

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Büscher, Annette; Seiffert, Rita

Aufbau eines Deutsche-Bucht-Modells einschließlich der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe. FuE-Abschlussbericht B3955.03.04.70227

BMVI-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/107115>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2020): Aufbau eines Deutsche-Bucht-Modells einschließlich der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe. FuE-Abschlussbericht B3955.03.04.70227. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BMVI-Expertennetzwerk Wissen Können Handeln).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

**FuE-Abschlussbericht
Aufbau eines Deutsche-Bucht-Modells
einschließlich der Ästuar
Ems, Jade-Weser und Elbe**

B3955.03.04.70227

Januar 2020

FuE-Abschlussbericht
Aufbau eines Deutsche-Bucht-Modells einschließlich
der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe

Beginn des Vorhabens: Januar 2015

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.03.04.70227

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
 Referat: Ästuarsysteme II (K3)
 Projektleiter: Dr. Annette Büscher
 Bearbeiter: Dr. Rita Seiffert, Dr. Annette Büscher

Hamburg, Januar 2020

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

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses FuE-Projektes ist ein hochaufgelöstes, dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches (HN-)Modell (UnTRIM2009) der Deutschen Bucht inklusive der Ästuarare Ems, Jade-Weser und Elbe aufgebaut worden.

Die Elementgrößen des numerischen Rechengitters variieren je nach Region mit Verfeinerungen in Richtung Küste, um die physikalischen Prozesse und das Volumen möglichst genau abzubilden. Der seeseitige Modellrand ermöglicht eine verlässliche und einfache Randwerteüberprüfung mit Messungen und liegt weit genug von der Küste entfernt, so dass die dortigen Verhältnisse von den Verhältnissen in den Ästuaren unbeeinflusst sind. Die seeseitigen Wasserstandsrandwerte werden mit dem übergeordneten, kalibrierten Modell DCsMv6 FM von Deltares berechnet, welches bei der BAW in Kooperation genutzt werden darf und eine gute Übereinstimmung mit Messungen liefert. Durchgeführte Sensitivitätsuntersuchungen ergeben, dass neben der räumlichen Auflösung die Wahl des Advektionsverfahrens, die Güte der seeseitigen Randwerte und die räumliche Rauheitsverteilung die Modellgüte gegenüber Messungen maßgeblich bestimmen.

Die Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte des Modells werden anhand eines Spring-Nipp-Zeitraumes mit normalen Tideverhältnissen kalibriert. Die Validierung des Modells erfolgt anhand eines zweiten Spring-Nipp-Zeitraumes mit normalen Tideverhältnissen sowie für einen Zeitraum mit Sturmflutbedingungen. Das Deutsche-Bucht-Modell zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung und gibt die Variabilität und Form der Wasserstandskurven, sowie Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte gut wieder. Die Modellierung der Wassertemperatur liefert im Hinblick auf den gewählten Berechnungsansatz in den Ästuaren ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse. Für eine quantitative Überprüfung der Modellgüte werden statistische Analysen der Tidekennwerte des Wasserstandes anhand einer Jahressimulation durchgeführt und mit Messungen verglichen. Die für einige Pegel berechneten Korrelationskoeffizienten, der Bias und der RSME des Modells gegenüber Messungen ergeben, dass das Modell die Tidedynamik auch über einen langen Simulationszeitraum gut abbildet. Die Kennzahlen liegen in der Größenordnung der Kennzahlen des übergeordneten Modells, welches die Wasserstandsrandwerte bereitstellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Deutsche-Bucht-Modell für die Simulation der Hydrodynamik und Transporte in der Deutschen Bucht inklusive der Ästuarare geeignet ist. Der dreidimensionale Modellansatz und die variable Gitterauflösung ermöglichen eine genaue Abbildung aller relevanten physikalischen Prozesse inklusive barokliner Einflüsse auf die Strömungs- und Transportverhältnisse. Dies ist für Untersuchungen von Extremereignissen wie hohen Oberwasserzuflüssen, Untersuchungen zum Einfluss eines möglichen Klimawandels sowie wasserbaulichen Fragestellungen von Bedeutung. Zusätzlich können einheitliche Randwertdatensätze für andere Modelle bereitgestellt werden. Zur Verbesserung der Modellgüte soll zukünftig für die Berechnung der Wassertemperatur die Strahlungsbilanz berücksichtigt werden.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Problemdarstellung und Ziel	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	1
1.3	Untersuchungsziel	1
2	Untersuchungskonzept und Eingangsdaten	2
2.1	Modellverfahren UnTRIM	2
2.2	Eingangsdaten	2
2.2.1	Modellgebiet und numerisches Gitter	2
2.2.2	Bathymetrie	2
2.2.3	Anfangs- und Randbedingungen	4
2.2.4	Rauheitsverteilung	4
3	Ergebnisse	5
3.1	Kalibrierung	5
3.1.1	Untersuchungen zur Modellsensitivität	5
3.1.2	Güte der Wasserstandsrandwerte sowie Verhältnisse von Wind und Oberwasserzuflüssen im Kalibrierungszeitraum	5
3.1.3	Ergebnis der Kalibrierung für die Küstenpegel der Deutschen Bucht	8
3.1.4	Ergebnis der Kalibrierung für das Ems Ästuar	12
3.1.5	Ergebnis der Kalibrierung für das Jade-Weser-Ästuar	16
3.1.6	Ergebnisse der Kalibrierung für das Elbe Ästuar	19
3.2	Validierung	26
3.2.1	Verhältnisse von Wind und Oberwasserzuflüssen sowie die Güte der Wasserstandsrandwerte im Validierungszeitraum	26
3.2.2	Ergebnis der Validierung für die Küstenpegel	29
3.2.3	Ergebnis der Validierung für das Ems Ästuar	32
3.2.4	Ergebnis der Validierung für das Jade-Weser-Ästuar	34
3.2.5	Ergebnis der Validierung für das Elbe Ästuar	36
3.3	Validierung Sturmflutzeitraum	42
3.3.1	Verhältnisse von Wind und Oberwasserzuflüssen sowie Güte der Wasserstandsrandwerte im Sturmflutzeitraum	42
3.3.2	Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für die Küstenpegel	45
3.3.3	Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für die Ems	47
3.3.4	Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für das Jade-Weser-Ästuar	47
3.3.5	Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für das Elbe Ästuar	49
3.4	Ergebnisse der Simulation der Wassertemperatur	50
3.4.1	Verhältnisse der Lufttemperatur im Simulationsjahr 2010	50
3.4.2	Ergebnis der Simulation der Wassertemperatur für die Küstenpegel	51
3.4.3	Ergebnis der Simulation der Wassertemperatur für die Ästuarre Jade-Weser und Elbe	53

3.5	Statistische Auswertung der Simulation des Jahres 2010	56
4	Zusammenfassung	60
5	Literatur	61

Bildverzeichnis		Seite
Bild 1:	Modelltopographie der Deutschen Bucht einschließlich der Ästuarare Ems, Jade-Weser und Elbe	3
Bild 2:	Abflussganglinien der Ems (Pegel Versen, in Schwarz), Jade-Weser (Pegel Intschede, in Rot) und Elbe (Pegel Neu Darchau, in Grün) des Jahres 2010 mit Zeiträumen für die Kalibrierung (blauer Kasten), die Validierung (gelber Kasten) und die Sturmflut-Validierung (magentafarbener Kasten)	6
Bild 3:	Messungen der skalaren Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Kalibrierungszeitraum (Datenquelle DWD)	7
Bild 4:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Terschelling; untere Bildhälfte: Differenz DCSMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Kalibrierungszeitraum	7
Bild 5:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Hvide Sande; untere Bildhälfte: Differenz DCSMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Kalibrierungszeitraum	8
Bild 6:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation bzw. die eingesteuerten WL Randwerte (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Terschelling (NL); untere Bildhälfte: Pegel Hvide Sande (DK)	9
Bild 7:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Wierumergronden; untere Bildhälfte: Pegel Huibertgat	9
Bild 8:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Norderney Riffgat; untere Bildhälfte: Pegel Helgoland Binnenhafen	10
Bild 9:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Büsum; untere Bildhälfte: Pegel Pellworm	10
Bild 10:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel List; untere Bildhälfte: Pegel Esbjerg	11

Bild 11:	Obere Bildhälfte: Station Deutsche Bucht, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -30,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -39,5 bis -38,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Station FINO1, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -12,5 mNHN) und die Simulation (in Grün: -31,5 bis -30,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	11
Bild 12:	Obere Bildhälfte: Zeitreihe des Salzgehaltes (tiefengemittelt) der Messung bei Helgoland Reede (in Schwarz) und der Simulation bei Helgoland Binnenhafen (in Rot); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Elbe (Pegel Neu Darchau)	12
Bild 13:	Bathymetrie des Ems-Ästuars/ Deutsche-Bucht-Modell	13
Bild 14:	Verwendete Rauheitsverteilung im Ems-Ästuar/Deutsche-Bucht-Modell	13
Bild 15:	Pegel Borkum Südstrand; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: -4,0 mNHN) und die Simulation (in Rot: -4,5 bis -3,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -4,0 mNHN) und die Simulation (in Rot: -4,5 bis -3,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)	13
Bild 16:	Pegel Emden Neue Seeschleuse; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: -1,6 mNHN) und die Simulation (in Rot: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -1,6 mNHN) und die Simulation (in Rot: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	14
Bild 17:	Pegel Terborg; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: -4,0 mNHN) und die Simulation (in Rot: -8,5 bis -7,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -4 mNHN) und die Simulation (in Rot: -8,5 bis -7,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	14
Bild 18:	Pegel Papenburg; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: -0,9 mNHN) und die Simulation (in Rot: -2,5 bis -1,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -4,0 mNHN) und die Simulation (in Rot: -2,5 bis -1,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)	15
Bild 19:	Obere Bildhälfte: Zeitreihe des Salzgehaltes (tiefengemittelt) der Simulation bei Emden (in Schwarz), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Rot), Messung des Salzgehaltes bei Emden (in Grün), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Blau); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Ems (Pegel Versen)	15
Bild 20:	Bathymetrie des Jade-Weser-Ästuars/ Deutsche-Bucht-Modell	16
Bild 21:	Verwendete Rauheitsverteilung im Jade-Weser-Ästuar/Deutsche-Bucht-Modell	16

Bild 22:	Pegel Leuchtturm Alte Weser; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,6 mNHN) und die Simulation (in Rot: -10,5 bis -9,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	17
Bild 23:	Pegel Dwarsgat; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,7 mNHN) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	17
Bild 24:	Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,9 mNHN) und die Simulation (in Rot: -15,5 bis -14,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	18
Bild 25:	Pegel Brake; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,8 mNHN) und die Simulation (in Rot: -13,5 bis -12,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	18
Bild 26:	Obere Bildhälfte: Messung des Salzgehaltes bei Bremerhaven Alter Leuchtturm (in Schwarz), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Schwarz), Simulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt, in Rot), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Weser (Pegel Intschede)	19
Bild 27:	Bathymetrie des Elbe-Ästuars/Deutsche-Bucht-Modell	20
Bild 28:	Verwendete Rauheitsverteilung im Elbe-Ästuar/Deutsche-Bucht-Modell	20
Bild 29:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bake A; untere Bildhälfte: Pegel Cuxhaven	21
Bild 30:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Brokdorf; untere Bildhälfte: Pegel Stadersand	21
Bild 31:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Blankenese; untere Bildhälfte: Pegel St. Pauli	22
Bild 32:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bunthaus; untere Bildhälfte: Pegel Zollenspieker	22
Bild 33:	Station LZ4a; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	23

Bild 34:	Station LZ3; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)	23
Bild 35:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10, mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	24
Bild 36:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	24
Bild 37:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	25
Bild 38:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	25
Bild 39:	Obere Bildhälfte: Messung des Salzgehaltes an der Station LZ3 (in Rot), Simulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt, in Schwarz), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Elbe (Pegel Neu Darchau)	26
Bild 40:	Messungen der skalaren Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Validierungszeitraum (Datenquelle DWD)	27

Bild 41:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DC SMv6 FM (in Rot) am Pegel Terschelling; untere Bildhälfte: Differenz DC SMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Validierungszeitraum	28
Bild 42:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DC SMv6 FM (in Rot) am Pegel Hvide Sande; untere Bildhälfte: Differenz DC SMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Validierungszeitraum	28
Bild 43	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation bzw. die eingesteuerten WL Randwerte (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Terschelling (NL); untere Bildhälfte: Pegel Hvide Sande (DK)	29
Bild 44:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Wierumergronden; untere Bildhälfte: Pegel Huibertgat	30
Bild 45:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Norderney Riffgat; untere Bildhälfte: Pegel Helgoland Binnenhafen	30
Bild 46:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Büsum; untere Bildhälfte: Pegel Pellworm	31
Bild 47:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel List; untere Bildhälfte: Pegel Esbjerg	31
Bild 48:	Obere Bildhälfte: Station Deutsche Bucht, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: –6,0 mNHN; in Rot: –30,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: –39,5 bis –38,5 mNHN; in Blau: –1,5 bis –0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Station FINO1, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: –6,0 mNHN; in Rot: –12,5 mNHN) und die Simulation (in Grün: –31,5 bis –30,5 mNHN; in Blau: –1,5 bis –0,5 mNHN)	32
Bild 49:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Borkum Südstrand; untere Bildhälfte: Pegel Emden Neue Seeschleuse	33
Bild 50:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Terborg; untere Bildhälfte: Pegel Papenburg	33
Bild 51:	Pegel Leuchtturm Alte Weser; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: –2,6 mNHN) und die Simulation (in Rot: –10,5 bis –9,5 mNHN; in Grün: –2,5 bis –1,5 mNHN)	34
Bild 52:	Pegel Dwarsgat; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: –2,7 mNHN) und die Simulation (in Rot: –9,5 bis –8,5 mNHN; in Grün: –2,5 bis –1,5 mNHN)	35

Bild 53:	Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,9 mNHN) und die Simulation (in Rot: -15,5 bis -14,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	35
Bild 54:	Pegel Brake; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,8 mNHN) und die Simulation (in Rot: -13,5 bis -12,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	36
Bild 55:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bake A; untere Bildhälfte: Pegel Cuxhaven	37
Bild 56:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Brokdorf; untere Bildhälfte: Pegel Stadersand	37
Bild 57:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Blankenese; untere Bildhälfte: Pegel St. Pauli	38
Bild 58:	Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bunthaus; untere Bildhälfte: Pegel Zollenspieker	38
Bild 59:	Station LZ4a; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)	39
Bild 60:	Station LZ3; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)	39
Bild 61:	Station LZ1 Tonne; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -6,5 bis -5,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -6,5 bis -5,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)	40
Bild 62:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	40

Bild 63:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	41
Bild 64:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	41
Bild 65:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	42
Bild 66:	Messungen der skalaren Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Sturmflutzeitraum (Datenquelle DWD)	43
Bild 67:	Messungen der Windrichtung in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Sturmflutzeitraum (Datenquelle DWD)	43
Bild 68:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Terschelling für den Sturmflutzeitraum ; untere Bildhälfte: Differenz der Wasserstände zwischen DCSMv6 FM – Messung (in Grün)	44
Bild 69:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Hvide Sande für den Sturmflutzeitraum; untere Bildhälfte: Differenz der Wasserstände zwischen DCSMv6 FM – Messung (in Grün)	44
Bild 70:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Huibertgat, untere Bildhälfte: Pegel Helgoland Binnenhafen	45
Bild 71:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Büsum, untere Bildhälfte: Pegel Pellworm	46
Bild 72:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel List, untere Bildhälfte: Pegel Esbjerg	46

Bild 73:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Borkum Südstrand, untere Bildhälfte: Pegel Emden Neue Seeschleuse	47
Bild 74:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Leuchtturm Alte Weser, untere Bildhälfte: Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm	48
Bild 75:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Brake, untere Bildhälfte: Pegel Oslebshausen	48
Bild 76:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Bake A, untere Bildhälfte: Pegel Cuxhaven	49
Bild 77:	Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Glückstadt, untere Bildhälfte: Pegel St. Pauli	50
Bild 78:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Lufttemperatur bei Helgoland für die Daten aus COSMO-REA6 (in Schwarz: 2,0 m Höhe über Grund) und die Messung (in Rot: 4,0 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Lufttemperatur bei Cuxhaven aus COSMO-REA6 (in Schwarz: 2,0 m Höhe über Grund) und für die Messung (in Rot: 4,0 mNHN)	51
Bild 79:	Oben: Lufttemperatur aus COSMO-REA6 bei Helgoland; Mitte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung Helgoland Reede (tiefungemittelt, in Schwarz) und die Simulation (in Rot: -4,5 bis -3,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); unten: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung Deutsche Bucht (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -30,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -39,5 bis -38,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	52
Bild 80:	Oben: Lufttemperatur aus COSMO-REA6 bei Helgoland; Mitte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung Nordseeboje III (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -35,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -40,5 bis -39,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); unten: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung FINO1 (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -25,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -31,5 bis -30,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)	53
Bild 81:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Leuchtturm Alte Weser (in Schwarz: -2,6 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefungemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Dwarsgat (in Schwarz: -2,7 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefungemittelt)	54
Bild 82:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Bremerhaven AL (in Schwarz: -2,9 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefungemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Brake (in Schwarz: -2,8 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefungemittelt)	55
Bild 83:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei LZ4a (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot, tiefungemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei LZ3 (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot, tiefungemittelt)	55

Bild 84:	Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt)	56
----------	---	----

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 1: Statistische Kennzahlen für den Tidehub gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung	58
Tabelle 2: Statistische Kennzahlen für das Tidehochwasser gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung	58
Tabelle 3: Statistische Kennzahlen für das Tidemittelwasser gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung	59
Tabelle 4: Statistische Kennzahlen für das Tideniedrigwasser gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung	59

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Wasserstände, Salzgehalte und Sedimenttransporte in der Deutschen Bucht stehen in enger Wechselwirkung mit den angrenzenden Ästuaren. Wasserbauliche Fragestellungen in dieser Region können daher ein großes Modellgebiet erfordern, das alle relevanten Prozesse in hoher Auflösung abbildet: z. B. die Untersuchung der Wirkung wasserbaulicher Maßnahmen im Mündungsbereich der Ästuare, die Wirkung von Extremereignissen und der Einfluss eines möglichen Klimawandels.

Die modernen Modell- und Analyseverfahren der BAW sowie gestiegene Speicher- und Rechnerkapazitäten ermöglichen die Berechnung großer Modellgebiete mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung über lange Zeiträume. Zusätzlich können Erfahrungen aus den an der BAW durchgeführten Projekten, z. B. AufMod (Heyer und Schrottke 2013), Optel-C (Kremp et al. 2012), KLIWAS (Seiffert et al. 2014), EXTREMENESS-C (Rudolph und Brodhagen 2018) sowie die aktuelle Kooperation mit den BAW-Projekten EasyGSH-DB (KFKI 2018), BASEWAD (Fricke und Weilbeer 2018) und dem Expertennetzwerk (Hänsel et al. 2017) genutzt werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Der Nutzen eines hochaufgelösten HN-Modells der Deutschen Bucht für die WSV ist vielfältig. Die Wirkung wasserbaulicher Maßnahmen im Mündungsbereich der Ästuare, die Wirkung von Extremereignissen wie Sturmfluten und hohen Oberwasserzuflüssen und der Einfluss eines möglichen Klimawandels können so für den gesamten Küstenraum und die angrenzenden Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe abgeschätzt werden. Das Modell soll außerdem einheitliche Randwertdatensätze für Sturmflutuntersuchungen und für andere Modelle bereitstellen. Es unterstützt dabei laufende Projektarbeiten, z. B. zum Expertennetzwerk und zum Sedimentmanagement im Elbeästuar.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel dieses Projektes ist der Aufbau eines hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modells der Deutschen Bucht inklusive der Ästuare Ems, Jade-Weser und Elbe, das die Hydrodynamik und Transportprozesse von Salz und Wärme dreidimensional und in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung berechnet. Der Modellaufbau umfasst dabei den Aufbau numerischer Rechengitter mit geeignetem seeseitigen Modellrand, die Festlegung geeigneter Randbedingungen und die Kalibrierung der Wasserstände, des Salzgehaltes und der Wassertemperatur. Das Modell soll u. a. im operationellen Betrieb, für Hindcastrechnungen, für Untersuchungen zum Einfluss eines möglichen Klimawandels und für wasserbauliche Systemstudien eingesetzt werden können.

2 Untersuchungskonzept und Eingangsdaten

2.1 Modellverfahren UnTRIM

Das auf der Methode der Finiten Differenzen / Finite Volumen basierende mathematische Verfahren UnTRIM2009 (Casulli und Stelling 2011) dient der Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. Das Verfahren löst die dreidimensionale reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichung (RANS) mit einem hydrostatischen Druckansatz. Die vertikale Turbulenz wird mithilfe des $k-\varepsilon$ -Modells abgebildet. Des Weiteren werden im Verfahren der Impulseintrag durch den Wind (Ansatz von Smith und Banke 1975) und der Wärmeaustausch Wasser - Atmosphäre (Excess-Temperature-Ansatz, Sweers 1976) berücksichtigt. Weitere Eingangsgrößen sind der atmosphärische Luftdruck (orts- und zeitvariabel) sowie die Bodenreibung nach Nikuradse in Kopplung mit dem Programmmodul SediMorph. UnTRIM2009 verwendet die Subgrid-Technologie, wodurch die Bathymetrie und somit das Volumen im Modell besonders in flachen Küstenbereichen höher aufgelöst werden kann. Der Rechenzeitschritt liegt bei 1 min, der Ausgabezeitschritt liegt bei 10 min. Die primären Berechnungsergebnisse im verwendeten Modus von UnTRIM2009 umfassen die Wasserspiegelauslenkung der freien Oberfläche, Strömungsgeschwindigkeiten sowie Salzkonzentration und Wärme.

2.2 Eingangsdaten

2.2.1 Modellgebiet und numerisches Gitter

Das Modellgebiet umfasst die gesamte Deutsche Bucht, s. Bild 1. Eine zentrale Frage in diesem Projekt ist die Wahl der Lage des seeseitigen Modellrandes, welche eine verlässliche, und möglichst einfache Randsteuerung und -überprüfung auf Grundlage vorhandener Dauermess- und Pegelstandorte ermöglicht. Der gewählte seeseitige Modellrand erstreckt sich vom Pegel Terschelling (NL) im Westen bis zum Pegel Hvide-Sande (DK) im Nordosten. Der seeseitige Modellrand liegt genügend weit von der Küste entfernt, so dass die Verhältnisse am Rand von den Verhältnissen in den Ästuaren unbeeinflusst sind. Das modellierte Gebiet beinhaltet die drei an die Deutsche Bucht angrenzenden Ästuare Ems, Weser und Elbe mit ihren Nebenflüssen bis Bollingerfähr, Intschede und Bleckede. Die Eider wird vereinfacht über einen Flowrand im Modell berücksichtigt. Die Simulationen erfolgen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter mit drei- sowie viereckigen Elementen. Die Elementgrößen variieren zwischen Kantenlängen von maximal 5658 m in der Nähe des seeseitigen Modellrandes und bis zu 4 m am Bullenfluss (Tideelbe). Insgesamt umfasst das verwendete Rechengitter 88010 Elemente (12832276 Subpolygone) mit einer Gesamtfläche von 42817 km². Die vertikale Auflösung liegt bei 1 m. Die Verwendung der Subgrid-Technologie sowie der variablen räumlichen Auflösung führen zu einer Optimierung der Rechendauer und des Speicherbedarfs.

2.2.2 Bathymetrie

Aufgrund der Größe des Modellgebiets müssen Topographieinformationen aus verschiedenen Quellen herangezogen werden. Die Topographie des Modells beruht hauptsächlich auf Daten-

sätzen des DHI (2002, 2003 und 2009) und des BSH (1985–2013). Im küstennahen Bereich von Schiermonnikoog (NL) bis Nordfriesland werden die Tiefeninformationen aus dem Vorgängerprojekt AufMod (Heyer und Schrottke 2013) übernommen. Westlich von Schiermonnikoog (NL) wird ein niederländischer Datensatz verwendet (1998–2001). Die Topographiedaten der Ästuarre Ems und Elbe stammen aus dem Jahr 2010, die Daten des Jade-Weser Ästuars aus dem Jahr 2012. Die Kantentiefen liegen im Modellgebiet zwischen -12 mNHN auf Pagensand (Elbeästuar) und $+57$ mNHN südlich von Helgoland, s. Bild 1.

Des Weiteren werden die wichtigsten Strombauwerke im Modellgitter berücksichtigt. Mithilfe des Präprozessors Java Netzgenerator (JaNET) werden unter Zuhilfenahme tiefenreferenzierter Bauwerkspolygone aus dem Projekt EasyGSH-DB Bauwerke wie Buhnen und Leitdämme auf die Subkanten des numerischen Gitternetzes übertragen. Die berücksichtigten Bauwerke umfassen den Geiseleitdamm, das Emssperrwerk, große Buhnenbauwerke (Norderney, Wangerooge, Minsener Oog), Schweinsrücken, Kugelbakenleitdamm, Glameyer Stack sowie große Buhnenbauwerke und Leitwerke im Jade-Weser-Ästuar und der Tideelbe, Trischendamm (Dithmarschen), Verbindungsdamm zu Halligen und der Hindenburgdamm (Sylt). Zukünftig soll die Ausrichtung des numerischen Gitternetzes den Bauwerken angepasst werden, um die Strömungswirkung optimal abzubilden.

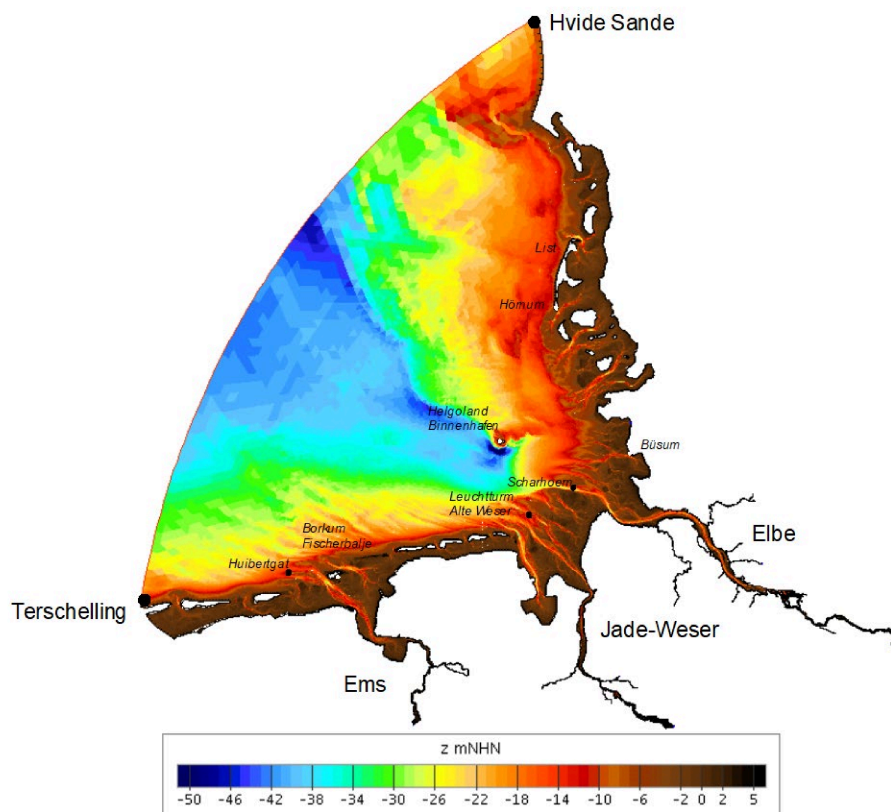


Bild 1: Modelltopographie der Deutschen Bucht einschließlich der Ästuarre Ems, Jade-Weser und Elbe

2.2.3 Anfangs- und Randbedingungen

Der Simulationszeitraum umfasst das gesamte Jahr 2010 vom 01.01.2010, 01:00 Uhr – 31.12.2010, 01:00 Uhr. Die Zeiträume für Kalibrierung und Validierung liegen im Juli, Oktober und November 2010, s. Kapitel 3.1 – 3.3.

Die Anfangsbedingungen für Wasserstand und Salzgehalt für den Start der Simulation am 01.01.2010, 01:00 Uhr werden dem übergeordneten, kalibrierten Nordseemodell des BAW-Projektes NSEE_BASE entnommen. Die Wassertemperatur wird konstant mit 6 °C initialisiert.

Eine möglichst exakte Steuerung des seeseitigen Rands ist die grundlegende Voraussetzung für die Kalibrierung und Validierung des Modells. Die Wasserstände am seeseitigen Rand werden mit dem übergeordneten, kalibrierten Modell DCSMv6 FM berechnet, welches von Deltares (Zijl et al. 2014) entwickelt wurde und bei der BAW in Kooperation genutzt werden darf. Die Wasserstände werden an 14 Stützstellen entlang des seeseitigen Randes des Deutsche-Bucht-Modells aus dem Modell DCSMv6 FM ausgelesen und mit Zeitschritten von 10 min ins Deutsche-Bucht-Modell eingesteuert.

Die seeseitigen Salzgehalte werden dem Nordseemodell des BAW-Projektes NSEE_BASE entnommen. Als Randwerte der Wassertemperatur dient die Messung Helgoland Reede aus 2010 (Tagesmittelwerte, tiefengemittelt) (Wiltshire et al. 2008).

Die Randwerte zur Lufttemperatur, zu Luftdruck und Windgeschwindigkeit stammen aus dem Datensatz COSMO-REA6 (HERZ-Zentrum für Wetterforschung, 2017). Die Oberwasserzuflüsse von Ems, Jade-Weser und Elbe werden über Messungen als Tageswerte eingesteuert (Ems / Pegel Versen: WSA Meppen; Jade-Weser / Pegel Intschede: WSA Hann. Münden; Elbe / Pegel Neu Darchau: www.portal-tideelbe.de). Die Randwerte für die Eider sowie die Ästuar-Zuflüsse bzgl. Abfluss, Salzgehalte und Wassertemperatur werden jeweils in erster Näherung als konstante Werte im Modell berücksichtigt.

Die binnenseitigen Randwerte zum Salzgehalt und zur Wassertemperatur für das Jade-Weser Ästuar werden über die Messstation Wehr Hemelingen als Tagesmittelwerte eingesteuert (WSA Bremerhaven). Die binnenseitigen Randwerte zum Salzgehalt der Ems stammen von der Messstation Herbrum. Die binnenseitige Randwertsteuerung der Wassertemperatur der Ems erfolgt aufgrund unzureichender Datenlage bei Herbrum mithilfe der Messstation Hemelingen / Weser als erste Näherung. Die binnenseitigen Salzgehalte der Elbe werden konstant mit 0,4 PSU vorgegeben. Für die binnenseitige Randwertsteuerung der Wassertemperatur der Elbe werden Tagesmittelwerte der Station Cumlosen verwendet (Datenbank undine <http://undine.bafg.de/>). Zusätzlich werden die Wärmeeinleitungen in der Elbe durch die Bayer AG, das Kernkraftwerk Brokdorf, DOW Chemicals, Kraftwerke Wedel und Tiefstack sowie die Müllverbrennungsanlage MVR über konstante Quellen-und-Senkenterme berücksichtigt.

2.2.4 Rauheitsverteilung

Die Rauheitsverteilung ist eine Kalibrierungsgröße und wird durch die Wahl der effektiven Sohlrauheit k_s nach Nikuradse bestimmt. Die Rauheit wird so angepasst, dass die Wasserstände, d. h. Tidehoch- und Tideniedrigwasser, Tidehub und Form der Tidekurve in der Deutschen Bucht und in den Ästuaren bestmöglich getroffen werden. Die gewählte Rauheitsverteilung ist jeweils in Bild 14 (Ems), Bild 21 (Jade-Weser) und Bild 28 (Jade-Weser) dargestellt. Außerhalb

der Ästuare wurden eine konstante Bodenrauheit von 0,63 mm sowie in Nordfriesland lokal erhöhte Rauheiten zwischen 1 – 10 mm gewählt.

3 Ergebnisse

3.1 Kalibrierung

3.1.1 Untersuchungen zur Modellsensitivität

In einem numerischen Simulationsverfahren ist die Güte der Berechnungsergebnisse von zahlreichen Faktoren abhängig. Im Projekt werden daher zunächst Sensitivitätsuntersuchungen zu Modelleinstellungen und zur Datengrundlage durchgeführt. Mithilfe dieser Voruntersuchungen werden diejenigen Parameter identifiziert, die die Güte der Simulationsergebnisse gegenüber Messungen maßgeblich bestimmen und daher für die Modellkalibrierung von Bedeutung sind. Die Voruntersuchungen umfassen Simulationen zu

- der Wahl des Advektionsverfahrens
- 2D- oder 3D-Modus
- der Parametrisierung der horizontalen turbulenten Viskosität
- der Wahl der horizontalen und vertikalen Gitterauflösung
- der Berücksichtigung von Salz, Temperatur und Sedimenttransport
- der rechnerische Berücksichtigung der Bodenrauheit
- der räumlichen Rauheitsverteilung
- dem Einfluss der Bathymetrie
- der Berücksichtigung der Ästuare im Modell
- der Güte der seeseitigen Randwerte von Wasserstand, Salz und Wassertemperatur
- der Lage und Anzahl der Stützstellen der seeseitigen Wasserstandsrandwerte aus dem übergeordneten Modell

Die Sensitivitätsuntersuchungen ergeben, dass die Hydrodynamik im Deutsche-Bucht-Modell neben der horizontalen und vertikalen Auflösung maßgeblich über die Wahl des Advektionsverfahrens, die Güte der seeseitigen Randwerte und die räumliche Rauheitsverteilung bestimmt werden. Für das vorhandene numerische Gitter (s. Kap. 2.2.1) erfolgt die Kalibrierung und Validierung der Hydrodynamik und Transporte des Deutsche-Bucht-Modells unter der Verwendung des energyhead Advektionsverfahrens und einer räumlich differenzierten effektiven Sohlrauheit nach Nikuradse k_s (s. Kap. 2.2.4).

3.1.2 Güte der Wasserstandsrandwerte sowie Verhältnisse von Wind und Oberwasserzuflüssen im Kalibrierungszeitraum

Als Kalibrierungszeitraum wird der Spring-Nipp-Zeitraum 06.07.2010, 18:00 bis 21.07.2010, 14:00 festgelegt. In diesem Zeitraum herrschen niedrige bis mittlere Abflussverhältnisse in den Ästuaren (Bild 2, blauer Kasten) sowie ruhige Windverhältnisse in der Deutschen Bucht (Bild 3) vor.

Die Voraussetzung für die Kalibrierung und Validierung des Modells ist eine möglichst exakte Steuerung des seeseitigen Rands, d.h. eine möglichst hohe Übereinstimmung der seeseitigen Wasserstandsrandwerte (aus DCSMv6 FM) mit den Messungen an den Pegeln Terschelling und Hvide Sande, die beide auf dem seeseitigen Rand liegen (Bild 1). In Bild 4 ist die Wasserstandsmessung am Pegel Terschelling (schwarz) den eingesteuerten Wasserstandsrandwerten aus dem übergeordneten Modell DCSMv6 FM (rot) für den Kalibrierungszeitraum (blauer Kasten) gegenüber gestellt. Die untere Bildhälfte zeigt die Differenz zwischen Modell – Messung des gleitenden Mittels über 12 Stunden und 25 Minuten für die Wasserstände (grün). Bild 5 stellt analog die Verhältnisse für den Pegel Hvide Sande dar. Die Form und Variabilität der Wasserstände sowie der Tidehub werden von DCSMv6 FM gut wiedergegeben. Das Tidehoch- und Tideniedrighochwasser liegen im Vergleich zur Messung etwas zu hoch (positive Differenzen, grüne Kurven in Bild 4 und Bild 5). Die Differenz fällt am Pegel Terschelling größer aus als am Pegel Hvide Sande.

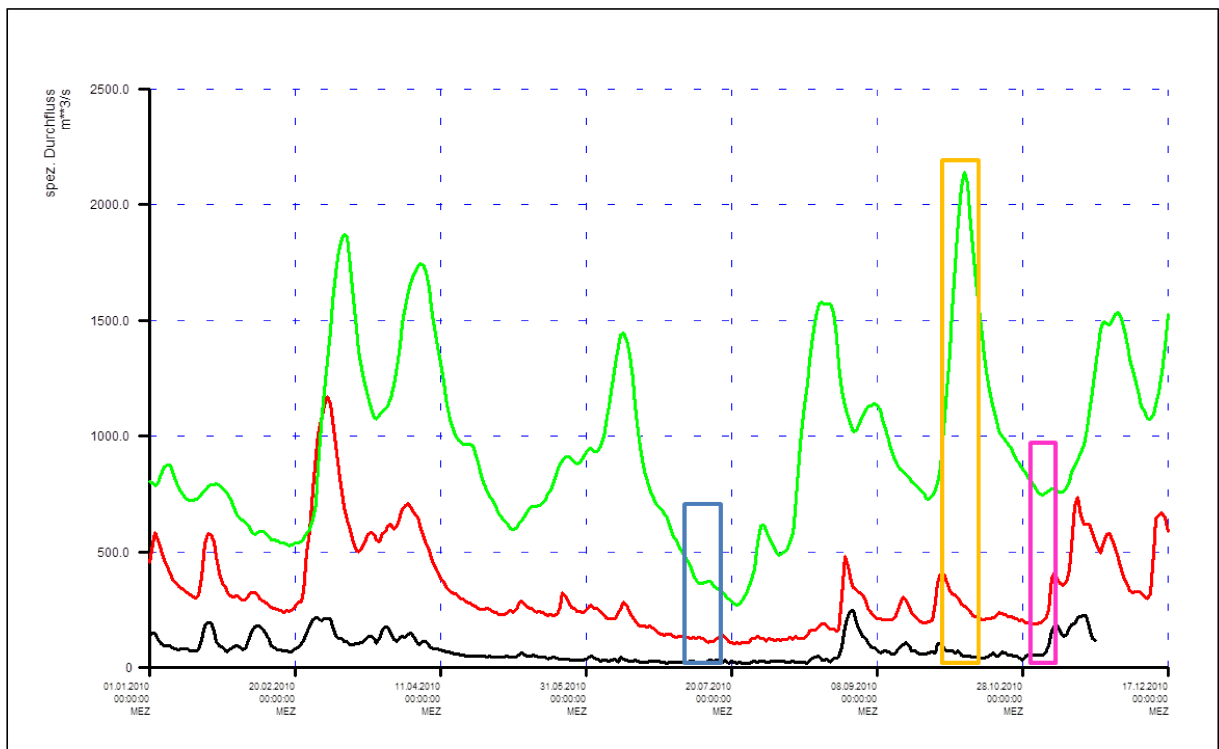


Bild 2: Abflussganglinien der Ems (Pegel Versen, in Schwarz), Jade-Weser (Pegel Intschede, in Rot) und Elbe (Pegel Neu Darchau, in Grün) des Jahres 2010 mit Zeiträumen für die Kalibrierung (blauer Kasten), die Validierung (gelber Kasten) und die Sturmflut-Validierung (magentafarbener Kasten)

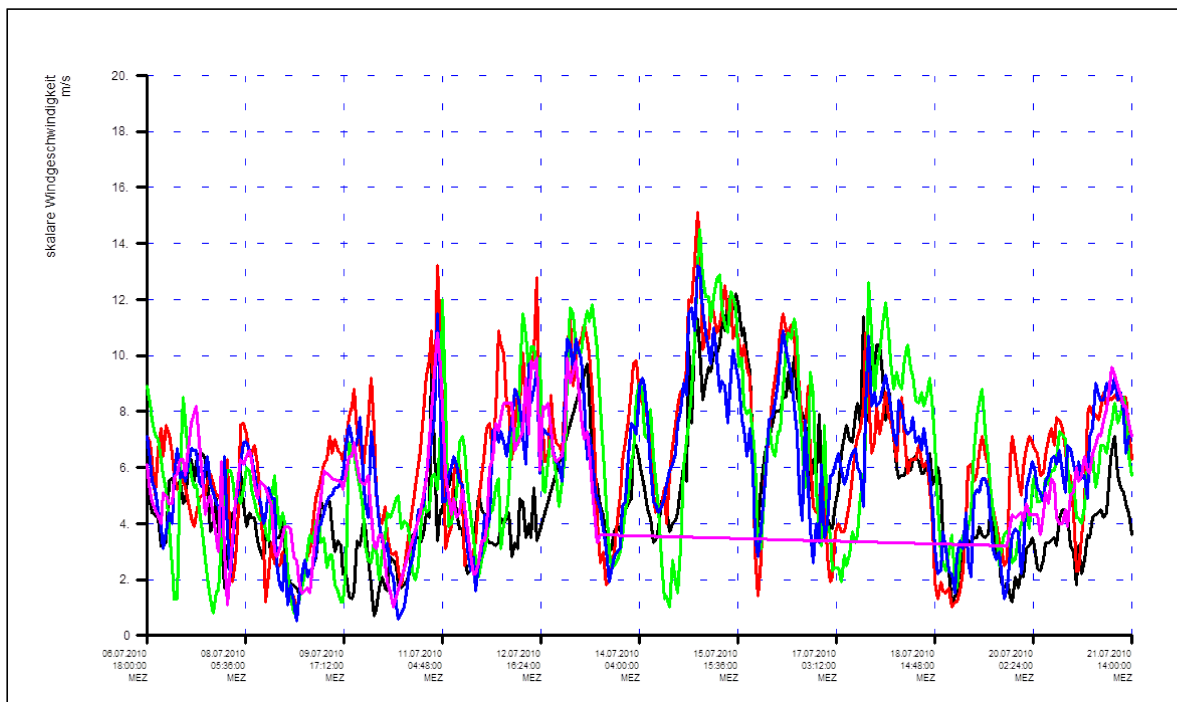


Bild 3: Messungen der skalaren Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Kalibrierungszeitraum (Datenquelle DWD)

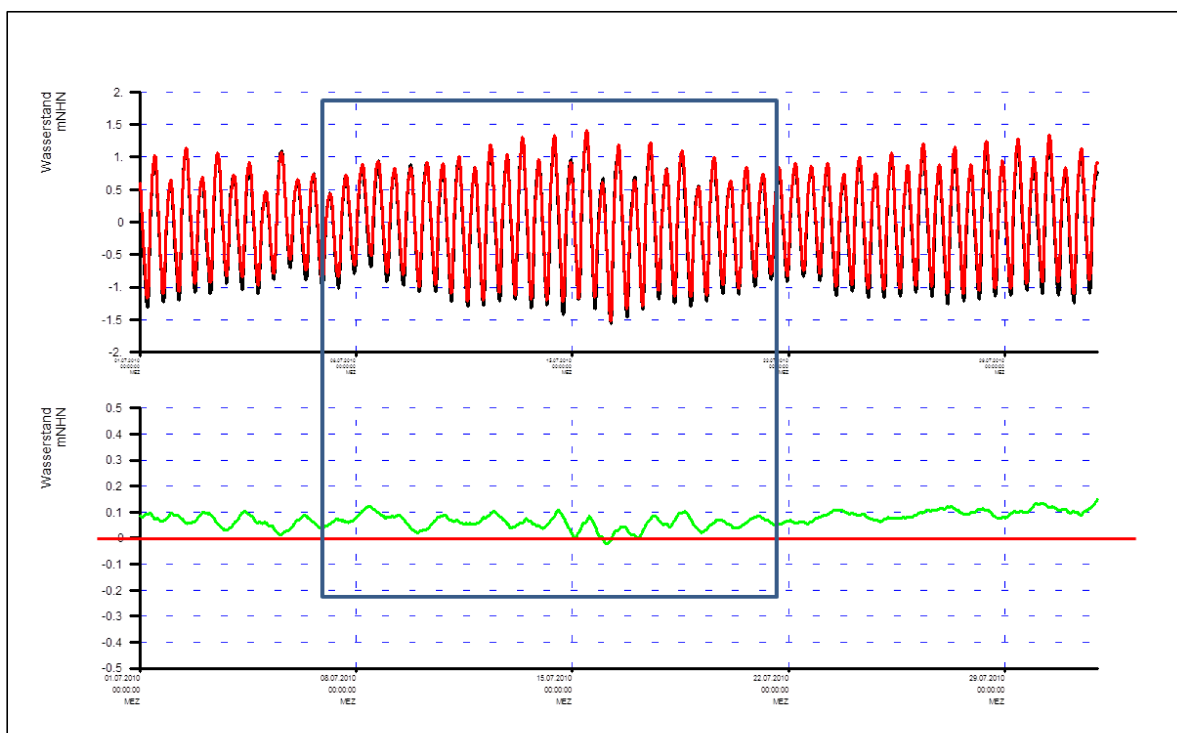


Bild 4: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Terschelling; untere Bildhälfte: Differenz DCSMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Kalibrierungszeitraum

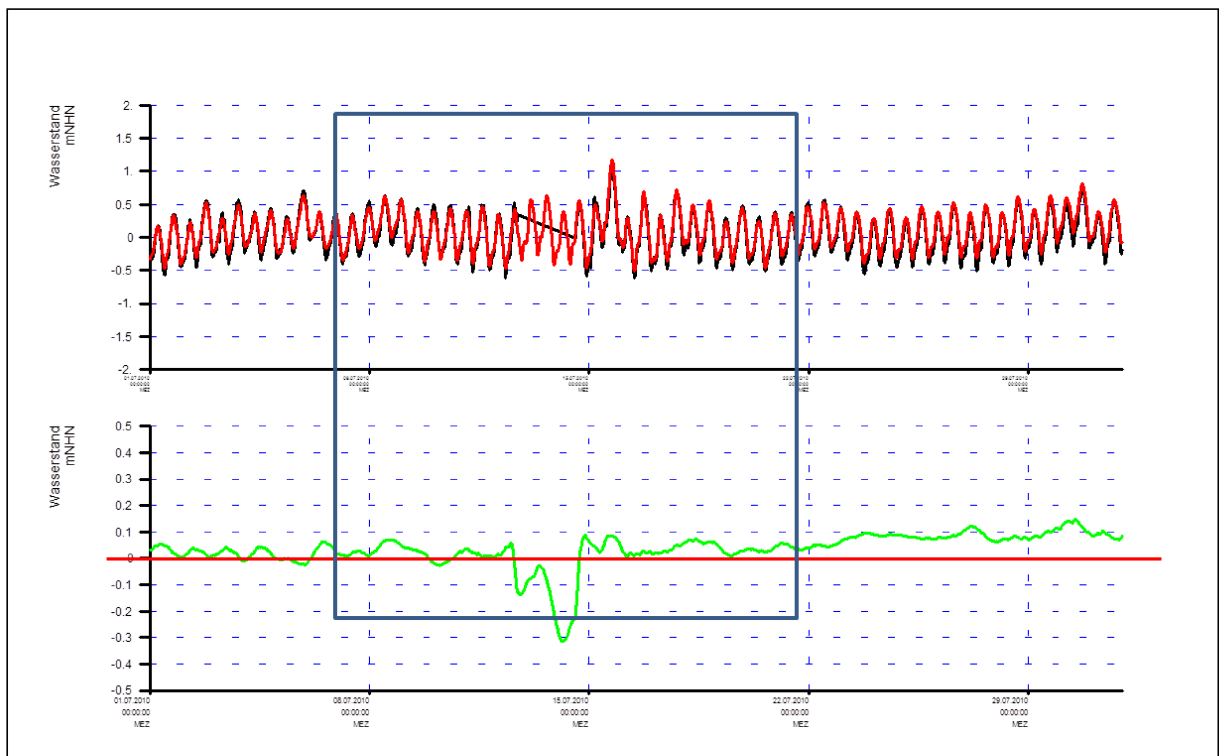


Bild 5: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Hvide Sande; untere Bildhälfte: Differenz DCSMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Kalibrierungszeitraum

3.1.3 Ergebnis der Kalibrierung für die Küstenpegel der Deutschen Bucht

In Bild 7 – Bild 11 sind die Ergebnisse der Kalibrierung für Wasserstand und Salzgehalt (jeweils oberste und unterste Berechnungsschicht) gegenüber der Messung (soweit vorhanden) für einige Pegel in der Deutschen Bucht und eine Woche im Kalibrierungszeitraum dargestellt. Bild 6 zeigt nochmals die Güte der WL Randwerte an den Pegeln Terschelling und Hvide Sande. Tidehochwasser und die Form der Tidekurven werden gut wiedergegeben. Das Tideniedrigwasser fällt grundsätzlich etwas zu hoch aus. Dies ist im Bereich der ostfriesischen Inseln bis zur Elbmündung am deutlichsten ausgeprägt. Die Salzgehalte an den Stationen Deutsche Bucht und FINO1 liegen in der Größenordnung der Messungen. Bild 12 zeigt das Ergebnis der Jahressimulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt) bei Helgoland Binnenhafen im Vergleich zur Messung an der Station Helgoland Reede in Abhängigkeit der Abflussganglinie Neu Darchau. Der Salzgehalt bei Helgoland zeigt im Modell plausible Reaktionen auf die Abflussvariation in der Tideelbe. Er geht während der Abflussspitzen leicht zurück und steigt in Phasen mit niedrigem Abfluss wieder leicht an. Im Vergleich zur Messung liegt der Salzgehalt in der gleichen Größenordnung oder etwas darüber.

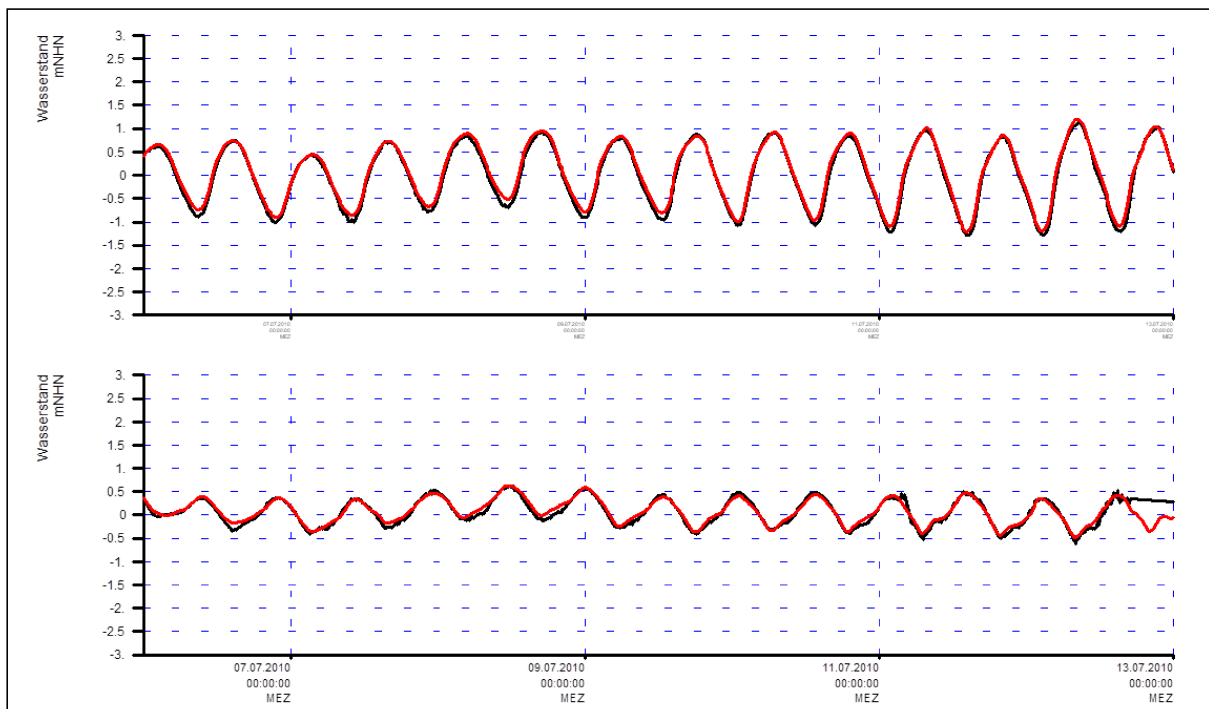


Bild 6: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation bzw. die eingesteuerten WL Randwerte (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Terschelling (NL); untere Bildhälfte: Pegel Hvide Sande (DK)

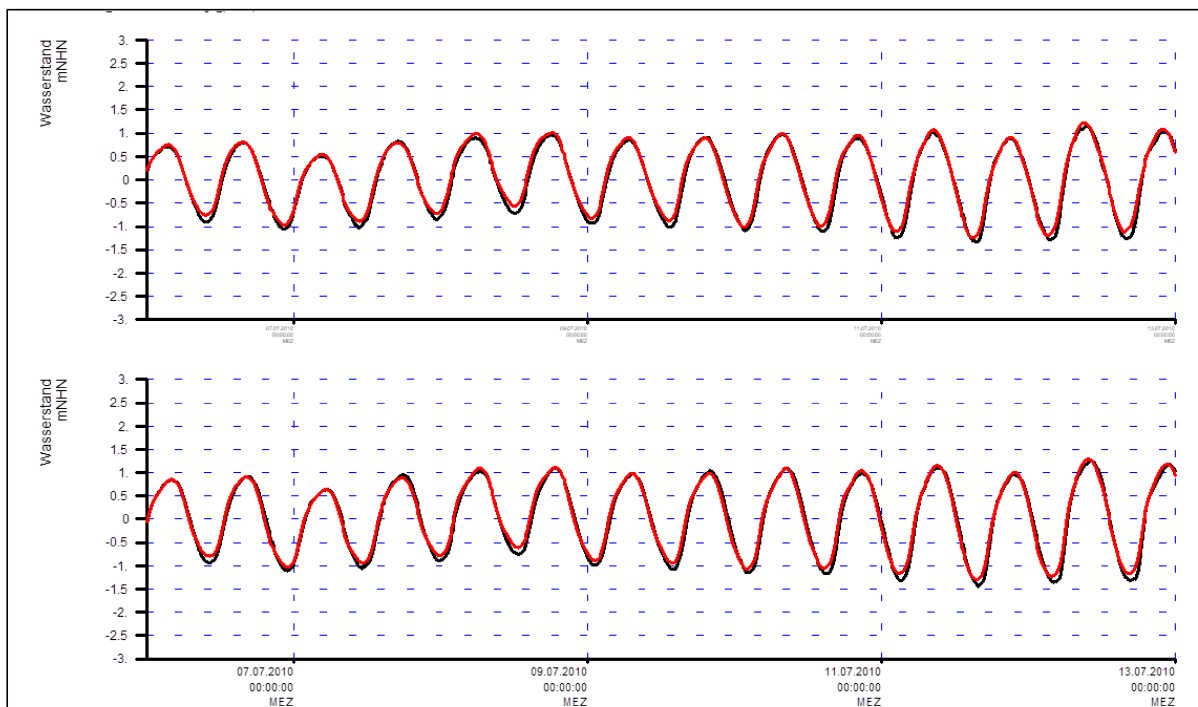


Bild 7: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Wierumergronden; untere Bildhälfte: Pegel Huibertgat

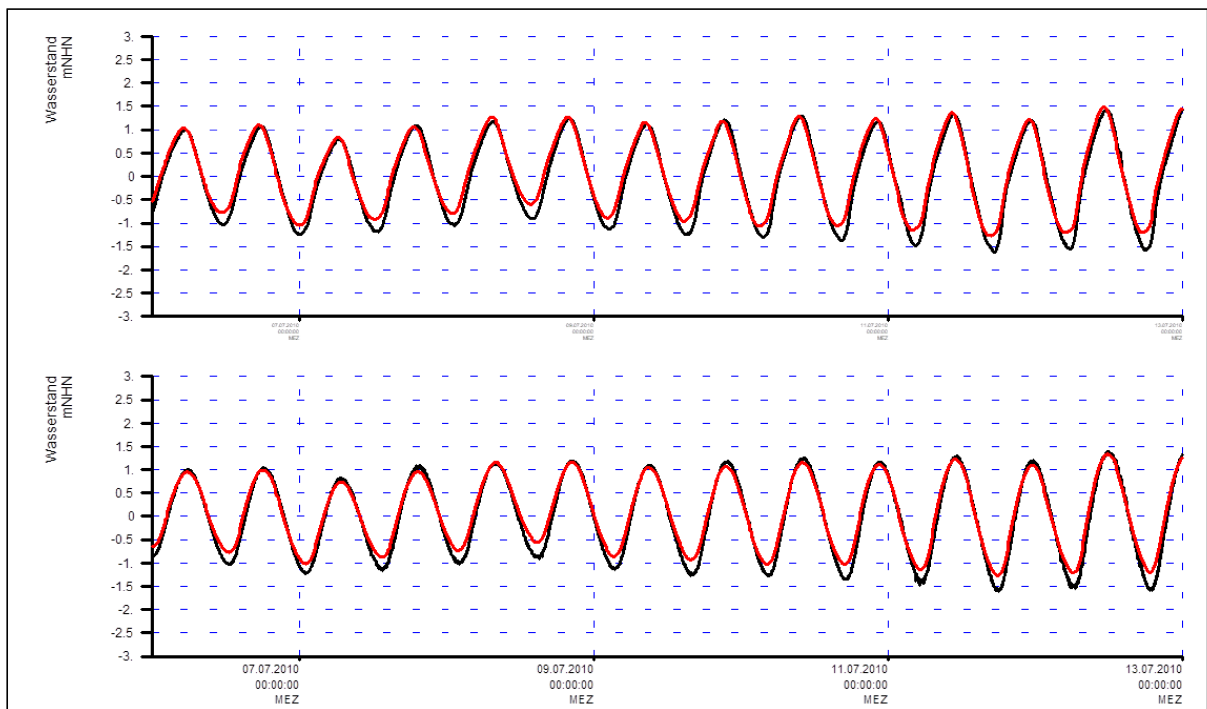


Bild 8: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Norderney Riffgat; untere Bildhälfte: Pegel Helgoland Binnenhafen

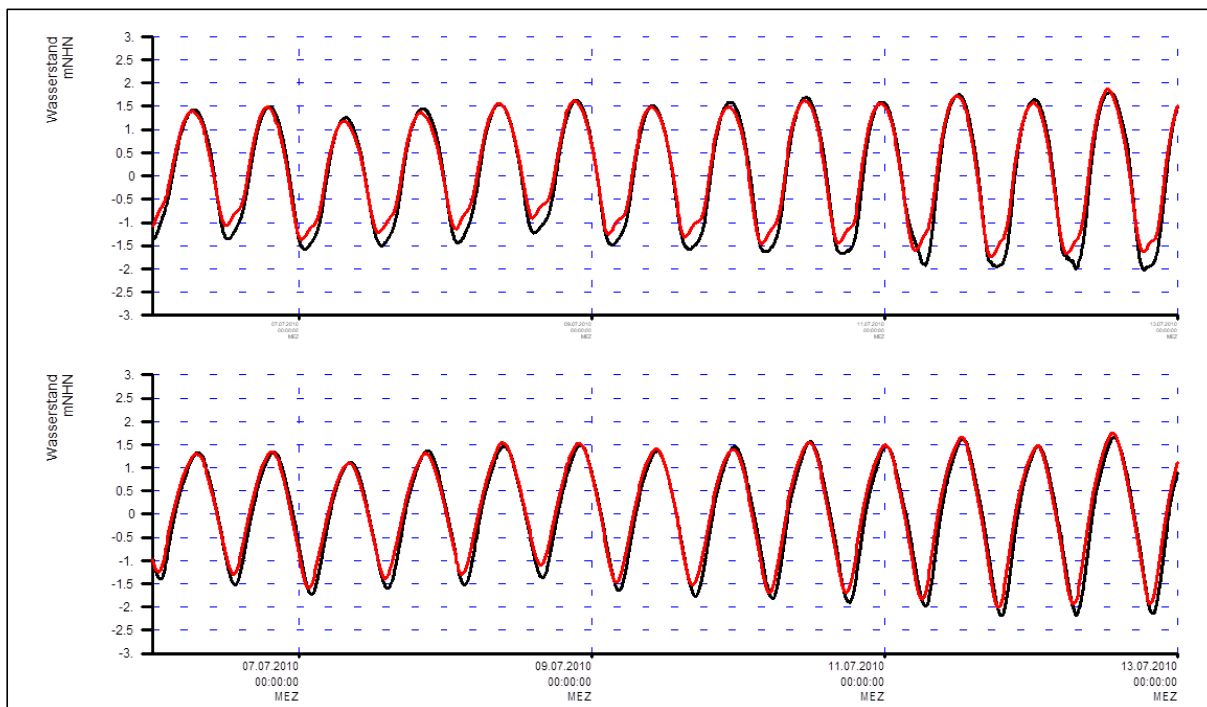


Bild 9: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Büsum; untere Bildhälfte: Pegel Pellworm

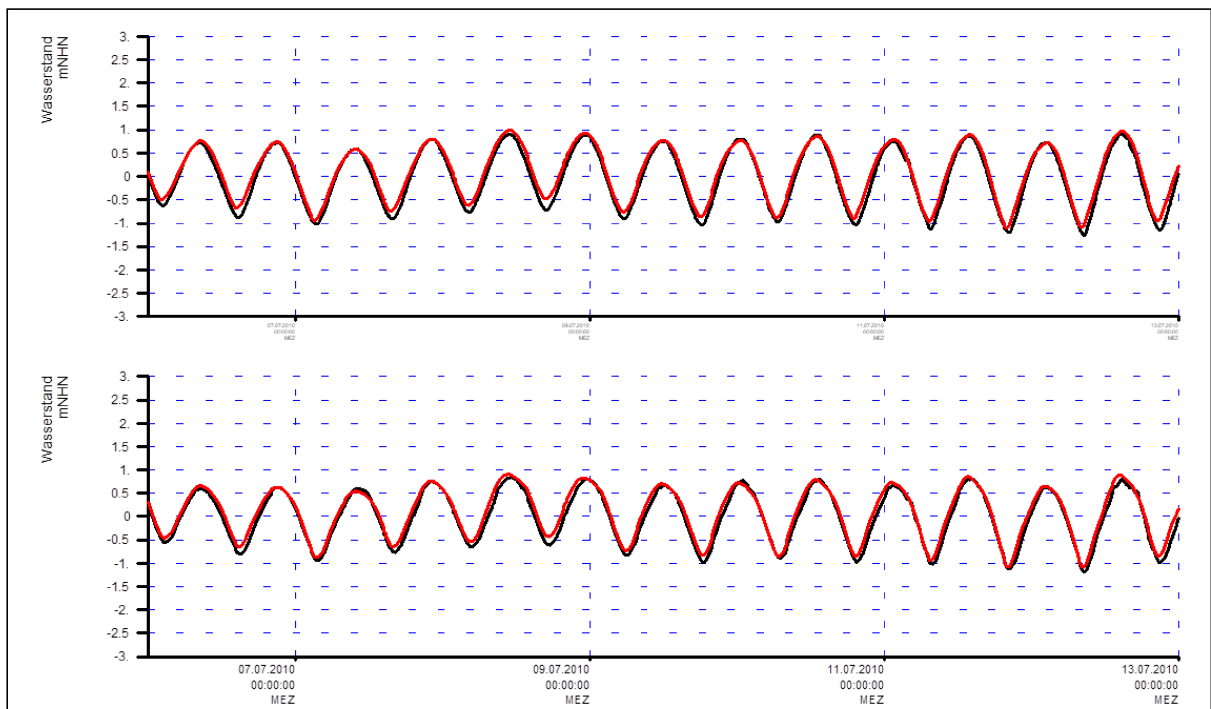


Bild 10: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel List; untere Bildhälfte: Pegel Esbjerg

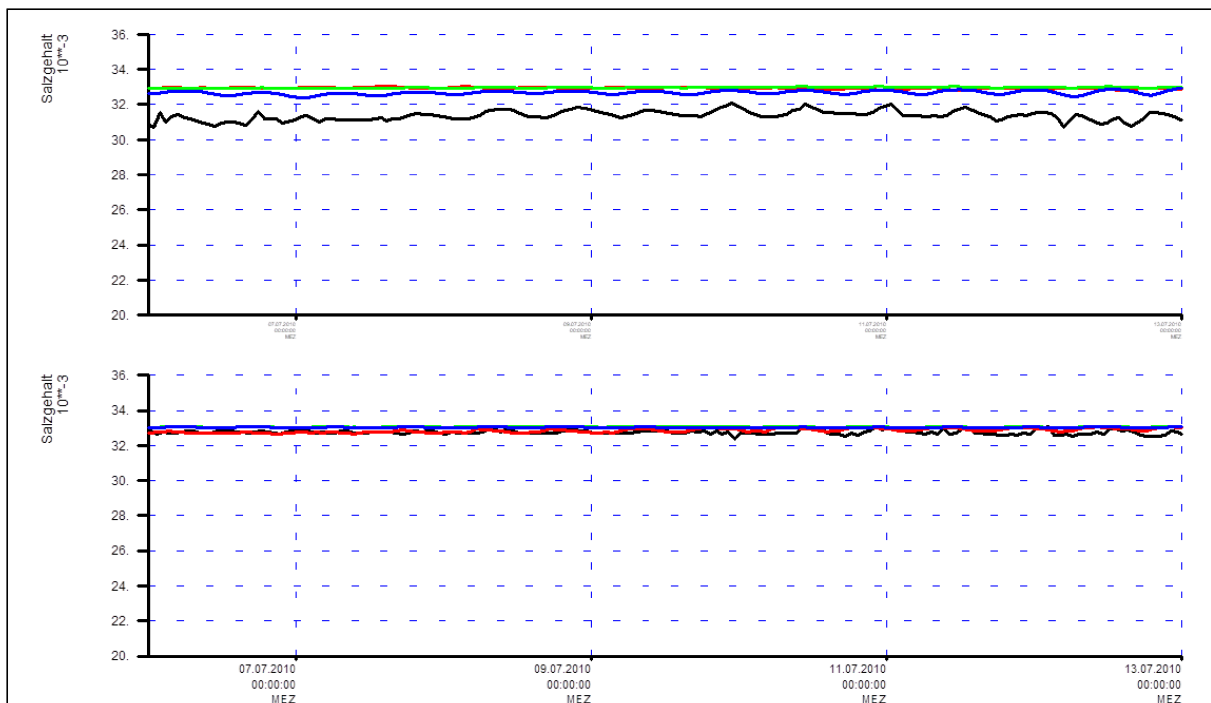


Bild 11: Obere Bildhälfte: Station Deutsche Bucht, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -30,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -39,5 bis -38,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Station FINO1, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -12,5 mNHN) und die Simulation (in Grün: -31,5 bis -30,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

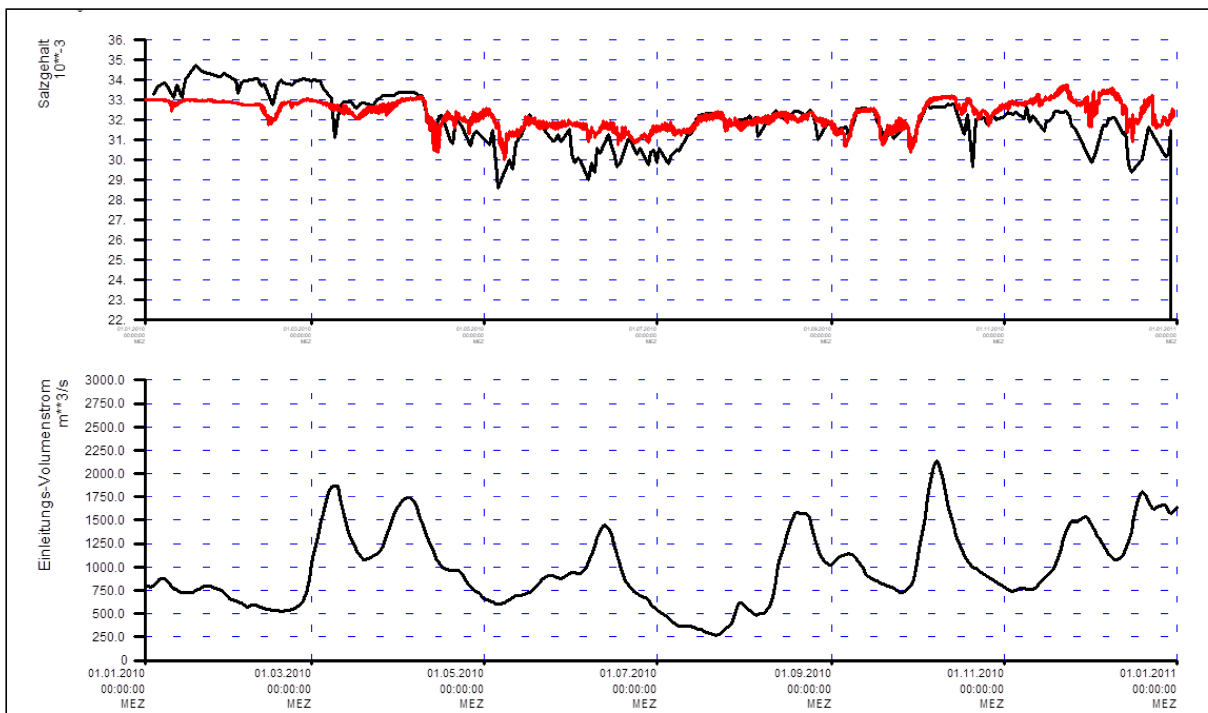


Bild 12: Obere Bildhälfte: Zeitreihe des Salzgehaltes (tiefengemittelt) der Messung bei Helgoland Reede (in Schwarz) und der Simulation bei Helgoland Binnenhafen (in Rot); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Elbe (Pegel Neu Darchau)

3.1.4 Ergebnis der Kalibrierung für das Ems Ästuar

Das numerische Gitter, die (Subgrid) Bathymetrie und die gewählte Rauheitsverteilung ist für das Ems Ästuar in Bild 13 und Bild 14 dargestellt. Das Wehr Herbrum ist über den Simulationszeitraum geöffnet. Das Emssperrwerk bei Gandersum und das Leda Sperrwerk werden über die UnTRIM Wehroption gesteuert. Die Zuflüsse Westerwoldse Aa, Leda und Jümme werden im Modell mit jeweils konstantem Abfluss, Salzgehalt und Wassertemperatur berücksichtigt, s. Kap. 2.2.3.

In Bild 15 – Bild 18 sind die Ergebnisse der Kalibrierung für Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt (jeweils oberste und unterste Berechnungsschicht) gegenüber der Messung (soweit vorhanden) dargestellt. Im Ems Ästuar werden Tidehochwasser und die Form der Tidekurven gut wiedergegeben. Der Tidehub wird etwas unterschätzt, das Tideniedrigwasser fällt grundsätzlich zu hoch aus. Die Strömungsgeschwindigkeiten, ihr Verlauf und die Kenterpunkte werden stromauf von Emden gut getroffen. Stromauf von Emden werden die Salzgehalte vom Modell grundsätzlich unterschätzt. Dies ist vermutlich auf die komplexen dichteinduzierten Wechselwirkungen zwischen Schwebstoffgehalt (Fluid Mud) und Salzgehalt in der Ems zurückzuführen, der im Modell Setup nicht abgebildet werden kann.

Bild 19 zeigt das Ergebnis der Jahressimulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt) bei Emden im Vergleich zur Messung und in Abhängigkeit der Abflussganglinie Versen. Der Salzgehalt variiert plausibel mit der Höhe des Abflusses und geht während der Abflussspitzen zurück. Im Sommer steigt der Salzgehalt während einer längeren Phase mit niedrigem Abfluss an. Im Vergleich zur

Messung liegt der Salzgehalt etwas zu hoch und steigt bei niedrigem Abfluss etwas langsamer an.

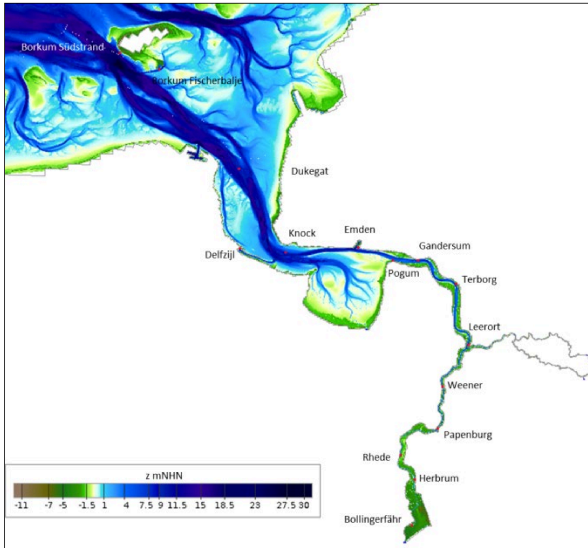


Bild 13: Bathymetrie des Ems-Ästuars/
Deutsche-Bucht-Modell

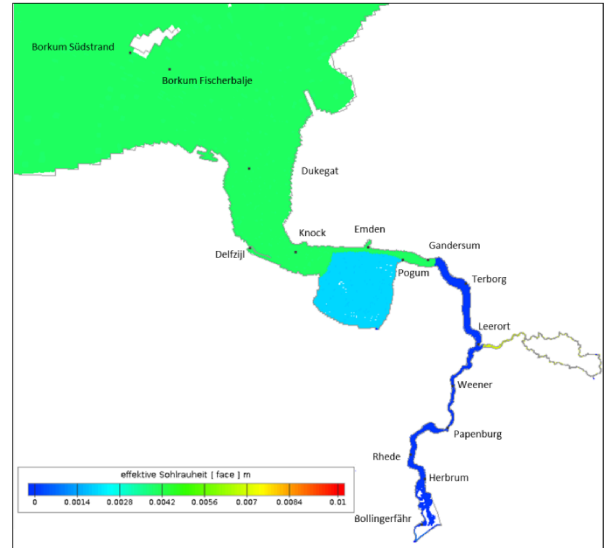


Bild 14: Verwendete Rauheitsverteilung im
Ems-Ästuar/Deutsche-Bucht-Modell

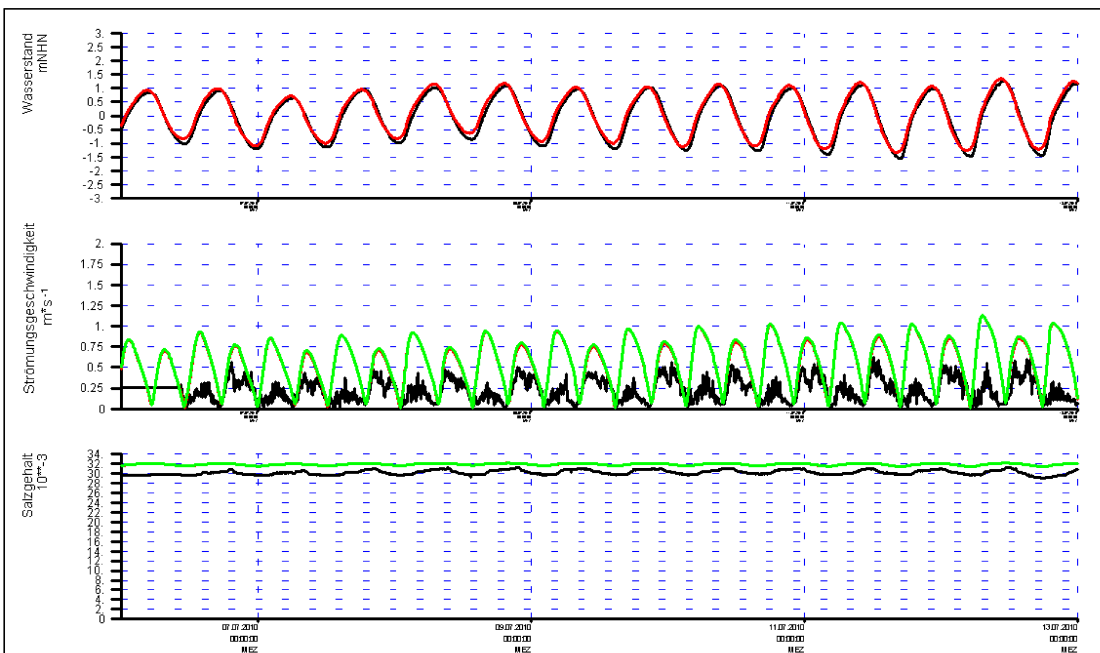


Bild 15: Pegel Borkum Südstrand; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: -4,0 mNHN) und die Simulation (in Rot: -4,5 bis -3,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -4,0 mNHN) und die Simulation (in Rot: -4,5 bis -3,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)

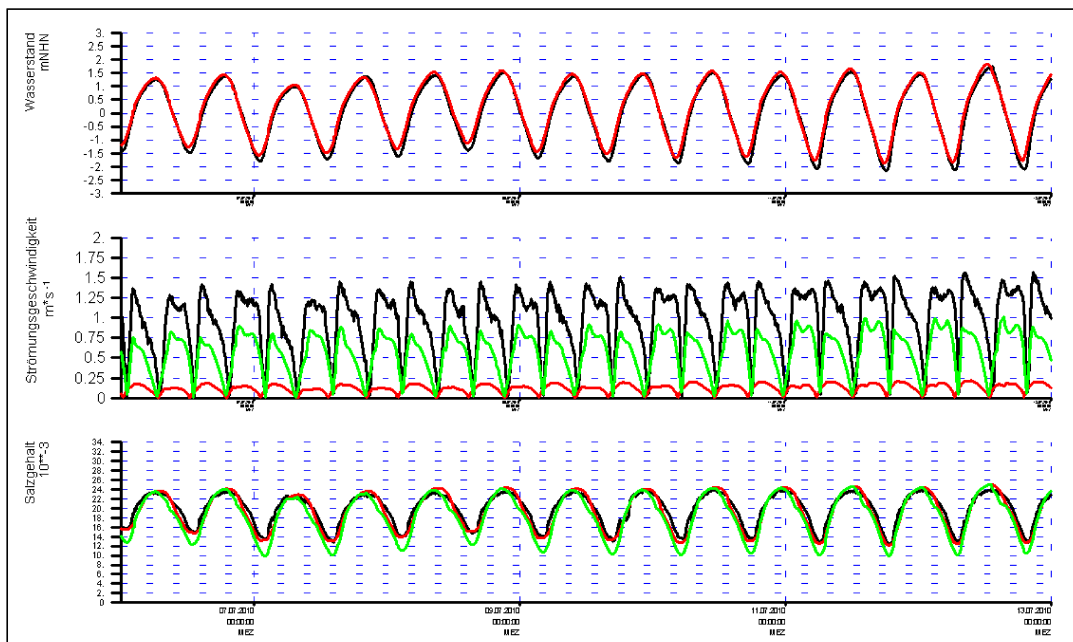


Bild 16: Pegel Emden Neue Seeschleuse; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: $-1,6$ mNHN) und die Simulation (in Rot: $-11,5$ bis $-10,5$ mNHN; in Grün: $-2,5$ bis $-1,5$ mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: $-1,6$ mNHN) und die Simulation (in Rot: $-11,5$ bis $-10,5$ mNHN; in Grün: $-2,5$ bis $-1,5$ mNHN)

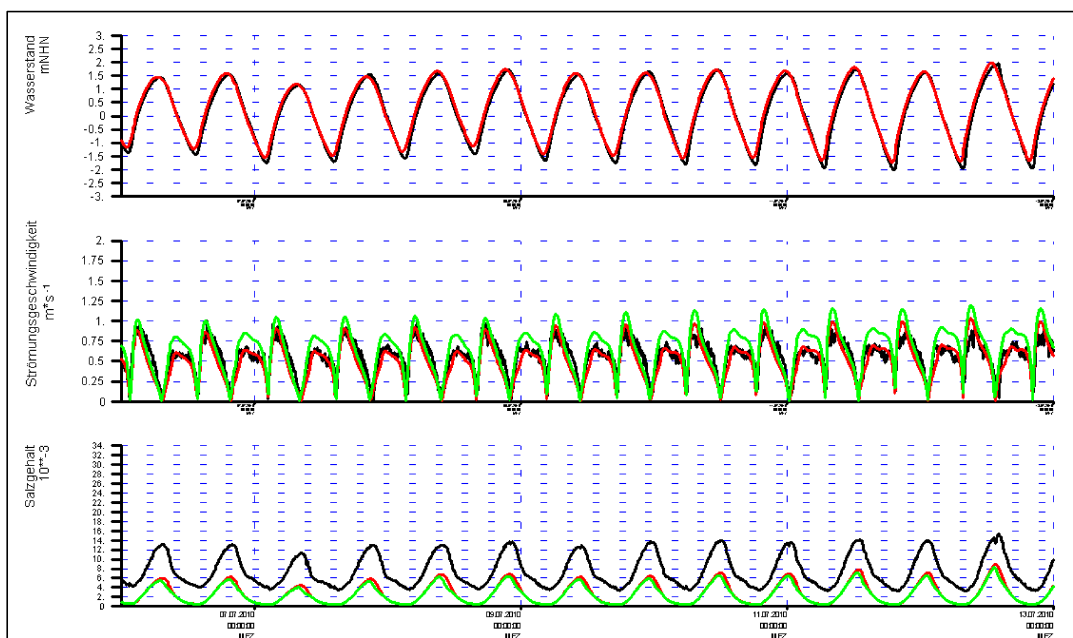


Bild 17: Pegel Terborg; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: $-4,0$ mNHN) und die Simulation (in Rot: $-8,5$ bis $-7,5$ mNHN; in Grün: $-2,5$ bis $-1,5$ mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -4 mNHN) und die Simulation (in Rot: $-8,5$ bis $-7,5$ mNHN; in Grün: $-2,5$ bis $-1,5$ mNHN)



Bild 18: Pegel Papenburg; oben: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); Mitte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: $-0,9$ mNHN) und die Simulation (in Rot: $-2,5$ bis $-1,5$ mNHN; in Grün: $-1,5$ bis $-0,5$ mNHN); unten: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: $-4,0$ mNHN) und die Simulation (in Rot: $-2,5$ bis $-1,5$ mNHN; in Grün: $-1,5$ bis $-0,5$ mNHN)

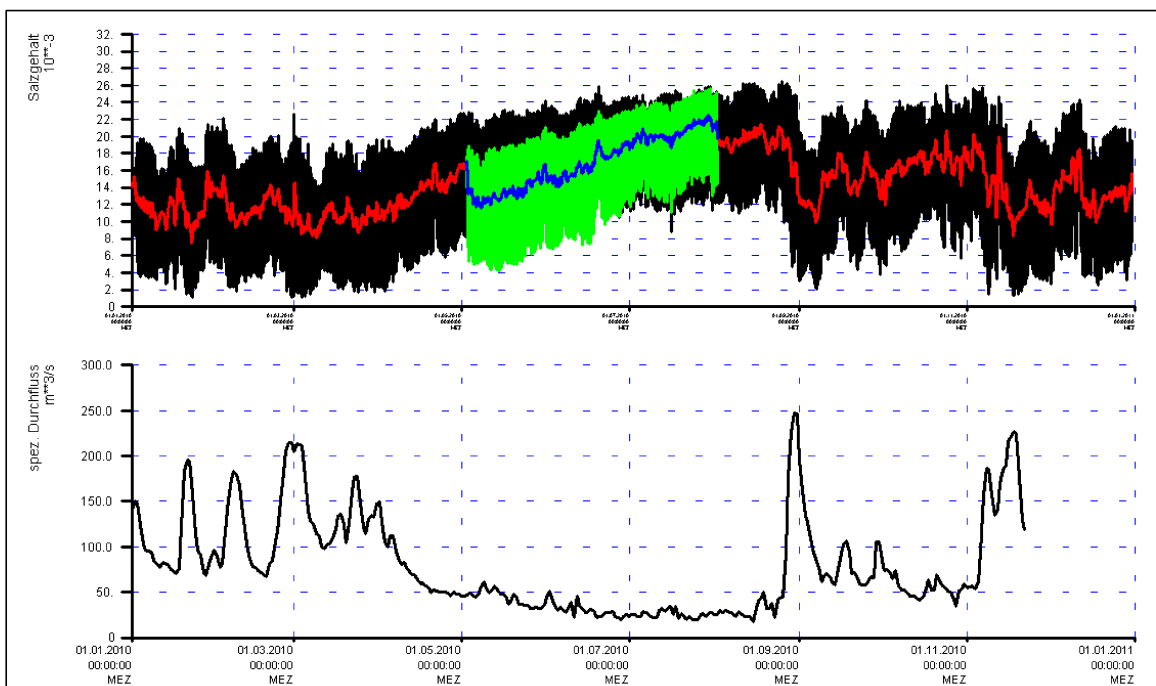


Bild 19: Obere Bildhälfte: Zeitreihe des Salzgehaltes (tiefengemittelt) der Simulation bei Emden (in Schwarz), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Rot), Messung des Salzgehaltes bei Emden (in Grün), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Blau); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Ems (Pegel Versen)

3.1.5 Ergebnis der Kalibrierung für das Jade-Weser-Ästuar

Das numerische Gitter, die (Subgrid) Bathymetrie und die gewählte Rauheitsverteilung ist für das Jade-Weser-Ästuar in Bild 20 und Bild 21 dargestellt. Das Wehr Hemelingen ist über den Simulationszeitraum geöffnet. Die Sperrwerke der Hunte, Ochtum und Wümme werden über die UnTrim Wehroption gesteuert. Die Zuflüsse Hunte, Wümme, Hamme und Ochtum werden im Modell mit jeweils konstantem Abfluss, Salzgehalt und Temperatur berücksichtigt, s. Kap. 2.2.3. In Bild 22 – Bild 25 sind die Ergebnisse der Kalibrierung für Wasserstand und Salzgehalt (jeweils oberste und unterste Berechnungsschicht) gegenüber der Messung dargestellt. Messungen zu Strömungsgeschwindigkeiten sind für das Jahr 2010 nicht verfügbar. Im Jade-Weser-Ästuar werden Tidehochwasser und Form der Tidekurven gut wiedergegeben. Der Tidehub wird allerdings unterschätzt, das Tideniedrigwasser fällt grundsätzlich zu hoch aus und die Tidewelle läuft etwas schneller als die Messung. Die Simulation des Salzgehaltes gibt die Messungen an allen Geopositionen gut wieder.

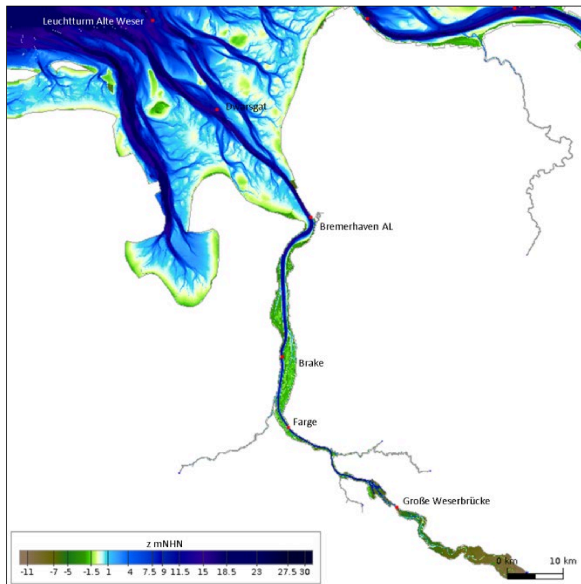


Bild 20: Bathymetrie des Jade-Weser-Ästuars/
Deutsche-Bucht-Modell

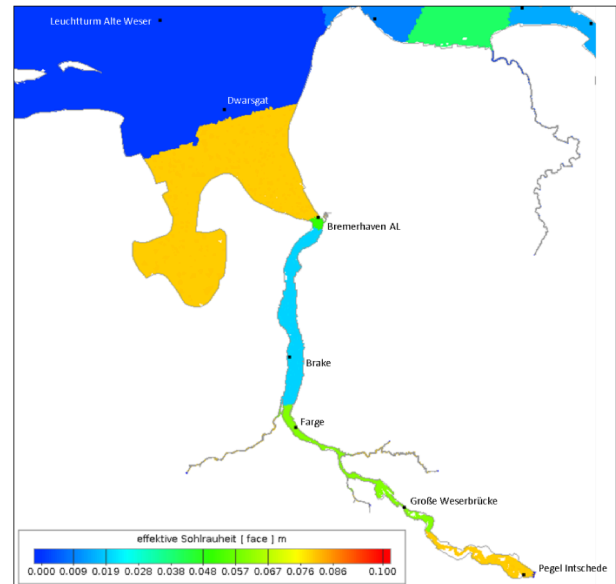


Bild 21: Verwendete Rauheitsverteilung im Jade-
Weser-Ästuar/Deutsche-Bucht-Modell

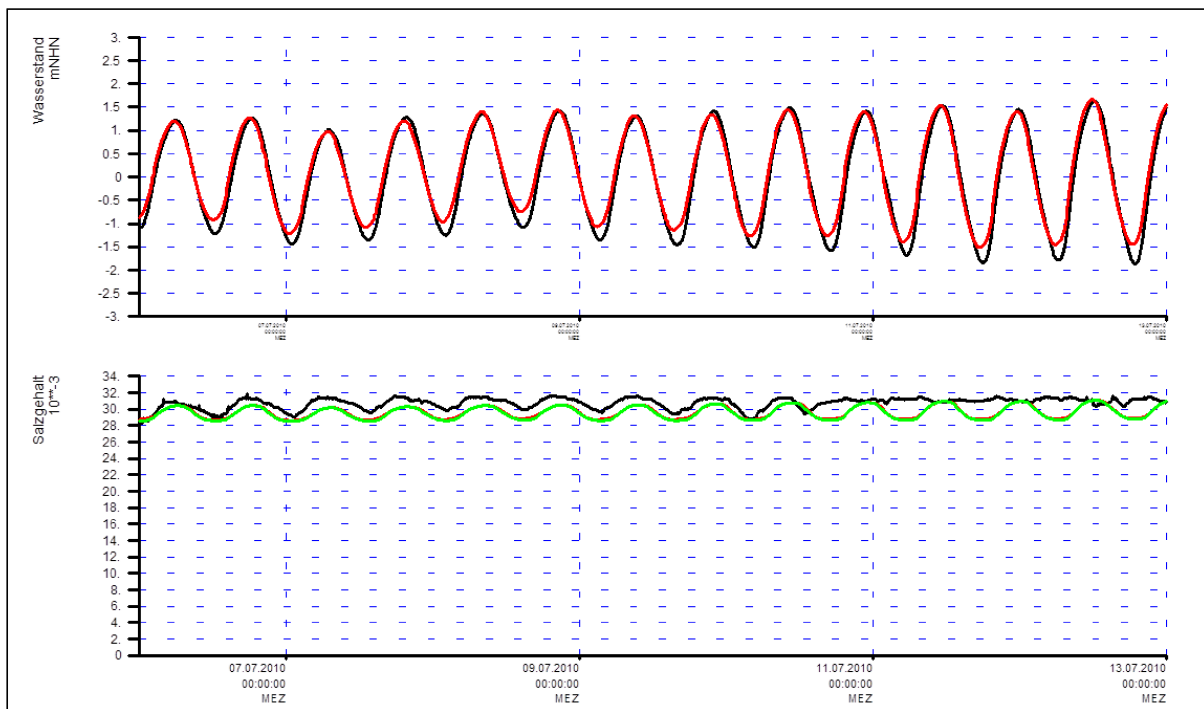


Bild 22: Pegel Leuchtturm Alte Weser; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,6 mNHN) und die Simulation (in Rot: -10,5 bis -9,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)

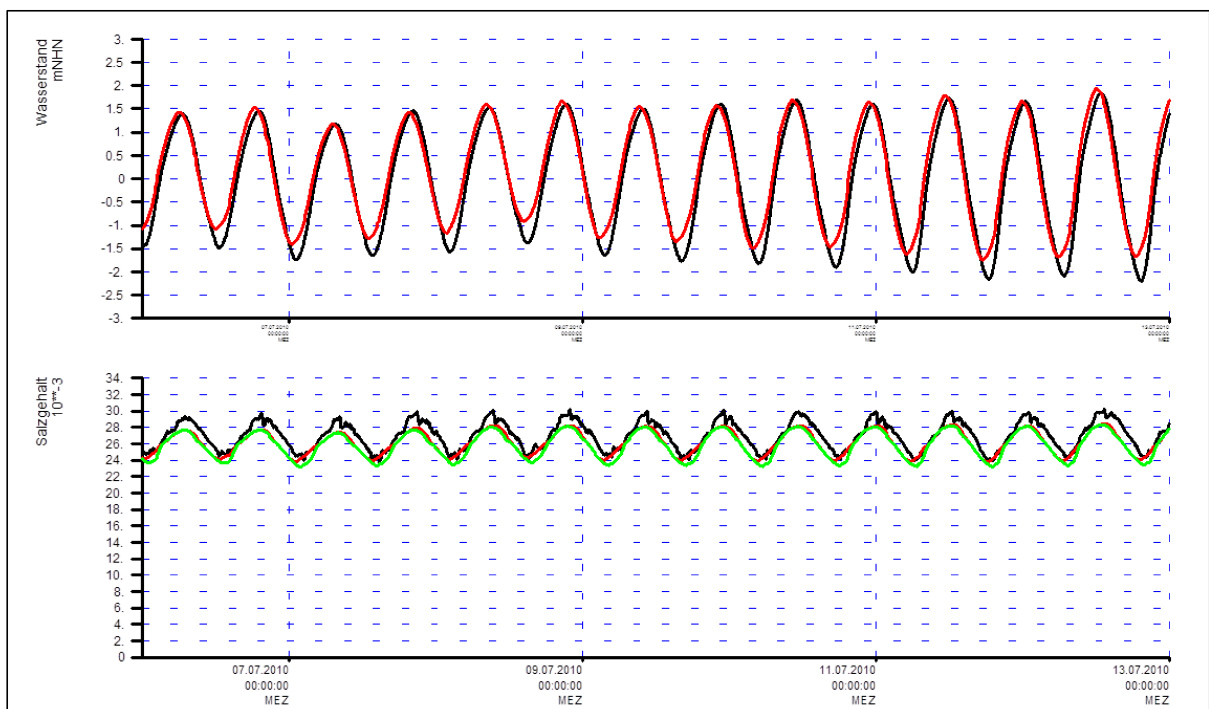


Bild 23: Pegel Dwarsgat; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,7 mNHN) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)

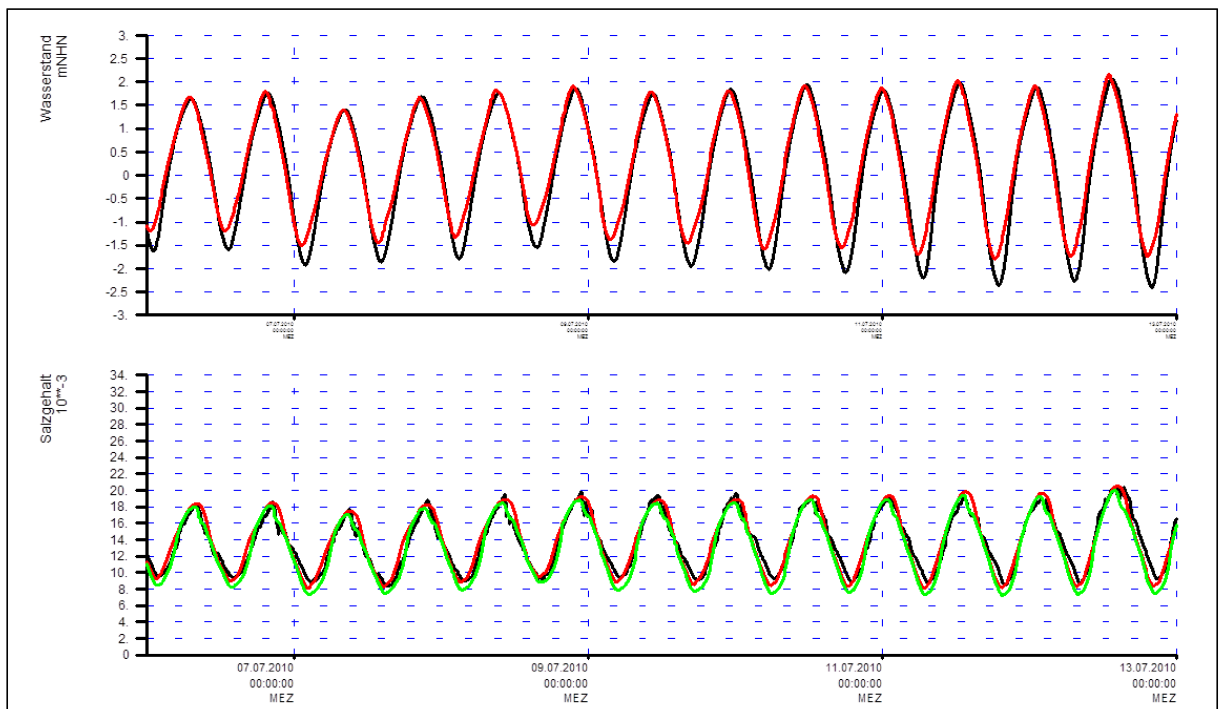


Bild 24: *Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,9 mNHN) und die Simulation (in Rot: -15,5 bis -14,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)*

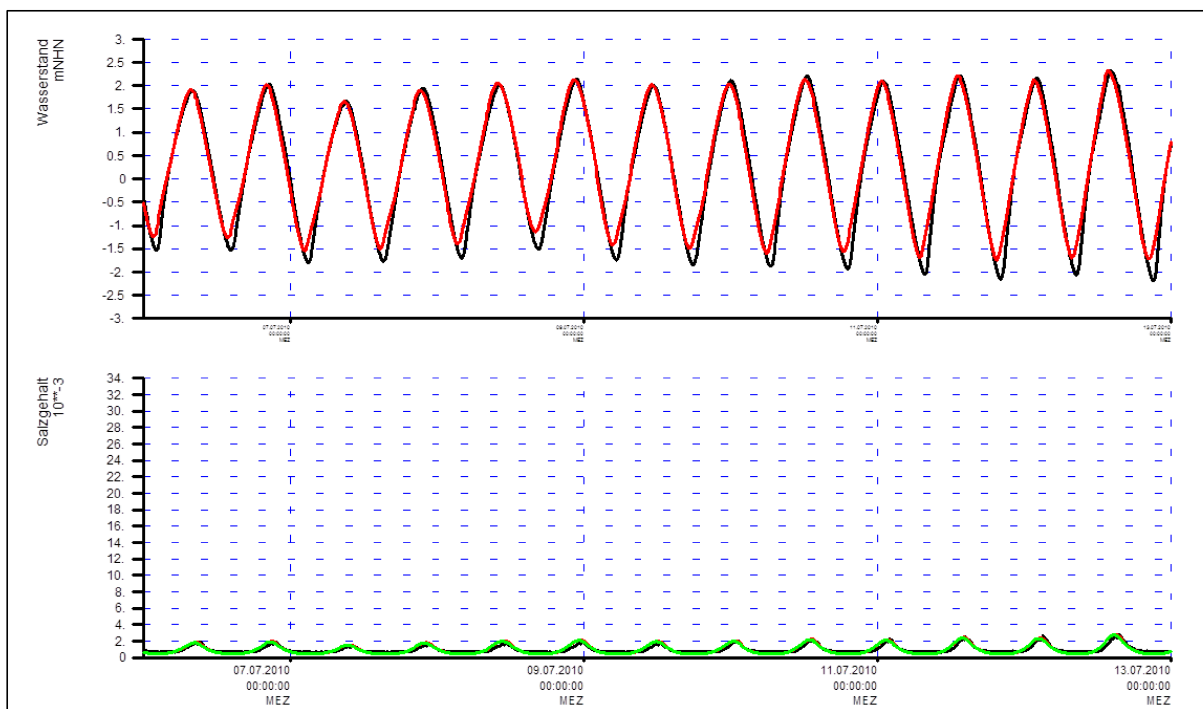


Bild 25: *Pegel Brake; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,8 mNHN) und die Simulation (in Rot: -13,5 bis -12,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)*

Bild 26 zeigt das Ergebnis der Jahressimulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt) bei Bremerhaven Alter Leuchtturm im Vergleich zur Messung und in Abhängigkeit der Abflussganglinie Intschede. Der Salzgehalt variiert plausibel mit der Höhe des Abflusses. Er sinkt während der Abflussspitzen und steigt im Sommer während der langen Phase mit niedrigem Abfluss an. Die Simulation liegt nach einer Einschwingzeit in der gleichen Größenordnung wie die Messung. Im letzten Drittel des Simulationszeitraumes liegt der Salzgehalt im Vergleich zur Messung etwas höher. Es wird im Modell nach einer Hochwasserwelle mehr Salz aus der Deutschen Bucht zurück ins Ästuar transportiert als in der Messung.

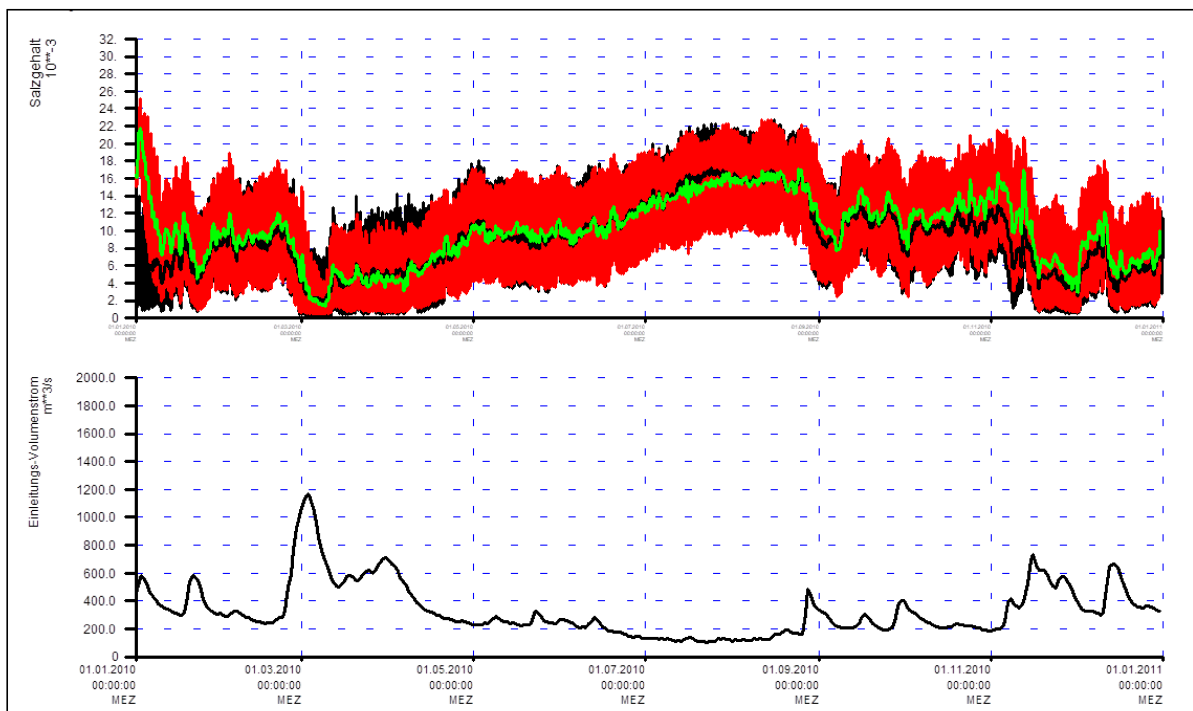


Bild 26: Obere Bildhälfte: Messung des Salzgehaltes bei Bremerhaven Alter Leuchtturm (in Schwarz), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Schwarz), Simulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt, in Rot), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Weser (Pegel Intschede)

3.1.6 Ergebnisse der Kalibrierung für das Elbe Ästuar

Das numerische Gitter, die (Subgrid) Bathymetrie und die gewählte Rauheitsverteilung ist für das Elbe Ästuar in Bild 27 und Bild 28 dargestellt. Die Sperrwerke sind über den Simulationszeitraum geöffnet. Das Wehr Geesthacht wird in Abhängigkeit des Zielwasserstandes und der Abflussganglinie über die UnTRIM Wehroption gesteuert. Die Zuflüsse der Tideelbe werden im Modell mit jeweils konstantem Abfluss, Salzgehalt und Wassertemperatur berücksichtigt.

In Bild 29 – Bild 38 sind die Ergebnisse der Kalibrierung für Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt (jeweils oberste und unterste Berechnungsschicht) gegenüber der Messung (soweit vorhanden) dargestellt. Tidehochwasser und die Form der Tidekurve werden vom Modell gut abgebildet. Der Tidehub wird etwas unterschätzt, das Tideniedrigwasser fällt grund-

sätzlich zu hoch aus. Stromauf von Blankenese ist eine leichte Phasenverschiebung erkennbar. Für verbesserte Ergebnisse sollte die Rauheit in diesem Abschnitt erneut angepasst werden. Die Simulationsergebnisse der Strömungsgeschwindigkeiten (Beträge, Verlauf, Kenterphasen) und der Salzgehalte in der Tideelbe liegen in den Größenordnungen der Messungen.

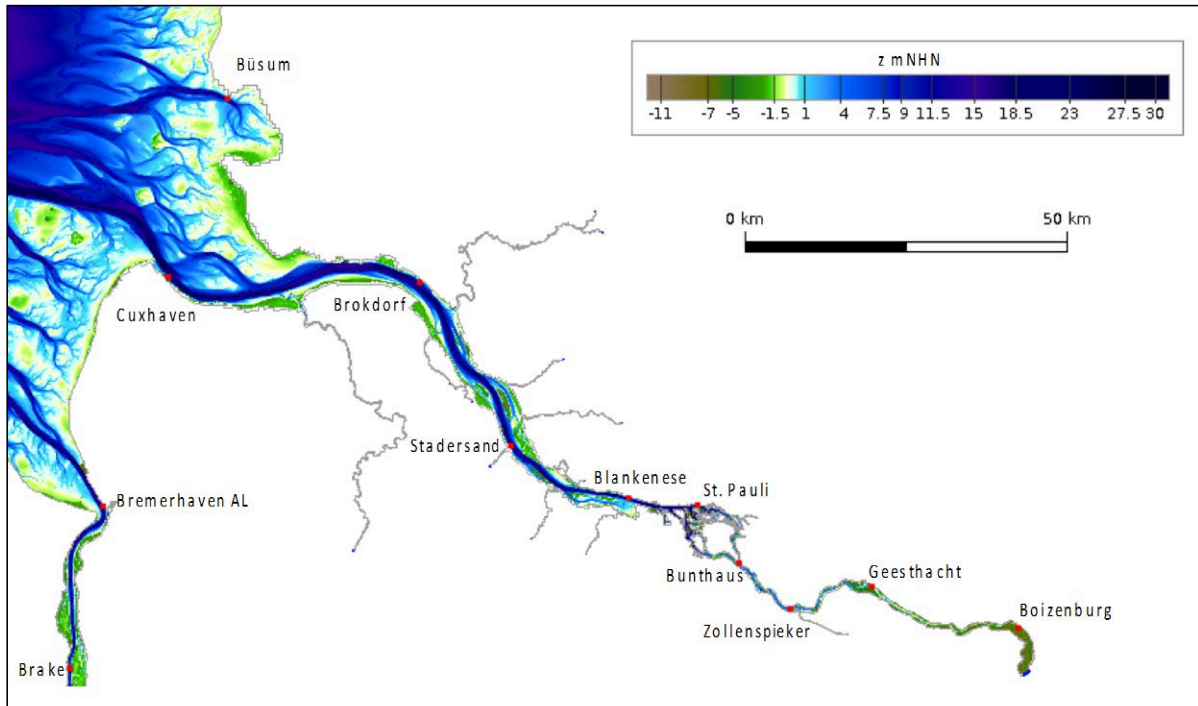


Bild 27: Bathymetrie des Elbe-Ästuars/Deutsche-Bucht-Modell

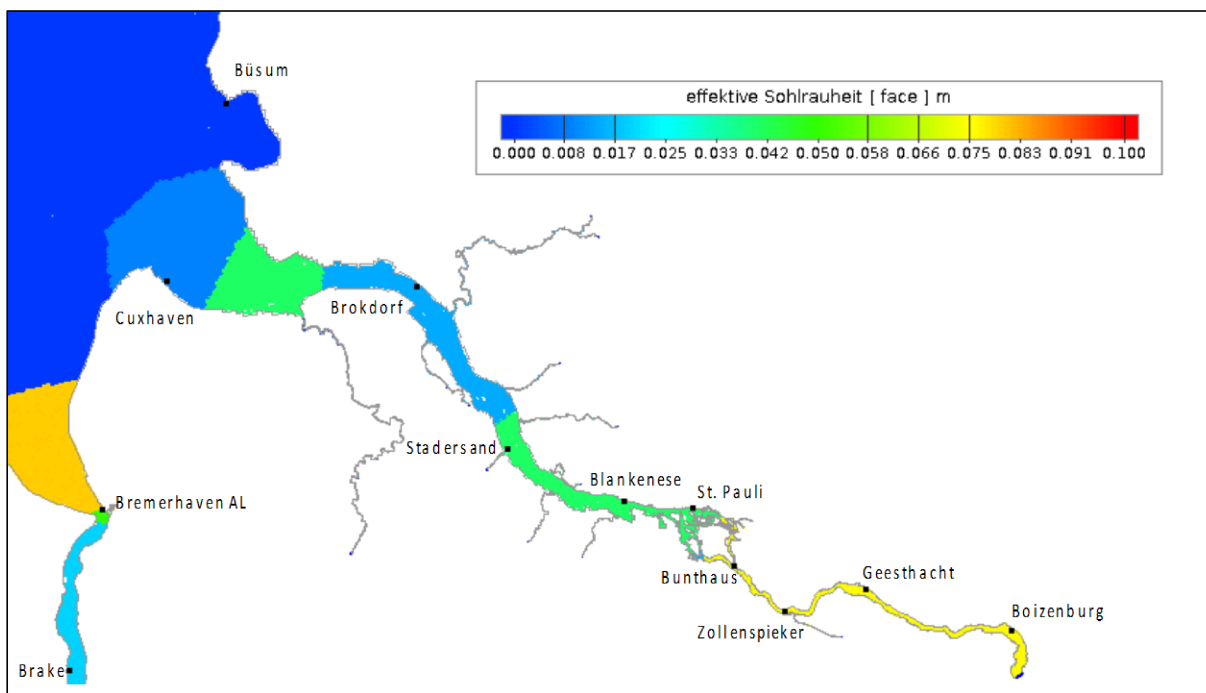


Bild 28: Verwendete Rauheitsverteilung im Elbe-Ästuar/Deutsche-Bucht-Modell

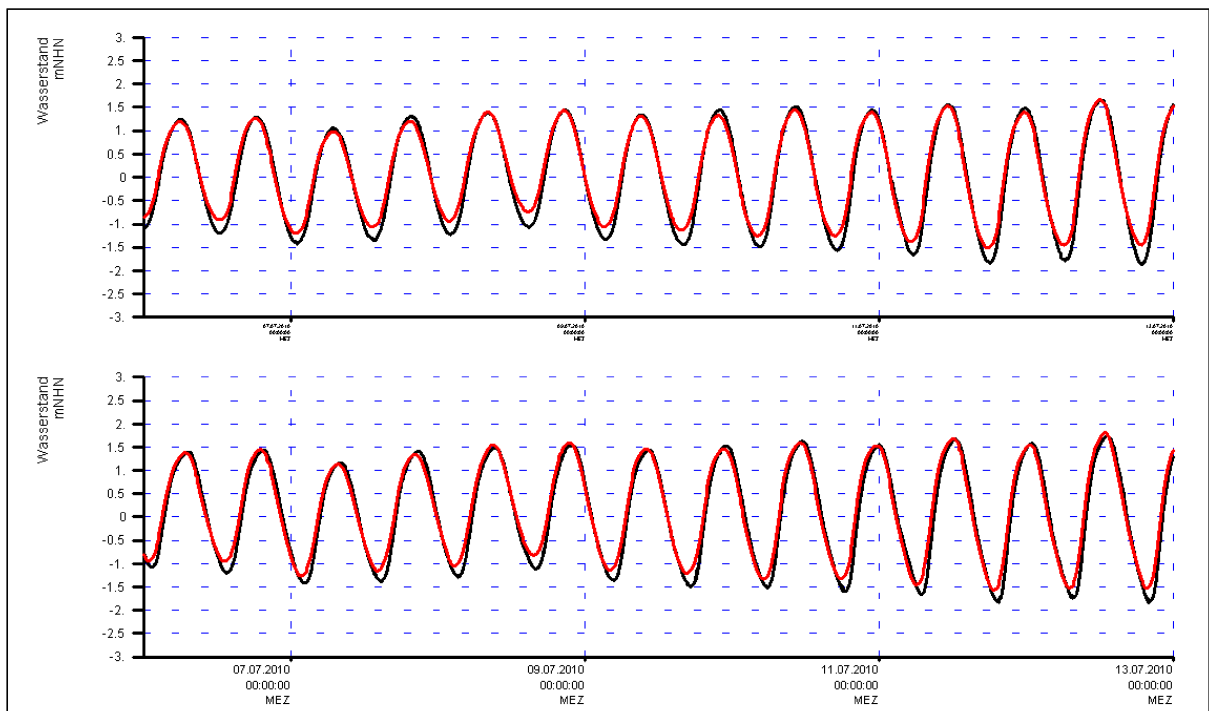


Bild 29: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bake A; untere Bildhälfte: Pegel Cuxhaven

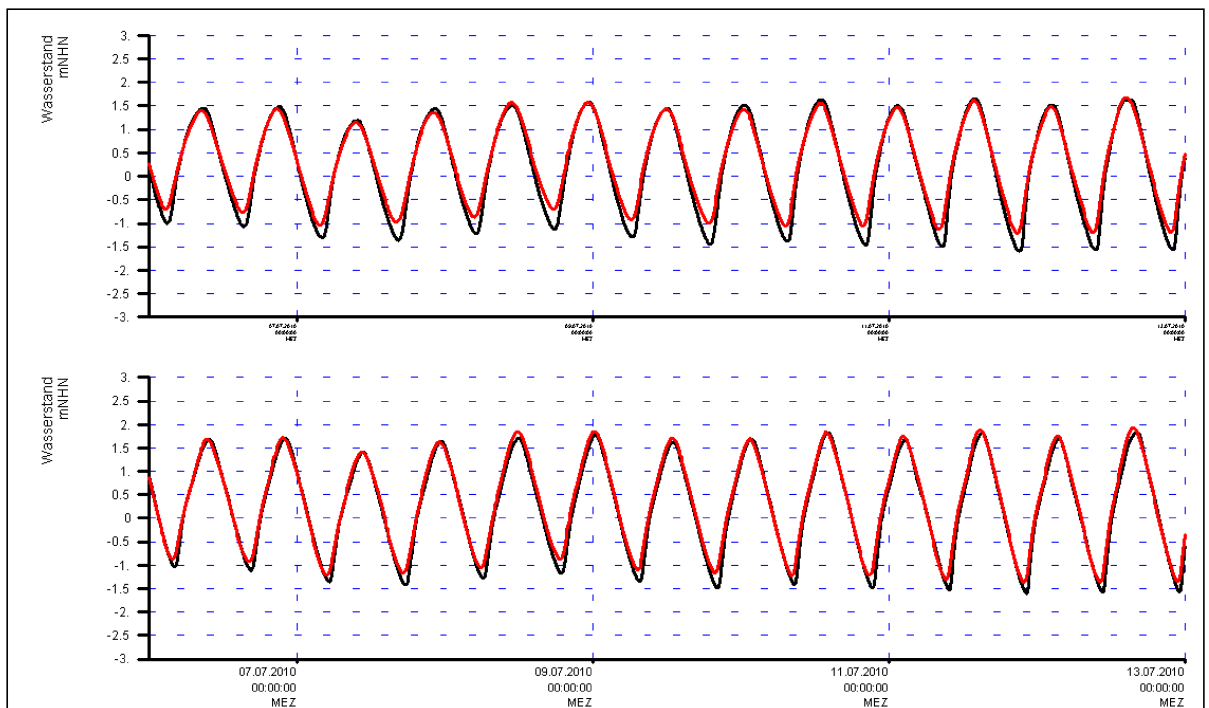


Bild 30: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Brokdorf; untere Bildhälfte Pegel Stadersand

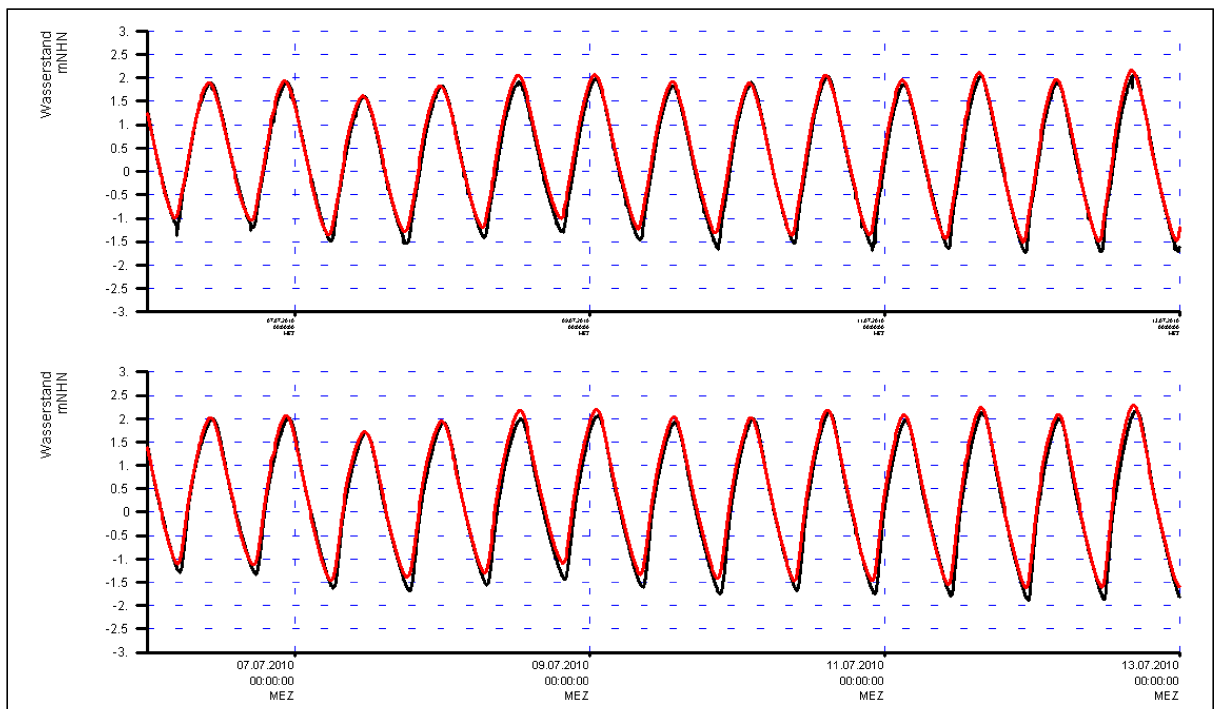


Bild 31: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Blankenese; untere Bildhälfte: Pegel St. Pauli

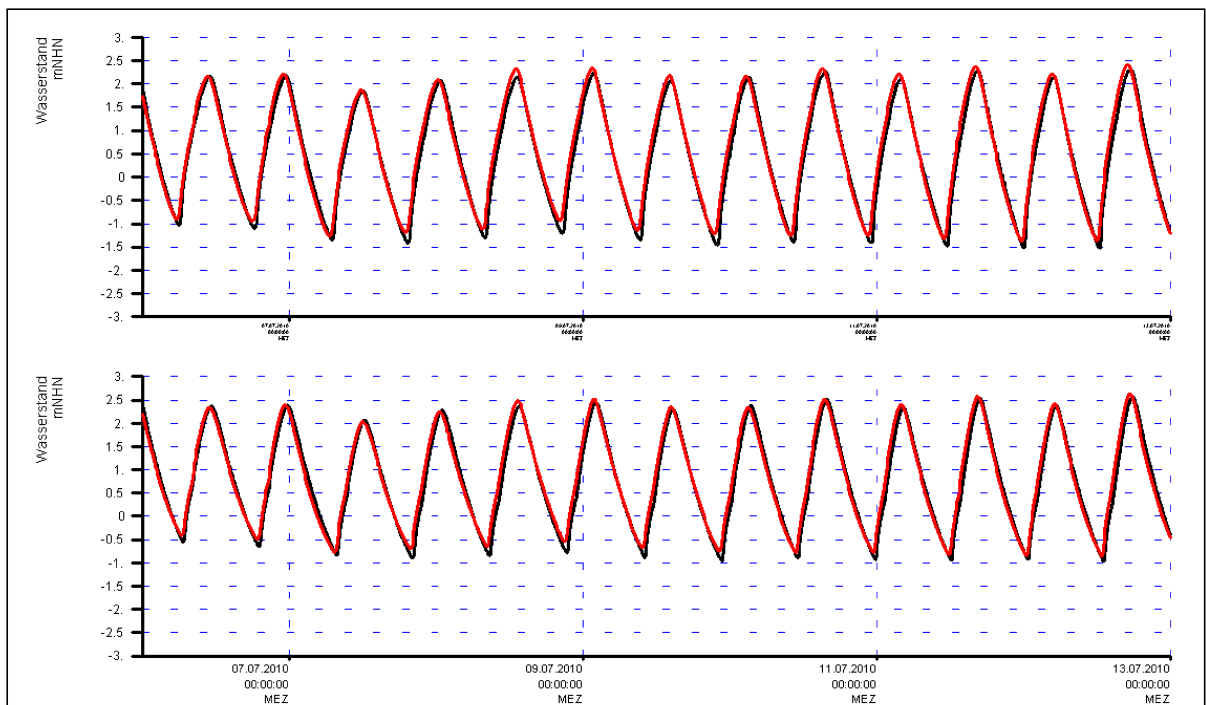


Bild 32: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bunthaus; untere Bildhälfte: Pegel Zollenspieker

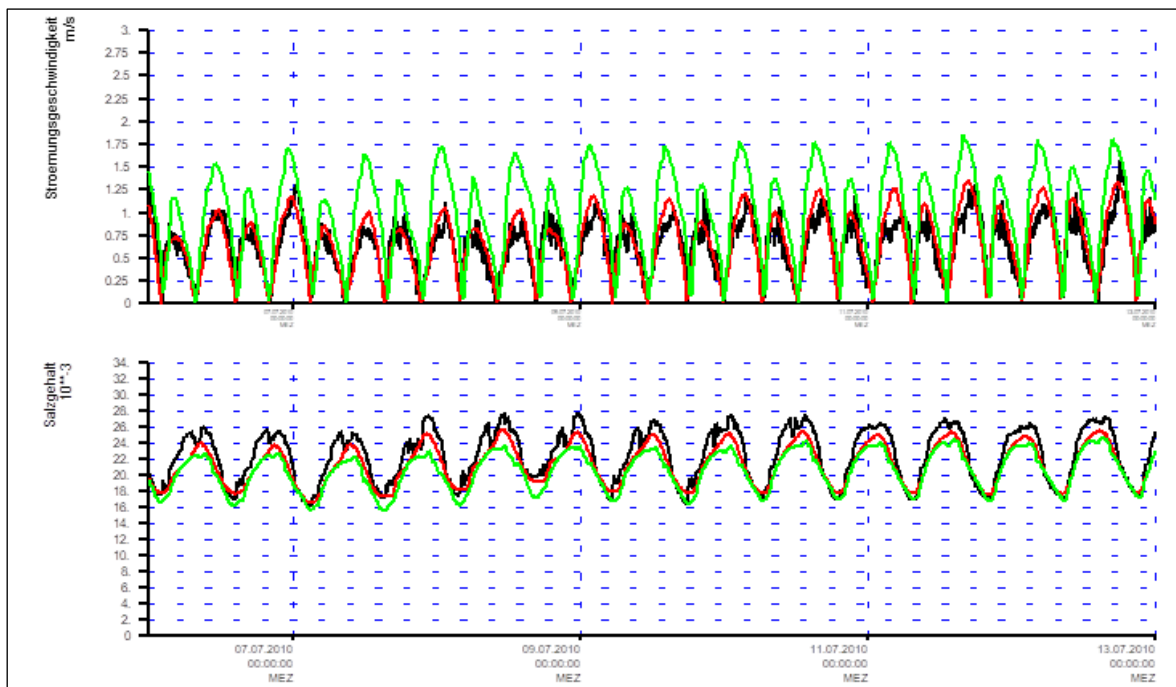


Bild 33: Station LZ4a; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)

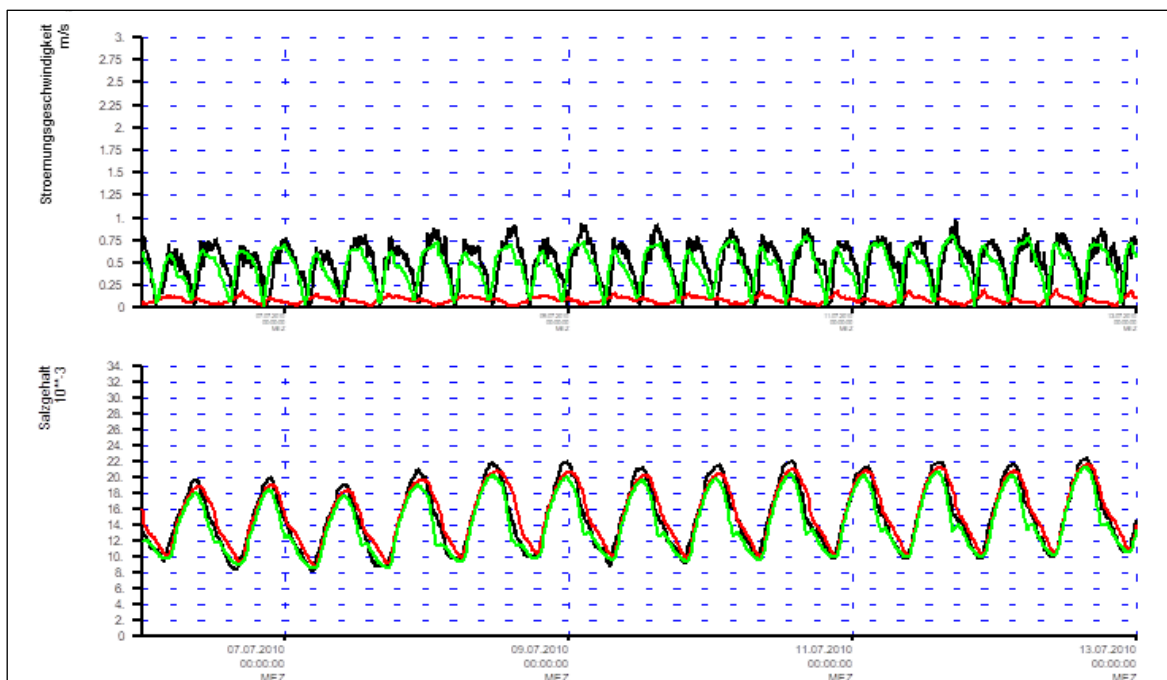


Bild 34: Station LZ3; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)

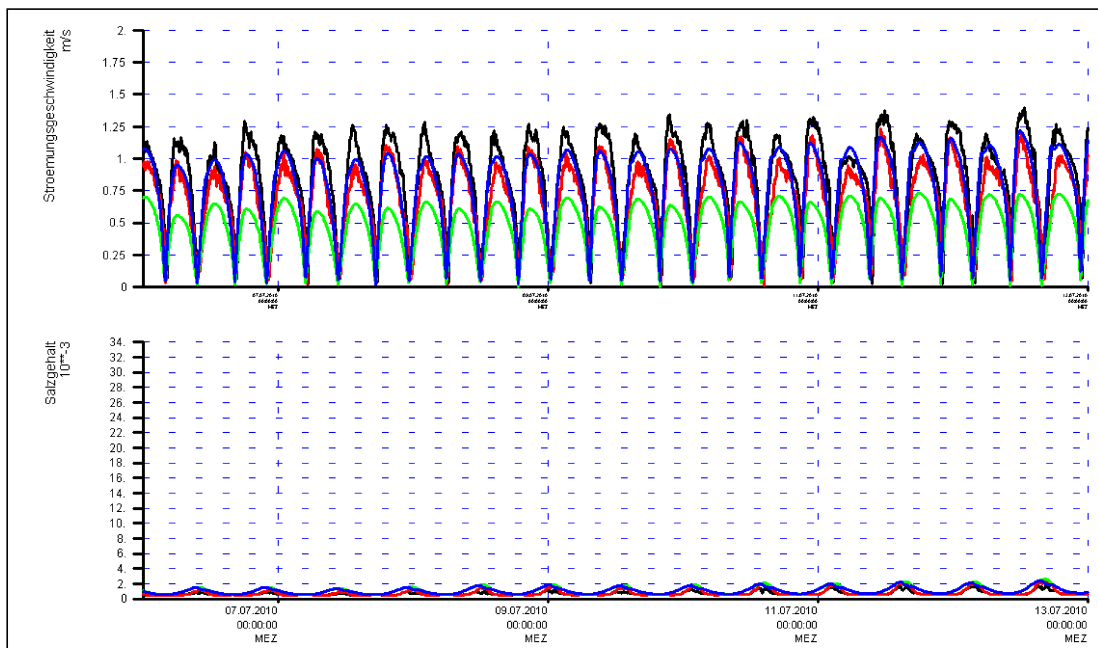


Bild 35: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10, mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

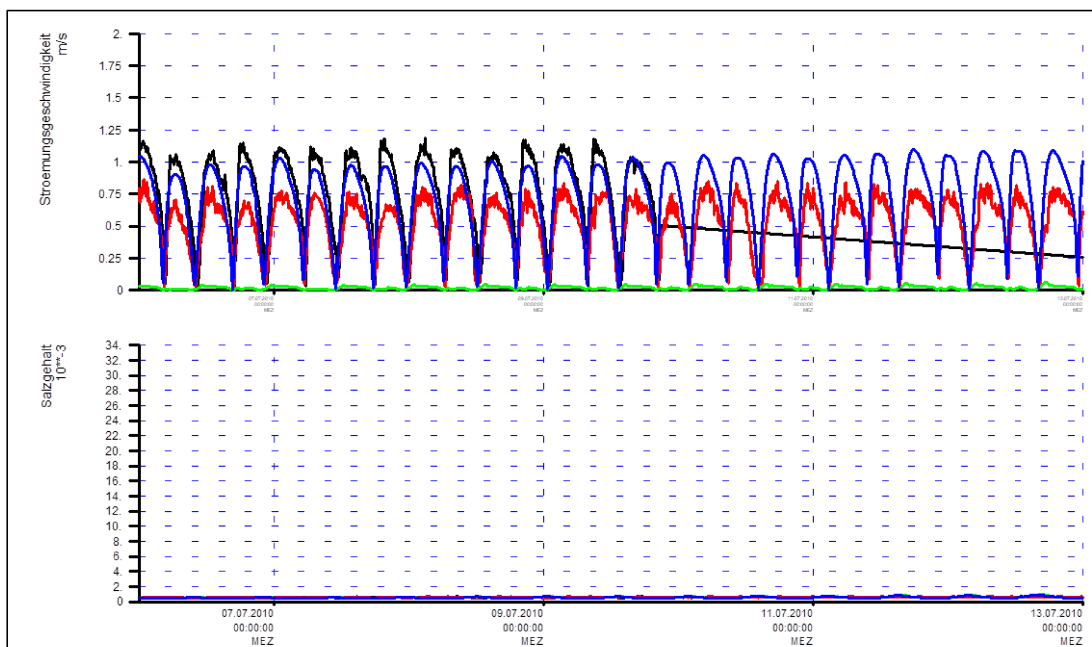


Bild 36: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

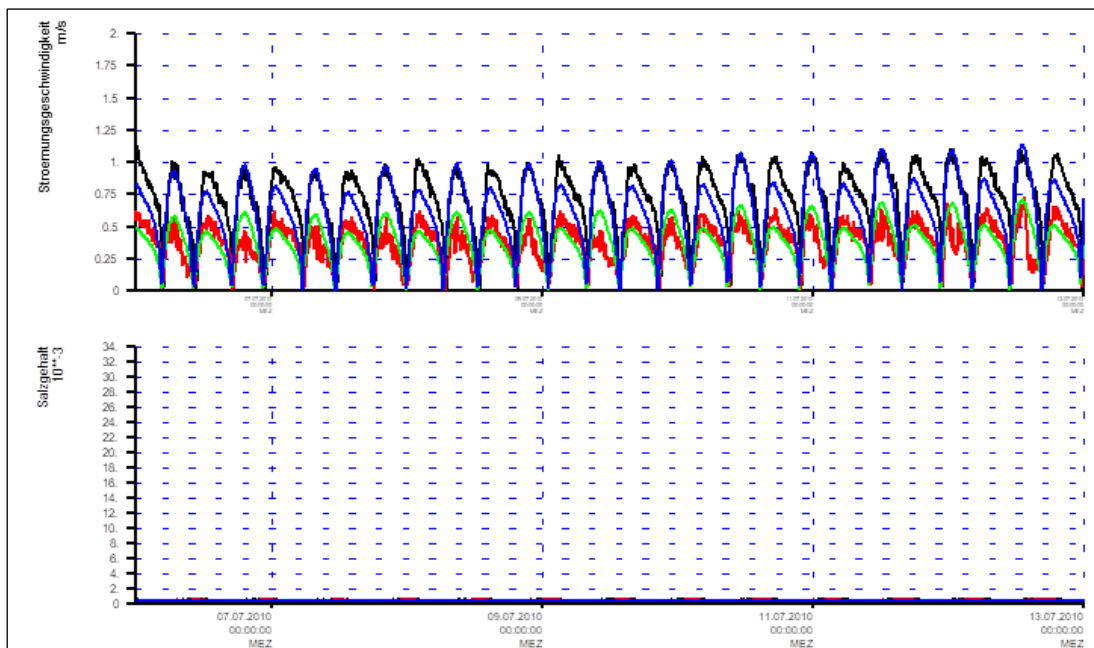


Bild 37: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

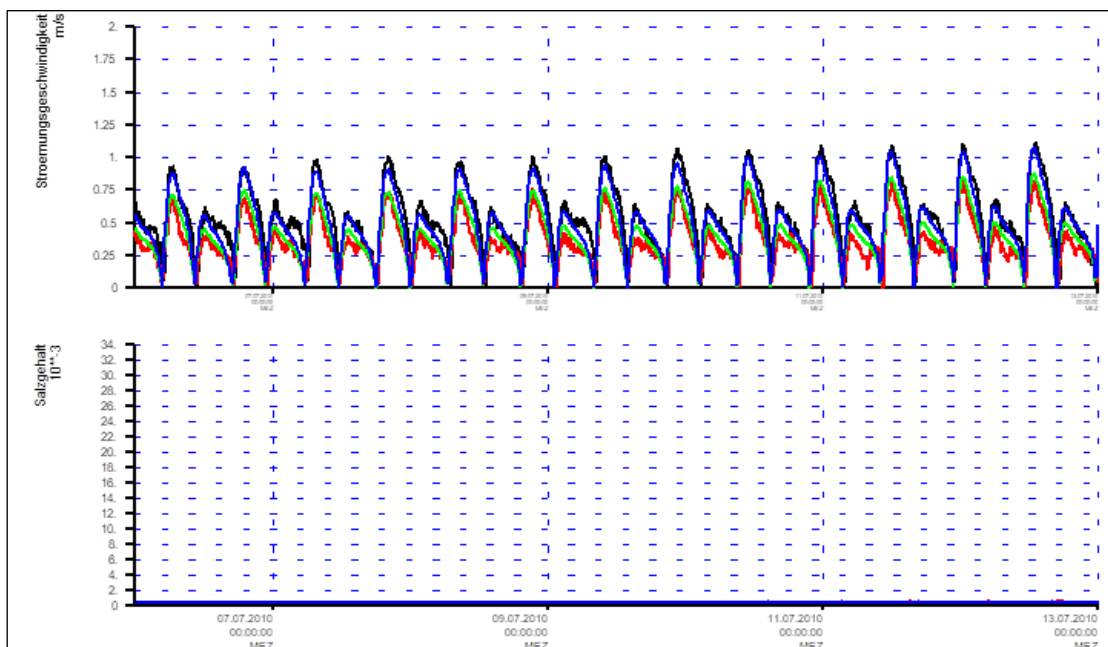


Bild 38: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

Bild 39 zeigt das Ergebnis der Jahressimulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt) an der Station LZ3 im Vergleich zur Messung und in Abhängigkeit der Abflussganglinie Neu Darchau. Der Salzgehalt variiert plausibel mit der Höhe des Abflusses. Er sinkt während der Abflussspitzen und steigt in Phasen mit niedrigem Abfluss wieder an. Die Simulationsergebnisse des Salzgehaltes liegen nach einer Einschwingzeit in der Größenordnung der Messung, die minimalen Salzgehalte werden vom Modell etwas überschätzt. Die Salzgehaltsvariation wird in der Simulation gut abgebildet. Im letzten Drittel des Simulationszeitraumes liegt der Salzgehalt im Vergleich zur Messung etwas höher. Es wird im Modell bei einer Hochwasserwelle weniger Salz aus dem Ästuar in die Deutsche Bucht transportiert als in der Messung, d. h. der Salzgehalt reagiert im Modell weniger deutlich auf hohe Abflussbedingungen als die Messung, s. Zeitraum August 2010.

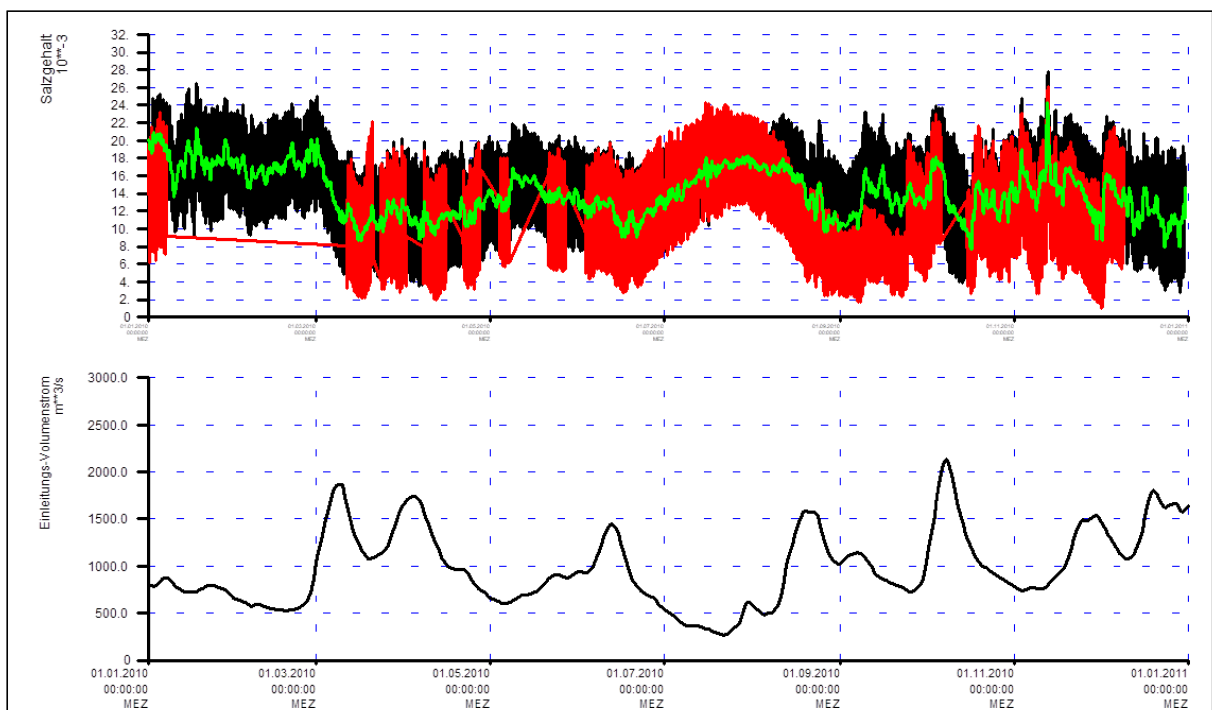


Bild 39: Obere Bildhälfte: Messung des Salzgehaltes an der Station LZ3 (in Rot), Simulation des Salzgehaltes (tiefengemittelt, in Schwarz), daraus berechnetes gleitendes Mittel über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün); untere Bildhälfte: Abflussganglinie der Elbe (Pegel Neu Darchau)

3.2 Validierung

3.2.1 Verhältnisse von Wind und Oberwasserzuflüssen sowie die Güte der Wasserstandsrandwerte im Validierungszeitraum

Als Validierungszeitraum wird der Spring-Nipp-Zeitraum 02.10.2010, 19:00 bis 17.10.2010, 12:00 festgelegt. Die Windverhältnisse sind weitestgehend ruhig, s. Bild 40. Die Oberwasserzuflüsse der Ästuarie sind erhöht und weisen im Validierungszeitraum eine Hochwasserwelle auf (Bild 2, gelber Kasten).

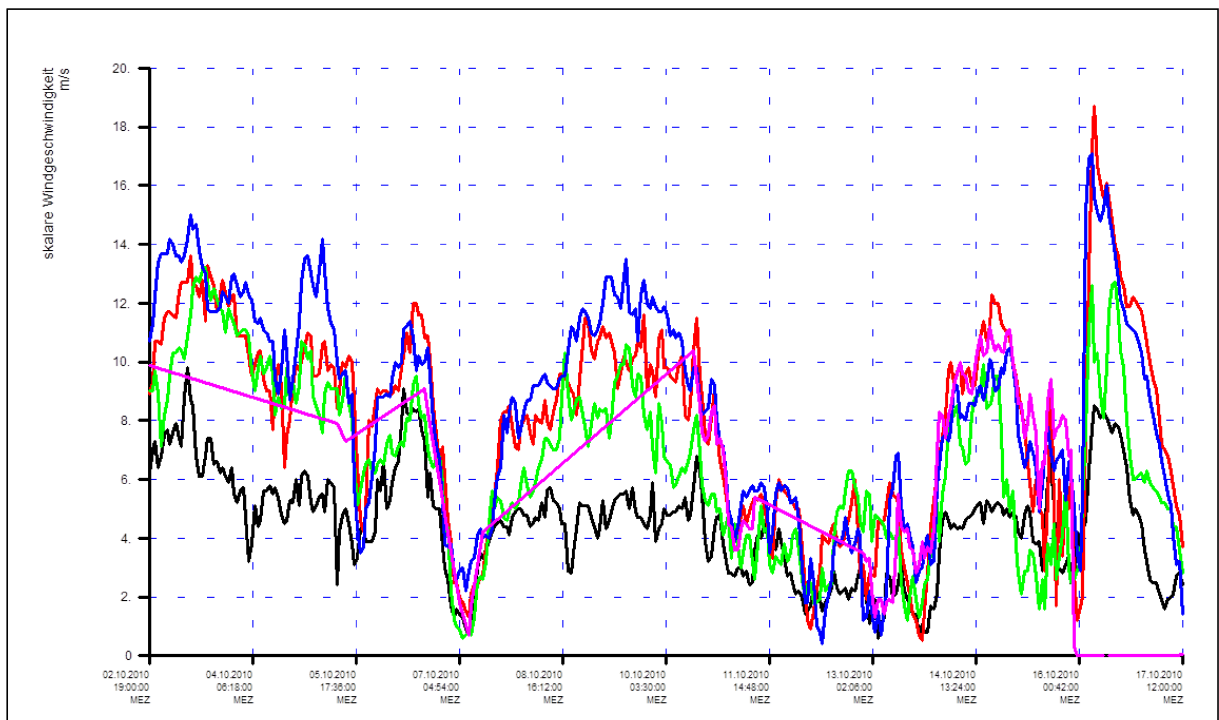


Bild 40: Messungen der skalaren Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Validierungszeitraum (Datenquelle DWD)

Der Validierungszeitraum weist eine sehr gute Übereinstimmung der seeseitigen Wasserstandsrandwerte aus DCSMv6 FM mit den Messungen an den Pegeln Terschelling und Hvide Sande auf. In Bild 41 ist die Wasserstandsmessung am Pegel Terschelling (schwarz) den eingesteuerten Wasserstandsrandwerten aus dem übergeordneten Modell DCSMv6 FM (rot) für den Validierungszeitraum (blauer Kasten) gegenüber gestellt. Die untere Bildhälfte zeigt die Differenz Modell – Messung des gleitenden Mittels über 12 Stunden und 25 min Stunden für die Wasserstände (grün). Bild 42 stellt analog die Verhältnisse für den Pegel Hvide Sande dar. Die Form, Variabilität und Amplitude der Wasserstände werden von DCSMv6 FM an beiden Pegeln gut wiedergegeben. Dies spiegelt sich auch in der Differenz der gleitenden Mittel der Wasserstände wieder (grüne Kurven in Bild 41 und Bild 42).

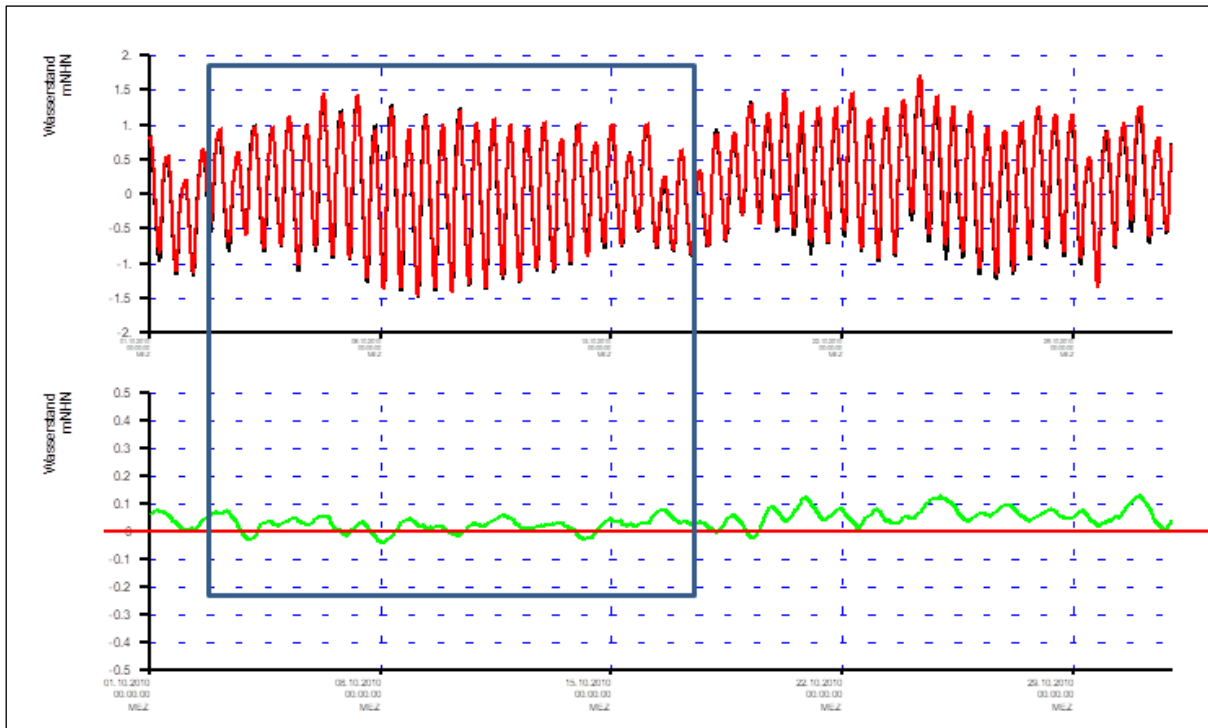


Bild 41: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Terschelling; untere Bildhälfte: Differenz DCSMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Validierungszeitraum

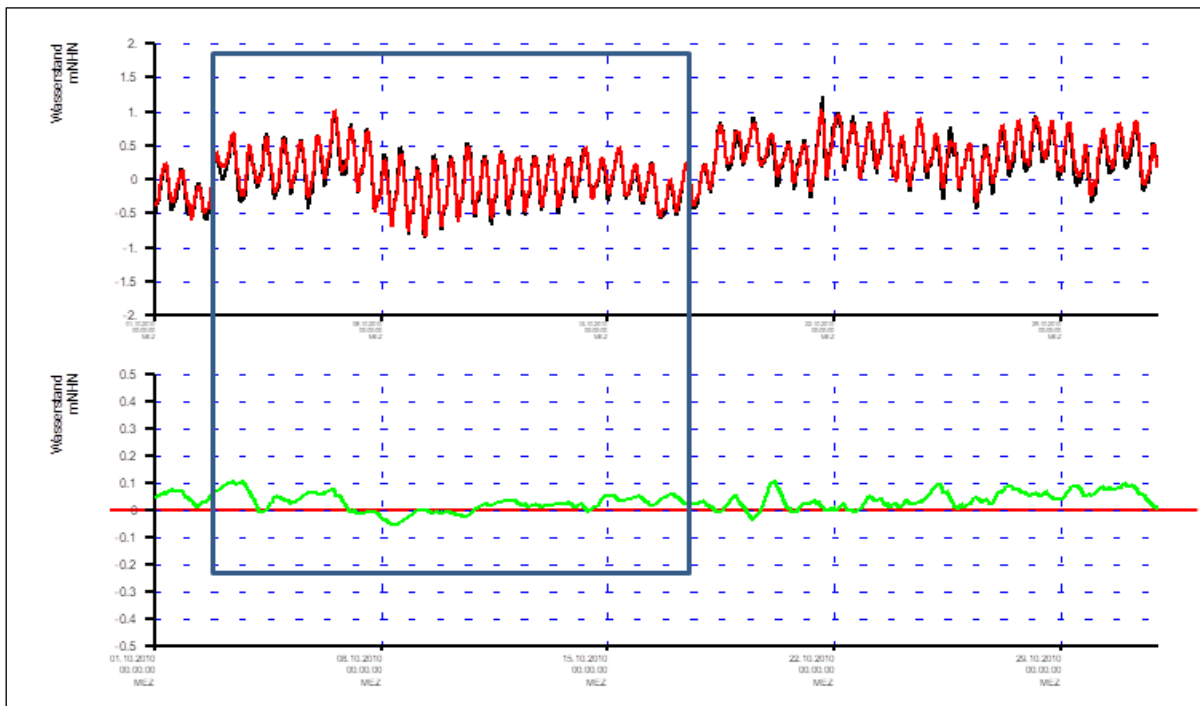


Bild 42: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Hvide Sande; untere Bildhälfte: Differenz DCSMv6 FM – Messung aus den gleitenden Mittel der Wasserstände über 12 Stunden und 25 Minuten (in Grün), blauer Kasten: Validierungszeitraum

3.2.2 Ergebnis der Validierung für die Küstenpegel

Die Vergleiche erfolgen anhand einer Gegenüberstellung von Messung und Simulationsergebnis am jeweiligen Pegel für eine Woche im Validierungszeitraum. An den Pegeln Terschelling und Hvide Sande stimmen die Wasserstände der eingesteuerten Randwerte gut mit der Messung überein, s. Bild 43 bzw. Bild 41 und Bild 42. Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie die Form der Wasserstandskurven werden gut wiedergegeben.

In Bild 44 bis Bild 48 sind die Ergebnisse der Validierung für Wasserstand und Salzgehalt (jeweils oberste und unterste Berechnungsschicht) gegenüber der Messung (soweit vorhanden) für einige Pegel in der Deutschen Bucht und eine Woche im Validierungszeitraum dargestellt. Das Deutsche-Bucht-Modell zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Tidehochwasser, Tidehub und die Form der Tidekurven werden gut wiedergegeben. Im Verlauf durch die Deutsche Bucht nimmt der Tidehub im Vergleich zur Messung zwischen Pegel Nordey und Helgoland Binnenhafen etwas ab und steigt dann im weiteren Verlauf wieder an. Die Salzgehalte an den Stationen Deutsche Bucht und FINO1 liegen in der Größenordnung der Messungen.

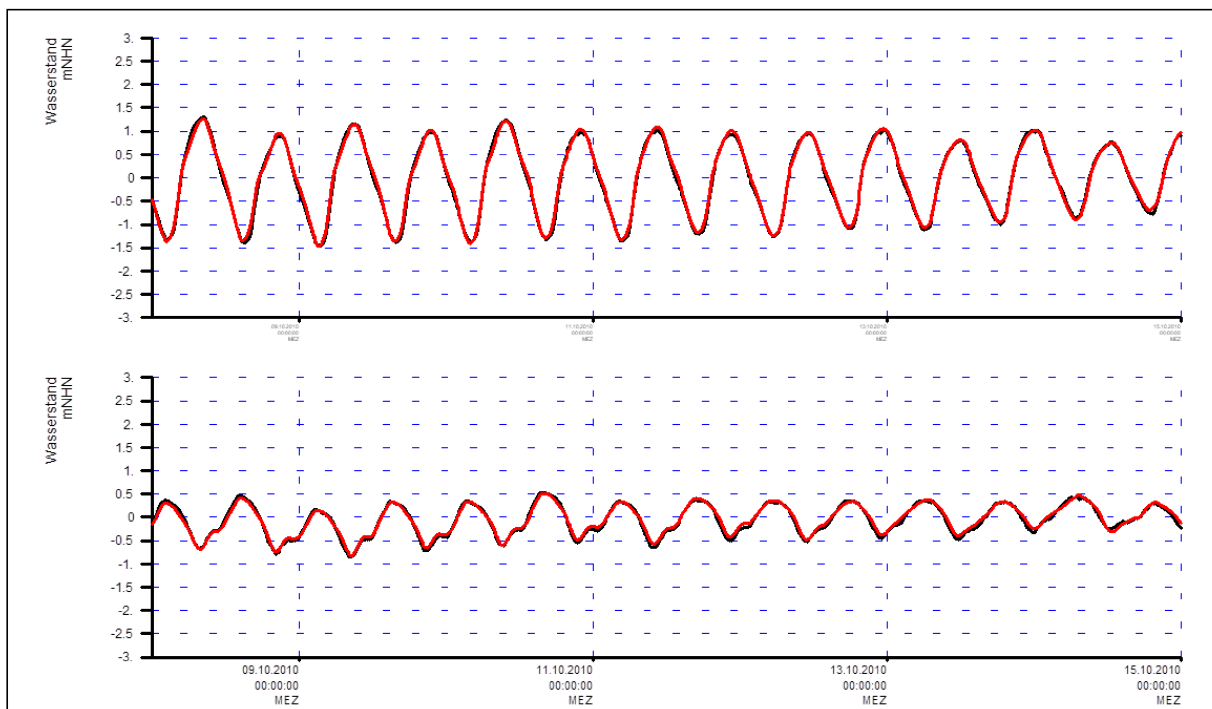


Bild 43 *Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation bzw. die eingesteuerten WL Randwerte (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Terschelling (NL); untere Bildhälfte: Pegel Hvide Sande (DK)*

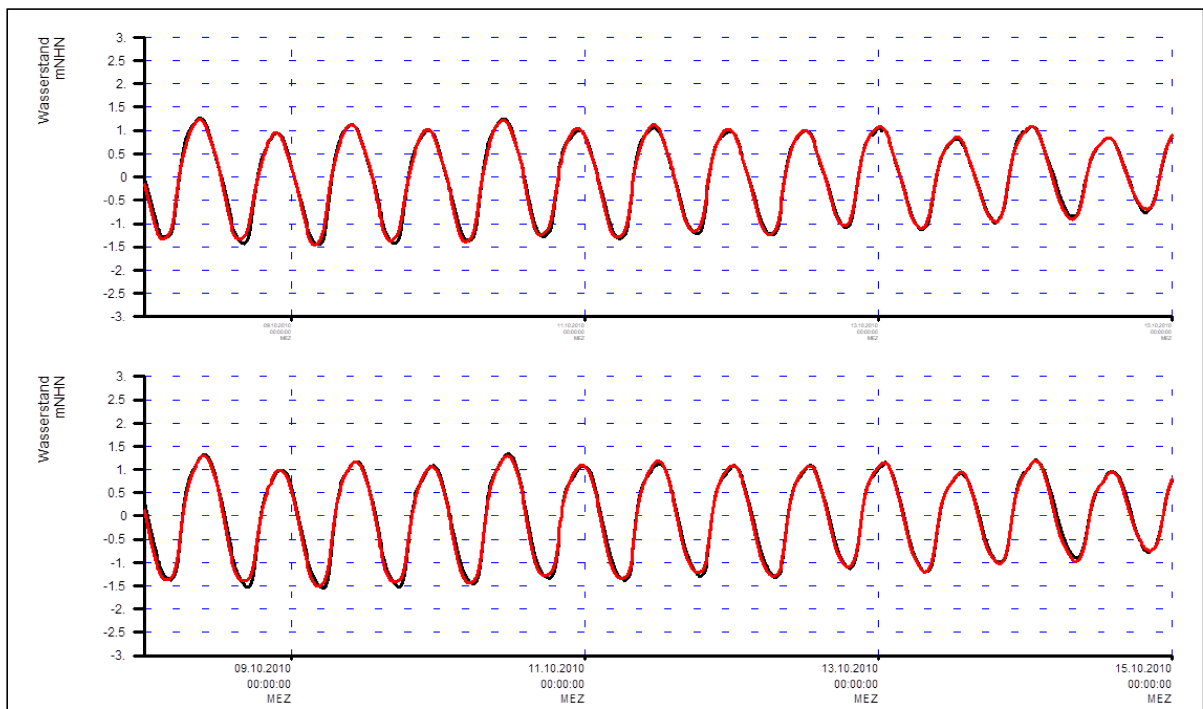


Bild 44: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Wierumergronden; untere Bildhälfte: Pegel Huibertgat

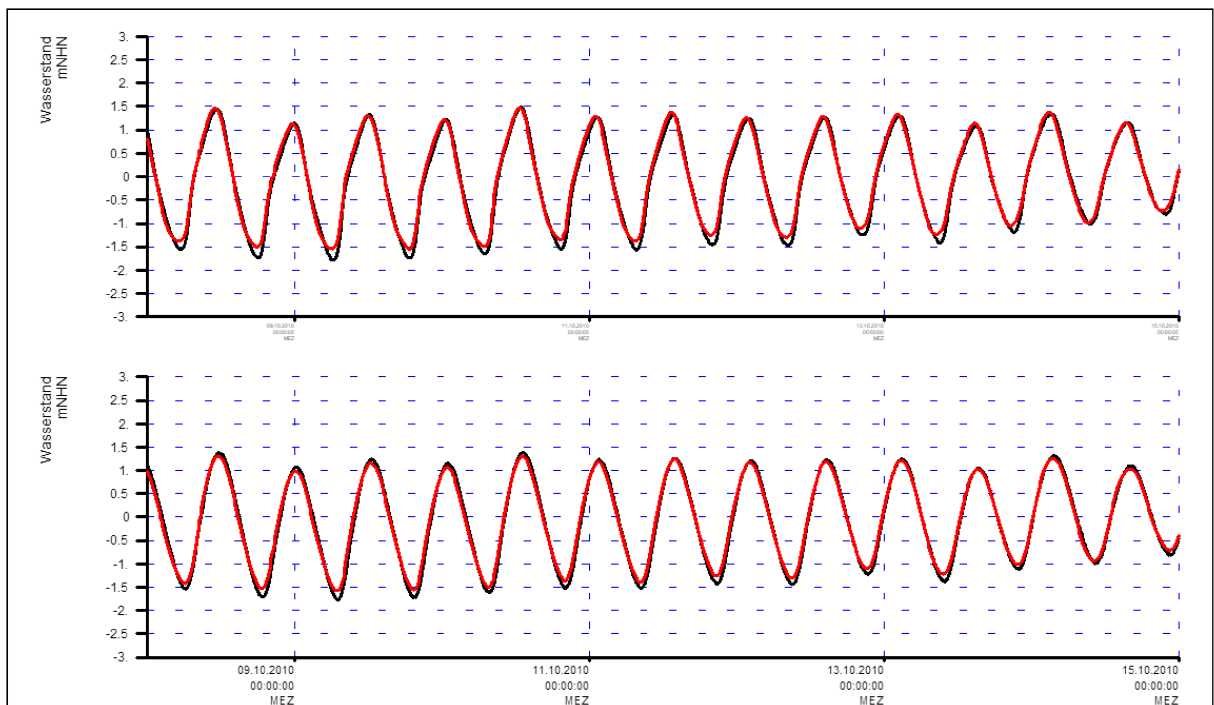


Bild 45: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Norderney Riffgat; untere Bildhälfte: Pegel Helgoland Binnenhafen

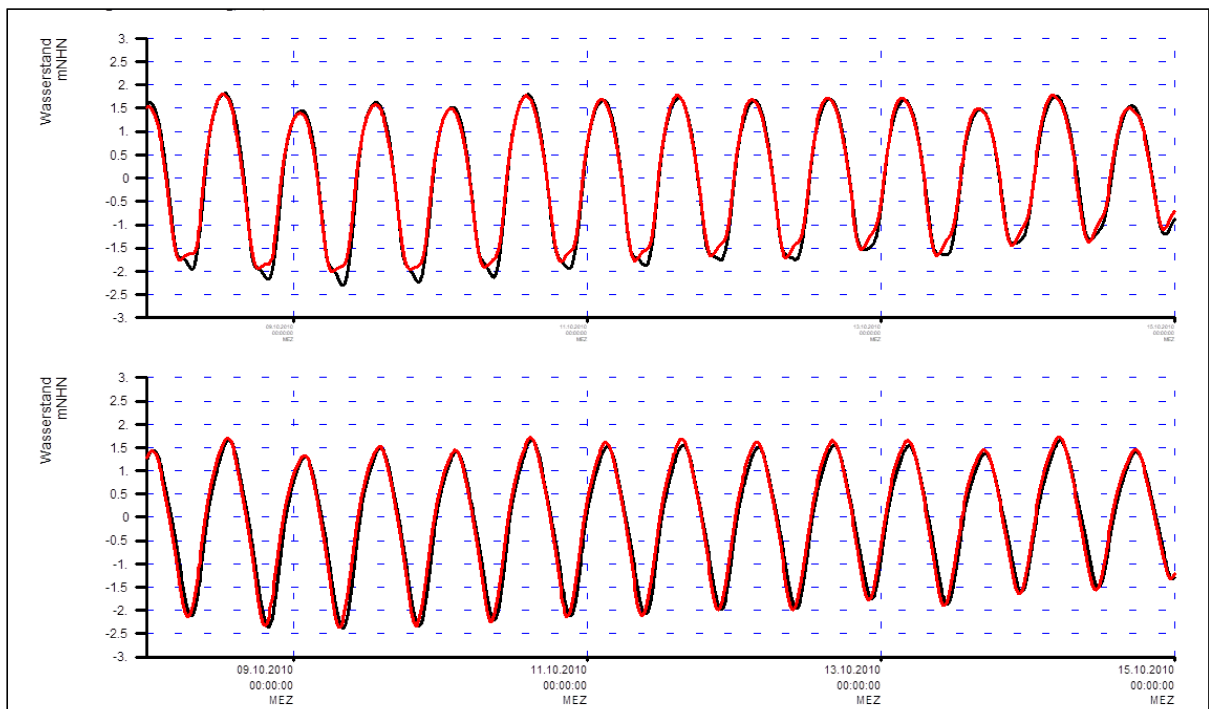


Bild 46: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Büsum; untere Bildhälfte: Pegel Pellworm

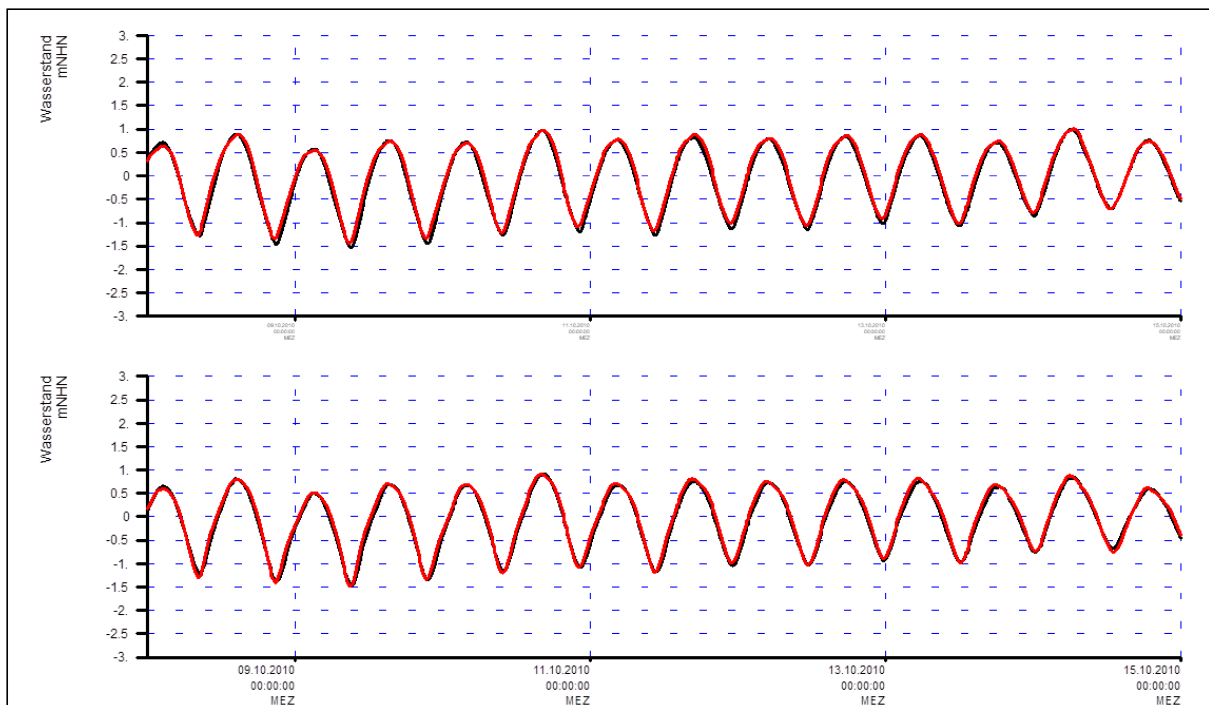


Bild 47: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel List; untere Bildhälfte: Pegel Esbjerg

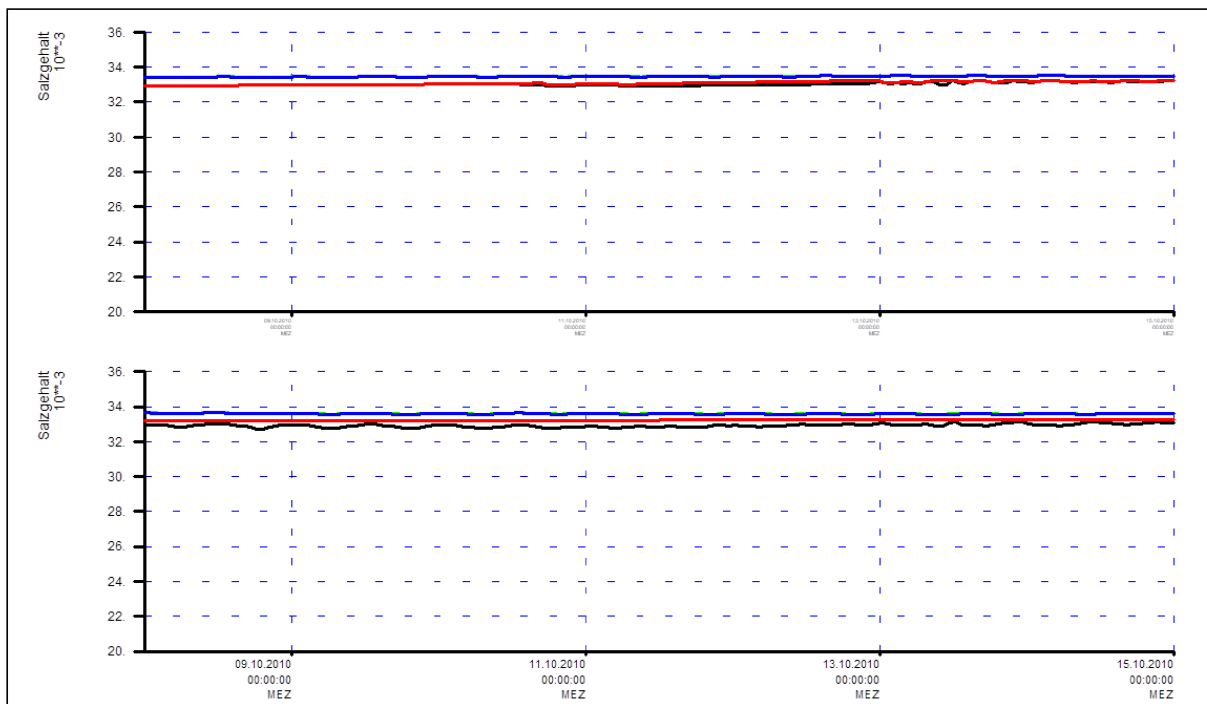


Bild 48: Obere Bildhälfte: Station Deutsche Bucht, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -30,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -39,5 bis -38,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Station FINO1, Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -12,5 mNHN) und die Simulation (in Grün: -31,5 bis -30,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

3.2.3 Ergebnis der Validierung für das Ems Ästuar

Die Modellvalidierung für das Ems Ästuar erfolgt durch den Vergleich der berechneten Wasserstände mit Messungen. Auf die Validierung der Strömungsgeschwindigkeit und des Salzgehaltes muss aufgrund fehlender Messdaten für das Jahr 2010 verzichtet werden.

Bild 49 und Bild 50 zeigen die Ergebnisse für vier Pegel in der Ems. Die Mittelwasserlage ist etwas zu hoch, Tidehub sowie Wasserstandsverlauf werden vom Modell gut reproduziert.

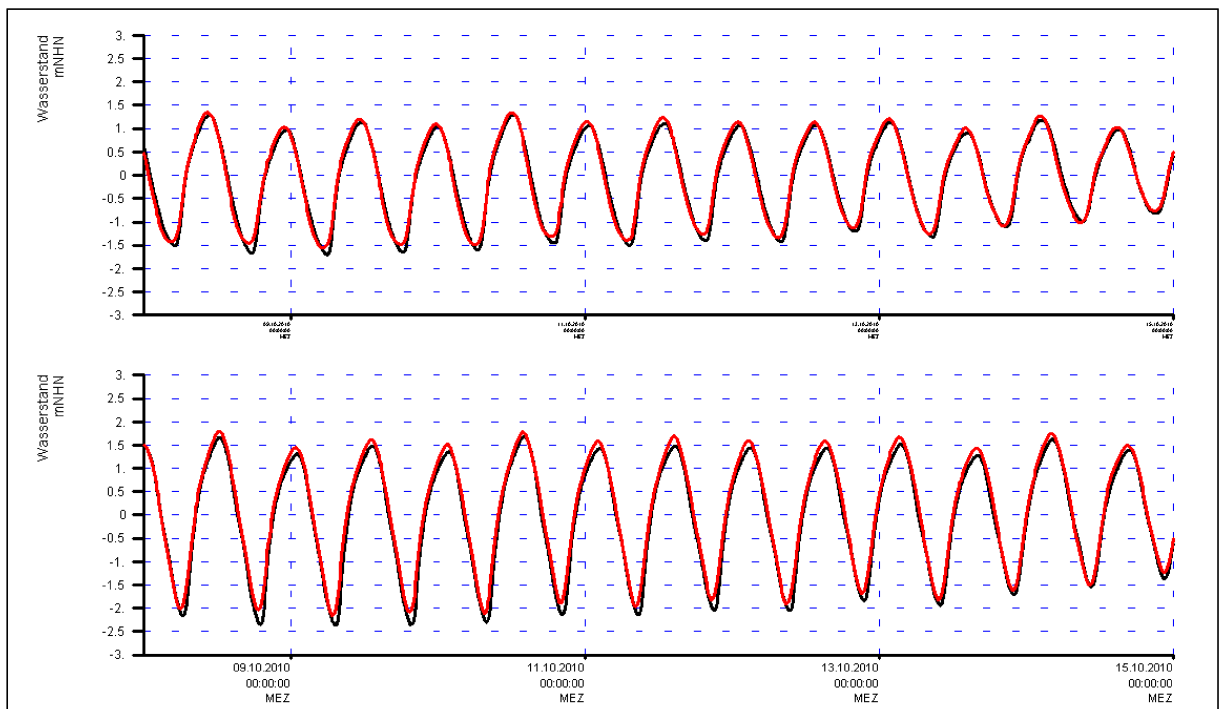


Bild 49: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Borkum Südstrand; untere Bildhälfte: Pegel Emden Neue Seeschleuse

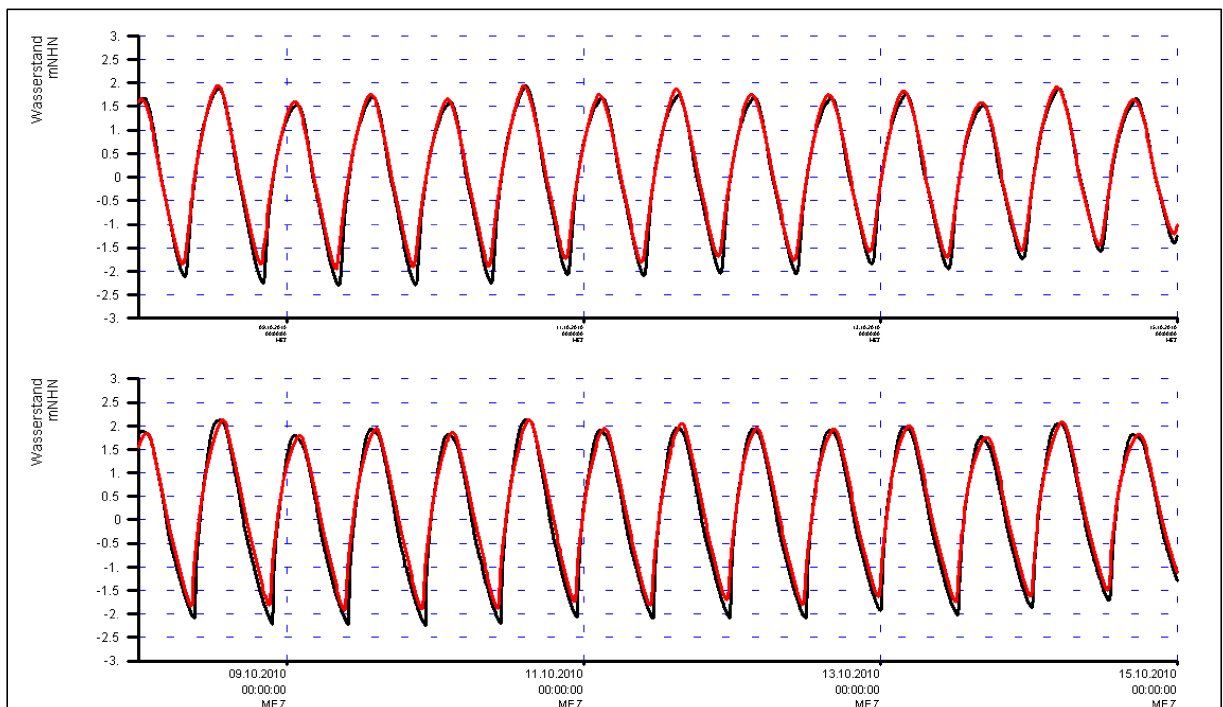


Bild 50: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Terborg; untere Bildhälfte: Pegel Papenburg

3.2.4 Ergebnis der Validierung für das Jade-Weser-Ästuar

Die Modellvalidierung für das Jade-Weser-Ästuar erfolgt durch den Vergleich der berechneten Wasserstände und Salzgehalte (jeweils oberste und unterste Berechnungsschicht) mit Messungen. Auf die Validierung der Strömungsgeschwindigkeit muss aufgrund fehlender Messdaten für das Jahr 2010 verzichtet werden. Bild 51 bis Bild 54 zeigen die Ergebnisse für vier Pegel in der Weser. Der Tidehub wird grundsätzlich unterschätzt, wobei das Tideniedrigwasser zu hoch ausfällt. Teilweise ist eine Phasenverschiebung erkennbar, d.h. die Tidewelle läuft im Modell etwas schneller als in der Messung. Die Salzgehalte werden im Weser Ästuar gut reproduziert. In der Außenweser werden die Salzgehalte etwas überschätzt.

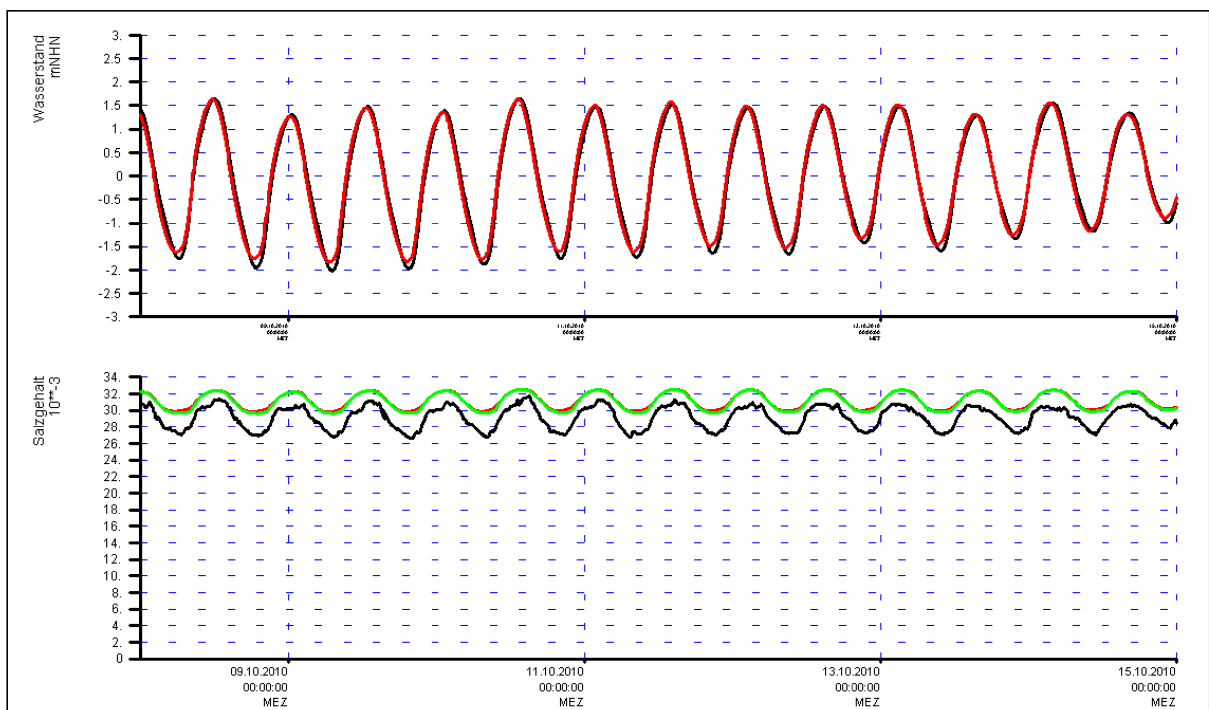


Bild 51: Pegel Leuchtturm Alte Weser; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,6 mNHN) und die Simulation (in Rot: -10,5 bis -9,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)

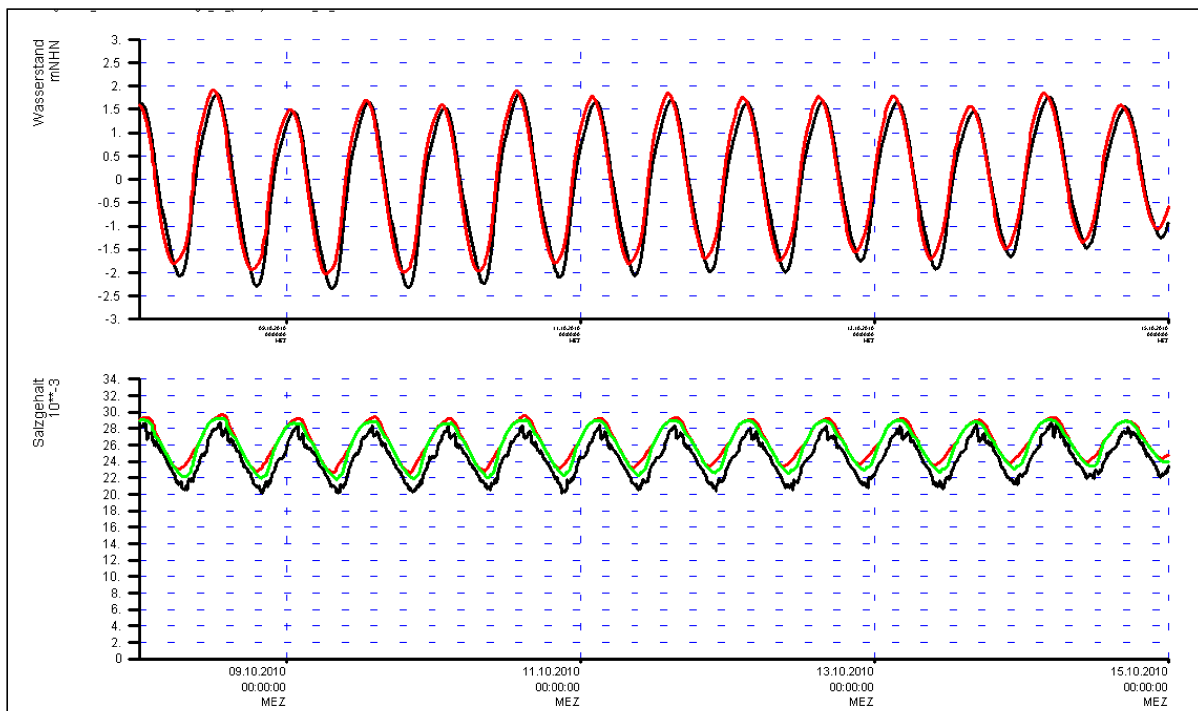


Bild 52: Pegel Dwarsgat; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,7 mNHN) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)

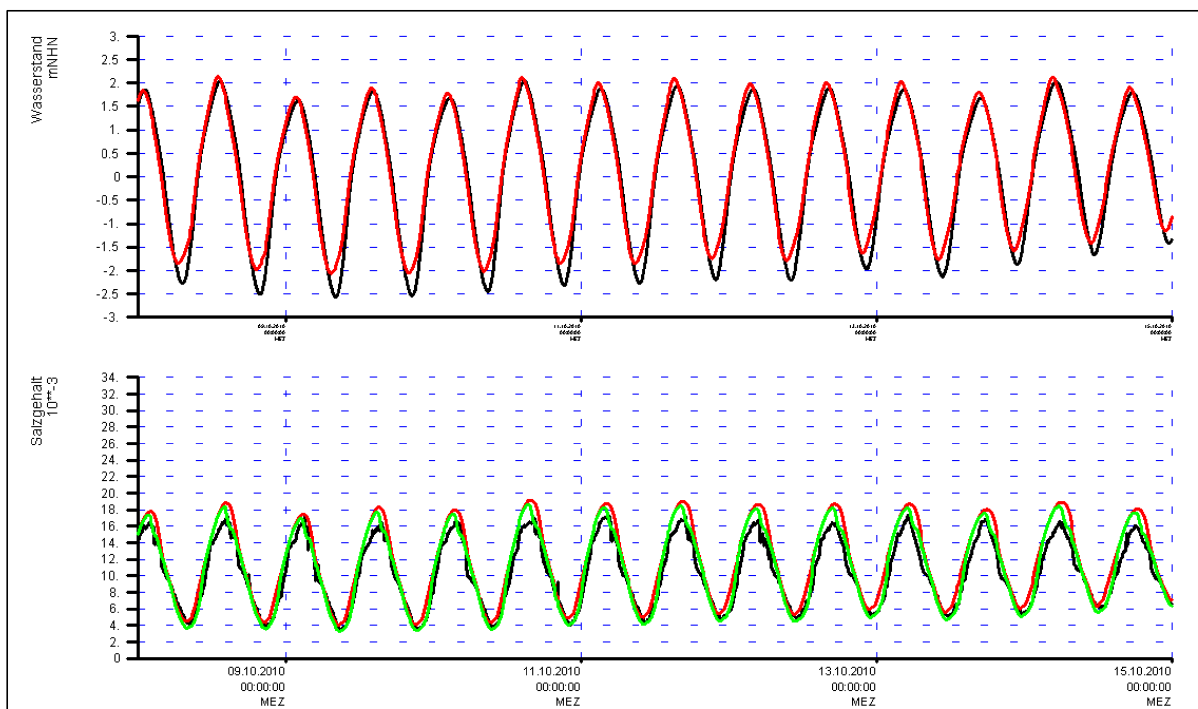


Bild 53: Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: -2,9 mNHN) und die Simulation (in Rot: -15,5 bis -14,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)

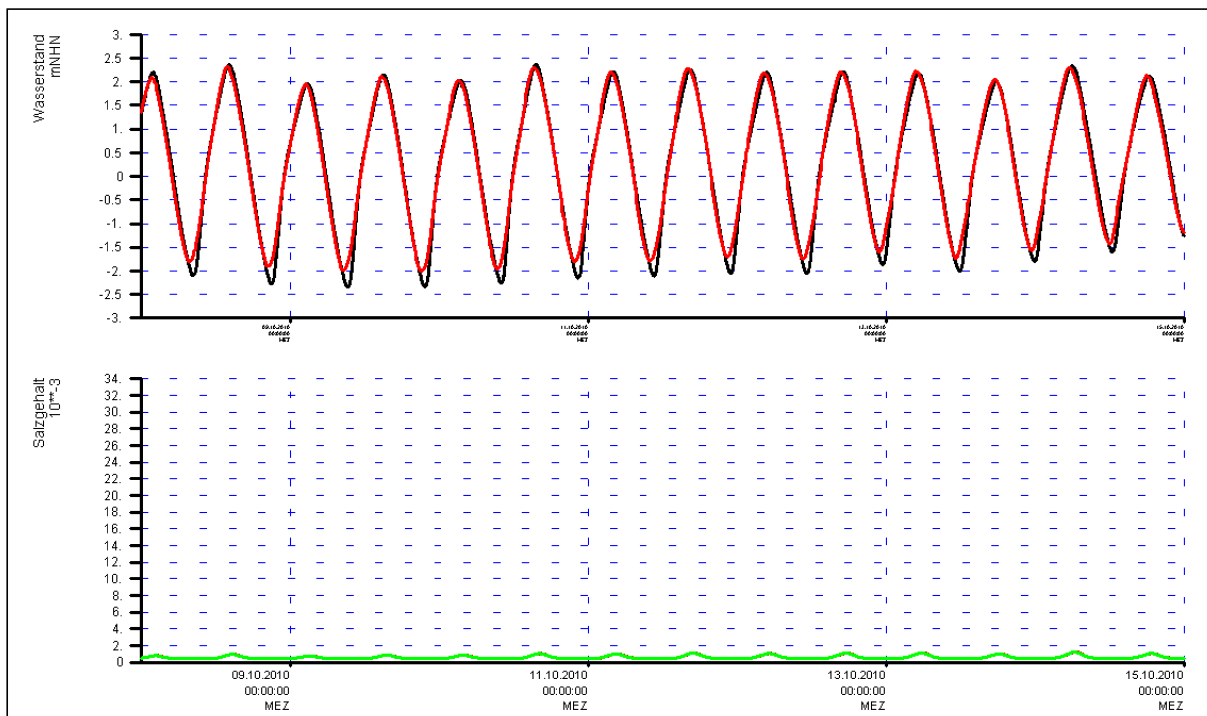


Bild 54: Pegel Brake; obere Bildhälfte: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: $-2,8$ mNHN) und die Simulation (in Rot: $-13,5$ bis $-12,5$ mNHN; in Grün: $-2,5$ bis $-1,5$ mNHN)

3.2.5 Ergebnis der Validierung für das Elbe Ästuar

In Bild 55 bis Bild 65 sind die Ergebnisse der Kalibrierung für Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt (jeweils oberste und unterste Berechnungsschicht) gegenüber der Messung (soweit vorhanden) dargestellt. Tidehub, Tidehoch- und Tideniedrigwasser sowie die Form der Tidekurve werden vom Modell grundsätzlich gut abgebildet. Teilweise liegt die Mittelwasserwasserlage im Vergleich zur Messung etwas zu hoch. Die Simulationsergebnisse der Strömungsgeschwindigkeiten (Beträge, zeitlicher Verlauf, Kenterphasen) und der Salzgehalte in der Tideelbe liegen ebenfalls in den Größenordnungen der Messungen. Aufgrund einer Messlücke ist der Darstellungszeitraum an der Station LZ3 in Bild 60 verglichen mit den anderen Stationen um eine Woche nach hinten verschoben.

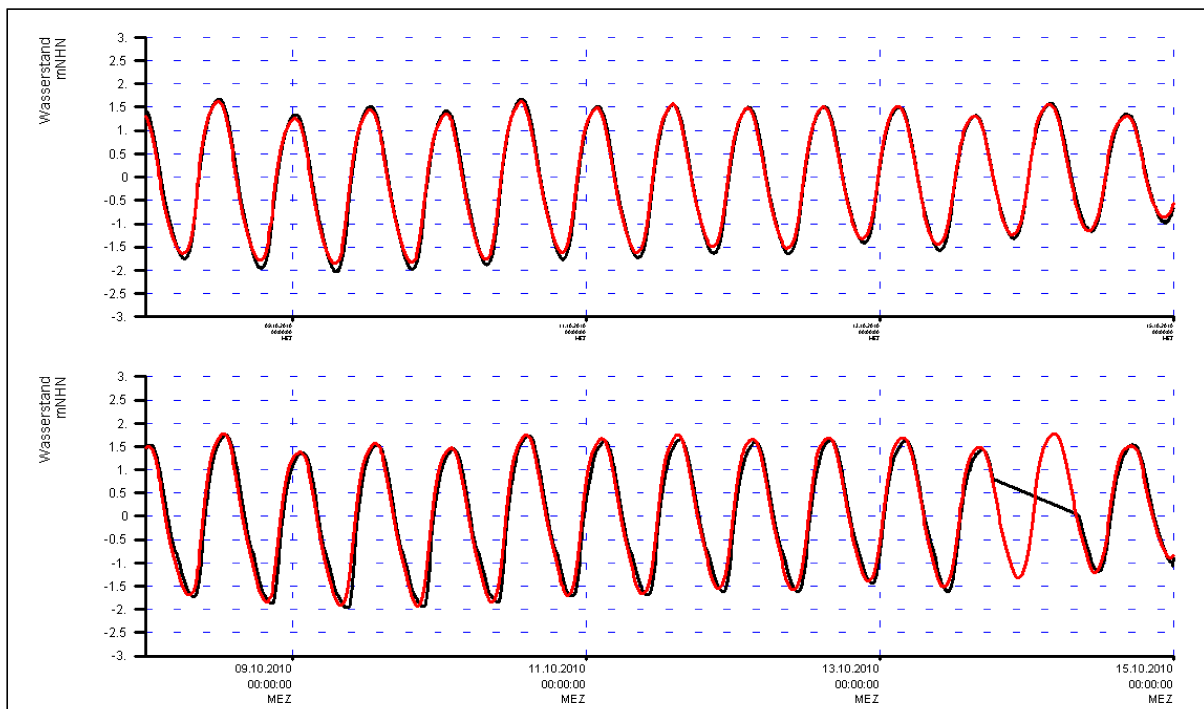


Bild 55: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bake A; untere Bildhälfte: Pegel Cuxhaven

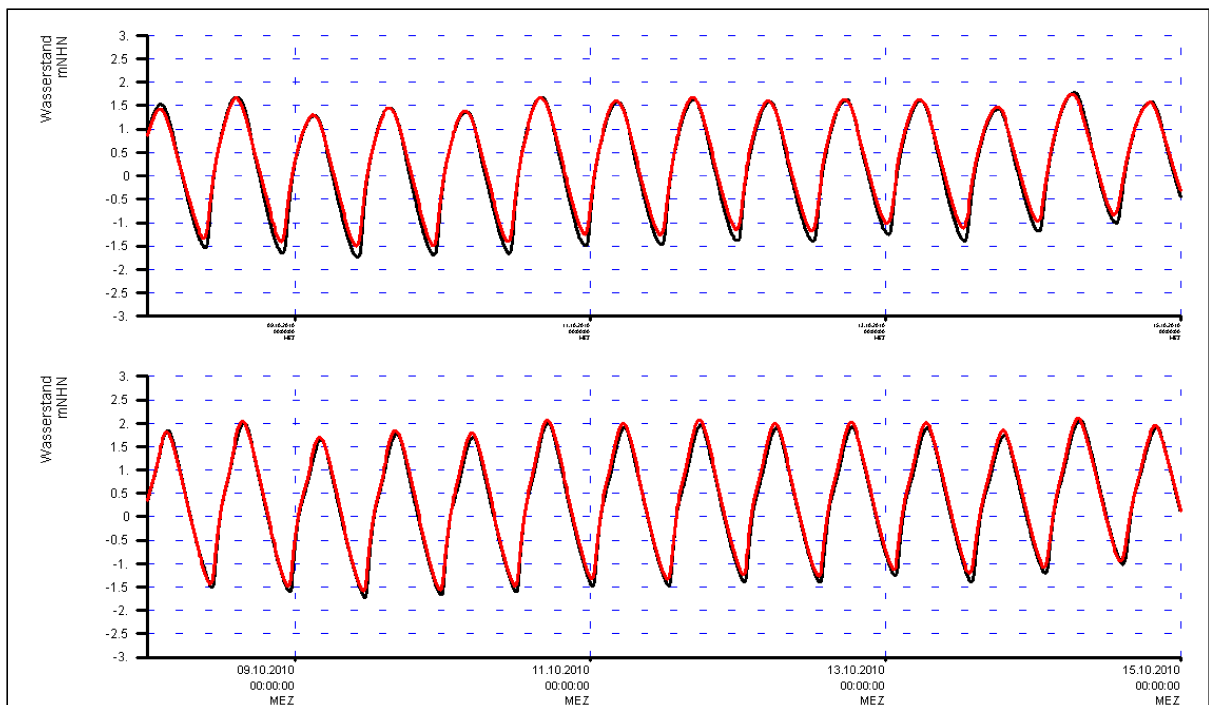


Bild 56: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Brokdorf; untere Bildhälfte: Pegel Stadersand

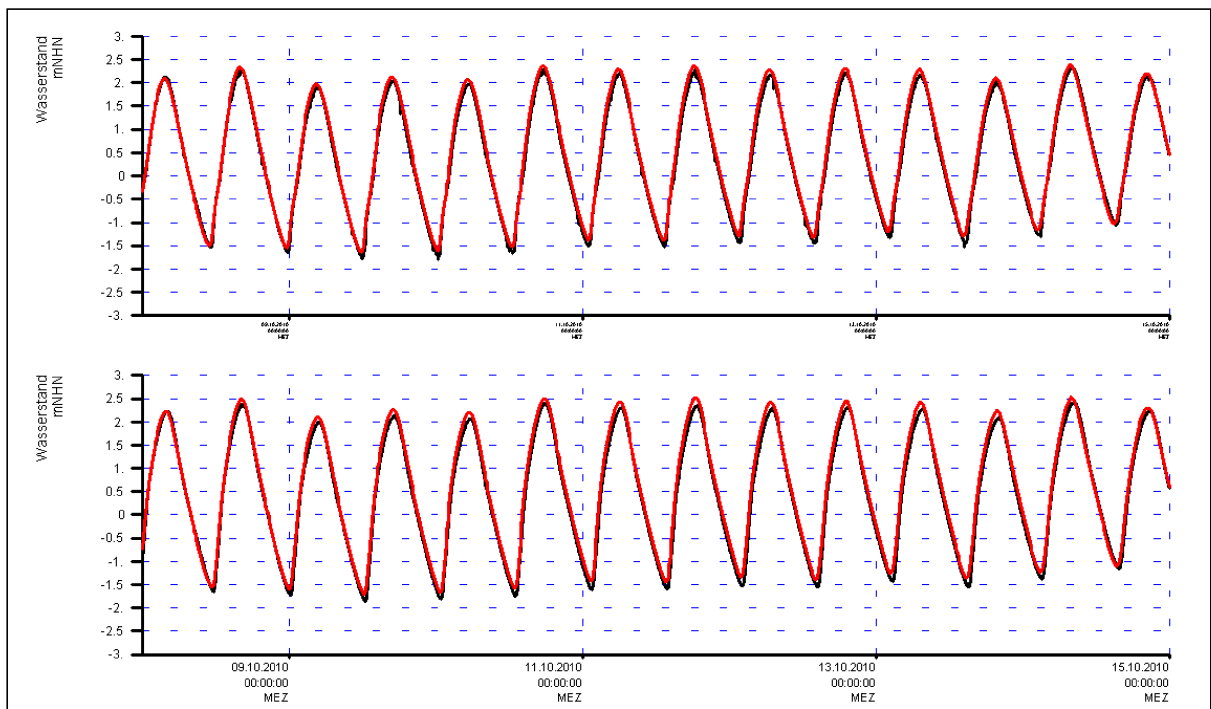


Bild 57: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Blankenese; untere Bildhälfte: Pegel St. Pauli

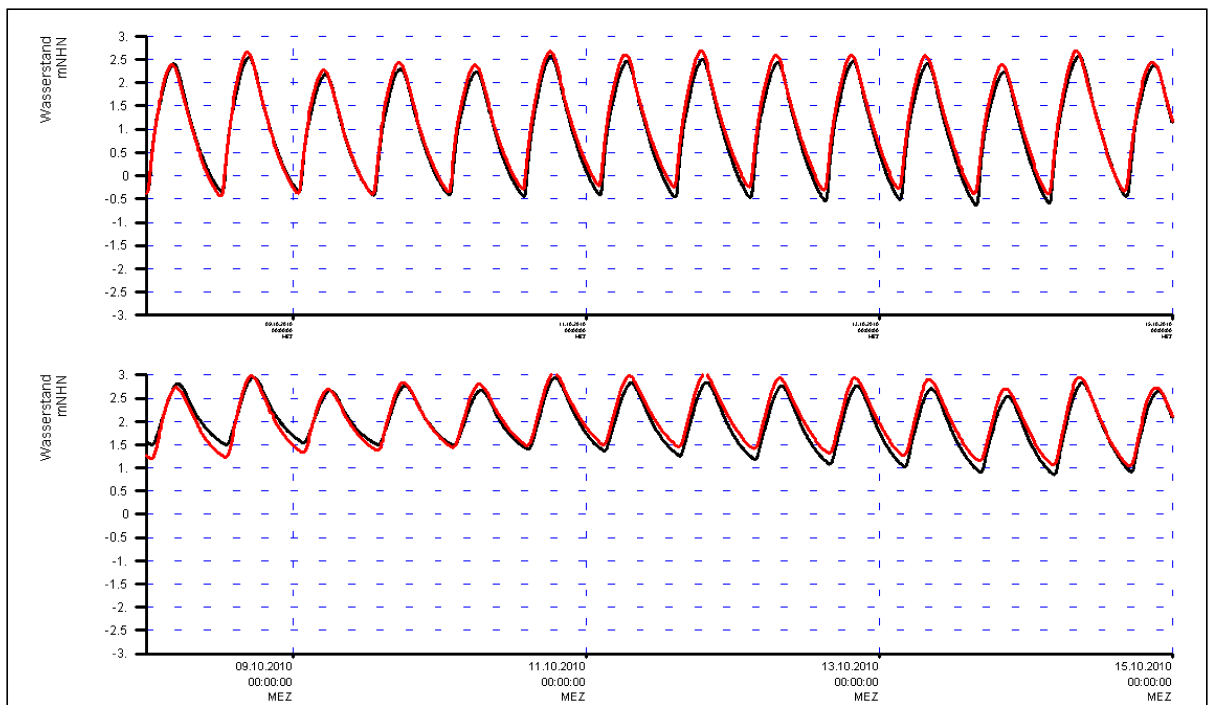


Bild 58: Zeitreihen des Wasserstandes für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot); obere Bildhälfte: Pegel Bunthaus; untere Bildhälfte: Pegel Zollenspieker

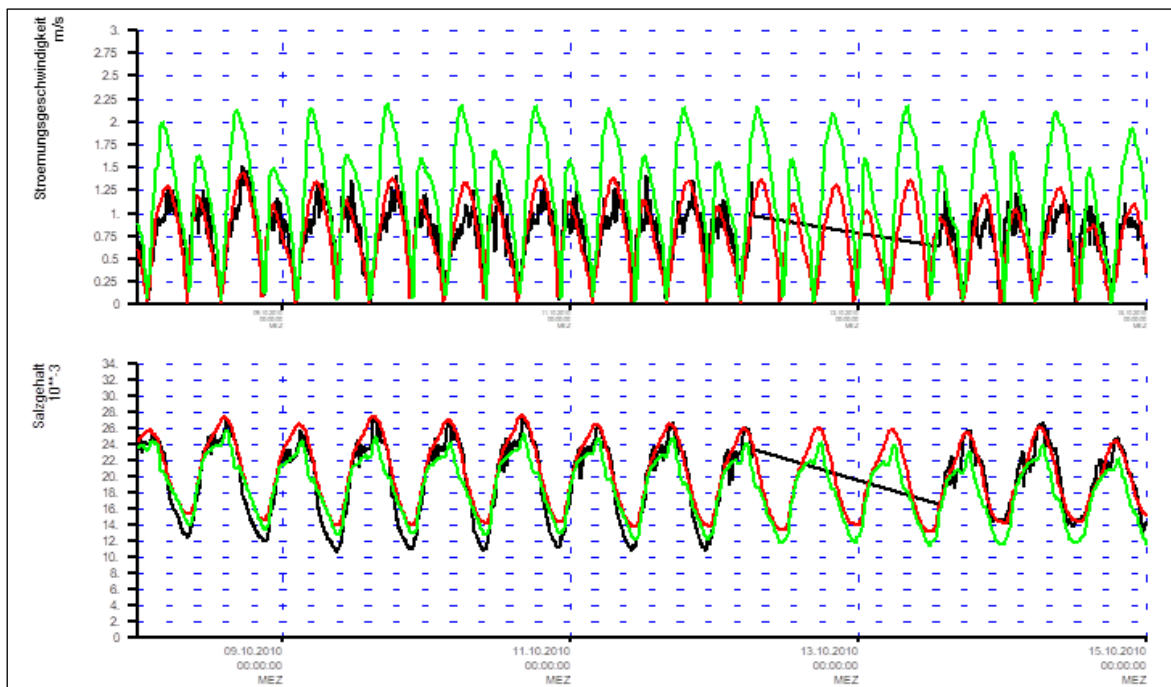


Bild 59: Station LZ4a; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Grün: -2,5 bis -1,5 mNHN)

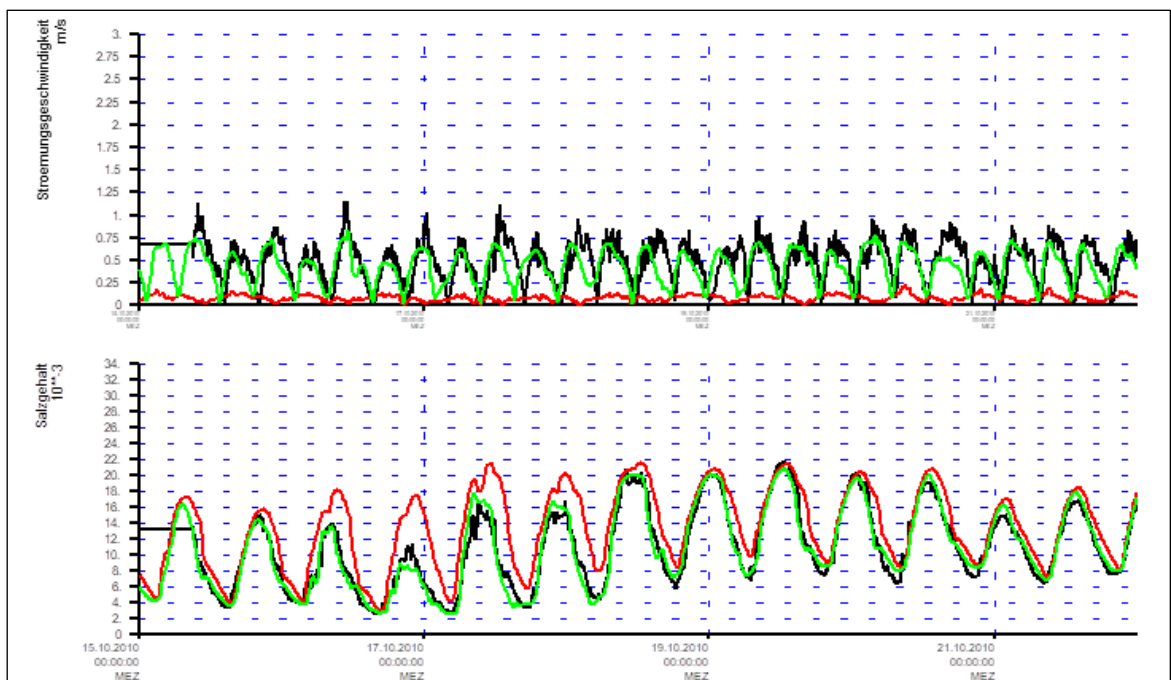


Bild 60: Station LZ3; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)

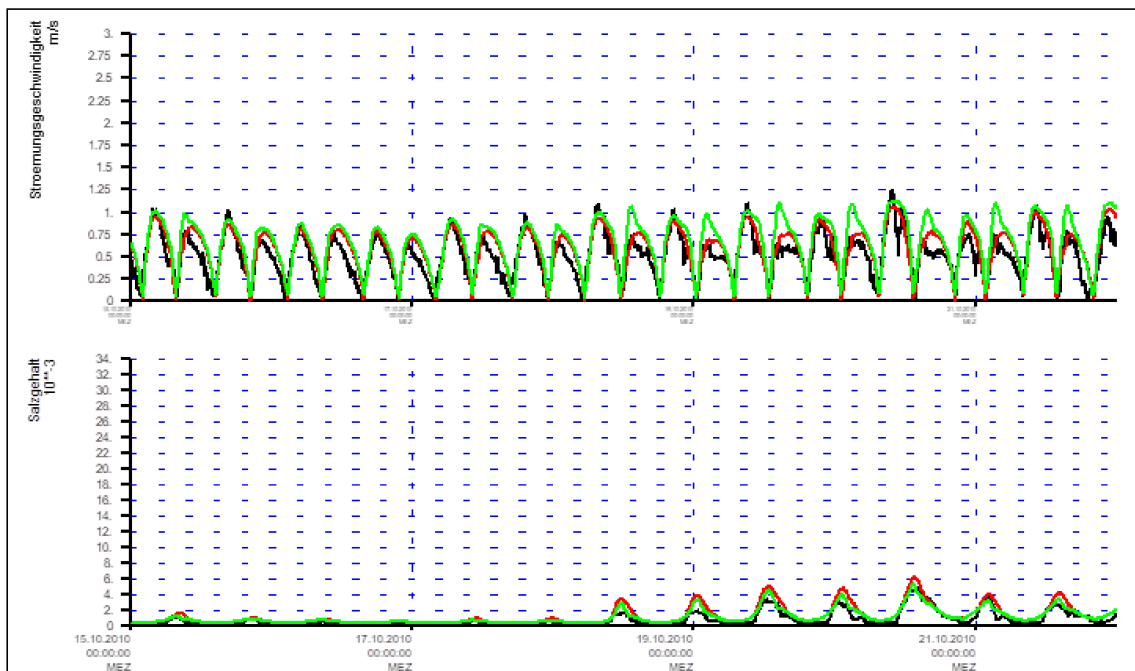


Bild 61: Station LZ1 Tonne; obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -6,5 bis -5,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot: -6,5 bis -5,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN)

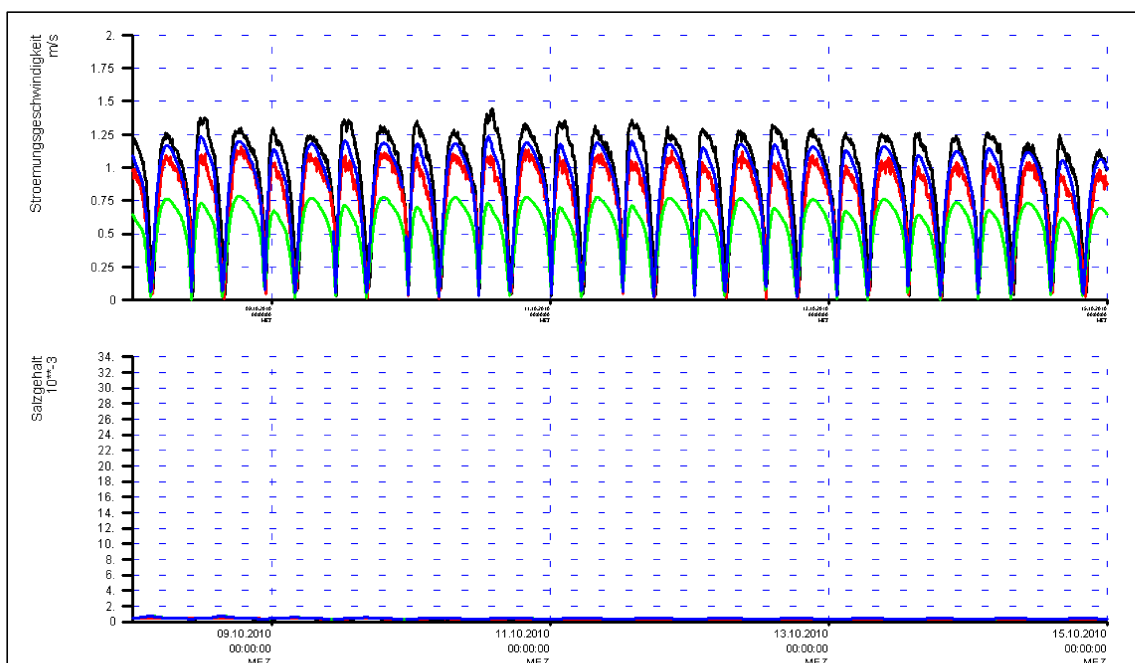


Bild 62: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D4 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -11,5 bis -10,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

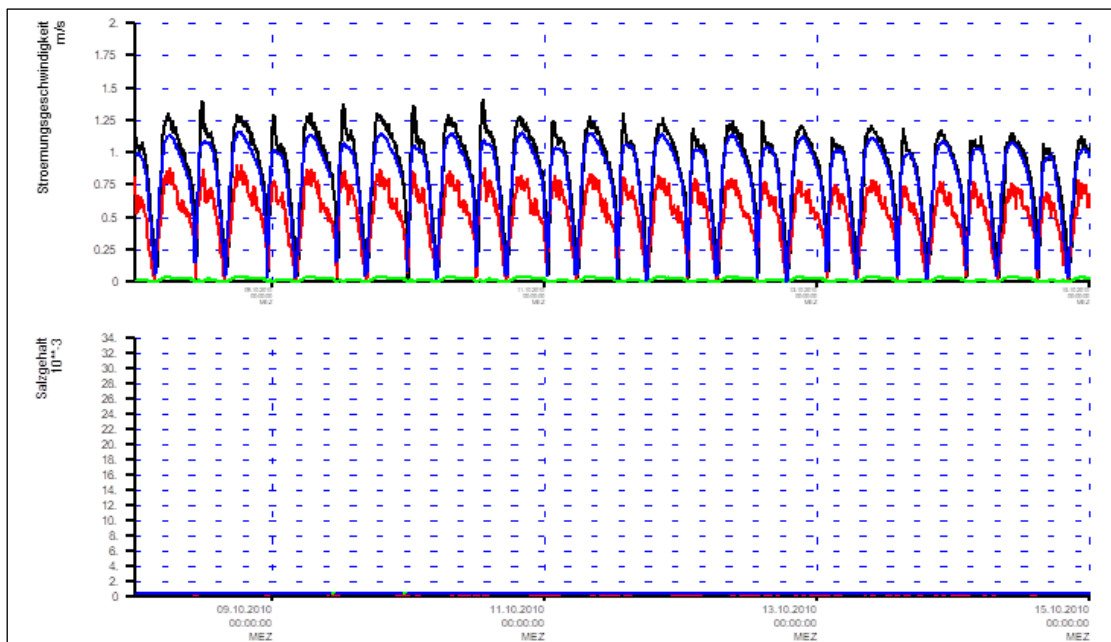


Bild 63: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D3 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D3 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -19,5 bis -18,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

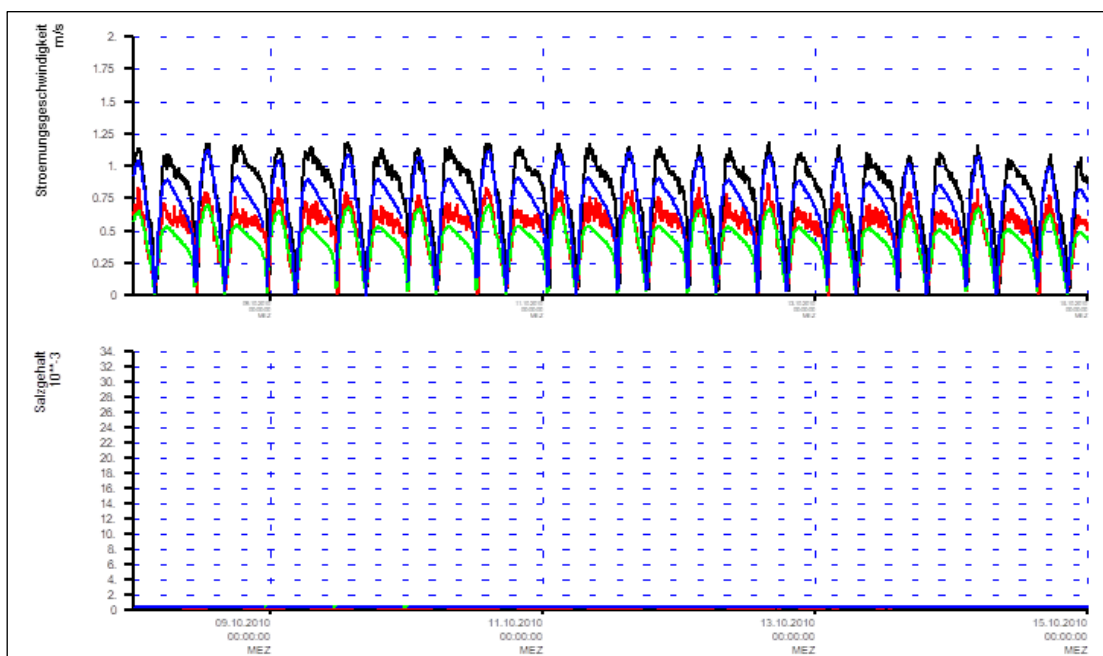


Bild 64: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D2 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D2 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -12,5 bis -11,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

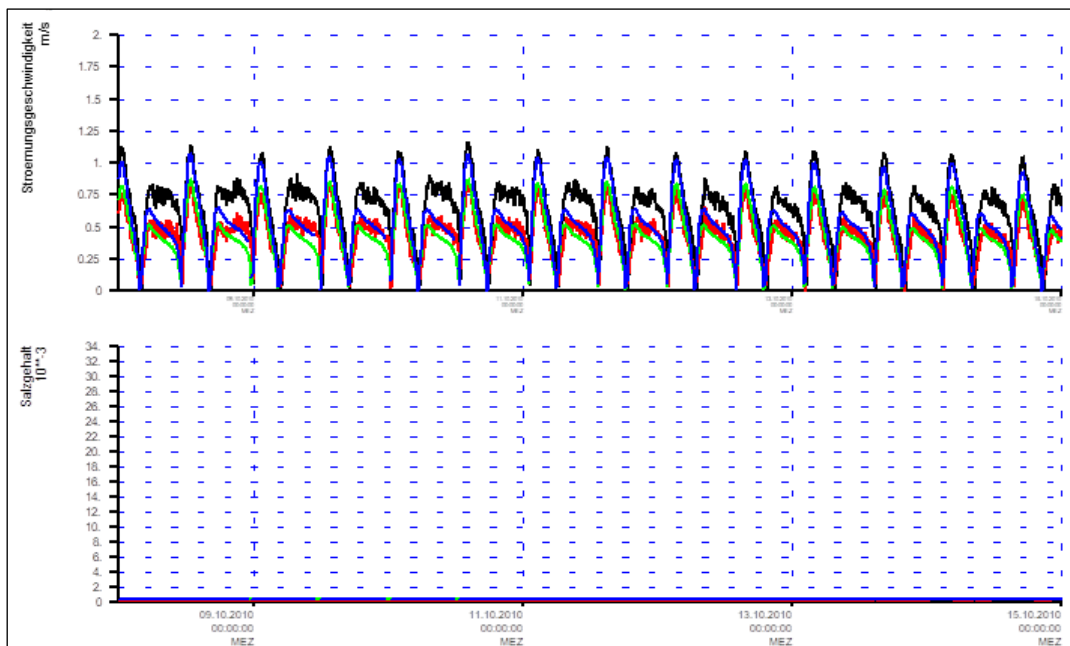


Bild 65: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der skalaren Strömungsgeschwindigkeit für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen des Salzgehaltes für die Messung D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche), D1 Sohle (in Rot: 1,1 m über Sohle) und die Simulation (in Grün: -9,5 bis -8,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

3.3 Validierung Sturmflutzeitraum

3.3.1 Verhältnisse von Wind und Oberwasserzuflüssen sowie Güte der Wasserstandsrandwerte im Sturmflutzeitraum

Zur Analyse der Güte des Deutsche-Bucht-Modells bei Sturmflutbedingungen wird die Sturmflut Carmen vom 12.11.2010 gewählt. Die gemessenen Sturmflutscheitelwasserstände erreichen in Emden 3,08 mNHN, in Bremen Oslebshausen 4,09 mNHN und in Hamburg St. Pauli 4,24 mNHN. Die Sturmflut wird gemäß der Definition des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in die erste von drei Klassen (1,5 bis 2,5 m über mittlerem Hochwasser (MHW)) eingeordnet. In Bild 66 und Bild 67 sind die Messungen der skalaren Windgeschwindigkeit und der Windrichtung an einigen Messstationen der Deutschen Bucht dargestellt. Der Wind weht mit bis zu Stärke 7 – 8 in Böen 11 aus südwestlichen Richtungen. Der Zeitraum liegt am Ende einer Hochwasserwelle in den Ästuaren, die Oberwasserhältnisse sind gemäßigt bis erhöht (s. Bild 2, magentafarbener Kasten).

In Bild 68 ist die Wasserstandsmessung am Pegel Terschelling (schwarz) den eingesteuerten Wasserstandsrandwerten aus dem übergeordneten Modell DCSMv6 FM (rot) für den Sturmflutzeitraum gegenüber gestellt. Die untere Bildhälfte zeigt die Differenz der Wasserstände zwischen Modell – Messung (grün). Bild 69 stellt analog die Verhältnisse für den Pegel Hvide Sande dar. Die Wasserstände werden an beiden Pegeln teilweise überschätzt (positive Differenzen, grüne Kurven in Bild 68 und Bild 69). Sturmflutscheitelwasserstände, Form, Variabilität der Wasserstände sowie der Tidehub werden gut wiedergegeben.

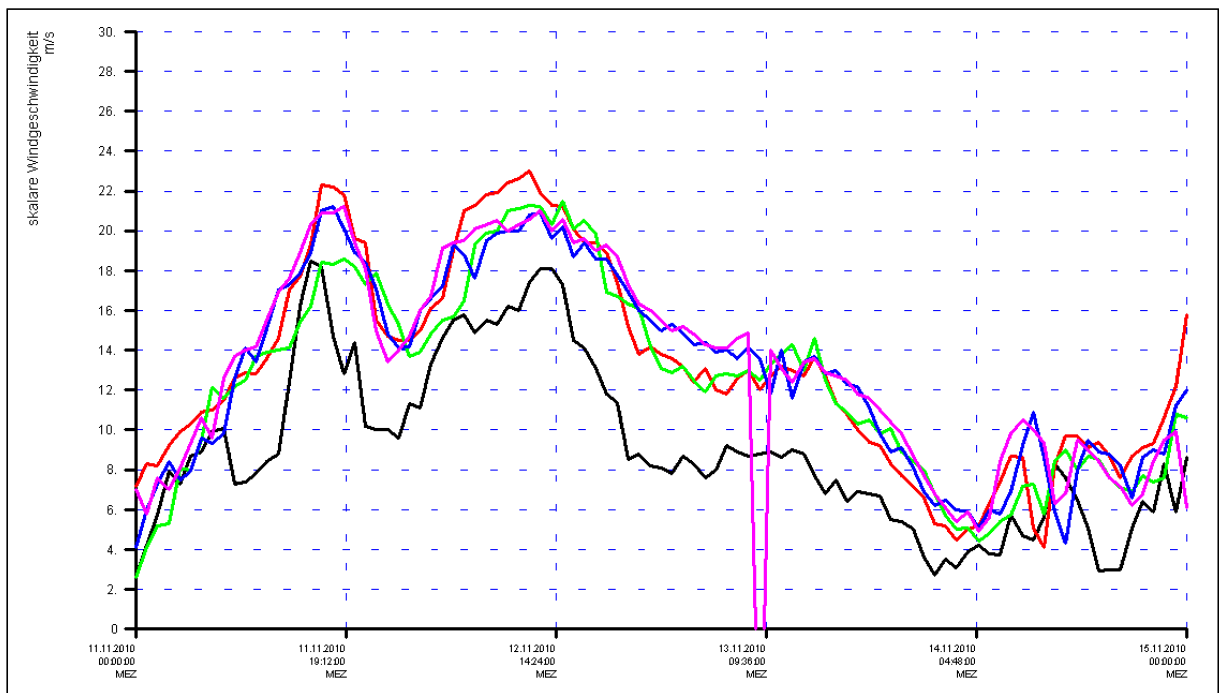


Bild 66: Messungen der skalaren Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Sturmflutzeitraum (Datenquelle DWD)

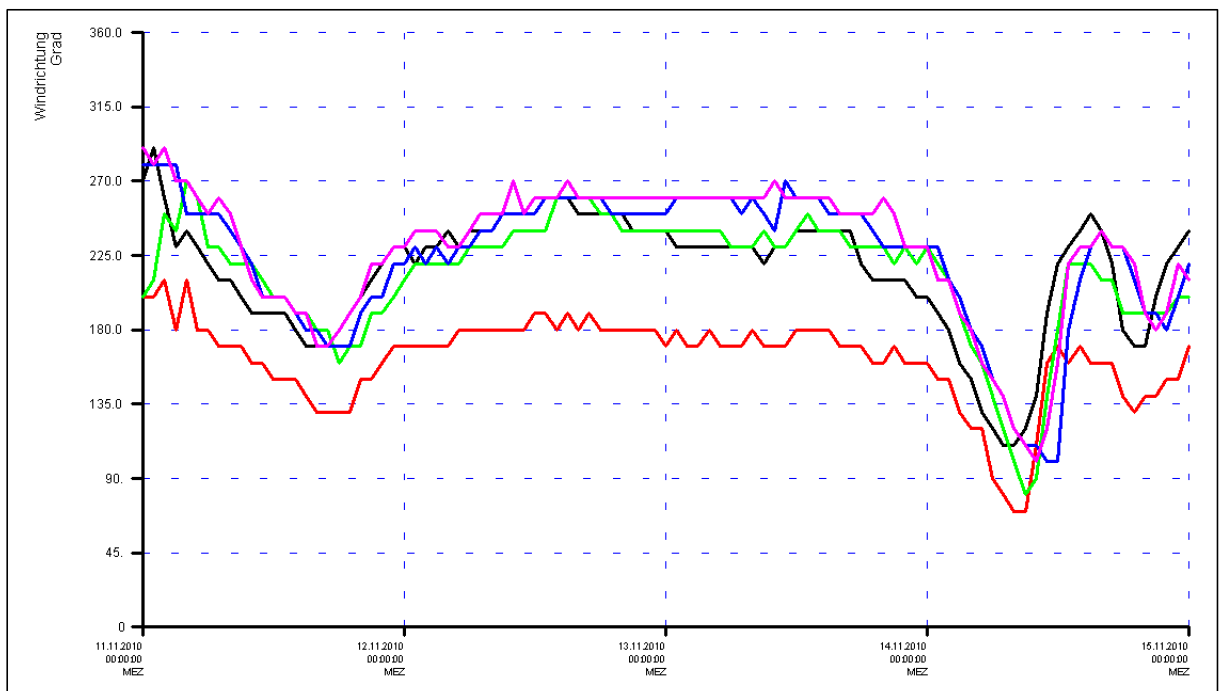


Bild 67: Messungen der Windrichtung in der Deutschen Bucht an den Stationen Borkum (in Schwarz), Leuchtturm Alte Weser (in Rot), Büsum (in Grün), Helgoland (in Blau) und Deutsche Bucht (in Magenta) für den Sturmflutzeitraum (Datenquelle DWD)

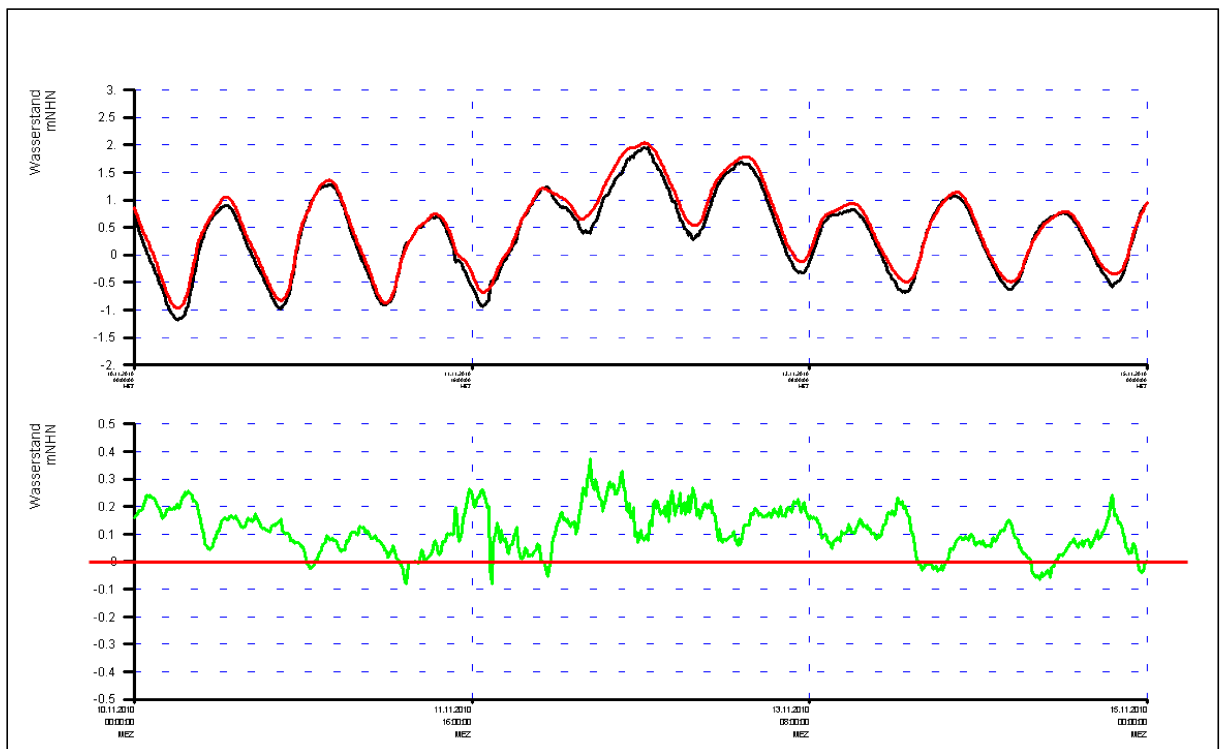


Bild 68: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Terschelling für den Sturmflutzeitraum ; untere Bildhälfte: Differenz der Wasserstände zwischen DCSMv6 FM – Messung (in Grün)

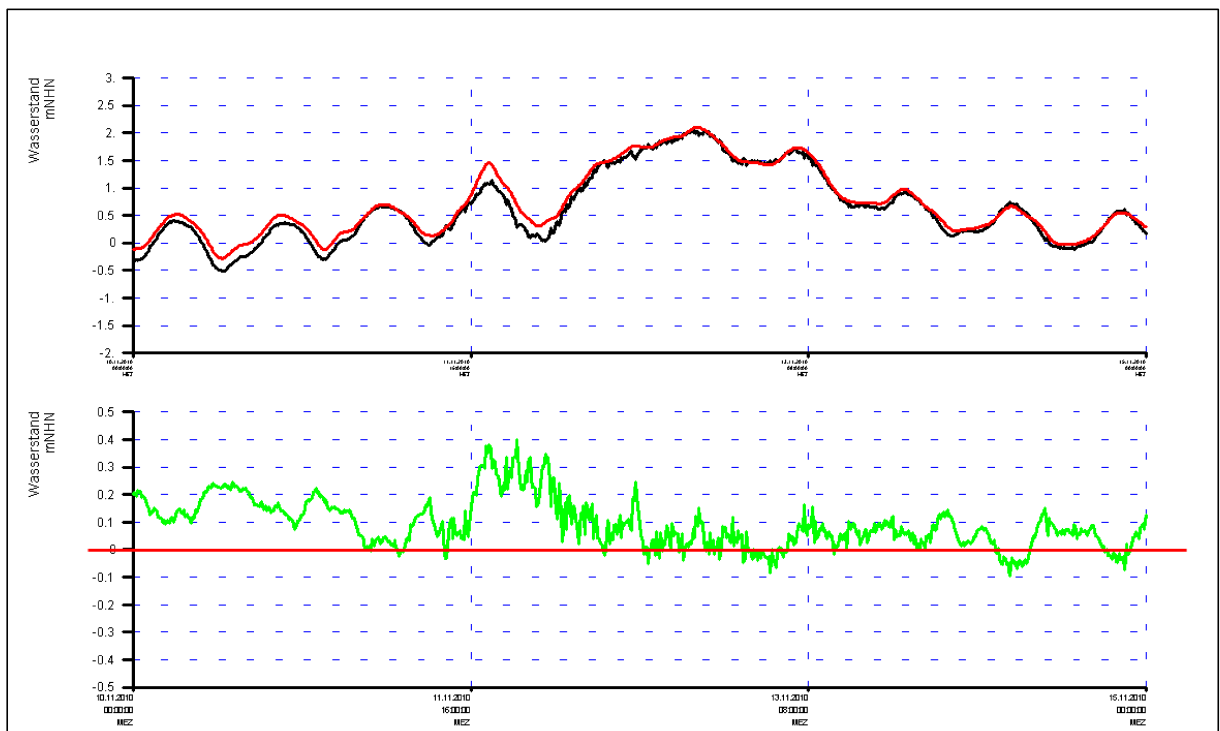


Bild 69: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wasserstände der Messung (in Schwarz) und der Randwerte aus DCSMv6 FM (in Rot) am Pegel Hvide Sande für den Sturmflutzeitraum; untere Bildhälfte: Differenz der Wasserstände zwischen DCSMv6 FM – Messung (in Grün)

3.3.2 Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für die Küstenpegel

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellsimulation für den Sturmflutzeitraum exemplarisch an einigen Pegeln der Deutschen Bucht dargestellt. Die Vergleiche erfolgen anhand einer Gegenüberstellung von Messung und Simulationsergebnis am jeweiligen Pegel. An den Pegeln Terschelling und Hvide Sande werden die Wasserstände der eingesteuerten Randwerte gegenüber der Messung etwas überschätzt, s. auch Bild 68 und Bild 69. Die Form und Variabilität der Wasserstandskurven werden an beiden Positionen gut wiedergegeben. Im weiteren Verlauf entlang der Küste zeigt das Deutsche-Bucht-Modell eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Das eingesteuerte Tidesignal vor und nach dem Sturmflutereignis wird im Modell gut weitergeleitet. Die Sturmflutscheitelwasserstände werden an den Küstenpegeln besser abgebildet als am seeseitigen Modellrand. Dieser Sachverhalt ist möglicherweise auf das eingesteuerte Windfeld zurückzuführen, welches während des Sturmflutereignisses geringere (Spitzen-)Windgeschwindigkeiten in der Deutschen Bucht aufweist als an den Pegeln Terschelling und Hvide Sande, wo die Sturmflutscheitelwasserstände vom Modell überschätzt werden.

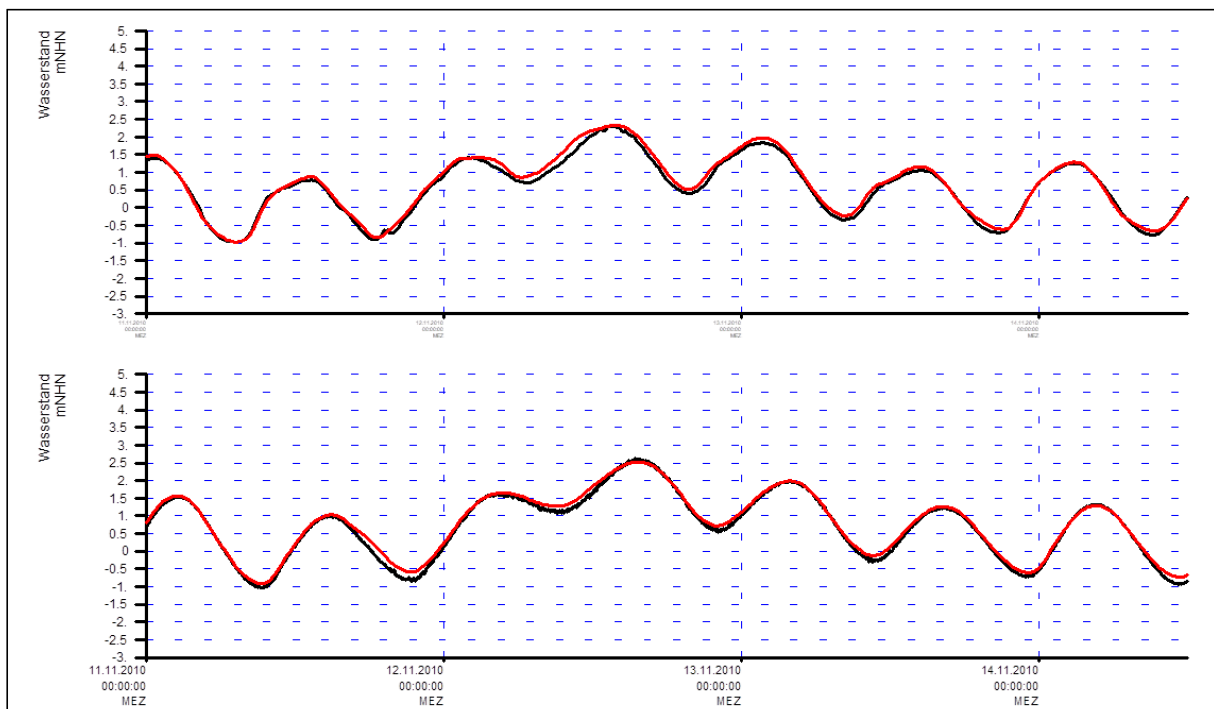


Bild 70: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Huibertgat, untere Bildhälfte: Pegel Helgoland Binnenhafen

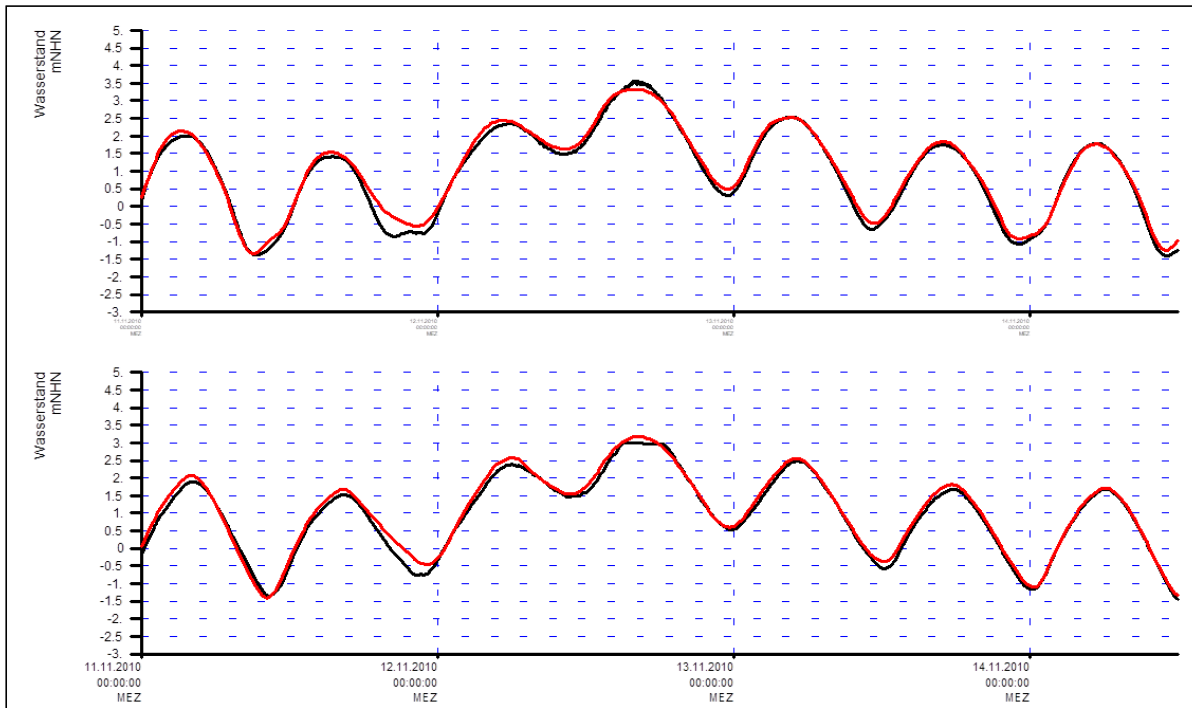


Bild 71: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot).
Obere Bildhälfte: Pegel Büsum, untere Bildhälfte: Pegel Pellworm

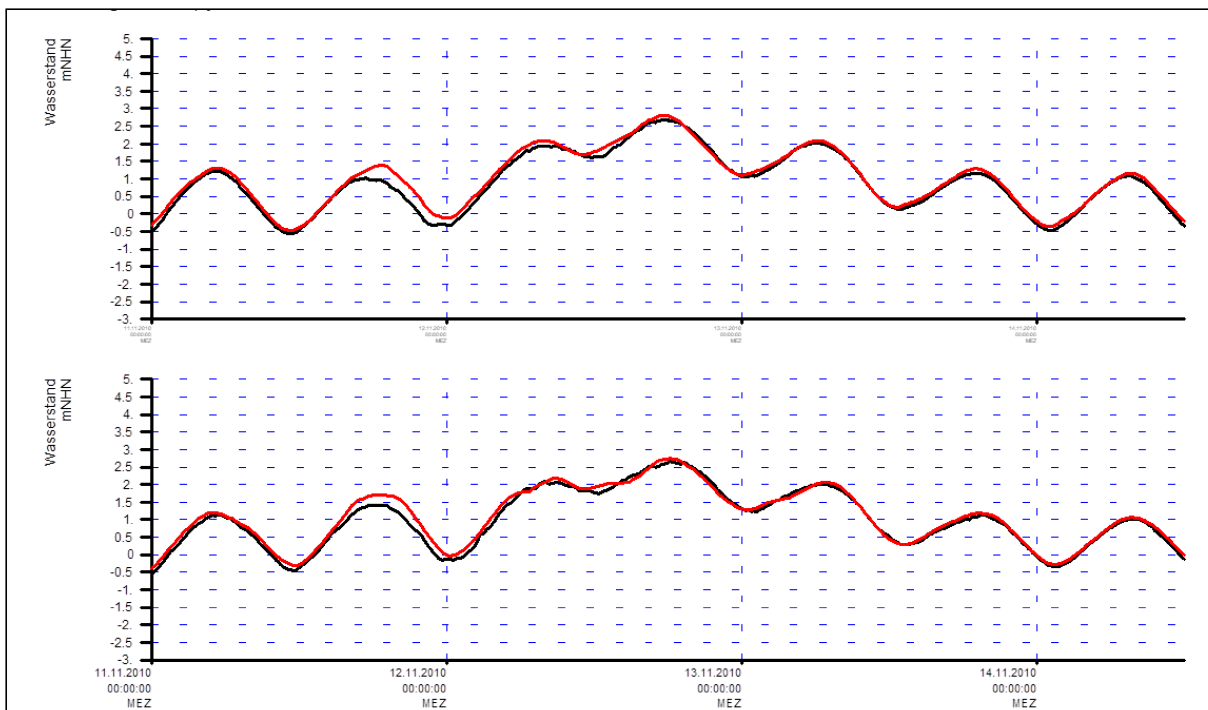


Bild 72: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot).
Obere Bildhälfte: Pegel List, untere Bildhälfte: Pegel Esbjerg

3.3.3 Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für die Ems

Bild 73 zeigt die Ergebnisse für die Außenems. Das Sturmflutsperrwerk Gandersum ist in Realität sowie im Modell geschlossen. Auf die Wasserstandskalibrierung bei geschlossenem Sperrwerk nahe und stromauf des Bauwerks musste aufgrund fehlender Personalressourcen verzichtet werden. In der Außenems werden die Sturmflutscheitelwasserstände und der Verlauf der Tiden im Vergleich mit den eingesteuerten Randwerten zufriedenstellend wiedergegeben.

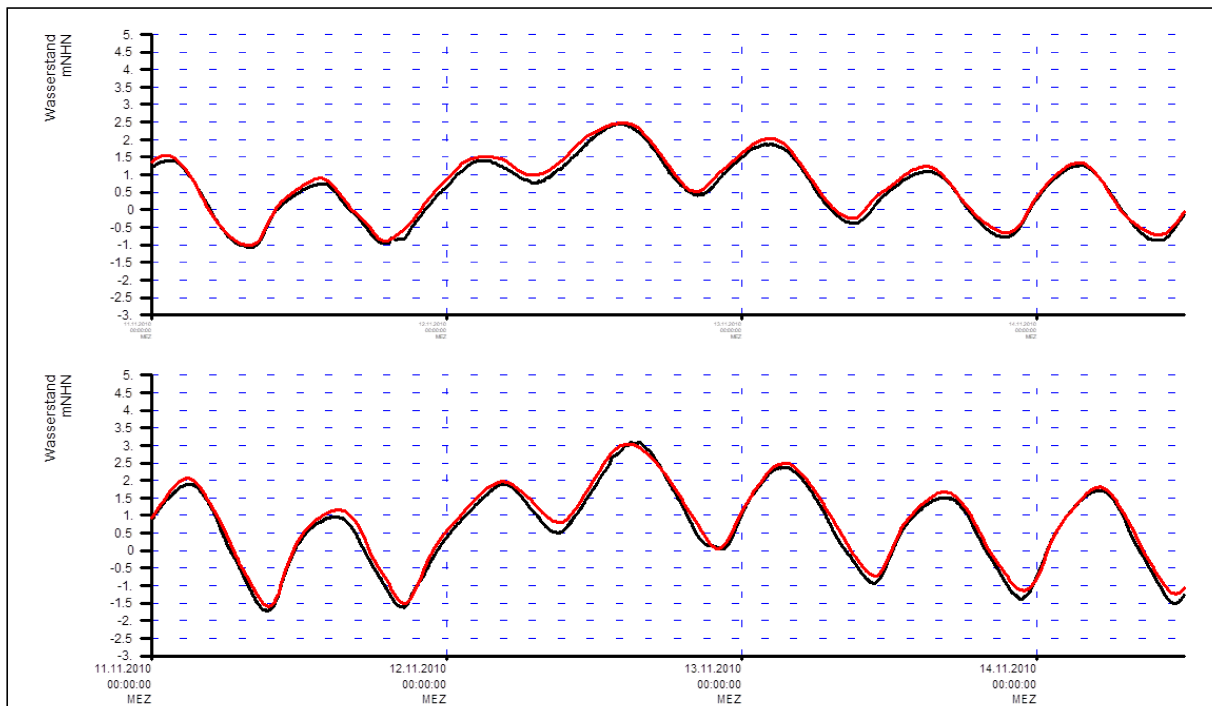


Bild 73: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Borkum Südstrand, untere Bildhälfte: Pegel Emden Neue Seeschleuse

3.3.4 Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für das Jade-Weser-Ästuar

Bild 74 und Bild 75 zeigen die Ergebnisse für vier Pegel im Jade-Weser-Ästuar. Die Sturmflutsperrwerke sind in Realität sowie im Modell geschlossen. In der Außenweser werden die Sturmflutscheitelwasserstände und der Verlauf der Tiden im Vergleich mit den eingesteuerten Randwerten zufriedenstellend wiedergegeben. In der Unterweser werden die Sturmflutscheitelwasserstände deutlich unterschätzt und der Ebbeast fällt flacher ab als in der Messung. Vor- und Nachtiden werden hingegen gut getroffen.

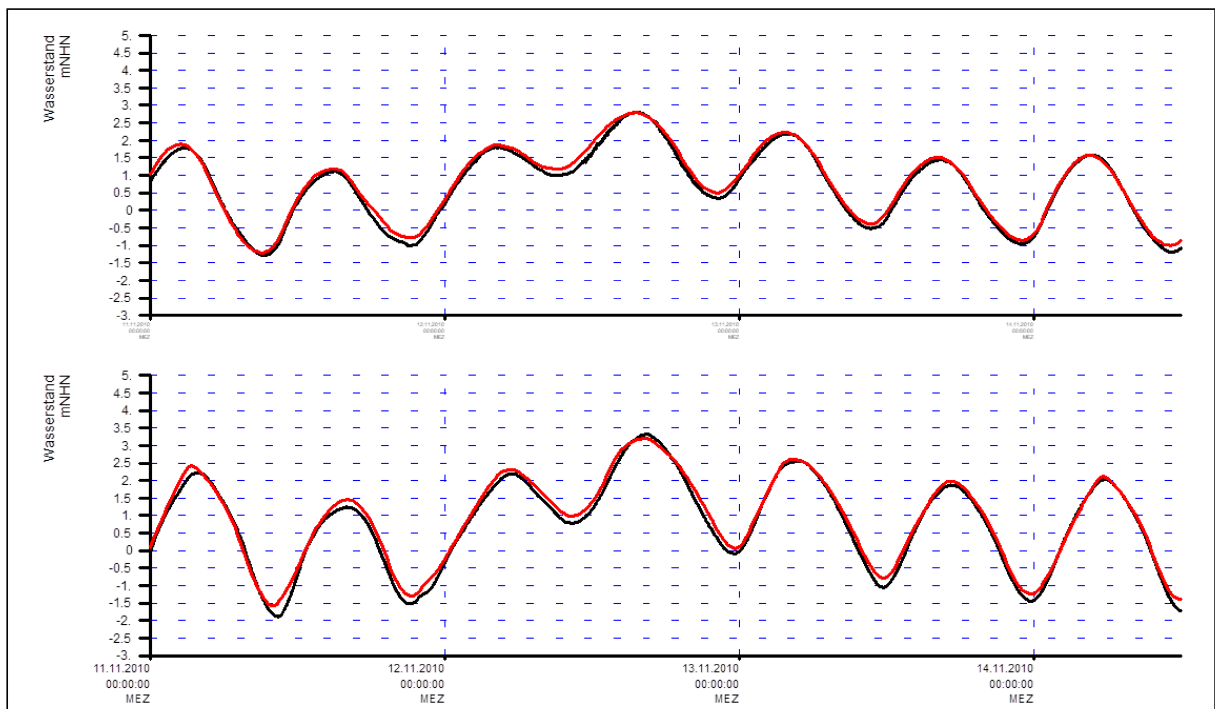


Bild 74: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Leuchtturm Alte Weser, untere Bildhälfte: Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm

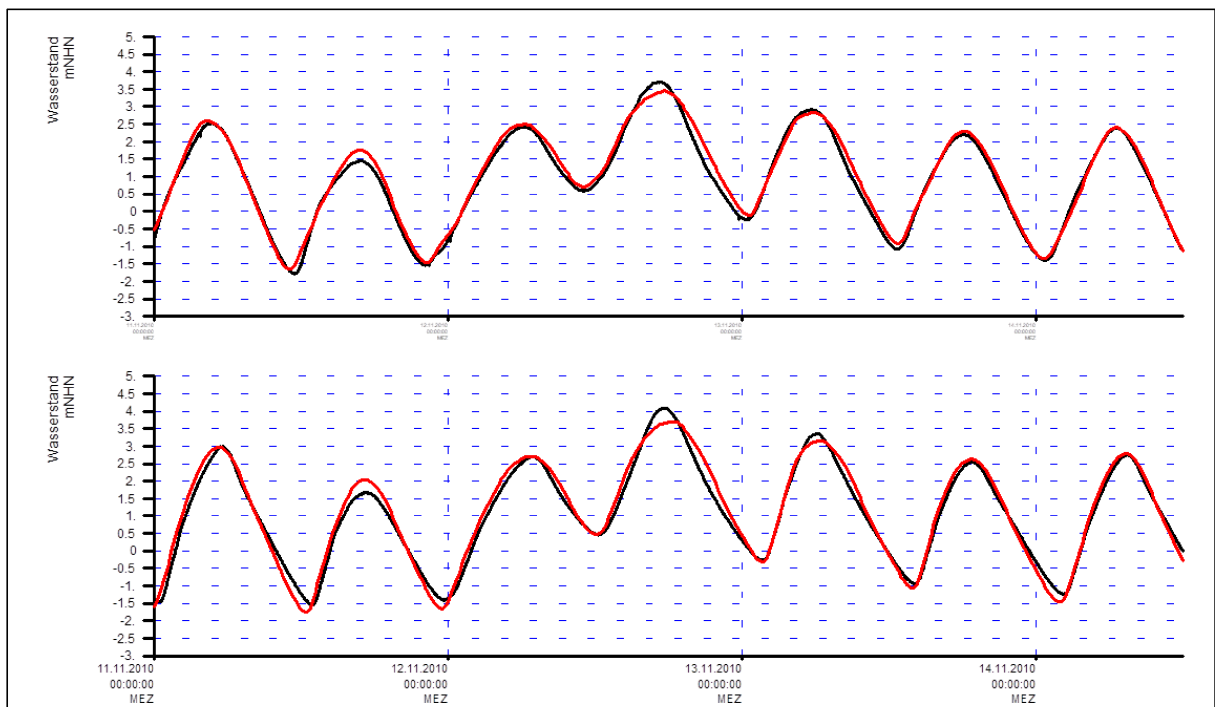


Bild 75: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Brake, untere Bildhälfte: Pegel Oslebshausen

3.3.5 Ergebnis der Validierung Sturmflutzeitraum für das Elbe Ästuar

Bild 76 und Bild 77 zeigen die Ergebnisse für vier Pegel im Elbe Ästuar. Die Sturmflutsperrwerke sind in Realität sowie im Modell geschlossen. Es zeigt sich, dass die Sturmflutscheitelwasserstände, Vor- und Nachtiden sowie der Wasserstandsverlauf im Vergleich zur Messung bzw. zu den eingesteuerten Randwerten zufriedenstellend wiedergegeben werden.

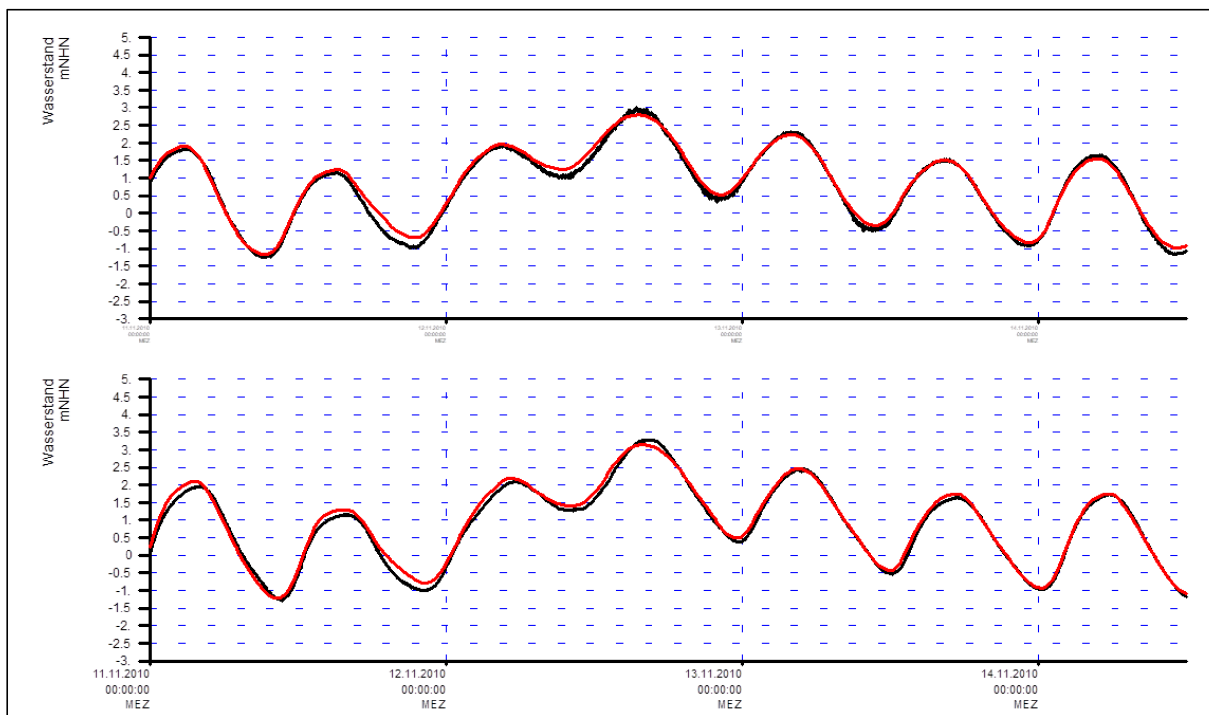


Bild 76: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Bake A, untere Bildhälfte: Pegel Cuxhaven

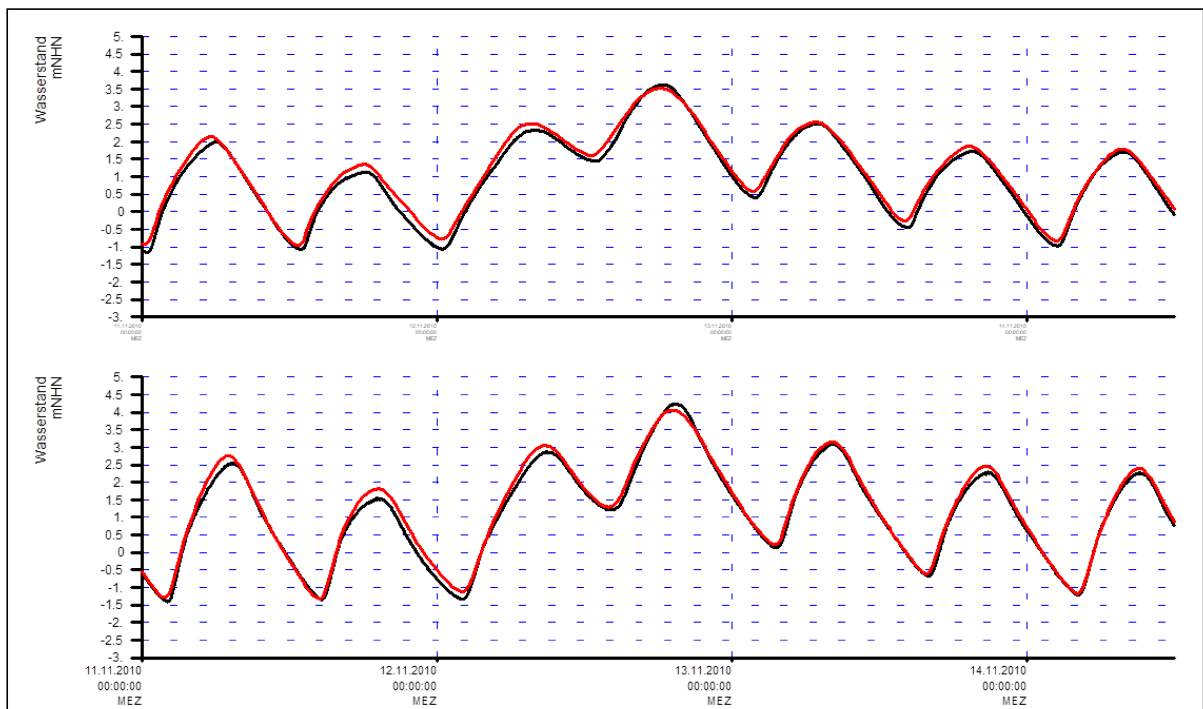


Bild 77: Zeitreihen der Wasserstände für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Obere Bildhälfte: Pegel Glückstadt, untere Bildhälfte: Pegel St. Pauli

3.4 Ergebnisse der Simulation der Wassertemperatur

3.4.1 Verhältnisse der Lufttemperatur im Simulationsjahr 2010

Der Wärmeaustausch Wasser - Atmosphäre wird in UnTRIM2009 mithilfe des Excess-Temperature-Ansatzes nach Sweers (1976) simuliert, welcher den Wärmefluss an der Wasseroberfläche in Abhängigkeit von der Hintergrundtemperatur (i. d. R. der Lufttemperatur) und der Windgeschwindigkeit berechnet. Als Eingangsgrößen für das Deutsche-Bucht-Modell werden die Lufttemperatur und Windgeschwindigkeiten aus dem COSMO-REA6 Datensatz verwendet. Bild 78 zeigt den Vergleich zwischen den Lufttemperaturrandwerten (COSMO-REA6; zeitliche Auflösung: 1h) und der DWD Messung (Tagesmittelwerte) exemplarisch an den Standorten Helgoland (oben) und Cuxhaven (unten). Die Messwerte (Werte und zeitlicher Verlauf) werden in Anbetracht der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung vom COSMO-REA6 Datensatz sehr gut wiedergegeben. Die Daten zeigen einen typischen Jahresgang mit den kleinsten Werten im Winter und den höchsten Werten im Juli/August. Als Randwerte der Wassertemperatur für das Deutsche-Bucht-Modell wird die Messung Helgoland Reede (tiefengemittelt, Tagesmittelwerte) verwendet (Wiltshire et al. 2008), s. Bild 79, Mitte.

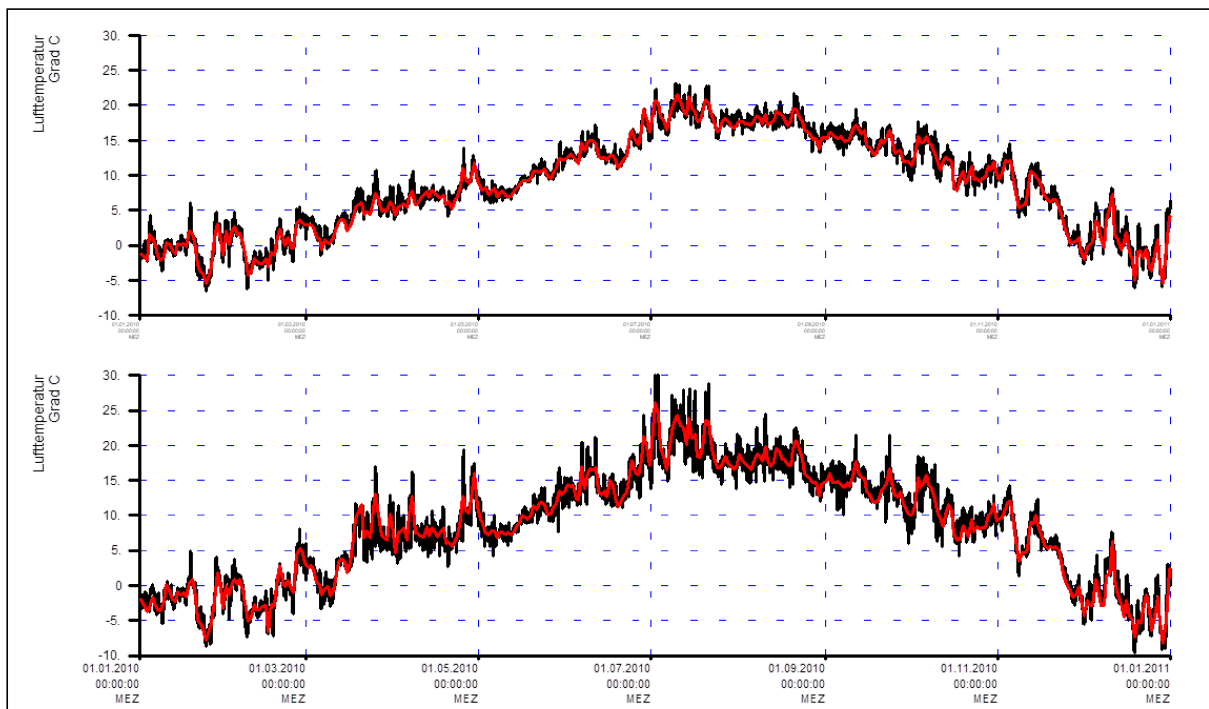


Bild 78: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Lufttemperatur bei Helgoland für die Daten aus COSMO-REA6 (in Schwarz: 2,0 m Höhe über Grund) und die Messung (in Rot: 4,0 mNHN); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Lufttemperatur bei Cuxhaven aus COSMO-REA6 (in Schwarz: 2,0 m Höhe über Grund) und für die Messung (in Rot: 4,0 mNHN)

3.4.2 Ergebnis der Simulation der Wassertemperatur für die Küstenpegel

Bild 79 und Bild 80 zeigen die berechneten Wassertemperaturen an vier Stationen in der Deutschen Bucht (jeweils oberste und unterste Schicht) im Vergleich zu den Messwerten (schwarz) sowie der Lufttemperatur bei Helgoland. Die Messungen der Wassertemperaturen zeigen einen typischen Jahresgang mit einem Minimum im März 2010 und einem Maximum Ende August 2010 und folgen in etwa dem Jahresgang der Lufttemperatur. Das Deutsche-Bucht-Modell kann die Wassertemperaturen im Frühjahr in Werten und Verlauf gut reproduzieren. Mit Anstieg der Lufttemperatur im April/Mai fallen die berechneten Wassertemperaturen verglichen mit den Messwerten allerdings zu niedrig aus. Das Maximum der gemessenen Wassertemperatur wird vom Modell nicht und zu spät (im September) erreicht. Der Rückgang der Temperaturen im Herbst wird vom Modell hinreichend gut wiedergegeben, wobei die Werte etwas weniger stark absinken als in der Messung. Die Schichtung der Wassertemperatur, die in der Messung an den Stationen Deutsche Bucht, Nordseeboje III und FINO1 erkennbar ist, wird grundsätzlich auch vom Modell berechnet. Die Zeitpunkte der Bildung und Auflösung der Schichtung werden im Vergleich zur Messung ebenfalls gut getroffen. Allerdings werden die absoluten Werte und der Temperaturgradient innerhalb der Schichtung vom Modell unterschätzt.

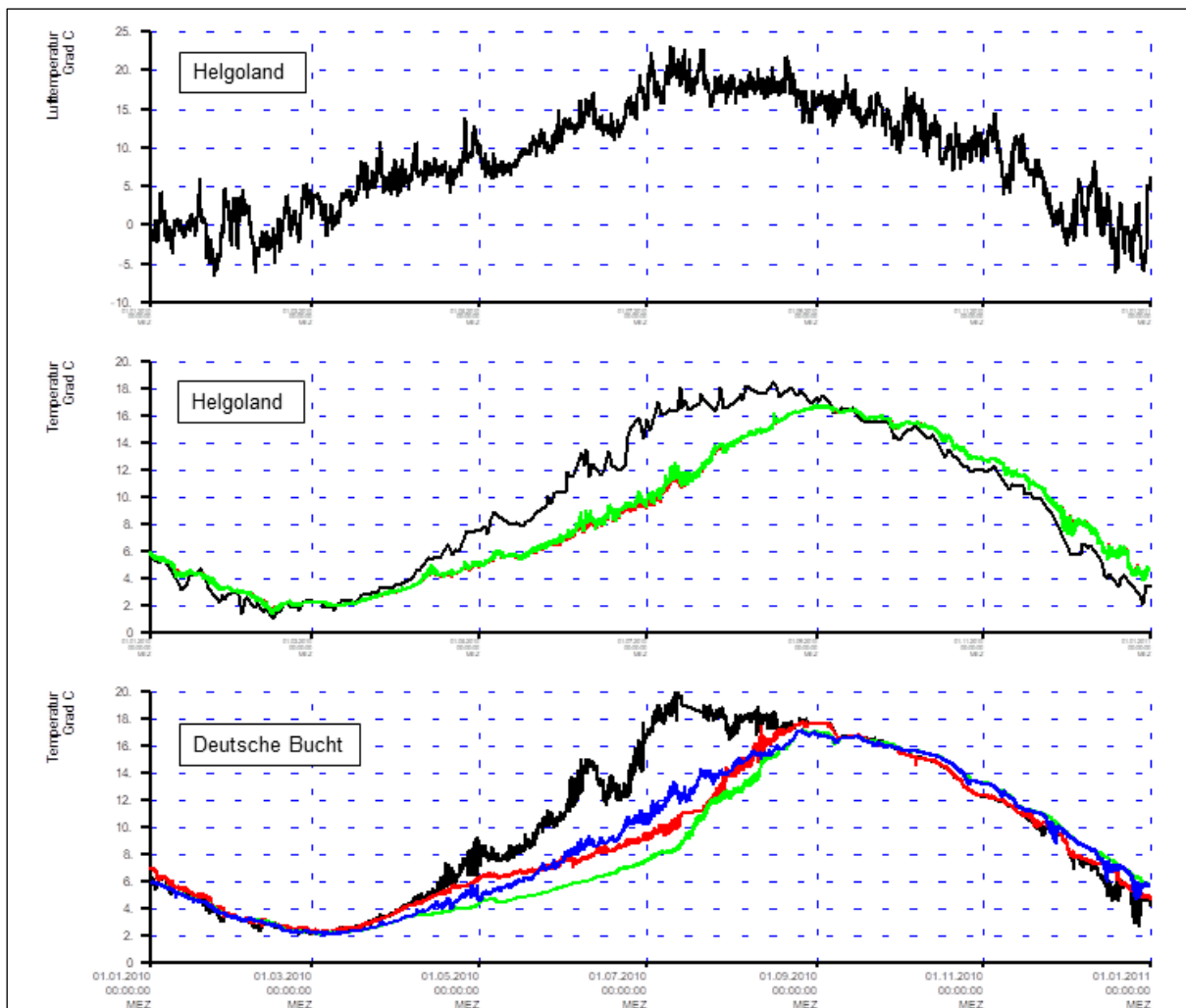


Bild 79: Oben: Lufttemperatur aus COSMO-REA6 bei Helgoland; Mitte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung Helgoland Reede (tiefengemittelt, in Schwarz) und die Simulation (in Rot: -4,5 bis -3,5 mNHN; in Grün: -1,5 bis -0,5 mNHN); unten: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung Deutsche Bucht (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -30,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -39,5 bis -38,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

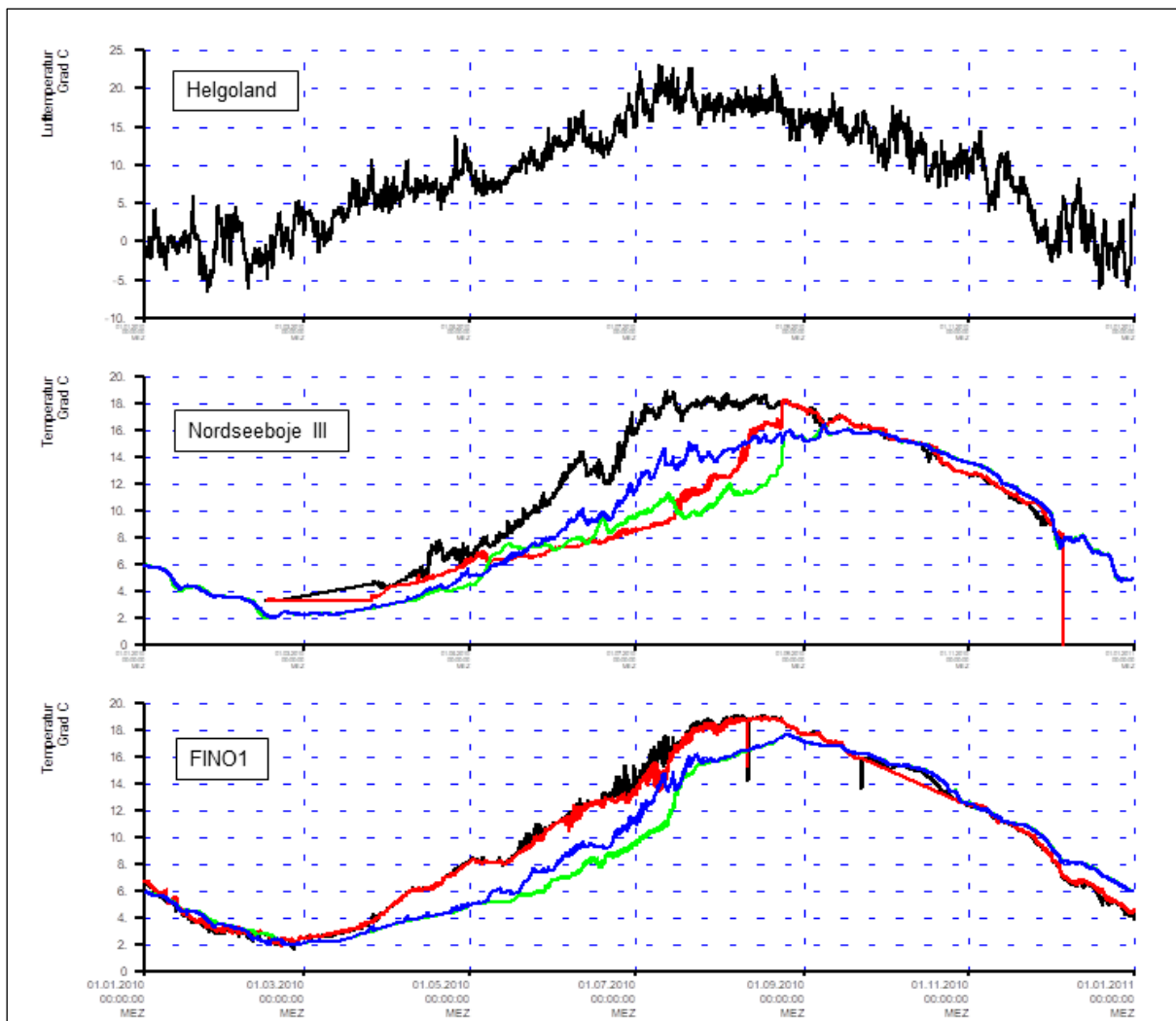


Bild 80: Oben: Lufttemperatur aus COSMO-REA6 bei Helgoland; Mitte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung Nordseeboje III (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -35,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -40,5 bis -39,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN); unten: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung FINO1 (in Schwarz: -6,0 mNHN; in Rot: -25,0 mNHN) und die Simulation (in Grün: -31,5 bis -30,5 mNHN; in Blau: -1,5 bis -0,5 mNHN)

3.4.3 Ergebnis der Simulation der Wassertemperatur für die Ästuarie Jade-Weser und Elbe

Bild 81 bis Bild 84 zeigen die Wassertemperaturen an jeweils vier Stationen in den Ästuaren Jade-Weser und Elbe für die Messung (in Schwarz) und die Simulation (in Rot). Aufgrund starker Durchmischung (d. h. fehlender Schichtung) und aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Simulationsergebnisse tiefengemittelt dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse für das Ems Ästuar entfällt wegen fehlender Langzeitdaten.

Die Simulationsergebnisse zeigen den typischen Jahresgang mit einem Minimum im März 2010 und einem Maximum ungefähr im August 2010. Zu Simulationsbeginn liegen die berechneten Werte durch die räumlich konstante Wassertemperatur-Initialisierung im Deutsche-Bucht-Modell zu hoch. Nach dem Einschwingen der Wassertemperatur kann das Modell die Messwerte

im Frühjahr in Werten und Verlauf dann gut reproduzieren. Der Anstieg der Wassertemperatur ab April/Mai wird verglichen mit den Messwerten allerdings unterschätzt. Der Rückgang der Wassertemperaturen im Herbst wird vom Modell gut wiedergegeben, wobei die Werte in den Mündungsbereichen etwas weniger stark absinken als in der Messung. Es lässt sich festhalten, dass das Modell in den Ästuaren geringere Abweichungen erzielt als an den Küstenpegeln (s. Kap. 3.4.2), wobei die Güte der Simulation Richtung stromauf steigt. Dies gilt insbesondere für die Elbe.

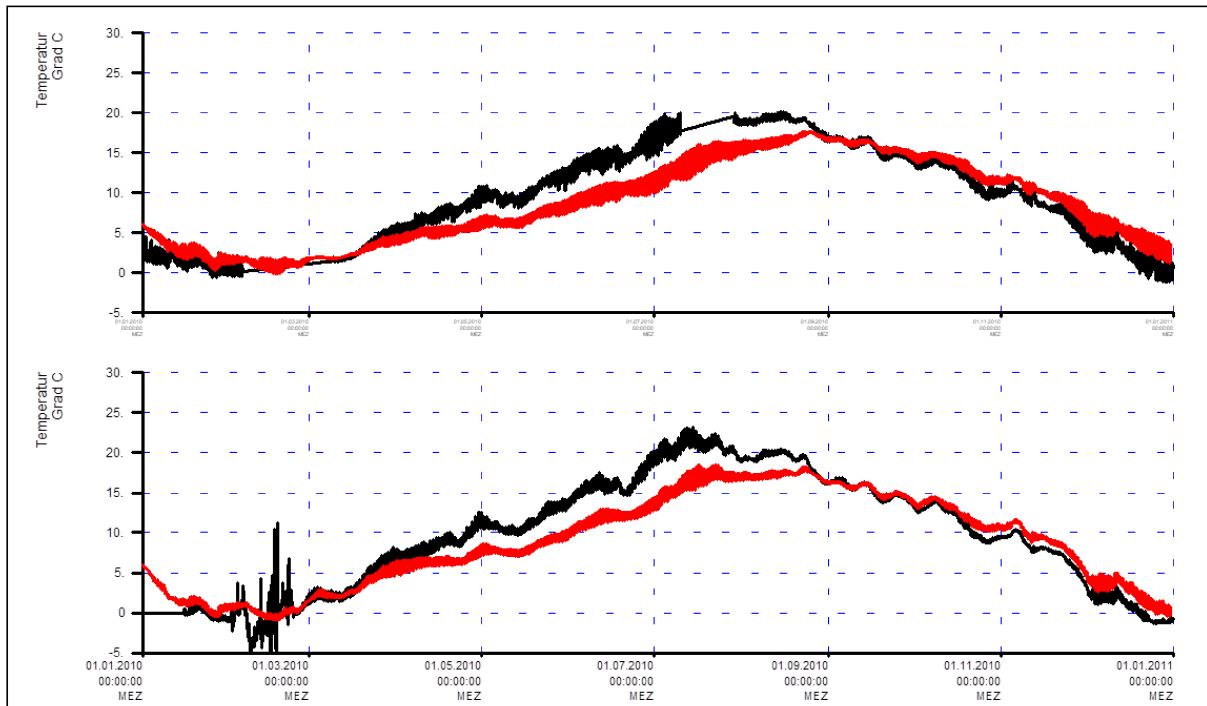


Bild 81: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Leuchtturm Alte Weser (in Schwarz: -2,6 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Dwarsgat (in Schwarz: -2,7 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt)

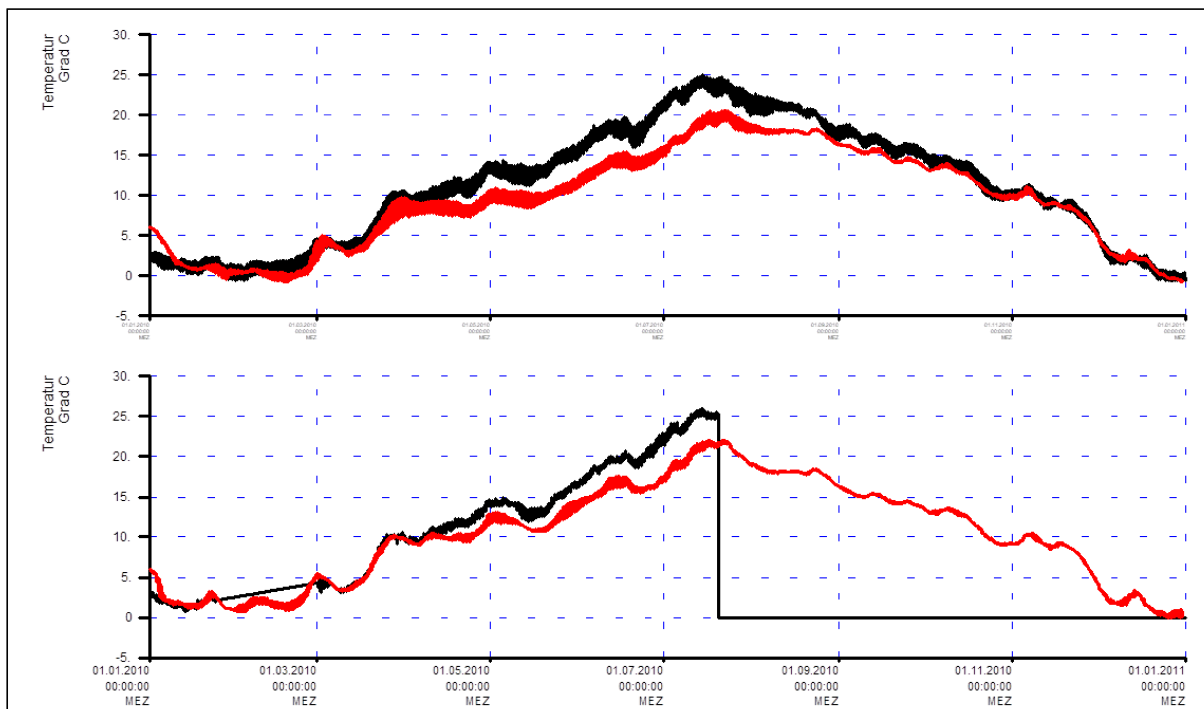


Bild 82: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Bremerhaven AL (in Schwarz: -2,9 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei Brake (in Schwarz: -2,8 mNHN) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt)

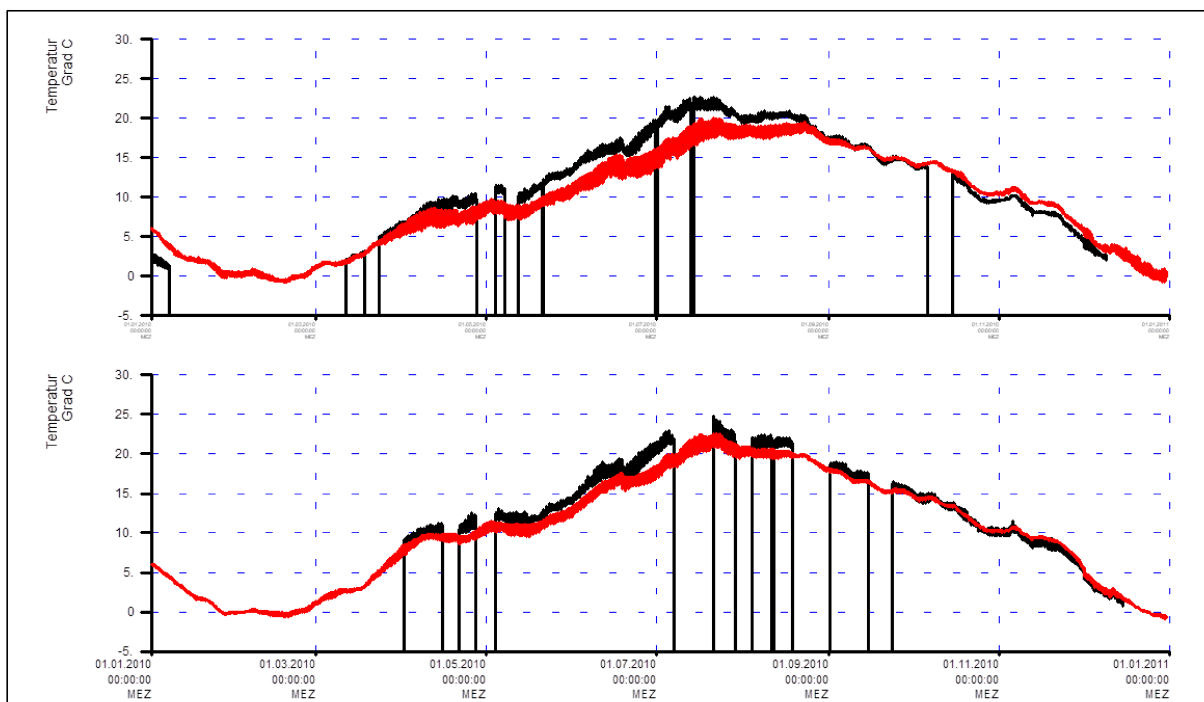


Bild 83: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei LZ4a (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei LZ3 (in Schwarz: 2,5 m über Sohle) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt)

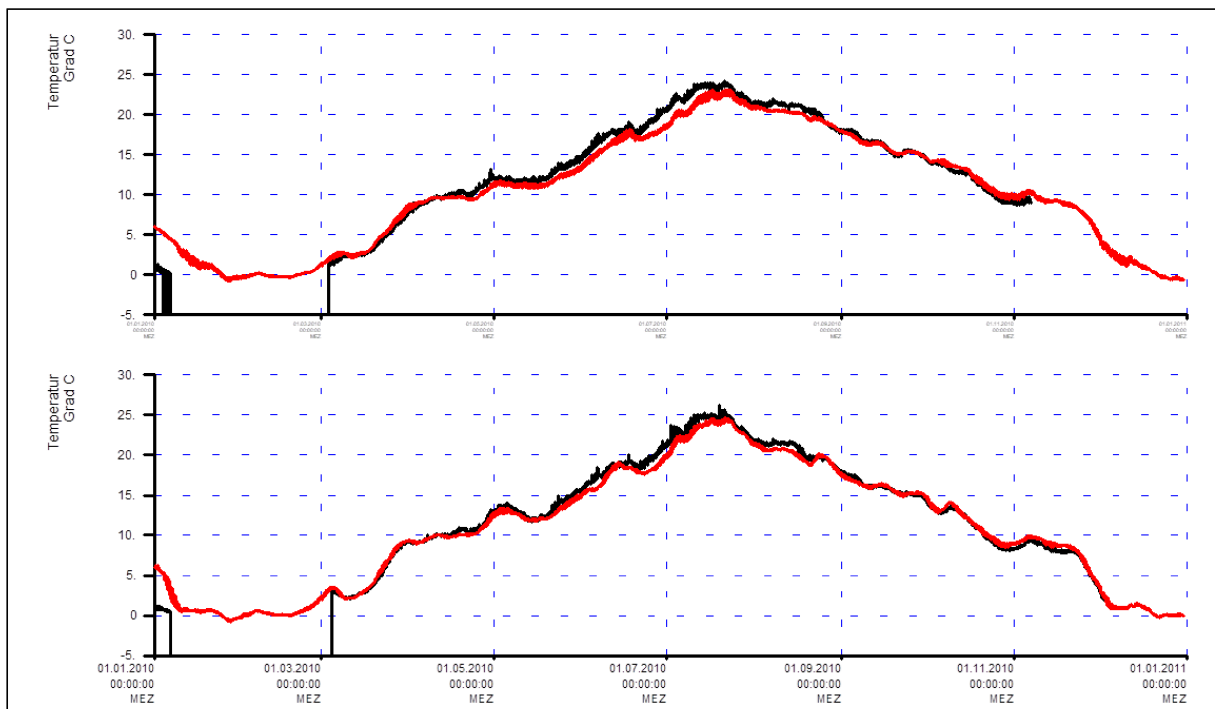


Bild 84: Obere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei D4 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt); untere Bildhälfte: Zeitreihen der Wassertemperatur für die Messung bei D1 Oberfläche (in Schwarz: 0,8 m unter Wasseroberfläche) und die Simulation (in Rot, tiefengemittelt)

3.5 Statistische Auswertung der Simulation des Jahres 2010

In den Kapiteln 3.1 – 3.3 wird die Güte der Modellkalibrierung des Deutsche-Bucht-Modells für zwei Spring-Nipp-Zeiträume und einen Sturmflutzeitraum dargestellt. In diesem Kapitel wird zusätzlich eine statistische Analyse der Tidekennwerte des Wasserstands für das simulierte Jahr 2010 durchgeführt. Zur Einordnung der Ergebnisse des kalibrierten Deutsche-Bucht-Modells werden die daraus ermittelten Kennzahlen mit Kennzahlen der Simulation des übergeordneten Modells DCsMv6 FM sowie Angaben aus der Literatur (Zijl et al. 2013) für einige Küstenpegel verglichen. Die Auswahl der Küstenpegel erfolgt dabei anhand vorhandener Messreihen und vorhandener Vergleichsdaten aus DCsMv6 FM sowie der Literatur.

Die Analyse der Tidekennwerte des Wasserstands wird für den Zeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 mithilfe des BAW-Postprocessing-Verfahrens NCANALYSE durchgeführt. Die Differenzen der Tidekennwerte für mThb, mThw, mTmw und mTnw sowie die statistischen Kennzahlen werden mit NCDELTA und TAYLORDIAGRAM ermittelt.

Die Ergebnisse der Analyse sind in Tabelle 1 – Tabelle 4 für einige Küstenpegel dargestellt für folgende statistische Kennzahlen:

- Bias: die Differenz zwischen dem Tidekennwert der Simulation des Deutsche-Bucht-Modell (SIM) und der Messung bzw. die Differenz zwischen dem Tidekennwert der Simulation mit DCsMv6 FM und der Messung.
- RSME (root-mean-square-error, Wurzel der mittleren Fehlerquadrate) als Maß für die Abweichung von Modellwerten zu Messwerten mit: r_i = Messwert, f_i = Modellwert:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (r_i - f_i)^2}{N}}$$

- Korrelation mit: r_i = Messwert, f_i = Modellwert:

$$\frac{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r}) \times (f_i - \bar{f})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2}}$$

Tabelle 1 bis Tabelle 4 zeigen, dass das Deutsche-Bucht-Modell die Messungen hinsichtlich der Tidekennwerte des Wasserstands zufriedenstellend wiedergibt. Dabei variieren die Kennzahlen in Abhängigkeit vom betrachteten Pegel. Die Korrelationen liegen bei 0,96 – 0,98. Es zeigt sich, dass die Güte des Deutsche-Bucht-Modells gegenüber den Messungen vergleichbar ist mit der Güte des übergeordneten Modells DCsMv6 FM, welches die Wasserstandsrandwerte für das Deutsche-Bucht-Modell bereitstellt. Zijl et al. (2013) berechneten den RSME für den Vergleich DCsMv6 – Messung für das Jahr 2007 und einige Tidekennwerte des Wasserstands entlang der Deutschen Bucht. Der RSME (mThw) liegt je nach Pegel zwischen 6,8 cm – 28,8 cm, der RSME (mTnw) liegt zwischen 7,4 cm – 18,5 cm. Die Ergebnisse für das Deutsche-Bucht-Modell liegen hier ebenfalls in der gleichen Größenordnung.

Tabelle 1: Statistische Kennzahlen für den Tidehub gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung

Pegel	mThb [m]			Bias zur Messung [m]		RSME (mThb) [m]		Korrelation (mThb)	
	SIM	DCSMv6 FM	Messung	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM
Terschelling	1,93	1,93	1,96	-0,04	-0,03	0,06	0,06	0,987	0,987
Borkum FB	2,34	2,27	2,41	-0,07	-0,15	0,11	0,17	0,966	0,958
Lt Alte Weser	2,71	2,74	2,88	-0,17	-0,14	0,20	0,18	0,963	0,948
Büsum	3,06	3,20	3,20	-0,14	-0,01	0,18	0,11	0,952	0,958
Hörnum	2,04	2,06	2,08	0,03	-0,02	0,07	0,10	0,960	0,931
Helgoland B.	2,18	2,23	2,41	-0,23	-0,18	0,24	0,20	0,963	0,952

Tabelle 2: Statistische Kennzahlen für das Tidehochwasser gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung

Pegel	mThw [mNHN]			Bias zur Messung [m]		RSME (mThw) [m]		Korrelation (mThw)	
	SIM	DCSMv6 FM	Messung	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM
Terschelling	0,93	0,93	0,87	0,05	0,05	0,08	0,08	0,984	0,985
Borkum FB	1,18	1,13	1,13	0,05	0,00	0,07	0,06	0,985	0,984
Lt Alte Weser	1,40	1,38	1,37	0,02	0,00	0,07	0,07	0,986	0,980
Büsum	1,60	1,65	1,58	0,02	0,07	0,08	0,10	0,983	0,981
Hörnum	1,00	0,97	0,97	0,04	0,00	0,06	0,06	0,988	0,988
Helgoland B.	1,11	1,11	1,13	-0,02	-0,03	0,06	0,07	0,984	0,980

Tabelle 3: Statistische Kennzahlen für das Tidemittelwasser gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung

Pegel	mTmw [mNHN]			Bias zur Messung [m]		RSME (mTmw) [m]		Korrelation (mTmw)	
	SIM	DCSMv6 FM	Messung	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM
Terschelling	0,05	0,04	-0,02	0,07	0,06	0,08	0,08	0,979	0,981
Borkum FB	0,05	0,05	0,01	0,04	0,05	0,06	0,06	0,998	0,988
Lt Alte Weser	0,07	0,05	-0,01	0,08	0,06	0,09	0,07	0,989	0,989
Büsum	0,12	0,05	0,03	0,08	0,02	0,11	0,07	0,977	0,980
Hörnum	0,10	0,05	0,03	0,07	0,02	0,08	0,05	0,992	0,991
Helgoland B.	0,05	0,04	-0,02	0,07	0,07	0,08	0,08	0,989	0,988

Tabelle 4: Statistische Kennzahlen für das Tideniedrigwasser gemittelt über den Analysezeitraum 07.01.2010, 16:00 – 27.12.2010, 11:00 für das Deutsche-Bucht-Modell (SIM), für DCSMv6 FM sowie die Messung

Pegel	mTnw [mNHN]			Bias zur Messung [m]		RSME (mTnw) [m]		Korrelation (mTnw)	
	SIM	DCSMv6 FM	Messung	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM	SIM	DCSMv6 FM
Terschelling	-1,00	-1,00	-1,09	0,09	0,09	0,11	0,10	0,978	0,979
Borkum FB	-1,16	-1,14	-1,28	0,12	0,15	0,14	0,16	0,934	0,980
Lt Alte Weser	-1,30	-1,36	-1,50	0,20	0,14	0,21	0,16	0,930	0,977
Büsum	-1,47	-1,55	-1,62	0,15	0,08	0,18	0,11	0,973	0,978
Hörnum	-1,04	-1,09	-1,11	0,07	0,02	0,09	0,09	0,988	0,981
Helgoland B.	-1,06	-1,12	-1,27	0,20	0,15	0,22	0,17	0,980	0,980

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses FuE-Projekts ist ein hochaufgelöstes, dreidimensionales hydrodynamisch-numerisches (HN-) Modell (UnTRIM2009) der Deutschen Bucht inklusive der Ästuarare Ems, Jade-Weser und Elbe aufgebaut und für die Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte kalibriert und validiert worden. Zudem wurde die Güte der Berechnung der Wassertemperatur untersucht. Die Elementgrößen des numerischen Rechengitters variieren je nach Region mit Verfeinerungen in Richtung Küste sowie in Gebieten von besonderem Interesse, um die physikalischen Prozesse möglichst genau abzubilden. Der gewählte seeseitige Modellrand ermöglicht eine verlässliche Randwerteüberprüfung mit Messungen und liegt weit genug von der Küste entfernt, so dass die dortigen Verhältnisse von den Verhältnissen in den Ästuaren unbeeinflusst sind. Sensitivitätsuntersuchungen ergeben, dass die Güte der Ergebnisse im Deutsche-Bucht-Modell gegenüber Messungen maßgeblich durch die Wahl des Advektionsverfahrens, die Güte der seeseitigen Randwerte, die horizontale und vertikale Gitterauflösung und die räumliche Rauheitsverteilung bestimmt wird.

Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte des Modells werden anhand eines Spring-Nipp-Zeitraumes mit normalen Tideverhältnissen für die Küstenpegel und die drei Ästuarare kalibriert. Die Validierung des Modells erfolgt anhand eines zweiten Spring-Nipp-Zeitraumes mit normalen Tideverhältnissen sowie für einen Zeitraum mit Sturmflutbedingungen. Das Deutsche-Bucht-Modell zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung und gibt die Variabilität und Form der betrachteten Größen gut wieder. Für eine quantitative Überprüfung der Modellgüte werden statistische Analysen der Tidekennwerte des Wasserstandes anhand einer Jahressimulation für einige Küstenpegel durchgeführt und mit Messungen und Literaturangaben verglichen. Die berechneten Korrelationskoeffizienten, der Bias und der RSME des Modells gegenüber Messungen ergeben, dass das Modell die Tidedynamik auch über einen langen Simulationszeitraum gut abbildet. Die Kennzahlen liegen in der Größenordnung der Kennzahlen des übergeordneten Modells, welches die Wasserstandsrandwerte bereitstellt.

Die Modellierung der Wassertemperatur liefert im Hinblick auf den gewählten Berechnungsansatz in den Ästuaren ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse. Zur Verbesserung der Modellgüte soll zukünftig für die Berechnung der Wassertemperatur die Strahlungsbilanz berücksichtigt werden, s. auch MacWilliams und Bever (2018).

Der dreidimensionale Modellansatz und die variable Gitterauflösung ermöglichen eine genaue Abbildung aller relevanten physikalischen Prozesse inklusive barokliner Einflüsse auf die Strömungs- und Transportverhältnisse in der Deutschen Bucht. Dies ist für Untersuchungen von Extremereignissen wie hohen Oberwasserzuflüssen, Untersuchungen zum Einfluss eines möglichen Klimawandels sowie wasserbaulichen Fragestellungen in den Mündungsbereichen der Ästuarare von Bedeutung. Außerdem können zukünftig mit dem Modell einheitliche Randwertdatensätze für andere Modelle bereitgestellt werden.

5 Literatur

Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und Deutsches Ozeanographisches Datenzentrum (DOD) (2017): MARNET

https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Beobachtungssysteme/Messnetz-MARNET/messnetz-marnet_node.html. Zuletzt geprüft am 17.01.2020.

Casulli, Vincenzo; Stelling, Guus S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 67 (4), S. 441–449.

Fricke, Benjamin; Weilbeer, Holger (2018): BASEWAD – BALancing SEdiment deficits in the WADden Sea - Simulation der morphologischen Entwicklung im schleswig-holsteinischen Wattenmeer. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (ForschungXpress, 24).

Hänsel, Stephanie; Gratzki, Annegret, Deutschländer, Thomas; Heinrich, Hartmut; Herrmann, Carina; Klose, Martin; Nilson, Enno; Ork, Jan; Walter, Andreas (2017): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen – Feinkonzept des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk Wissen – Können – Handeln. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur(BMVI) (Hg), Berlin. www.bmvi-expertennetzwerk.de.

HERZ-Zentrum für Wetterforschung (2017): Datenbasis: Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung, Werte bearbeitet, download: <https://www.herz-tb4.uni-bonn.de/>.

Heyer, Harro; Schrottko, Kerstin (2013): Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht – AufMod. (FuE Bericht A39550270116, 5).

Kremp, Christine; Rudolph, Elisabeth; Sehili, Aissa (2012): OPTEL-C: Entwicklung eines operativen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. In: *Die Küste* 79, S. 141–168.

Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) (2018): <http://www.kfki.de/de/projekte/easygsh-db>. Zuletzt geprüft am 17.01.2020.

MacWilliams, Michael; Bever, Aaron (2018): Simulating Temperature in San Francisco Bay. 15. Internationaler UnTRIM Users Workshop, Trient, Italien.

Rudolph, Elisabeth; Brodhagen, Tabea (2018): Analyse von extremen Sturmfluten in den Ästuarren von Elbe und Ems und mögliche Verstärkungen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (ForschungXpress, 31).

Seiffert, Rita; Hesser, Fred; Büscher, Annette; Fricke, Benjamin; Holzwarth, Ingrid; Rudolph, Elisabeth; Sehili, Aissa; Seiß, Guntram; Winkel, Norbert (2014): Schlussbericht KLIWAS-Projekt 2.04/3.02. In: *KLIWAS Schriftenreihe* 36.

Smith, S. D.; Banke, E. D. (1975): Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. R. Met. Soc.* 101, S. 665–673. Online verfügbar <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/qj.49710142920>.

Sweers, H. E. (1976): A nomogram to estimate the heat exchange coefficient at the air-water interface as a function of windspeed and temperature; a critical survey of some literature. *J. of Hydrology* 30, S. 375–401.

Wiltshire, Karen Helen; Malzahn, Arne Michael; Wirtz, Kai; Greve, Wulf; Janisch, Silvia; Mangelsdorf, Peter; Manly, Bryan F. J.; Boersma, Maarten (2008): Resilience of North Sea phytoplankton spring bloom dynamics: An analysis of long-term data at Helgoland Roads. *Limnol. Oceanogr.* 53(4), S. 1294–1302. <http://www.pangaea.de>.

Zijl, Firmijn; Verlaan, Martin; Gerritsen, Herman (2013): Improved water-level forecasting for the Northwest European Shelf and North Sea through direct modelling of tide, surge and non-linear interaction. In: *Ocean Dynamics* 63 (7), S. 823–847. DOI 10.1007/s10236-013-0624-2. Online verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10236-013-0624-2>.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, Januar 2020



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