehalt wird anhand von Zielwerten aus der Referenz-Literatur nachgewiesen.

6.2 Hinweise zur Interpretation der Modellergebnisse

Wie in Kapitel 5.5 erläutert, kann die Belastbarkeit der Ergebnisse von der betrachteten Größe und deren Wertebereich abhängen.

So werden Wasserstände im oberstromigen Abschnitt des Leda-Jümme-Gebiets teilweise „ungenau“ abgebildet. Da die Auswirkungen von veränderten Randwerten im Modell qualitativ korrekt wiedergegeben werden können, bleibt die Validität des Modells erhalten. In diesem Bereich sind Aussagen zur relativen Änderung jedoch möglichst qualitativ, mit Bezug auf Referenzergebnisse, zu formulieren.

Ähnliches gilt für den Bereich mit niedrigen Salzgehalten von weniger als 2 ‰ im Mittel. Die Wirkung der Abweichungen des Salzgehalts auf den Dichtegradienten in der oberen Unterems haben keine relevanten Auswirkungen auf die Hydrodynamik, da die dominanten physikalischen Prozesse erhalten bleiben. So können qualitative Prognosen z. B. zur räumlichen Verschiebung der Brackwasserzone oder Zu-/Abnahmen einer Kenngröße in Relation zu Referenzergebnissen getroffen werden.

Für Schwebstoffgehalte im Bereich der flüssigschlickreichen Unterems sind Aussagen zur relativen Änderung ebenso qualitativ, mit Bezug auf Referenzergebnisse, zu formulieren. Änderungen der Konzentration oder des Transportverhaltens sollen aus der Hydrodynamik plausibilisiert werden.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, im Februar 2022

Im Auftrag

Bearbeitung

Dr.-Ing. Jessica Kelln

Anton Rosenhagen M. Sc.

7 Literaturverzeichnis

- Arbeitsgemeinschaft (ARGE) smile consult GmbH - Inphoris GmbH (2016): Aufbau eines Digitalen Geländemodells des Unter- und Außenems-Wasserlaufes 2015 (DGM-W Unter-/Außenems-2015). Abschlussbericht.
- Bever, Aaron J.; MacWilliams, Michael L. (2013): Simulating sediment transport processes in San Pablo Bay using coupled hydrodynamic, wave, and sediment transport models. In: *Marine Geology* 345 (Suppl. 1), S. 235–253. DOI: 10.1016/j.margeo.2013.06.012.
- Bever, Aaron J.; MacWilliams, Michael L.; Fullerton, David K. (2018): Influence of an Observed Decadal Decline in Wind Speed on Turbidity in the San Francisco Estuary. In: *Estuaries and Coasts* 41 (7), S. 1943–1967. DOI: 10.1007/s12237-018-0403-x.
- Casulli, Vincenzo (2009): A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. In: *Int. J. Numer. Meth. Fluids* 60 (4), S. 391–408. DOI: 10.1002/flid.1896.
- Fringer, Oliver B.; Dawson, Clint N.; He, Ruoying; Ralston, David K.; Zhang, Y. Joseph (2019): The future of coastal and estuarine modeling. Findings from a workshop. In: *Ocean Modelling* 143 (1–2), S. 101458. DOI: 10.1016/j.ocemod.2019.101458.
- Hansen, O. (2020): Planfeststellungsverfahren Außenemsvertiefung; - Zweite ergänzende Stellungnahme. NLWKN Direktion, Postfach 10 01 02, 26491 Norden, 03.03.2020. Brief an Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt, Schloßplatz 9, 26603 Aurich.
- Krebs, M.; Weilbeer, Holger (2008): Ems-Dollart Estuary. In: *Die Küste* 74, S. 252–262.
- Lewis, E. L.; Perkin, R. G. (1981): The practical salinity scale 1978. Conversion of existing data. In: *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 28 (4), S. 307–328. DOI: 10.1016/0198-0149(81)90002-9.
- MacWilliams, Michael; Bever, Aaron; Gross, Edward; Ketefian, Gerard; Kimmerer, Wim (2015): Three-Dimensional Modeling of Hydrodynamics and Salinity in the San Francisco Estuary. An Evaluation of Model Accuracy, X2, and the Low-Salinity Zone. In: *SFEWS* 13 (1). DOI: 10.15447/sfews.2015v13iss1art2.
- Murphy, Allan H. (1988): Skill Scores Based on the Mean Square Error and Their Relationships to the Correlation Coefficient. In: *Mon. Wea. Rev.* 116 (12), S. 2417–2424. DOI: 10.1175/1520-0493(1988)116<2417:SSBOTM>2.0.CO;2.
- Papenmeier, Svenja; Schrottke, Kerstin; Bartholomä, Alexander; Flemming, Burghard W. (2013): Sedimentological and Rheological Properties of the Water–Solid Bed Interface in the Weser and Ems Estuaries, North Sea, Germany. Implications for Fluid Mud Classification. In: *Journal of Coastal Research* 289, S. 797–808. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00144.1.
- Rodi, Wolfgang (1987): Examples of calculation methods for flow and mixing in stratified fluids. In: *J. Geophys. Res.* 92 (C5), S. 5305. DOI: 10.1029/JC092iC05p05305.
- van Maren, Dirk S.; Winterwerp, Johan C.; Vroom, Julia (2015): Fine sediment transport into the hyper-turbid lower Ems River. The role of channel deepening and sediment-induced drag reduction. In: *Ocean Dynamics* 65 (4), S. 589–605. DOI: 10.1007/s10236-015-0821-2.

van Waveren, Harold (1999): Handboek Good Modelling Practice. [Utrecht], Lelystad, Den Haag: STOWA; Rijkswaterstaat-RIZA; SDU, afd. SEO/RIZA [etc. distr.] (Rijkswaterstaat-RIZA-rapport, 99.036).

Willmott, Cort J. (1981): ON THE VALIDATION OF MODELS. In: *Physical Geography* 2 (2), S. 184–194. DOI: 10.1080/02723646.1981.10642213.

Anlagen

Anlage 1: Validierungsergebnisse Wasserstände

Tabelle 14: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_1. Mittleres Tidehochwasser (Thw), mittleres Tideniedrigwasser (Tnw) und mittlerer Tidehub (Thb) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell ($\Delta\text{Mod.}$). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Mittlere Abweichung der Eintrittszeit (Eintritt) jeweils für Tidehochwasser (ΔThw) und Tideniedrigwasser (ΔTnw). Negative Abweichungen bedeuten eine frühere Modelleintrittszeit. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als systematische Abweichung (Bias), Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill).

Pegel	Thw		Tnw		Thb		Eintrittszeit		Zeitreihe		
	cmNHN		cmNHN		cmNHN		min		cm		-
	Mes.	$\Delta\text{Mod.}$	Mes.	$\Delta\text{Mod.}$	Mes.	$\Delta\text{Mod.}$	ΔThw	ΔTnw	Bias	RMSE	Skill
Huibertgat	91	0	-115	0	206	0	3	2	-1	1	1.000
Norderney	107	3	-132	-20	237	23	-1	-8	6	14	0.993
Borkum-Südstr.	90	9	-134	6	222	4	7	8	9	9	0.997
Borkum-Fischb.	100	5	-131	-4	230	9	8	9	3	5	0.999
Emshörn	108	2	-141	-4	248	7	6	6	0	3	1.000
Eemshaven	107	7	-144	-6	250	13	-1	4	3	6	0.999
Dukegat	112	5	-148	-8	259	13	-2	3	0	7	0.999
Delfzijl	124	5	-168	-9	291	14	-12	1	0	6	0.999
Knock	124	2	-162	-13	285	15	4	4	-2	6	0.999
Nieuwe Statenz.	136	8	-169	13	304	-3	-7	17	-1	24	0.987
E. - Emspier	125	11	-181	-2	305	13	5	5	6	8	0.998
E. - Neue Seesch.	127	12	-185	-1	310	12	6	6	7	9	0.998
Pogum	134	9	-187	0	320	9	7	8	6	9	0.999
Emsspw.-UP	138	8	-188	1	325	7	11	6	5	8	0.999
Emsspw.-OP	140	7	-187	1	326	6	3	4	4	7	0.999
Terborg	148	7	-188	-2	336	9	3	4	3	7	0.999
Leerort	159	5	-190	1	348	4	9	2	3	7	0.999
Weener	162	7	-196	6	357	1	21	-1	6	10	0.998
Papenburg	169	3	-194	2	363	1	28	-8	3	10	0.998
Rhede	176	2	-183	7	358	-4	34	-17	2	14	0.997
Ledaspw.-UP	153	10	-174	3	326	8	3	1	4	9	0.998
Ledaspw.-OP	159	4	-170	-1	329	5	6	3	-1	9	0.998
Leer-Leda	157	6	-172	1	329	5	3	2	3	9	0.998
Westringaburg	139	12	-57	-7	196	19	0	8	3	8	0.997
Dreyschloot	114	4	9	17	105	-13	23	19	9	15	0.955
Nortmoor	150	1	-65	-16	214	17	-4	-3	-5	9	0.996
Holtland	141	5	-57	-7	197	12	23	17	1	14	0.989
Stickhausen	132	5	-34	-1	166	5	-5	-2	2	6	0.997
Barge	111	-1	2	17	108	-18	13	4	8	13	0.965

Tabelle 15: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_2. Mittleres Tidehochwasser (Thw), mittleres Tideniedrigwasser (Tnw) und mittlerer Tidehub (Thb) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Mittlere Abweichung der Eintrittszeit (Eintritt) jeweils für Tidehochwasser (Δ Thw) und Tideniedrigwasser (Δ Tnw). Negative Abweichungen bedeuten eine frühere Modelleintrittszeit. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als systematische Abweichung (Bias), Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill).

Pegel	Thw		Tnw		Thb		Eintrittszeit		Zeitreihe		
	cmNHN		cmNHN		cmNHN		min		cm		-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Δ Thw	Δ Tnw	Bias	RMSE	Skill
Huibertgat	86	0	-142	0	230	0	4	0	-1	1	1.000
Norderney	104	2	-158	-10	263	12	-1	-12	7	15	0.994
Borkum-Südstr.	86	9	-160	6	247	3	12	5	8	9	0.998
Borkum-Fischb.	97	5	-159	-1	257	6	7	10	4	5	0.999
Emshörn	106	2	-169	-2	276	3	10	7	1	4	0.999
Eemshaven	105	7	-173	-3	280	10	-2	4	4	6	0.999
Dukegat	111	4	-177	-5	289	9	7	6	1	4	1.000
Delfzijl	124	4	-199	-5	325	9	-2	7	2	8	0.999
Knock	124	0	-193	-8	319	8	7	9	-1	9	0.999
Nieuwe Statenz.	138	6	-182	53	321	-48	7	28	9	29	0.982
E. - Emspier	126	9	-217	6	344	3	12	14	9	14	0.997
E. - Neue Seesch.	127	11	-221	8	349	3	15	16	10	15	0.996
Pogum	136	8	-221	8	359	0	19	16	7	15	0.996
Emsspw.-UP	141	6	-217	6	360	1	19	14	6	15	0.996
Emsspw.-OP	141	7	-218	6	360	0	16	12	6	14	0.997
Terborg	151	4	-213	0	366	4	13	9	2	11	0.998
Leerort	162	1	-211	5	374	-4	24	8	3	13	0.997
Weener	165	4	-220	16	386	-13	34	7	10	18	0.995
Papenburg	174	-2	-218	17	394	-19	41	2	7	18	0.995
Rhede	183	-4	-161	1	345	-5	52	2	3	16	0.995
Ledaspw.-UP	161	2	-182	-2	345	5	22	5	0	13	0.997
Ledaspw.-OP	141	2	-186	2	328	0	19	5	2	12	0.997
Leer-Leda	141	2	-185	0	328	2	17	6	2	13	0.996
Westringaburg	123	9	-59	-10	183	19	13	8	1	9	0.996
Dreyschloot	100	7	6	20	95	-14	56	24	12	17	0.951
Nortmoor	130	2	-69	-18	201	19	-7	0	-7	11	0.994
Holtland	123	5	-60	-9	185	14	12	4	0	8	0.996
Stickhausen	111	3	-42	-2	152	4	1	0	1	6	0.997
Barge	96	1	-3	20	101	-19	20	13	10	16	0.959

Tabelle 16: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_3. Mittleres Tidehochwasser (Thw), mittleres Tideniedrigwasser (Tnw) und mittlerer Tidehub (Thb) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Mittlere Abweichung der Eintrittszeit (Eintritt) jeweils für Tidehochwasser (Δ Thw) und Tideniedrigwasser (Δ Tnw). Negative Abweichungen bedeuten eine frühere Modelleintrittszeit. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als systematische Abweichung (Bias), Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Pegel	Thw		Tnw		Thb		Eintrittszeit		Zeitreihe		
	cmNHN		cmNHN		cmNHN		min		cm		-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Δ Thw	Δ Tnw	Bias	RMSE	Skill
Huibertgat	124	0	-105	0	227	0	4	3	0	1	1.000
Norderney	144	4	-117	-13	259	17	-1	-2	6	14	0.995
Borkum-Südstr.	138	-5	-112	-1	249	-4	11	7	-3	6	0.999
Borkum-Fischb.	135	6	-116	-2	249	8	16	10	3	6	0.999
Emshörn	145	2	-125	-1	269	3	11	10	0	6	0.999
Eemshaven	143	9	-131	-1	273	10	6	4	4	7	0.999
Dukegat	150	4	-134	-3	282	7	5	7	0	5	1.000
Delfzijl	166	4	-158	-4	323	8	3	12	1	9	0.998
Knock	166	0	-152	-6	317	6	6	14	-1	11	0.998
Nieuwe Statenz.	171	18	-113	22	283	-4	4	39	4	21	0.989
E. - Emspier	**										
E. - Neue Seesch.	177	7	-174	4	349	3	13	17	4	13	0.997
Pogum	182	8	-179	7	359	1	17	19	7	17	0.996
Emsspw.-UP	187	8	-174	4	360	4	13	16	5	17	0.996
Emsspw.-OP	186	9	-175	4	359	5	14	14	5	17	0.996
Terborg	196	6	-169	-4	364	10	17	11	1	14	0.997
Leerort	199	9	-158	-7	356	16	35	10	3	14	0.997
Weener	203	9	-156	-4	358	12	54	11	5	17	0.995
Papenburg	212	3	-138	-14	349	17	67	8	0	17	0.995
Rhede	222	4	-44	-41	266	45	72	5	-13	24	0.987
Ledaspw.-UP	205	4	-131	-17	335	20	34	9	-5	15	0.996
Ledaspw.-OP	137	5	-135	-12	271	18	42	9	-3	14	0.995
Leer-Leda	135	8	-135	-13	270	20	38	13	-2	18	0.991
Westringaburg	122	16	-22	-16	143	32	33	9	0	13	0.987
Dreyschloot	112	16	45	17	67	0	19	18	14	18	0.940
Nortmoor	131	7	-27	-31	160	37	36	3	-10	17	0.983
Holtland	123	11	-20	-22	143	33	43	7	-4	14	0.986
Stickhausen	120	9	4	-15	115	24	33	0	-3	12	0.985
Barge	110	12	39	10	70	2	18	4	8	15	0.959

Tabelle 17: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Validierung_4. Mittleres Tidehochwasser (Thw), mittleres Tideniedrigwasser (Tnw) und mittlerer Tidehub (Thb) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Mittlere Abweichung der Eintrittszeit (Eintritt) jeweils für Tidehochwasser (Δ Thw) und Tideniedrigwasser (Δ Tnw). Negative Abweichungen bedeuten eine frühere Modelleintrittszeit. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als systematische Abweichung (Bias), Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill).

Pegel	Thw		Tnw		Thb		Eintrittszeit		Zeitreihe		
	cmNHN		cmNHN		cmNHN		min		cm		-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Δ Thw	Δ Tnw	Bias	RMSE	Skill
Huibertgat	137	0	-66	0	201	0	3	3	0	1	1.000
Norderney	159	6	-70	2	226	3	-3	1	5	13	0.995
Borkum-Südstr.	153	-6	-67	-1	218	-4	9	6	-5	9	0.998
Borkum-Fischb.	149	4	-71	-2	217	6	7	11	0	7	0.999
Emshörn	160	0	-79	-2	236	2	10	12	-2	9	0.998
Eemshaven	158	6	-86	0	241	6	1	4	2	8	0.998
Dukegat	165	2	-88	-2	249	4	9	10	-1	7	0.999
Delfzijl	184	0	-110	-4	291	4	6	13	-2	11	0.997
Knock	183	-4	-105	-6	285	2	14	16	-3	13	0.996
Nieuwe Statenz.	197	4	-53	-14	246	21	13	11	-3	25	0.984
E. - Emspier	188	6	-124	4	309	2	21	18	5	18	0.994
E. - Neue Seesch.	195	2	-123	1	315	1	19	17	0	15	0.996
Pogum	201	2	-127	4	325	-1	21	15	2	17	0.995
Emsspw.-UP	206	1	-125	1	328	0	25	15	0	18	0.995
Emsspw.-OP	202	2	-125	2	324	0	31	14	0	18	0.995
Terborg	211	0	-122	-4	330	4	40	11	-3	17	0.995
Leerort	215	2	-118	-5	331	7	53	8	-1	17	0.995
Weener	218	1	-115	-4	331	5	70	7	2	19	0.995
Papenburg	226	-4	-99	-13	322	9	83	4	-3	20	0.994
Rhede	236	-3	-7	-44	239	41	65	0	-17	28	0.983
Ledaspw.-UP	222	-4	-94	-18	314	14	57	7	-10	20	0.993
Ledaspw.-OP	113	4	-99	-13	210	17	31	5	-11	21	0.983
Leer-Leda	111	7	-100	-12	209	18	31	13	-9	22	0.981
Westringaburg	106	7	-4	-21	109	29	42	8	-10	20	0.962
Dreyschloot	104	7	57	11	47	-4	23	32	7	15	0.948
Nortmoor	115	0	-8	-35	122	35	30	2	-20	27	0.944
Holtland	108	4	-1	-26	108	31	37	5	-13	22	0.955
Stickhausen	107	2	20	-20	86	22	32	0	-12	20	0.948
Barge	102	1	51	3	51	-2	26	8	-1	15	0.948

Tabelle 18: Analyse der Wasserstände. Zeitraum: Jahr 2015. Mittleres Tidehochwasser (Thw), mittleres Tideniedrigwasser (Tnw) und mittlerer Tidehub (Thb) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell ($\Delta\text{Mod.}$). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Mittlere Abweichung der Eintrittszeit (Eintritt) jeweils für Tidehochwasser (ΔThw) und Tideniedrigwasser (ΔTnw). Negative Abweichungen bedeuten eine frühere Modelleintrittszeit. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als systematische Abweichung (Bias), Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill).

Pegel	Thw		Tnw		Thb		Eintrittszeit		Zeitreihe		
	cmNHN		cmNHN		cmNHN		min		cm		-
	Mes.	$\Delta\text{Mod.}$	Mes.	$\Delta\text{Mod.}$	Mes.	$\Delta\text{Mod.}$	ΔThw	ΔTnw	Bias	RMSE	Skill
Huibertgat	109	0	-108	0	216	0	6	2	0	1	1.000
Norderney	128	5	-119	-8	247	12	2	-7	6	13	0.995
Borkum-Südstr.	111	7	-121	6	232	1	9	6	6	8	0.998
Borkum-Fischb.	119	6	-119	-2	238	8	10	10	3	5	0.999
Emshörn	129	2	-128	-2	257	4	9	7	0	5	0.999
Eemshaven	127	8	-133	-2	261	10	0	2	4	6	0.999
Dukegat	133	5	-138	-3	271	8	5	5	1	5	0.999
Delfzijl	148	4	-160	-4	308	9	0	5	1	8	0.999
Knock	148	0	-154	-8	302	8	9	9	-2	9	0.998
Nieuwe Statenz.	161	8	-132	6	293	1	6	17	0	25	0.985
E. - Emspier	148	10	-177	4	325	6	12	12	7	12	0.997
E. - Neue Seesch.	153	11	-178	5	331	5	14	12	7	13	0.997
Pogum	162	8	-178	4	340	3	15	13	5	13	0.997
Emsspw.-UP	168	6	-176	3	344	3	15	12	4	13	0.997
Emsspw.-OP	169	5	-173	3	342	2	13	10	3	13	0.997
Terborg	178	4	-172	-2	349	6	17	8	1	11	0.998
Leerort	185	3	-169	0	355	3	28	6	2	12	0.998
Weener	187	6	-174	5	361	0	42	3	6	15	0.997
Papenburg	195	1	-168	1	363	0	52	0	3	15	0.997
Rhede	202	1	-117	-15	319	16	56	3	-3	18	0.994
Ledaspw.-UP	185	4	-148	-4	333	8	26	6	-1	14	0.997
Ledaspw.-OP	153	2	-150	-2	303	5	24	6	-1	15	0.995
Leer-Leda	152	4	-151	-3	302	7	19	6	1	16	0.995
Westringaburg	133	11	-38	-10	172	21	19	7	2	14	0.987
Dreyschloot	114	8	36	13	78	-5	16	14	10	17	0.943
Nortmoor	145	0	-44	-22	188	22	14	1	-8	16	0.987
Holtland	135	5	-34	-15	168	20	28	12	-2	17	0.981
Stickhausen	128	4	-11	-9	139	13	11	9	0	12	0.988
Barge	111	4	31	8	80	-5	19	12	7	16	0.950

Anlage 2: Validierungsergebnisse Strömungsgeschwindigkeiten

Tabelle 19: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_1. Mittlere Tidestromgeschwindigkeit (Tide), mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Flut), mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Ebbe) und Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit (Flut/Ebbe) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Tide		Flut		Ebbe		Flut/Ebbe		Zeitreihe	
	m/s		m/s		m/s		-		m/s	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Emshörn-O*	0.5	0.1	0.6	0.0	0.5	0.2	1.1	-0.2	0.2	0.919
Emshörn-U	0.4	0.2	0.4	0.1	0.4	0.2	1.2	-0.2	0.3	0.750
Knock*	0.7	0.0	0.9	-0.2	0.6	0.1	0.2	0.9	0.2	0.900
Emden*	0.9	-0.1	0.9	-0.1	0.9	0.0	1.0	-0.2	0.1	0.964
Ditzum*	**									
Terborg*	0.8	-0.3	0.9	-0.4	0.8	-0.2	1.2	-0.3	0.3	0.802
Soltborg-O*	0.8	-0.3	0.8	-0.2	0.8	-0.3	1.1	0.3	0.2	0.894
Leerort_A*	0.8	-0.2	0.7	-0.1	0.8	-0.2	0.9	0.2	0.2	0.891
Leerort_B*	0.7	-0.2	0.7	-0.3	0.6	-0.2	1.2	-0.3	0.3	0.778
Grotegaste*	0.4	0.1	0.7	0.0	0.3	0.2	3.1	-1.6	0.3	0.795
Weener_A*	0.5	-0.2	0.8	-0.4	0.4	-0.1	2.2	-0.6	0.3	0.784
Weener_B*	**									
Mark*	0.6	-0.2	0.7	-0.2	0.6	-0.2	1.3	0.0	0.2	0.815
Papenburg*	0.5	-0.1	0.5	0.0	0.6	-0.1	1.0	0.5	0.2	0.816
Rhede*	0.3	0.1	0.4	0.1	0.3	0.1	1.4	0.0	0.2	0.791

*Tabelle 20: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_2. Mittlere Tidestromgeschwindigkeit (Tide), mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Flut), mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Ebbe) und Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit (Flut/Ebbe) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).*

Messstation	Tide		Flut		Ebbe		Flut/Ebbe		Zeitreihe	
	m/s		m/s		m/s		-		m/s	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Emshörn-O*	**									
Emshörn-U										
Knock*										
Emden*	1.1	-0.2	1.1	-0.3	1.1	-0.1	1.0	-0.2	0.3	0.901
Ditzum*	0.9	-0.1	0.9	-0.2	0.9	0.0	1.1	-0.2	0.2	0.921
Terborg*	**									
Soltborg-O*										
Leerort_A*	0.7	-0.1	0.7	-0.1	0.8	-0.2	0.9	0.1	0.2	0.894
Leerort_B*	**									
Grotegaste*										
Weener_A*	0.6	-0.3	0.8	-0.4	0.5	-0.2	1.7	-0.3	0.3	0.781
Weener_B*	0.5	0.0	0.7	-0.2	0.4	0.0	1.6	-0.5	0.2	0.863
Mark*	**									
Papenburg*										
Rhede*										

Tabelle 21: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_3. Mittlere Tidestromgeschwindigkeit (Tide), mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Flut), mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Ebbe) und Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit (Flut/Ebbe) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Tide		Flut		Ebbe		Flut/Ebbe		Zeitreihe	
	m/s		m/s		m/s		-		m/s	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Emshörn-O*	**									
Emshörn-U	**									
Knock*	0.9	-0.1	1.1	-0.3	0.6	0.1	0.6	0.5	0.6	0.525
Emden*	**									
Ditzum*	0.9	-0.2	0.9	-0.2	0.9	-0.1	1.0	-0.1	0.3	0.901
Terborg*	0.7	-0.1	0.8	-0.3	0.7	-0.1	1.1	-0.3	0.2	0.890
Soltborg-O*	**									
Leerort_A*	0.7	-0.1	0.6	0.0	0.7	-0.1	0.9	0.1	0.2	0.916
Leerort_B*	0.5	-0.1	0.6	-0.2	0.5	0.0	1.3	-0.5	0.2	0.879
Grotegaste*	0.5	0.1	0.7	-0.1	0.4	0.2	2.0	-0.9	0.3	0.833
Weener_A*	0.5	-0.1	0.5	-0.2	0.5	-0.1	1.1	0.0	0.2	0.860
Weener_B*	0.5	0.0	0.5	-0.1	0.5	0.1	1.1	-0.2	0.1	0.896
Mark*	0.5	-0.1	0.4	0.0	0.6	-0.1	0.7	0.2	0.2	0.880
Papenburg*	0.7	-0.2	0.4	0.0	0.8	-0.2	0.5	0.2	0.2	0.872
Rhede*	**									

Tabelle 22: Analyse der Strömungsgeschwindigkeiten. Zeitraum: Validierung_4. Mittlere Tidestromgeschwindigkeit (Tide), mittlere Flutstromgeschwindigkeit (Flut), mittlere Ebbestromgeschwindigkeit (Ebbe) und Verhältnis der mittleren Flut- zu Ebbestromgeschwindigkeit (Flut/Ebbe) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Tide		Flut		Ebbe		Flut/Ebbe		Zeitreihe	
	m/s		m/s		m/s		-		m/s	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Emshörn-O*	**									
Emshörn-U										
Knock*										
Emden*										
Ditzum*										
Terborg*	0.7	-0.2	0.7	-0.3	0.7	-0.1	1.1	-0.3	0.2	0.878
Soltborg-O*	**									
Leerort_A*	0.6	-0.1	0.6	-0.1	0.7	-0.1	0.8	0.1	0.2	0.907
Leerort_B*	0.5	-0.1	0.6	-0.2	0.5	0.0	1.1	-0.3	0.2	0.882
Grotegaste*	0.6	0.0	0.7	-0.1	0.5	0.1	1.5	-0.5	0.2	0.876
Weener_A*	0.6	-0.2	0.6	-0.2	0.6	-0.2	1.0	0.0	0.2	0.806
Weener_B*	0.6	-0.1	0.6	-0.1	0.6	-0.1	0.9	-0.1	0.2	0.903
Mark*	0.6	-0.1	0.7	-0.3	0.6	-0.1	1.2	-0.4	0.3	0.668
Papenburg*	0.8	-0.2	0.4	0.0	0.9	-0.3	0.5	0.2	0.3	0.842
Rhede*	**									

Anlage 3: Validierungsergebnisse Salzgehalte

Tabelle 23: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_1. Mittlerer Tidesalzgehalt (Mittel), maximaler Tidesalzgehalt (Max), minimaler Tidesalzgehalt (Min), mittlere Tidesalzgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	‰		‰		‰		‰		‰	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Borkum-Südstr.	**									
Emshörn-O*	28.3	1.1	29.4	1.1	26.6	1.3	2.9	-0.2	1.1	0.787
Emshörn-U	28.4	0.9	29.6	0.9	26.9	1.0	2.6	0.0	1.0	0.815
Knock (WSV)*	21.1	1.5	24.2	1.2	17.3	1.6	6.9	-0.3	2.0	0.839
Knock (BfG)	21.2	1.4	24.3	1.2	17.2	1.3	7.1	-0.1	1.5	0.906
E. - Emspier	13.9	3.2	19.4	2.7	8.5	1.1	11.0	1.5	3.9	0.827
Emden*	14.3	1.0	19.4	1.2	6.9	0.3	12.5	1.0	1.3	0.975
Pogum	10.5	1.4	16.4	1.8	4.2	0.3	12.2	1.5	1.9	0.956
Ditzum*	**									
Gandersum-O*	8.1	0.4	13.4	0.6	1.9	0.3	11.6	0.3	0.7	0.991
Gandersum-U	8.4	0.0	14.6	-0.2	3.1	-0.9	11.5	0.7	0.9	0.989
Terborg (BfG)	4.0	-1.1	7.7	-1.0	1.6	-1.0	6.2	-0.1	1.2	0.921
Soltborg-O*	1.9	-0.9	2.9	-0.9	0.9	-0.4	2.0	-0.4	1.0	0.669
Soltborg-M	1.7	-0.7	2.2	-0.2	0.9	-0.5	1.3	0.2	0.8	0.659
Soltborg-U	1.8	-0.8	2.3	-0.4	1.1	-0.6	1.2	0.3	1.0	0.542
Leerort_A*	1.6	-0.9	3.0	-1.9	0.5	-0.1	2.5	-1.8	1.1	0.613
Leerort (NLWKN)	1.7	-1.0	2.9	-2.0	0.5	-0.2	2.5	-1.8	1.2	0.594
Leer-Leda*	1.1	-0.7	2.2	-1.6	0.2	0.0	2.0	-1.6	1.0	0.601
Weekeborg-O*	1.0	-0.5	1.7	-1.1	0.5	-0.1	1.2	-1.0	0.6	0.546
Weekeborg-M	0.9	-0.4	1.6	-1.0	0.4	0.0	1.2	-1.0	0.5	0.566
Weekeborg-U	1.0	-0.5	1.5	-0.9	0.5	-0.1	0.9	-0.7	0.6	0.504
Grotegaste*	0.9	-0.4	1.6	-1.1	0.5	-0.1	1.1	-1.0	0.6	0.513
Weener (NLWKN)	0.7	-0.2	1.0	-0.5	0.5	-0.1	0.5	-0.4	0.3	0.459
Weener_A*	0.7	-0.2	1.1	-0.6	0.5	-0.1	0.6	-0.5	0.3	0.461
Weener_B*	**									
Mark*	0.6	-0.1	0.8	-0.3	0.5	0.0	0.3	-0.2	0.2	0.374
Papenburg (NLWKN)	**									
Rhede*	0.5	0.0	0.6	0.0	0.3	0.2	0.3	-0.3	0.1	0.211
Herbrum*	**									

Tabelle 24: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_2. Mittlerer Tidesalzgehalt (Mittel), maximaler Tidesalzgehalt (Max), minimaler Tidesalzgehalt (Min), mittlere Tidesalzgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	‰		‰		‰		‰		‰	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Borkum-Südstr.	**									
Emshörn-O*										
Emshörn-U										
Knock (WSV)*										
Knock (BfG)	16.1	1.4	20.2	1.4	10.9	1.1	9.3	0.3	1.6	0.938
E. - Emspier	10.8	0.4	16.3	0.7	4.4	-0.6	12.0	1.3	1.3	0.979
Emden*	9.3	0.3	14.4	0.8	2.8	-0.5	11.5	1.4	0.9	0.988
Pogum	7.4	-0.7	13.3	-0.8	1.7	-0.3	11.6	-0.5	1.1	0.983
Ditzum*	7.1	-2.0	12.4	-2.2	1.4	-0.9	11.0	-1.4	2.6	0.917
Gandersum-O*	5.0	-0.9	9.1	-1.3	0.9	-0.3	8.2	-1.0	1.2	0.961
Gandersum-U	5.2	-1.2	10.2	-1.9	1.1	-0.5	9.1	-1.5	1.4	0.952
Terborg (BfG)	1.9	-0.9	4.7	-2.1	0.6	-0.2	4.1	-1.8	1.1	0.839
Soltborg-O*	**									
Soltborg-M										
Soltborg-U										
Leerort_A*	0.5	-0.1	0.8	-0.3	0.3	0.1	0.5	-0.4	0.2	0.685
Leerort (NLWKN)	0.6	-0.2	0.9	-0.4	0.3	0.0	0.6	-0.4	0.2	0.665
Leer-Leda*	0.4	-0.1	0.6	-0.2	0.2	0.0	0.4	-0.3	0.2	0.762
Weekeborg-O*	**									
Weekeborg-M										
Weekeborg-U										
Grotegaste*										
Weener (NLWKN)	0.4	0.0	0.5	-0.1	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.762
Weener_A*	0.4	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.807
Weener_B*	0.4	-0.1	0.5	-0.1	0.4	-0.1	0.1	0.0	0.0	0.786
Mark*	0.5	-0.1	0.5	-0.1	0.5	-0.1	0.1	0.0	0.1	0.691
Papenburg (NLWKN)	0.4	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.1	-0.1	0.0	0.749
Rhede*	0.4	0.0	0.4	0.0	0.3	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.888
Herbrum*	0.4	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.955

Tabelle 25: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_3. Mittlerer Tidesalzgehalt (Mittel), maximaler Tidesalzgehalt (Max), minimaler Tidesalzgehalt (Min), mittlere Tidesalzgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	‰		‰		‰		‰		‰	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Borkum-Südstr.	**									
Emshörn-O*										
Emshörn-U										
Knock (WSV)*	14.0	3.4	18.2	4.4	8.9	2.1	9.3	2.3	5.7	0.680
Knock (BfG)	14.1	3.4	19.2	3.7	8.0	2.4	11.2	1.2	3.8	0.824
E. - Emspier	**									
Emden*										
Pogum										
Ditzum*	3.2	0.4	7.1	1.0	0.4	0.1	6.8	0.9	1.1	0.969
Gandersum-O*	2.6	0.0	5.4	0.2	0.5	0.0	4.9	0.2	0.5	0.985
Gandersum-U	2.8	-0.3	7.4	-1.4	0.5	0.0	6.9	-1.4	0.8	0.974
Terborg (BfG)	0.9	-0.3	1.9	-0.7	0.5	-0.2	1.3	-0.5	0.4	0.865
Soltborg-O*	**									
Soltborg-M										
Soltborg-U										
Leerort_A*	0.3	0.1	0.4	0.0	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.627
Leerort (NLWKN)	0.3	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	0.2	-0.1	0.1	0.854
Leer-Leda*	0.2	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.898
Weekeborg-O*	**									
Weekeborg-M										
Weekeborg-U										
Grotegaste*	0.5	-0.1	0.5	-0.1	0.4	-0.1	0.1	0.0	0.1	0.603
Weener (NLWKN)	0.4	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.793
Weener_A*	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.393
Weener_B*	0.4	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.676
Mark*	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1	0.419
Papenburg (NLWKN)	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1	0.469
Rhede*	0.3	0.1	0.4	0.1	0.2	0.2	0.1	-0.1	0.1	0.491
Herbrum*	0.4	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.981

Tabelle 26: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Validierung_4. Mittlerer Tidesalzgehalt (Mittel), maximaler Tidesalzgehalt (Max), minimaler Tidesalzgehalt (Min), mittlere Tidesalzgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	‰		‰		‰		‰		‰	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Borkum-Südstr.	**									
Emshörn-O*										
Emshörn-U										
Knock (WSV)*										
Knock (BfG)										
E. - Emspier	9.3	2.8	17.4	2.2	2.3	1.3	15.1	0.9	3.4	0.935
Emden*	**									
Pogum	4.5	1.7	10.3	2.4	1.0	0.2	9.3	2.2	2.6	0.931
Ditzum*	**									
Gandersum-O*	2.5	0.5	5.1	1.7	0.6	0.0	4.4	1.6	1.3	0.961
Gandersum-U	2.6	0.4	6.3	0.8	0.6	0.1	5.7	0.7	1.2	0.969
Terborg (BfG)	1.0	-0.3	2.0	-0.4	0.6	-0.2	1.5	-0.2	0.4	0.949
Soltborg-O*	**									
Soltborg-M										
Soltborg-U										
Leerort_A*	0.3	0.0	0.4	0.0	0.3	0.1	0.2	-0.1	0.1	0.799
Leerort (NLWKN)	0.3	0.0	0.5	-0.1	0.2	0.1	0.3	-0.1	0.1	0.815
Leer-Leda*	0.2	0.0	0.2	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.877
Weekeborg-O*	**									
Weekeborg-M										
Weekeborg-U										
Grotegaste*	0.4	0.0	0.5	-0.1	0.4	0.0	0.1	-0.1	0.2	0.507
Weener (NLWKN)	0.4	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.873
Weener_A*	0.2	0.1	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1	0.0	0.1	0.475
Weener_B*	0.3	0.0	0.4	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.802
Mark*	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.1	0.545
Papenburg (NLWKN)	0.3	0.0	0.4	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.1	0.831
Rhede*	0.3	0.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.1	-0.1	0.1	0.736
Herbrum*	0.4	0.0	0.4	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.976

Tabelle 27: Analyse der Salzgehalte. Zeitraum: Jahr 2015. Mittlerer Tidesalzgehalt (Mittel), maximaler Tidesalzgehalt (Max), minimaler Tidesalzgehalt (Min), mittlere Tidesalzgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). * Messtiefe in m unter Wasserspiegel (Mitschwimmer). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 520/694 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	‰		‰		‰		‰		‰	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Borkum-Südstr.	**									
Emshörn-O*	27.8	0.9	29.4	1.0	25.4	1.1	4.0	-0.1	1.5	0.871
Emshörn-U	27.9	0.8	29.4	1.0	25.7	1.0	3.7	0.0	1.5	0.865
Knock (wsv)*	**									
Knock (BfG)	19.3	1.0	23.3	0.7	14.1	0.8	9.2	-0.1	1.8	0.960
E. - Emspier	12.8	1.2	18.9	0.9	6.4	0.1	12.5	0.7	3.0	0.939
Emden*	12.0	0.2	17.6	0.4	4.9	-0.3	12.6	0.7	1.6	0.983
Pogum	5.1	2.2	8.3	4.3	1.5	0.1	6.7	4.3	5.6	0.800
Ditzum*	8.7	0.4	14.8	0.2	2.9	0.2	12.0	0.0	1.7	0.978
Gandersum-O*	6.7	-0.7	11.4	-1.1	2.0	-0.5	9.4	-0.6	3.8	0.880
Gandersum-U	6.8	-0.9	12.2	-1.5	2.6	-0.9	9.6	-0.5	3.5	0.901
Terborg (BfG)	2.8	-0.8	5.4	-1.0	1.2	-0.6	4.2	-0.4	1.1	0.954
Soltborg-O*	**									
Soltborg-M	**									
Soltborg-U	**									
Leerort_A*	0.9	-0.4	1.6	-0.6	0.4	-0.1	1.1	-0.6	0.8	0.747
Leerort (NLWKN)	1.1	-0.6	1.8	-1.0	0.4	-0.1	1.4	-0.8	1.0	0.744
Leer-Leda*	0.8	-0.4	1.4	-0.9	0.2	0.0	1.2	-0.9	0.9	0.659
Weekeborg-O*	**									
Weekeborg-M	**									
Weekeborg-U	**									
Grotegaste*	0.8	-0.4	1.3	-0.8	0.5	-0.1	0.8	-0.7	0.7	0.609
Weener (NLWKN)	0.6	-0.2	0.8	-0.4	0.4	-0.1	0.4	-0.3	0.4	0.619
Weener_A*	0.6	-0.2	0.9	-0.5	0.4	0.0	0.5	-0.5	0.5	0.549
Weener_B*	**									
Mark*	**									
Papenburg (NLWKN)	0.5	0.0	0.5	-0.1	0.4	0.0	0.1	-0.1	0.1	0.885
Rhede*	0.4	0.0	0.5	0.0	0.2	0.2	0.2	-0.2	0.1	0.753
Herbrum*	0.4	0.0	0.5	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.989

Anlage 4: Validierungsergebnisse Schwebstoffgehalt

Tabelle 28: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_1. Mittlerer Tideschwebstoffgehalt (Mittel), maximaler Tideschwebstoffgehalt (Max), minimaler Tideschwebstoffgehalt (Min), mittlere Tideschwebstoffgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Knock	**									
E. - Emspier	0.8	-0.2	1.7	-0.4	0.3	0.0	1.4	-0.4	0.4	0.800
Pogum	1.2	0.2	3.5	-0.8	0.1	0.2	3.4	-1.1	0.8	0.819
Gandersum	1.6	0.1	6.7	-2.6	0.2	0.4	6.5	-3.1	1.0	0.858
Terborg	2.5	0.3	9.0	-4.7	0.4	0.9	8.6	-5.6	1.9	0.697

Tabelle 29: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_2. Mittlerer Tideschwebstoffgehalt (Mittel), maximaler Tideschwebstoffgehalt (Max), minimaler Tideschwebstoffgehalt (Min), mittlere Tideschwebstoffgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Knock	**									
E. - Emspier	1.7	-0.7	4.1	-1.7	0.3	0.1	3.8	-1.8	1.0	0.718
Pogum	2.1	0.3	6.6	-2.2	0.3	0.3	6.2	-2.5	1.1	0.860
Gandersum	2.2	0.4	8.0	-2.3	0.4	0.6	7.6	-2.9	1.0	0.913
Terborg	2.0	1.7	4.8	0.7	0.6	1.4	4.3	-0.6	2.0	0.641

Tabelle 30: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_3. Mittlerer Tideschwebstoffgehalt (Mittel), maximaler Tideschwebstoffgehalt (Max), minimaler Tideschwebstoffgehalt (Min), mittlere Tideschwebstoffgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Knock	**									
E. - Emspier										
Pogum	1.9	0.8	5.0	-0.3	0.4	0.4	4.6	-0.7	1.4	0.787
Gandersum	1.4	1.4	5.3	0.2	0.4	0.8	4.9	-0.7	1.7	0.730
Terborg	0.8	2.8	1.8	3.3	0.4	1.5	1.4	1.9	3.0	0.330

Tabelle 31: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Validierung_4. Mittlerer Tideschwebstoffgehalt (Mittel), maximaler Tideschwebstoffgehalt (Max), minimaler Tideschwebstoffgehalt (Min), mittlere Tideschwebstoffgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 14/28 Tiden analysierbar).

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Knock	**									
E. - Emspier										
Pogum	1.7	0.6	4.8	-0.7	0.4	0.4	4.5	-1.1	1.5	0.744
Gandersum	1.3	1.0	4.1	0.3	0.4	0.6	3.7	-0.3	1.4	0.762
Terborg	0.9	2.0	2.0	2.3	0.4	1.1	1.6	1.3	2.2	0.499

*Tabelle 32: Analyse der Schwebstoffgehalte. Zeitraum: Jahr 2015. Mittlerer Tideschwebstoffgehalt (Mittel), maximaler Tideschwebstoffgehalt (Max), minimaler Tideschwebstoffgehalt (Min), mittlere Tideschwebstoffgehaltsvariation (Variation) jeweils gemessen (Mes.) und Abweichung zum Modell (Δ Mod.). Negative Abweichungen bedeuten ein kleineres Modellergebnis. Abweichungen der synoptischen Ergebnisse (Zeitreihe) als Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (RMSE) und Skill-Wert nach Willmott (1981) (Skill). ** Pegel mit Messlücken (weniger als 520/694 Tiden analysierbar).*

Messstation	Mittel		Max		Min		Variation		Zeitreihe	
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	-
	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	Mes.	Δ Mod.	RMSE	Skill
Knock	**									
E. - Emspier	1.0	-0.3	2.4	-0.8	0.2	0.1	2.2	-0.9	0.7	0.755
Pogum	1.4	0.4	4.2	-0.9	0.3	0.2	4.0	-1.1	1.1	0.799
Gandersum	1.5	0.5	5.6	-1.2	0.3	0.5	5.3	-1.7	1.1	0.831
Terborg	1.5	1.5	4.7	-0.2	0.4	1.1	4.3	-1.2	2.0	0.636



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de