

**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen



**KFKI – Projekt OPTEL: Windstaustudien und  
Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells**

**OPTEL – C  
Entwicklung eines operationellen Tidemodells  
der Elbe**

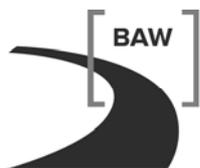
**sowie einer Modellkopplung mit dem  
BSH-Vorhersagemodell der Nordsee**

Fördernummer BMBF 03KIS071

Christine Kremp  
Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg

September 2011





**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**KFKI – Projekt OPTEL:**

**Windstaustudien und Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells**

**OPTEL – C**

**Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie  
einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee**

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 03 70 134  
Fördernummer: BMBF 03KIS071 / KFKI 101  
Projektförderung: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

GEFÖRDERT VOM



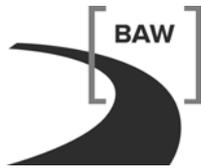
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Zur Förderung

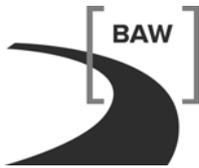
vorgeschlagen vom: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)  
Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich  
Referat: K3  
Bearbeiterin: Dr. Christine Kremp  
Projektleiterin: Dr. Elisabeth Rudolph

Hamburg, im September 2011

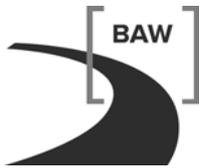
Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



Bundesanstalt für Wasserbau  
OPTEL C - Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer  
Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee  
BAW-Nr.– A3955 03 70 134 - September 2011



| <b>Inhaltsverzeichnis</b> |  | <b>Seite</b> |
|---------------------------|--|--------------|
| 1                         | Einführung                               | 1            |
| 2                         | OPTEL                                    | 3            |
| 3                         | Das Teilprojekt OPTEL-C                  | 6            |
| 4                         | Das numerische Verfahren UnTRIM          | 7            |
| 5                         | Modellentwicklung                        | 10           |
| 5.1                       | Modellaufbau                             | 13           |
| 5.1.1                     | Topografie und Gitter                    | 14           |
| 5.1.2                     | prep_hyd                                 | 16           |
| 5.1.3                     | prep_met                                 | 16           |
| 5.1.4                     | Tideelbmodell                            | 18           |
| 5.2                       | Randwerte                                | 18           |
| 5.2.1                     | Oberwasserzufluss                        | 18           |
| 5.2.2                     | Rand zur Nordsee                         | 19           |
| 5.2.3                     | Atmosphärische Antriebe                  | 23           |
| 5.3                       | Übertragbarkeit auf andere Ästuar        | 28           |
| 6                         | Kalibrierung und Validierung             | 29           |
| 6.1                       | Kalibrierung                             | 29           |
| 6.2                       | Validierung                              | 33           |
| 6.2.1                     | Statistische Auswertung                  | 33           |
| 6.2.2                     | Das Wehr Geesthacht                      | 39           |
| 6.2.3                     | Einfluss der WASP-Faktoren bei Sturmflut | 39           |
| 7                         | Auswertung der Szenarien                 | 49           |
| 7.1                       | Wasserstand                              | 50           |
| 7.2                       | Strömung                                 | 52           |
| 7.3                       | Salzgehalt                               | 52           |
| 8                         | Präoperationeller Betrieb                | 53           |
| 8.1                       | Hoher Abfluss im Januar 2011             | 54           |
| 8.2                       | Sturmflut 4./ 5. Februar 2011            | 57           |
| 8.3                       | Mittlere Verhältnisse im März 2011       | 61           |
| 8.4                       | Mittlere Verhältnisse im Mai 2011        | 65           |
| 8.4.1                     | Wasserstand                              | 67           |



|       |                              |    |
|-------|------------------------------|----|
| 8.4.2 | Strömungsgeschwindigkeit     | 73 |
| 8.4.3 | Salzgehalt                   | 79 |
| 9     | Zusammenfassung und Ausblick | 82 |
| 10    | Danksagung                   | 85 |
| 11    | Literatur                    | 86 |

## Bildverzeichnis

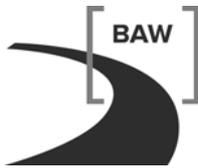
## Seite

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Bild 1:   | Maximale Flutstromgeschwindigkeit in Fahrrinnenmitte entlang der Elbe zwischen Elbe km 750 und 590 in der Topographie 1970 (violett) und 2002 (schwarz) (Ergebnis einer Simulation mit einem HN-Modell der Elbe, siehe Fig. 13 in [5])   | 4  |
| Bild 2:   | Veränderung des mittleren Tidehochwassers (MThw, hier MHW), des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw, hier MLw) und des mittleren Tidehubs (MThb, hier MTr) im Zeitraum 1880 bis 2007 (siehe Fig. 9 in [5]).   | 5  |
| Bild 3:   | Phasen eines OpenMI-kompatiblen Modelles (OpenMI 2.0 Specification, [27] )   | 11 |
| Bild 4:   | GUI Configuration Editor mit einer Composition aus Komponenten (oben) und den Eigenschaften der verknüpften Daten auf einem Linux-Betriebssystem.  | 12 |
| Bild 5:   | Schema des Modellaufbaus. Die beiden Präprozessoren laufen vor dem Hauptprogramm. Sie sind die Schnittstellen zwischen dem Hauptprogramm und den anderen beiden Vorhersagemodellen.  | 13 |
| Bild 6:   | Topografie des HN-Modells des Elbe-Ästuars. Die Lage des offenen Randes zur Nordsee ist in Magenta gekennzeichnet. Der Oberwasserzufluss wird in Bleckede vorgegeben (ebenfalls in Magenta gekennzeichnet). Zusätzlich sind die Orte markiert, für die Wasserstandszeitreihen in den Szenarienläufen und im präoperationellen Betrieb ausgegeben werden. | 14 |
| Bild 7:   | Ausschnitt aus dem unstrukturierten orthogonalen Gitter im Bereich von Brunsbüttel. In der Fahrrinne werden hier Rechtecke und in den Seitenbereichen Dreiecke verwendet. Die Farben kennzeichnen die Tiefe der Polygone.  | 15 |
| Bild 8:   | zeigt für Szenario 1 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt   | 20 |
| Bild 9:   | zeigt für Szenario 2 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt.  | 20 |
| Bild 10 : | zeigt für Szenario 3 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt.  | 21 |
| Bild 11:  | zeigt für Szenario 4 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt   | 21 |
| Bild 12:  | zeigt für Szenario 5 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt   | 22 |
| Bild 13:  | zeigt für Szenario 6 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt.  | 22 |

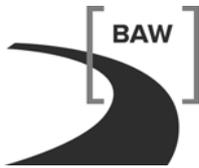
|          |   |    |
|----------|---|----|
| Bild 14: | Windgeschwindigkeiten im Ästuar aus dem Wettervorhersagemodell COSMO-EU. Die linke Seite der Abb. zeigt die Windgeschwindigkeiten und Richtungen im COSMO-EU Gitter und die rechte Seite der Abb. zeigt das mit WASP-Faktoren korrigierte Windfeld. | 23 |
| Bild 15: | Windvorhersage mit Windwerten des nächstliegenden COSMO-EU Gitterpunkt  | 24 |
| Bild 16: | Windgeschwindigkeitszeitreihen von COSMO-EU an den markierten grün markierten Punkten in Bild 15 auf dem Schnitt Nördlichster Punkt – Niedersachsen, ohne WASP-Korrekturfaktoren  | 25 |
| Bild 17: | Windgeschwindigkeitszeitreihen wie im vorhergehenden Bild, aber mit WASP-Korrekturfaktoren.   | 25 |
| Bild 18: | Windgeschwindigkeitszeitreihen von COSMO-EU an den grün markierten Punkten aus Bild 15 auf dem Schnitt von Niedersachsen nach Schleswig-Holstein, ohne WASP-Korrekturfaktoren und eine Messung für Cuxhaven.  | 26 |
| Bild 19: | Windgeschwindigkeitszeitreihen wie im vorhergehenden Bild 18, aber mit WASP-Korrekturfaktoren.  | 27 |
| Bild 20: | Windrichtungszeitreihe von COSMO-EU Vorhersagen für den Schnitt 2 über den Mündungstrichter der Elbe  | 27 |
| Bild 21  | zeigt links den Wasserstand und rechts das Windfeld für das Jade-Weser Ästuar zu einem bestimmten Zeitpunkt.  | 28 |
| Bild 22: | Elemente einer Terminologie der Modellierung (nach Schlesinger et al. [34])   | 29 |
| Bild 23: | Zeitreihe des gemessenen Oberwasserzuflusses bei Neu Darchau 2006 in m <sup>3</sup> /s (Elbe-km536), MNQ ist der mittlere niedrigste Abfluss und MQ bezeichnet den mittleren Abfluss [14].  | 31 |
| Bild 24: | Windgeschwindigkeit in Scharhörn während der mittleren Verhältnisse (sz1) im Ästuar. Vorhersage aus dem COSMO-EU Modell und Messwerte.  | 31 |
| Bild 25: | Windgeschwindigkeit in Scharhörn während des hohen Oberwasserzuflusses (sz2 und sz3) in das Tideelbe Ästuar. <b>hellblau</b> - Vorhersage aus dem COSMO-EU Modell <b>dunkelblau</b> - Messwerte   | 32 |
| Bild 26: | Windgeschwindigkeit in Scharhörn während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5). <b>hellgrau</b> - Vorhersage aus dem COSMO-EU Modell <b>dunkelgrau</b> – Messwerte  | 32 |
| Bild 27  | Verteilung der Bodenreibungskoeffizienten im Modellgebiet.  | 33 |
| Bild 28: | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Thw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 5) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.   | 35 |
| Bild 29: | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Tnw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 5) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.   | 35 |
| Bild 30: | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit Thw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 5) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.                                   | 36 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Bild 31:  | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit $T_{nw}$ der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 5) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.  | 36 |
| Bild 32:  | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für das $Thw$ der Szenarien aus dem Jahre 2006 mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.   | 37 |
| Bild 33:  | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für das $T_{nw}$ der Szenarien aus dem Jahre 2006 mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.  | 37 |
| Bild 34:  | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit des $Thw$ der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 5) mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.  | 38 |
| Bild 35:  | Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit des $T_{nw}$ der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 5) mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.   | 38 |
| Bild 36:  | Wasserstand in Cuxhaven während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand $\Delta HW = 1$ cm für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet.   | 40 |
| Bild 37 : | Wasserstand in Grauerort während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand $\Delta HW = 8$ cm für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte - schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet.  | 41 |
| Bild 38:  | Wasserstand in St.Pauli während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand $\Delta HW = 17$ cm für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte - schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet.  | 41 |
| Bild 39:  | Wasserstand in Altengamme während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand $\Delta HW = 22$ cm für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte - schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet | 42 |
| Bild 40:  | Wasserstand in Cuxhaven während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand $\Delta HW = 1$ cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod.              | 43 |
| Bild 41:  | Wasserstand in Grauerort während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand $\Delta HW = 8$ cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod              | 43 |
| Bild 42:  | Wasserstand in Hamburg St. Pauli während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand $\Delta HW = 17$ cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod.    | 44 |

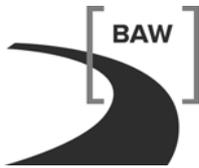
- Bild 43: Wasserstand in Altengamme während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 20$  cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod. 44
- Bild 44: Differenzen in den Scheitelwasserständen  $\Delta HW$  (Messung – Modell) des Sturmflutszenarios von 2006 (sz5); türkis – Randwerte: Wasserstand (wl) aus Messungen an Bake Z, Wind aus COSMO-EU mit WAsP - Faktoren, pink – wl aus BSHcmod, Wind aus COSMO-EU mit WAsP - Faktoren, gelbe Quadrate – wl aus Messungen an der Bake Z, Wind aus COSMO-EU ohne WAsP - Faktoren, ockerfarbene Dreiecke – wl aus dem BSHcmod, Wind aus COSMO-EU ohne WAsP – Faktoren. 45
- Bild 45: Änderung der Differenz der Scheitelwasserstände  $\Delta HW$  (Messung - Modell) auf Grund des gewählten Windfeldes (COSMO-EU mit WAsP – COSMO-EU ohne WAsP, siehe Bild 44) entlang des Ästuars für jeweils gleiche Wasserstandsrandwerten. Türkis – Wasserstandsrandwerte aus Messungen an der Bake Z, pink – Wasserstandsrandwerte aus dem BSHcmod. 46
- Bild 46: Änderung der Differenzen der Scheitelwasserstände  $\Delta HW$  (Messung - Modell) auf Grund des verwendeten Wasserstandsrandwertes (BSHcmod – Randwerte aus Messungen von Bake Z, siehe Bild 44) entlang des Ästuars für jeweils gleichen Wind: dunkelblau – COSMO-EU Wind mit WAsP-Faktoren korrigiert, pink – COSMO-EU Wind ohne WAsP-Korrektur. 47
- Bild 47: Differenzen (Messung - Modell) in den Scheitelwasserständen für die Sturmflut vom 12.1.2007 (sz6) entlang des Elbe – Ästuars. Die blauen Zahlen geben die Abweichung in cm an. 48
- Bild 48: Lage der Dauermessstationen im Elbegebiet. 50
- Bild 49: Lage der Pegel, an denen die modellierten Wasserstandszeitreihen mit den gemessenen verglichen wurden. 51
- Bild 50: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im Januar 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet. 54
- Bild 51: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im Januar 2011. 55
- Bild 52: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Glückstadt im Januar 2011. 55
- Bild 53: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet. 56
- Bild 54: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im Januar 2011. 56
- Bild 55: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung am Wehr Geesthacht UP im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet. 57
- Bild 56: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im Februar 2011.58



|          |   |    |
|----------|---|----|
| Bild 57: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im Februar 2011.  | 59 |
| Bild 58: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Glückstadt im Februar 2011.  | 59 |
| Bild 59: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im Februar 2011.   | 60 |
| Bild 60: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im Februar 2011.   | 60 |
| Bild 61: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung am Wehr Geesthacht UP im Februar 2011.   | 61 |
| Bild 62: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im März 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.            | 61 |
| Bild 63: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im März 2011.   | 62 |
| Bild 64: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Glückstadt im März 2011.   | 63 |
| Bild 65: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im März 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet. | 63 |
| Bild 66: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im März 2011.  | 64 |
| Bild 67: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung am Wehr Geesthacht UP im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet. | 64 |
| Bild 68: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im Mai 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.             | 65 |
| Bild 69: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven im Mai 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.            | 66 |
| Bild 70: | Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung in Hamburg St. Pauli im Mai 2011.  | 66 |
| Bild 71: | Elbmündung: Wasserstandsverteilung am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).   | 67 |
| Bild 72: | Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.  | 68 |
| Bild 73: | Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.  | 68 |
| Bild 74: | Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 9:00 UTC.  | 69 |
| Bild 75: | Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 12:00 UTC.   | 69 |
| Bild 76: | Hafen Hamburg: Wasserstandsverteilung am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).  | 70 |
| Bild 77: | Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.   | 71 |
| Bild 78: | Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.   | 71 |



|          |  |    |
|----------|--|----|
| Bild 79: | Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den<br>2. Mai 2011 9:00 UTC.                                       | 72 |
| Bild 80: | Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den<br>2. Mai 2011 12:00 UTC.                                      | 72 |
| Bild 81: | Elbmündung: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit am 2. Mai 2011<br>00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).    | 73 |
| Bild 82: | Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011<br>3:00 UTC.                             | 74 |
| Bild 83: | Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011<br>6:00 UTC.                             | 74 |
| Bild 84: | Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011<br>9:00 UTC.                             | 75 |
| Bild 85: | Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011<br>12:00 UTC.                            | 75 |
| Bild 86: | Hafen Hamburg: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit am 2. Mai 2011<br>00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW). | 76 |
| Bild 87: | Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai<br>2011 3:00 UTC.                          | 77 |
| Bild 88: | Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai<br>2011 6:00 UTC.                          | 77 |
| Bild 89: | Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai<br>2011 9:00 UTC.                          | 78 |
| Bild 90: | Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai<br>2011 12:00 UTC.                         | 78 |
| Bild 91: | Elbmündung: Verteilung des Salzgehaltes am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn<br>der Vorhersage (BAW).                | 79 |
| Bild 92: | Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.  | 80 |
| Bild 93: | Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.  | 80 |
| Bild 94: | Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 9:00 UTC.  | 81 |
| Bild 95: | Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 12:00 UTC.   | 81 |



## Tabellenverzeichnis

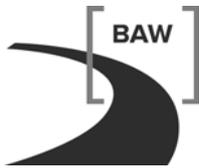
## Seite

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabelle 1: | Charakteristische Werte des Modellgitters des BAW-Vorhersagemodells-Elbe.   | 15 |
| Tabelle 2: | Zeiträume der im Projekt OPTTEL vereinbarten Szenarien zum Vergleich der Modellergebnisse mit Messwerten.   | 49 |
| Tabelle 3: | Mittelungszeiträume für die Differenzen aus <a href="#">Messwert-Modellwert</a> der Thw, Tnw, des Tidehubs, des Tidemittelwassers und der Eintrittszeiten für Thw und Tnw in den einzelnen Szenarien. | 51 |
| Tabelle 4: | Ablauf der Vorhersage im präoperationellen Betrieb beim BSH für einen Vorhersagezeitraum von 24 Stunden.  | 53 |



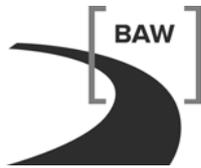
## Verzeichnis der Abkürzungen

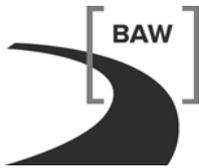
| Abkürzung   | Vollständige Bezeichnung   |
|-------------|--|
| BAW - DH    | Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg   |
| BfG         | Bundesanstalt für Gewässerkunde  |
| Bl          | Bleckede   |
| BMBF        | Bundesministerium für Bildung und Forschung  |
| BMVBW       | Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung                                      |
| BSH         | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie  |
| BSHcmod     | Operational Circulation Model of BSH, Name des HN-Modells                                    |
| COSMO-EU    | Name des Wettervorhersagemodells des DWD   |
| Cz          | Chezy Bodenreibungskoeffizient   |
| D           | Dauermessstation (WSA Hamburg)   |
| DGJ         | Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch  |
| DGM         | Digitales Geländemodell  |
| DWD         | Deutscher Wetterdienst   |
| ESMF        | Earth System Modeling Framework  |
| G           | Geesthacht   |
| GMT         | Greenwich Mean Time  |
| HHQ         | höchster bekannter Wert des Oberwasserzufluss (DIN 4049-3)                                   |
| HThw        | höchstes Tidehochwasser in einer bestimmten Zeitspanne                                       |
| HHThw       | höchster bekannter Wert des Tidehochwassers(DIN 4049-3)                                      |
| HN - Modell | hydrodynamisch – numerisches Modell  |
| HPA         | Hamburg Port Authority   |
| HVZ         | Hochwasservorhersagezentrale   |
| HW          | höchster Wasserstand in einem gleichartigen Zeitabschnitt, hier Sturmflutscheitelwasserstand |
| KFKI        | Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen   |
| LHW         | Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen Anhalt                       |
| LKN         | Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein             |
| LZ          | Langzeitmessstation (WSA Cuxhaven)   |
| NN          | Normalnull   |
| MESZ        | Mitteuropäische Sommerzeit, UTC + 2 Stunden  |
| MEZ         | Mitteuropäische Zeit, UTC + 1 Stunde   |
| MNQ         | mittlerer niedrigster Abfluss  |
| MPI         | Message Passing Interface  |
| MQ          | mittlerer Abfluss  |
| MThb        | mittlerer Tidehub  |
| MThw        | mittleres Tidehochwasser   |



|        |   |
|--------|---|
| MTnw   | mittleres Tideniedrigwasser                                   |
| OpenMI | Open Modeling Interface (Modellkopplung)                      |
| OpenMP | Open Multi Processing   |
| Q      | Oberwasserzufluss   |
| SF     | Sturmflut   |
| sz     | Szenario  |
| Thb    | Tidehub (DIN 4049-3)  |
| Thw    | Tidehochwasser (DIN 4049-3)                                   |
| Tmw    | Tidemittelwasser (DIN 4049-3)                                 |
| Tnw    | Tideniedrigwasser (DIN 4049-3)                                |
| UnTRIM | Unstructured TRIM, Name des HN-Modells                        |
| UTC    | Coordinated Universal Time, koordinierte Weltzeit, früher GMT |
| WAsP   | Wind Atlas Analysis and Application Program                   |
| WAVOS  | Wasserstandsvorhersagesystem der BfG                          |
| WSA    | Wasser- und Schifffahrtsamt                                   |
| WSV    | Wasser- und Schifffahrtsverwaltung                            |

---





## 1 Einführung

Das Projekt „OPTEL - Windstaustudien und Entwicklung eines operationellen Tideelbe-Modells“ besteht aus vier Teilprojekten, die in einer Kooperation zwischen dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), dem Deutschen Wetterdienst (DWD), der Hamburg Port Authority (HPA) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) bearbeitet werden (siehe auch Projektbeschreibung OPTEL [11]). Das Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Forschungskoordination und die wissenschaftliche Begleitung des Projektes erfolgt durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI). Die Teilprojekte gliedern sich wie folgt:

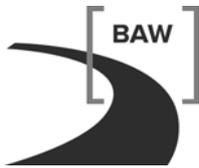
- OPTEL A: Entwicklung eines operationellen Tideelbe-Modells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens (BSHcmod) für die Nord- und Ostsee (BSH)
- OPTEL B: Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tideelbe“ (DWD).
- OPTEL C: Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee“ (BAW)
- OPTEL D: Studien zur Stauentwicklung in der Tideelbe“ (HPA)

Die Koordination der Teilprojekte liegt in den Händen des BSH.

Die Elbe und besonders die tidebeeinflusste Untere Elbe ist ein stark frequentierter Schifffahrtsweg. Aufgrund des Tideeinflusses benötigen Schiffe, die von der Nordsee kommend die Elbe nach Hamburg befahren, präzise und möglichst langfristige Vorhersagen des Wasserstandes. Auf die wirtschaftliche Bedeutung einer präzisen Wasserstandsvorhersage wird in OPTEL-D von HPA [37] hingewiesen. Für Manöver im Hafen wie z. B. das Eindocken von Schiffen oder das Wenden sehr großer Schiffe sind zusätzlich detaillierte Kenntnisse der tideabhängigen Strömungsverhältnisse wichtig.

Für die Tideelbe werden zur Zeit vom BSH lediglich Vorhersagen der Tidehochwasser und Tideniedrigwasser für ausgewählte Orte entlang des Ästuares durchgeführt und veröffentlicht. Bei extremen Ereignissen wie Sturmfluten, sehr hohen oder auch sehr niedrigen Oberwasserzuflüssen in die Tideelbe sind räumlich und zeitlich detaillierte Vorhersagen von Wasserstands- und Strömungsverhältnissen jedoch besonders wichtig. Diese Informationen ermöglichen zusätzlich zu einer verbesserten Beratung der Schifffahrt, der Deichverbände oder der Wasserwirtschaft auch die Möglichkeit, bei Havarien im Bereich der Elbe die Öl- bzw. Schadstoffbekämpfung effizienter zu betreiben.

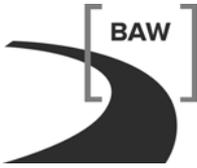
Die Sturmfluten im Winter 2006/2007 zeigten deutlich, dass hoher Bedarf für eine verbesserte Wasserstandsvorhersage bei Sturmflut für die Elbe bzw. alle Ästuaire der deutschen Nordseeküste besteht.



Durch die Kopplung numerischer Modelle der Tideelbe mit hydrodynamisch-numerischen Vorhersagemodellen (HN-Modell) der Nordsee und Deutschen Bucht wird im Rahmen des Forschungsvorhabens OPTEL gezeigt, dass mit numerischen Modellen und heutiger Rechnerleistung räumlich (flächendeckende) und zeitlich hochaufgelöste (gesamter Tideverlauf) operationelle Wasserstands-, Strömungs- und Salztransportvorhersagen für die Tideelbe möglich sind. Hierbei werden zwei unterschiedliche numerische Verfahren von OPTEL-A (BSHcmod, [16]) und OPTEL-C (UnTRIM [8]) eingesetzt, um die Vor- und Nachteile der Modellverfahren in unterschiedlichen Vorhersagesituationen untersuchen zu können. Das Projekt OPTEL ist auch als Pilotstudie für Jade-Weser und Ems gedacht.

Ziel des von der BAW bearbeiteten Teilprojektes OPTEL-C ist die Entwicklung eines operationellen Tideelbemodells. Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe wird auf der Grundlage des 3-dimensionalen hydrodynamisch numerischen Modellverfahrens UnTRIM, das ein unstrukturiertes orthogonales Gitter verwendet, entwickelt. Die Wahl eines derartigen Gitters ermöglicht eine möglichst tiefen- und volumentreue Widergabe der Ästuartopographie bei einer möglichst kleinen Anzahl von Gitterelementen.

In einer engen Zusammenarbeit mit OPTEL-A und OPTEL-B werden die für die Randwertübergabe aus der Nordsee (Wasserstand, Strömung und Salzgehalt am Rand der Elbe zur Deutschen Bucht), aus der Atmosphäre (Windgeschwindigkeit über der Elbe) und aus dem Binnenbereich (Oberwasserzufluss in die Tideelbe) benötigten Schnittstellen entwickelt. Für die von OPTEL-D zusammengestellten 6 Szenarien aus den Jahren 2006, 2007 und 2008 werden von OPTEL-C mit dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe Simulationen unter Vorhersagebedingungen durchgeführt. Die Modellergebnisse für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt werden analysiert und mit Messungen verglichen. Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe wird auf dem Rechner des BSH implementiert. Im präoperationellen Betrieb werden täglich Wasserstand, Strömung und Salzgehalt für die Tideelbe vorhergesagt.



## 2 OPTEL

In den Ästuaren im Bereich der deutschen Nordseeküste liegen wichtige Häfen. Für diese und weitere Orte in den Ästuaren liefert das BSH Gezeitenvoraberechnungen und Wasserstandsvorhersagen. Durch den zukünftigen Einsatz von 3D - Ästuarmodellen sollen die Wasserstands- und Strömungsvorhersagen in den Ästuaren verbessert werden

Das BSH beteiligt sich, wie auch die anderen Projektpartner, zur Verbesserung seiner Dienste und Dienstleistungen an Forschungs- und Entwicklungsprojekten. U.a. betreibt das BSH Vorhersagedienste und hat für die Sicherheit und Leichtigkeit des Seeverkehrs zu sorgen. Mit meereskundlichen Vorhersagen für die deutsche Nord- und Ostseeküste unterstützt das BSH u. a. die Schifffahrt, Hafenämter und Verkehrszentralen. Es liefert Gezeitenvoraberechnungen, aktuelle Wasserstandsvorhersagen und gibt Sturmflutwarnungen heraus. Mit seinem operationellen Modellsystem [16] erzeugt es zusätzlich Strömungsvorhersagen für die Nord- und Ostsee [12], sowie Vorhersagen für Wassertemperatur, Salzverteilung und Eisbedeckung im Modellgebiet.

Durch die Ästuare führen Bundeswasserstraßen, die zusammen mit den Häfen einen bedeutenden Wirtschaftsfaktor darstellen. Die BAW als zentraler Dienstleister der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) trägt dazu bei, dass die Wasserstraßen in Deutschland den wachsenden technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen gerecht werden und alle Anlagen und Einrichtungen der Bundeswasserstraßen den Sicherheitsanforderungen genügen. Insbesondere verfügt sie über umfassende Kompetenz und Erfahrung auf dem Gebiet des Verkehrswasserbaus und ist maßgeblich an den verschiedenen Strombaumaßnahmen beteiligt. Bewegliche sandige Sedimente und Schwebstoffe sind dabei eine Herausforderung in den Tideästuaren, die Fragen nach Möglichkeiten der Minimierung von Unterhaltsaufwendungen und Reduzierung der Verschlickung aufwerfen. Hochauflösende HN-Modelle, die bei der BAW angewendet und weiterentwickelt werden, sind wichtige Werkzeuge bei der Beantwortung dieser Fragen.

Im Zuge der Globalisierung werden Häfen weiter ausgebaut. Hamburg, das viele Hafenanlagen in der Tideelbe hat, liegt ca. 110 km stromauf der Elbmündung. Ebenso sind Bremen, Brake, Bremerhaven [41] und Wilhelmshaven aus dem Jade-Weser Gebiet zu nennen und nicht zuletzt die Werft in Papenburg und der Hafen in Emden. Für die immer größeren Schiffe, die zunehmend mehr Tonnage befördern können, wurden und werden seit dem letzten Jahrhundert Vertiefungen der Fahrrinnen u. a. Strombaumaßnahmen durchgeführt. Beispielhaft dazu sei die Abb. 4.5 auf S.88 in [25] genannt, die die Historie der Vertiefungen der Unterweser zwischen 1888 und 2006 illustriert. Diese Maßnahmen bewirken Änderungen in den Strömungsgeschwindigkeiten, dem Tidehub und der Form der Tidekurven entlang der Ästuare. Eindrucksvoll ist das für die Entwicklung des Tidehubs [30] und der HThw Höhendifferenz St.Pauli – Cuxhaven [20] für die Elbe dokumentiert und im Abschlussbericht des Teilprojektes OPTEL-D [37] aktualisiert. Auch die Strömungsgeschwindigkeiten entlang der

Tideelbe verändern sich mit der Ausbautiefe der Elbe. Bild 1 zeigt die analysierte Flutstromgeschwindigkeit im Bereich der Unter- und Außenelbe [5]. Die zugrundeliegenden Daten sind Ergebnisse einer Simulation mit einem Elbe-Modell mit einer Topographie von 1970 (schwarz) bzw. 2002 (violett) (mit freundlicher Genehmigung des Verfassers aus [5] entnommen). Die Veränderungen in der Topographie der Elbe zwischen 1970 und 2002 führen zu einer Zunahme der maximalen Flutstromgeschwindigkeit im Bereich der Unterelbe.

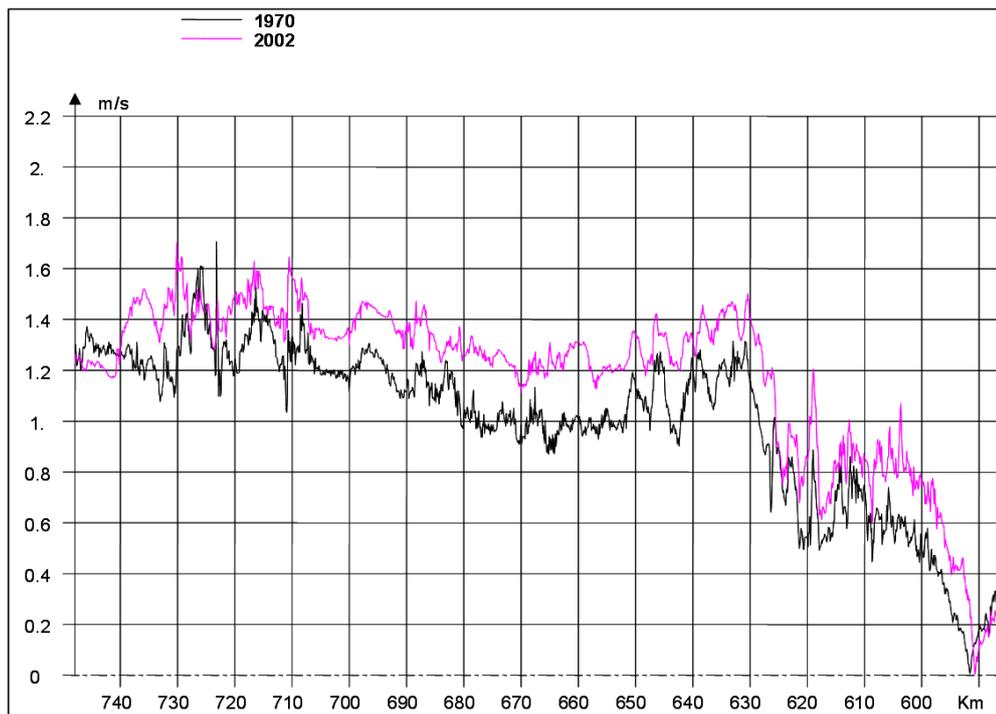


Bild 1: Maximale Flutstromgeschwindigkeit in Fahrrinnenmitte entlang der Elbe zwischen Elbe km 750 und 590 in der Topographie 1970 (violett) und 2002 (schwarz) (Ergebnis einer Simulation mit einem HN-Modell der Elbe, siehe Fig. 13 in [5])

Bild 2 zeigt die die Veränderung der Monatsmittel des mittleren Tidehochwassers MThw, des mittleren Tideniedrigwassers MTnw und des mittleren Tidehubs (MThb) seit 1880 an den Orten Cuxhaven – Steubenhöft und Hamburg - St. Pauli in der Tideelbe (Datengrundlage: Messungen, ebenfalls mit freundlicher Genehmigung aus [5] entnommen).

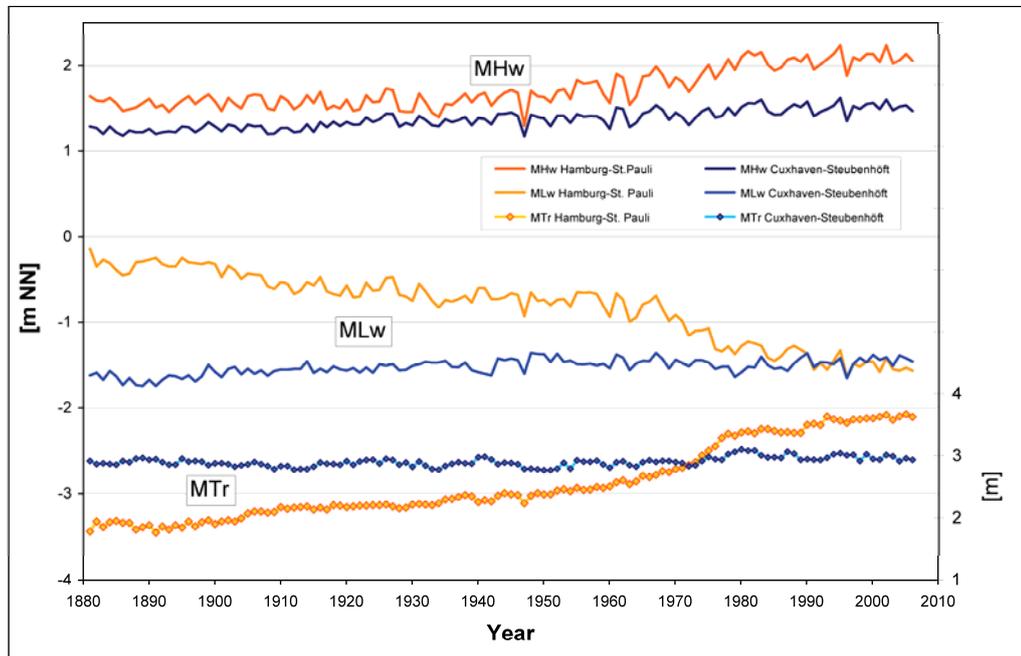
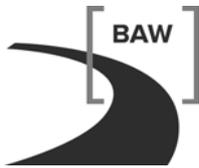


Bild 2: Veränderung des mittleren Tidehochwassers (MThw, hier MHW), des mittleren Tideniedrigwassers (MTnw, hier MLw) und des mittleren Tidehubs (MThb, hier MTr) im Zeitraum 1880 bis 2007 (siehe Fig. 9 in [5]).

Insbesondere für statistische Wasserstandsvorhersageverfahren wirkt sich dieser Umstand erschwerend aus, da deren Zuverlässigkeit nicht nur auf einer genügend großen Anzahl von Beobachtungswerten beruht, diese müssen zusätzlich aus einem System kommen, das nicht ständigen Änderungen unterworfen ist, wie z.B. verschiedenen Strombaumaßnahmen oder Sedimenttransport in einem Ästuar.

In den Ästuaren stoßen 2 Wassersysteme aufeinander, die jedes von einer eigenen Dynamik geprägt sind. Der Fluß führt Süßwasser, das stetig in eine Richtung fließt und je nach Jahreszeit größere oder kleinere Volumina Wasser pro Zeiteinheit in das Ästuar einspeist. Die künstliche Tidegrenze bzw. die Grenze zwischen Ästuar und Binnenfluss bildet in Elbe, Weser und Ems ein Wehr (Elbe bei Geesthacht, Weser bei Hemelingen, Ems bei Herbrum). Der seeseitige Rand des Ästuars ist der Tidedynamik unterworfen, vom Seegang in der Deutschen Bucht beeinflusst und in unregelmäßigen Abständen kurzzeitig von Fernwellen und/oder Sturmfluten. Von der Seeseite gelangt mit der Flut salzhaltiges Wasser von höherer Dichte ins Ästuar. Die Tidewelle wird an Wehren, Sperrwerken oder der Topographie reflektiert. Von der Bodenbeschaffenheit hängt die Bodenschubspannung ab. Durch bewegliche Sedimente finden in manchen Bodenbereichen relativ schnelle Änderungen der Bodentopografie statt. Schwebstoffe können von einem Ästuarbereich in einen anderen transportiert werden und an „ruhigen Stellen“ sedimentieren.

Mit hochauflösenden HN-Modellen kann man Wasserstand, Strömung und Salzgehalt auch bei relativ schnellen Änderungen im System gut beschreiben. Voraussetzung ist eine gute



und aktuelle Topografie, eine geeignete Gitterauflösung, die die Tiefe und das Volumen des Ästuars ausreichend beschreibt, so dass die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle richtig wiedergegeben wird.

### 3 Das Teilprojekt OPTEL-C

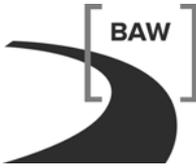
Ziel des Projektes OPTEL-C ist die Möglichkeit der Bereitstellung von aktuellen Wasserstands- und Strömungsdaten an beliebigen Orten in der Tideelbe. Dazu braucht man eine operationelle Wasserstands- und Strömungs- und Salztransportvorhersage mit einem Tideelbemodell, das auch bei extremen Ereignissen wie Sturmfluten, Sturmebben, schnell ansteigenden Oberwasserzuflüssen aus der Mittelelbe und sehr niedrigen Elbewasserständen zuverlässige Vorhersagen liefert. Im Teilprojekt OPTEL-C wurde ein solches Elbemodell entwickelt, das BAW-Vorhersagemodell-Elbe. Um von der Modellentwicklung auch für andere Ästuare zu profitieren, ist das Konzept so angelegt, dass eine einfache Übertragung auf andere Ästuare möglich ist.

Zur Gewährleistung einer guten Reproduzierbarkeit der hydrodynamischen Verhältnisse braucht man ein genügend genau auflösendes Modellgitter ebenso wie eine aktuelle und gute Topografie.

Das im BAW-Vorhersagemodell-Elbe verwendete hydrodynamische Modell UnTRIM Version 2007 [2] löst die Flachwassergleichungen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter [3] und [5]. Die Randwerte, die zur Lösung dieser Gleichungen genutzt werden, sind atmosphärische Antriebe des Vorhersagemodells COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes [17], Antriebe aus dem Vorhersagemodell BSHcmod des BSH [16] und der Oberwasserzufluss aus der Mittelelbe [25]. Letzterer ist der einzige Randwert, der z. Zt. nicht aus einem Vorhersagemodell kommt, sondern aus Messungen.

Das verwendete Wettervorhersagemodell COSMO-EU hat mit einer Gitterweite von ca. 7 km x 7 km eine vergleichsweise grobe räumliche Auflösung. Deshalb wird auch die tatsächliche Grenze zwischen Land und Wasser in diesem Modell verhältnismäßig grob aufgelöst. Im Abschlussbericht OPTEL-B [18] wird dieses Problem wie folgt zusammengefasst: „Verwendet man die räumlich groben Windfelder von COSMO-EU, um daraus ein räumlich hoch aufgelöstes Windfeld über der Elbe zu interpolieren, so wird dieses Windfeld über der Elbe zu geringe Windgeschwindigkeiten aufweisen, da die verschiedenen Rauigkeiten des Geländes bei der Berechnung der Windfelder auf Grund der groben Auflösung ungenügend erfasst werden. So haben z.B. viele Gitterelemente von COSMO-EU die Rauigkeit von Land, wo in Wirklichkeit zum Teil Wasserflächen sind.“

Im Teilprojekt des Deutschen Wetterdienstes (OPTEL-B) wurden deshalb die Windgeschwindigkeiten durch WAsP-Korrekturfaktoren windrichtungsabhängig auf ein Gitter mit einer Auflösung von 250 m x 250 m korrigiert (s.a. Bericht OPTEL-B [18]). WAsP steht dabei für **Wind Atlas Analysis und Application Program** [40].



Die Auflösung des Elbemodellgitters ist deutlich feiner als die des COSMO-EU Gitters. Die Kantenlängen des Elbomodells variieren zwischen 12 m und 1,13 km. Die längsten Kanten befinden sich im Bereich der Deutschen Bucht. Bei der Interpolation des Windfeldes vom groben COSMO-EU Gitter auf das feine Gitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe werden die Windgeschwindigkeiten mit den von OPTTEL-B bereitgestellten windrichtungsabhängigen Korrekturfaktoren versehen. Das so modifizierte Windfeld enthält eine deutlich verbesserte Windgeschwindigkeiten über der Tideelbe und an der Land - Wassergrenze.

Ein wesentlicher Punkt im Projekt ist die Kalibrierung und Validierung des Modells. Deshalb wurden in Teilprojekt OPTTEL-D (siehe auch [37] Abschnitt 3.2) von Hamburg Port Authority sechs verschiedene Szenarien aus Zeiträumen ausgewählt, die sehr verschiedene Verhältnissen im Ästuar erfassen: neben mittleren Verhältnissen auch extreme Ereignisse wie Sturmflut, Sturmebbe und hohen Oberwasserzufluss. Mit einem dieser Szenarien (Szenario 1) ist das Modell kalibriert worden. Die Wasserstandsrandwerte am Nordseerand für den Kalibrierungszeitraum wurden aus Messungen an der Bake Z abgeleitet.

Auch kann ausgehend von diesen Szenarien am Beispiel der Wasserstände sichtbar gemacht werden, welchen Einfluss die Randwerte am offenen Rand zur Nordsee auf die Modellergebnisse haben. Vergleiche dazu beispielhaft Bild 28 mit Bild 32, Bild 29 mit Bild 33, Bild 30 mit Bild 34 sowie Bild 31 mit Bild 35.

Am Beispiel des Jade –Weser Ästuars wird die Übertragbarkeit auf andere Ästuar diskutiert.

Seit November läuft das BAW-Vorhersagemodell-Elbe im präoperationellen Betrieb im BSH und erste Ergebnisse können vorgelegt werden, insbesondere modellierte Pegelstände während der Hochwassersituation durch starken Oberwasserzufluss bis zu  $3570 \text{ m}^3/\text{s}$  am 23. Januar 2011 und einer Sturmflut (nach der Definition des BSH [13], [31]) vom 4./5. Februar 2011, bei der das Tidehochwasser in Cuxhaven 1.72 m über dem mittleren Hochwasser mThw lag und entsprechend in St.Pauli 2.15 m. Die verwendeten Daten für den Oberwasserzufluss sind Messungen aus Neu Darchau, siehe Informationsplattform Undine [39]. Zum Vergleich der modellierten Pegelstände aus der präoperationellen Vorhersage standen Messungen als Rohdaten aus dem gewässerkundlichen Informationssystem der Wasser und Schifffahrtsverwaltung des Bundes PegelOnline [29] zu Verfügung.

#### **4 Das numerische Verfahren UnTRIM**

Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe für die operationelle Vorhersage für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt ist auf der Basis eines numerischen Modells des Elbe-Ästuars unter Verwendung des hydronumerischen Modellverfahrens UnTRIM [5], Version UnTRIM2007, entwickelt worden. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im Validation Document [3]. UnTRIM ist ein Finite Differenzen/Finite Volumen Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter löst. Grundlage des Verfahrens UnTRIM sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der

physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung darstellen.

Mit diesem Berechnungsverfahren können flächendeckend für jeden aktiven Gitterpunkt und Zeitschritt u. a. folgende physikalische Größen berechnet werden:

- Wasserspiegelauslenkung bezüglich NN,
- Strömungsgeschwindigkeit und
- Salzgehalt.

Bei der Berechnung der aufgezählten physikalischen Größen berücksichtigt das mathematische Modell des Elbe-Ästuars folgende, die Tidedynamik beeinflussende Prozesse:

- Gezeiten,
- Oberwasserzufluss,
- Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen,
- Sohlreibung,
- Impulseintrag durch den Wind,
- turbulente Diffusion des Strömungsimpulses,
- turbulente Viskosität,
- Corioliskraft, sowie den
- advektiven Impulstransport.

Die räumliche und zeitliche Variabilität des lokalen Windfeldes erzeugt einen zusätzlichen räumlich und zeitlich variablen Impulseintrag aus der Atmosphäre, der Strömung und Wasserstand von Flüssen und Ästuaren kleinräumig beeinflusst. Dieser Effekt ist bei Extremereignissen wie Sturmfluten nicht zu vernachlässigen und muss deshalb hier im HN-Modell berücksichtigt werden.

Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird parametrisiert und durch die Windschubspannung  $\vec{\tau}_{surface}$  beschrieben:

$$\vec{\tau}_{surface} = \rho_{air} \cdot c_{d10} \cdot |\vec{v}_{10, Wind}| \cdot \vec{v}_{10, Wind} ,$$

hierbei bezeichnet  $\rho_{air}$  die Dichte der Luft und  $\vec{v}_{10, Wind}$  die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund. Für das vorliegende Modell wird der Impulsaustauschkoeffizient  $c_{d10}$  mit den von Smith und Banke [35] vorgeschlagenen Koeffizienten berechnet:

$$c_{d10} = (0.63 + 0.066 \cdot |\vec{v}_{10, Wind}|) \cdot 10^{-3} .$$

Die Bodenschubspannung wird im Rahmen des BAW-Vorhersagemodells-Elbe in der aktuellen Version nach dem Chezy-Gesetz parametrisiert.

$$\vec{\tau}_{bottom} = \rho_{water} \cdot c_B \cdot |\vec{v}| \cdot \vec{v} ,$$

hierbei bezeichnet  $\rho_{water}$  die Dichte des Wassers und  $\vec{v}$  die horizontale Strömungsgeschwindigkeit. Für  $c_B$  gilt dabei

$$c_B = \frac{g}{C_z^2}, \quad \text{mit } g\text{-Erdbeschleunigung und } C_z\text{-Chezy-Wert}$$

Es sei darauf hingewiesen, dass die Wassertiefe in der Gleichung von Chezy nicht berücksichtigt wird. Die Auswirkungen eines veränderten Ansatzes für die Bodenschubspannung unter Berücksichtigung der lokalen zeitlich variablen Wassertiefe auf die Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und die Rechenzeit könnte in einem nächsten Schritt getestet werden.

Für die Dichte des Wassers wurde im Modell eine Parametrisierung der Zustandsgleichung verwendet, die nur die lineare Abhängigkeit vom Salzgehalt berücksichtigt und keine Temperaturabhängigkeit, da die Temperatur im Modell z. Zt nicht berücksichtigt wird.

$$\rho_{sea\ water} = \rho_{pure\ water} + 8.1744 \cdot 10^{-1} \cdot salinity + no\ further\ terms$$

Weitere verwendete Parameter sind die horizontale und vertikale Viskosität HVIS und VVIS

$$HVIS = 1.00000115\ m^2 / s ,$$

$$VVIS = 0.00000115\ m^2 / s + variable\ turbulente\ Viskosität$$

Beide enthalten Anteile aus molekularer und turbulenter Viskosität. Bei HVIS ist der turbulente Anteil konstant, bei VVIS ist der turbulente Anteil variabel und z. Zt. mit einem Mischungswegmodell in Anlehnung an Rodi [32] formuliert.

Für die horizontale und vertikale Diffusion HDIF und VDIF werden konstante Werte eingesetzt

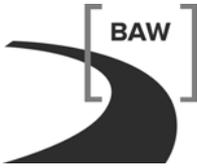
$$HDIF = 1.000001\ m^2 / s ,$$

$$VDIF = 0.002501\ m^2 / s .$$

Das Modellverfahren UnTRIM diskretisiert die zu lösenden Differentialgleichungen semiimplizit. Von uns wurde der folgende Implizitfaktor gewählt:

$$THETA = 0.7 ,$$

Der ursprünglich eingesetzte Implizitfaktor  $THETA = 0.6$  führte bei verschiedenen Ästuarzuständen (geringe Wassertiefe bei hoher Strömungsgeschwindigkeit) Schwingungen in der Lösung für die Wasserstände unterhalb des Wehres Geesthacht (siehe Abschnitt 8.3).



## 5 Modellentwicklung

Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe benötigt zu jedem Zeitschritt Informationen über den Wasserstand und den Salzgehalt am seeseitigen Rand. Diese Informationen werden vom Küstenmodell BSHcmod des BSH bereitgestellt. Die BAW hat in enger Zusammenarbeit mit dem BSH die benötigte Schnittstelle zwischen dem Küstenmodell des BSH (Grundlage BSHcmod, [16]) und dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe (Grundlage UnTRIM, [5]) konzipiert und entwickelt. Zusätzlich braucht das BAW-Vorhersagemodell-Elbe zu jedem Zeitschritt Informationen über die Windgeschwindigkeiten und die Windrichtungen über der Elbe. Für den präoperationellen Betrieb im BSH stehen dafür Vorhersagen aus dem COSMO – EU Modell des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung. Eine entsprechende Schnittstelle dazu wurde in enger Zusammenarbeit mit dem DWD, Teilprojekt OPTEL-B [18] in der BAW entwickelt.

Das gesamte BAW-Vorhersagemodell-Elbe ist in fortran90 [1] programmiert und modular aufgebaut. Die drei Bestandteile prep\_met, prep\_hyd und das Hauptprogramm rechnen unabhängig voneinander. Sie haben jeder ein eigenes executable (ausführbares Programm), das über eine Steuerdatei verschiedene Ausführungsvarianten erlaubt und damit flexibel ist. Das erleichtert die Übertragung auf andere Ästuare. Auch sind eventuell notwendige Erweiterungen jederzeit leicht möglich. Konkretere Ausführungen dazu finden sich in den Abschnitten 5.1, 5.1.2, 5.1.3 und 5.1.4.

Der Projektantrag sah vor zu untersuchen, ob frei verfügbare standardisierte Verfahren wie OpenMI (Open Modeling Interface) oder ESMF (Earth System Modeling Framework) vorteilhaft zur Modellkopplung der Vorhersagemodelle BSHcmod und COSMO-EU an UnTRIM2007 angewendet werden können.

Zu Beginn des Projektes OPTEL wurde deshalb geprüft, ob es möglich ist, die Randwertübergabe durch eine Modellkopplung auf der Grundlage von OpenMI (Open Modeling Interface), s. [4] und [22], zu realisieren. OpenMI stellt ein standardisiertes Interface bereit, das es numerischen Modellen ermöglicht, zur Laufzeit Daten zu jedem Zeitschritt miteinander auszutauschen. Mitgelieferte Tools übernehmen räumliche und zeitliche Interpolationen zwischen den Daten gekoppelter Modelle. Über ein Graphisches User Interface (GUI) lassen sich die verschiedenen Modelle zu Netzwerken oder Compositions zusammenfügen und steuern. Standardisierte Modellkomponenten lassen sich relativ einfach ersetzen, z.B. durch die eines anderen Anbieters.

OpenMI kompatible Modelle müssen in mehreren Phasen ablaufen, wobei jede Phase von außerhalb startbar ist. Das im Dezember 2010 eingeführte OpenMI 2.0 [22] erfordert noch fünf Phasen von der Initialisierungsphase bis zur Endphase. s. Bild 3.

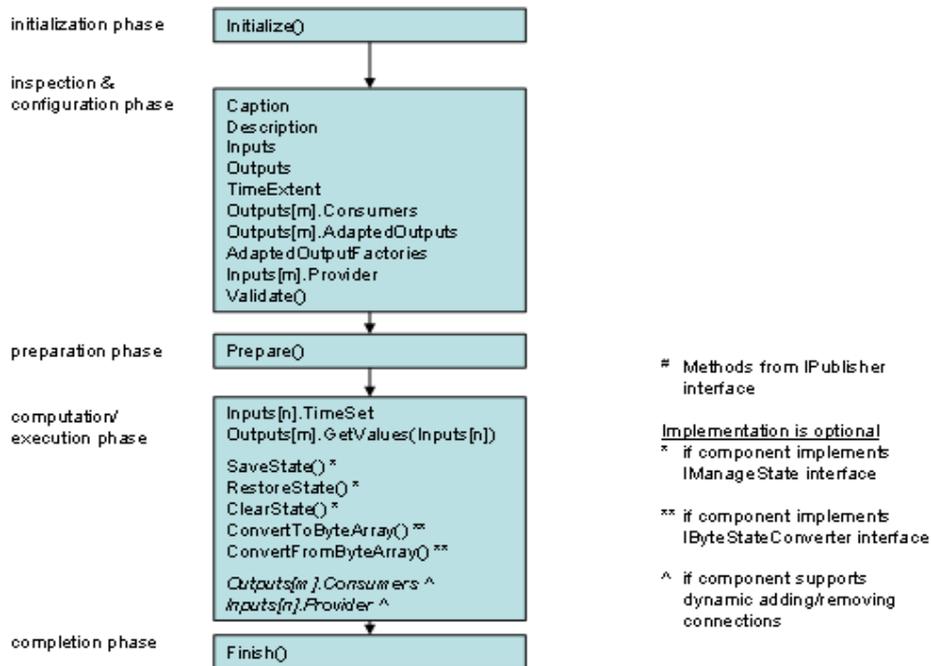


Bild 3: Phasen eines OpenMI-kompatiblen Modelles (OpenMI 2.0 Specification, [27] )

Auch in der Computation-Phase muss jeder Berechnungsschritt von außen getriggert d.h. angestoßen werden können, d. h. er darf nicht in einer internen Schleife gekapselt sein. UnTRIM hätte diese Bedingung bereits erfüllt, für BSHcmod wäre eine grundlegende Umstrukturierung nötig geworden.

Zu OPTEL – Projektbeginn lagen lediglich gesicherten Erkenntnisse über OpenMI auf Windows - Betriebssystemen vor. Es bestand noch keine Möglichkeit, die GEI (generic engine interface) auf dem Linux-Betriebssystem des BSH oder BAW Großrechners laufen zu lassen. Deshalb wurde im OPTEL Projekt entschieden, die Randwertübergabe klassisch mit Randwertdateien zu realisieren. Mittlerweile konnten mit Hilfe der Entwicklungsumgebung Mono und Java OpenMI-Implementierungen auf Betriebssystemen wie Linux realisiert werden [24], s. Bild 4. Tools für OpenMI 2.0 werden von vornherein auch für Mono entwickelt.

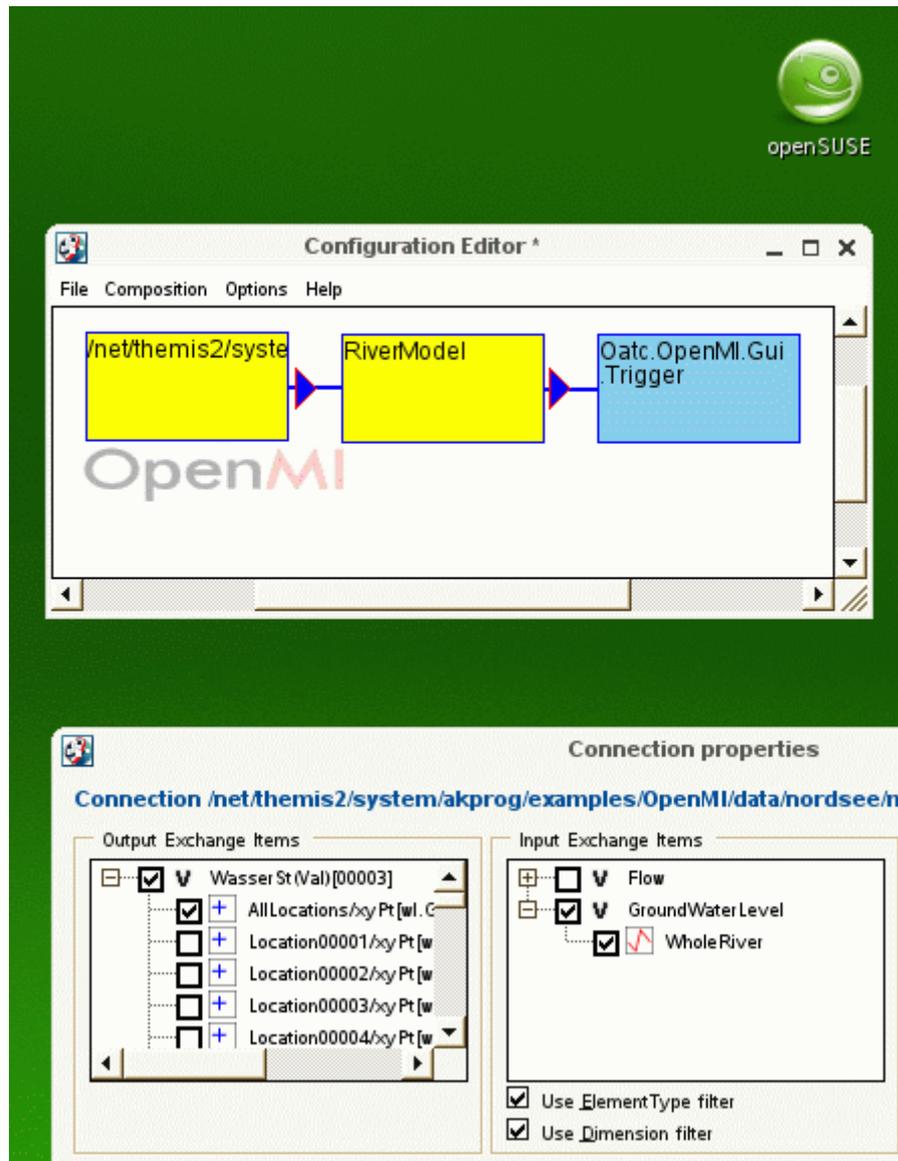


Bild 4: GUI Configuration Editor mit einer Composition aus Komponenten (oben) und den Eigenschaften der verknüpften Daten auf einem Linux-Betriebssystem.

## 5.1 Modellaufbau

Das operationelle Tidemodellsystem der Elbe besteht aus drei Programmpaketen, prep\_met, prep\_hyd und dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe (Hauptprogramm). Jedes Modellpaket erfüllt eine andere Aufgabe, läuft unabhängig und wird jeweils durch eine Steuerdatei gesteuert. Der aktuelle Oberwasserzufluss wird im Hauptprogramm aus einer Datei gelesen. Der hydrologische Präprozessor prep\_hyd ist die Schnittstelle des Hauptprogramms zu den hydrologischen Vorhersagen aus dem Küstenmodell BSHcmod. Der meteorologische Präprozessor prep\_met ist die Schnittstelle zu den meteorologischen Vorhersagen aus dem Modell COSMO-EU.

Diese beiden Präprozessoren kann man für beliebige Ästuare nutzen, indem man z.B. in der Steuerdatei von prep\_hyd den Gitternamen eines anderen Ästuars einträgt und den Namen einer entsprechenden Randwertedatei, erzeugt aus den entsprechenden Daten des Küstenmodells mit einem analogem Aufbau zur Randwertedatei für die Elbe. Passend dazu ist die Steuerdatei von prep\_met zu ändern, d.h. auch hier wird der Gitternamen des anderen Ästuars eingetragen, die Streifenkennzahl des Ästuars in Gauss-Krüger-Koordinaten wird angepasst und die WASP-Korrekturfaktoren werden abgeschaltet, da diese derzeit nur für die Elbe vorliegen.

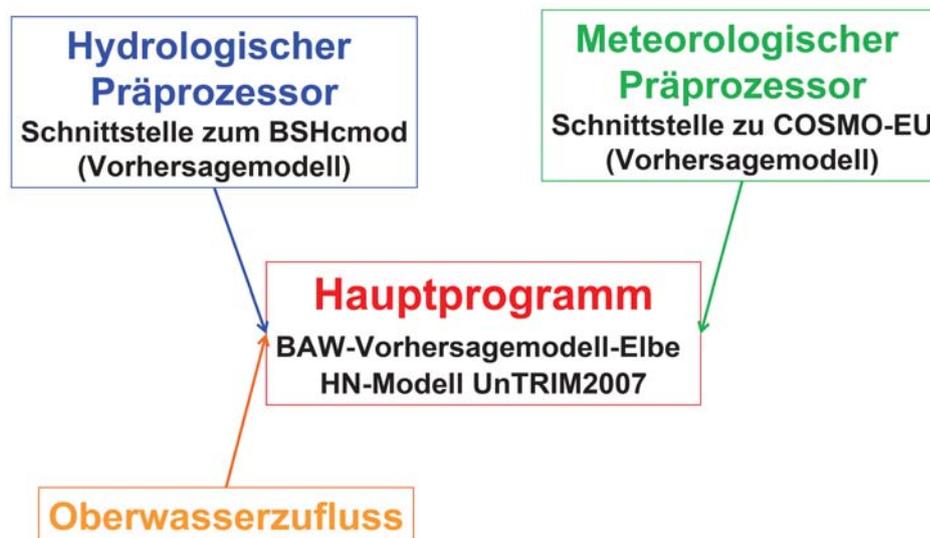


Bild 5: Schema des Modellaufbaus. Die beiden Präprozessoren laufen vor dem Hauptprogramm. Sie sind die Schnittstellen zwischen dem Hauptprogramm und den anderen beiden Vorhersagemodellen.

Das Hauptprogramm rechnet für die Elbe mit einem Zeitschritt von 100 sec. und kann als 2D und 3D -Modell laufen. Kalibriert wurde es als 3D Modell mit vertikalen Schichten einer Dicke von 2m und unter Berücksichtigung der WASP-Korrekturfaktoren, die unten noch beschrieben werden (s. Abschnitt 5.2.3). Mit 8 Prozessoren läuft das Hauptprogramm auf der SGI der

BAW für eine 12 h Vorhersage 25 Minuten und mit 5 Prozessoren auf dem IBM Rechner mit AIX Betriebssystem im BSH 40 Minuten.

### 5.1.1 Topografie und Gitter

Die Wahl von Topografie und Gitter hat Einfluss auf die Modellergebnisse. Zur Erstellung der hochaufgelösten Modelltopografie liegen Informationen über den morphologischen Zustand von 2006 (digitales Geländemodell DGM mit Grundlage Jahrespeilung 2006) vor. Da die Topographie der Elbe zeitlichen Änderungen unterworfen ist, ist vorgesehen, dass die Modelltopografie regelmäßig aktualisiert wird. Deutliche morphologischen Änderungen findet man z. B. im Bereich der Elbmündung am Medemsand und Medemgrund (Elbe km 710 bis Elbe km 730).

Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe berechnet seine Vorhersagen z. Zt. mit dieser Topografie 2006 ( siehe Bild 6). Unter Verwendung der gleichen Datengrundlage (DGM) wurde für das Projekt OPTEL-A eine Topographie auf einem regelmäßigen Elbmodellgitter des BSH mit 90 m x 90 m Auflösung von der BAW zu Verfügung gestellt.

Da bei hohem Oberwasserzufluss ( $> 1100\text{m}^3/\text{s}$ ) oder Sturmflut das Wehr Geesthacht gelegt wird, reicht das Modellgebiet bis Bleckede (s. Bild 6). Die Nebenflüsse der Elbe sind in der Modelltopographie z. Zt. nicht berücksichtigt. Sie werden bei Sturmflut durch Sperrwerke von der Elbe getrennt.

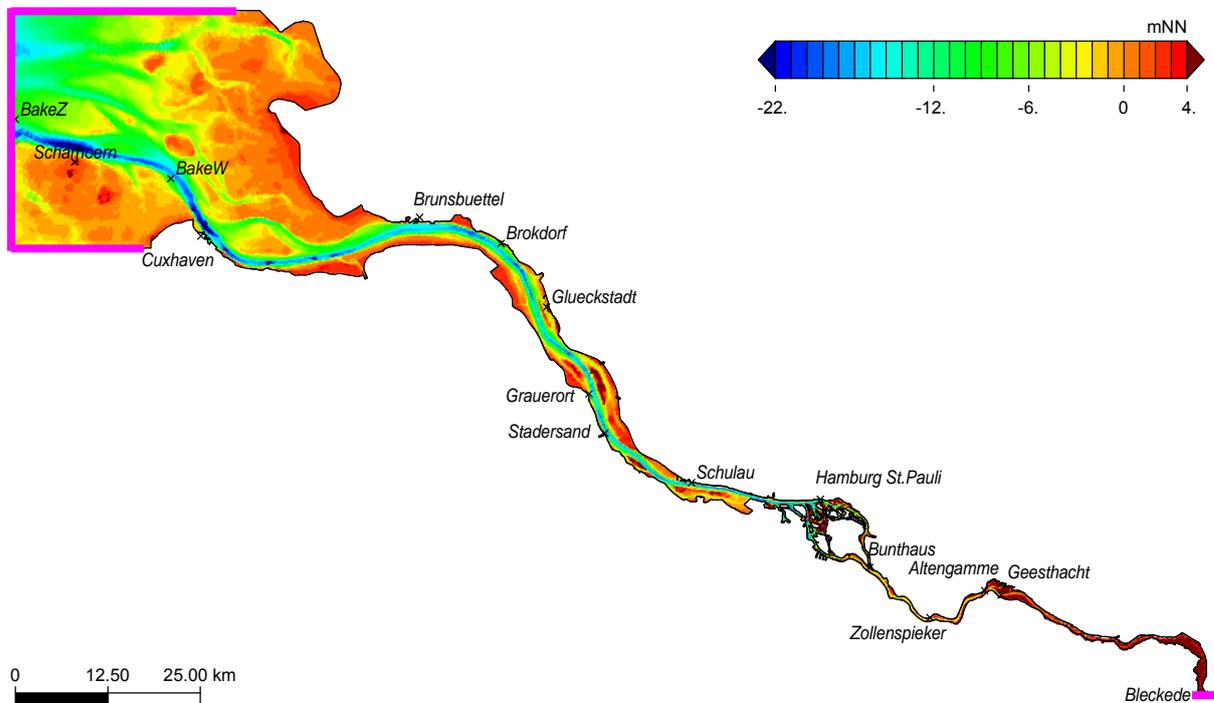


Bild 6: Topografie des HN-Modells des Elbe-Ästuares. Die Lage des offenen Randes zur Nordsee ist in Magenta gekennzeichnet. Der Oberwasserzufluss wird in Bleckede vorgegeben (ebenfalls in Magenta gekennzeichnet). Zusätzlich sind die Orte markiert, für die Wasserstandszeitreihen in den Szenarielläufen und im prä-operationellen Betrieb ausgegeben werden.

Das dem HN-Modell zugrunde liegende unstrukturierte orthogonale Gitternetz ist im vorliegenden Fall aus dreieckigen und viereckigen Gitterelementen (siehe Bild 7) aufgebaut und überdeckt das Modellgebiet vollständig. Dieses Gitter ermöglicht Gebiete von Interesse wie die Hafengebiete oder die Fahrrinne feiner aufzulösen als z. B. Wattgebiete. Gitternetz und räumliche Diskretisierung sind in Tabelle 1 näher beschrieben.

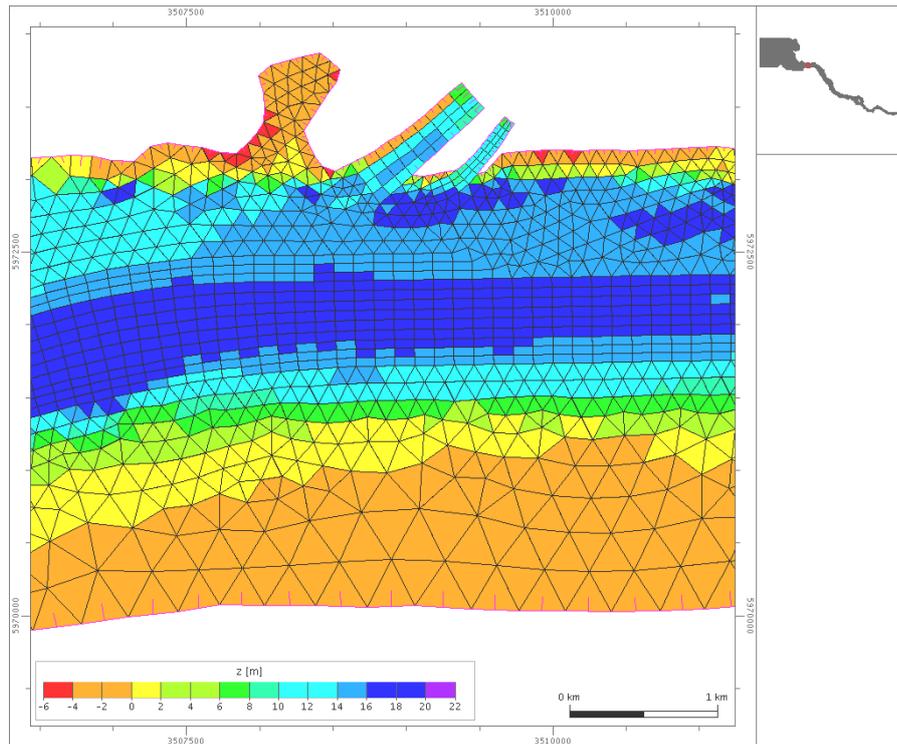
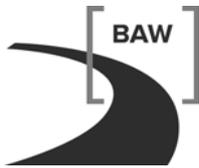


Bild 7: Ausschnitt aus dem unstrukturierten orthogonalen Gitter im Bereich von Brunsbüttel. In der Fahrrinne werden hier Rechtecke und in den Seitenbereichen Dreiecke verwendet. Die Farben kennzeichnen die Tiefe der Polygone.

|                            | 2d                | 3d                         |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|
| <b>Anzahl der Knoten</b>   | 75 065            |                            |
| <b>Anzahl der Kanten</b>   | 195 942           | 1 311 335                  |
| <b>Anzahl der Polygone</b> | 120 852           | 894 918                    |
| davon Dreiecke             | 99 269            |                            |
| davon Vierecke             | 21 583            |                            |
| <b>Kantenlängen</b>        | 12 m              | bis 1 131 m                |
| <b>Elementflächen</b>      | 75 m <sup>2</sup> | bis 860 000 m <sup>2</sup> |
| <b>Vertikale Auflösung</b> | -                 | 2 m                        |

Tabelle 1: Charakteristische Werte des Modellgitters des BAW-Vorhersagemodells-Elbe.



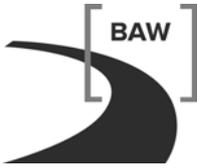
### 5.1.2 prep\_hyd

Das Programmpaket prep\_hyd hat die Aufgabe, die vom Küstenmodell (BSHcmod) bereitgestellten Randwerte für den nordseeseitigen Rand des BAW-Vorhersagemodells-Elbe aufzubereiten (s. Bild 5), damit diese Randwerte in das Hauptprogramm eingelesen werden können. Die aufbereiteten Daten werden im Moment im Binärformat (Direktzugriffsdateien) ausgegeben. Es ist auch eine Ausgabe im netCDF-Format angelegt, jedoch nicht ausprogrammiert. Network Common Data Format (NetCDF) ist ein Dateiformat für den Austausch wissenschaftlicher Daten. Da es ein in der Meteorologie, Ozeanographie und Geographie sehr weit verbreitetes Datenformat ist, trägt es sehr zur Vereinfachung des Datenaustausches zwischen verschiedenen Modellen bei, die Datenausgabe in diesem Format sollte hier bei Bedarf einfach zu ergänzen sein.

Die Auswahl des Ausgabeformates erfolgt in der Steuerdatei Nordsee\_Rand.inp. Aus dem Küstenmodell (BSHcmod) werden Wasserstand, Temperatur, Salz und die dazugehörige Tiefenschichtung in regelmäßigen Zeitabständen bereitgestellt. Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe berücksichtigt z. Zt. den Wasserstand und den Salzgehalt am seeseitigen Rand. Da sich im Ästuar keine stabile Salzsichtung ausbilden kann, wird der Salzgehalt des Küstenmodells (BSHcmod) in den Randpolygonen über die Wassersäule gemittelt und diese Mittelwerte werden in das Modell übernommen. Den größten Fehler, der bei dieser Art der Datenübertragung auftreten kann, macht man bei sehr hohen Oberwasserzuflüssen. Diese großen, relativ leichten Frischwassermengen werden stromab transportiert und bilden zeitweise oberflächennahe Frischwasserbereiche im Mündungsbereich. Mit welchem Effekt zu rechnen ist, kann man beim Vergleich der Salzgehaltszeitreihen von Szenario 1 und den Szenarien 2 und 3 abschätzen - vergleiche dazu die Abbildungen im Abbildungsteil zum Bericht, Gliederungspunkt 4. In prep\_hyd werden über eine Steuerdatei alle zur Rechnung notwendigen Daten eingelesen.

### 5.1.3 prep\_met

Das Programmpaket prep\_met hat die Aufgabe, die von einem Wettervorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes bereitgestellten atmosphärischen Antriebe auf ein Ästuargitter zu übertragen. Über die Steuerdatei Atmosphärische\_Antriebe.inp können alle zur Rechnung notwendigen Daten und Dateien eingelesen werden. In unserem konkreten Fall bedeutet das, die vom Vorhersagemodell COSMO-EU auf einem Gitter in geographischen Koordinaten bereitgestellten atmosphärischen Antriebe auf das Elbmodellgitter zu übertragen. Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe verwendet Gauß-Krüger Koordinaten. Aus dem Wettervorhersagemodell stehen Luftdruck, Lufttemperatur, zonale und meridionale Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe, spezifische Feuchte und der Gesamtbedeckungsgrad mit Wolken in stündlichen Werten zur Verfügung. Davon werden die Windgeschwindigkeiten, die Temperatur und der Luftdruck für das Hauptprogramm aufbereitet. Auch hier werden die Daten im Moment im Binärformat (Direktzugriffsdateien) ausgegeben. Die Ausgabe im netCDF-Format ist



auch hier angelegt aber nicht ausprogrammiert. Wie oben schon erwähnt, führt das BAW-Vorhersagemodell-Elbe z. Zt. keine Vorhersage der Wassertemperatur durch. Durch die geringe geographische Ausdehnung des Ästuars kann der Einfluss der Luftdruckunterschiede auf den Wasserstand vernachlässigt werden.

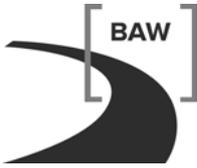
Die vom Teilprojekt OPTTEL-B bereitgestellten WAsP-Korrekturfaktoren für das COSMO-EU Modell (Auflösung ca. 7 km x 7 km, 72 Stunden Vorhersagezeitraum) sind implementiert, so dass die Windkomponenten für das BAW-Vorhersagemodell-Elbe auf einem Raster von 250 m x 250 m zur Verfügung stehen. Durch spezielle Rechenläufe wurde sichergestellt, dass alle 12 Felder der WAsP-Korrekturfaktoren fehlerfrei von prep\_met reproduziert werden. Dazu wurden die Abbildungen der Ergebnisse der speziellen Rechenläufe mit den entsprechenden Abbildungen aus dem Teilprojekt B verglichen. Auf die Darstellung der Abbildungen soll hier verzichtet werden. Im Bericht des Teilprojektes OPTTEL-B gibt es davon beispielhaft eine Abbildung (Bild 7 in [18]).

Um den Einfluß der atmosphärischen Antriebe auf die Modellergebnisse des BAW-Vorhersagemodells-Elbe herausarbeiten zu können, sind für den Präprozessor prep\_met über die Steuerdatei verschiedene Varianten zur Erzeugung des Windfeldes über dem Ästuar einstellbar:

1. für jeden Seitenmittelpunkt im Ästuar gitter werden die Windkomponenten des nächstliegenden Gitterpunktes des COSMO-EU Gitters übernommen.
2. auf jeden Seitenmittelpunkt des Ästuar gitters werden die abstandsgewichteten Windkomponenten der vier umliegenden Gitterpunkte des COSMO-EU Gitters interpoliert.
3. bei Verwendung der WAsP-Korrekturfaktoren wird zuerst wie unter Punkt 1 verfahren und danach die gefundenen Windkomponenten mit dem WAsP-Korrekturfaktor multipliziert, der dem entsprechenden Seitenmittelpunkt am nächsten liegt.
4. bei Verwendung der WAsP-Korrekturfaktoren wird zuerst wie unter Punkt 2 verfahren und danach die gefundenen Windkomponenten mit dem WAsP-Korrekturfaktor multipliziert, der dem entsprechenden Seitenmittelpunkt am nächsten liegt.

Zusätzlich ist es von Interesse, neben der flächenhaften Ausgabe des Windfeldes über dem Ästuar bei Bedarf auch Zeitreihen an ausgewählten Punkten zu bekommen. Dazu ist in die Steuerdatei als Typ des Ausgabeformates ‚ascii\_Zeitreihen‘ einzutragen und man bekommt die Zeitreihen an allen Orten, deren Koordinaten in die Datei wind.tsr eingetragen worden sind, Beispiele dazu siehe Bild 16 bis Bild 20.

Bezüglich des Einflusses der WAsP – Korrekturfaktoren auf das Windfeld und die modellierten Wasserstände sei hier auf die Abbildungen in den Abschnitten 5.2.3 und 6.2.3 verwiesen. Eine weitere Option, die man für die Windvorhersagen wählen kann, ist nur für Hindcast-rechnungen von Bedeutung. Unter der geforderten Eingabe ‚Name der Vorhersagedatei‘ in der Steuerdatei kann man anstelle des Namens einer Vorhersagedatei, mit der üblicherweise eine Vorhersage gerechnet wird, alternativ das Schlüsselwort ‚met\_vorhersageliste\_rein‘ verwenden. In dem Falle liest prep\_met aus einer Datei mit dem Namen ‚met\_vorhersageliste\_rein‘ immer nur die ersten 12 Vorhersagestunden aller dort zeilenweise eingeschriebenen Vorhersagedateien aus.



Vom Teilprojekt OPTEL-B des DWD sind neben den WASP-Korrekturfaktoren für das Wettervorhersagemodell COSMO-EU auch WASP-Korrekturfaktoren für das feiner auflösende Wettervorhersagemodell COSMO-DE bereitgestellt worden. Das COSMO-DE Gitter hat eine Auflösung von ca. 2.8 km x 2.8 km und der Vorhersagezeitraum beträgt 18 Stunden. Da diese Modelldaten im operationellen Betrieb des BSH noch nicht genutzt werden, ist der Gittertyp de (Vorhersagen aus COSMO-DE) nicht berücksichtigt worden. Da prep\_met modular aufgebaut ist, kann der Präprozessor ohne große Programmumstellung durch Hinzufügen weiterer Programmteile um die Berücksichtigung der COSMO-DE Vorhersage ergänzt werden.

Neben den Vorhersagen von COSMO-EU (Gittertyp eu) liest prep\_met auch die Vorhersagen des LM-Modells (Gittertyp lm), das u. a. ein etwas anderes Gitter und eine andere Polage als COSMO-EU hat und von diesem abgelöst wurde.

#### **5.1.4 Tideelbemodell**

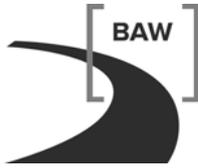
Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe (Hauptprogramm) berechnet Wasserstand, Salzgehalt und Strömungsgeschwindigkeiten auf einem 3D Gitter (s. a. Tabelle 1) mit einer Tiefenauflösung von 2 m. Die Ergebnisse werden sowohl dreidimensional im Binärformat ausgegeben, jeweils in einer Datei für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt, als auch im ASCII-Format als Zeitreihen für den Wasserstand an verschiedenen Orten von Interesse im Ästuar, an denen z. B. zum Vergleich Messdaten zur Verfügung stehen (s. Bild 6). Diese Orte wurden im Projekt vereinbart. Eine 2. Zeitreihenausgabe im ASCII-Format gibt Wasserstand, Salzgehalt und die 3 Geschwindigkeitskomponenten für die Strömung an anderen gewünschten Orten aus. Die Anzahl und die Koordinaten dieser Orte werden über die Datei untrim.tsr eingelesen und können bei jedem Lauf geändert werden. Es sind z. Zt. 24 Einträge vorgesehen. Aktuell wird diese Ausgabe genutzt, um die Salzgehalte und Strömungsgeschwindigkeiten aus dem Modell mit den Messwerten an den Langzeitmessstationen LZ und D während der Szenarienzeiträume zu vergleichen, s. a. Absatz 7.2 und 7.3. Das Hauptprogramm liest über eine Steuerdatei alle zur Modellierung notwendigen Daten ein.

### **5.2 Randwerte**

#### **5.2.1 Oberwasserzufluss**

Die Oberwasserzuflussdatei im präoperationellen Betrieb heißt oberw\_bfg. Unter diesem Dateinamen ist z. Zt. nur das Auslesen des aktuellen Oberwasserzuflusses in die Tideelbe möglich. Die aktuellen Abflüsse für Weser und Ems sind in dieser Datei jedoch auch enthalten. Der Dateiname oberw\_bfg ist im präoperationellen Betrieb in die Steuerdatei des Hauptprogramms steuerung\_optel.inp einzutragen.

Für Hindcastrechnungen und die Anwendung des Modells auf andere Ästuarare kann man in diese Steuerdatei den Namen einer entsprechenden Oberwasserzuflussdatei eintragen, die



die Daten des Oberwasserzuflusses für den Hindcastzeitraum und für das entsprechende Ästuar enthält.

### 5.2.2 Rand zur Nordsee

Beim Vergleich der Wasserstände aus den Randwertedateien für die Szenarien, erzeugt mit dem Küstenmodell (BSHcmod Version v4), und den Messungen an Bake A und Z hat sich gezeigt, dass es z. T. Abweichungen gibt, die diese Randwerte zur Modellkalibrierung ungeeignet machen. Deshalb wurden von der BAW für die Szenarien sz1, sz2, sz3 und sz5 aus dem Jahre 2006 für den nordseeseitigen Modellrand Wasserstandsrandwerte unter Verwendung geeigneter Übertragungsfunktionen aus der Messung bei Bake Z erzeugt. Die von HPA ausgewählten Szenarien wurde anschließend sowohl mit Randwerten aus dem Küstenmodell (BSHcmod) als auch mit den Randwerten aus den Messungen an der Bake Z durchgeführt. Die Auswahl der Randwerte erfolgte für die konkreten Läufe über die Steuerdatei Nordsee\_Rand.inp. Beim Vergleich der Ergebnisse wird vermittelt, welchen Einfluss die Wasserstände am Nordseerand auf die Modellergebnisse haben. Vergleiche dazu aus dem Abbildungsteil zum Bericht die Abbildungen 4 und 8, die Abb. 12 und 14, die Abb. 16 und 18 und die Abb. 22 und 24.

Da im BAW-Vorhersagemodell-Elbe z. Zt. keine Wassertemperaturvorhersage durchgeführt wird, ist in der Steuerdatei Nordsee\_Rand.inp auch das Einlesen des Randwertes Wassertemperatur nicht berücksichtigt. Wenn die Wassertemperatur, die aus dem Küstenmodell (BSHcmod) als Randwert zur Verfügung steht, in Zukunft berücksichtigt werden soll, muss neben der Steuerdatei auch das Modul mod\_sortiere\_randzellen.f90 erweitert werden. Das modul müsste dann um eine subroutine temperatur\_BSH erweitert werden, die analog zur subroutine salzgehalt\_BSH geschrieben werden kann.

Im Folgenden sind die gemessenen Wasserstände an Bake Z (hellblau) und Bake A (dunkelblau) dargestellt sowie der Wasserstand als Modelloutput (rot) aus dem Vorhersagemodell BSHcmod an der Bake Z für alle im Projekt vereinbarten Szenarien (Bild 8 bis Bild 13; vereinbarte Szenarien s. Tabelle 2).

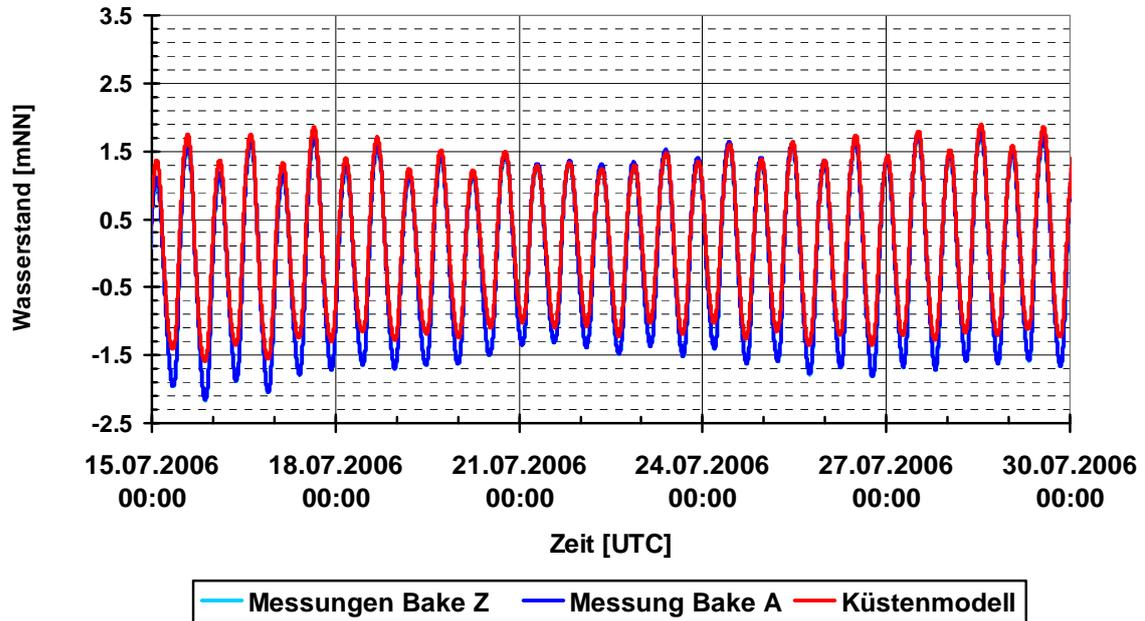


Bild 8: zeigt für Szenario 1 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt

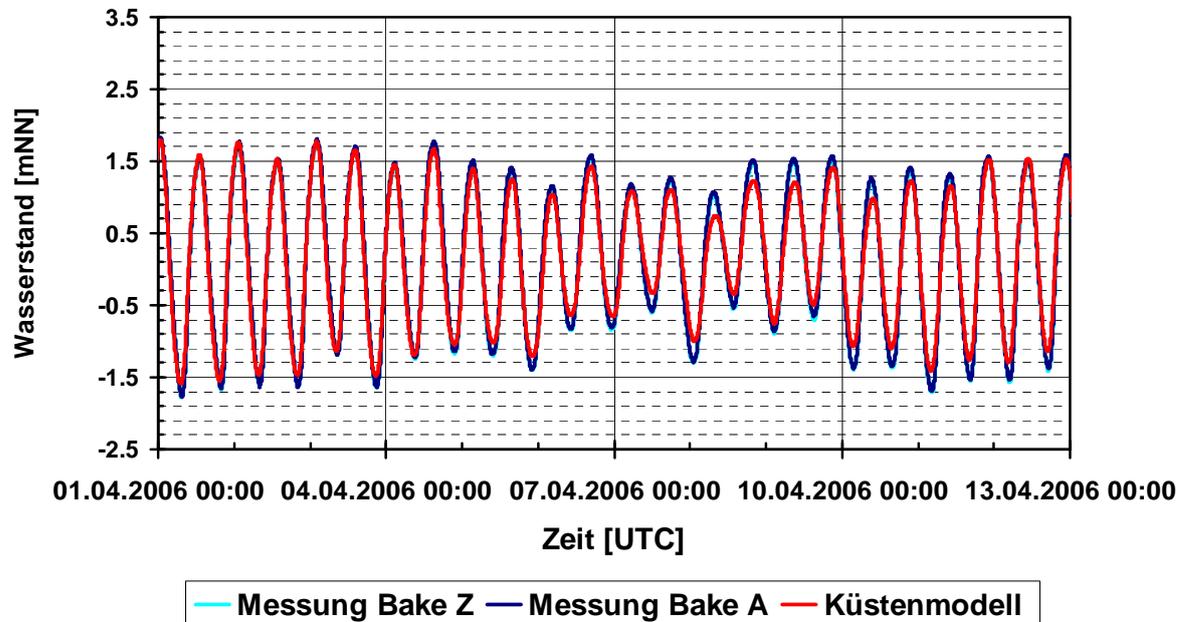


Bild 9: zeigt für Szenario 2 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt.

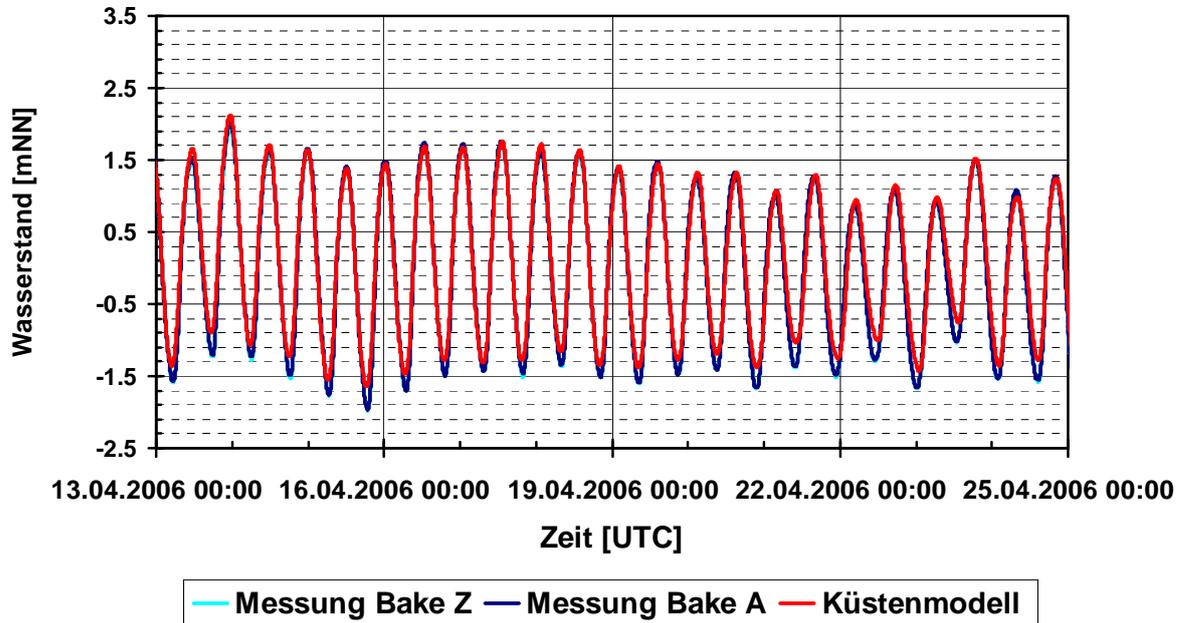


Bild 10 : zeigt für Szenario 3 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt.

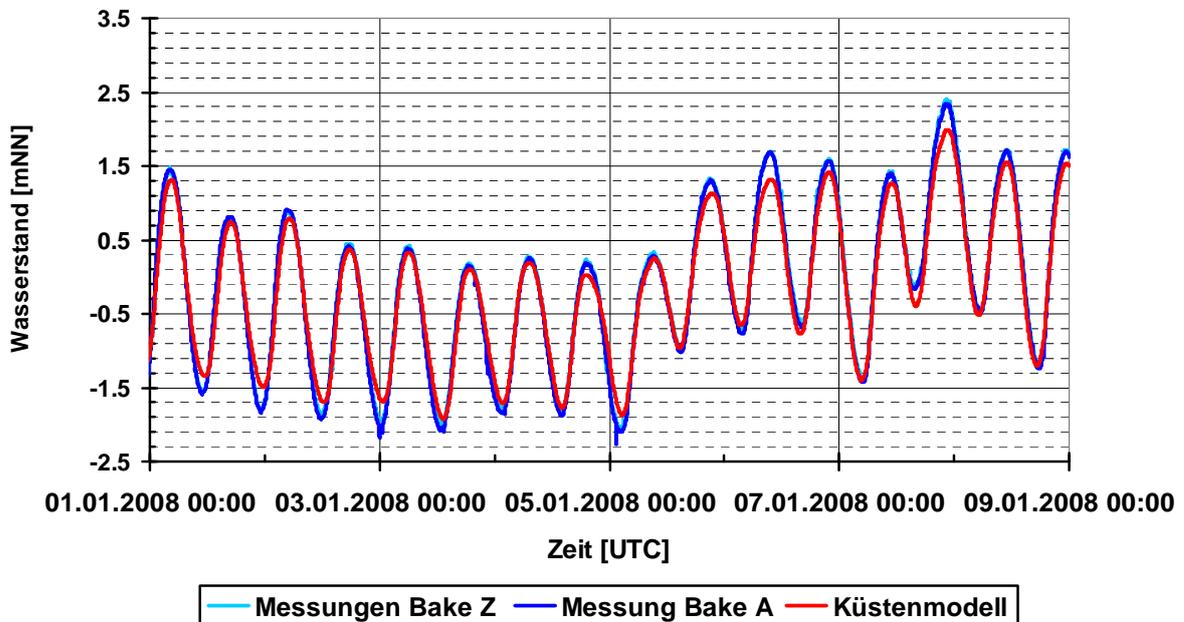


Bild 11: zeigt für Szenario 4 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt

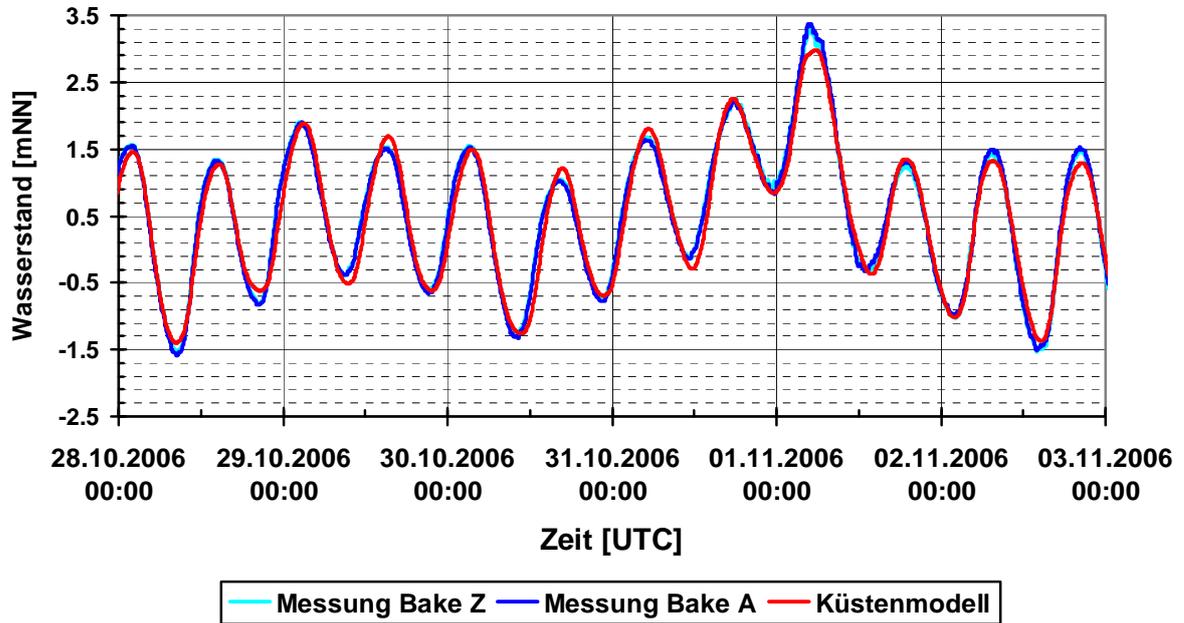


Bild 12: zeigt für Szenario 5 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt

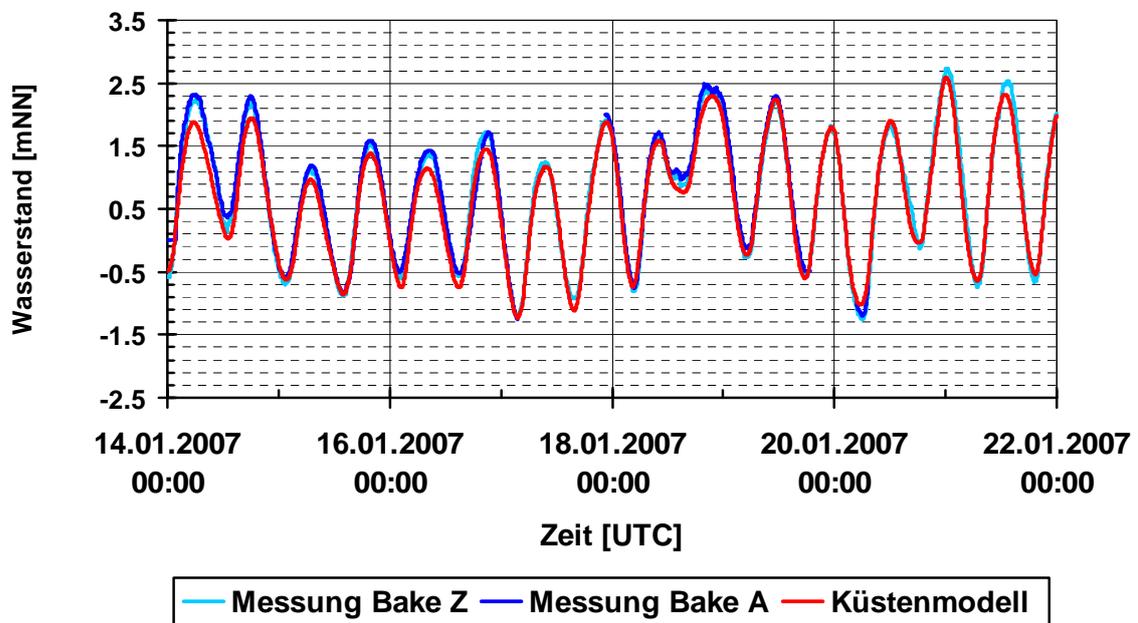


Bild 13: zeigt für Szenario 6 die gemessenen Wasserstände an Bake Z und Bake A und den vorhergesagten Wasserstand vom Küstenmodell in dem Modellvolumen, das Bake Z einschließt.

### 5.2.3 Atmosphärische Antriebe

Die WASP-Korrekturfaktoren ([40] und [18]) wurden eingeführt, um realistischere Windgeschwindigkeiten über dem Elbe - Ästuar zu erhalten. Durch die grobe Auflösung des Gitters für die atmosphärischen Antriebe sind die Windgeschwindigkeiten in Bereichen, in denen eine Gitterzelle nicht vollständig Wasser bedeckt, sondern auch Landanteile enthält, i. a. unterschätzt. Wir erwarten bei der Einführung der bereitgestellten WASP-Korrekturfaktoren eine windrichtungsabhängige Erhöhung der Windgeschwindigkeit über dem Ästuar.

Im Bild 14 sehen wir einen Vergleich von Windgeschwindigkeiten für südwestlichen Wind in der Elbemündung. Verglichen werden COSMO-EU Windgeschwindigkeiten, die einmal mit der Variante 1 aus 5.1.3 erzeugt wurden (linke Seite der Abbildung) und zum anderen dieselben Windgeschwindigkeiten nach der Korrektur mit den WASP-Faktoren (rechte Seite der Abbildung). Auf der rechten Seite der Abbildung wurde das Windfeld in dem Bereich, in dem es WASP-Faktoren gibt, mit der Variante 3 aus 5.1.3 erzeugt und am Rande des Modellgebietes wurde der Wind auf das Ästurgitter interpoliert. Man kann deutlich Flächen über dem Duhner Watt und zwischen Brunsbüttel und Brokdorf erkennen, in denen der Wind bei Berücksichtigung der WASP-Faktoren um z.T. 5 m/s höher geworden ist.

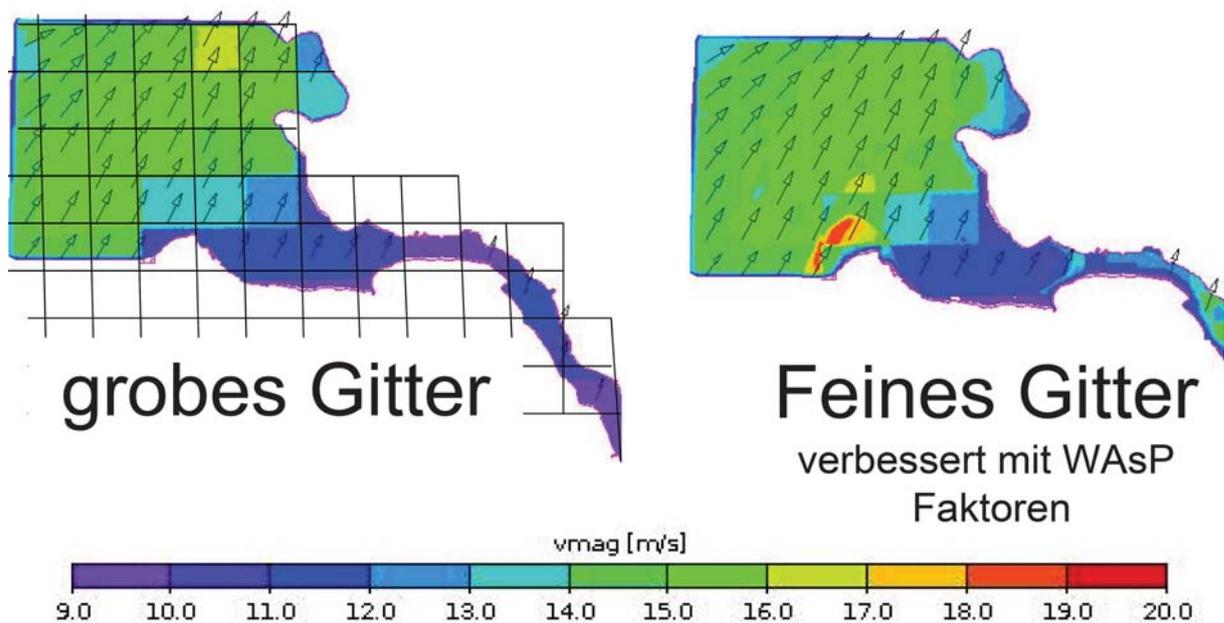


Bild 14: Windgeschwindigkeiten im Ästuar aus dem Wettervorhersagemodell COSMO-EU. Die linke Seite der Abb. zeigt die Windgeschwindigkeiten und Richtungen im COSMO-EU Gitter und die rechte Seite der Abb. zeigt das mit WASP-Faktoren korrigierte Windfeld.

Auch Bild 15 zeigt ein Windfeld über dem Mündungsgebiet der Elbe in Darstellung nach Rechnungen der Variante 1 aus 5.1.3. Zusätzlich zu den Windgeschwindigkeiten sind zwei Schnitte eingezeichnet. Der 1. Schnitt reicht von einem nördlichsten Punkt des Schnittes bis auf das Gebiet von Niedersachsen und der 2. Schnitt geht quer über den Mündungstrichter

der Elbe von Niedersachsen bis nach Schleswig-Holstein. In den folgenden Abbildungen, Bild 16 bis Bild 19, sind die Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten an den ausgewählten Punkten dieser Schnitte für den Zeitraum vom 31.10.2006 00:00 Uhr bis zum 03.11.2006 00:00 Uhr dargestellt. Dieser Zeitraum fällt in das Szenarium 5, siehe dazu auch Tabelle 2 und Abschnitt 6.2.3.

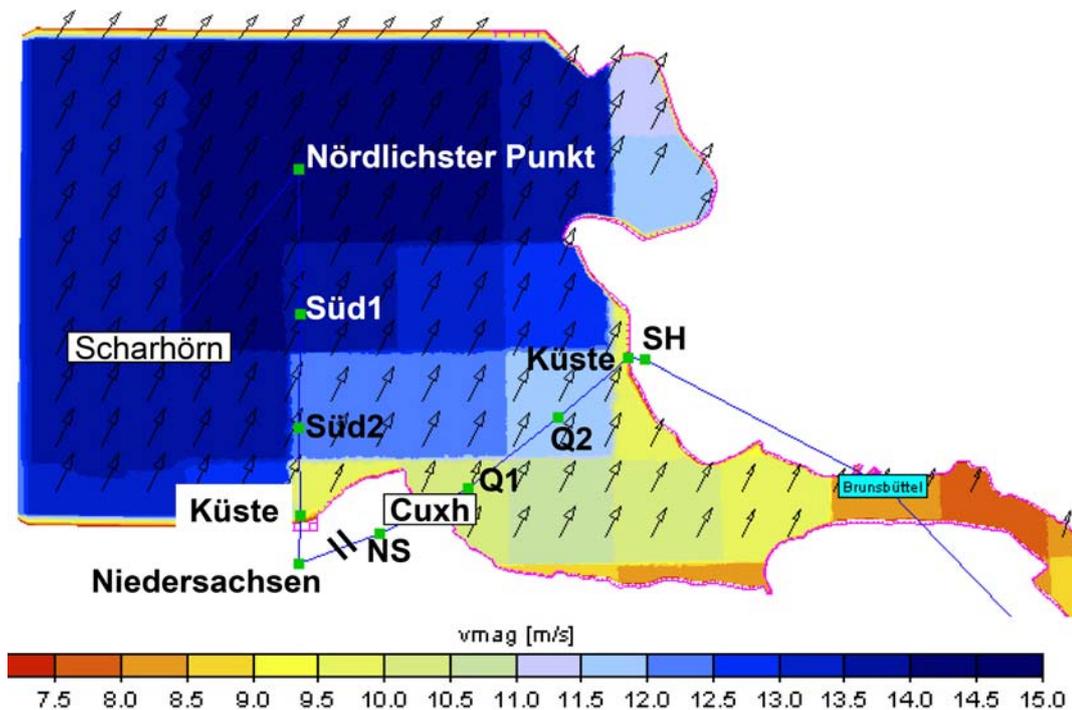


Bild 15: Windvorhersage mit Windwerten des nächstliegenden COSMO-EU Gitterpunkt

Im 1. Schnitt befinden sich drei der markierten Punkte in COSMO-EU Gitterzellen, die vollständig über dem Wasser liegen. Von den anderen beiden Punkten liegt einer ganz nahe an der Küste über Wasser und der andere über dem Land Niedersachsen. Im Bild 16 sind die Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten an den markierten Punkten für COSMO-EU Vorhersagen ohne WASP-Korrekturfaktoren abgebildet. Es sind nur 4 der erwarteten 5 Zeitreihen zu sehen. Die hellgrüne Kurve für die Zeitreihe des Küstenpunktes fehlt scheinbar. Die beiden südlichsten Punkte des 1. Schnittes liegen offensichtlich in einer COSMO-EU Gitterzelle und die dunkelgrüne Kurve des Landpunktes Niedersachsen liegt exakt über der hellgrünen des Küstenpunktes und überdeckt diese.

Die Ergebnisse der Rechnung zur Erzeugung der Zeitreihen unter Berücksichtigung der WASP-Korrekturfaktoren für den gleichen Schnitt sind in Bild 17 dargestellt. Wie erwartet unterscheidet sich jetzt die Zeitreihe des Küstenpunktes von der über dem Land Niedersachsen und hat auch höhere Windgeschwindigkeiten als diese. Wie zu erkennen ist, sind die Unterschiede der Windgeschwindigkeiten bei höheren Windwerten größer als bei kleineren. Bei Windgeschwindigkeiten unter 5 m/s gibt es kaum Unterschiede zwischen Zeitreihen über Land- und Wasserpunkten in beiden Fällen.

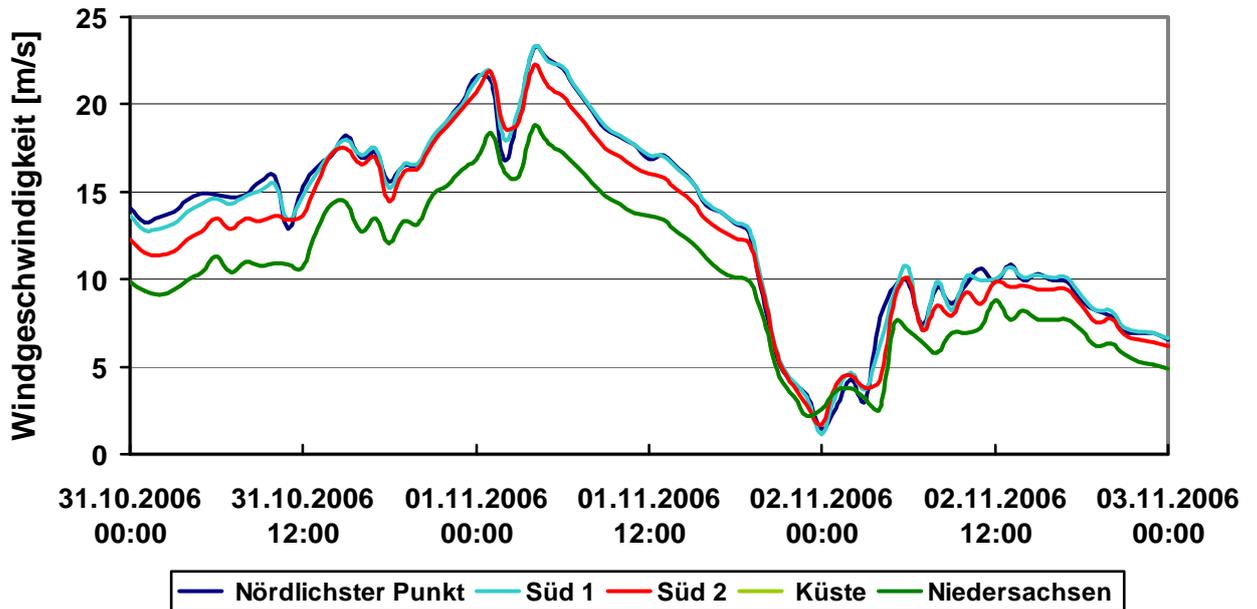


Bild 16: Windgeschwindigkeitszeitreihen von COSMO-EU an den markierten grün markierten Punkten in Bild 15 auf dem Schnitt Nördlichster Punkt – Niedersachsen, ohne WAsP-Korrekturfaktoren

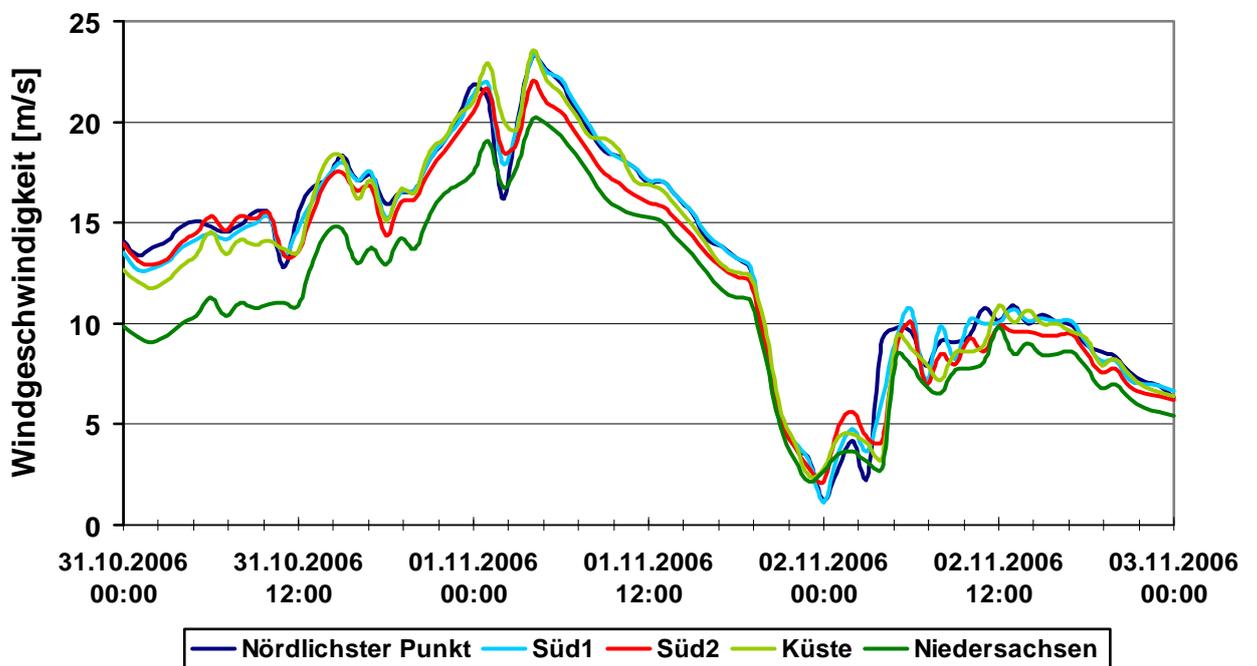


Bild 17: Windgeschwindigkeitszeitreihen wie im vorhergehenden Bild, aber mit WAsP-Korrekturfaktoren.

Im 2. Schnitt, dem Schnitt über den Mündungstrichter der Elbe, gibt es einen markierten Punkt mehr als in Schnitt 1. In der Abbildung für die entsprechenden COSMO-EU Zeitreihen

ist zusätzlich zu der Modell - Zeitreihe in Cuxhaven eine Zeitreihe aus Messungen für Cuxhaven eingefügt (Bild 18). Anstelle der erwarteten 7 Zeitreihen können wir hier nur 5 Zeitreihen unterscheiden. Zum einen wird die Modell - Zeitreihe für Cuxhaven von der Modellzeitreihe Q1 überdeckt, da beide in derselben Gitterzelle liegen. Ebenso haben wir gleiche Werte für die Zeitreihen des Küsten- und des Landpunktes in Schleswig – Holstein (SH). Beim Vergleich der Modellzeitreihe Cuxhaven (hellblaue Kurve, verdeckt durch die rote von Q1) mit den gemessenen Werten (schwarz gestrichelte Kurve mit blauen Kreisen) fällt auf, dass die Modellwerte in vielen Abschnitten höher liegen als die Messwerte. Die Berücksichtigung der WAsP – Korrekturfaktoren sollte auch hier zu Verbesserungen in den Windgeschwindigkeiten führen. Bild 19 zeigt dazu im Vergleich die entsprechenden Zeitreihen. Es ist zu beobachten, dass die beiden Zeitreihen Schleswig – Holstein (SH) und Küste SH jetzt zu unterscheiden sind und für die Zeitreihe am Küstenpunkt (hellgrün) höhere Windgeschwindigkeiten vorliegen als auf dem Landpunkt (dunkelgrün). Desgleichen sind jetzt auch die Zeitreihe Niedersachsen (NS, dunkelblau) und Cuxhaven (mittelblau) zu unterscheiden. Der Modellpunkt Cuxhaven wurde so gewählt, dass er beim Wind - Messmast Cuxhaven liegt. In Bild 19 liegen nun die Modellwerte von Cuxhaven näher an den Messwerten als in Bild 18, in dem die WAsP – Korrekturfaktoren beim Erstellen der Zeitreihen nicht berücksichtigt wurden.

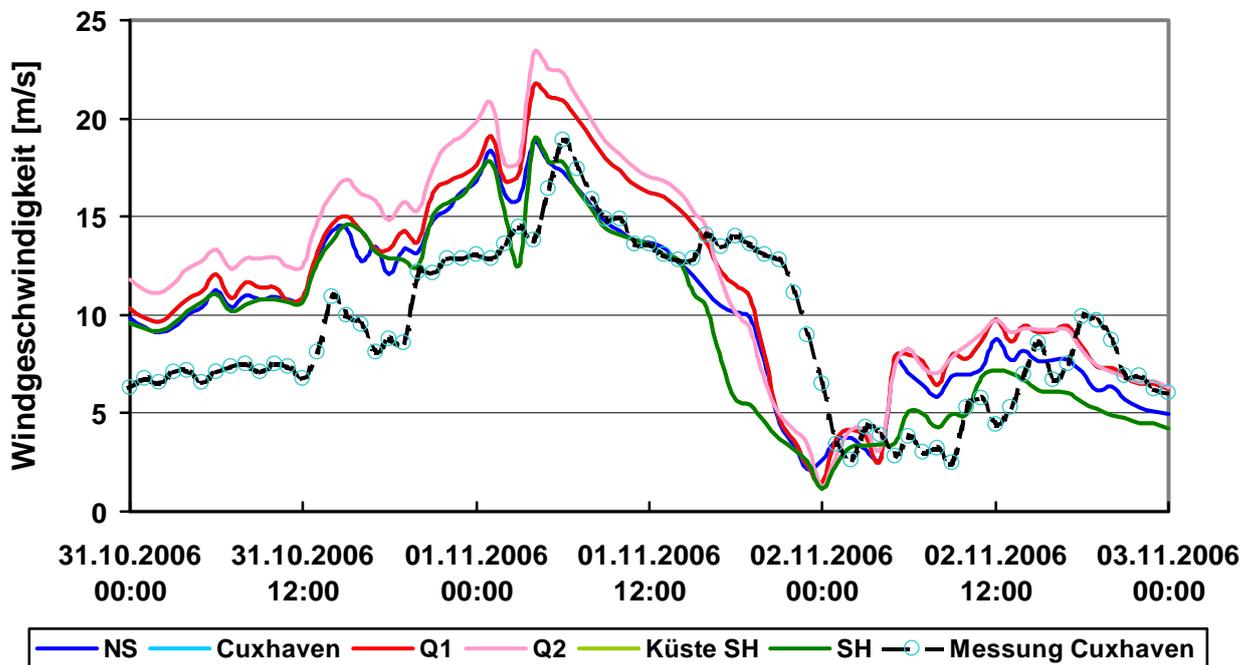


Bild 18: Windgeschwindigkeitszeitreihen von COSMO-EU an den grün markierten Punkten aus Bild 15 auf dem Schnitt von Niedersachsen nach Schleswig-Holstein, ohne WAsP-Korrekturfaktoren und eine Messung für Cuxhaven.

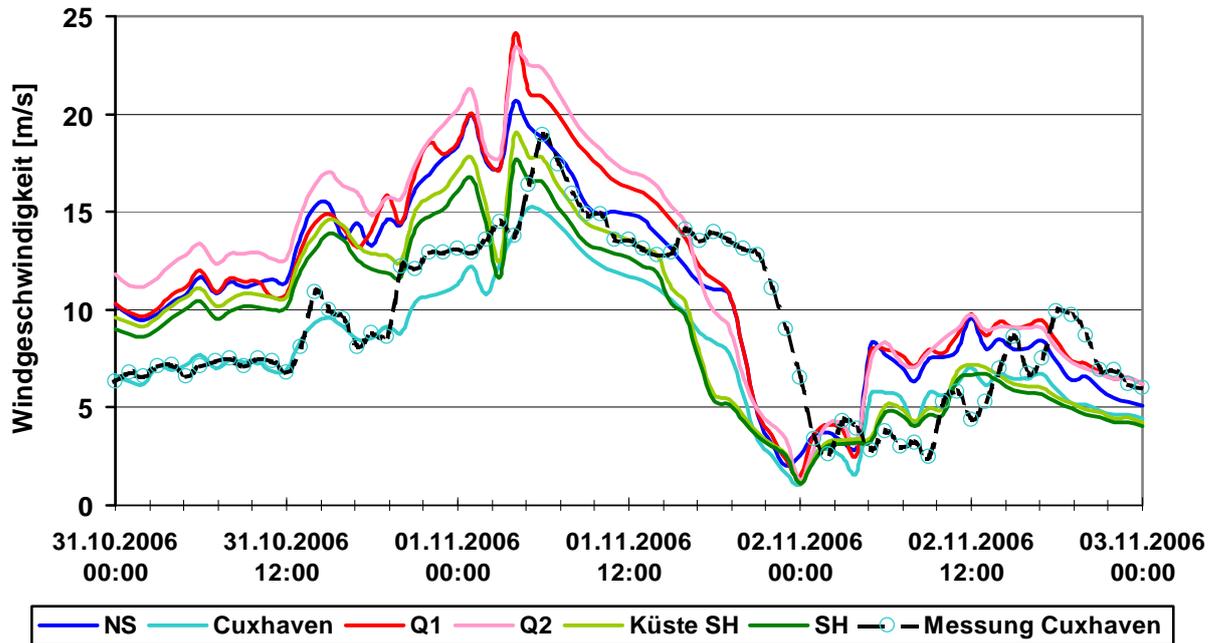


Bild 19: Windgeschwindigkeitszeitreihen wie im vorhergehenden Bild 18, aber mit WASP-Korrekturfaktoren.

Zu den Darstellungen der Windgeschwindigkeit gehören die Darstellungen der Windrichtung. Auf die Vollständigkeit dieser Darstellungen soll hier verzichtet werden und beispielhaft die Modell - Zeitreihen der Windrichtung für den Schnitt über den Mündungstrichter der Elbe und die Messung in Cuxhaven gezeigt werden. Siehe dazu Bild 20.

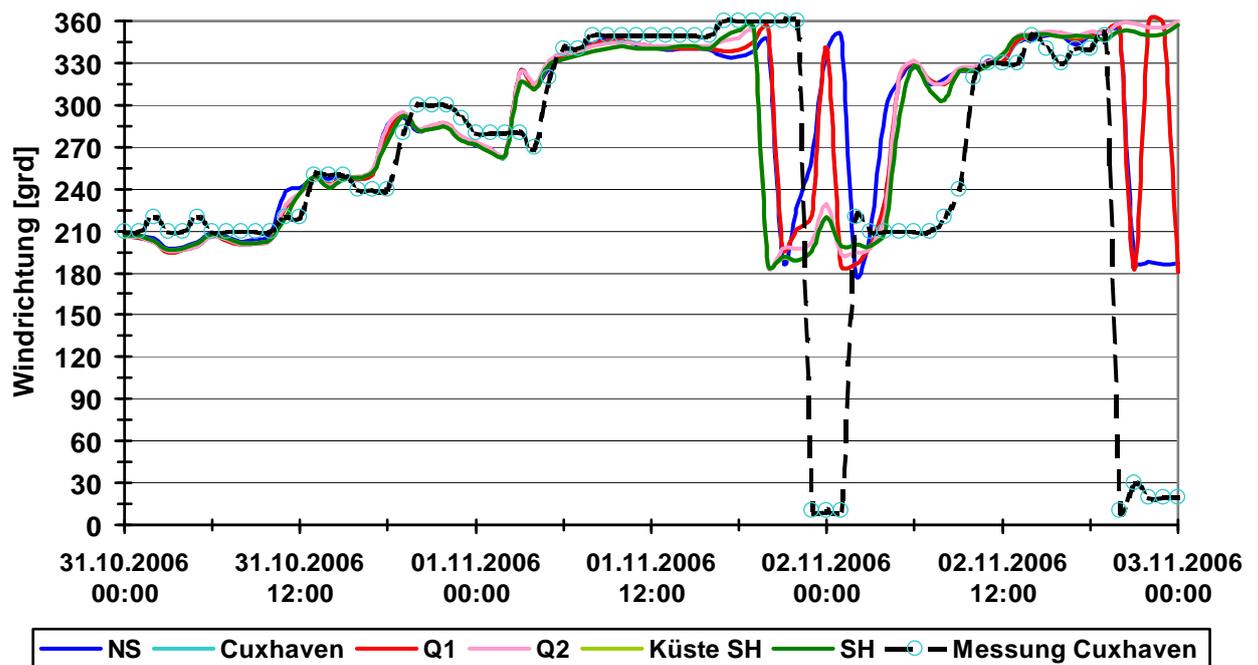


Bild 20: Windrichtungszeitreihe von COSMO-EU Vorhersagen für den Schnitt 2 über den Mündungstrichter der Elbe

### 5.3 Übertragbarkeit auf andere Ästuare

Das Projekt OPTEL ist u.a. eine Pilotstudie für das Jade-Weser- und das Ems-Ästuar. Im Projektantrag ist als Teilziel formuliert, dass die im Projekt OPTEL entwickelten Verfahren auch für die Ems und Jade/Weser einsetzbar sein sollen. Dieses Teilziel wurde bei der Modellentwicklung berücksichtigt, siehe dazu Gliederungspunkte 5 und 5.1. Getestet wurde die Übertragbarkeit auf andere Ästuare am Beispiel des Jade-Weser-Ästuars.

Voraussetzung für die Übertragbarkeit ist die Verfügbarkeit des Ästuargitters und die Bereitstellung der entsprechenden Randwerte. Zur Gewinnung der Randwerte „atmosphärische Antriebe“ wurde der Meteorologische Präprozessor über die dazugehörige Steuerdatei `Atmosphärische_Antriebe.inp` angesprochen. In der Steuerdatei wurde der Name des Elbe-Ästuargitters durch den Namen des Jade-Weser-Gitters ersetzt und die Verwendung der WASP-Faktoren ausgeschaltet, da derzeit für das Jade-Weser-Ästuar keine WASP-Korrekturfaktoren zur Verfügung stehen. Da keine Randwerte aus dem Küstenmodell zur Verfügung standen, wurde am seeseitigen Rand der Salzgehalt auf einen konstanten Wert gesetzt und als Wasserstandsrandwerte eine sinusförmige Funktion angenommen. Bild 21 zeigt beispielhaft eine Momentaufnahme aus dem Ergebnis des Simulationslaufes.

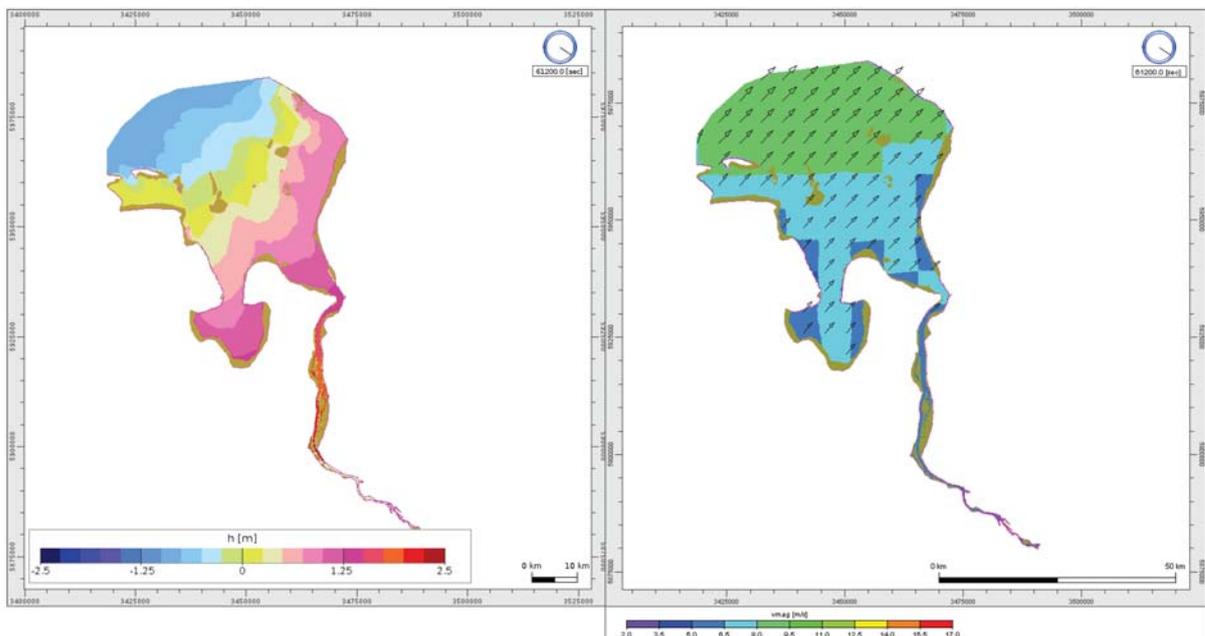


Bild 21 zeigt links den Wasserstand und rechts das Windfeld für das Jade-Weser Ästuar zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Diese Momentaufnahme zusammen mit zwei Animationen für den Wasserstand und die dazugehörigen atmosphärischen Antriebe belegen die einfache Übertragbarkeit auf andere Ästuare. Trotz alledem sind diese Modellergebnisse, auch mit Randwerten aus dem Küstenmodell, so nicht verwertbar, da die Kalibrierung und Validierung des Jade-Weser-Modells noch aussteht. Die Durchführung passte nicht in den Zeitrahmen des Projektes.

## 6 Kalibrierung und Validierung

Der Nutzung des BAW-Vorhersagemodells-Elbe im präoperationellen Betrieb geht die Kalibrierung und Validierung des Modells mit Szenarien aus der Vergangenheit voraus. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Weg von der Analyse der Realität über das konzeptionelle Modell und den Modellcode zum ortsspezifischen numerischen Modell (HN-Modell). Dessen Ergebnisse werden wiederum mit der Realität verglichen [34].

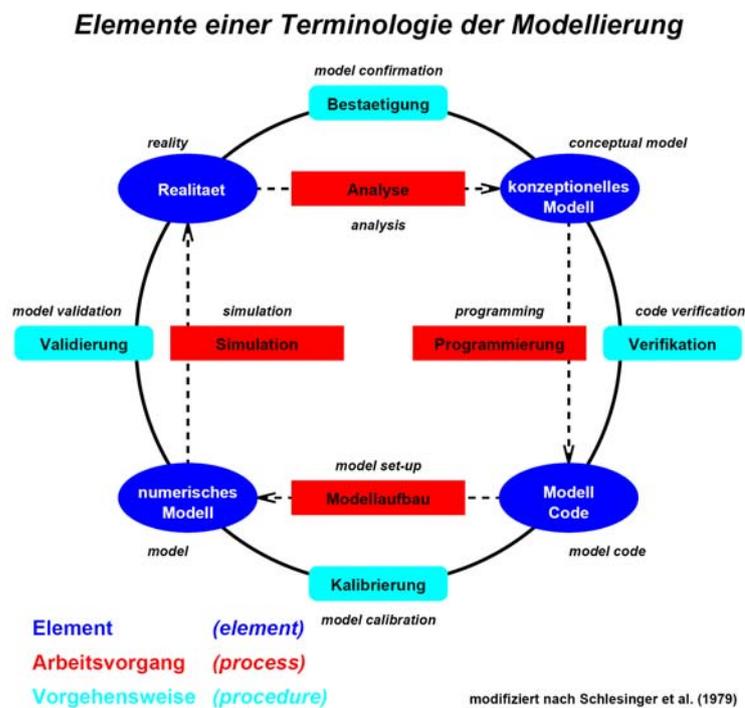


Bild 22: Elemente einer Terminologie der Modellierung (nach Schlesinger et al. [34])

### 6.1 Kalibrierung

Für die Modellkalibrierung werden verschiedene Parameter eines ortsspezifischen numerischen HN-Modells so angepasst, dass ein realitätsnahes Modellverhalten erzielt wird. Die Abweichungen zwischen Beobachtungsdaten und Modellergebnissen dürfen eine vorgegebene Genauigkeitsgrenze nicht überschreiten. Abweichungen können sich aus Messfehlern (Pegelmessungen, Peilungen) und aus Modellapproximationen und -parametrisierungen ergeben.

Mit der Modellvalidierung wird der Nachweis erbracht, dass die Ergebnisse des verwendeten numerischen Modells für das Anwendungsgebiet, hier das Tideelbegebiet, innerhalb des geforderten Genauigkeitsbereiches für die beabsichtigte Modellanwendung (hier Wasser-

standsvorhersage für die Tideelbe) liegen. Hierbei werden die bei der Kalibrierung ermittelten Parameter unverändert für andere Simulationszeiträume übernommen

Zur Kalibrierung des HN-Modells des Elbe-Ästuares werden gemessene Zeitreihen des Wasserstandes über den Zeitraum von einem Szenario (hier Szenario 1, s. Tabelle 2) mit den entsprechenden berechneten Zeitreihen verglichen. Wesentliches Ziel der Kalibrierung und Validierung ist es nachzuweisen, dass das HN-Modell, welches immer ein vereinfachtes Ersatzsystem der komplexen natürlichen Vorgänge darstellt, das Systemverhalten (Tidedynamik) im Untersuchungsgebiet richtig wiedergibt. Eine detailliertere Beschreibung der Validierung wird in Abschnitt 6.2 vorgestellt.

Für die Kalibrierung wurde das Jahr 2006 gewählt, in dem 4 von 6 im Projekt vereinbarten Szenarien liegen (s. Tabelle 2) und Randwerte für den Wasserstand aus Messungen an der Bake Z zur Verfügung stehen. Erfreulicherweise gab es im Jahre 2006 Zeitabschnitte sowohl mit mittleren Verhältnissen im Ästuar (Szenario 1), als auch mit extremen Ereignissen wie den Szenarien 2, 3 und 5, (s. a. Abschnitt 7). Im Folgenden sollen diese illustriert werden:

Das Bild 23 zeigt neben dem Oberwasserzufluss in Neu Darchau für das Jahr 2006 auch die Zeitintervalle, in denen besondere Bedingungen im Ästuar vorlagen.

Das Intervall mit den mittleren Bedingungen eignet sich besonders, um in diesem die Bodenreibungskoeffizienten zu wählen. Der Oberwasserzufluss ist dabei nahe dem Mittleren und aus Bild 24 ist zu entnehmen, dass der Impulseintrag aus der Atmosphäre vergleichsweise gering ist. Bild 27 zeigt die Bodenreibungskoeffizienten, die die geringsten Abweichungen der modellierten Wasserstände von den gemessenen entlang der gesamten Tideelbe zwischen Bake Z und dem Wehr Geesthacht Unterpegel ergeben haben. Es wurde darauf Wert gelegt, dass im Zweifelsfalle die Tidehochwasser Thw besser getroffen werden als die Tide-niedrigwasser Tnw.

Die gewählten Bodenreibungskoeffizienten müssen nicht nur für mittlere Verhältnisse im Ästuar genügend genaue Ergebnisse liefern, sondern in allen anderen Situationen, insbesondere auch bei Extremereignissen. Für die mittleren Verhältnisse wurde die Kalibrierung zunächst mit dem Gitter bis Geesthacht durchgeführt. Da bei den Extremereignissen das Wehr gelegt ist und das Modellgebiet bis Bleckede reicht, wurden die Szenarien 2, 3 und 5 dazu herangezogen die passenden Bodenreibungskoeffizienten für das Modellgebiet oberhalb des Wehres zu finden und kleinere Korrekturen auf dem Modellgebiet unterhalb des Wehres anzubringen. Das Ergebnis ist in Bild 27 zu sehen.

Das Zeitintervall „hoher Abfluss“ überdeckt die Szenarien 2 und 3. Szenario 2 beinhaltet den Zeitraum der stark ansteigenden Oberwasserwelle und das Szenario 3 den der langsam abnehmenden Oberwasserwelle und Bild 25 zeigt die Windgeschwindigkeiten in Scharhörn für dieses Zeitintervall.

Das Szenario 5 beinhaltet eine Sturmflut mit fülliger Windstaukurve. Die dazugehörigen Windgeschwindigkeiten in Scharhörn sind Bild 26 zu entnehmen.

Die Abbildungen Bild 24, Bild 25 und Bild 26 zeigen außerdem, wie sich die aus COSMO-EU vorhergesagte Windgeschwindigkeit für Scharhörn zu der dort gemessenen verhält, jeweils für die Vorhersagestunden 0 - 12.

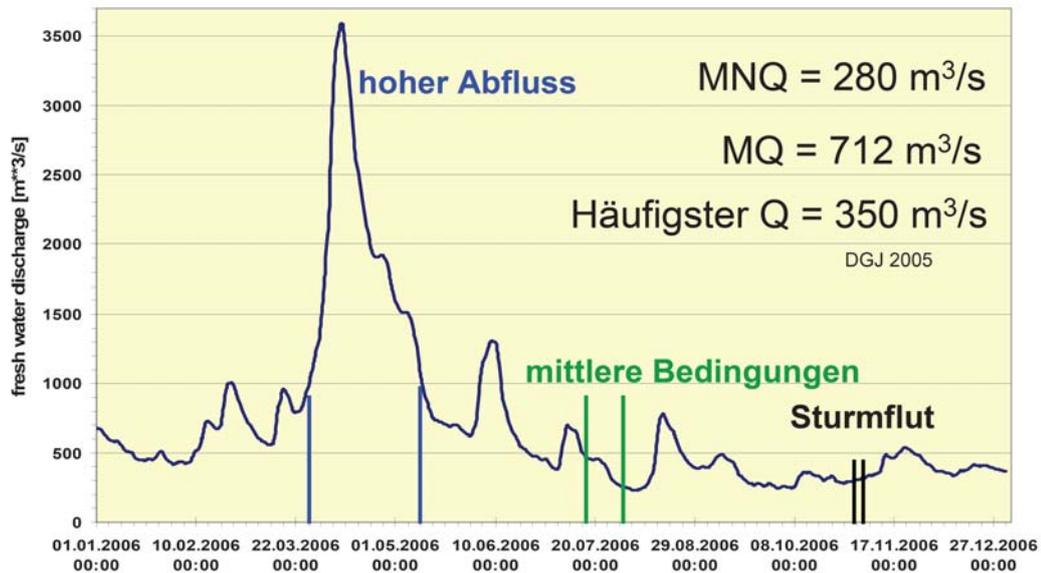


Bild 23: Zeitreihe des gemessenen Oberwasserzufflusses bei Neu Darchau 2006 in  $m^3/s$  (Elbe-km536), MNQ ist der mittlere niedrigste Abfluss und MQ bezeichnet den mittleren Abfluss [14].

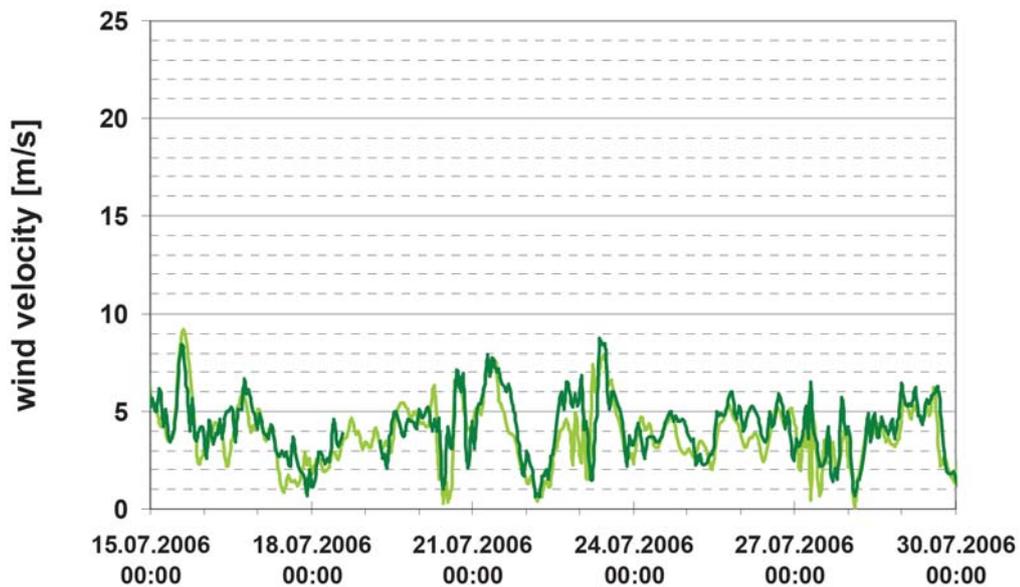


Bild 24: Windgeschwindigkeit in Scharhörn während der mittleren Verhältnisse (sz1) im Ästuar. **hellgrün** - Vorhersage aus dem COSMO-EU Modell, **dunkelgrün** - Messwerte.

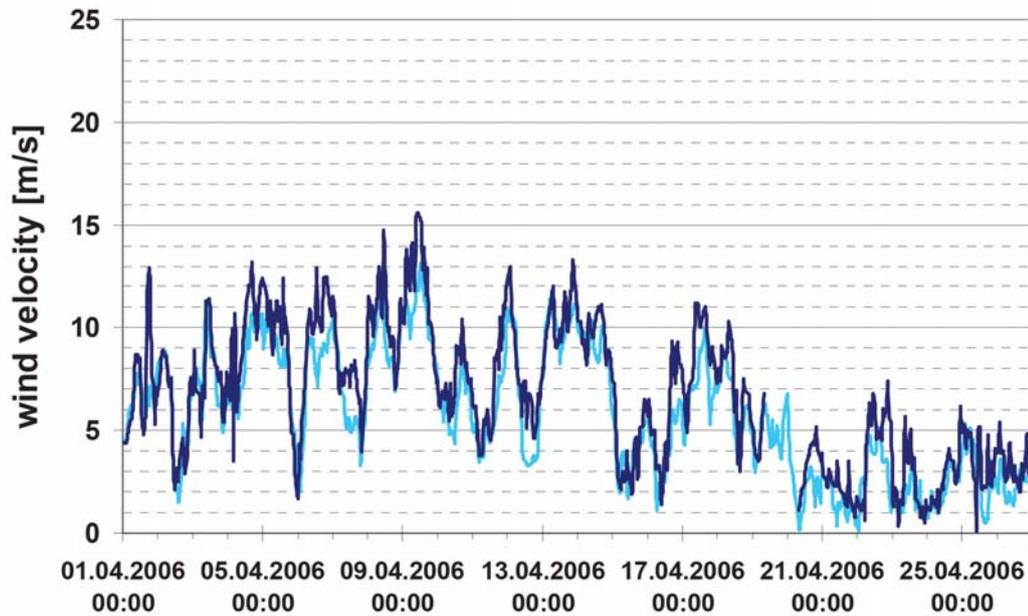


Bild 25: Windgeschwindigkeit in Scharhörn während des hohen Oberwasserzuflusses (sz2 und sz3) in das Tideelbe Ästuar. **hellblau** - Vorhersage aus dem COSMO-EU Modell **dunkelblau** - Messwerte

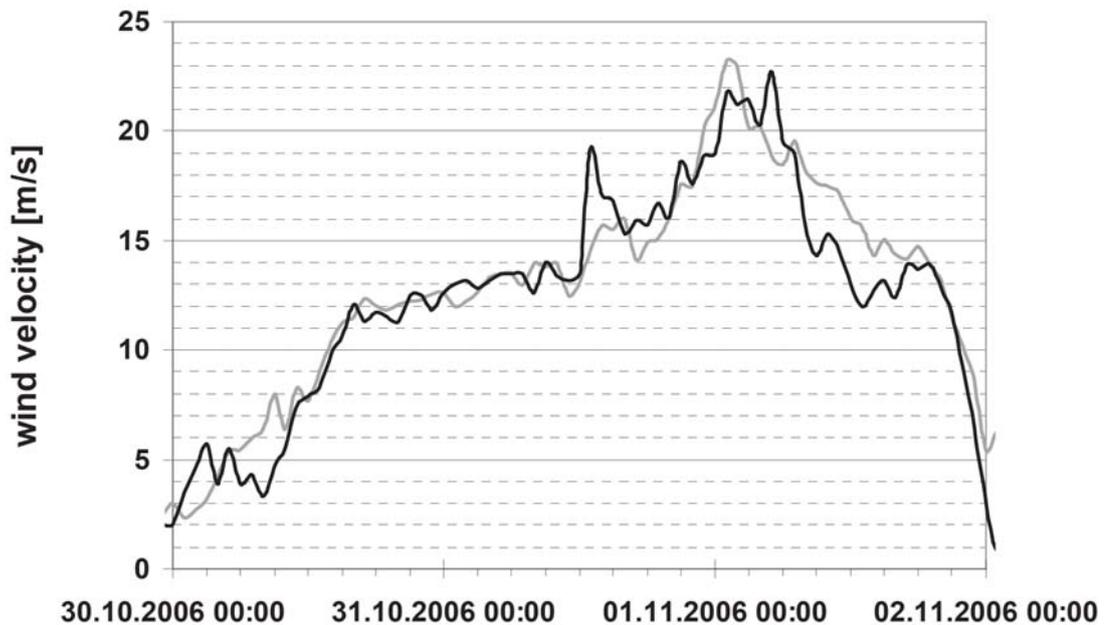
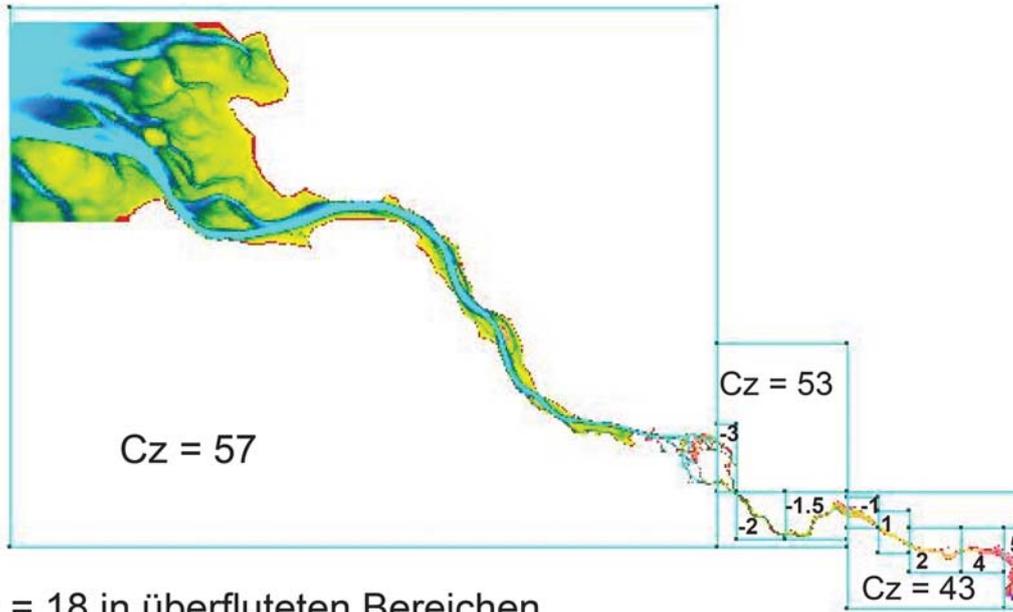


Bild 26: Windgeschwindigkeit in Scharhörn während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5). **hellgrau** - Vorhersage aus dem COSMO-EU Modell **dunkelgrau** - Messwerte



Cz = 18 in überfluteten Bereichen

Bild 27 Verteilung der Bodenreibungskoeffizienten im Modellgebiet. Es gibt 3 Hauptgebiete. Im mittleren und im östlichen Gebiet wird noch ein vierter Bodenreibungskoeffizient für höher gelegene Ästuarbereiche eingeführt. Die angegebenen Höhen sind m über NN.

## 6.2 Validierung

Mit der Modellvalidierung wird der Nachweis erbracht, dass die Ergebnisse des verwendeten numerischen Modells für das Anwendungsgebiet, hier das Tideelbegebiet, innerhalb des geforderten Genauigkeitsbereiches für die beabsichtigte Modellanwendung liegen. Hierbei werden die bei der Kalibrierung ermittelten Parameter unverändert für andere Simulationszeiträume übernommen.

Ziel ist es, für die operationelle Vorhersage naturnahe Ergebnisse zu erhalten, insbesondere die Abweichungen der Thw von den Messwerten im Bereich von  $\pm 10$  cm zu halten.

### 6.2.1 Statistische Auswertung

Um einen möglichst kompakten Überblick über die Abweichungen der modellierten Wasserstände von den Messwerten entlang des Elbe-Ästuars zu erhalten, wurden für alle Szenarien an 14 Pegelmessstationen die Mittelwerte aus den einzelnen Differenzen von Messwert minus Modellwert der Tidehochwasser Thw, der Tideniedrigwasser Tnw, des Tidehubes Thb, des Tidemittelwassers Tmw und der Eintrittszeiten von Tidehoch- und Tideniedrigwasser gebildet.

$$M_w = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right),$$

$$\text{Varianz} = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right)$$

$$\text{Std} = \sqrt{\text{Varianz}},$$

$M_w$  - Mittelwert

$x_i$  - Differenz des i-ten Vergleichspaares *Messwert – Modellwert*

$n$  – Anzahl der Differenzen im Auswertungszeitraum

$\text{Std}$  - Standardabweichung

Diese Mittelwerte werden szenarienweise mit den entsprechenden Standardabweichungen für das Thw, Tnw, Thb und Tmw im Abbildungsteil zum Bericht unter dem Gliederungspunkt 2 präsentiert.

Anders in den folgenden Abbildungen. In Bild 28 bis Bild 31 sind in je einer Abbildung jeweils die Mittelwerte der beschriebenen Differenzen für die Thw, die Tnw und die Eintrittszeiten der Thw und Tnw der Szenarien, die in das Jahr 2006 fallen, zusammengefasst. Die wesentliche Gemeinsamkeit der Ergebnisse liegt in den Randwerten für den Wasserstand, die alle aus den Messungen an Bake Z abgeleitet wurden, und den meteorologischen Vorhersagen, von denen ausschließlich die ersten 12 Vorhersagestunden verwendet wurden. Ersteres lässt sich leicht an den Werten der Pegelstation Bake Z erkennen, denn dort sind die Differenzen und damit auch die Mittelwerte der Differenzen immer 0. Szenarienrechnungen mit späteren Vorhersagestunden (13 – 72) aus den meteorologischen Vorhersagen zu Vergleichszwecken konnten aus Zeitgründen nicht gemacht werden.

Bild 28 zeigt, dass die Abweichungen der modellierten Thw von den Messwerten für die Hindcastrechnungen im gewünschten Bereich von  $\pm 10$  cm liegen. Für die Tnw liegen die Abweichungen im Bereich von  $\pm 40$  cm und damit deutlich höher. Das ist vorzugsweise den Szenarien 2 und 3 geschuldet (steil ansteigende Oberwasserwelle und langsam abnehmende Oberwasserwelle) im Bereich oberhalb von Bunthaus. Während für alle Szenarien das Niedrigwasser im Modell im Mittel nicht weit genug absinkt, verkehren sich die Verhältnisse oberhalb von Bunthaus für Szenario 2 und 3. In diesem Bereich sind auch die Standardabweichungen besonders hoch, vergleiche dazu Bild 12 (Szenario 2) und Bild 16 (Szenario 3) im Abbildungsteil zum Bericht. Auch die Abweichungen der Eintrittszeiten für Thw bzw. Tnw übersteigen dort für Szenario 3 bzw. Szenario 2 den Rahmen von 20 bzw. 30 Minuten.

In diesem Zusammenhang sei auf die Bedeutung der Randwerte für den Wasserstand am seeseitigen Rand hingewiesen, vergleiche dazu die Abbildungen Bild 32 bis Bild 35. Dort lassen sich für die verschiedenen Szenarien verschiedene Mittelwerte der Abweichungen Messung – Modell an der Bake Z beobachten. Die Abweichungen an der Bake Z bei den Thw (Bild 32) liegen zwar noch im gewünschten Bereich von  $\pm 10$  cm, aber entlang des gesamten Ästuars vergrößert sich der Bereich der Abweichungen von den anfänglichen 20 cm

auf ca. 40 cm. Für die anderen drei untersuchten Tidekennwerte fällt der Vergleich ähnlich aus (Bild 33 bis Bild 35).

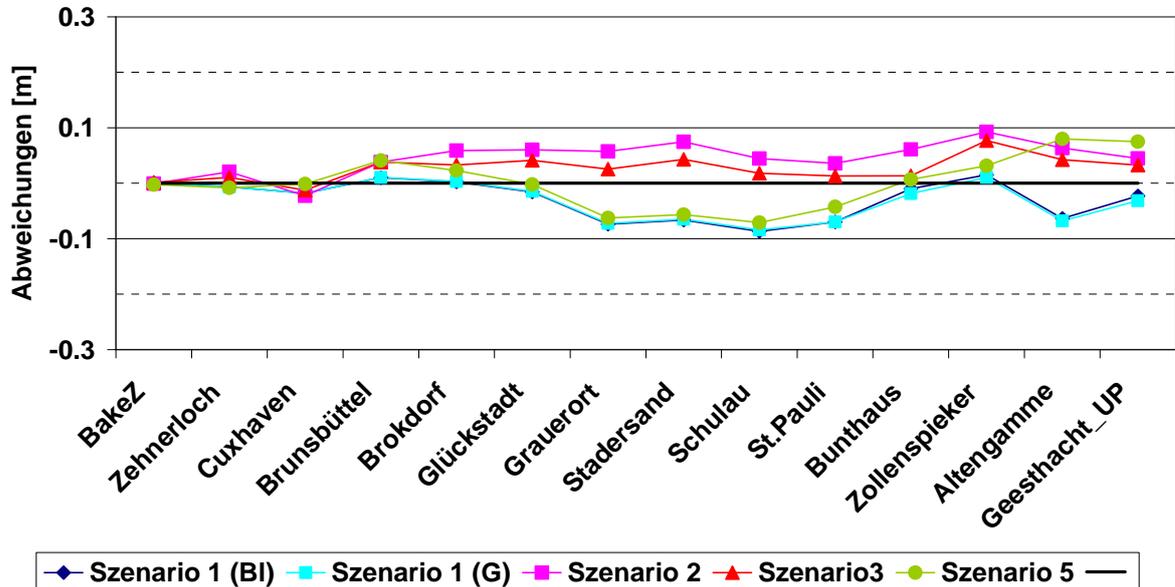


Bild 28: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Thw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.

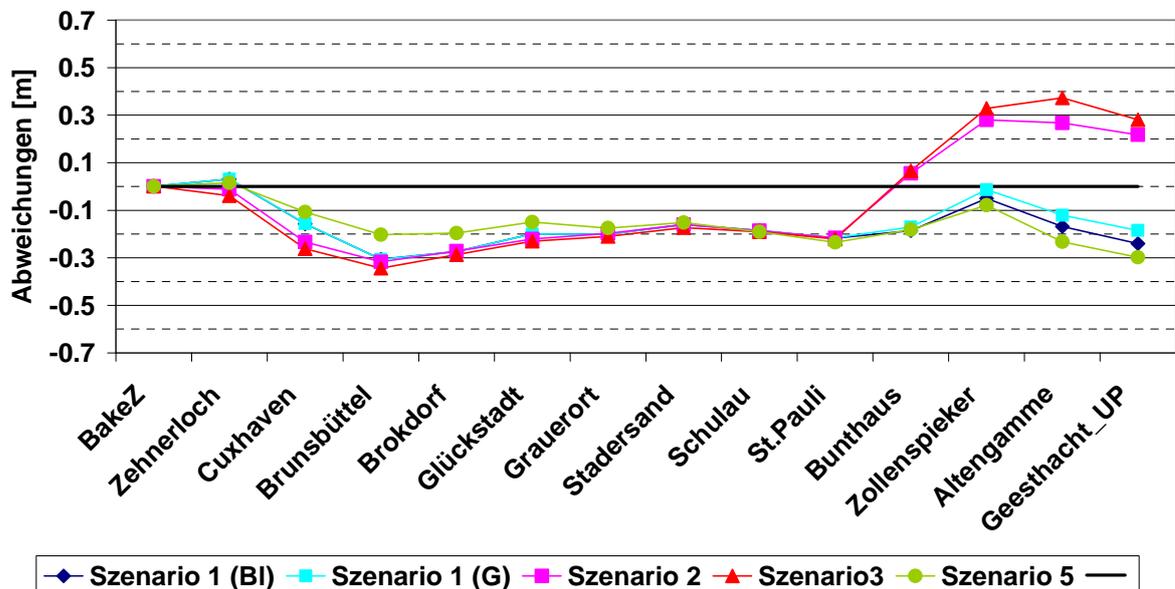


Bild 29: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Tnw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.

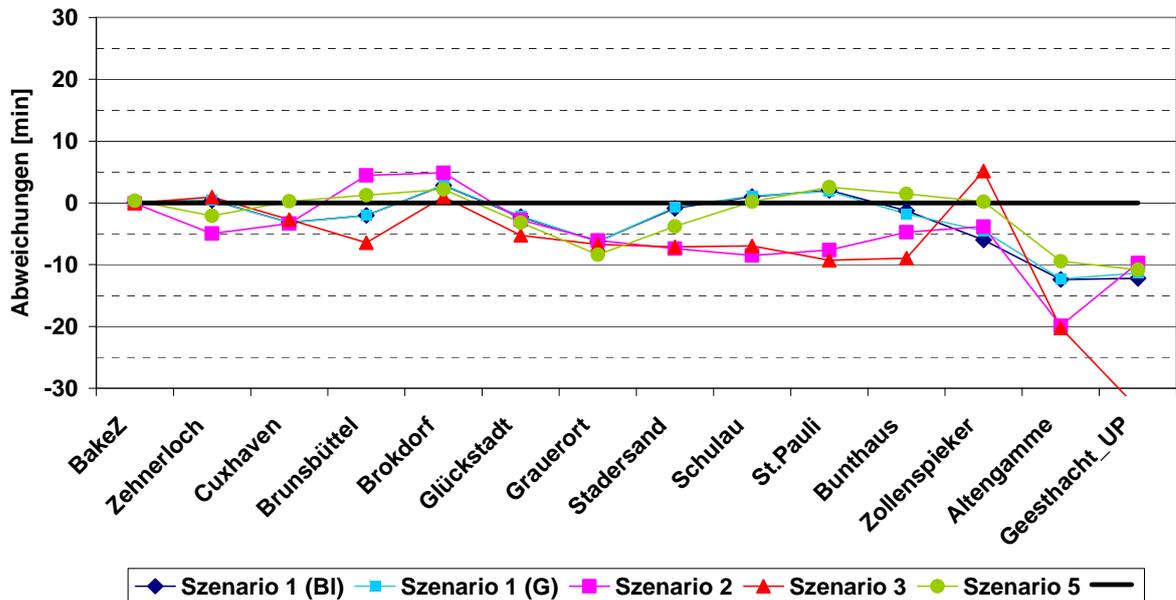


Bild 30: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit Thw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.

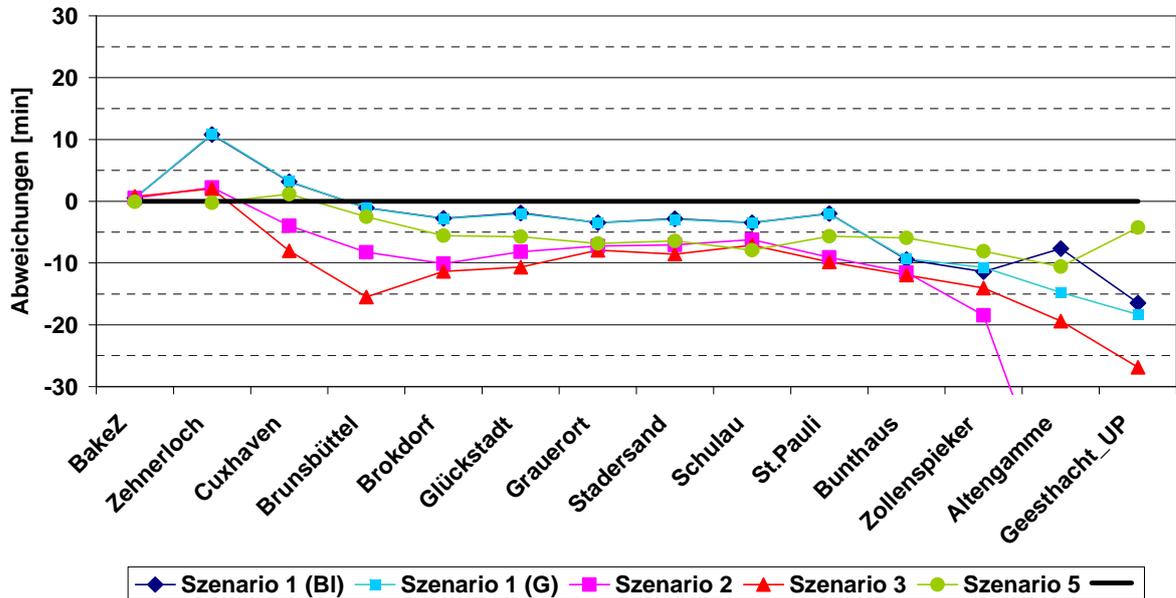


Bild 31: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit Tnw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand, die aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden.

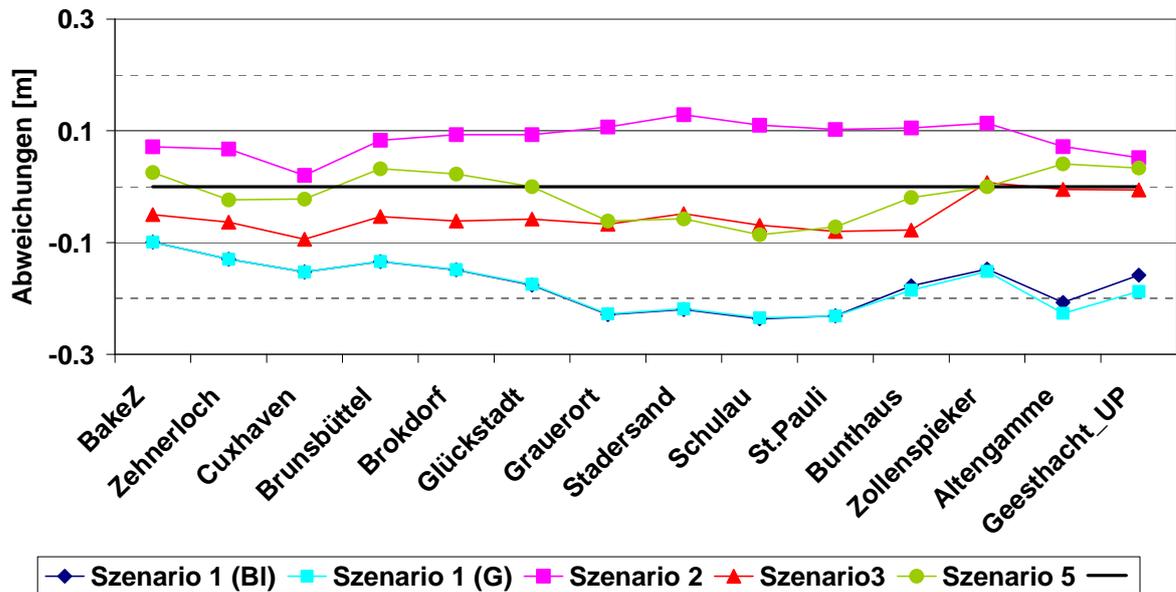


Bild 32: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für das Thw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.

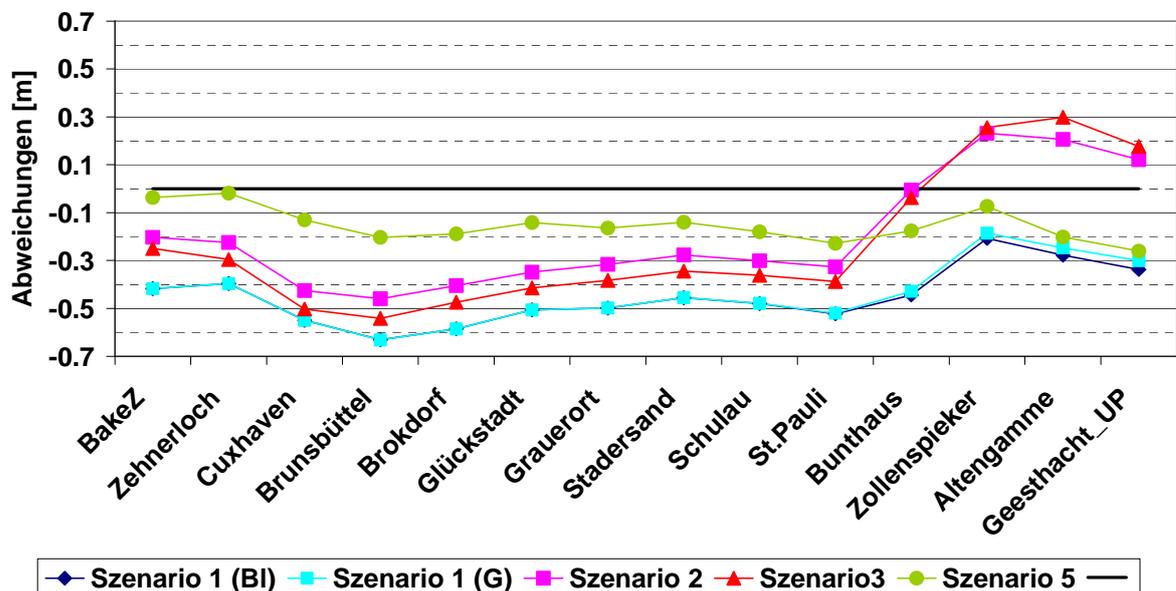


Bild 33: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für das Tnw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.

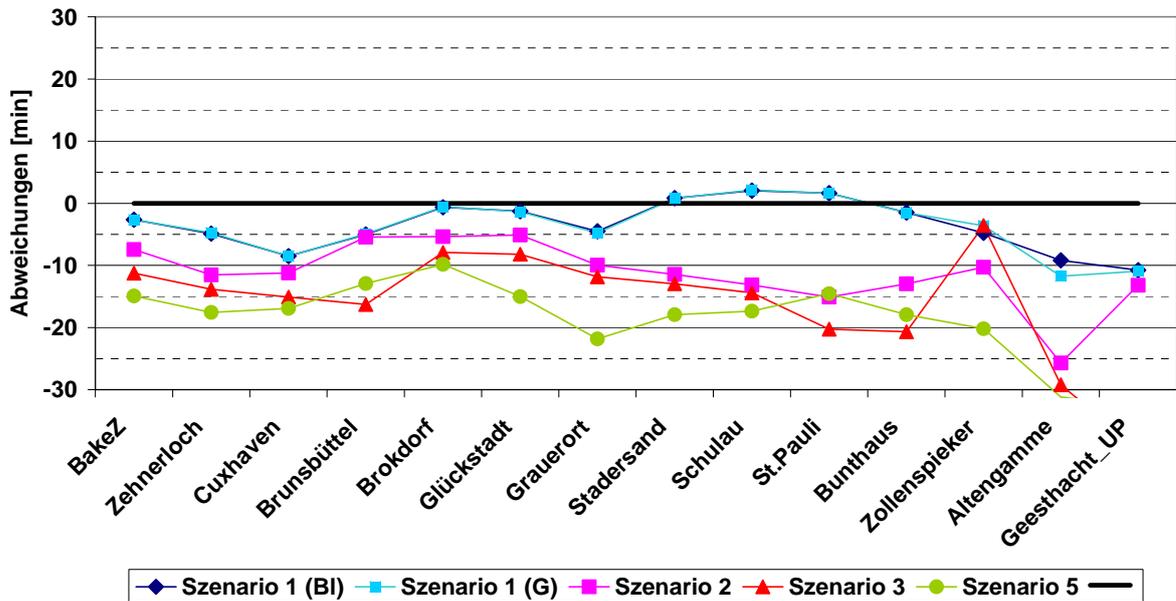


Bild 34: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit des Thw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.

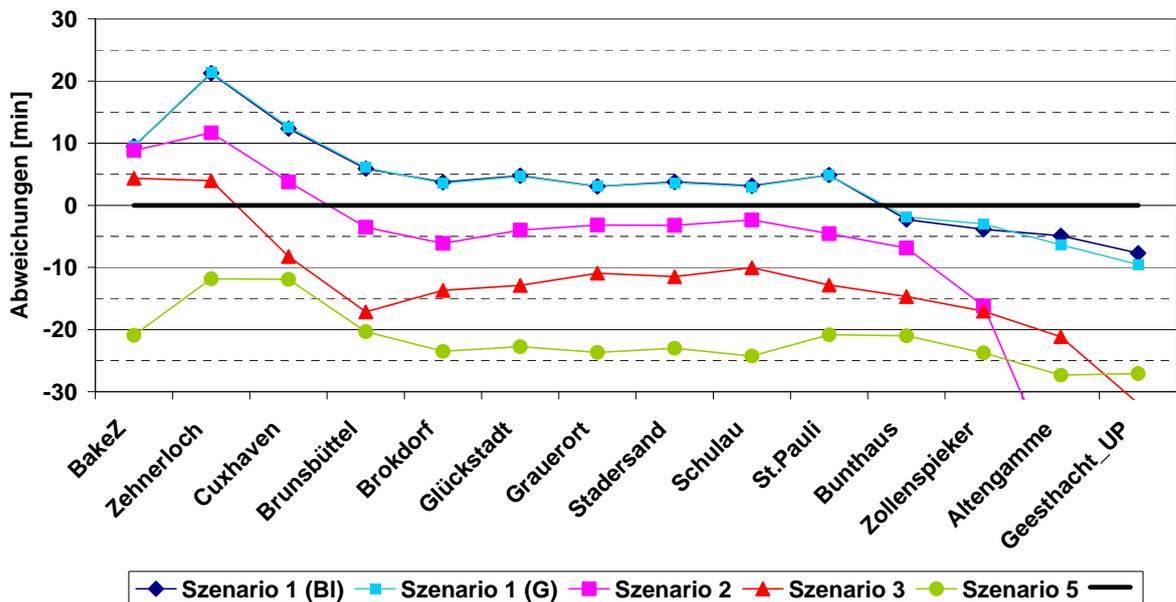


Bild 35: Mittelwerte aus den Differenzen Messung – Modell für die Eintrittszeit des Tnw der Szenarien aus dem Jahre 2006 (s. Tabelle 3) mit Randwerten für den Wasserstand aus BSHcmod.

## 6.2.2 Das Wehr Geesthacht

Das Wehr in Geesthacht befindet sich am deutschen Elbe-Kilometer 585,9 und wurde 1960 in Betrieb genommen. Es dient der Stauhaltung der Elbe oberhalb von Geesthacht mit einem Stauziel von 4 m über NN und begrenzt den Gezeiteneinfluss der Nordsee stromaufwärts. Die beschriebenen Aufgaben erfüllt das Wehr an den meisten Tagen des Jahres und das Szenario 1 fällt unter diese Bedingungen. Zur Entwicklung eines operationellen Tideelbe-Modells muss man in diesem Falle ein Modellgebiet von der Nordsee bis zum Wehr Geesthacht berücksichtigen. Bei hohem Oberwasserzufluss ( $> 1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ) oder Sturmflut wird das Wehr Geesthacht gelegt (pers. Mitteilungen WSA Lauenburg). Der Einfluss der Gezeiten ist dann über Geesthacht hinaus stromauf zu spüren. Das Modellgebiet reicht in solchen Fällen bis Bleckede (Bild 6). Im Teilprojekt OPTTEL-C stellte sich die Frage, wie man für den operationellen Betrieb die Modellgebiete wählen oder wechseln muss, um für alle möglichen Bedingungen in der Tideelbe zu optimalen Ergebnissen zu kommen.

Deshalb wurde das Szenario 1 auf 2 verschiedenen Modellgittern gerechnet. Das eine Modellgitter überdeckt das Modellgebiet bis Geesthacht (G) und das andere wurde fortgesetzt über Geesthacht hinaus bis Bleckede (BI). Die Ergebnisse der Modellsimulationen für beide Modellgebiete sind im Abbildungsteil zum Bericht unter dem Gliederungspunkt 2.1 dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse für die Tidekennwerte Thw, Tnw und deren Eintrittszeiten zusammen mit den anderen Szenarien aus 2006 ist aus den Bild 28 bis Bild 35 zu entnehmen. In all diesen Abbildungen entsprechen die dunkelblauen Kurven Simulationen für Szenario 1 mit dem Modellgitter bis Bleckede (BI) und die hellblauen Kurven Simulationen für Szenario 1 mit dem Modellgitter bis Geesthacht (G). Beide Kurven liegen in allen Fällen von Bake Z bis Bunthaus übereinander. Die Differenzen an den verbleibenden 3 Pegelorten sind so gering, unabhängig ob die Randwerte für den Wasserstand am seeseitigen Rand aus Messungen an der Bake Z abgeleitet wurden oder aus dem Küstenmodell BSHcmod kommen, dass man im operationellen Betrieb durchgängig mit dem Modellgebiet bis Bleckede auskommt und keinen Gitterwechsel vornehmen muss.

## 6.2.3 Einfluss der WASP-Faktoren bei Sturmflut

In den Abbildungen Bild 18 und Bild 19 (Gliederungspunkt 5.2.3) werden an wenigen Punkten über dem Ästuar Windgeschwindigkeiten aus dem COSMO-EU Vorhersagemodell mit korrigierten Windgeschwindigkeiten, korrigiert durch orts- und windrichtungsabhängige WASP-Faktoren ([18], [40]), anhand von Zeitreihen verglichen. In den untersuchten Punkten zeigen sich in Zeitabschnitten mit geringem Wind kaum Unterschiede in den Windgeschwindigkeiten, bei stärkerem Wind nehmen die Unterschiede zu. Um sich ein Bild über die Auswirkungen der WASP – Korrekturfaktoren auf den Wasserstand zu machen, wurden die Szenarien des Jahres 2006 mit und ohne WASP – Korrekturfaktoren gerechnet. Es hat sich gezeigt, dass in den untersuchten Fällen die Unterschiede im Wasserstand bei Windgeschwindigkeiten unter  $15 \text{ m/s}$  unwesentlich sind. Bei der Sturmflut im November jedoch zeigt

sich die Wirkung der WASP-Faktoren, die entlang des Ästuars stromaufwärts deutlich zunimmt.

Da für das BAW-Vorhersagemodell-Elbe Randwerte aus zwei verschiedenen Vorhersagemodellen bereitgestellt werden, ist es darüber hinaus interessant zu untersuchen, welche Auswirkungen der Randwert Wasserstand auf den Scheitelwert des Hochwassers hat. Die Ergebnisse der Rechnungen sind im Folgenden abgebildet:

Bild 36 bis Bild 39 zeigen die Wasserstände der Sturmflut vom 1. November 2006 aus Hindcastrechnungen mit dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe entlang des Ästuars von Cuxhaven über Grauerort und St. Pauli bis nach Altengamme. Die Randwerte für den Wasserstand kommen aus Messungen an der Bake Z. Die atmosphärischen Randwerte kommen aus dem COSMO-EU Modell, einmal mit (türkisfarbene Kurven) und einmal ohne WASP-Korrekturfaktoren (orange Kurven). Zusätzlich zu den Modellergebnissen sind die Messwerte als schwarze Kurven eingetragen. In Cuxhaven liegen die Modellkurven übereinander, stromauf werden die Unterschiede in den Wasserständen immer deutlicher, jedoch nur in den Abschnitten mit höheren Windgeschwindigkeiten, vergleiche dazu Bild 26.

Wie sehen die Ergebnisse aus, wenn die Randwerte für den Wasserstand aus dem Vorhersagemodell BSHcmod kommen?

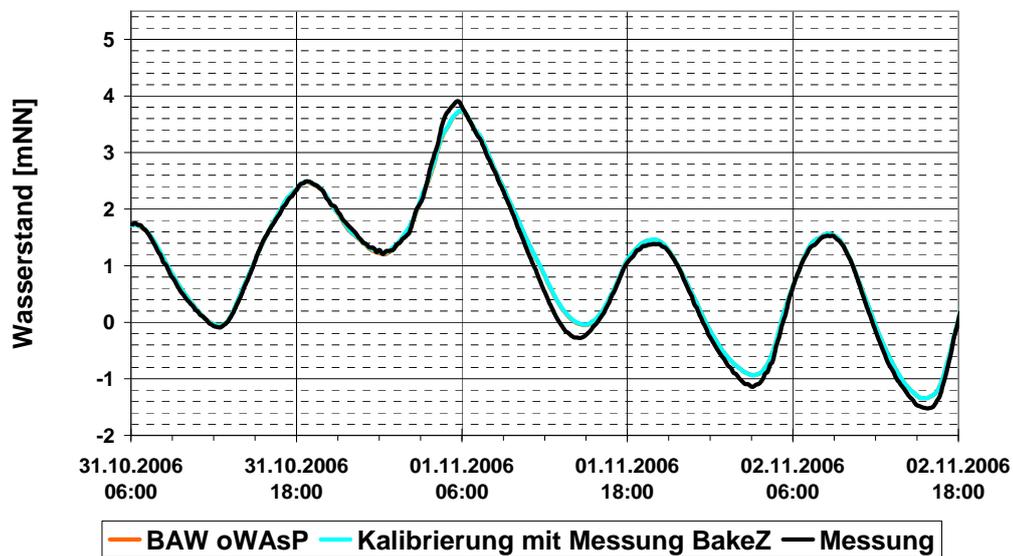


Bild 36: Wasserstand in Cuxhaven während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 1 \text{ cm}$  für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WASP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet.

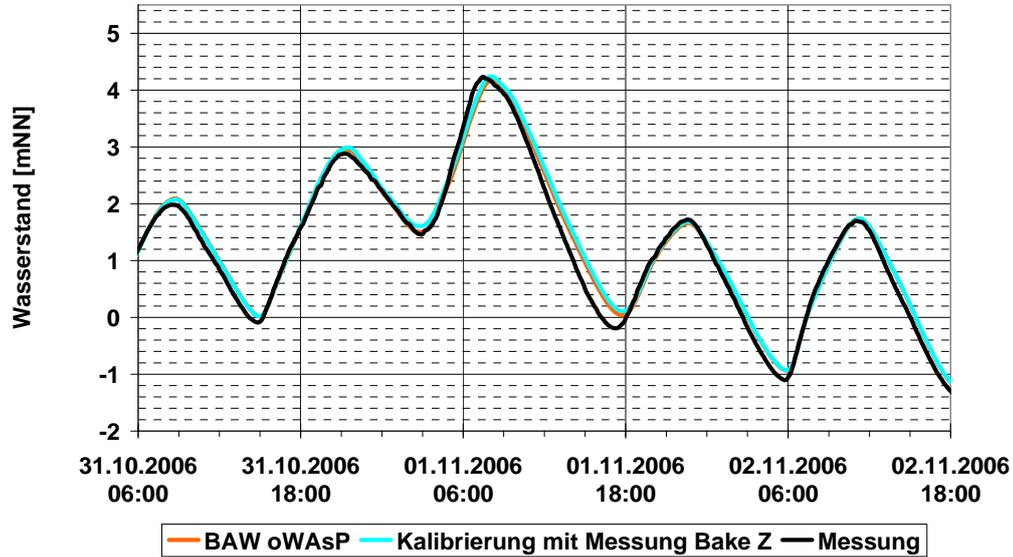


Bild 37 : Wasserstand in Grauerort während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 8 \text{ cm}$  für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte - schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet.

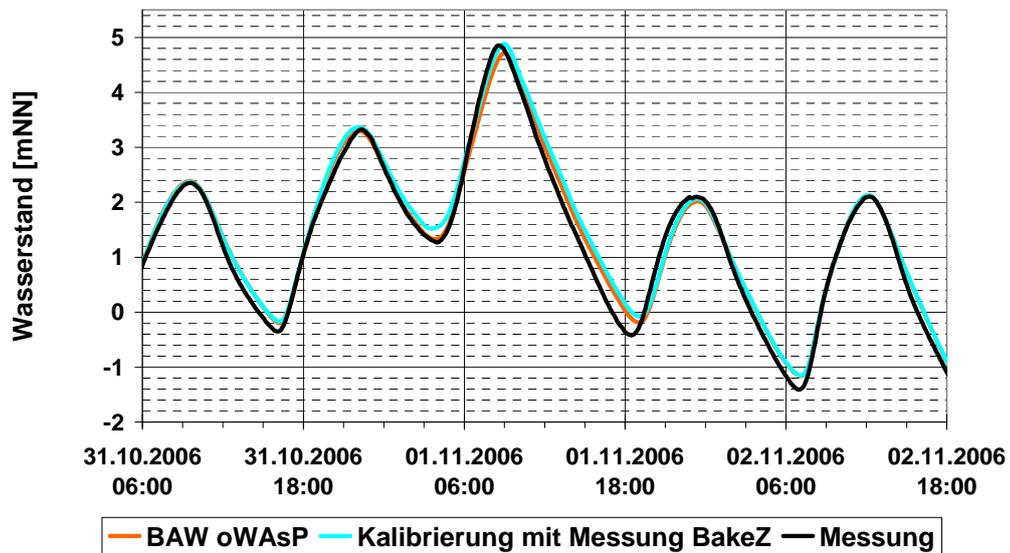


Bild 38: Wasserstand in St.Pauli während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 17 \text{ cm}$  für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte - schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet.

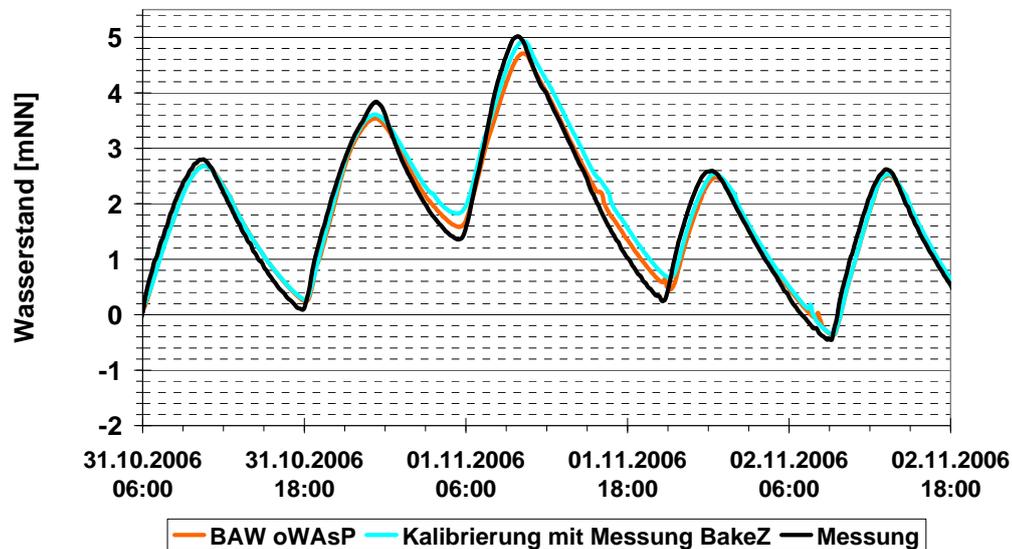


Bild 39: Wasserstand in Altengamme während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 22$  cm für die Rechnungen mit (türkis) und ohne (orange) WASP-Korrekturfaktoren, Messwerte - schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus Messwerten an der Bake Z abgeleitet

Die Abbildungen Bild 40 bis Bild 43 zeigen ebenfalls Wasserstände der Sturmflut vom 1. November 2006 aus Hindcastrechnungen mit dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe entlang des Ästuars von Cuxhaven über Grauerort und St.Pauli bis nach Altengamme. Die Randwerte für den Wasserstand kommen jetzt aus dem Vorhersagemodell BSHcmod. Die atmosphärischen Randwerte kommen, wie bei den vorhergehenden Abbildungen, aus dem COSMO-EU Modell, einmal mit (pinkfarbene Kurven) und einmal ohne WASP-Korrekturfaktoren (grüne Kurven). Zusätzlich zu den Modellergebnissen sind die Messwerte als schwarze Kurven eingetragen. In Cuxhaven liegen die Modellkurven übereinander, stromauf werden die Unterschiede in den Wasserständen immer deutlicher, jedoch nur in den Abschnitten mit höheren Windgeschwindigkeiten. Diese Beschreibung gilt, wie man sieht, unabhängig davon, welche der beiden Randwerte für den Wasserstand wir zur Rechnung verwendet haben. Selbst die Differenzen in den Scheitelwasserständen stimmen bis auf eine Ausnahme überein. Wenn man aber Bild 36 mit Bild 40 vergleicht, erkennt man die unterschiedlichen Differenzen in den Scheitelwasserständen zu den Messwerten.

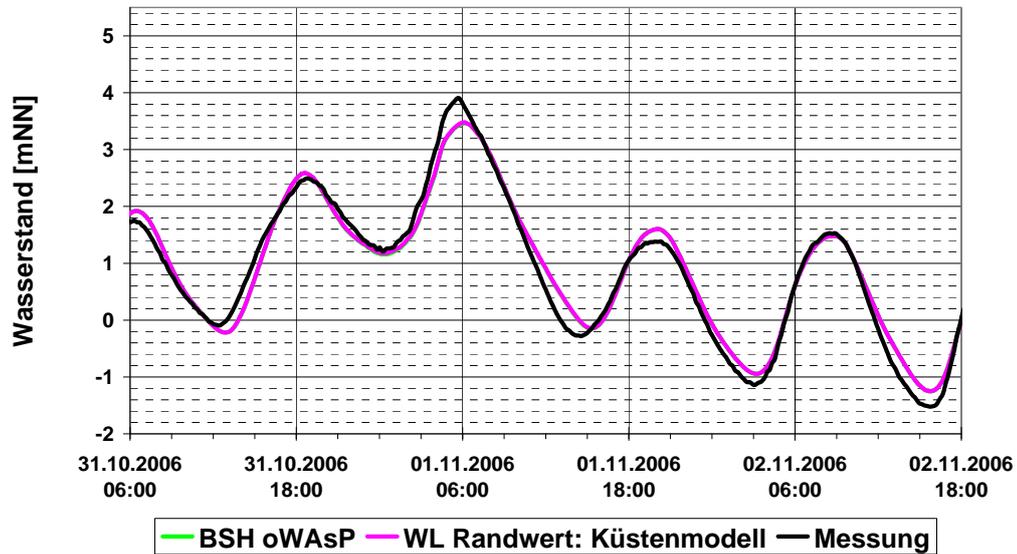


Bild 40: Wasserstand in Cuxhaven während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 1$  cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod.

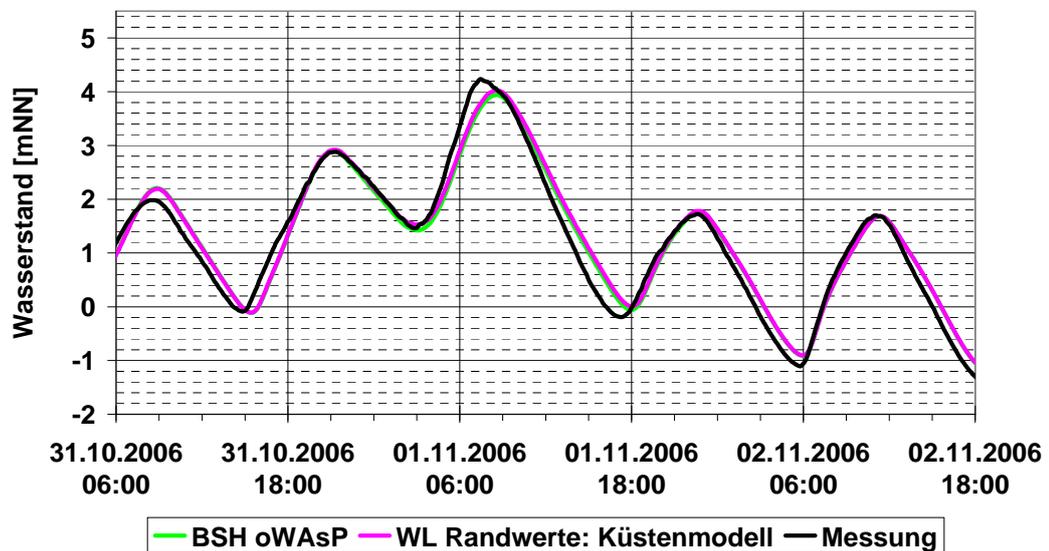


Bild 41: Wasserstand in Grauerort während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 8$  cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WAsP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod

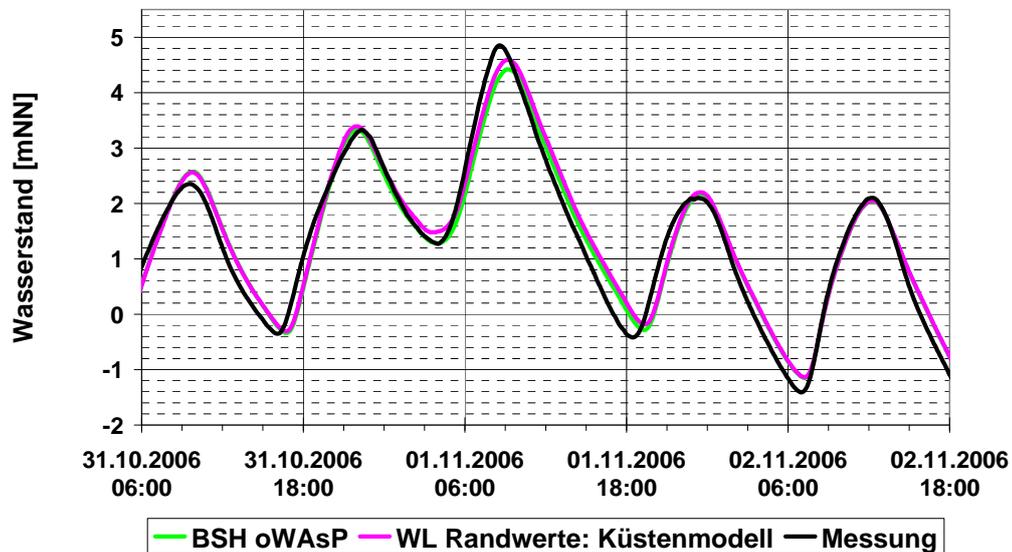


Bild 42: Wasserstand in Hamburg St. Pauli während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 17$  cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WASP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod.

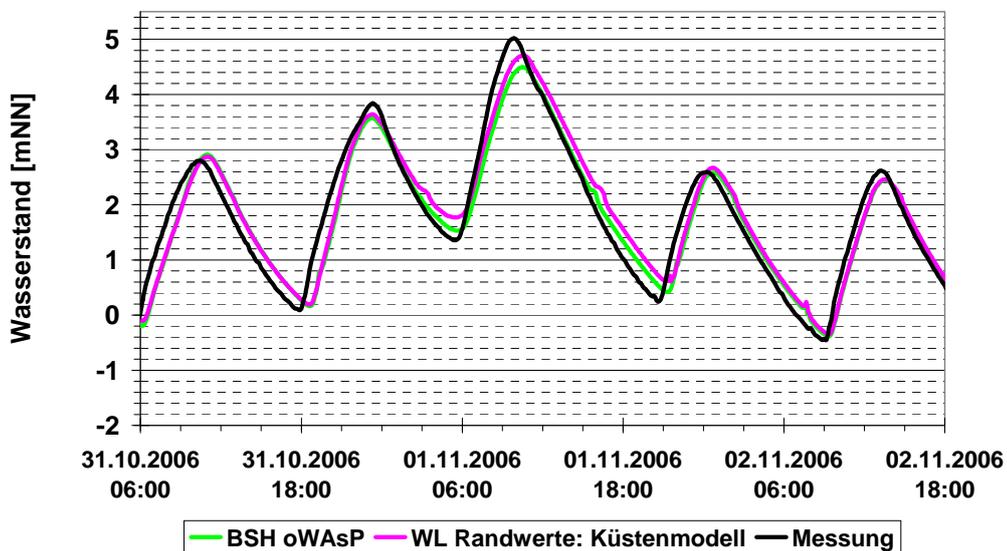


Bild 43: Wasserstand in Altengamme während der Sturmflut am 1. November 2006 (sz5): Differenz im Scheitelwasserstand  $\Delta HW = 20$  cm für die Rechnungen mit (pink) und ohne (grün) WASP-Korrekturfaktoren, Messwerte – schwarze Kurve, Wasserstandsrandwerte aus dem Vorhersagemodell BSHcmod.

Diese sollen hier dargestellt werden. Bild 44 zeigt die Differenzen Messung – Modell (BAW-Vorhersagemodell-Elbe) für die Scheitelwasserstände HW aus dem Sturmflutszenario (Szenario 5) von 2006 entlang des Elbe-Ästuars für die verschiedenen Randwerte. In Bild 44 sind die Werte, die als Quadrate dargestellt sind, die Differenzen der HW aus den Läufen mit den Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Die Differenzen der HW, die als Dreiecke dargestellt sind, kommen aus den Läufen mit den Wasserstandsrandwerten aus dem Vorhersagemodell BSHcmod. Aus den Rechnungen, die mit reinen COSMO-EU Windwerten durchgeführt wurden, sind die Differenzen für die Scheitelwasserständen mit gelb und ockerfarben gekennzeichnet. Die türkis- und die pinkfarbenen Werte sind die Differenzen zu den Messungen aus den Läufen, die WAsP-Korrekturfaktoren verwenden. Für alle Punkte, die oberhalb der Null – Linie liegen, sind die Modellwerte entsprechend zu klein, für alle Punkte unterhalb der Null – Linie liegen die Modellwerte über den Messwerten.

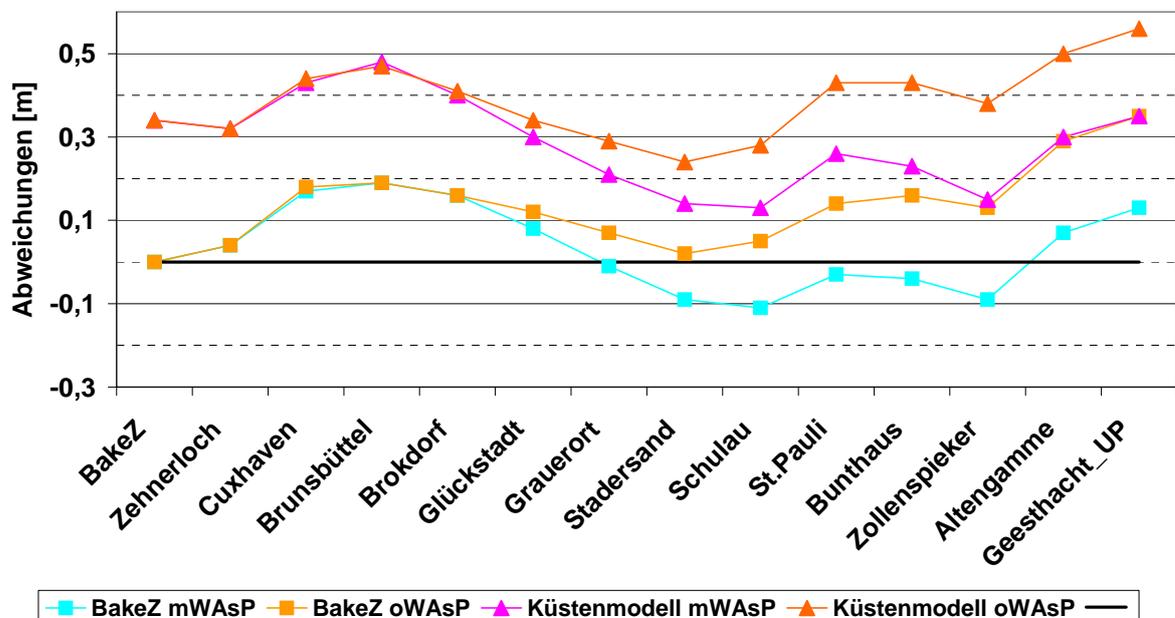


Bild 44: Differenzen in den Scheitelwasserständen  $\Delta HW$  (Messung – Modell) des Sturmflutszenarios von 2006 (sz5); türkis – Randwerte: Wasserstand (wl) aus Messungen an Bake Z, Wind aus COSMO-EU mit WAsP - Faktoren, pink – wl aus BSHcmod, Wind aus COSMO-EU mit WAsP - Faktoren, gelbe Quadrate – wl aus Messungen an der Bake Z, Wind aus COSMO-EU ohne WAsP - Faktoren, ockerfarbene Dreiecke – wl aus dem BSHcmod, Wind aus COSMO-EU ohne WAsP – Faktoren.

Für das Sturmflutszenario 5 kann man zusammenfassend feststellen, dass der Einfluss der WAsP – Korrekturfaktoren für den Wind auf den Wasserstand im Mündungsbereich der Elbe unbedeutend ist im Vergleich zu den Ergebnissen aus Rechnungen mit den unkorrigierten Windgeschwindigkeiten, auch im Bereich hoher Windgeschwindigkeiten. Die Wirkung der WAsP-Korrekturfaktoren verstärkt sich stromauf mit deutlichen Effekten bei höheren Windgeschwindigkeiten (z. B. bei Sturmflut). Die Änderung der Differenz der Scheitelwasserständen

de für Rechnungen mit und ohne WAsP – Faktoren hängt unwesentlich von den Randwerten ab, siehe Bild 45. Die Randwertgenauigkeit ist jedoch von ausschlaggebender Bedeutung für die Genauigkeit der Modellergebnisse, siehe dazu Differenzen an Bake Z in Bild 44 und Bild 46.

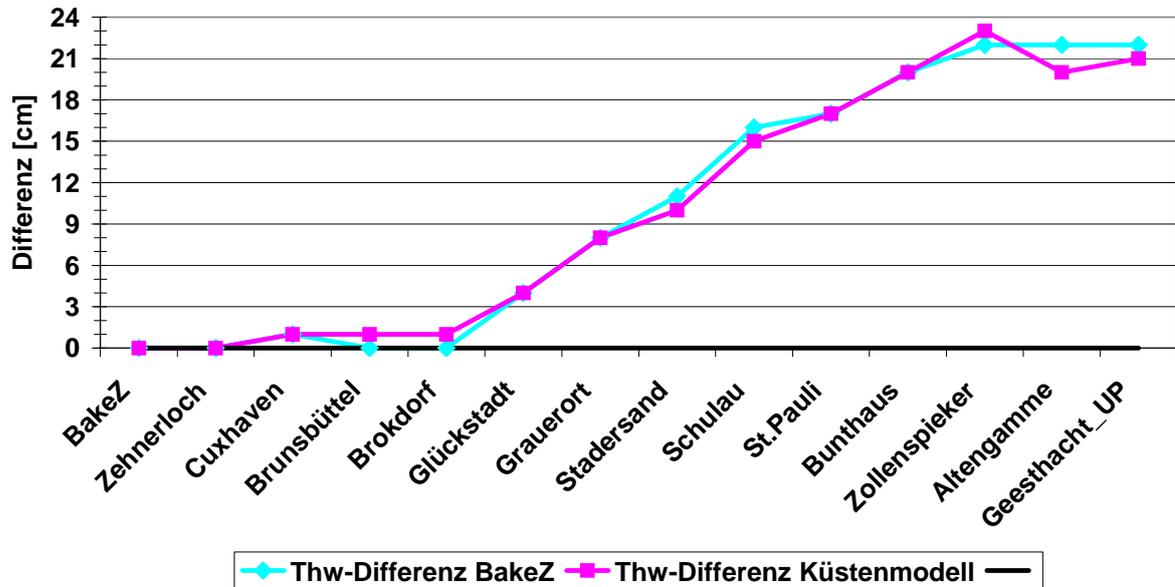


Bild 45: Änderung der Differenz der Scheitelwasserstände  $\Delta HW$  (Messung - Modell) auf Grund des gewählten Windfeldes (COSMO-EU mit WAsP – COSMO-EU ohne WAsP, siehe Bild 44) entlang des Ästuars für jeweils gleiche Wasserstandsrandwerten. Türkis – Wasserstandsrandwerte aus Messungen an der Bake Z, pink – Wasserstandsrandwerte aus dem BSHcmod.

Bild 45 zeigt die Änderung der Differenzen in den Scheitelwasserständen entlang des Ästuars aus jeweils zwei Läufen mit Windwerten aus den COSMO-EU Vorhersagen, die einmal mit und einmal ohne WAsP – Faktoren gerechnet wurden. Die türkisfarbenen und die pinkfarbenen Punkte repräsentieren unterschiedliche Randwerte im Wasserstand. Die türkisfarbenen dargestellten Differenzänderungen sind aus den beiden Läufen mit den Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z und die pinkfarbenen Differenzänderungen sind aus den Läufen mit Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Diese Differenzänderungen zeigen eindrucksvoll die Wirkung der WAsP-Faktoren entlang des Ästuars bei hohen Windgeschwindigkeiten.

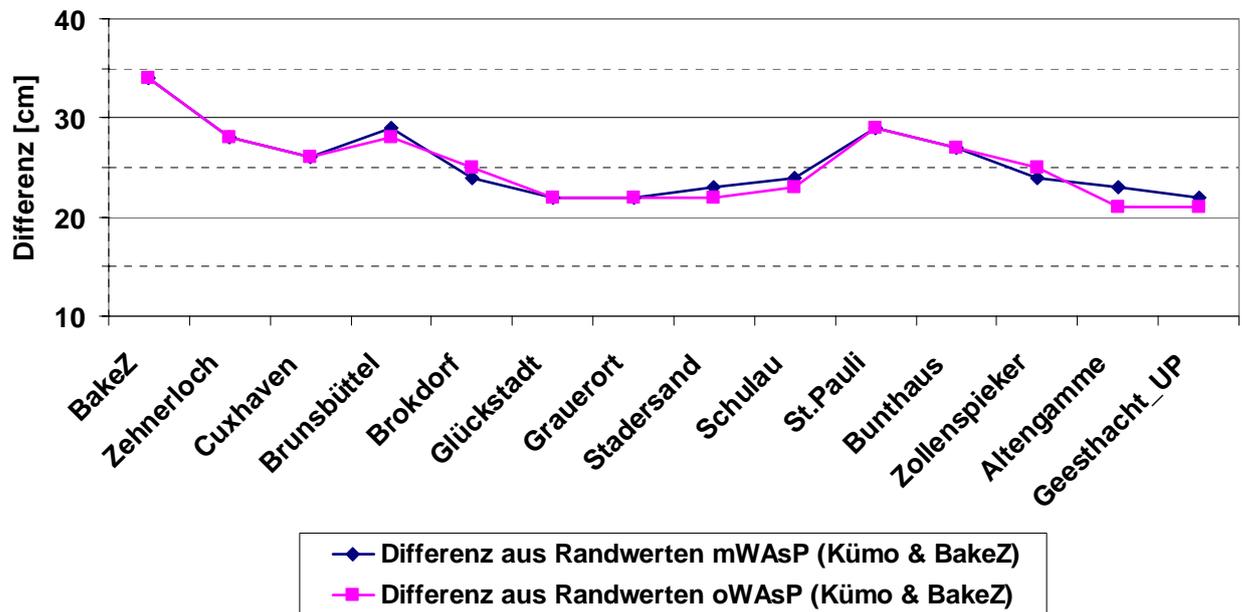


Bild 46: Änderung der Differenzen der Scheitelwasserstände  $\Delta HW$  (Messung - Modell) auf Grund des verwendeten Wasserstandsrandwertes (BSHcmod – Randwerte aus Messungen von Bake Z, siehe Bild 44) entlang des Ästuars für jeweils gleichen Wind: dunkelblau – COSMO-EU Wind mit WAsP-Faktoren korrigiert, pink – COSMO-EU Wind ohne WAsP-Korrektur.

Bild 46 zeigt die Änderung der Differenzen in den Scheitelwasserständen aus jeweils zwei Läufen mit verschiedenen Wasserstandsrandwerten, die einmal aus dem Vorhersagemodell BSHcmod kommen und zum anderen aus Messungen an der Bake Z gewonnen wurden (BSHcmod Randwerte – Randwerte aus Messungen an Bake Z). Die dunkelblauen und die pinkfarbenen Punkte repräsentieren unterschiedliche atmosphärische Antriebe (Wind). Die dunkelblau dargestellten Differenzänderungen sind aus den beiden Läufen mit COSMO-EU Wind durch WAsP-Faktoren korrigiert und die pinkfarbenen Differenzänderungen sind aus den Läufen mit COSMO-EU Wind ohne WAsP-Korrekturen. Diese Differenzänderungen zeigen die Fortsetzung des Randwertefehlers entlang des Ästuars im Szenario 5.

Es sollen die Scheitelwasserstände einer weiteren Sturmflut, die mit dem kalibrierten BAW-Vorhersagemodell-Elbe nachgerechnet wurde, mit den entsprechenden Messwerten entlang des Ästuars verglichen werden (Messung – Modell). Es ist die Sturmflut vom 12. Januar 2007, die in Cuxhaven einen maximalen Windstau von 274 cm aufwies, der 3 Stunden vor dem Scheitelwasserstand aufgetreten ist und bei Erreichen des Scheitelwasserstandes noch etwa 260 cm betrug [38]. Der Oberwasserzufluss in das Ästuar in diesem Zeitraum betrug  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die Modellrechnungen wurden mit COSMO-EU Winden durchgeführt, die durch WAsP-Faktoren korrigiert waren. Für die Hindcastrechnungen wurden jeweils nur die ersten 12 Vorhersagestunden aus den Windvorhersagen verwendet. Der Wasserstand und das Salz am seeseitigen Rand kamen aus dem Vorhersagemodell BSHcmod. In Bild 45 sind die

Differenzen der Scheitelwasserstände dargestellt. Die schwarze Linie im Bild ist die Null-Linie. Ideal wäre es, wenn alle Dreiecke auf dieser Linie liegen würden und es keine Abweichungen zwischen Messung und Modell gäbe. Die Abweichungen sind auf einer Meterskala dargestellt, die genaue Abweichung an den Pegelstandorten ist jedoch als Zentimeterwert in die Abbildung eingeschrieben. Am seeseitigen Rand ist der Modellwert des HW um 5 cm kleiner als der gemessene Wert und zwischen Glückstadt und Schulau übersteigen die HW Modellwerte die gemessenen um 12 bis 16 cm. In Cuxhaven wird der Scheitelwasserstand vom Modell um 1 cm, in St. Pauli um 6 cm überschätzt.

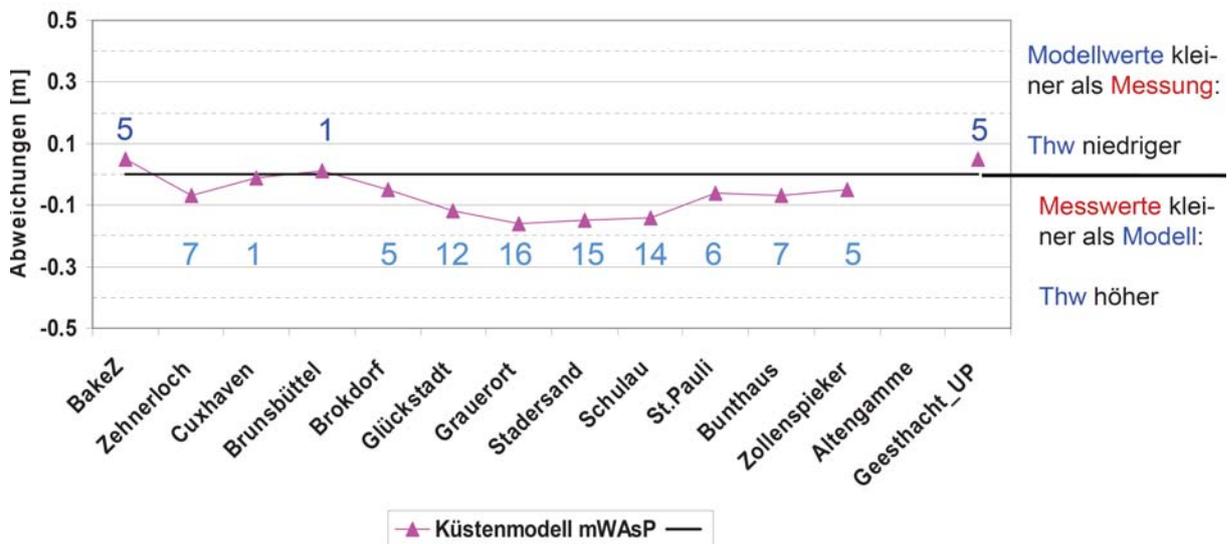


Bild 47: Differenzen (Messung - Modell) in den Scheitelwasserständen für die Sturmflut vom 12.1.2007 (sz6) entlang des Elbe – Ästuars. Die blauen Zahlen geben die Abweichung in cm an.

## 7 Auswertung der Szenarien

Innerhalb des Projektes OPTEL ist vereinbart, dass die Qualität der Modellergebnisse an 6 Szenarien überprüft wird. Die Szenarien 1 – 6 liegen in den in Tabelle 2 genannten Zeiträumen, die sich in ihrer hydrologischen und meteorologischen Situation unterscheiden. Die Szenarienauswahl wurde von OPTEL-D [37] vorgeschlagen. Ebenfalls wurden die zum Vergleich benötigten Messungen von OPTEL-D [37] aufbereitet und bereitgestellt.

| Szenario - Nr. | Verhältnisse im Ästuar               | Dauer des Szenarios      |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1              | mittlere Verhältnisse                | 15. 07.2006 – 01.08.2006 |
| 2              | steil ansteigende Oberwasserwelle    | 24.03.2006 – 13.04.2006  |
| 3              | langsam abnehmendes Oberwasser       | 13.04.2006 – 27.04.2006  |
| 4              | extreme Ost-/Südost- Windlage        | 01.01.2008 – 08.01.2008  |
| 5              | Sturmflut mit fülliger Windstaukurve | 28.10.2006 – 03.11.2006  |
| 6              | Sturmflut mit steiler Windstaukurve  | 14.01.2007 – 21.01.2007  |

Tabelle 2: Zeiträume der im Projekt OPTEL vereinbarten Szenarien zum Vergleich der Modellergebnisse mit Messwerten.

Für den Wasserstand werden die Thw, die Tnw, der Thb und das Tmw in den einzelnen Szenarienzeiträumen mit den Messwerten verglichen, außerdem die Eintrittszeiten von Thw und Tnw. Dies geschieht an 14 ebenfalls von OPTEL-D ausgewählten Pegelstationen entlang der Elbe zwischen Bake Z und dem Unterpegel von Geesthacht, siehe dazu Bild 49.

Für die Strömung stehen zum Vergleich Messergebnisse von den Langzeitmessstationen LZ und D zur Verfügung, siehe Bild 48. Die Messdaten an den LZ Stationen werden 2,50 m über der Sohle erhoben. An den D Stationen werden die Messungen 1,10 m über der Sohle und 0,80 m unter dem aktuellen Wasserstand (Oberfläche) durchgeführt [37]. Die modellierten Strömungsgeschwindigkeiten werden im Folgenden beispielhaft an den Stationen LZ4, LZ2 T und D2 (Juelssand) mit den Messungen verglichen.

Der Vergleich für den Salzgehalt erfolgt mit Messdaten von den L-Stationen. Alle Salzgehaltsmessreihen, die von OPTEL-D [37] bereitgestellt wurden, werden mit den Modellwerten verglichen.

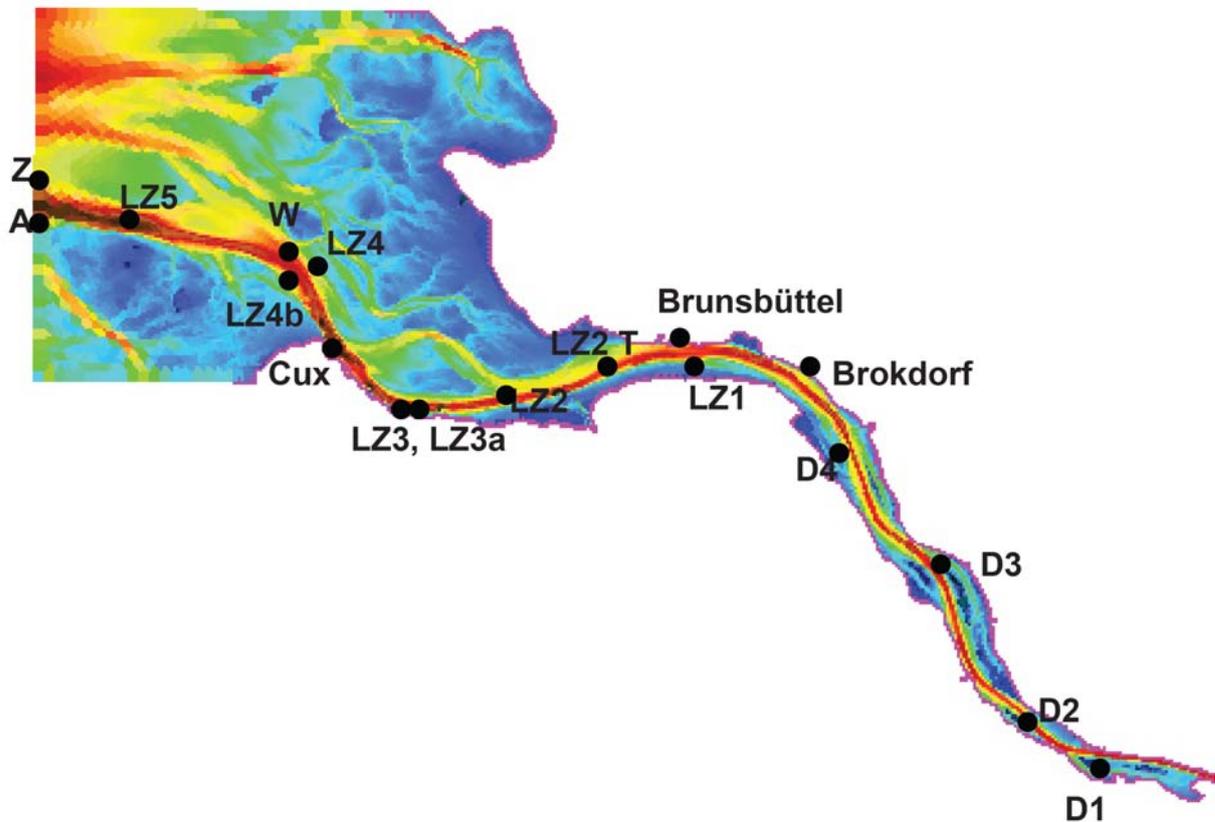


Bild 48: Lage der Dauermessstationen im Elbegebiet.

## 7.1 Wasserstand

Die Abbildungen zu den Szenarien für den Wasserstand sind im Abbildungsteil zum Bericht OPTEL-C Kapitel 2 zu finden. Für das Szenario 1 ist die Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven und Hamburg St. Pauli für den Analysezeitraum dargestellt.

Für den erwähnten kompakten Überblick (Statistische Auswertung 6.2.1.) wurden für die 6 Szenarien die Mittelwerte aus den einzelnen Differenzen Messwert – Modellwert für Tidehochwasser Thw, Tideniedrigwasser Tnw, Tidehub Thb und Tidemittelwasser sowie deren Standardabweichungen für die in der Tabelle 3 aufgeführten Zeiträume berechnet und dargestellt. Eine weitere Abbildung zeigt für jedes Szenario die Differenz zwischen gemessener und modellierter Eintrittszeit des Tidehochwassers Thw und des Tideniedrigwassers Tnw.

Für die Szenarien, für die Wasserstandsrandwerte am seeseitigen Rand sowohl aus den Modellergebnissen BSHcmod als auch aus Messungen an der Bake Z erzeugt wurden, sind beide Vergleiche dargestellt.

Im Gegensatz zu den bereits in Abschnitt 6.2.1 dargestellten Ergebnissen der statistischen Analyse der Szenarien sind die Darstellungen im Abbildungsband zu OPTEL-C nach Szenarienzeiträumen und nicht nach Auswerteparameter sortiert.

| Mittelungszeiträume für | Zeitraum                                    |
|-------------------------|---|
| Szenario 1              | 15.07.2006 00:00 Uhr – 30.07.2006 23:00 Uhr |
| Szenario 2              | 01.04.2006 00:00 Uhr – 13.04.2006 23:00 Uhr |
| Szenario 3              | 13.04.2006 00:00 Uhr – 27.04.2006 23:00 Uhr |
| Szenario 4              | 24.12.2007 00:00 Uhr – 09.01.2008 00:00 Uhr |
| Szenario 5              | 28.10.2006 00:00 Uhr – 04.11.2006 00:00 Uhr |
| Szenario 6a             | 15.01.2007 12:30 Uhr – 22.01.2007 00:00 Uhr |
| Szenario 6              | 06.01.2007 00:00 Uhr – 15.01.2007 00:00 Uhr |

Tabelle 3: Mittelungszeiträume für die Differenzen aus [Messwert-Modellwert](#) der Thw, Tnw, des Tidehubs, des Tidemittelwassers und der Eintrittszeiten für Thw und Tnw in den einzelnen Szenarien.

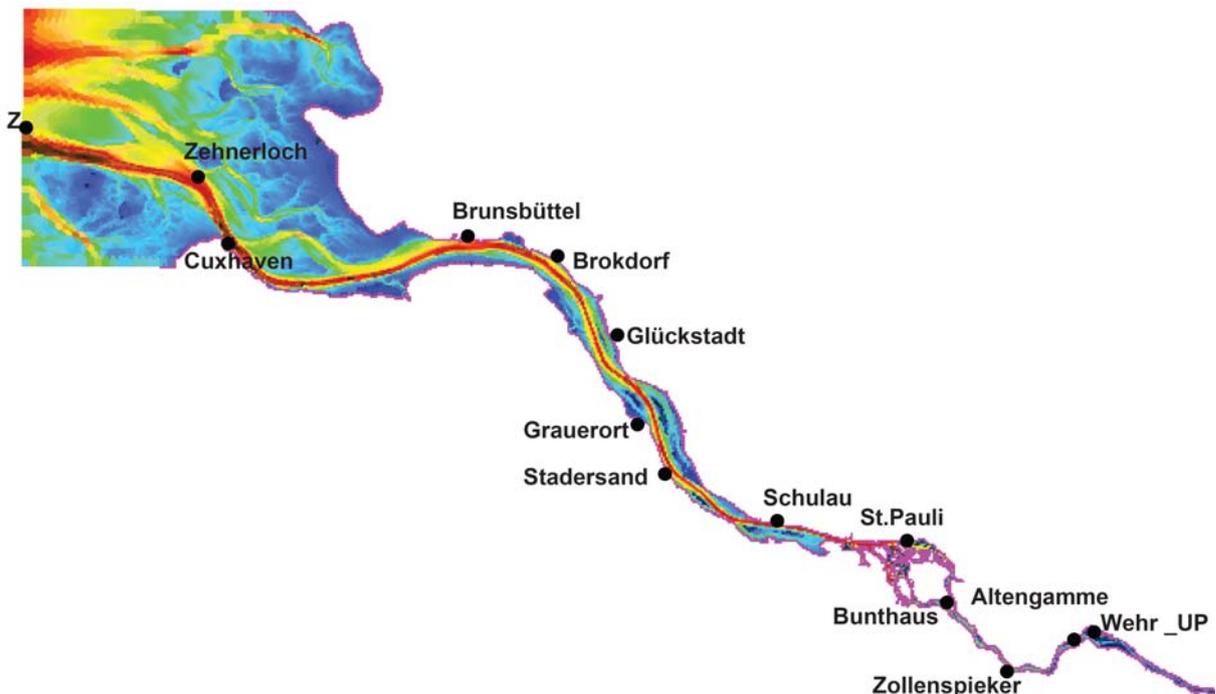


Bild 49: Lage der Pegel, an denen die modellierten Wasserstandszeitreihen mit den gemessenen verglichen wurden.

## 7.2 Strömung

Die Strömungsverhältnisse in der Tideelbe weisen hohe natürliche Schwankungen auf. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten treten in der Fahrrinne auf. Das lässt sich in Bild 81 bis Bild 85 (Strömungsgeschwindigkeiten im Elbmündungsgebiet) sehr gut erkennen. In der Fahrrinne wird mit mittleren Geschwindigkeiten zwischen 80 cm/s und 110 cm/s gerechnet, während bei maximalen Werten mit bis zu 200 cm/s gerechnet werden kann.

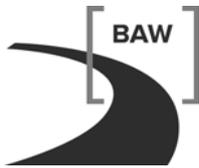
Bild 31 bis Bild 54 im Abbildungsteil zum Bericht OPTTEL-C Kapitel 3 zeigen den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten an den Langzeitmessstationen LZ4, LZ2 T und der Dauermessstation D2 für die 6 betrachteten Szenarien.

Die modellierten und die gemessenen Werte zeigen eine gute Übereinstimmung, besonders für die Zeitpunkte der Kenterung und die Formunterschiede der Kurven in der Flut- und Ebbephase. Das Modell reagiert auch gut auf kurzzeitige Ereignisse, wie in Szenario 5 und 6 zu sehen ist. Das 1. Maximum in den Geschwindigkeiten bei Szenario 5 ist ein Flutstrommaximum. An der Station LZ4 lässt sich eine geringe Ebbestromgeschwindigkeit vor dem Flutstrom der Sturmflut und eine hohe Ebbestromgeschwindigkeit nach dem Scheitelwasserstand erkennen. An der Station LZ2 Tonne findet man eine kurze Ebbestromphase vor der Sturmflut und eine lange nach der Sturmflut. Gleiches können wir an der Station D2 (Juelssand) beobachten, sowohl für die Messung über Grund als auch für die Messung unter der Oberfläche, wobei die Strömungsgeschwindigkeiten an der Oberfläche deutlich höher liegen. Ebenso gut nachgebildet sind die Strömungsgeschwindigkeiten am Boden in Szenario 6, das die Sturmflut nachbildet, die vom Orkan „Kyrill“ ausgelöst wurde. Der Wasserstandsverlauf dazu in Cuxhaven und St. Pauli ist Abb.16 des Abschlussberichtes OPTTEL-D [37] zu entnehmen.

## 7.3 Salzgehalt

Der Vergleich der modellierten Salzgehaltszeitreihen mit den gemessenen ist in den Bildern 56 bis 89 im Abbildungsteil zum Bericht OPTTEL-C Kapitel 4 dargestellt. Die Salzgehaltsrandwerte am seeseitigen Modellrand stammen aus dem Vorhersagemodell BSHcmod. Auf dem Modellrand liegen keine Vergleichsmessungen vor, so dass die Güte der Randwerte nicht überprüft werden kann.

Da sich auf dem Modellrand des Elbmodells in der Regel keine stabile Salzsichtung ausbilden kann, wird der Salzgehalt des Küstenmodells vertikal gemittelt und der Mittelwert in das Ästuarmodell eingelesen. Mit dieser Methode kommt man bei den beiden Sturmfluten aus Szenario 5 und 6 zu guten Übereinstimmungen zwischen Messung und Modell. Für Szenario 2 und 3 (hoher Abfluss) sind die Ergebnisse auch noch gut, trotz der Mittelung am Rand. Bei hohem Oberwasser wird das Sinken des Salzgehaltes in Cuxhaven sehr gut nachgebildet, siehe Bild 63. Die schlechteste Übereinstimmung zwischen gemessenem und modelliertem Salzgehalt findet man für Szenario 4 (Niedriger Abfluss mit starkem Ostwind).



## 8 Präoperationeller Betrieb

Im Rahmen eines präoperationellen Betriebes soll das Verhalten des BAW-Vorhersagemodells-Elbe in der Vorhersageumgebung des BSH geprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Hierfür wird das BAW-Vorhersagemodell-Elbe auf dem Vorhersagerechner des BSH installiert. Das Modell muss die Windvorhersage des DWD, die Wasserstandsvorhersagen des BSH für die Nordsee sowie die von der BfG zu Verfügung gestellte Abflussmessung Neu Darchau zum geeigneten Zeitpunkt lesen und anschließend eine Vorhersage für die Elbe durchführen.

Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe wurde im IV. Quartal 2010 auf den Rechner des BSH portiert. Das Programmpaket wurde in der BAW auf einem SGI - Rechner mit linux – Betriebssystem entwickelt. Beim BSH laufen die operationellen Vorhersagen auf einem IBM-Rechner mit AIX -Betriebssystem. Nach geringfügigen Anpassungsarbeiten aufgrund der unterschiedlichen fortran90 - Compiler wurde im November 2010 der präoperationelle Betrieb des BAW-Vorhersagemodell-Elbe in der Vorhersageumgebung des BSH aufgenommen.

Jeden Tag am frühen Morgen werden im Anschluss an die operationellen Vorhersagen des DWD und BSH die Randwerte für das BAW-Vorhersagemodell-Elbe (siehe Abschnitt 5.1.2, 5.1.3 sowie Bild 6) vorbereitet. Anschließend wird eine 24-stündige Vorhersage für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt mit dem BAW-Vorhersagemodells-Elbe durchgeführt. Tabelle 4 gibt einen Überblick zum Ablauf einer 24 - stündigen Vorhersage sowie zur benötigten Zeit.

|  |             |
|--|-------------|
| Vorhersage Nordsee und Deutsche Bucht mit BSH-cmodnoku | 2 Stunden   |
| Vorbereitung Randwerte BAW-Vorhersagemodell Elbe       | 1,5 Stunden |
| Vorhersage mit BAW-Vorhersagemodell Elbe (UnTRIM2007)  | 1,5 Stunden |

Tabelle 4: Ablauf der Vorhersage im präoperationellen Betrieb beim BSH für einen Vorhersagezeitraum von 24 Stunden.

Im Vergleich zu den Statistiken für den Wasserstand (vergleiche Abbildungsteil zum Bericht OPTEL-C, Gliederungspunkt 2), gewonnen aus den Kalibrierungs- und Validierungsläufen, die auf Hindcastrechnungen beruhen und bei denen die Randwerte für den Wasserstand am Rand zur Nordsee aus Modelldaten (aus BSHcmod) verwendet wurden, muss man bei den Ergebnissen aus dem präoperationellen Betrieb stärkere Abweichungen von den Messwerten erwarten. Das hat seine Ursache im Vorhersagebetrieb: Die gezeigten Ergebnisse aus dem präoperationellen Betrieb zeigen den Modelloutput als Vorhersage für je einen Tag. Dabei kommen sowohl für die Nordseerandwerte aus dem BSHcmod als auch für unser

Modell nicht mehr die ersten 12 Vorhersagestunden der atmosphärischen Antriebe aus COSMO-EU zur Anwendung, sondern die Stunden 13 – 36. Man muss davon ausgehen, dass die Randwerte ungenauer werden, je weiter sie vom Vorhersagebeginn (Vorhersage- stunde 0 des COSMO-EU Modells) entfernt liegen.

Bereits in den ersten Monaten des präoperationellen Betriebes treten für die Vorhersage interessante Oberwasserzufluss- und Windsituationen auf. Im Januar 2011 steigt der Oberwasserzufluss (Messung Neu Darchau) auf  $Q = 3500 \text{ m}^3/\text{s}$  an. Am 5. Februar 2011 wird in der Elbe eine Sturmflut beobachtet. Anfang März und Anfang Mai 2011 treten mittlere Verhältnisse bezogen auf Thw und Tnw auf. Im folgenden Abschnitt werden die Vorhersage- ergebnisse für die vier genannten Zeiträume an ausgewählten Orten mit Messungen (aus PegelOnline [29]) verglichen.

### 8.1 Hoher Abfluss im Januar 2011

Im Januar 2011 wird in der Elbe ein hoher Abfluss beobachtet. So steigt zwischen dem 16. Januar 2011 und dem 24. Januar 2011 der Abfluss bei Neu Darchau von  $2330 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $3570 \text{ m}^3/\text{s}$  an (BfG, 2011). Der höchste Abfluss HQ (1926/2007, [15]) beträgt  $3620 \text{ m}^3/\text{s}$ , während des Elbehochwassers im April 2006 wurden  $3600 \text{ m}^3/\text{s}$  (siehe Szenario 2 und Szenario 3 in Bild 23) erreicht.

Bild 50 zeigt den Wasserstandsverlauf in diesem Zeitraum bei Bake Z auf dem Rand des BAW-Vorhersagemodells-Elbe zum BSH Nordsee Modell. Diese Wasserstandszeitreihe ist aus acht 24-stündigen Vorhersagen zusammengesetzt. Der Vergleich Messung mit Modell gibt an diesem Ort auch einen Hinweis auf die Vorhersagegüte des Nordseemodells. In diesem Zeitraum findet man Abweichungen zwischen Messung und Vorhersage sowohl im Tidehochwasser Thw als auch im Tideniedrigwasser Tnw.

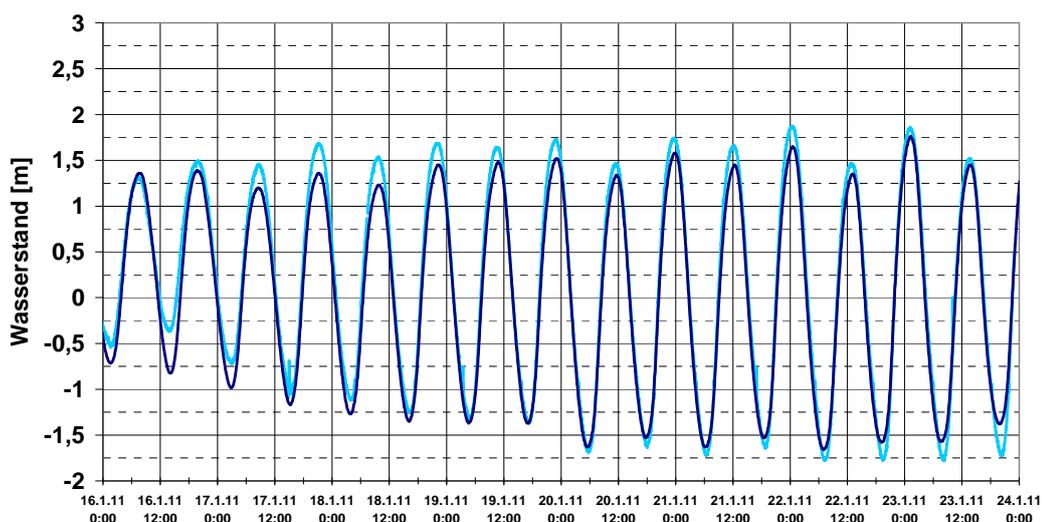


Bild 50: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im Januar 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Die acht 24-stündigen Wasserstandsvorhersagen für Cuxhaven, Glückstadt, Hamburg St. Pauli, Zollenspieker und Wehr Geesthacht UP sind in Bild 51 bis Bild 55 dargestellt. Aufgrund der Untersuchungen zu Szenario 2 (siehe Abschnitt 6.2.1 Bild 28 und Bild 29) erwartet man für ansteigenden Oberwasserzufluss, dass die Vorhersage das Thw zwischen Brunsbüttel und Geesthacht unterschätzt und das Tnw zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli überschätzt. Dieses erwartete Verhalten wird in den hier gezeigten Vorhersagen beobachtet.

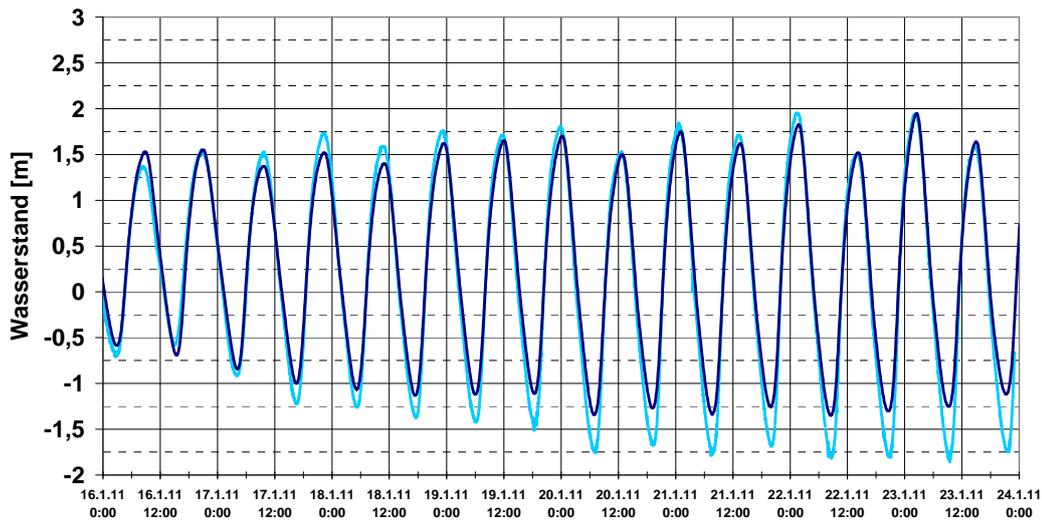


Bild 51: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

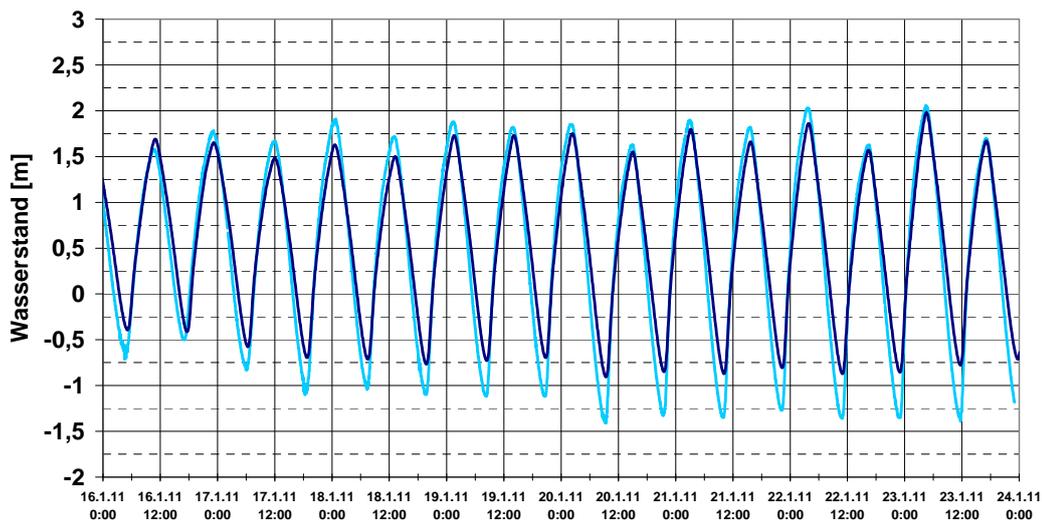


Bild 52: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Glückstadt im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

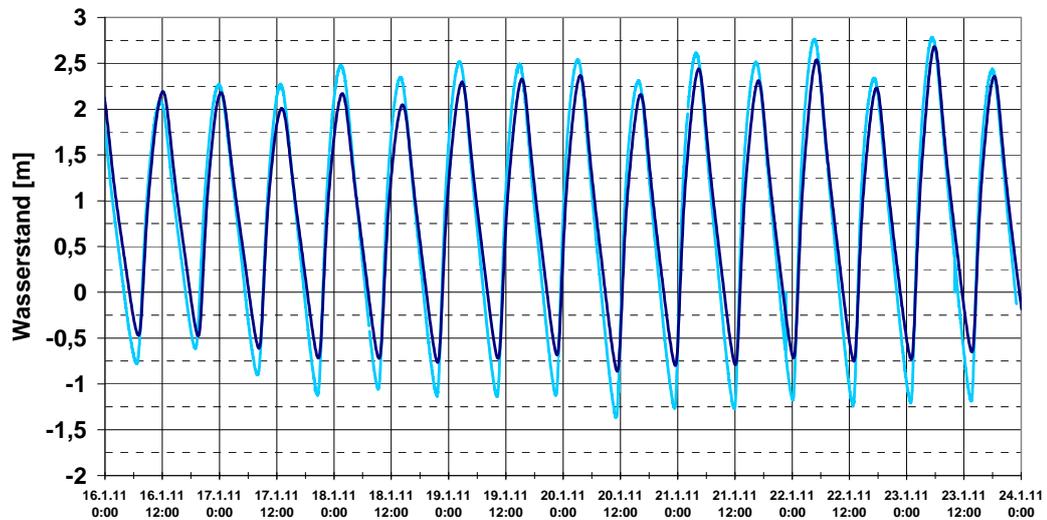


Bild 53: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Im Bereich stromauf von Hamburg werden die Wasserstände deutlich durch den hohen Oberwasserzufluss modifiziert. Das  $T_{nw}$  und  $T_{hw}$  liegen über dem mittleren  $MT_{nw}$  und  $MT_{hw}$  und der Tidehub  $T_{hb}$  ist deutlich kleiner als bei mittleren Abflussverhältnissen (vergleiche z. B. mit Bild 66 und Bild 67). Dieses in den dargestellten Messungen Zollenspieker (Bild 54) und Wehr Geesthacht UP (Bild 55) zu findende Verhalten wird auch in den Ergebnissen des BAW-Vorhersagemodells-Elbe abgebildet.

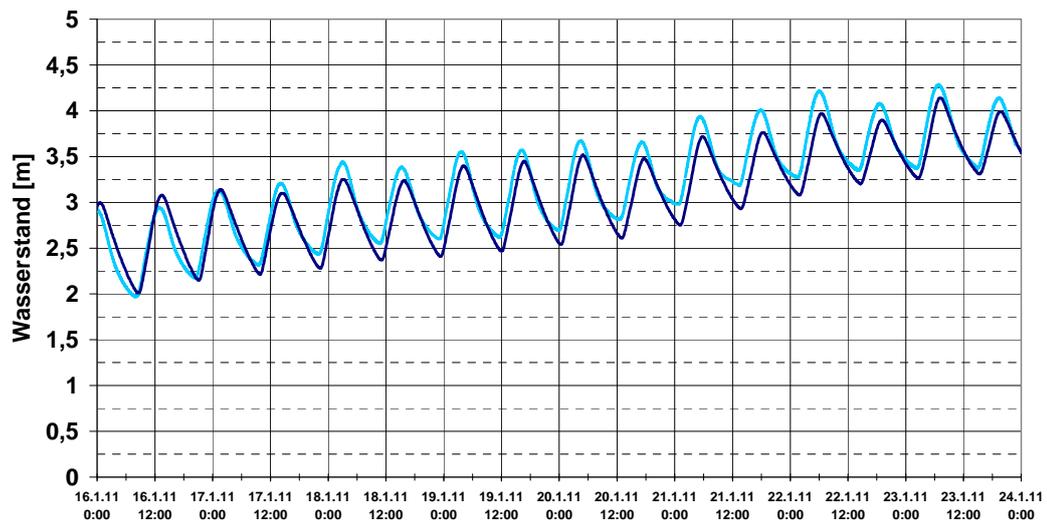


Bild 54: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

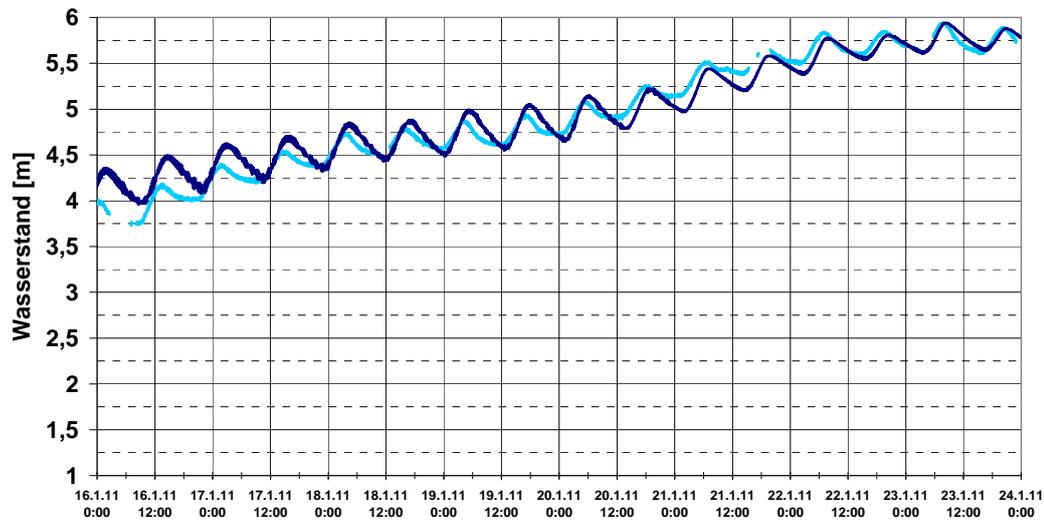


Bild 55: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung am Wehr Geesthacht UP im Januar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

## 8.2 Sturmflut 4./ 5. Februar 2011

In der Nacht vom 4. auf den 5. Februar 2011 kommt es im Bereich der Elbmündung zu Wasserständen größer als NN + 3,00 m. In Cuxhaven werden NN + 3,24 m [29] und in Hamburg St. Pauli NN + 4,26 m [29] gemessen. Aufgrund dieser Wasserstände wird dieses Ereignis nach Definition des BSH ([13] und [6]), als Sturmflut bezeichnet. Zwischen dem 3. Februar 2011 und dem 7. Februar 2011 steigt der Abfluss bei Neu Darchau von 1490 m<sup>3</sup>/s auf 1930 m<sup>3</sup>/s an (BfG, 2011).

Bild 56 zeigt den Wasserstandsverlauf in diesem Zeitraum bei Bake Z auf dem Rand des BAW-Vorhersagemodells-Elbe zum BSH Nordsee Modell. Diese dargestellte Wasserstandszeitreihe ist aus vier 24-stündigen Vorhersagen zusammengesetzt.

Der Vergleich der vorhergesagten Randwerte aus dem Nordseemodell des BSH bei Bake Z mit den Messungen zeigt, dass die drei Thw im Sturmflutzeitraum 4./5. Februar 2011 um ca. 25 cm vom Nordseemodell überschätzt werden. Der Sturmflutscheitelwasserstand bei Bake Z wird im Nordseemodell ca. 20 Minuten früher erreicht als in der Messung.

In Bild 28 sind die Abweichungen im Tidehochwasser Thw zwischen Messung und Modell dargestellt. Bei Sturmflut (Szenario 5) werden entlang der Elbe zwischen Bake Z und Geesthacht Abweichungen im Thw von weniger als ± 10 cm erwartet.

In Bild 30 sind die Abweichungen in der Eintrittszeit zwischen Messung und Modell dargestellt. Bei Sturmflut (Szenario 5) werden entlang der Elbe zwischen Bake Z und Zollenspieker Abweichungen in der Eintrittszeit von weniger als ± 10 Minuten erwartet.

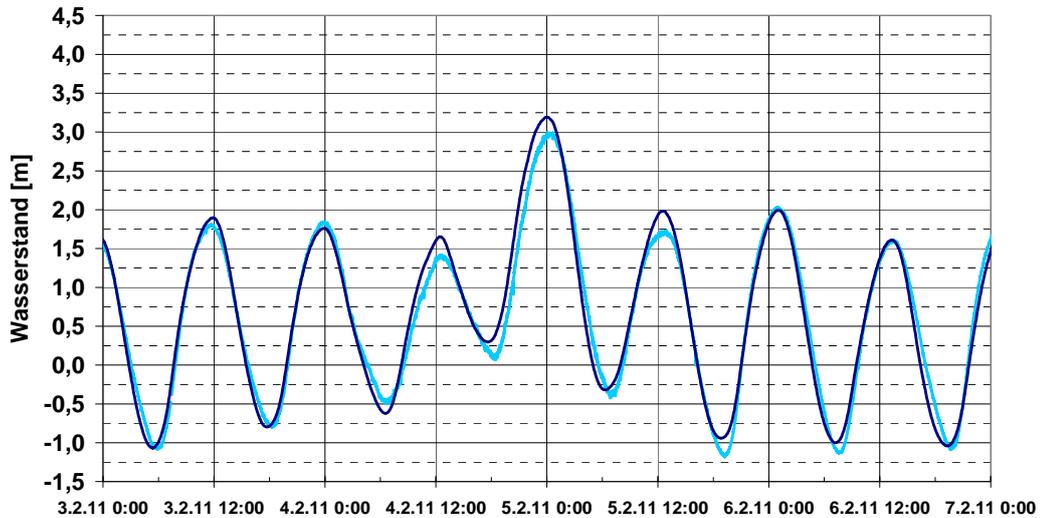


Bild 56: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im Februar 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Die vier 24-stündigen Wasserstandsvorhersagen für Cuxhaven, Glückstadt, Hamburg St. Pauli, Zollenspieker und Wehr Geesthacht UP sind in Bild 57 bis Bild 61 dargestellt. Aufgrund der Untersuchungen zu Szenario 5 (Sturmflut, siehe Abschnitt 6.2.1 Bild 28 und Bild 29) erwartet man bei Sturmflut, dass die Vorhersage das Thw zwischen Brunsbüttel und Glückstadt unterschätzt und zwischen Grauerort und Bunthaus überschätzt und ebenfalls das Tnw zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli überschätzt. Das erwartete Verhalten wird in den Vorhersagen beobachtet. Zusätzlich werden zwischen Bake Z und Geesthacht die Sturmflutscheitelwasserstände aufgrund der zu hohen Wasserstände im Nordseevorhersagemodell (BSH) überschätzt.

In Hamburg St. Pauli (Bild 59) überschätzt das BAW-Vorhersagemodells-Elbe den Sturmflutscheitelwasserstand um ca. 20 cm. Der Sturmflutscheitelwasserstand wird in der Vorhersage ca. 20 Minuten zu früh erreicht. Diese Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung liegen in der Größenordnung, die bereits für die Randwerte aus dem Nordseemodell bei Bake Z (siehe Bild 56) beobachtet wurden.

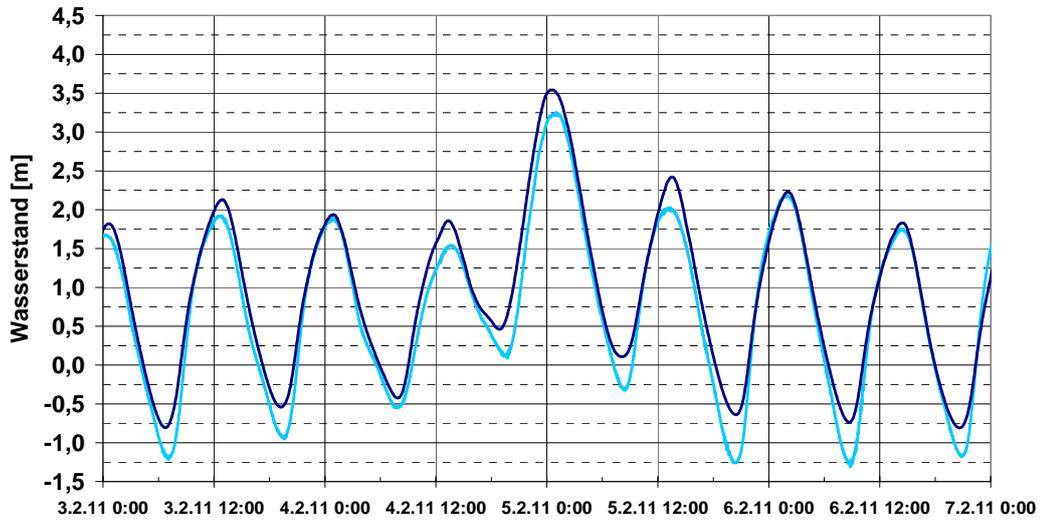


Bild 57: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im Februar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

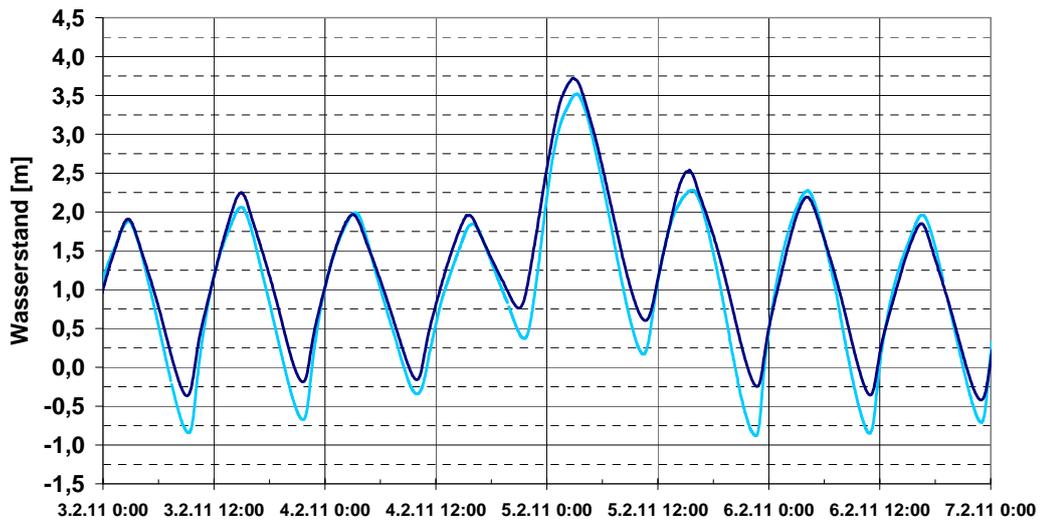


Bild 58: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Glückstadt im Februar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

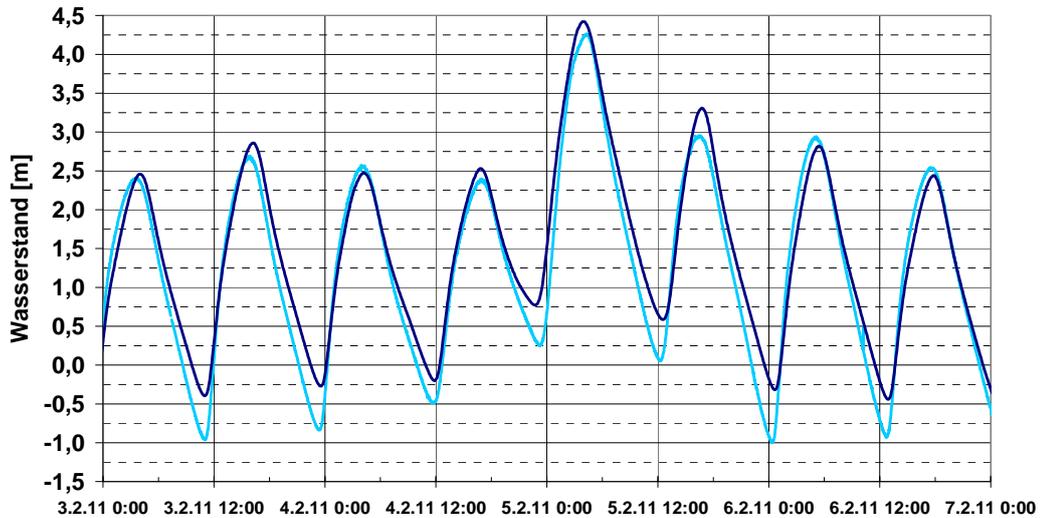


Bild 59: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im Februar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Im Bereich stromauf von Hamburg werden die Wasserstände zusätzlich durch den relativ hohen Oberwasserzufluss modifiziert. Das T<sub>nw</sub> und T<sub>hw</sub> liegen über dem mittleren MT<sub>nw</sub> und MT<sub>hw</sub> und der Tidehub T<sub>hb</sub> ist deutlich kleiner als bei mittleren Abflussverhältnissen. Dieses in den dargestellten Messungen Zollenspieker (Bild 60) und Wehr Geesthacht UP (Bild 61) zu findende Verhalten wird auch in den Ergebnissen des BAW-Vorhersagemodells-Elbe abgebildet, jedoch liegt das Tidemittelwasser T<sub>mw</sub> in diesem Zeitraum im BAW-Vorhersagemodell Elbe zu hoch.

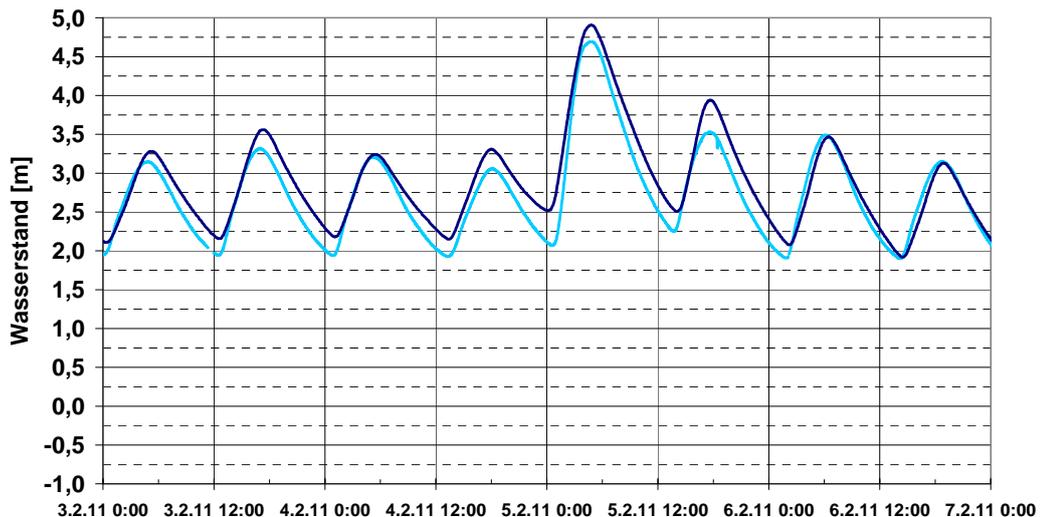


Bild 60: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im Februar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

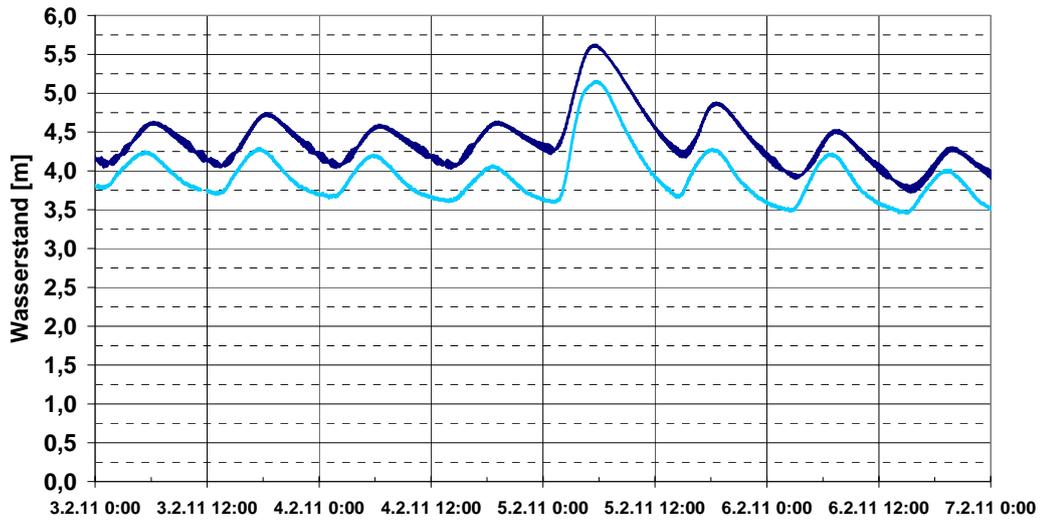


Bild 61: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung am Wehr Geesthacht UP im Februar 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

### 8.3 Mittlere Verhältnisse im März 2011

Zwischen dem 5. März 2011 und dem 9. März 2011 sinkt der Abfluss der Elbe bei Neu Dar-  
 chau von 1030 m<sup>3</sup>/s auf 945 m<sup>3</sup>/s (BfG, 2011).

Bild 62 zeigt den Wasserstandsverlauf in diesem Zeitraum bei Bake Z auf dem Rand des  
 BAW-Vorhersagemodells-Elbe zum BSH Nordsee Modell. Diese Wasserstandszeitreihe ist  
 aus vier 24-stündigen Vorhersagen zusammengesetzt.

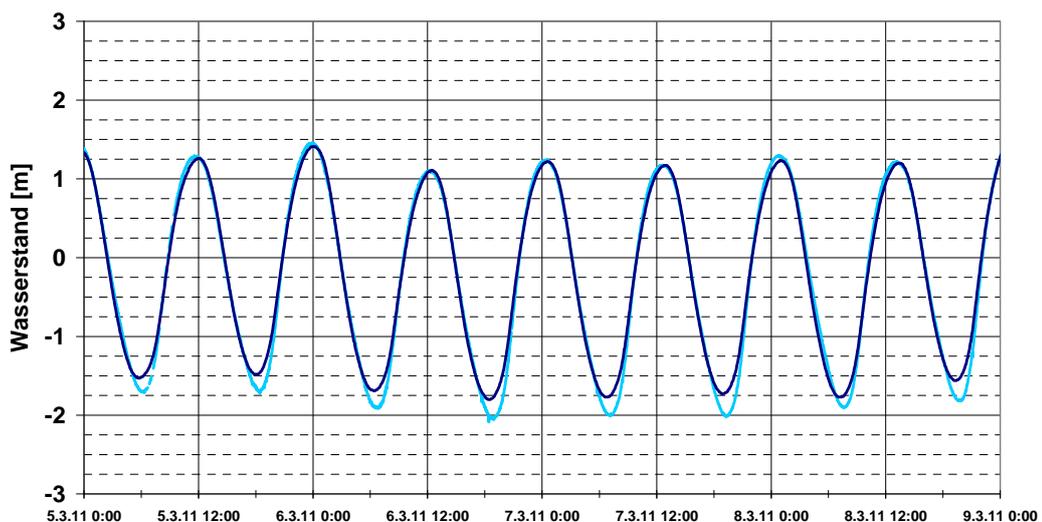


Bild 62: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im März 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Der Vergleich Messung mit Modell bei Bake Z zeigt, dass für den betrachteten Zeitraum die Thw vom Nordseemodell des BSH sehr gut vorhergesagt werden. Die Tnw liegen in diesem Zeitraum im Nordseemodell ca. 25 cm höher als in der Messung.

Die vier 24-stündigen Wasserstandsvorhersagen für Cuxhaven, Glückstadt, Hamburg St. Pauli, Zollenspieker und Wehr Geesthacht UP sind in Bild 63 bis Bild 67 dargestellt. Aufgrund der Untersuchungen zu Szenario 1 (mittlere Verhältnisse, siehe Abschnitt 6.2.1 Bild 28) erwartet man, für die Vorhersage des Thw zwischen Brunsbüttel und Geesthacht Abweichungen von der Messung von  $\pm 10$  cm. Für das Tnw erwartet man zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli zu hohe Werte im Vergleich zur Messung (Bild 29). Das erwartete Verhalten wird in den dargestellten Vorhersagen beobachtet.

Zwischen Cuxhaven (Bild 63) und Hamburg St. Pauli (Bild 65) weichen die Vorhersagen des BAW-Vorhersagemodells-Elbe für das Thw um weniger als  $\pm 10$  cm von der Messung ab. Das Thw wird in der Vorhersage ca. 10 Minuten zu spät erreicht. Diese Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung liegen in der Größenordnung, die bereits in den Randwerten aus dem Nordseemodell bei Bake Z (siehe Bild 62) zu beobachten sind.

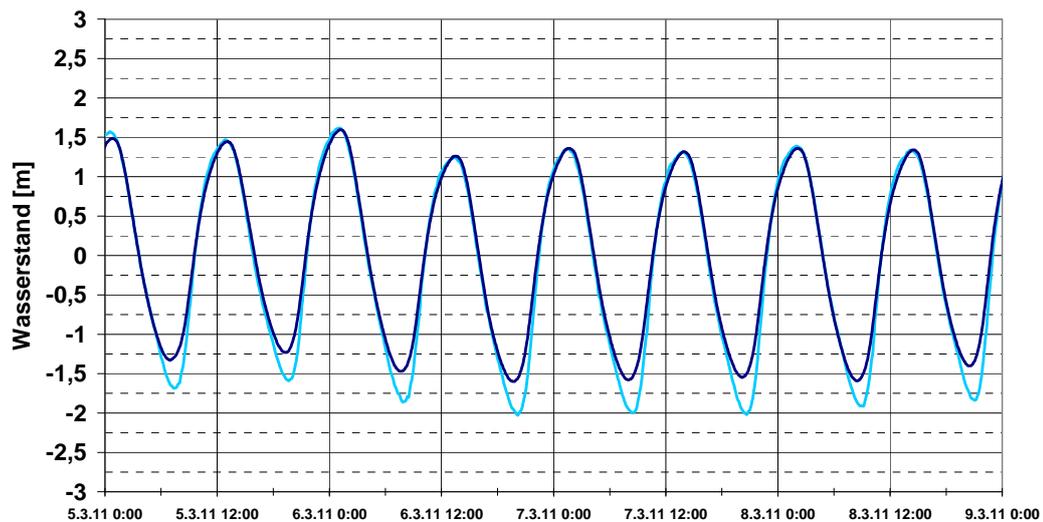


Bild 63: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

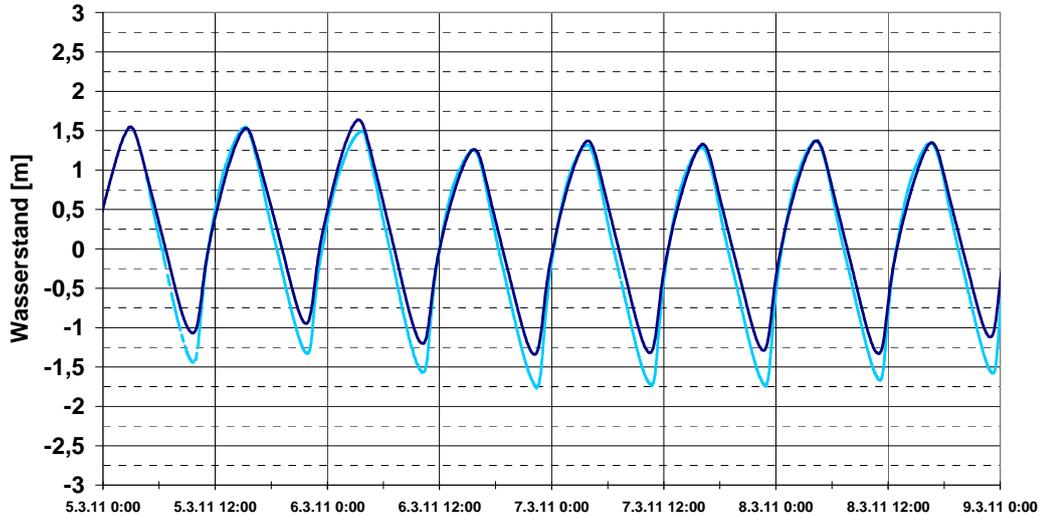


Bild 64: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Glückstadt im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

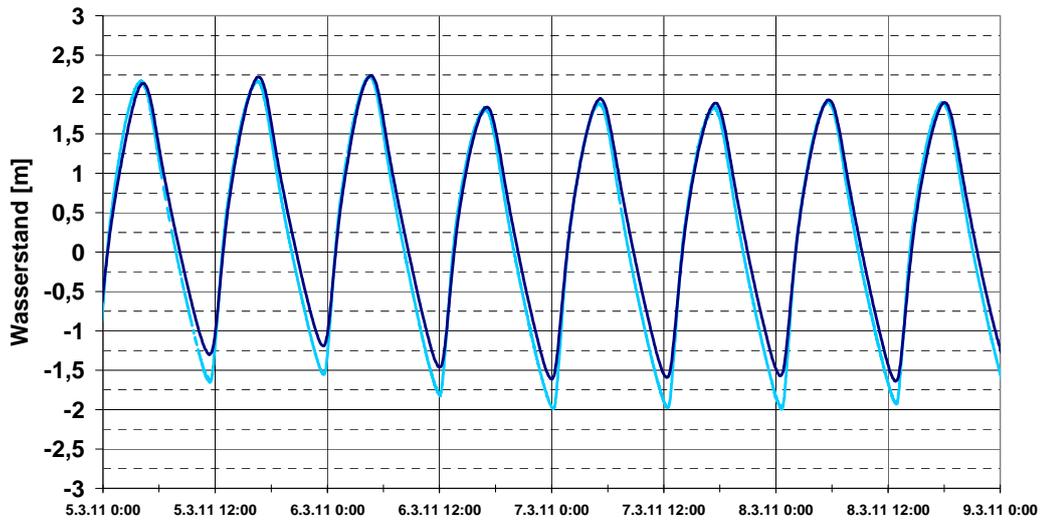


Bild 65: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli im März 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

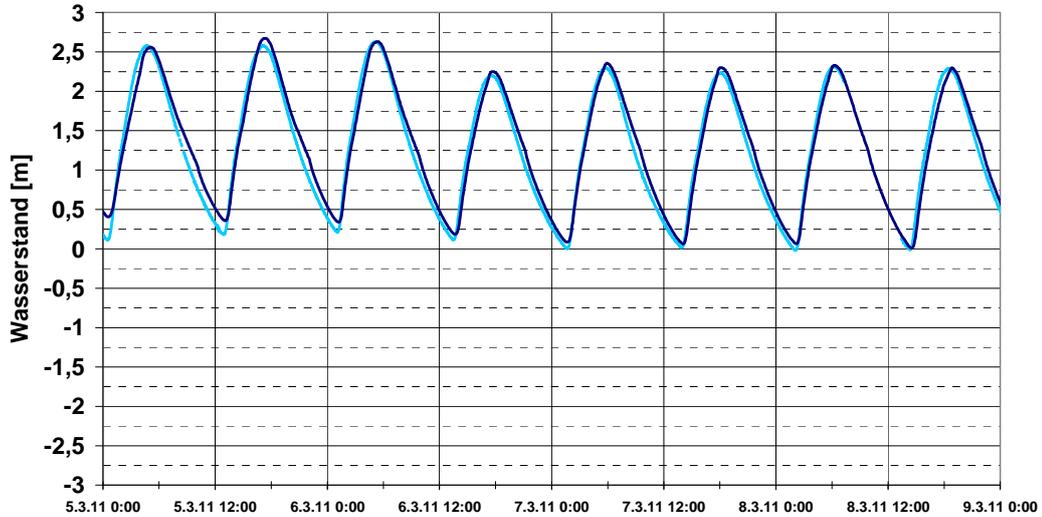


Bild 66: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Zollenspieker im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Der Vergleich zwischen gemessenem Wasserstand am Wehr Geesthacht UP und der Vorhersage ist in Bild 67 dargestellt. Im Bereich des Wehres kommt es bei den dargestellten Verhältnissen im BAW-Vorhersagemodells-Elbe zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten verbunden mit Wasserstandsschwankungen. Diese Wasserstandsschwankungen haben keinen Einfluss auf die Modellergebnisse stromauf und stromab des Wehres. Durch geeignete Wahl des „implicitness factors“ THETA (siehe Abschnitt 4) können diese Wasserstandsschwankungen gedämpft werden

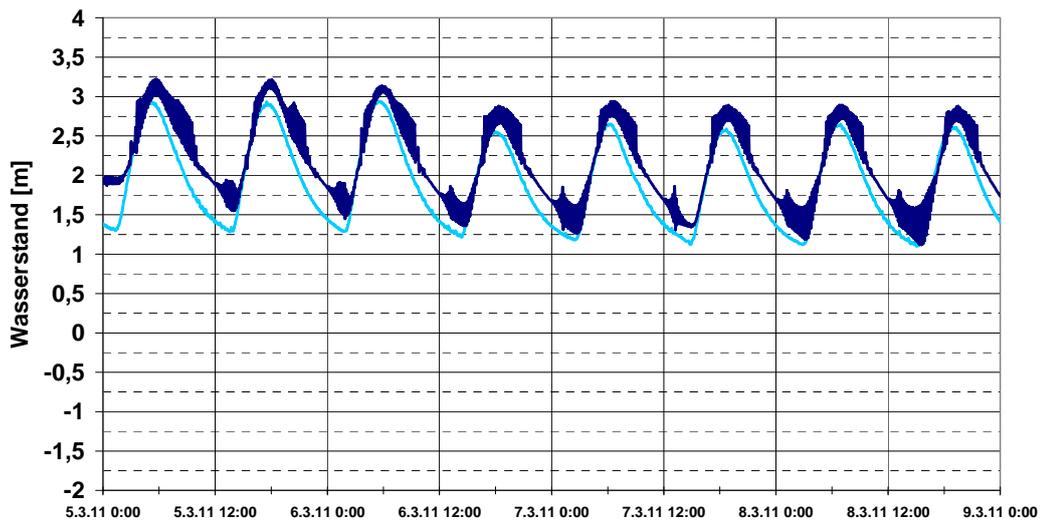


Bild 67: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung am Wehr Geesthacht UP im März 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

## 8.4 Mittlere Verhältnisse im Mai 2011

Zwischen dem 1. Mai 2011 und dem 4. Mai 2011 sinkt der Abfluss bei Neu Darchau von  $572 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $564 \text{ m}^3/\text{s}$  (BfG, 2011). Bild 68 zeigt den Wasserstandsverlauf in diesem Zeitraum bei Bake Z auf dem Rand des BAW-Vorhersagemodells-Elbe zum BSH Nordsee Modell. Diese hier dargestellte Wasserstandszeitreihe ist aus drei 24-stündigen Vorhersagen zusammengesetzt.

Der Vergleich Messung mit Modell bei Bake Z zeigt, dass für den betrachteten Zeitraum die Thw vom Nordseemodell des BSH gut vorhergesagt werden. Die Tnw liegen in diesem Zeitraum im Nordseemodell ca. 20 cm bis 30 cm höher als in der Messung.

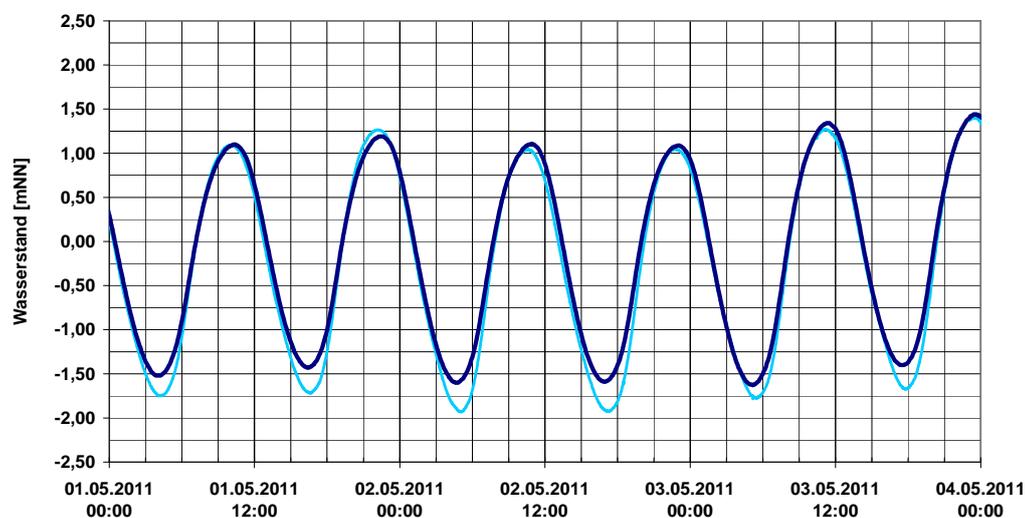


Bild 68: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung bei Bake Z im Mai 2011. Die Vorhersage (BSH) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Die drei 24-stündigen Wasserstandsvorhersagen für Cuxhaven und Hamburg St. Pauli sind in Bild 69 und Bild 70 dargestellt. Aufgrund der Untersuchungen zu Szenario 1 (mittlere Verhältnisse, siehe Abschnitt 6.2.1 Bild 28) erwartet man, für die Vorhersage des Thw bei Cuxhaven und Hamburg St. Pauli Abweichungen von der Messung von  $\pm 10 \text{ cm}$ . Für das Tnw erwartet man zwischen Cuxhaven und Hamburg St. Pauli zu hohe Werte im Vergleich zur Messung (Bild 29). Das erwartete Verhalten wird auch in den dargestellten Vorhersagen beobachtet.

In Cuxhaven (Bild 69) und Hamburg St. Pauli (Bild 70) weichen die Vorhersagen des BAW-Vorhersagemodells-Elbe für das Thw um weniger als  $\pm 10 \text{ cm}$  von der Messung ab. Diese Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung liegen in der Größenordnung, die bereits in den Randwerten aus dem Nordseemodell bei Bake Z (siehe Bild 68) zu beobachten sind.

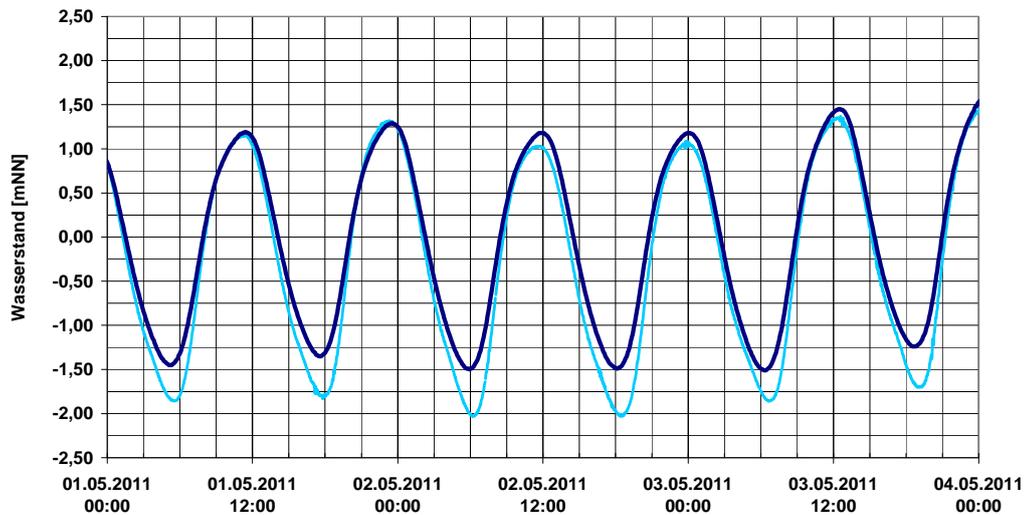


Bild 69: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven im Mai 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

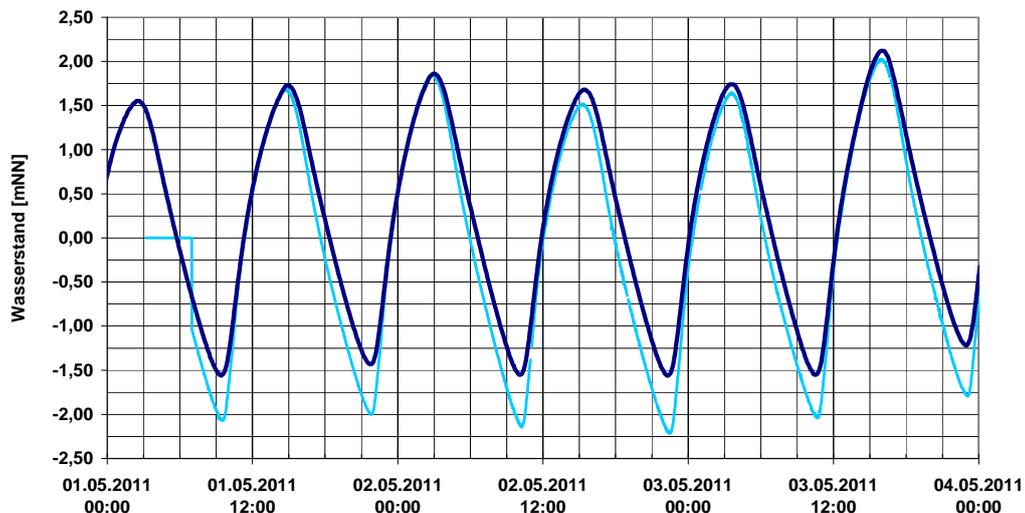


Bild 70: Präoperationeller Betrieb: Wasserstandsentwicklung in Hamburg St. Pauli im Mai 2011. Die Vorhersage (BAW) ist dunkelblau und die Messung hellblau gekennzeichnet.

Das BAW-Vorhersagemodells-Elbe berechnet zu jedem Zeitschritt für jeden Ort im Vorhersagezeitraum Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt. In den folgenden Abschnitten 8.4.1, 8.4.2 und 8.4.3 sind beispielhaft für die Vorhersage beginnend am 2. Mai 2011 um 00:00 UTC die für 3:00 UTC, 6:00 UTC, 9:00 UTC und 12:00 UTC vorhergesagten Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte in der Elbmündung dargestellt.

### 8.4.1 Wasserstand

Zu Beginn jeder Vorhersage wird das Vorhersagemodell mit Werten aus der vorherigen Vorhersage initialisiert. Am 2. Mai 2011 00:00 UTC wird der Wasserstand im BAW-Vorhersagemodell-Elbe auf den Wert der Wasserstandsvorhersage für den 2. Mai 2011 00:00 UTC vom 1. Mai 2011 00:00 UTC gesetzt. Bild 71 zeigt die Wasserstandsverteilung in der Elbmündung zu Beginn der Vorhersage (Initialisierung). Die trockenen Gebiete sind braun markiert. Einen Überblick über den Tideverlauf im Vorhersagezeitraum geben für Bake Z auf dem Modellrand Bild 68 und für Cuxhaven Bild 69. Die Vorhersage beginnt ca. 1 Stunde nach Thw in Cuxhaven (Bild 69). Das Tnw wird in Cuxhaven gegen 6:00 UTC erreicht und das folgende Thw gegen 12:00 UTC.

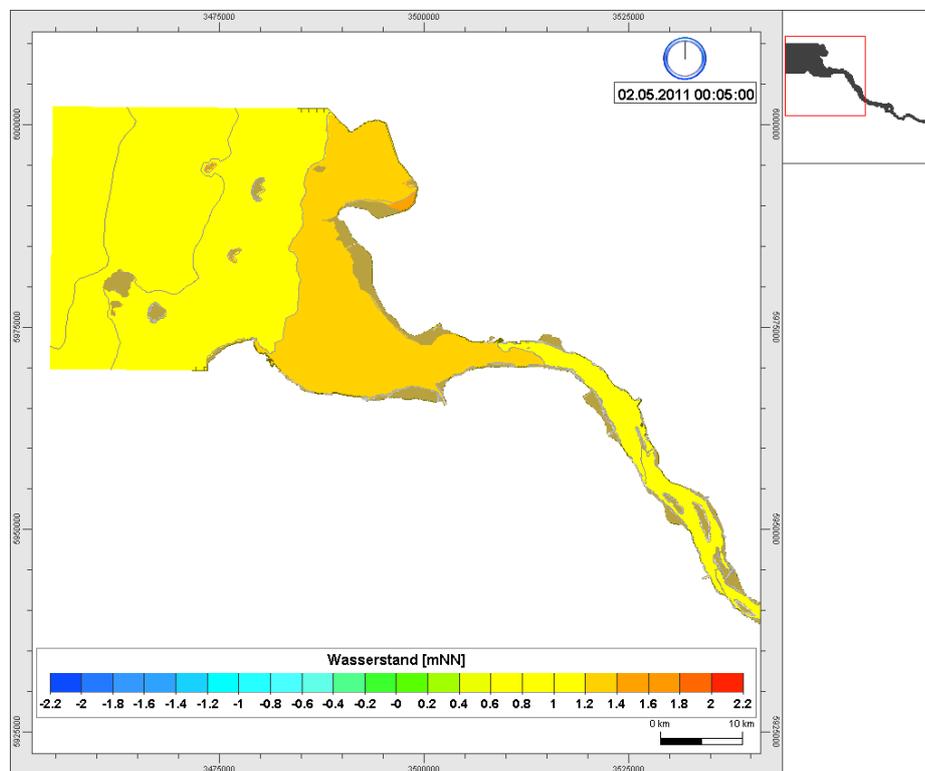


Bild 71: Elbmündung: Wasserstandsverteilung am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).

Am 2. Mai 2011 zeigt die Vorhersage für 3:00 UTC (ca. 4 Stunden nach Thw, Bild 72) einen deutlich niedrigeren Wasserstand als in Bild 71, große Teile des Wattes im Elbmündungsgebiet sind bereits trocken gefallen. Um 6:00 UTC (Bild 73) wird bei Cuxhaven das Tnw erreicht. Anschließend steigt der Wasserstand wieder (2. Mai 2011 9:00 UTC, Bild 74) und erreicht um 12.00 UTC das nächste Thw (Bild 75).

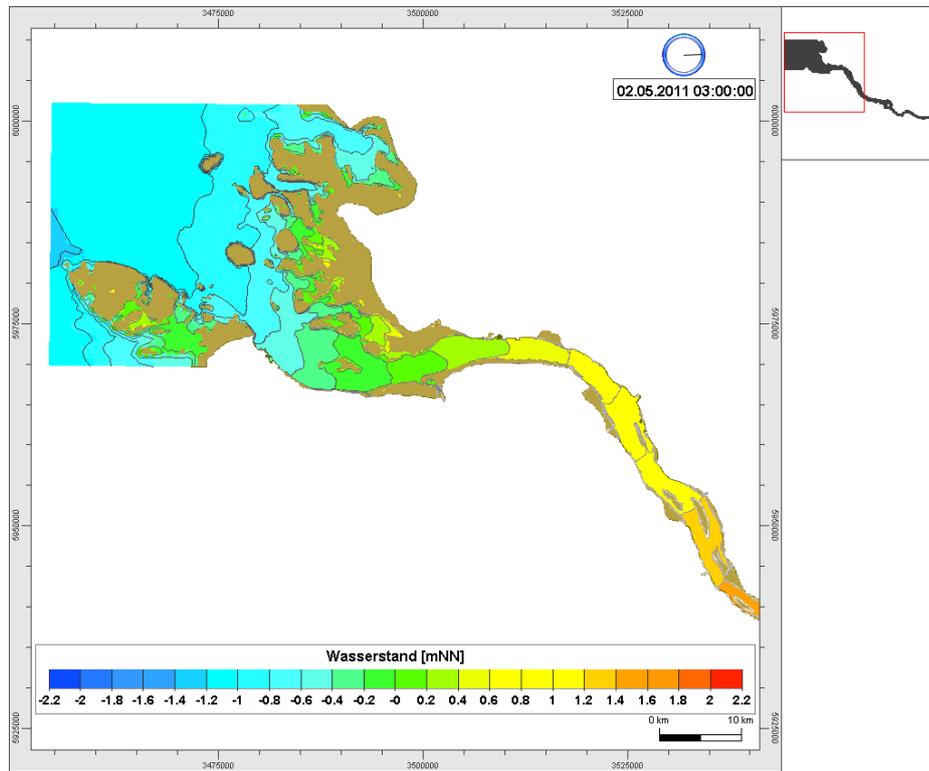


Bild 72: Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.

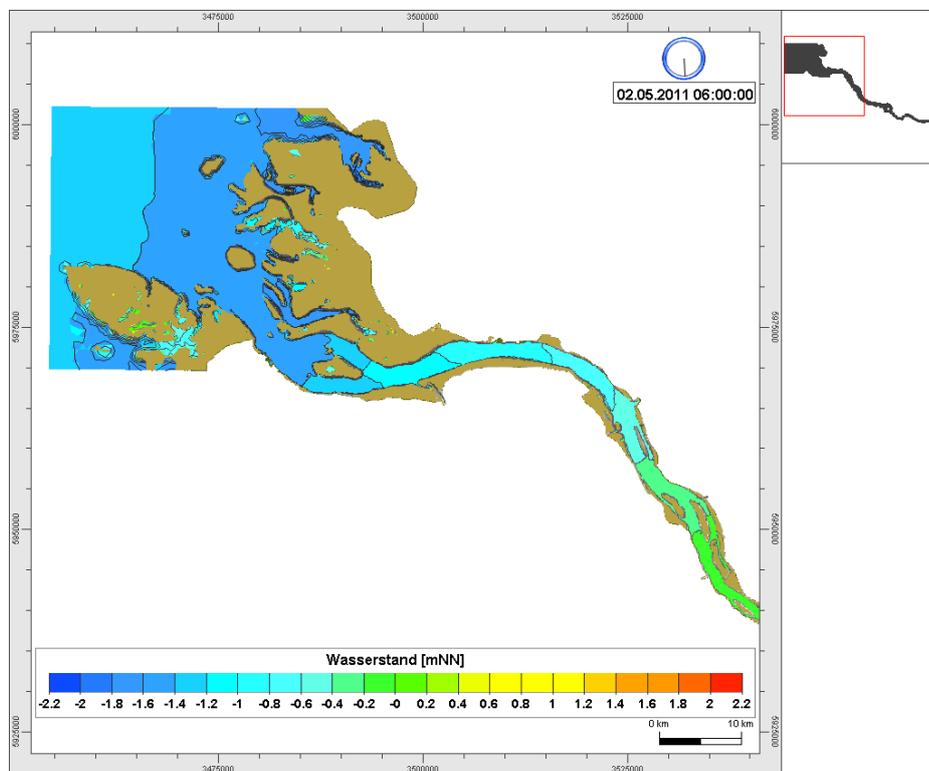


Bild 73: Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.

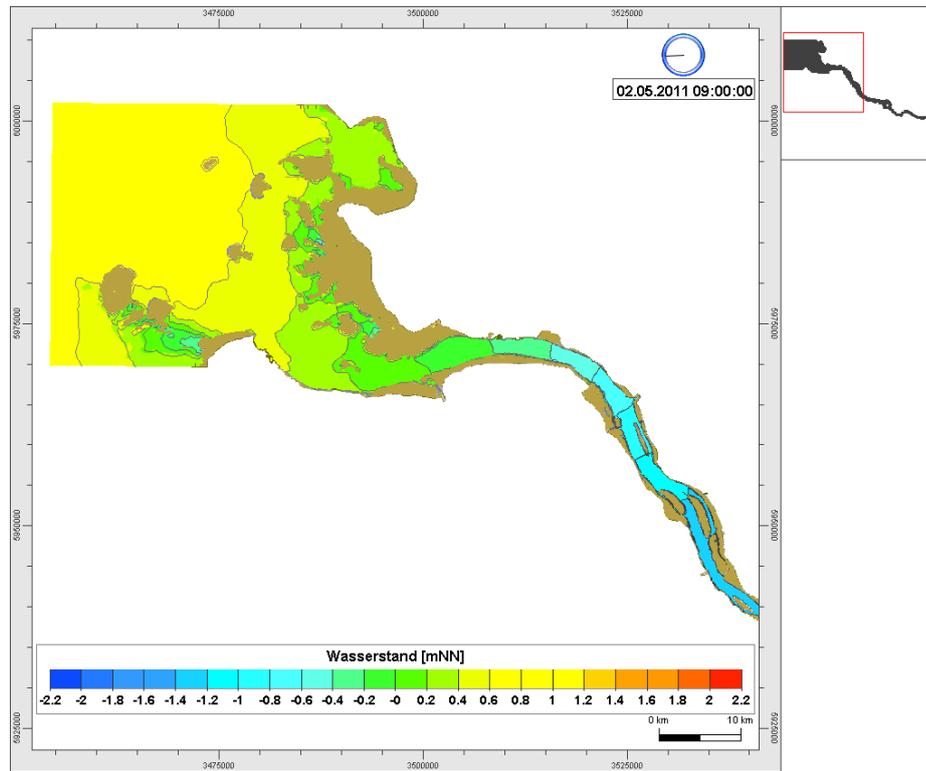


Bild 74: Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 9:00 UTC.

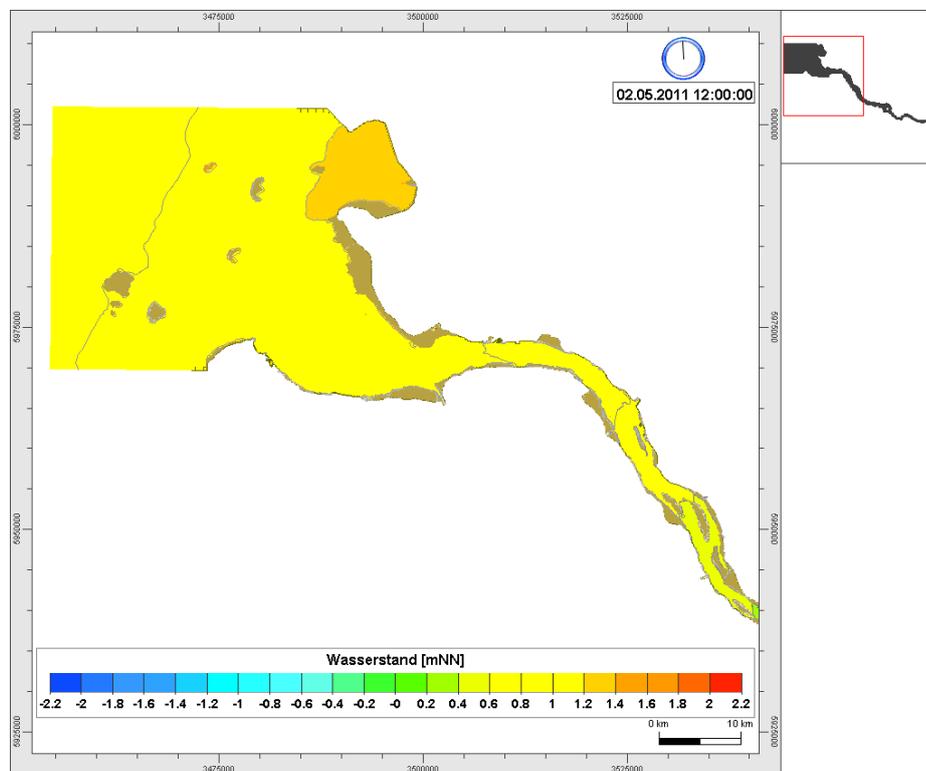


Bild 75: Elbmündung: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 12:00 UTC.

Auch für weitere Gebiete von Interesse im Vorhersagegebiet stehen zeitlich und räumlich hochaufgelöste Wasserstandsvorhersagen zu Verfügung. Bild 76 zeigt die Wasserstandsverteilung im Hamburger Hafen zu Beginn der Vorhersage am 2. Mai 2011. Die trockenen (aber z.B. bei Sturmflut überflutbaren) Flächen im Hafen sind braun gekennzeichnet. Bild 70 gibt einen Überblick über den Tideverlauf im Vorhersagezeitraum für Hamburg St.Pauli.

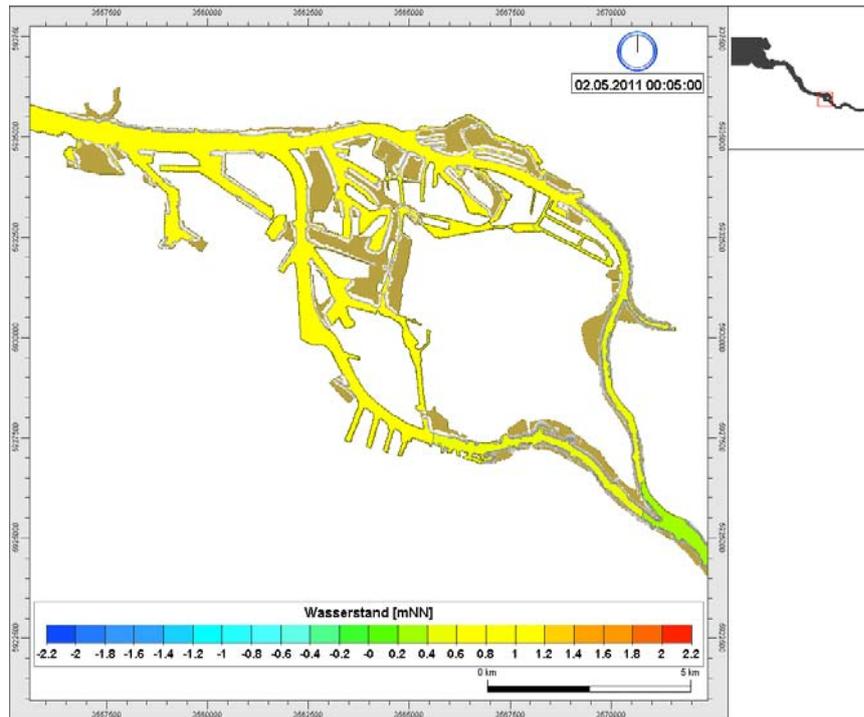


Bild 76: Hafen Hamburg: Wasserstandsverteilung am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).

Am 2. Mai 2011 3:00 UTC (Bild 77) zeigt sowohl die Vorhersage als auch die Messung Tidehochwasser Thw. Anschließend sinkt der Wasserstand im Hamburger Hafen (6:00 UTC in Bild 78 und 9.00 UTC in Bild 79). Gegen 10:00 UTC wird das Tideniedrigwasser Tnw erreicht. Gegen 12:00 UTC (Bild 80) ist der Wasserstand im Hafengebiet bereits wieder auf NN + 0,00 m angestiegen.

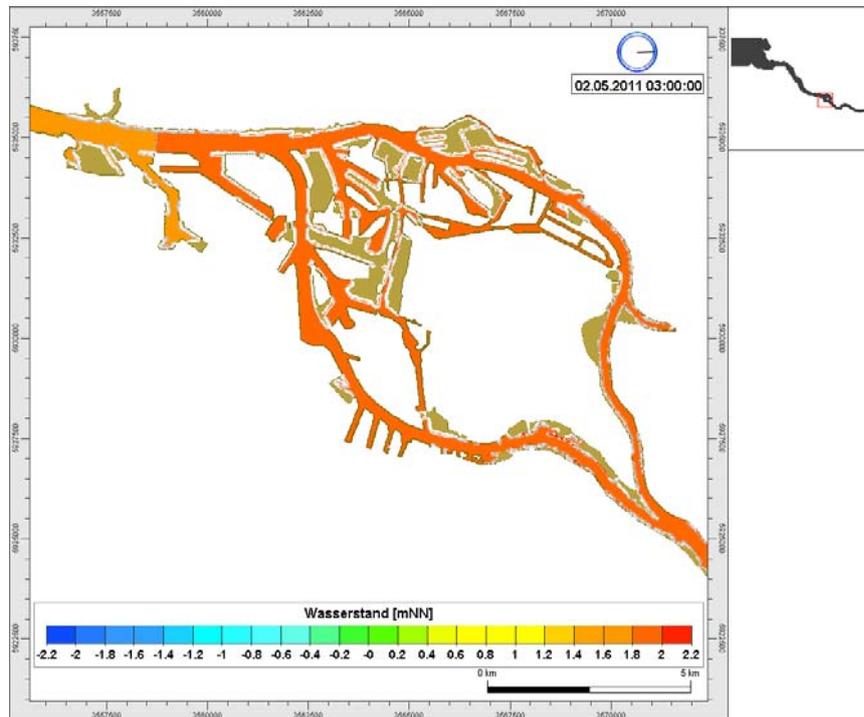


Bild 77: Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.

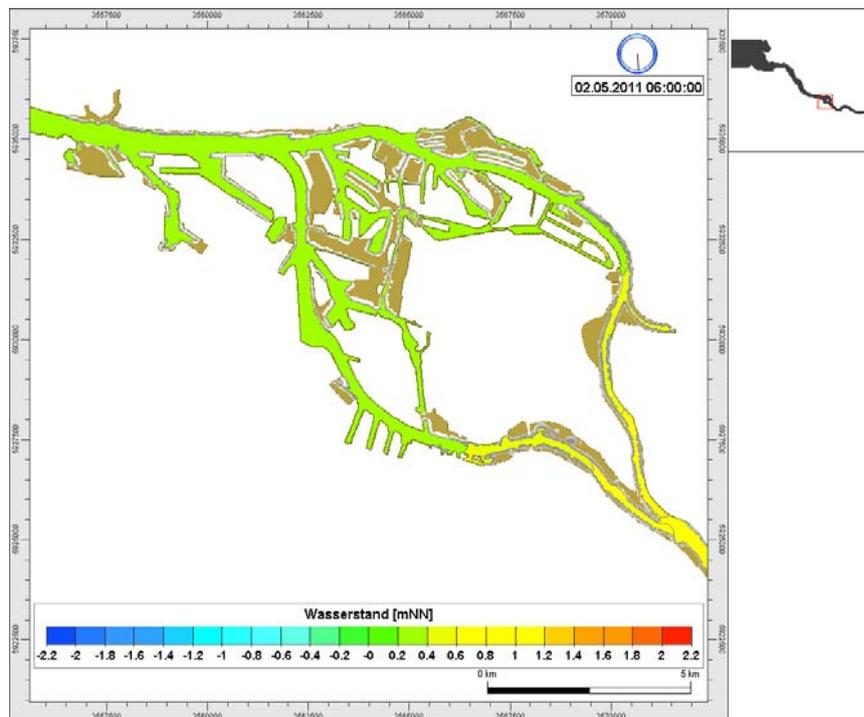


Bild 78: Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.

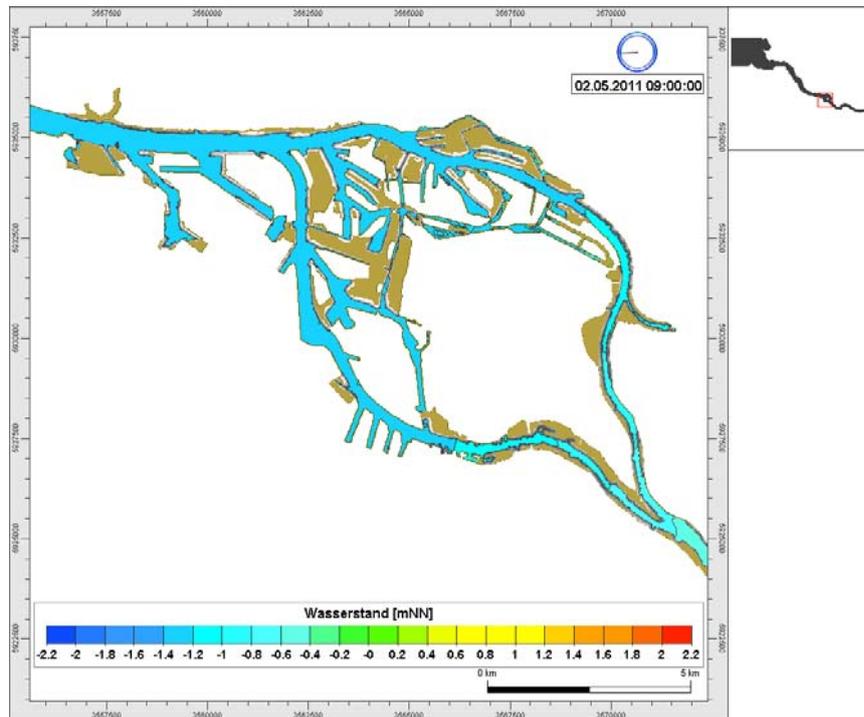


Bild 79: Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 9:00 UTC.

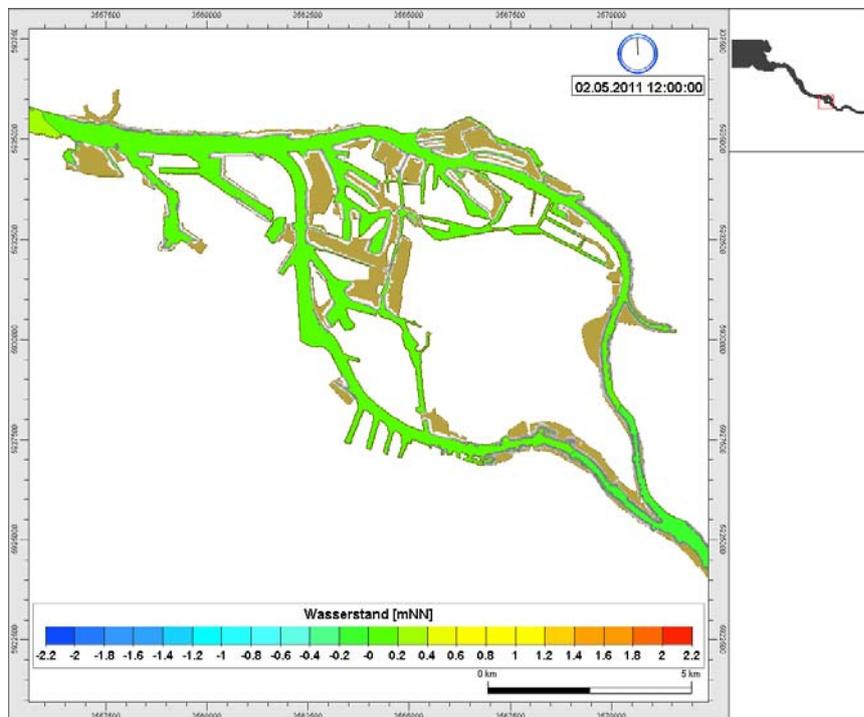


Bild 80: Hafen Hamburg: Wasserstandsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 12:00 UTC.

## 8.4.2 Strömungsgeschwindigkeit

Zu Beginn jeder Vorhersage werden ebenfalls die Strömungsgeschwindigkeiten des Vorhersagemodells mit Werten aus der vorherigen Vorhersage initialisiert. Am 2. Mai 2011 00:00 UTC wird die Strömungsgeschwindigkeit im BAW-Vorhersagemodells-Elbe auf den Wert der Strömungsvorhersage für den 2. Mai 2011 00.00 UTC vom 1. Mai 2011 00:00 UTC gesetzt. Bild 81 zeigt die oberflächennahe Strömungsgeschwindigkeiten in der Elbmündung zu Beginn der Vorhersage. Die trockenen Gebiete sind braun markiert. Einen Überblick über den Tideverlauf in Cuxhaven im Vorhersagezeitraum gibt Bild 69. Westlich von Cuxhaven hat bereits die Ebbströmung eingesetzt, während stromauf von Cuxhaven noch Flutstrom herrscht.

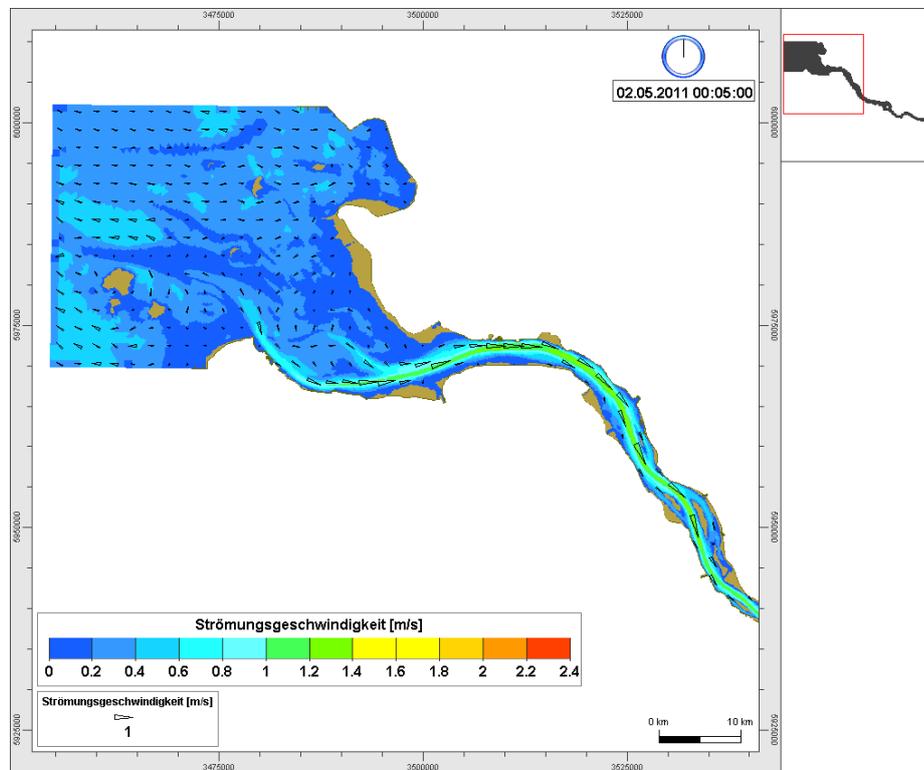


Bild 81: Elbmündung: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).

Die Vorhersage für den 2. Mai 2011 3:00 UTC (Bild 82) zeigt Ebbstrom im gesamten Elbmündungsbereich. Hohe Strömungsgeschwindigkeiten treten in den tiefen Rinnen wie der Fahrrinne oder der Medemrinne auf. Auch drei Stunden später, kurz vor Tnw in Cuxhaven (Bild 83), herrscht in der Elbmündung Ebbstrom. Lediglich im Bereich des westlichen Modellrandes hat die Stromkenterung schon stattgefunden. Für 9:00 UTC wird für das gesamte Elbmündungsgebiet Flutstrom (Bild 84) vorhergesagt. Auch hier findet man die hohen Strömungsgeschwindigkeiten erwartungsgemäß in den tiefen Rinnen. Um 12:00 UTC (Bild 85), zu Thw bei Cuxhaven, beginnt in der Elbmündung die Kenterung während stromauf von Cuxhaven noch Flutstrom herrscht.

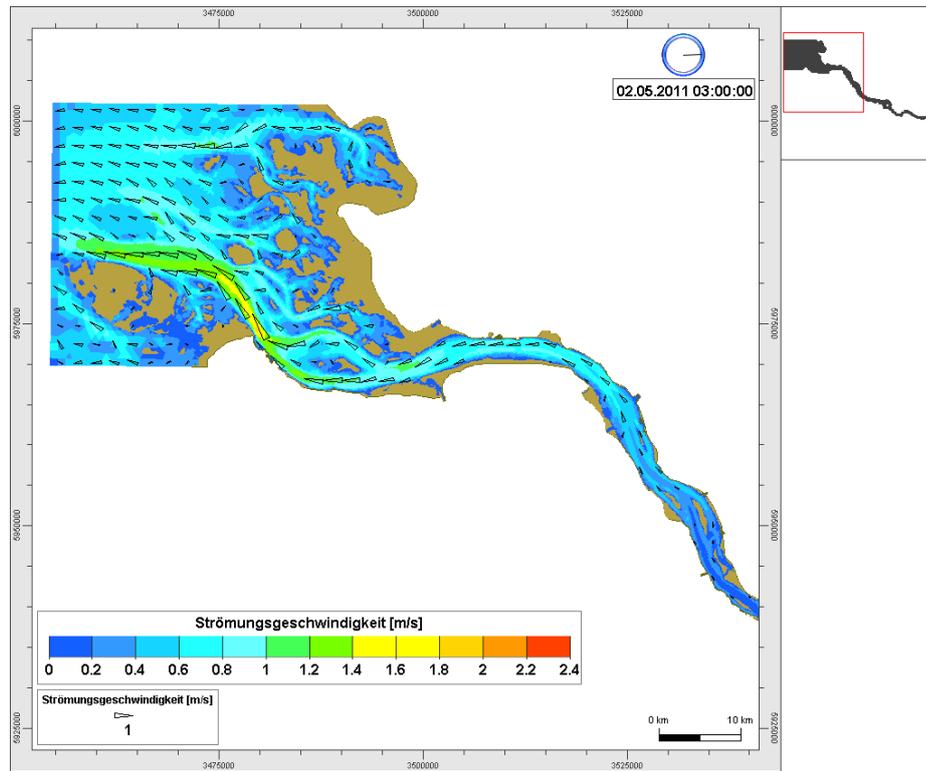


Bild 82: Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.

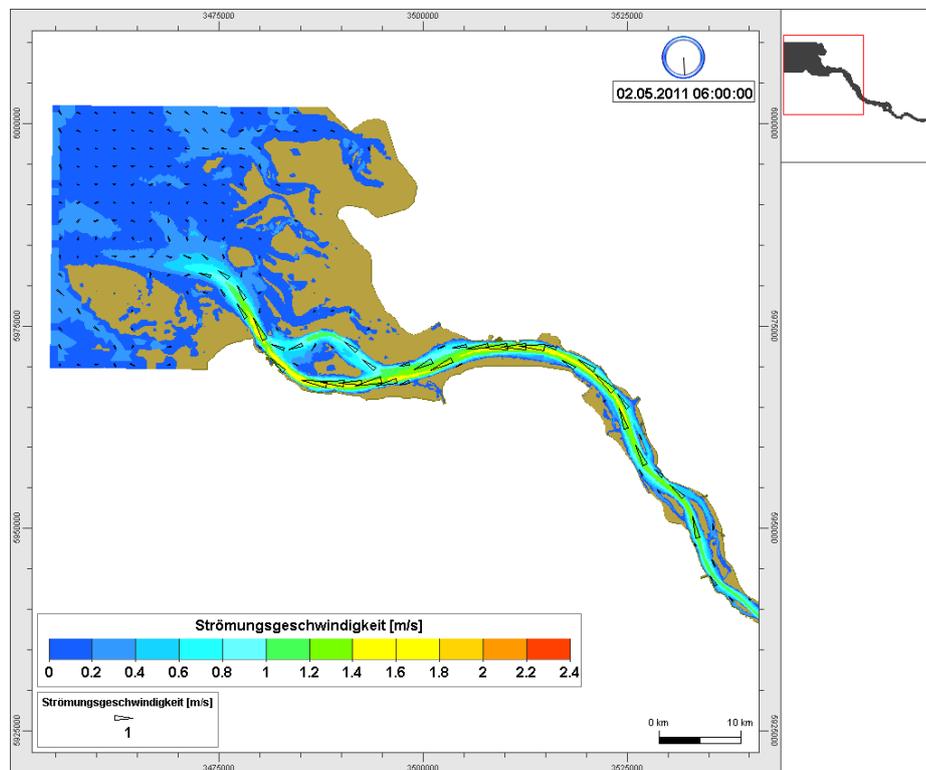


Bild 83: Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.

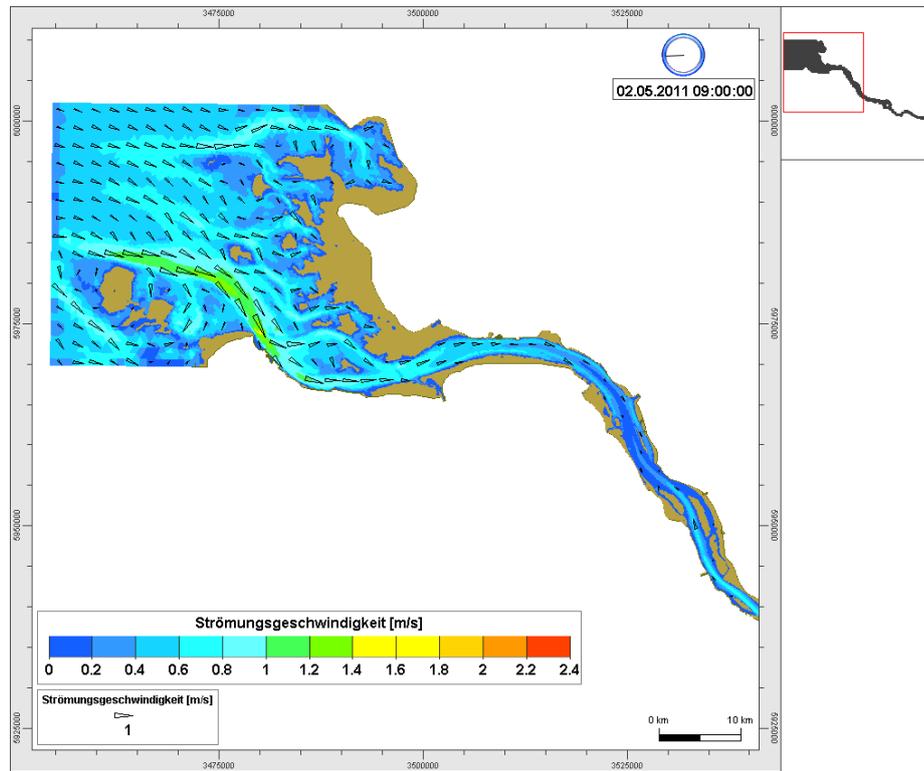


Bild 84: Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 9:00 UTC.

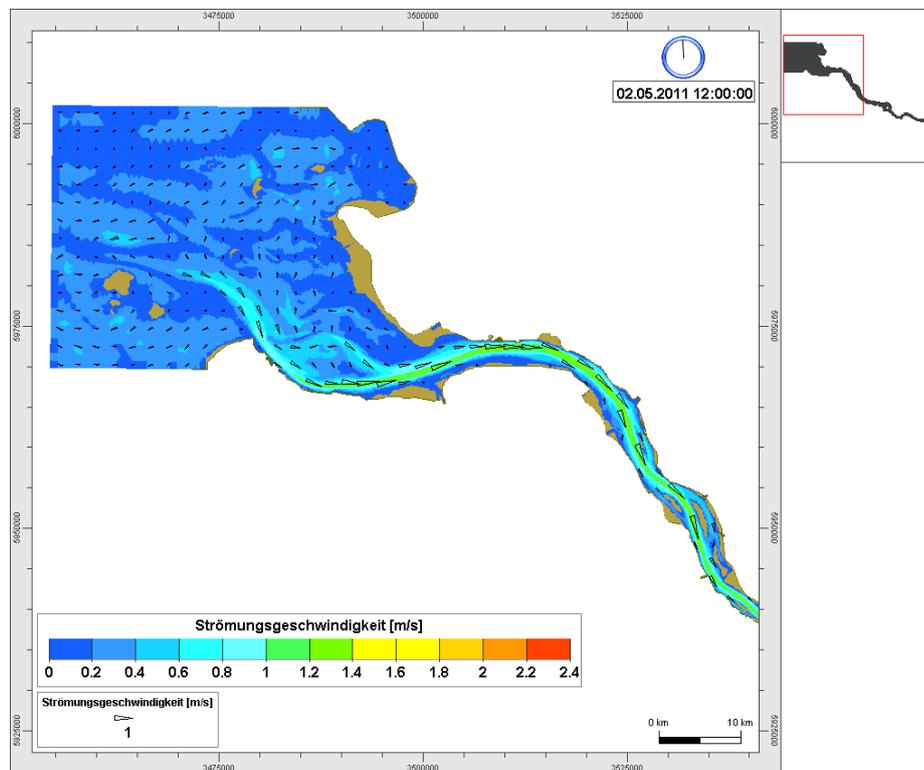


Bild 85: Elbmündung: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 12:00 UTC.

Auch für weitere Gebiete von Interesse im Vorhersagegebiet stehen zeitlich und räumlich hochaufgelöste Strömungsvorhersagen zu Verfügung. Bild 86 zeigt die Strömungsverteilung im Hamburger Hafen zu Beginn der Vorhersage am 2. Mai 2011. Die trockenen (aber z.B. bei Sturmflut überflutbaren) Flächen im Hafen sind braun gekennzeichnet. Bild 70 gibt einen Überblick über den Tideverlauf im Vorhersagezeitraum für Hamburg St.Pauli. Zu Beginn der Vorhersage herrscht im gesamten Hafengebiet Flutstrom. In der Fahrrinne der Norder- und Süderelbe treten die höhern Strömungsgeschwindigkeiten auf, während in den einzelnen Häfen deutlich niedrigere Strömungsgeschwindigkeiten zu finden sind.

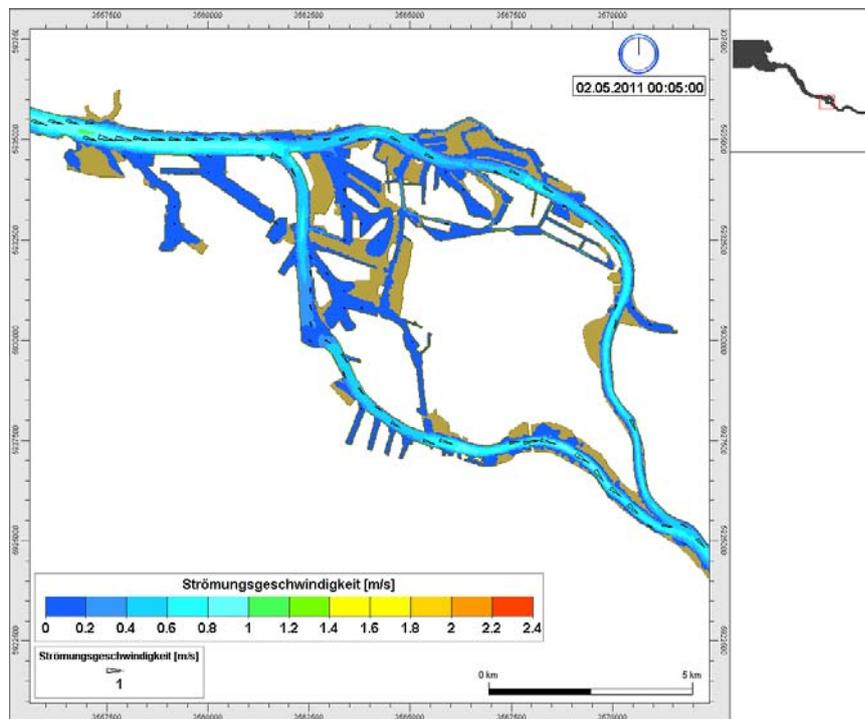


Bild 86: Hafen Hamburg: Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).

Drei Stunden später, zu Thw in Hamburg St.Pauli herrscht noch Flutstrom, jedoch mit deutlich kleineren Geschwindigkeiten (Bild 87). Für 6.00 UTC (Bild 88) und 9:00 UTC (Bild 89) bei fallendem Wasserstand ist Ebbstrom für das gesamte Hafengebiet vorhergesagt. Auch hier werden die größten Strömungsgeschwindigkeiten in der Fahrrinne beobachtet. Um 12:00 UTC (Bild 90), ca. 2 Stunden nach Tnw herrscht Flutstrom.

Diese detaillierten Strömungsvorhersagen für die gesamte Tideelbe und besonders auch für den Hamburger Hafen sind z: B. für Drehmanöver von Schiffen oder beim Eindocken von Schiffen von Interesse.

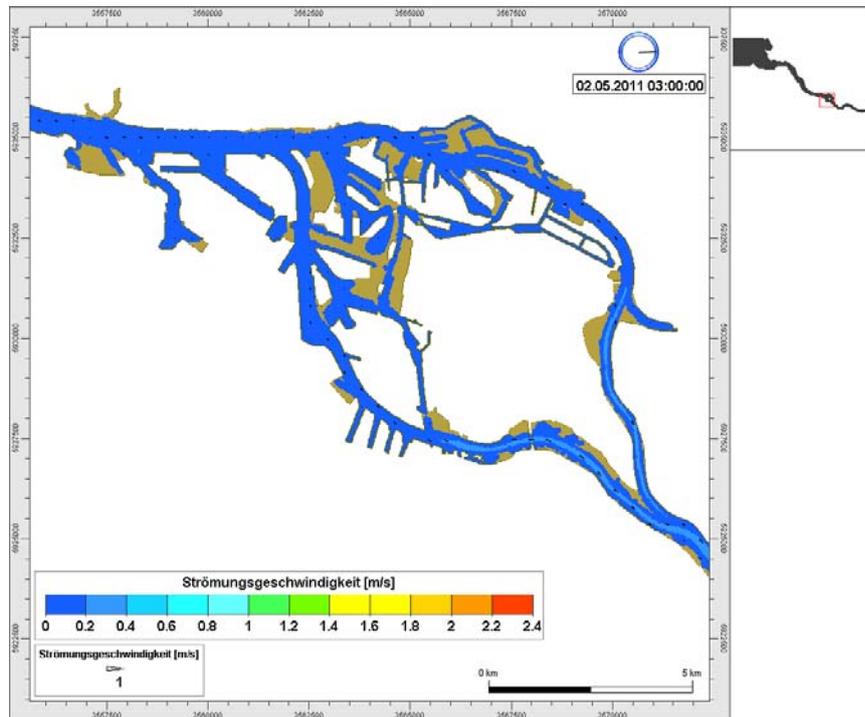


Bild 87: Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.

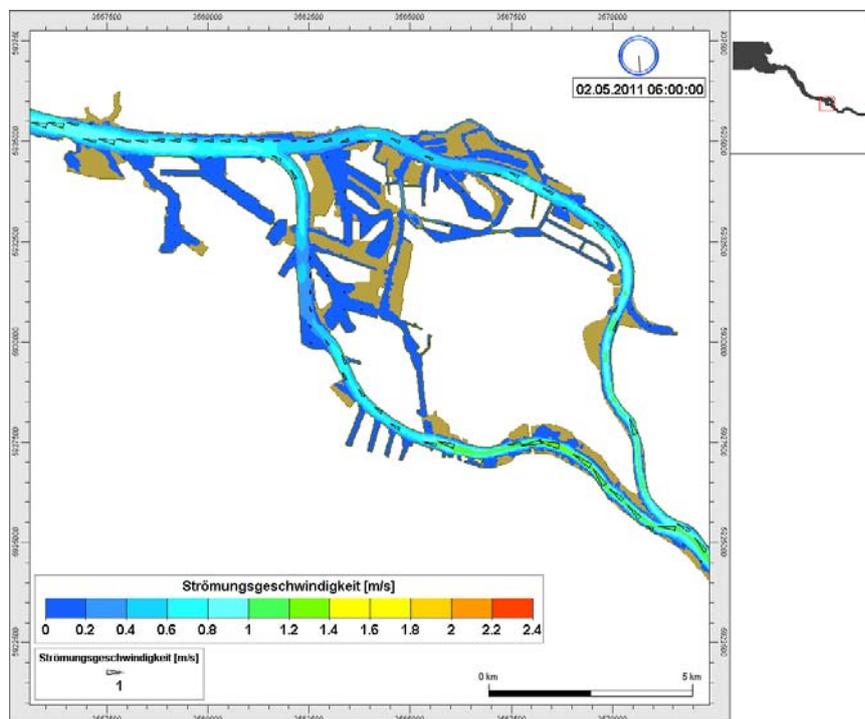


Bild 88: Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.

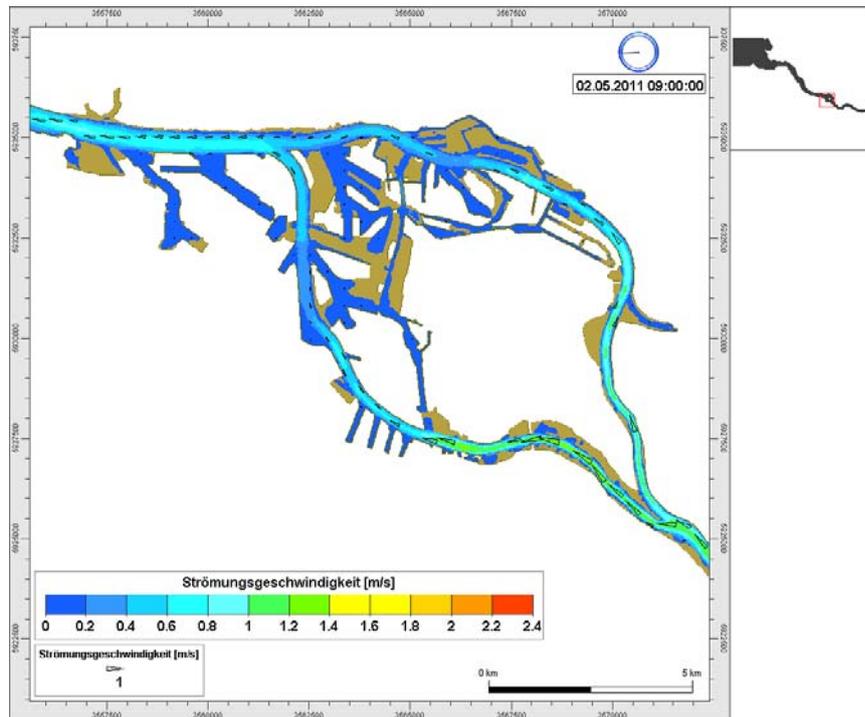


Bild 89: Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 9:00 UTC.

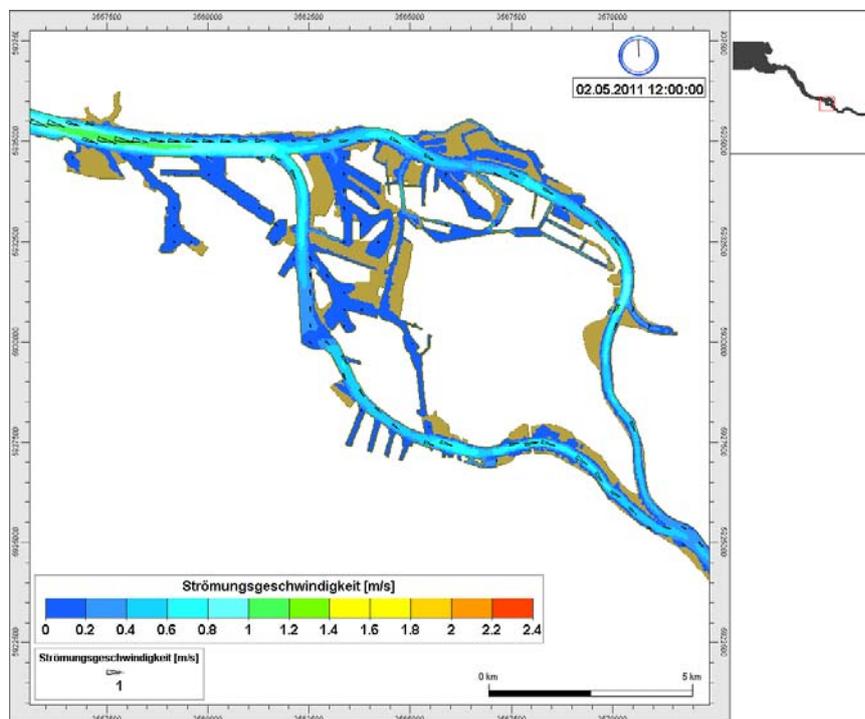


Bild 90: Hafen Hamburg: Strömungsgeschwindigkeitsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 12:00 UTC.

### 8.4.3 Salzgehalt

Zu Beginn jeder Vorhersage werden ebenfalls die Salzgehaltsverteilungen des Vorhersage-modells mit Werten aus der vorherigen Vorhersage initialisiert. Am 2. Mai 2011 00:00 UTC (Beginn der Vorhersage) wird die Salzgehaltsverteilung im BAW-Vorhersagemodells-Elbe auf den für den 2. Mai 2011 00.00 UTC vorhergesagten Wert der Salzgehaltsvorhersage vom 1. Mai 2011 00:00 UTC (Beginn der Vorhersage am Vortag) gesetzt. Bild 91 zeigt den oberflächennahen Salzgehalt in der Elbmündung zu Beginn der Vorhersage. Die trockenen Gebiete sind braun markiert. Einen Überblick über den Tideverlauf bei Cuxhaven im Vorher-sagezeitraum gibt Bild 69. Im Elbmündungsgebiet und auch stromauf von Cuxhaven wird das Salz mit dem Flutstrom bevorzugt in der tiefen Rinne elbaufwärts transportiert.

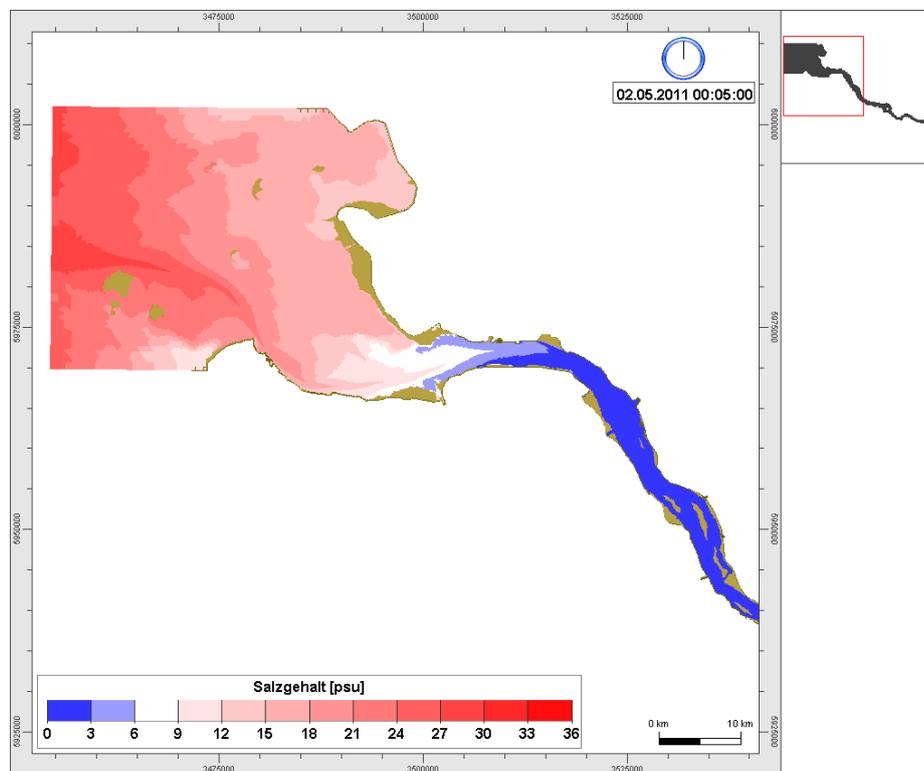


Bild 91: Elbmündung: Verteilung des Salzgehaltes am 2. Mai 2011 00:05 UTC zu Beginn der Vorhersage (BAW).

Mit einsetzendem Ebbstrom (Bild 93 und Bild 94) wird das salzhaltige Wasser wieder in Richtung Nordsee gedrängt. Das blau gekennzeichnete salzarme Wasser dringt bis 9:00 UTC (Bild 94) in den Bereich Neufelder Sand/ Medemgrund vor. Mit dem Flutstrom wird das salzhaltigere rot gekennzeichnete Wasser wieder elbaufwärts (Bild 95) transportiert.

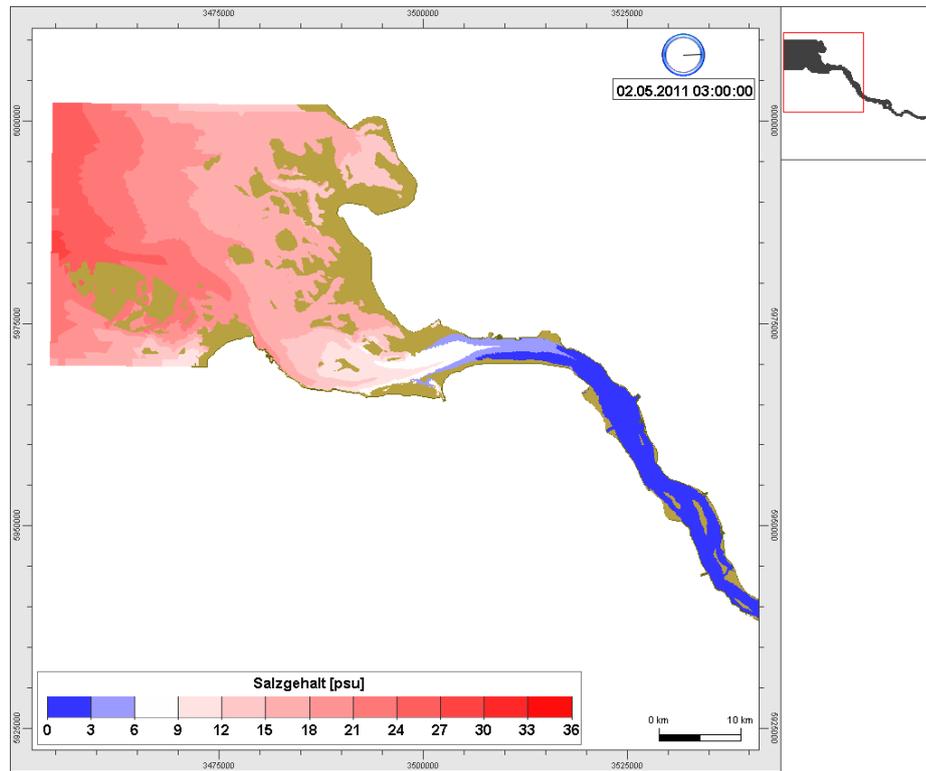


Bild 92: Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 3:00 UTC.

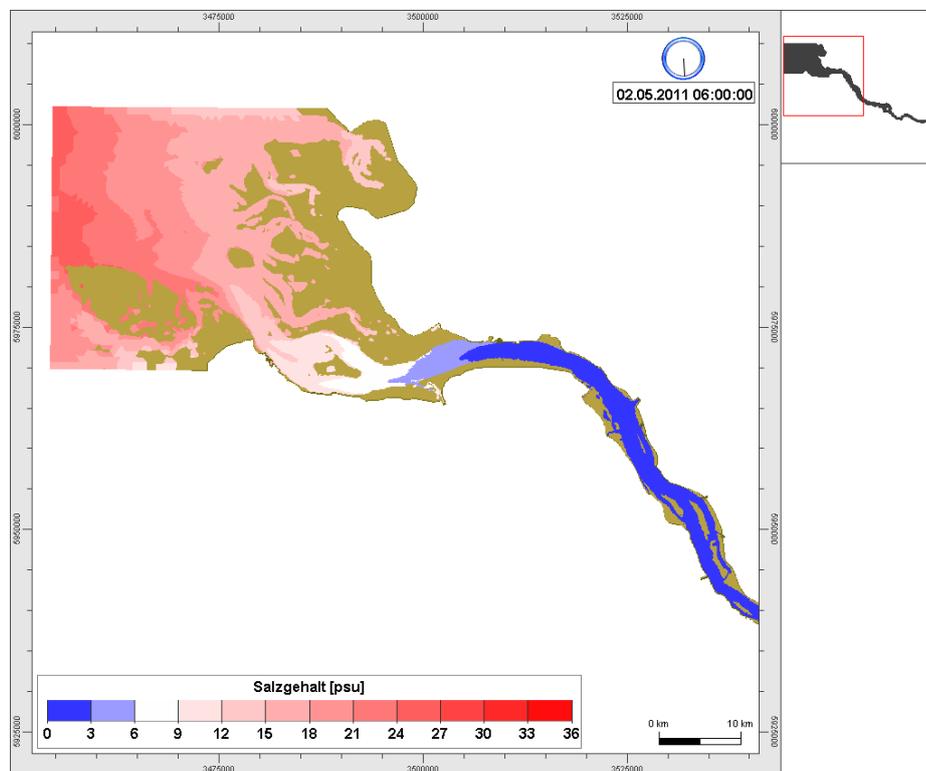


Bild 93: Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 6:00 UTC.

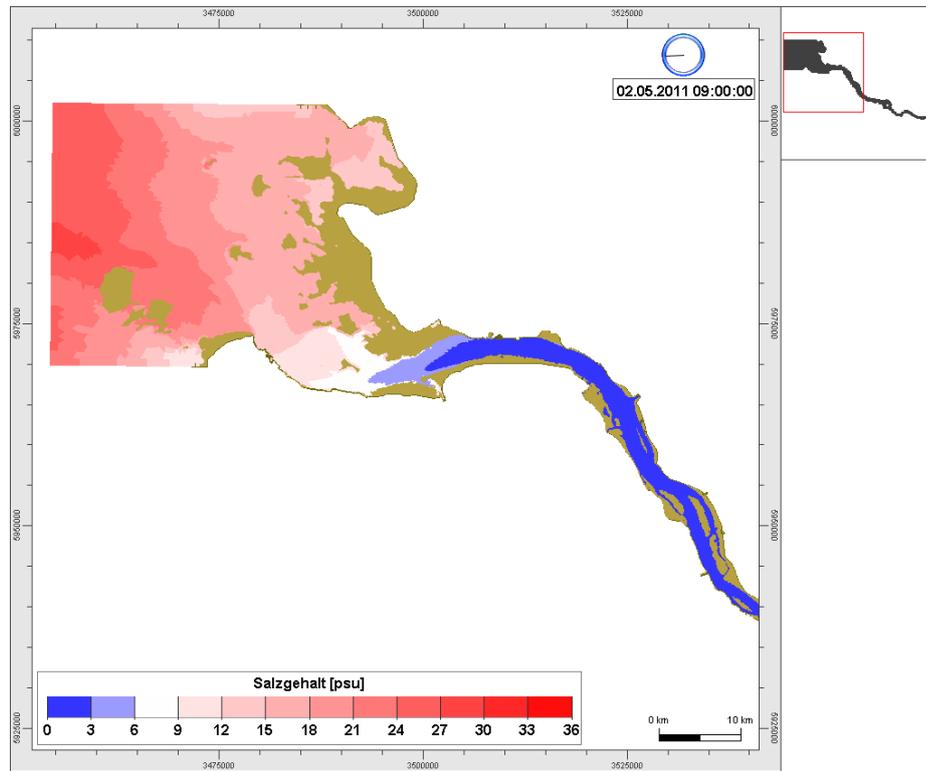


Bild 94: Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 9:00 UTC.

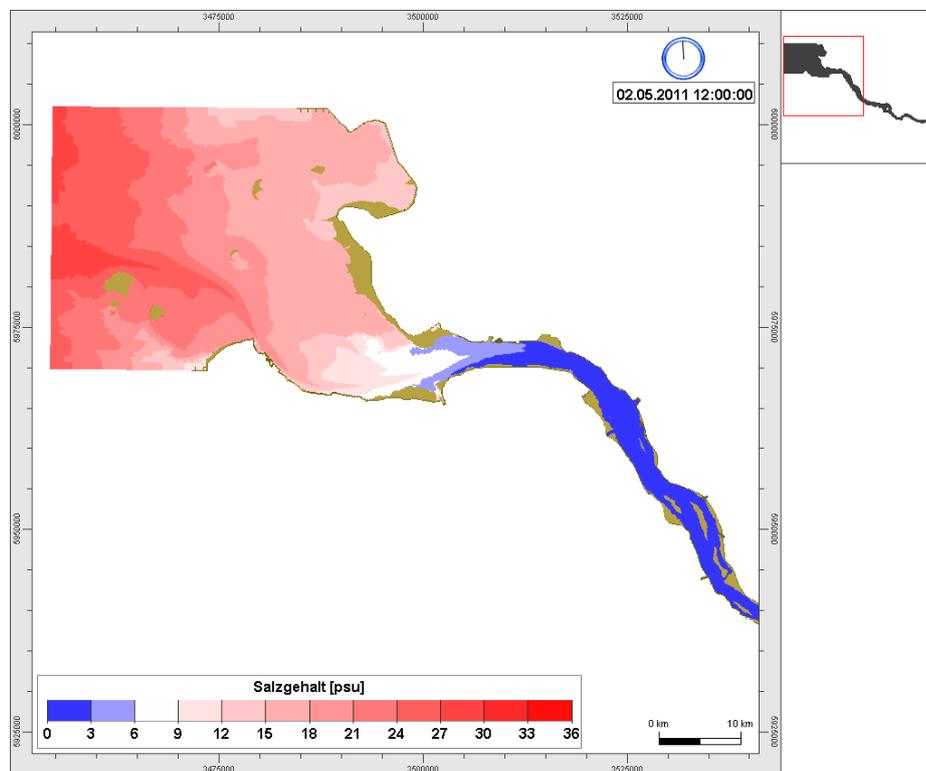
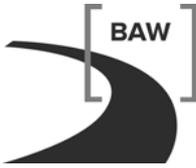


Bild 95: Elbmündung: Salzgehaltsvorhersage (BAW) für den 2. Mai 2011 12:00 UTC.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

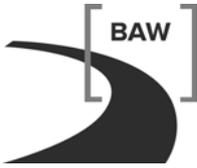
Im Rahmen des Projektes OPTEL-C wird eine operationelle Wasserstands-, Strömungs- und Salztransportvorhersage für die Tideelbe entwickelt, die auch bei extremen Wind- und/oder Oberwassersituationen Vorhersagen zur Verfügung stellt. Bei der Konzeption des Vorhersagesystems aus Atmosphäre, Nordsee und Tideelbe wird beachtet, dass eine Übertragung des Vorhersagesystems auf die Ästuar von Jade-Weser und Ems möglich ist.

Auf der Grundlage des 3-dimensionalen hydrodynamischen numerischen Modells UnTRIM [8] wird das BAW-Vorhersagemodell-Elbe entwickelt. Das mathematische Verfahren UnTRIM eignet sich besonders für Anwendungen in geometrisch komplexen Ästuaren mit regelmäßigem Überfluten und Trockenfallen. Das BAW-Vorhersagemodell für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt in der Tideelbe erhält Informationen über den vorhergesagten Wind über der Elbe aus dem Wettervorhersagemodell COSMO-EU [17] des DWD. Am seeseitigen Rand zur Nordsee werden Wasserstands- und Salztransportvorhersagen aus dem Vorhersagemodell BSHcmod [16] des BSH vorgegeben. Als Abfluss für den Vorhersagezeitraum wird die letzte verfügbare Abflussmessung in Neu Darchau (BfG) verwendet. Die vom BAW-Vorhersagemodell-Elbe benötigten Schnittstellen zu den genannten Randwerten sind in OPTEL-C in enger Zusammenarbeit mit OPTEL-A und OPTEL-B [18] entwickelt worden.

Im Projektzeitraum OPTEL-C konnte gezeigt werden, dass die Schnittstelle zum Wettervorhersagemodell des DWD [18] für beliebige Modellgebiete, wie z.B. das Jade-Weser-Ästuar einsetzbar ist. Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe kann prinzipiell auch für dieses Ästuar Wasserstandsvorhersagen durchführen.

Zur Kalibrierung und Validierung des BAW-Vorhersagemodells-Elbe stehen Messungen von Wasserstand, Strömung und Salzgehalt entlang des Ästuares sowie Randwerte für 6 Szenarien aus den Jahren 2006, 2007 und 2008 zu Verfügung. Die Wasserstandsrandwerte stammen zum einen aus dem Vorhersagemodell des BSH und zum anderen aus Messungen. Die 6 von OPTEL-D [37] ausgewählten Szenarien beinhalten unterschiedliche meteorologische und hydrologische Situationen, wie mittlere Verhältnisse, Sturmfluten, Sturmsee oder sehr hohe bzw. sehr niedrige Oberwasserzuflüsse.

Der Vergleich von Messung mit Vorhersage für die 6 Szenarien zeigt die Bedeutung der Randwerte für die Güte der Vorhersage entlang des Ästuares. Wird die Vorhersage der Szenarienzeiträume mit Messungen des Wasserstandes angetrieben, so werden die Tidehochwasser Thw entlang der Elbe auf  $\pm 10$  cm und die Tideniedrigwasser Tnw entlang der Elbe auf  $\pm 40$  cm vorhergesagt. Durch den Einsatz von Ergebnissen aus dem Vorhersagemodell des BSH [16] zur Randwertgenerierung für die Szenarienzeiträume erreicht die Vor-



hersage + 10 cm/ - 25 cm im Tidehochwasser Thw und + 30 cm/-60 cm im Tideniedrigwasser Tnw, da die Vorhersagen für die Elbe zusätzlich von der Vorhersagegüte der Randwerte abhängen. Die Wasserstandsvorhersage für die Elbe verbessern sich besonders bei Sturmflut durch den Einsatz der von OPTTEL-B bereitgestellten WASP-Korrekturfaktoren im BAW-Vorhersagemodells-Elbe. Da zum Projektende von OPTTEL-C im März 2011 noch keine Ergebnisse aus dem operationellen Tideelbmodell des BSH für diese 6 Szenarien zu Verfügung standen, konnte der geplante Vergleich der Vorhersageverfahren aus OPTTEL-A (BSH) und OPTTEL-C (BAW) noch nicht stattfinden.

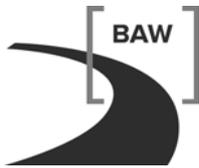
Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe läuft seit dem 8. Januar 2011 ununterbrochen im prä-operationellen Betrieb auf dem Rechner des BSH und erzeugt jeden Tag auf der Grundlage der Vorhersagen von BSH und DWD eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Vorhersage für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt für die Tideelbe. Zur Randwertaufbereitung und Vorhersage der nächsten 24 Stunden benötigt das BAW-Vorhersagemodell-Elbe derzeit auf dem Rechner des BSH 3 Stunden.

Die präoperationelle Phase wird noch bis zum Ende des Jahres 2011 fortgesetzt. Nach der gemeinsamen Auswertung und Bewertung der Vorhersageergebnisse für die Elbe durch BSH und BAW wird gemeinsam über den Übergang des BAW-Vorhersagemodells-Elbe in den operationellen Betrieb entschieden werden. Im Rahmen dieser Auswertung und Bewertung soll auch eine vergleichende Bewertung der Vorhersageergebnisse für die Elbe aus OPTTEL-A und OPTTEL-C stattfinden.

Die bisherigen Vorhersageergebnisse des BAW-Vorhersagemodells-Elbe aus dem präoperationellen Betrieb zeigen entlang der Elbe, wie aus den Ergebnissen für den Kalibrierungs- und Validierungszeitraum zu erwarten, in Abhängigkeit von der Vorhersagegüte des Wasserstandes auf dem Rand zur Nordsee, sehr zufriedenstellende Vorhersagen des Tidehochwassers Thw sowie der Eintrittszeit des Thw und weniger zufriedenstellende Vorhersagen des Tideniedrigwasser Tnw.

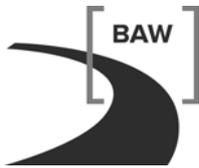
Um die Vorhersagegüte von der Tidephase unabhängig zu machen, wird parallel zur prä-operationellen Phase an einer Verbesserung der Kalibrierung des BAW-Vorhersagemodell-Elbe gearbeitet. In einem ersten Schritt soll die Parametrisierung der Bodenrauheit verändert werden. Erste Ergebnisse mit veränderter Kalibrierung des BAW-Vorhersagemodell-Elbe werden für November 2011 erwartet.

Durch Mitglieder der projektbegleitenden Gruppe des KFKI-Projektes OPTTEL wurde im Frühjahr 2011 Kontakt zwischen OPTTEL und der Hochwasservorhersagezentrale Elbe (HVZ) des LHW in Magdeburg hergestellt. Hier wird für die Wasserstandsvorhersage der Binnenelbe in Zusammenarbeit mit BfG und WSV das Wasserstandsvorhersagesystem der Elbe WAVOS eingesetzt. Bei gelegtem Wehr Geesthacht (hoher Abfluss oder Sturmflut) benötigt dieses



Vorhersagesystem Randwerte aus dem tidebeeinflussten Bereich zwischen Zollenspieker und Lauenburg. Hierfür sind Wasserstandsvorhersagen aus der Tideelbe als Randwerte interessant. In einem Gespräch am 7. Juli 2011 in Magdeburg wurden die Vorhersagemöglichkeiten für Wasserstände in der Tideelbe aus OPTTEL-A und OPTTEL-C vorgestellt. Es wurde verabredet, zu prüfen, ob eine Randwertübergabe aus den (prä-) operationellen Vorhersagemodellen der Tideelbe möglich ist. Für die Vorhersagen der Hochwasservorhersagezentrale ist eine sehr schnelle, möglichst lange Wasserstandsvorhersage für die Tideelbe wünschenswert.

Derzeit wird bei der BAW untersucht, ob eine weitere Beschleunigung der Wasserstandsvorhersage mit dem BAW-Vorhersagemodells-Elbe möglich ist. Hierfür bietet sich der Einsatz des hydrodynamischen numerischen Verfahrens UnTRIM2 ([9] bzw. [10]) an, das durch den Einsatz der sogenannten subgrid-Technologie mit einem deutlich größeren Rechengitter aber vergleichbarer Auflösung der Topographie Wasserstandsvorhersagen vergleichbarer Güte in deutlich verkürzter Rechenzeit modellieren kann. Erste Tests der BAW zeigen, dass sich für eine 72-stündige Wasserstandsvorhersage der Tideelbe die Rechenzeit von derzeit ca. 4,5 Stunden (270 Minuten) auf 15 Minuten reduziert.

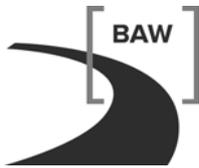


## 10 Danksagung

Ich möchte mich bei meinen KollegInnen von der BAW Dienststelle Hamburg für die vielfältige Unterstützung bedanken. Desweiteren bedanke ich mich für die sehr gute referatsübergreifende Zusammenarbeit.

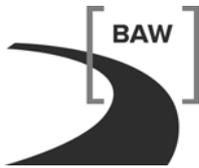
Ich bedanke mich ebenfalls bei den Projektpartnern vom DWD, vom BSH und von HPA für die gute Zusammenarbeit, die Bereitstellung und Diskussion der WASP-Faktoren (DWD), die Bereitstellung der Daten von Wasserstand, Strömung und Salzgehalt an vereinbarten Messstellen für die Zeiträume der Szenarien (HPA) - ohne diese Daten wäre die Beurteilung der Hindcasts nicht möglich gewesen – und nicht zuletzt für die Unterstützung bei der Implementierung des BAW-Vorhersagemodells-Elbe im BSH und bei der Aufnahme des prä-operationellen Betriebes (BSH).

Das Projekt OPTEL-C wurde auf Vorschlag des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) vom Bundesministerium für Forschung und Technologie gefördert. Besonderer Dank gilt den Mitgliedern der projektbegleitenden Gruppe für fruchtbare Diskussionen und weiterführende Anregungen.

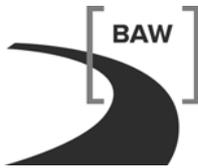


## 11 Literatur

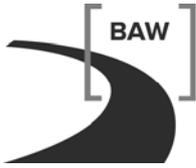
- [1] Adams, J. C., W. S. Brainerd, J. T. Martin, B. T. Smith und J. L. Wagener (1992) Fortran 90 Handbook – Complete ANSI/ISO Reference. MacGraw-Hill Book Company. New York. ISBN 0-07-000406-4.
- [2] BAW: Mathematisches Verfahren UnTRIM. Internet - Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstrasse 157. 22559 Hamburg, [http://www.baw.de/methoden/index.php5/Mathematisches\\_Verfahren\\_UNTRIM](http://www.baw.de/methoden/index.php5/Mathematisches_Verfahren_UNTRIM)
- [3] BAW (2004) Validation document – Mathematical Model UnTRIM, Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstr. 157, 22559 Hamburg [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/vd-untrim-2004.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/vd-untrim-2004.pdf)
- [4] Blind, M. und J.B. Gregersen (2005) Towards an Open Modelling Interface (OpenMI) the Harmonit project, Adv.Geosc. 4, pp.69-74
- [5] Boehlich, M.J. and Strotmann, T (2008) The Elbe Estuary, Die Küste, **74**, pp. 288 – 306
- [6] BSH (2011) Nordseesturmflut in der Nacht vom 4. 2. auf den 5. 2. 2011. Bericht des Sturmflutwarndienstes des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie. [http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Sturmfluten/Berichte/sturmflut\\_nordsee\\_05\\_02\\_11.pdf](http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Sturmfluten/Berichte/sturmflut_nordsee_05_02_11.pdf)
- [7] Casulli, V. and G. Lang (2004) Mathematical Model UnTRIM – User Interface Description – Version June 2004. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstrasse 157. 22559 Hamburg, [http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische\\_verfahren/pdf/Simulationsverfahren\\_Kueste\\_untrim-ui-2004.pdf](http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_untrim-ui-2004.pdf) .
- [8] Casulli, V. and R.A. Walters (2000) An unstructured, three-dimensional model based on the shallow water equations, Intern. J. Num. Meth. in Fluids, **32**, pp.331-348 [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1097-0363\(20000215\)32:3%3C331::AID-FLD941%3E3.0.CO;2-C/pdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1097-0363(20000215)32:3%3C331::AID-FLD941%3E3.0.CO;2-C/pdf)
- [9] Casulli, V. (2008), A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 60, Issue 4, pp. 391 - 408.
- [10] Casulli, V. and Stelling, G. S. (2010) Semi-implicit sub grid modelling of three-dimensional free-surface flows, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Volume 67, Issue 4, pp. 441-449.
- [11] [Projektbeschreibung OPTEL :](#) [http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Projekte/OPTEL/Projektbeschreibung\\_OPTEL\\_neu\\_b\\_m11.pdf](http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Projekte/OPTEL/Projektbeschreibung_OPTEL_neu_b_m11.pdf)
- [12] Strömungsvorhersagen aus dem operationellen Modellsystem des BSH: <http://www.bsh.de/aktdat/modell/stroemungen/Modell1.htm>



- [13] Definition der Sturmfluten:  
<http://www.bsh.de/de/Meeresdaten/Vorhersagen/Sturmfluten/index.jsp>
- [14] DGJ (2005) Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung 2002, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Arbeit – Hamburg Port Authority
- [15] DGJ (2011) Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung 2007, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Wirtschaft und Arbeit – Hamburg Port Authority
- [16] Dick, S., E. Kleine, S.H. Müller-Navarra, H. Klein, H. Komo, (2001) The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod), Model description and validation, Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie, **29**, 49 pp.
- [17] DWD: Regionalmodell COSMO - EU. Internet Bericht.  
[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?nfpb=true&state=maximized&windowLabel=T43402627281174304668504&T43402627281174304668504gsbDocument-Path=Navigation%2FForschung%2FAnalyse\\_Modellierung%2FFU\\_NM\\_LME\\_node.html%3Fnnn%3Dtrue&pageLabel=dwdwww\\_spezielle\\_nutzer\\_hobbymeteorologen\\_vorhersage](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?nfpb=true&state=maximized&windowLabel=T43402627281174304668504&T43402627281174304668504gsbDocument-Path=Navigation%2FForschung%2FAnalyse_Modellierung%2FFU_NM_LME_node.html%3Fnnn%3Dtrue&pageLabel=dwdwww_spezielle_nutzer_hobbymeteorologen_vorhersage)
- [18] Ganske, A., und Rosenhagen, G. (2010) "Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die TideElbe". Abschlußbericht des KFKI-Projektes OPTEL-B, Fördernummer KFKI 101
- [19] Gijssbers, P., S. Hummel, S. Vaneček, J. Groos, A. Harper, R. Knapen, J. Gregersen, P. Schade, A. Antonello (2010) From OpenMI 1.4 to 2.0, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software, 5. Biennial Meeting, Ottawa, Canada ,  
<http://www.iemss.org/iemss2010/index.php?n=Main.Proceedings>
- [20] Gönnert, G. & Ferk, U. , "Natürliche und anthropogen beeinflusste Entwicklung von Sturmfluten in der Deutschen Bucht und der Unterelbe", Vechtaer Studien zur Angewandten Geographie und Regionalwissenschaft, (1996),Bd. 18, S. 13 - 31.
- [21] Götschenberg, A. und A. Kahlfeld (2008) The Jade. Die Küste, **74**, pp. 263 – 274.
- [22] Gregersen, J.B., P.J.A. Gijssbers, S.J.P. Westen, M.Blind (2005) OpenMI:the essential concepts and their implications for legacy software, Adv. Geosc. **4**, pp. 37 – 44.
- [23] Krebs, M. und H. Weilbeer (2008) The Ems-Dollart-Estuary. Die Küste, **74**, pp. 252 - 262.
- [24] Knapen, R., P. Schade (2010) There is more than Windows. OpenMI LIFE Final Workshop,  
<http://www.openmi.org/reloaded/events/archive/final-workshop-20100111/There-is-more-than-Windows-v2.pdf>
- [25] Lange, D., H. Müller, F. Piechotta und R. Schubert (2008): The Weser Estuary. Die Küste, **74**, pp. 275 - 287



- [26] Malcherek, A. "Gezeiten und Wellen", Vieweg+Teubner, Wiesbaden 2010, ISBN 978-3-8348-0787-8
- [27] Moore, R. OpenMI Association Technical Committee (2010) OpenMI Standard 2 Specification, p. 66.
- [28] Müller-Navarra, S. H., Bork, I., Jensen, J., Koziar, Ch., Mudersbach, Ch., Rudolph, E. (2006) Modellstudien zur Sturmflut und zum Hamburg-Orkan 1962. Hansa 143, 10/06, S. 72 – 88.
- [29] PegelOnline – Gewässerkundliches Informationssystem der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.  
<https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelNr=5930010>
- [30] Projektgruppe Strombau (2007) "Bericht zum Ganzheitlichen Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Unter- und Außenelbe". Hamburg:s.n.,2007
- [31] Reviervorhersage Elbe: <http://www.bsh.de/aktdat/wvd/tabelb.htm>
- [32] Rodi, W., Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review, International Association for Hydraulic Research, Delft, 3rd edition 1993, Balkema.
- [33] Rudolph, E. (2005) Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe. *promet* 31, pp. 186 - 190.
- [34] Schlesinger, S., Crosbie, R. E., Gagné, R. E., Innis, G. S., Loch, J., Sylvester, J., Wright, R. D., Kheir, N. and Bartos, D. (1979), Terminology for model credibility, SCS Technical Committee on Model Credibility, *Simulation*, **32** (3), pp 103-104
- [35] Smith, S. D. and Banke, E. G. (1975), Variation of Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed, *Quart. J. of the Roy. Met. Soc.*, **101**, pp 665 - 673.
- [36] Siefert, W. (1998) Tiden und Sturmfluten in der Elbe und ihren Nebenflüssen. *Die Küste* 60. S. 1 – 115.
- [37] Strotmann, Th., Radegast, C., Ferk, U. (2011) Abschlussbericht des Teilprojektes OPTEL-D, BMBF 03KISO73 / KFKI 101.
- [38] Sturmfluten zur Bemessung von Hochwasserschutzanlagen, Berichte des Landesbetriebes Straßen, Brücken und Gewässer Hamburg, Nr.2/2009.
- [39] Undine - Informationsplattform der BfG: Datengrundlagen zur Einordnung und Bewertung hydrologischer Extreme <http://undine.bafg.de/servlet/is/12102/>
- [40] WAsP: Wind Atlas Analysis and Application Program. Version 8. Course Notes 2005. Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark. <http://www.wasp.dk/>
- [41] Weservertiefung: <http://www.weser.de/index.php?id=7>



**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen



**KFKI – Projekt OPTEL: Windstaustudien und  
Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells**

**OPTEL – C**

**Entwicklung eines operationellen Tidemodells  
der Elbe**

**sowie einer Modellkopplung mit dem  
BSH-Vorhersagemodell der Nordsee**

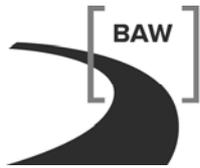
**Abbildungsteil**

Fördernummer BMBF 03KIS071

Christine Kremp  
Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg

September 2011





**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

**KFKI – Projekt OPTEL: Windstaustudien und  
Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells  
OPTEL – C  
Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe  
sowie einer Modellkopplung mit dem  
BSH-Vorhersagemodell der Nordsee**

**Abbildungsteil**

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 03 70 134  
Fördernummer. BMBF 03KIS071 / KFKI 101

GEFÖRDERT VOM

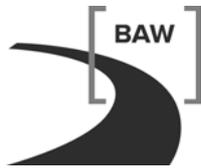


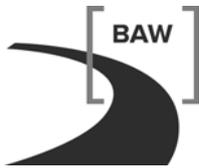
Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Zur Förderung  
vorgeschlagen vom: Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)  
Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich  
Referat: K3  
Bearbeiterin: Dr. Christine Kremp  
Projektleiterin: Dr. Elisabeth Rudolph

Hamburg, im September 2011

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





| <b>Inhaltsverzeichnis</b> |                              | <b>Seite</b> |
|---------------------------|------------------------------|--------------|
| 1                         | Abbildungen zu den Szenarien | 1            |
| 2                         | Wasserstand                  | 3            |
| 2.1                       | Szenario 1                   | 4            |
| 2.2                       | Szenario 2                   | 9            |
| 2.3                       | Szenario 3                   | 11           |
| 2.4                       | Szenario 4                   | 13           |
| 2.5                       | Szenario 5                   | 14           |
| 2.6                       | Szenario 6                   | 16           |
| 2.7                       | Szenario 6a                  | 17           |
| 3                         | Strömung                     | 18           |
| 3.1                       | Szenario 1                   | 19           |
| 3.2                       | Szenario 2                   | 21           |
| 3.3                       | Szenario 3                   | 23           |
| 3.4                       | Szenario 4                   | 25           |
| 3.5                       | Szenario 5                   | 27           |
| 3.6                       | Szenario 6                   | 29           |
| 4                         | Salzgehalt                   | 31           |
| 4.1                       | Szenario 1                   | 32           |
| 4.2                       | Szenario 2                   | 35           |
| 4.3                       | Szenario 3                   | 38           |
| 4.4                       | Szenario 4                   | 40           |
| 4.5                       | Szenario 5                   | 43           |
| 4.6                       | Szenario 6                   | 47           |

## Bildverzeichnis

## Seite

|          |   |   |
|----------|---|---|
| Bild 1:  | Lage der Pegelmessstationen in der Tideelbe, an denen die mit dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe modellierten Wasserstandszeitreihen mit den gemessenen Wasserstandszeitreihen verglichen werden.  | 3 |
| Bild 2:  | Szenario 1: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven. Die Messung ist grün, die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der BSHcmod-Randwerte rot und die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der Randwerte erzeugt aus der Messung Bake Z schwarz gekennzeichnet.          | 4 |
| Bild 3:  | Szenario 1: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli. Die Messung ist grün, die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der BSHcmod-Randwerte rot und die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der Randwerte erzeugt aus der Messung Bake Z schwarz gekennzeichnet. | 4 |
| Bild 4:  | Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.   | 5 |
| Bild 5:  | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.   | 5 |
| Bild 6:  | Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.   | 6 |
| Bild 7:  | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.   | 6 |
| Bild 8:  | Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.   | 7 |
| Bild 9:  | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.   | 7 |
| Bild 10: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.   | 8 |
| Bild 11: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.   | 8 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Bild 12: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für $T_{mw}$ , $T_{hb}$ , $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede. | 9  |
| Bild 13: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.        | 9  |
| Bild 14: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für $T_{mw}$ , $T_{hb}$ , $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.             | 10 |
| Bild 15: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.                    | 10 |
| Bild 16: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für $T_{mw}$ , $T_{hb}$ , $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede. | 11 |
| Bild 17: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.        | 11 |
| Bild 18: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für $T_{mw}$ , $T_{hb}$ , $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.             | 12 |
| Bild 19: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.                    | 12 |
| Bild 20: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für $T_{mw}$ , $T_{hb}$ , $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.             | 13 |
| Bild 21: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.                    | 13 |
| Bild 22: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für $T_{mw}$ , $T_{hb}$ , $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede. | 14 |
| Bild 23: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.        | 14 |
| Bild 24: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für $T_{mw}$ , $T_{hb}$ , $T_{hw}$ und $T_{nw}$ bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.             | 15 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Bild 25: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede. | 15 |
| Bild 26: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.      | 16 |
| Bild 27: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede. | 16 |
| Bild 28: | Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.      | 17 |
| Bild 29: | Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede. | 17 |
| Bild 30: | Lage der Langzeit- bzw. Dauermessstationen im Elbeästuar.   | 18 |
| Bild 31: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ4  | 19 |
| Bild 32: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ2 T  | 19 |
| Bild 33: | 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 20 |
| Bild 34: | 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 20 |
| Bild 35: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ4  | 21 |
| Bild 36: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ2 T  | 21 |
| Bild 37: | 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 22 |
| Bild 38: | 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 22 |
| Bild 39: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ4  | 23 |
| Bild 40: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ2 T  | 23 |
| Bild 41: | 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 24 |
| Bild 42: | 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 24 |

|          |   |    |
|----------|---|----|
| Bild 43: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ4  | 25 |
| Bild 44: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ2 T  | 25 |
| Bild 45: | 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 26 |
| Bild 46: | 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 26 |
| Bild 47: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ4  | 27 |
| Bild 48: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ2 T  | 27 |
| Bild 49: | 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 28 |
| Bild 50: | 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 28 |
| Bild 51: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ4  | 29 |
| Bild 52: | Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ2 T  | 29 |
| Bild 53: | 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 30 |
| Bild 54: | 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2   | 30 |
| Bild 55: | Lage der Messstationen im vom Salzwasser aus der Nordsee beeinflussten Bereich des Elbeästuares.  | 31 |
| Bild 56: | Gemessenen (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.      | 32 |
| Bild 57: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.      | 32 |
| Bild 58: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. | 33 |
| Bild 59: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.      | 33 |
| Bild 60: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.      | 34 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Bild 61: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.         | 34 |
| Bild 62: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.         | 35 |
| Bild 63: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.    | 35 |
| Bild 64: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.         | 36 |
| Bild 65: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Brunsbüttel. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. | 36 |
| Bild 66: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet          | 37 |
| Bild 67: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet          | 38 |
| Bild 68: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.    | 38 |
| Bild 69: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet          | 39 |
| Bild 70: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.   | 40 |
| Bild 71: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.   | 40 |
| Bild 72: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.  | 41 |
| Bild 73: | Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3a. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.  | 41 |

- Bild 74: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 42
- Bild 75: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 42
- Bild 76: Gemessenen (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 43
- Bild 77: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 43
- Bild 78: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 44
- Bild 79: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3a. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 44
- Bild 80: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 45
- Bild 81: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Brunsbüttel. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 45
- Bild 82: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 46
- Bild 83: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 47
- Bild 84: Gemessener (schwarz) und den modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 47
- Bild 85: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 48
- Bild 86: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 48
- Bild 87: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 49

- Bild 88: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Brunsbüttel. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 49
- Bild 89: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet. 50

| <b>Tabellenverzeichnis</b>  | <b>Seite</b> |
|---|--------------|
| Tabelle 1: Verhältnisse im Ästuar und Zeiträume der einzelnen Szenarien.  | 1            |
| Tabelle 2: Mittelungszeiträume für die Differenzen aus <b>Messwert-Modellwert</b> für die Thw, Tnw, den Tidehub, das Tidemittelwassers und die Eintrittszeiten von Thw und Tnw für die einzelnen Szenarien. | 2            |

## 1 Abbildungen zu den Szenarien

Die Projektpartner haben vereinbart, dass die Qualität der Modellergebnisse an 6 Szenarien überprüft werden soll. Die Szenarien 1 bis 6 liegen in den aus Tabelle 1 ersichtlichen Zeiträumen, in denen sich die Verhältnisse im Ästuar wie nachfolgend aufgeführt, beschreiben lassen:

| Szenario - Nr. | Verhältnisse im Ästuar               | Dauer des Szenarios      |
|----------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1              | mittlere Verhältnisse                | 15. 07.2006 – 01.08.2006 |
| 2              | steil ansteigende Oberwasserwelle    | 24.03.2006 – 13.04.2006  |
| 3              | langsam abnehmendes Oberwasser       | 13.04.2006 – 27.04.2006  |
| 4              | extreme Ost-/Südost- Windlage        | 01.01.2008 – 08.01.2008  |
| 5              | Sturmflut mit fülliger Windstaukurve | 28.10.2006 – 03.11.2006  |
| 6              | Sturmflut mit steiler Windstaukurve  | 14.01.2007 – 21.01.2007  |

Tabelle 1: Verhältnisse im Ästuar und Zeiträume der einzelnen Szenarien.

Eine ausführliche Beschreibung der der ausgewählten Szenarien befindet sich in Abschnitt 3 des Berichtes zu OPTEL-D.

In den nachfolgenden Beschreibungen werden die üblichen Abkürzungen genutzt:

Thw            Tidehochwasser (DIN 4049-3)  
 Tnw            Tideniedrigwasser (DIN 4049-3)  
 Thb            Tidehub (DIN 4049-3)  
 Tmw            Tidemittelwasser (DIN-4049-3)

dt\_Thw        Differenz (Messwert – Modellwert) der Eintrittszeit des Thw  
 dt\_Tnw        Differenz (Messwert – Modellwert) der Eintrittszeit des Tnw  
 LZ            Langzeitmessstation  
 LZ2 T        Langzeitmessstation 2 Tonne  
 D            Dauermessstation  
 Std            Standardabweichung  
 GMT          Greenwich Mean Time  
 UTC          Coordinated Universal Time, koordinierte Weltzeit, früher GMT  
 MEZ          Mitteleuropäische Zeit, UTC + 1 Stunde  
 MESZ        Mitteleuropäische Sommerzeit, UTC + 2 Stunden

Zur Überprüfung der Modellergebnisse des BAW-Vorhersagemodell-Elbe für den Wasserstand werden die Mittelwerte mit den Standardabweichungen aus der Differenz **Messwert – Modellwert** zum jeweiligen Zeitpunkt für die folgenden charakteristischen Punkte der Tidekurven berechnet: für die Thw, die Tnw, den Thb und das Tmw. Für die charakteristischen Zeiten der Tidekurven werden die Mittelwerte aus der Differenz Messwert – Modellwert für die Eintrittszeiten des Thw und des Tnw berechnet. Die Mittelungszeiträume sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Die Strömungsgeschwindigkeiten aus dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe werden mit den Zeitreihen von Messungen an Langzeitmessstationen verglichen (siehe Abschnitt 3 zur Strömung), ebenso der Salzgehalt(siehe Abschnitt 4 zum Salzgehalt).

Alle in den Abbildungen genannten Uhrzeiten beziehen sich, falls nicht extra gekennzeichnet, auf UTC.

| <b>Szenario</b> | <b>Mittelungszeitraum für das Szenario</b>  |
|-----------------|---|
| Szenario 1      | 15.07.2006 00:00 Uhr – 30.07.2006 23:00 Uhr |
| Szenario 2      | 01.04.2006 00:00 Uhr – 13.04.2006 23:00 Uhr |
| Szenario 3      | 13.04.2006 00:00 Uhr – 27.04.2006 23:00 Uhr |
| Szenario 4      | 24.12.2007 00:00 Uhr – 09.01.2008 00:00 Uhr |
| Szenario 5      | 28.10.2006 00:00 Uhr – 04.11.2006 00:00 Uhr |
| Szenario 6a     | 15.01.2007 12:30 Uhr – 22.01.2007 00:00 Uhr |
| Szenario 6      | 06.01.2007 00:00 Uhr – 15.01.2007 00:00 Uhr |

Tabelle 2: Mittelungszeiträume für die Differenzen aus **Messwert-Modellwert** für die Thw, Tnw, den Tidehub, das Tidemittelwassers und die Eintrittszeiten von Thw und Tnw für die einzelnen Szenarien.

## 2 Wasserstand

Zur Modellierung des Wasserstandes wurden wahlweise zwei verschiedene Datenarten für die Wasserstandsrandwerte am seeseitigen Rand genutzt

1. Randwerte, die aus Messungen an der Bake Z gewonnen wurden und
2. Randwerte, die aus dem Vorhersagemodell BSHcmod des BSH kommen.

In Abschnitt 4.2. Randwerte des Berichtes zu OPTEL-C sind beispielhaft die Wasserstandsrandwertzeitreihen bei Bake A bzw. Bake Z aus der Messung bzw. aus dem Küstenmodell (BSHcmod) des BSH für die 6 genannten Szenarien dargestellt.

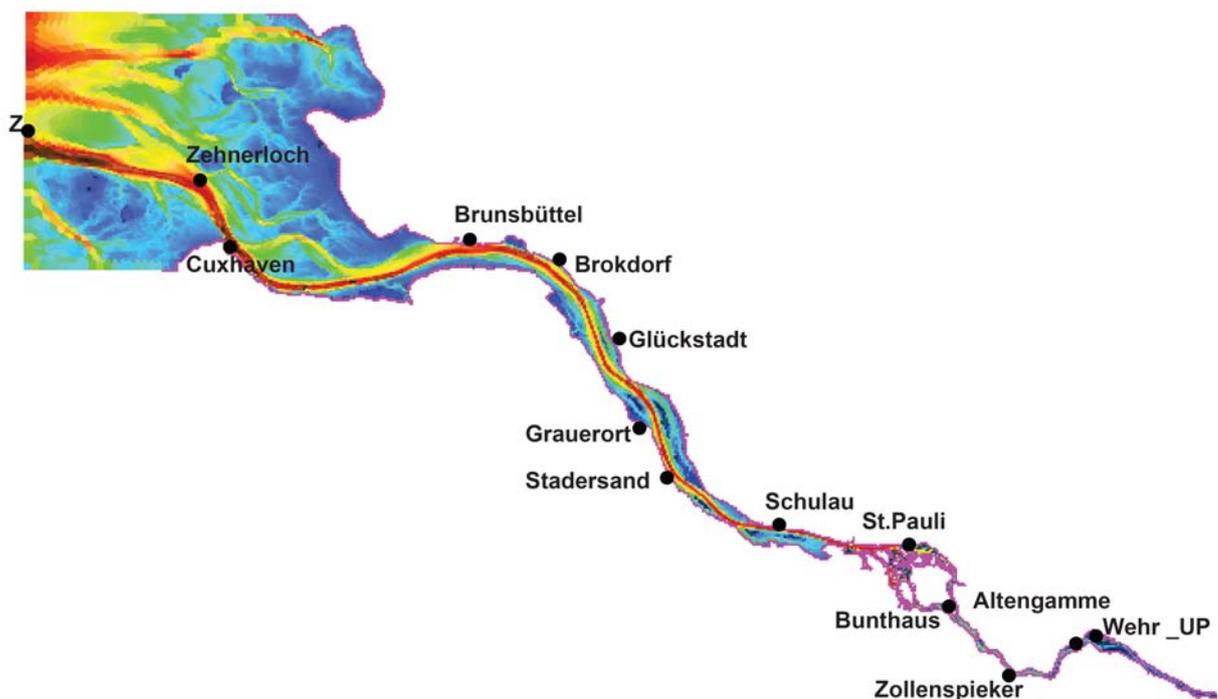


Bild 1: Lage der Pegelmessstationen in der Tideelbe, an denen die mit dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe modellierten Wasserstandszeitreihen mit den gemessenen Wasserstandszeitreihen verglichen werden.

In den Fällen, für die es Randwerte sowohl aus dem Vorhersagemodell BSHcmod als auch aus Messungen an der Bake Z gibt, sind beide Ergebnisse dargestellt. Das betrifft alle Szenarien, die in das Jahr 2006 fallen: Szenario 1, Szenario 2, Szenario 3 und Szenario 5, vgl. dazu auch Tabelle 1.

Der Vergleich [Messung – Modell](#) für die entsprechenden Charakteristika der Tidekurven wurde an 14 Pegelstationen entlang der Tideelbe durchgeführt. Die Lage und Bezeichnung der Pegelstationen ist aus Bild 1 zu entnehmen.

## 2.1 Szenario 1

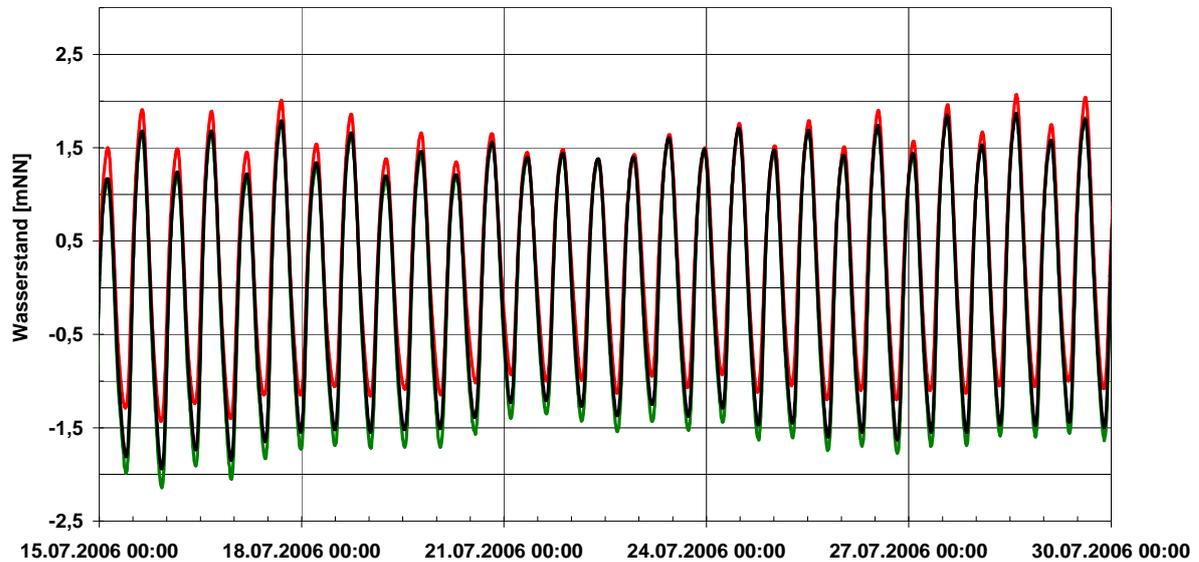


Bild 2: Szenario 1: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven. Die Messung ist grün, die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der BSHcmod-Randwerte rot und die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der Randwerte erzeugt aus der Messung Bake Z schwarz gekennzeichnet.

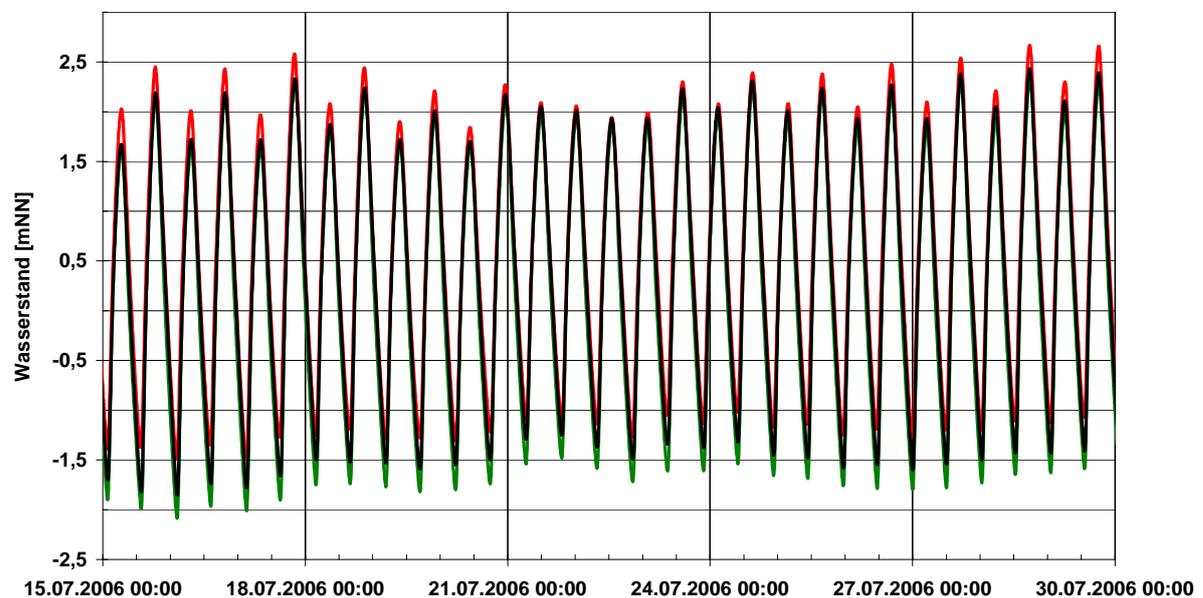


Bild 3: Szenario 1: Wasserstandsentwicklung bei Hamburg St. Pauli. Die Messung ist grün, die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der BSHcmod-Randwerte rot und die Modellrechnung (BAW-Vorhersagemodell-Elbe bis Bleckede) unter Verwendung der Randwerte erzeugt aus der Messung Bake Z schwarz gekennzeichnet.

**BAW (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

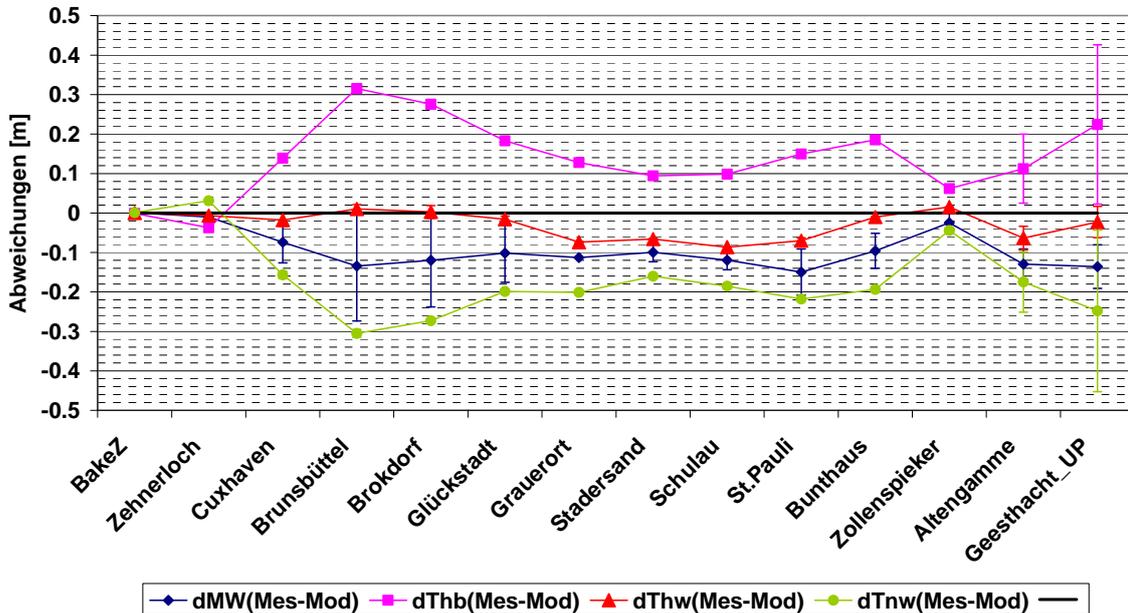


Bild 4: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

**BAW (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

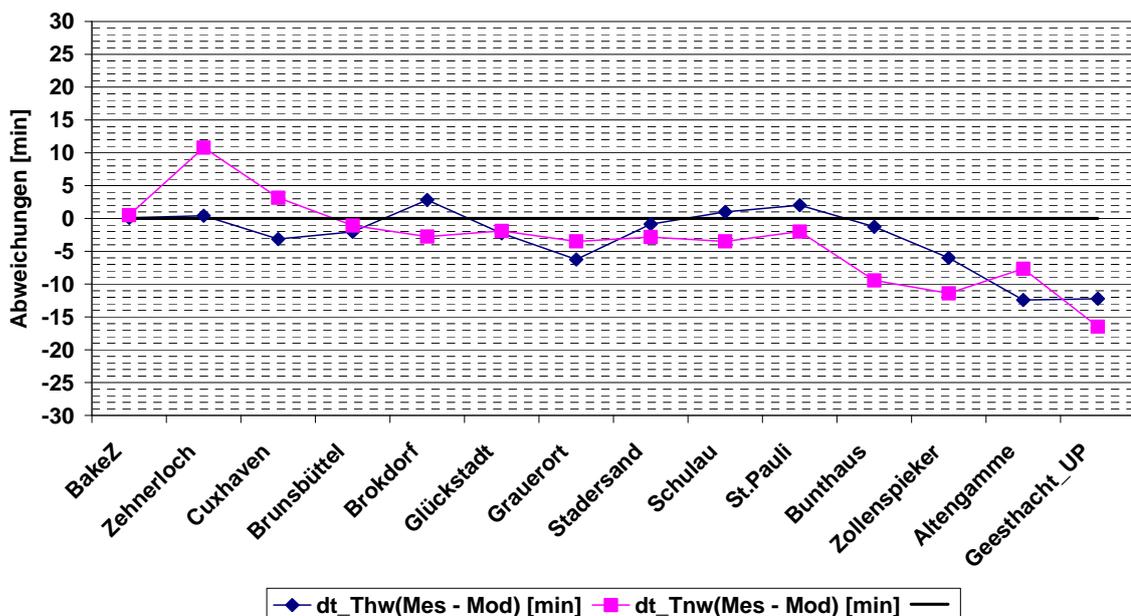


Bild 5: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

**BAW (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis Ge**

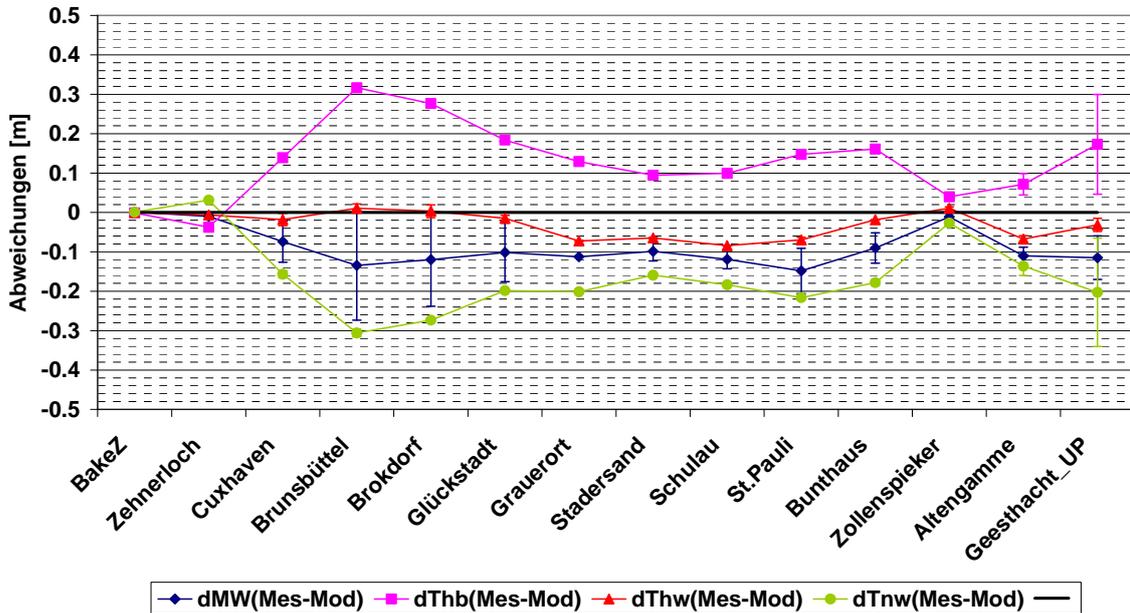


Bild 6: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.

**BAW (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis Ge**

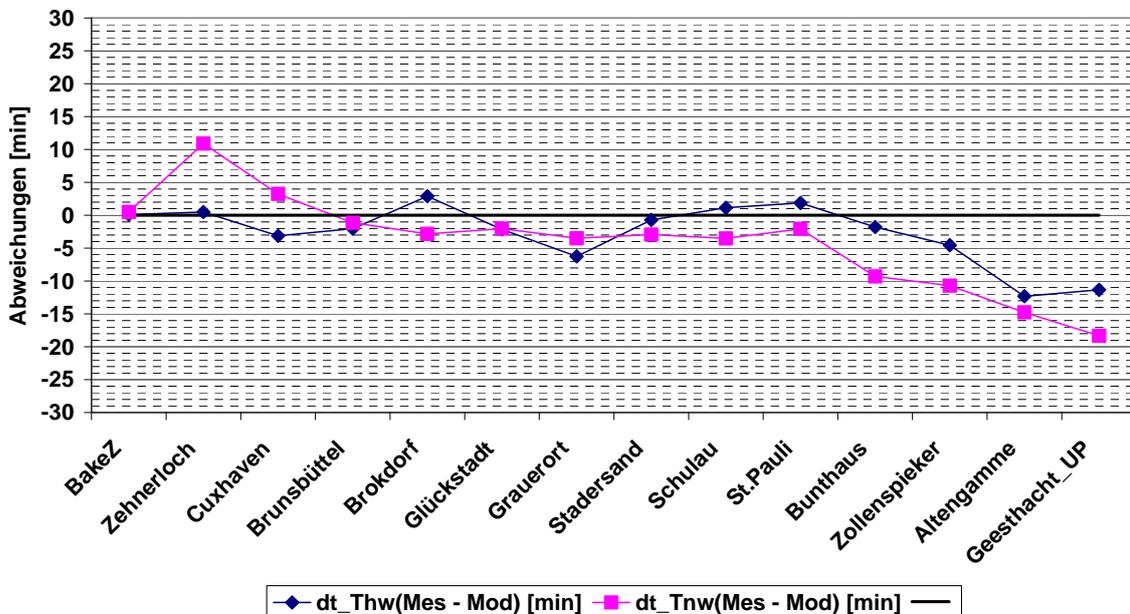


Bild 7: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.

**BSH (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

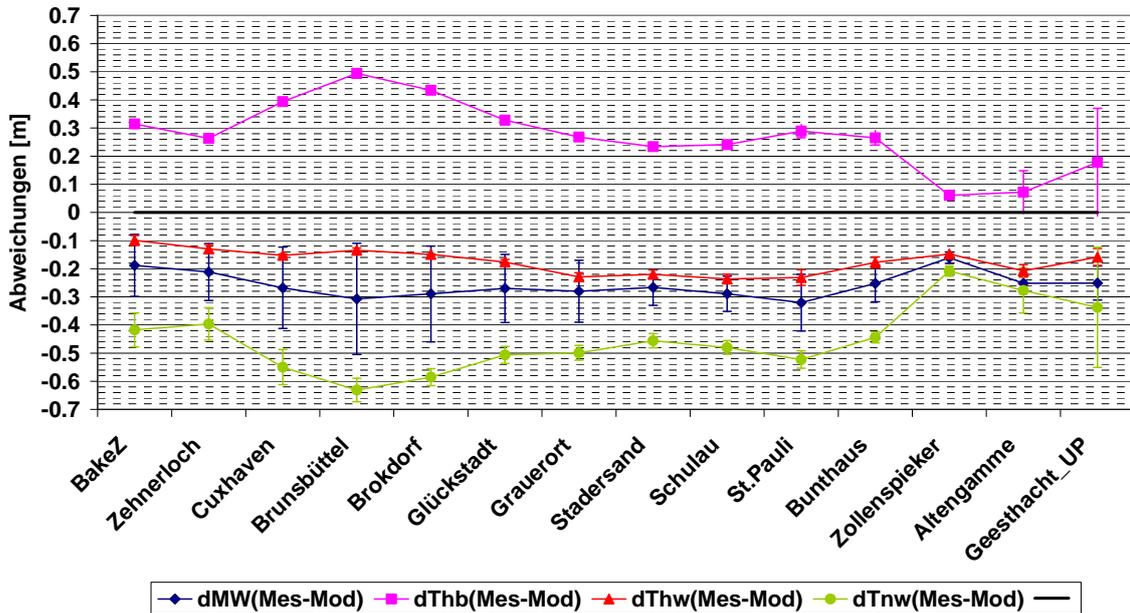


Bild 8: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

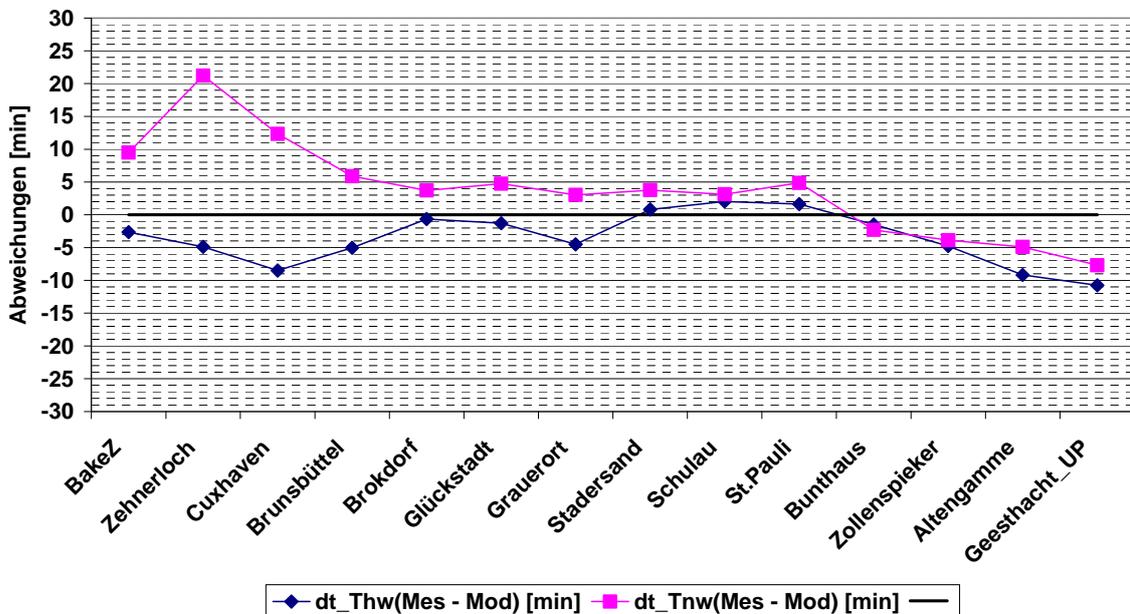


Bild 9: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis Ge**

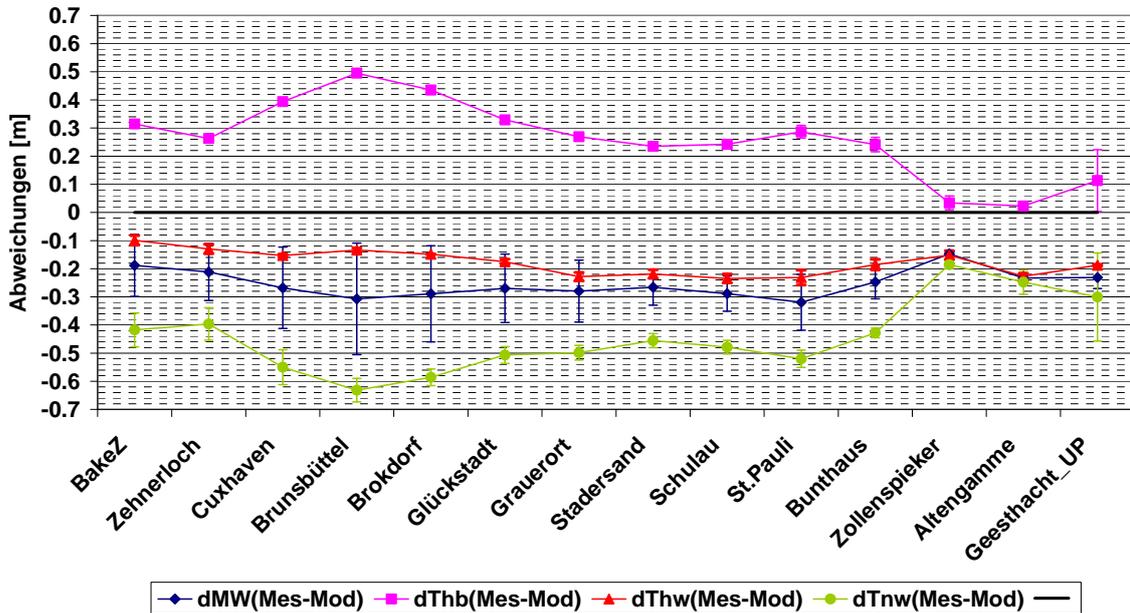


Bild 10: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.

**BSH (15.7.-30.7.06) sz1 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis Ge**

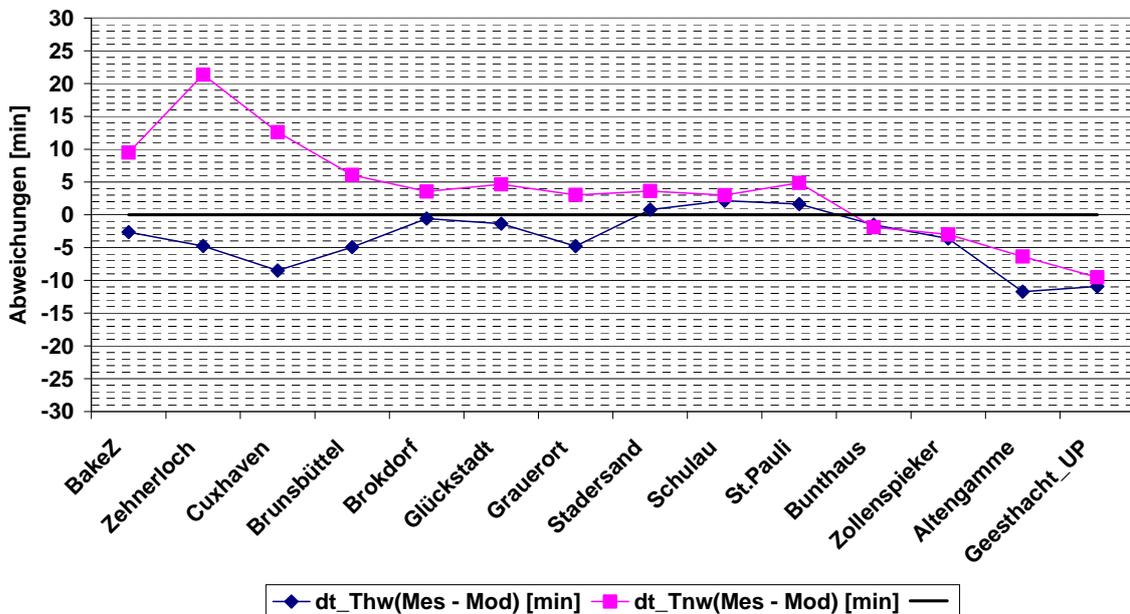


Bild 11: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Geesthacht.

## 2.2 Szenario 2

BAW (1.4.-13.4.06) sz2 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI

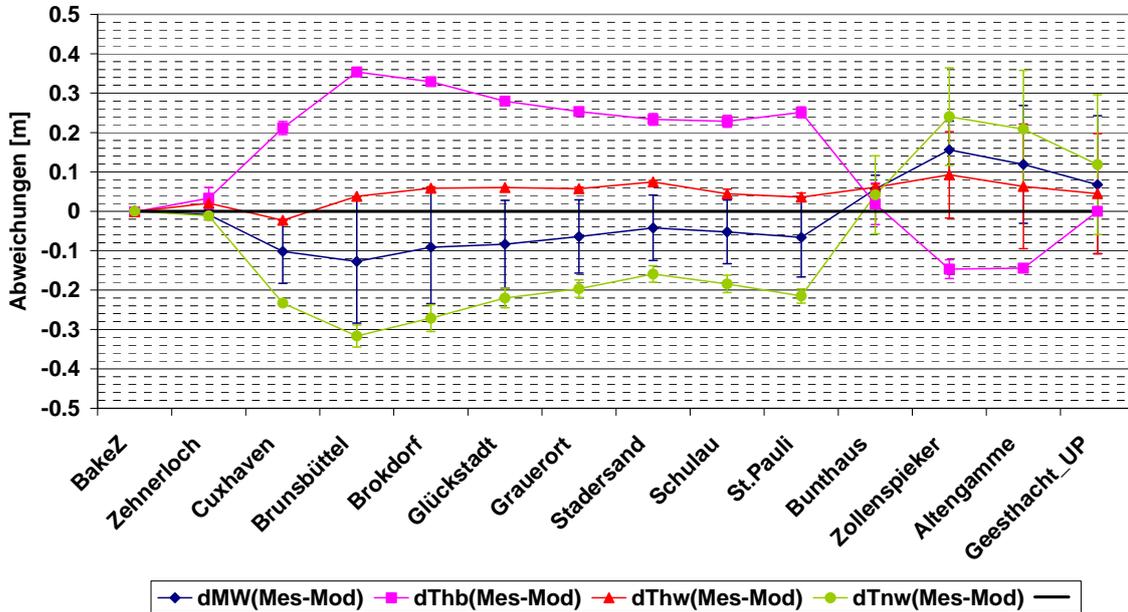


Bild 12: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

BAW (1.4.-13.4.06) sz2 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI

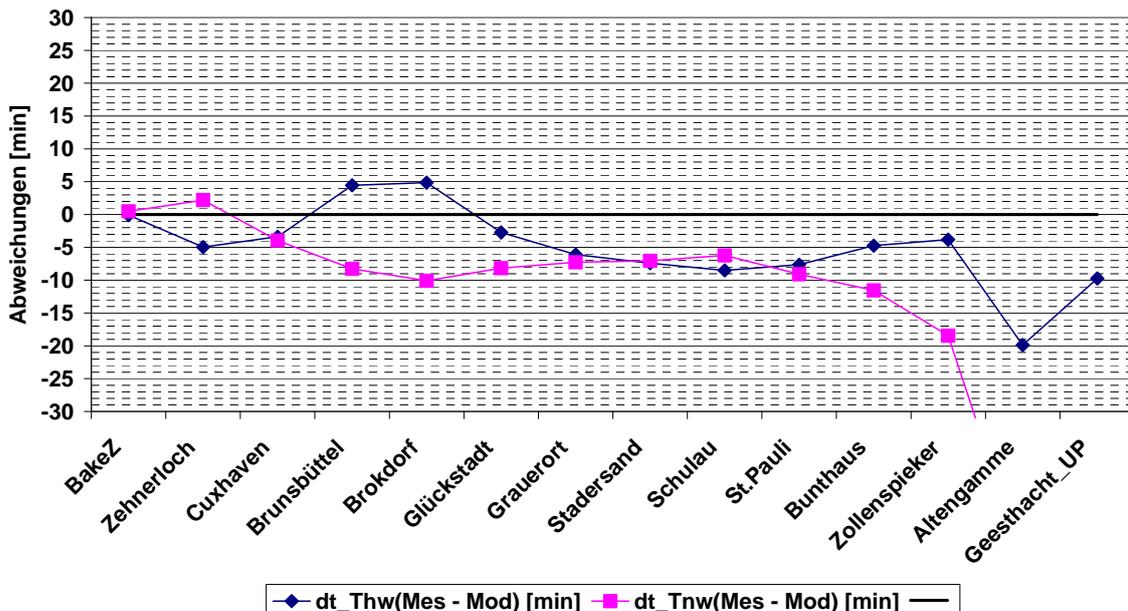


Bild 13: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (1.4.-13.4.06) sz2 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

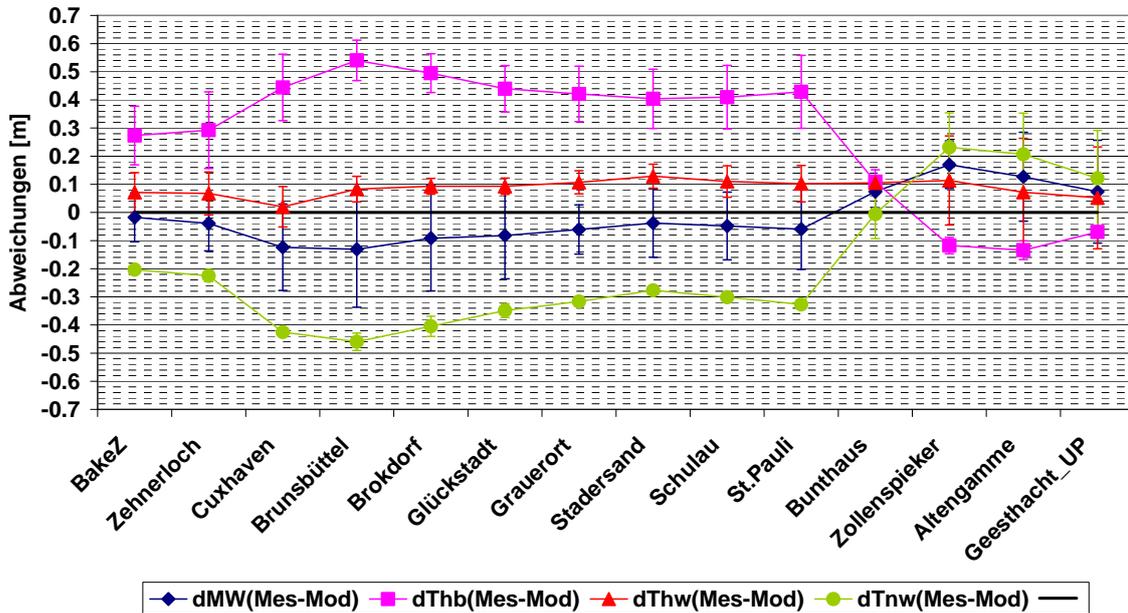


Bild 14: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (1.4.-13.14.06) sz2 mTurbVis mWAsP zon2c\_8aOW2b bis BI**

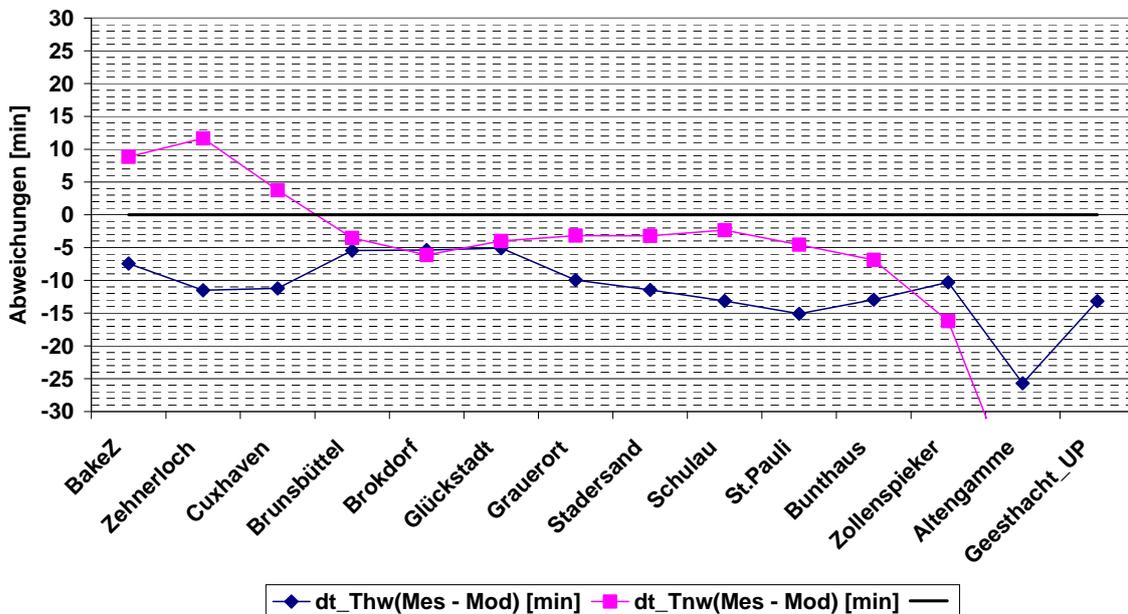


Bild 15: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

### 2.3 Szenario 3

BAW (13.4.-27.4.06) sz3 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI

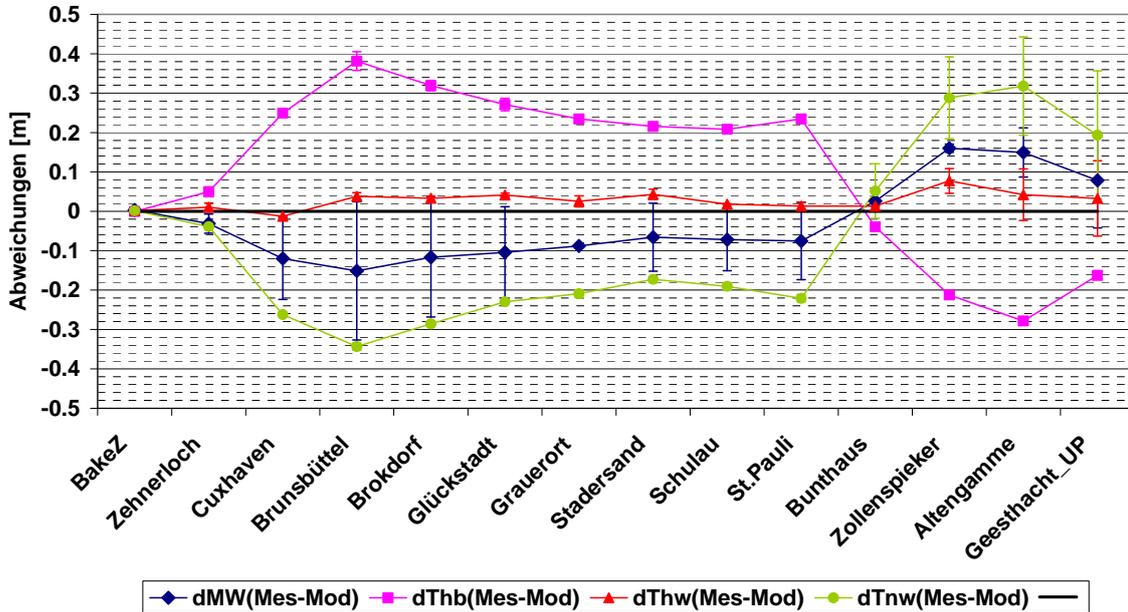


Bild 16: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

BAW (13.4.-27.4.06) sz3 oTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI

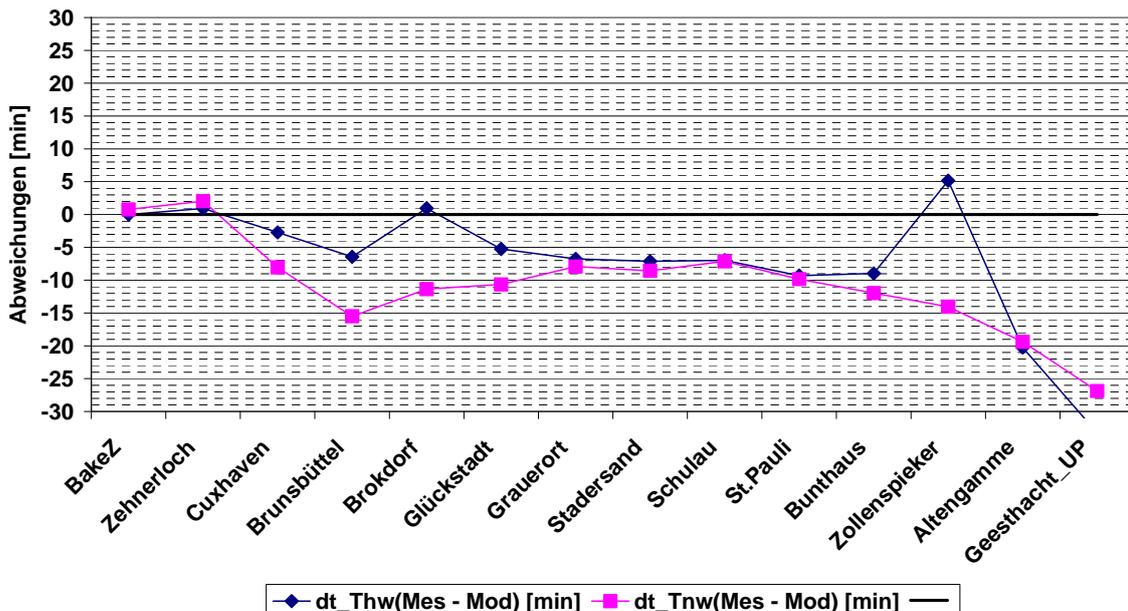


Bild 17: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (13.4.-27.4.06) sz3 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

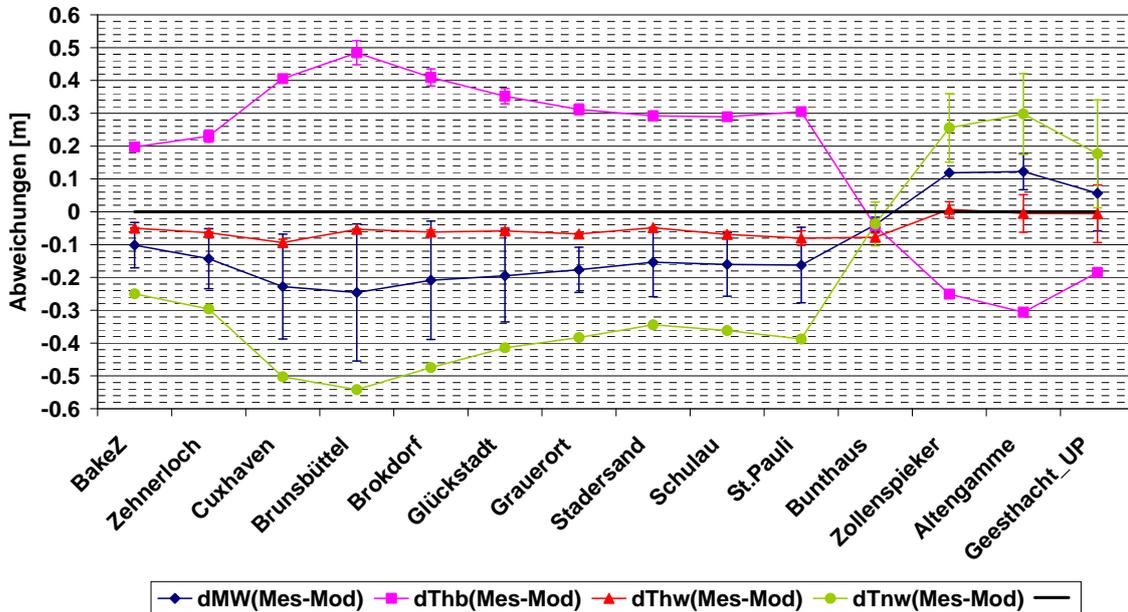


Bild 18: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (13.4.-27.4.06) sz3 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

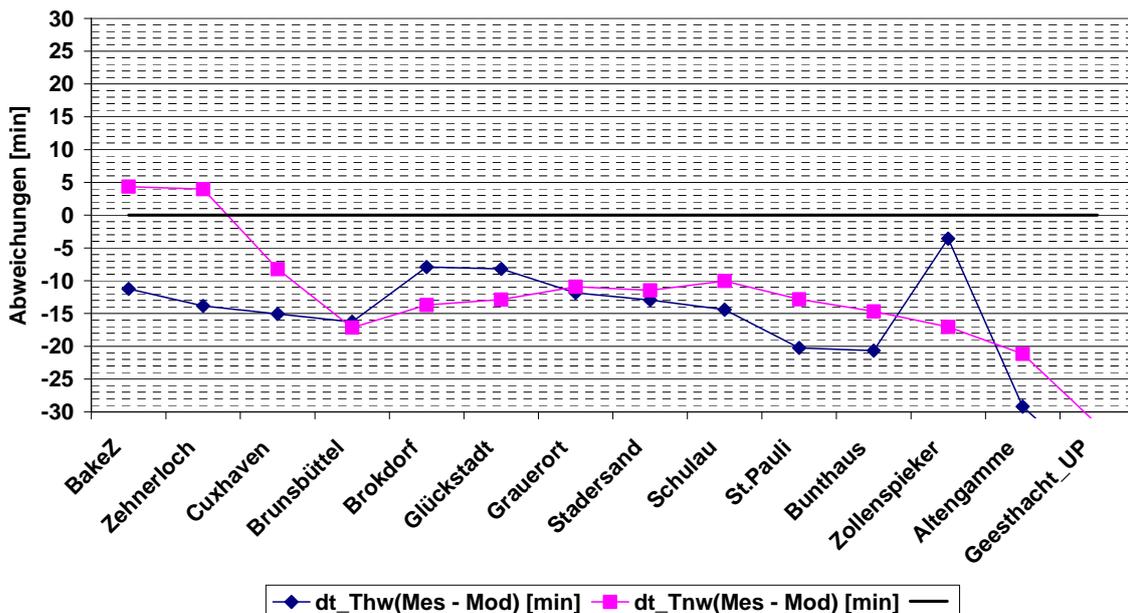


Bild 19: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

## 2.4 Szenario 4

BSH(24.12.-9.1.08) sz4 mTurbVis mWAsP zon2c\_8aOW2b bis BI

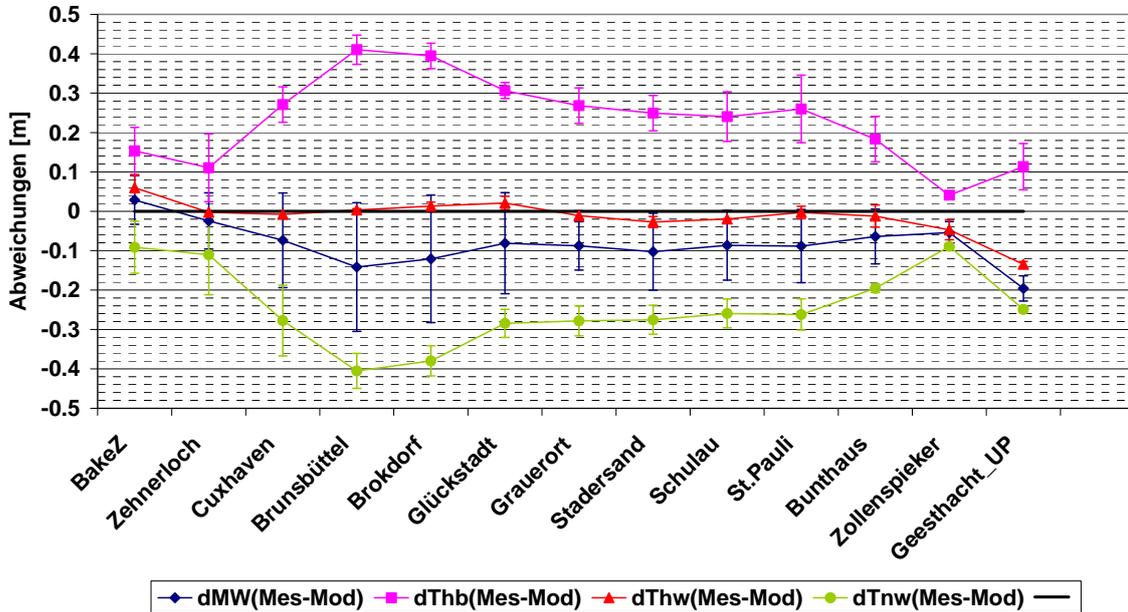


Bild 20: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

BSH(24.12.-9.1.08) sz4 mTurbVis mWAsP zon2c\_8aOW2b bis BI

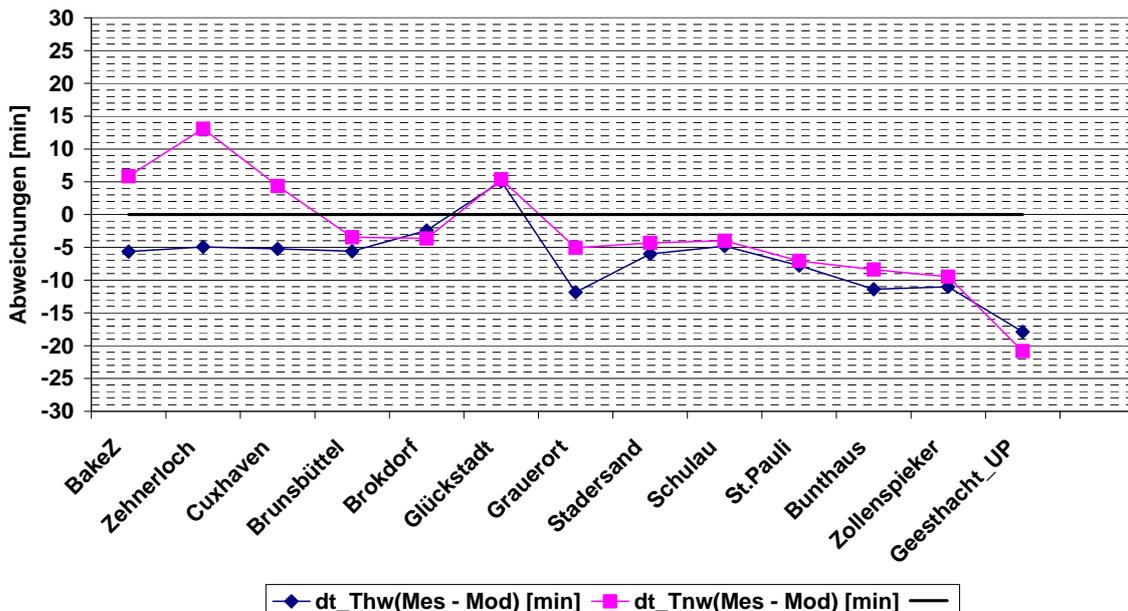


Bild 21: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

## 2.5 Szenario 5

BAW (28.10.-4.11.06) sz5 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI

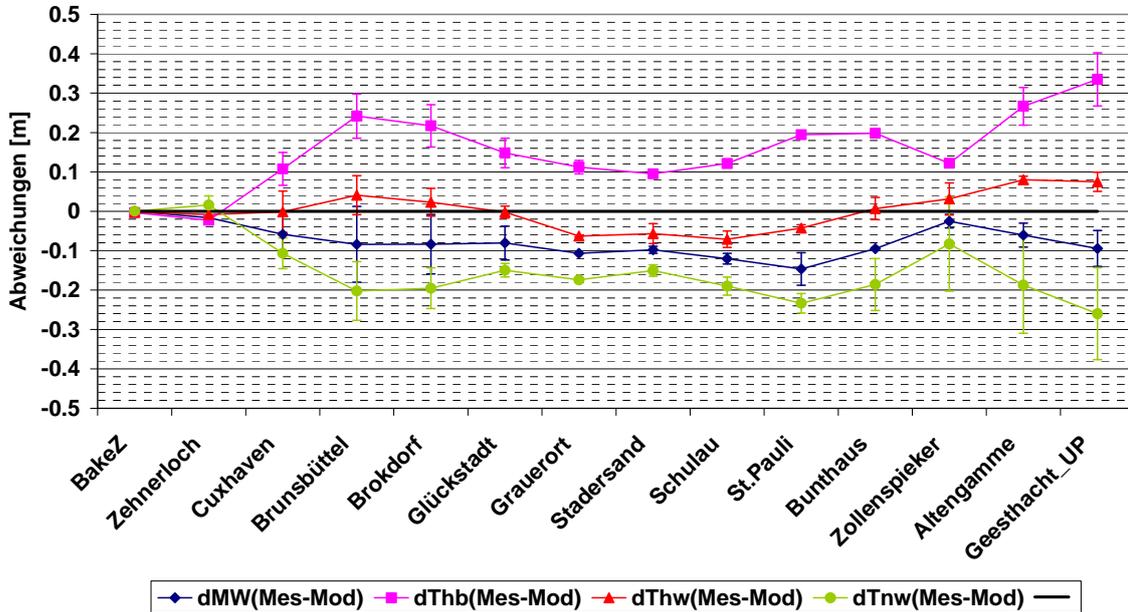


Bild 22: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

BAW (28.10.-4.11.06) sz5 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI

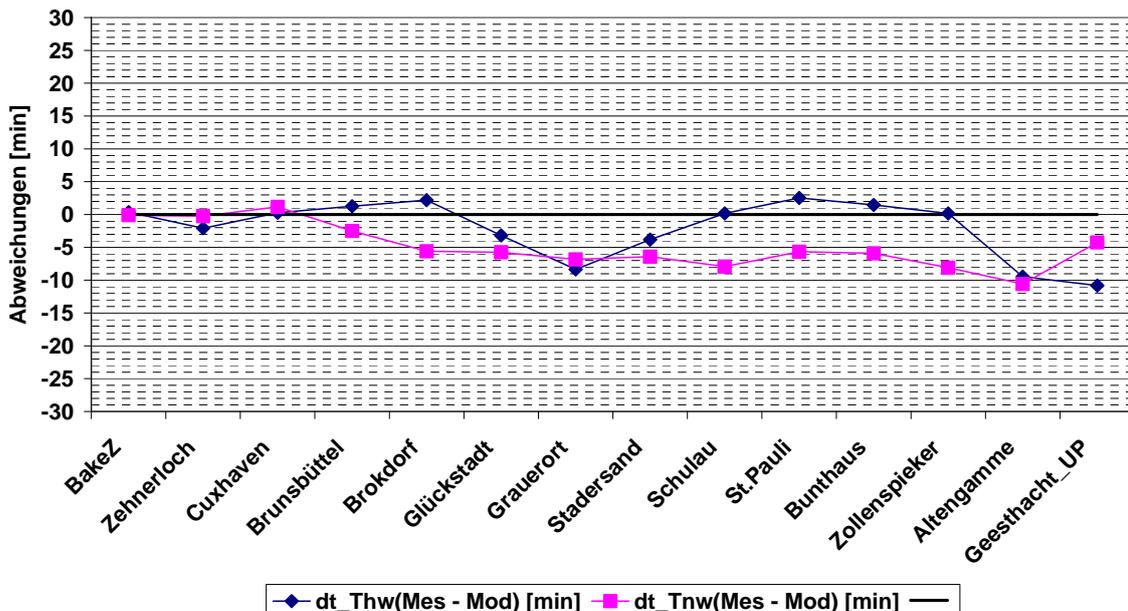


Bild 23: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus Messungen an der Bake Z. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (28.10.-4.11.06) sz5 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

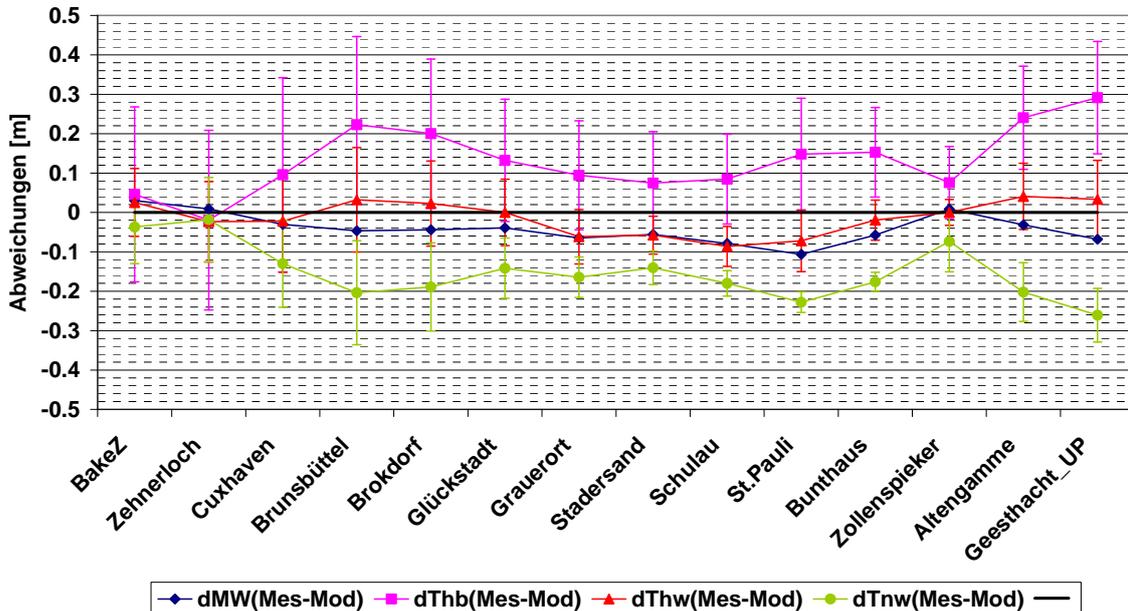


Bild 24: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

**BSH (28.10.-4.11.06) sz5 mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI**

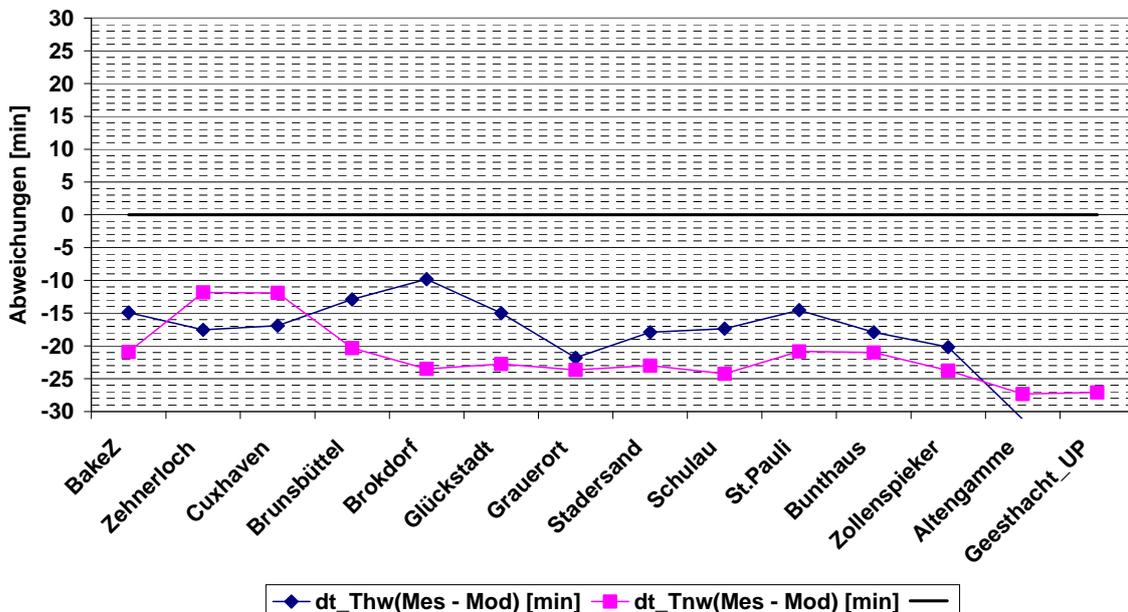


Bild 25: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

## 2.6 Szenario 6

BSH (6.1.-15.1.07) sz6 mTurbVis mWAsP zon2c\_8aOW2b bis BI

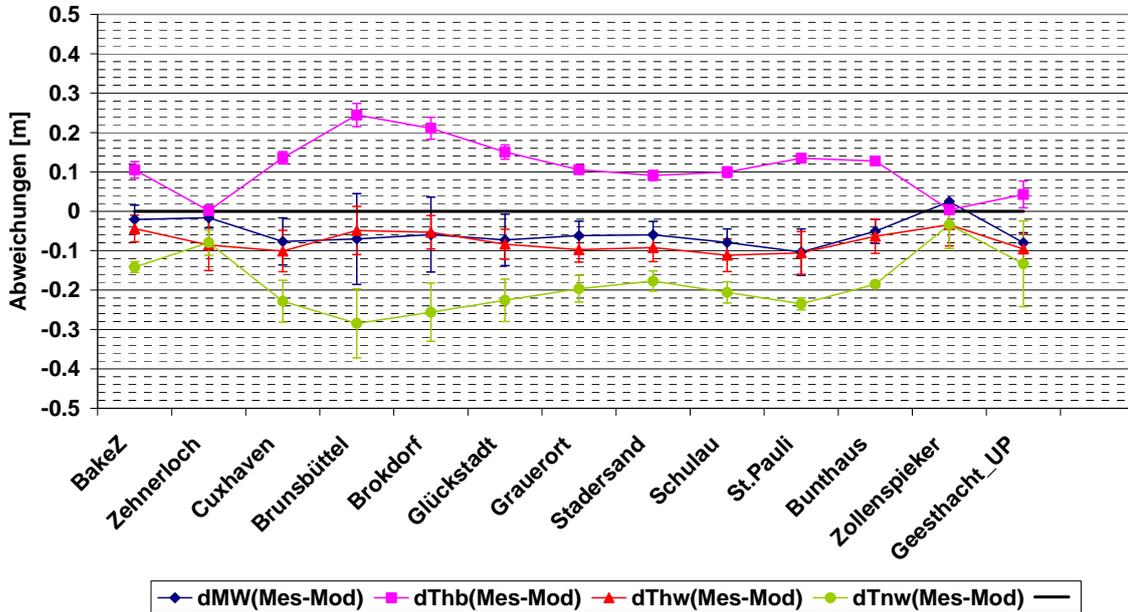


Bild 26: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

BSH (6.1.-15.1.07) sz6 mTurbVis mWAsP zon2c\_8aOW2b bis BI

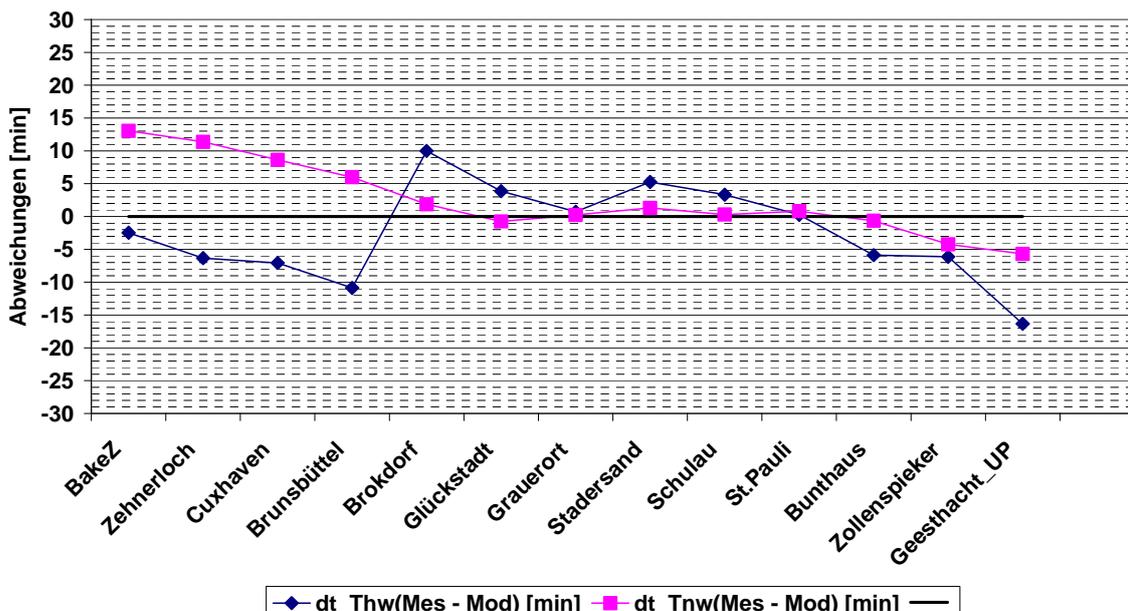


Bild 27: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

## 2.7 Szenario 6a

BSH(16.1.-22.1.2007) sz6a mTurbVis mWAsP zon2c\_8aOW2b (BI)

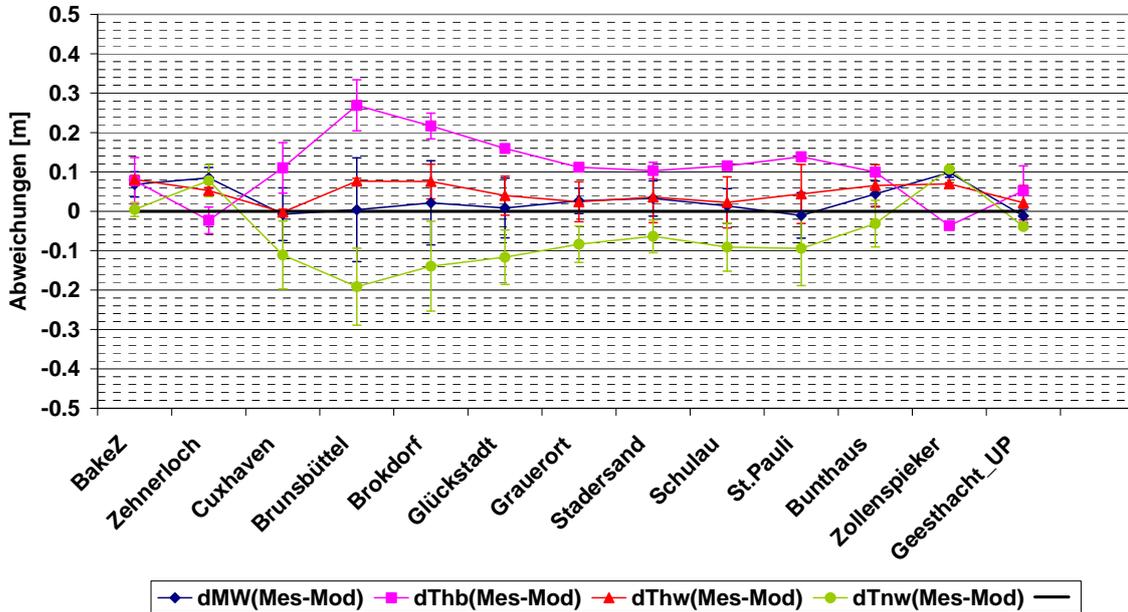


Bild 28: Mittelwerte der Differenzen mit Std für Tmw, Thb, Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodells-Elbe reicht bis Bleckede.

BSH (16.1.-22.1.2007) sz6a mTurbVis mWAsP z2c\_8aOW2b bis BI

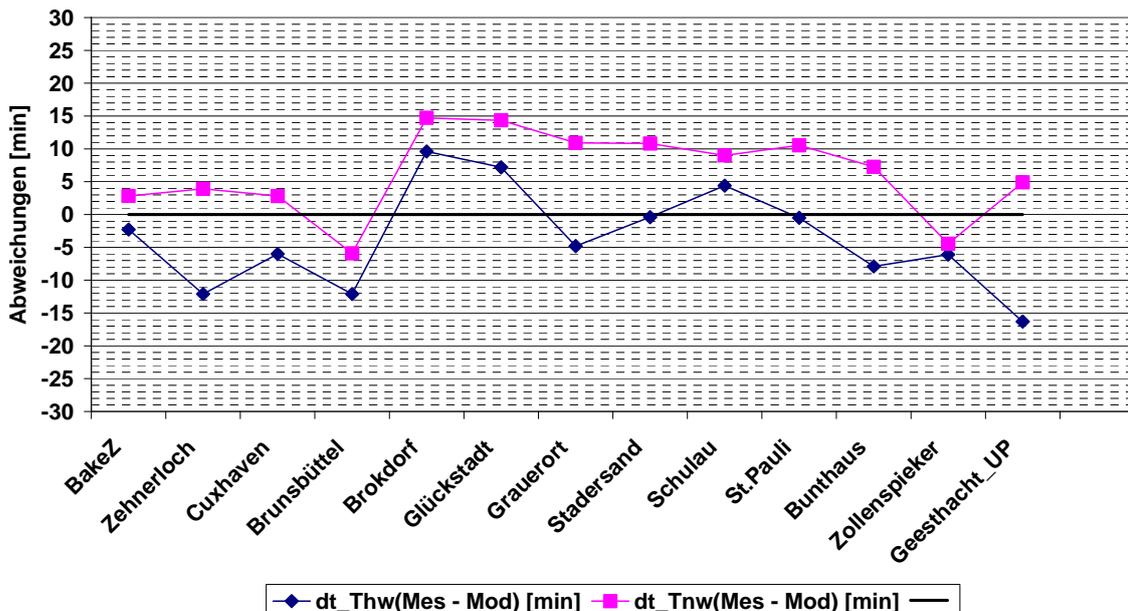


Bild 29: Mittelwerte der Differenzen für die Eintrittszeiten von Thw und Tnw bei Wasserstandsrandwerten aus dem BSHcmod. Das Modellgitter des BAW-Vorhersagemodell-Elbe reicht bis Bleckede.

### 3 Strömung

Zum Vergleich für die Strömung und den Salzgehalt stehen Messergebnisse aus Langzeitmessstationen LZ und D zur Verfügung, siehe Bild 30. Die Daten an den LZ Stationen werden 2,5 m über der Sohle erhoben. An den D Stationen werden die Messungen 1,1 m über der Sohle und 0,8 m unter dem aktuellen Wasserstand durchgeführt. Eine Beschreibung der gemessenen Daten befindet sich in Abschnitt 3 Tabelle 3 des Berichtes zu OPTEL-D.

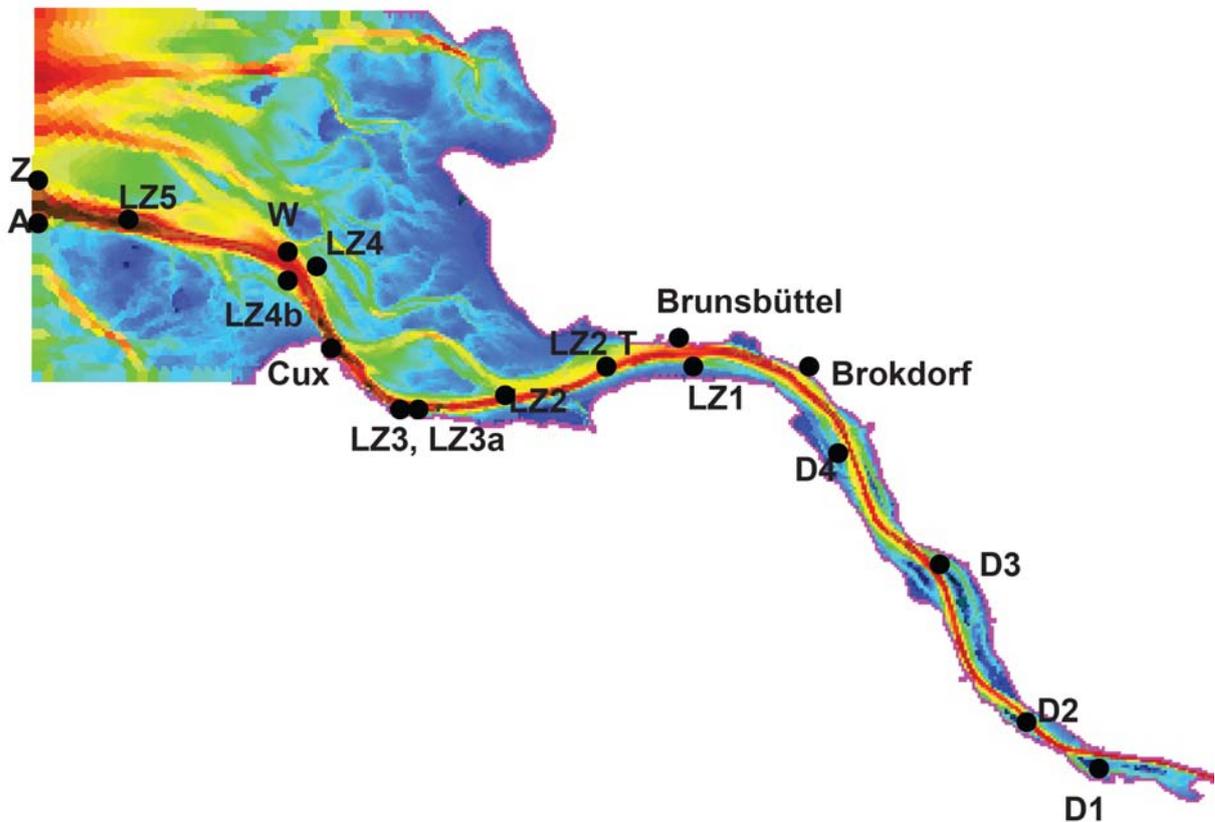


Bild 30: Lage der Langzeit- bzw. Dauermessstationen im Elbeästuar.

Im Folgenden werden die mit dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe modellierten Strömungsgeschwindigkeiten beispielhaft mit den Messungen an den Stationen LZ4, LZ2 T und D2 (Juelsand) verglichen.

### 3.1 Szenario 1

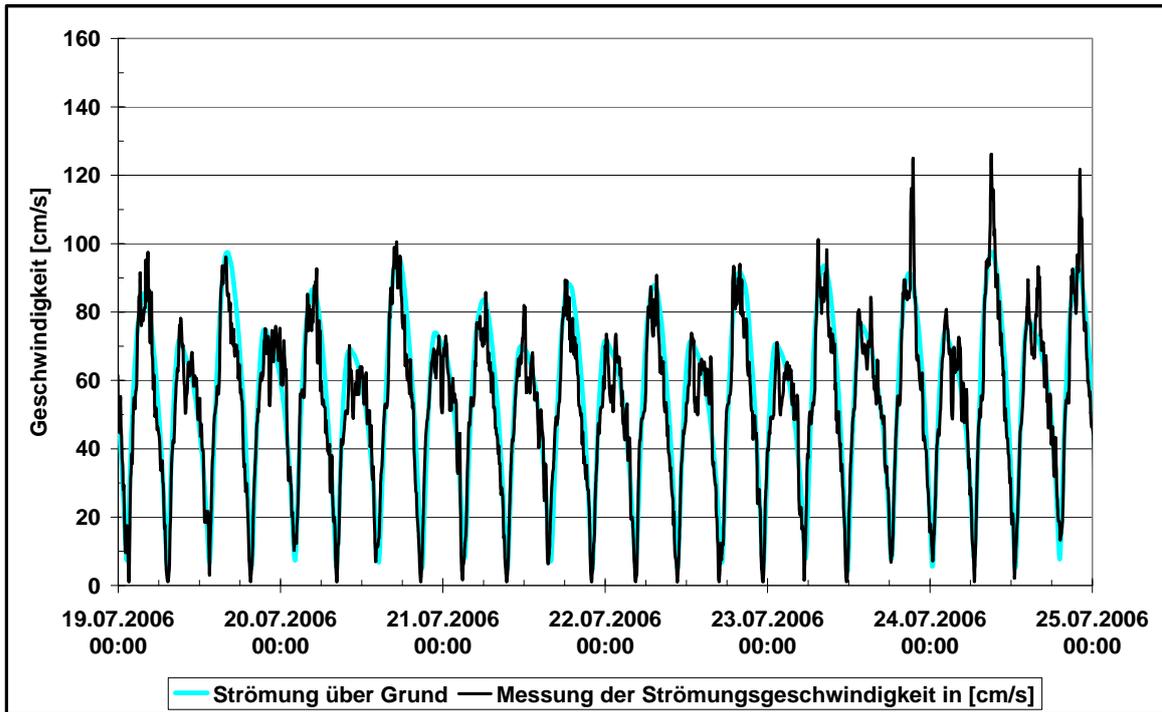


Bild 31: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ4

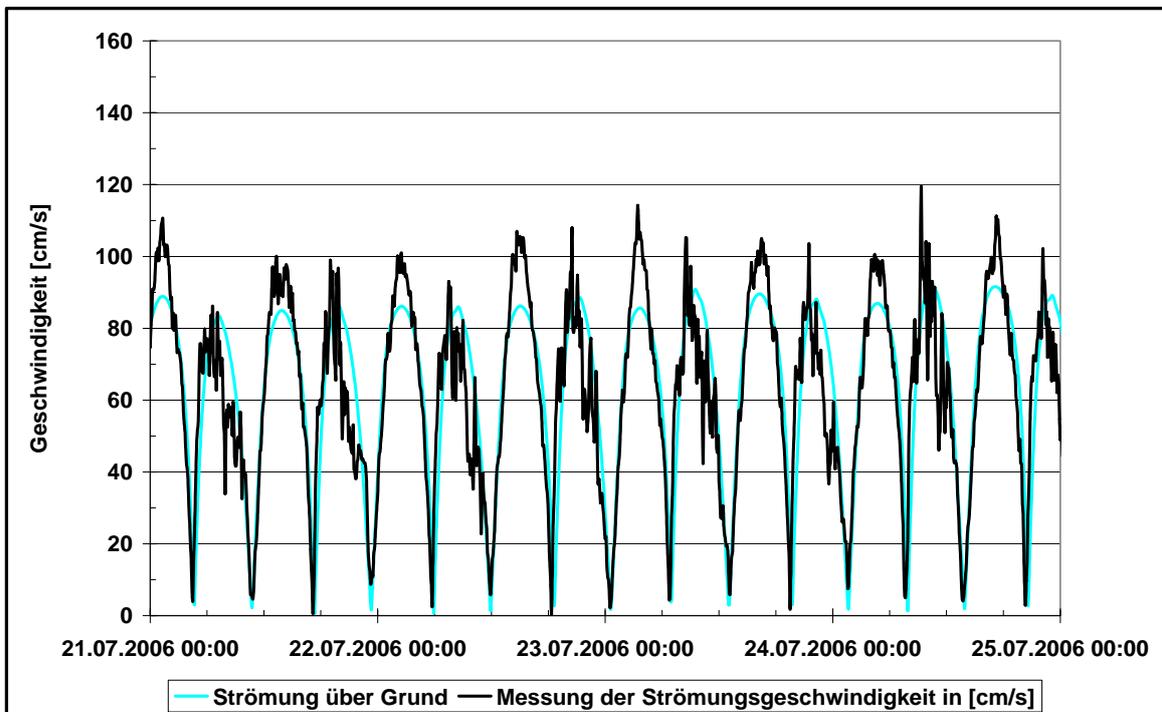


Bild 32: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ2 T

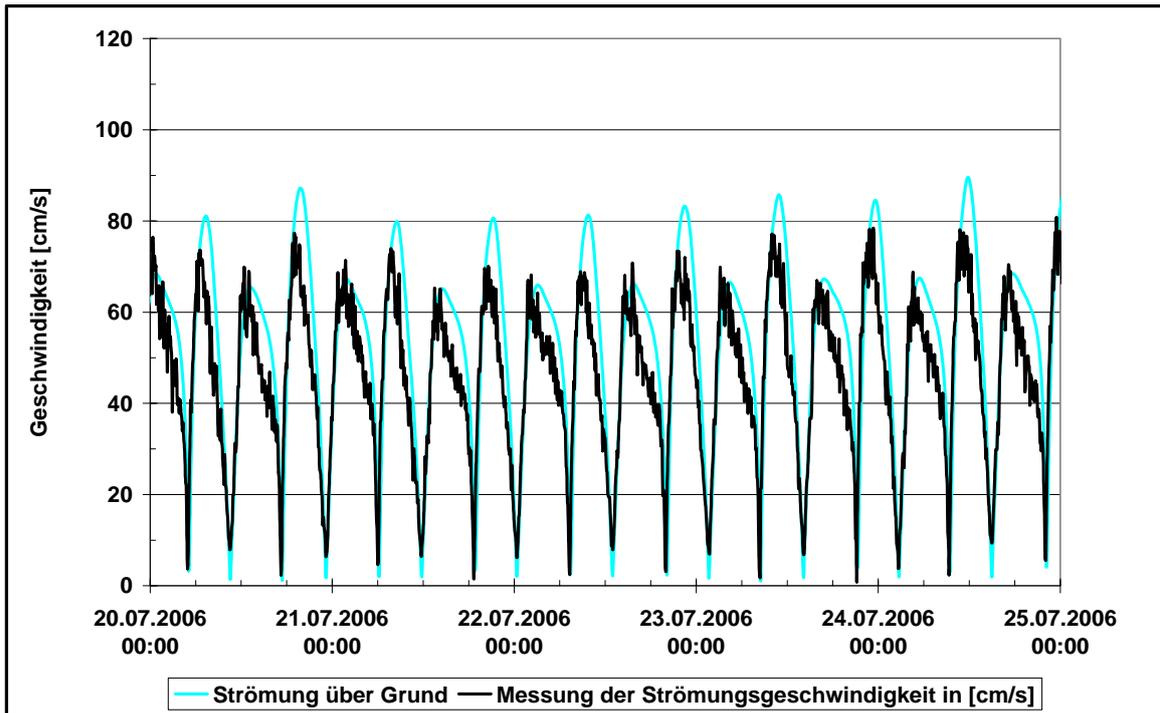


Bild 33: 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2

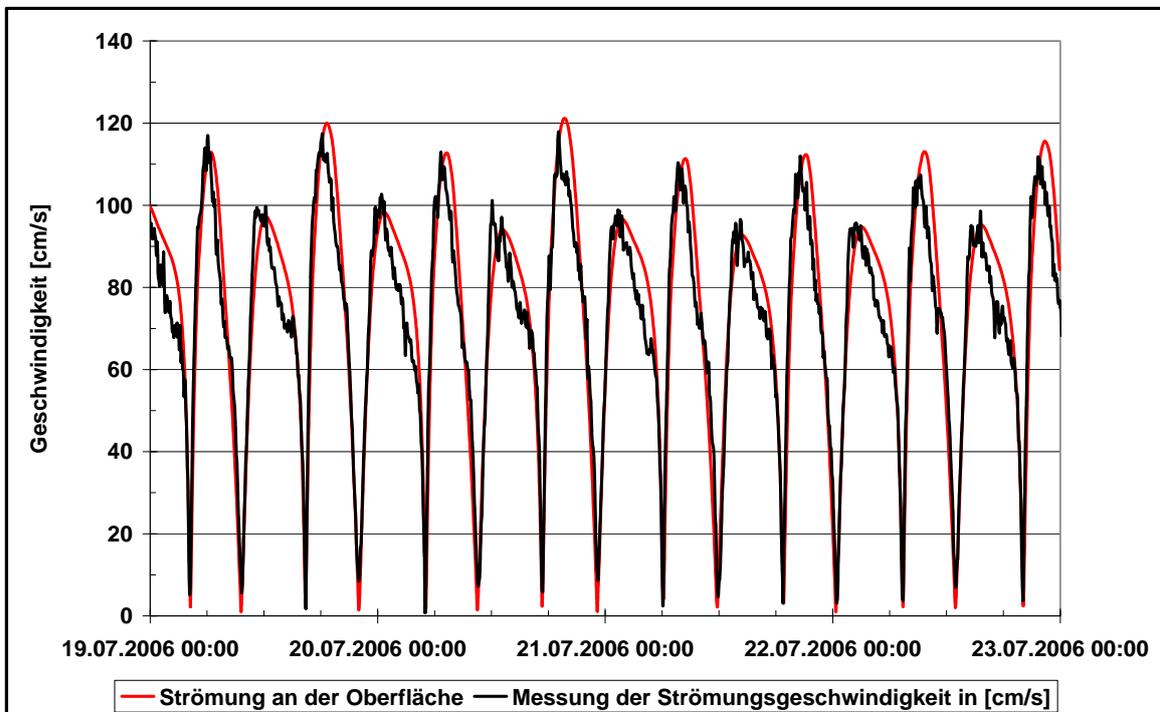


Bild 34: 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermessstation D2

### 3.2 Szenario 2

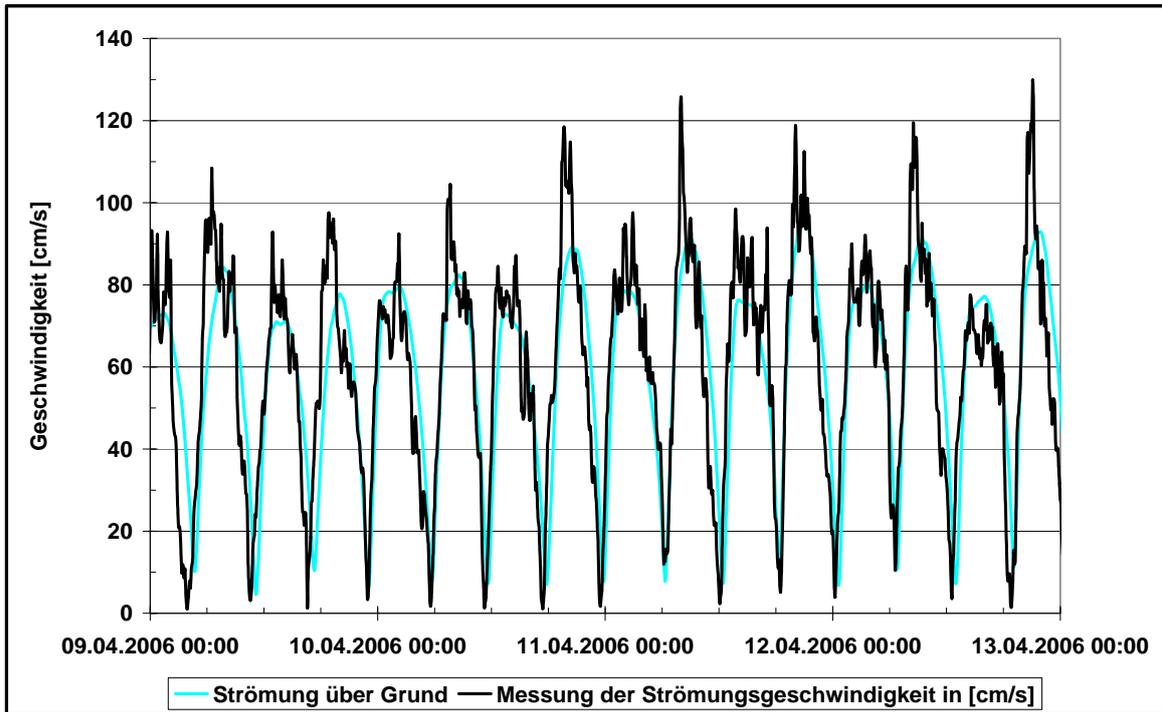


Bild 35: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ4

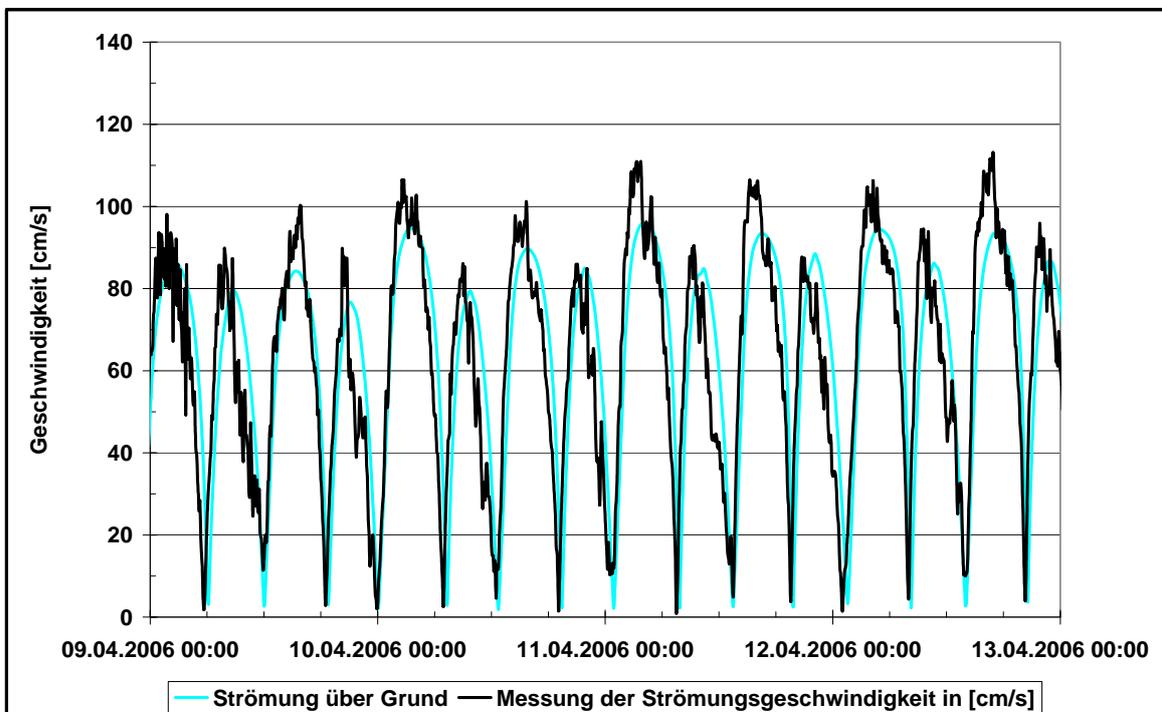


Bild 36: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ2 T

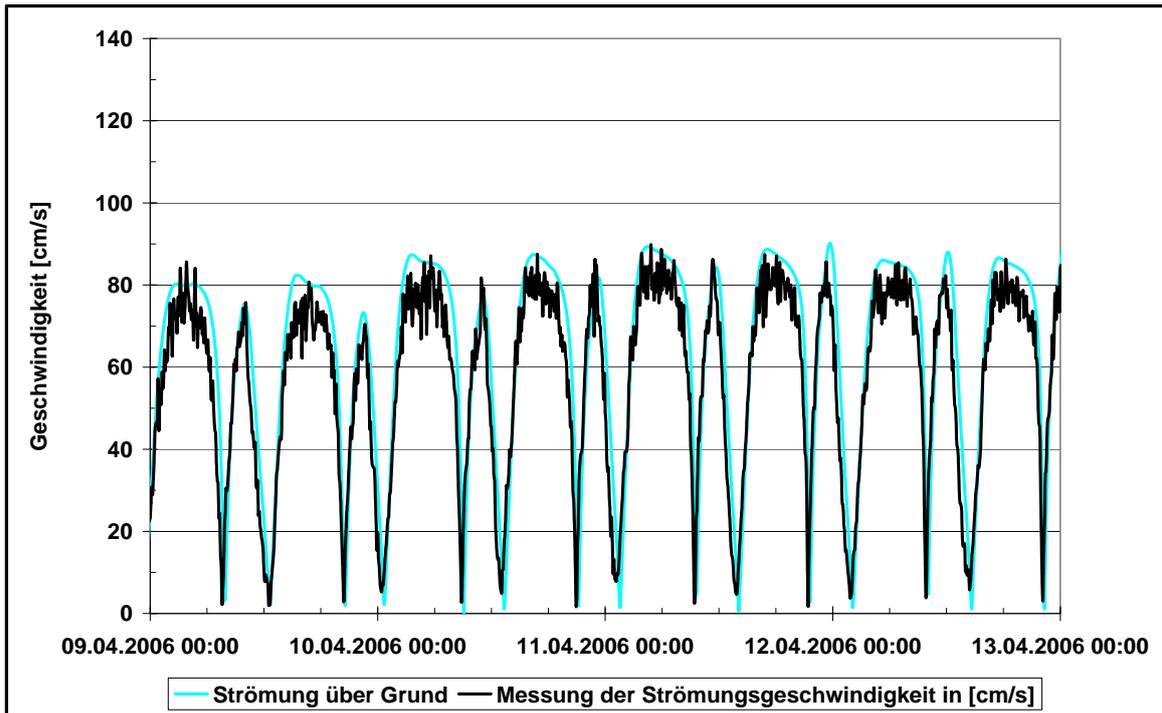


Bild 37: 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

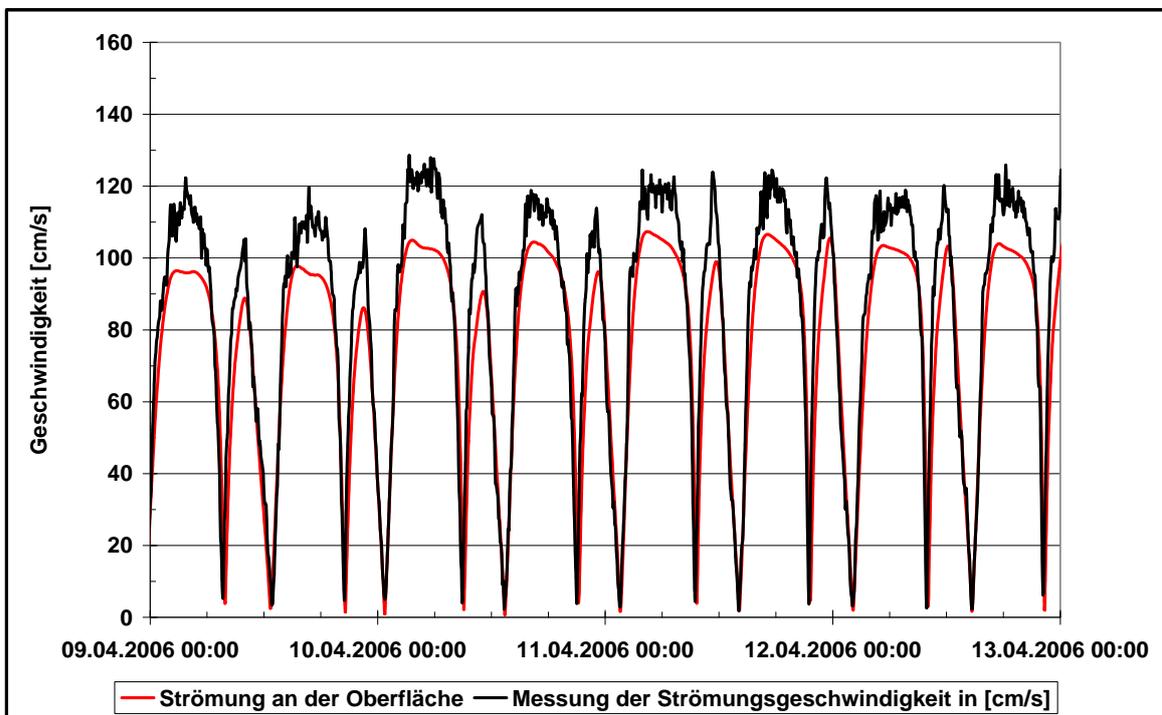


Bild 38: 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

### 3.3 Szenario 3

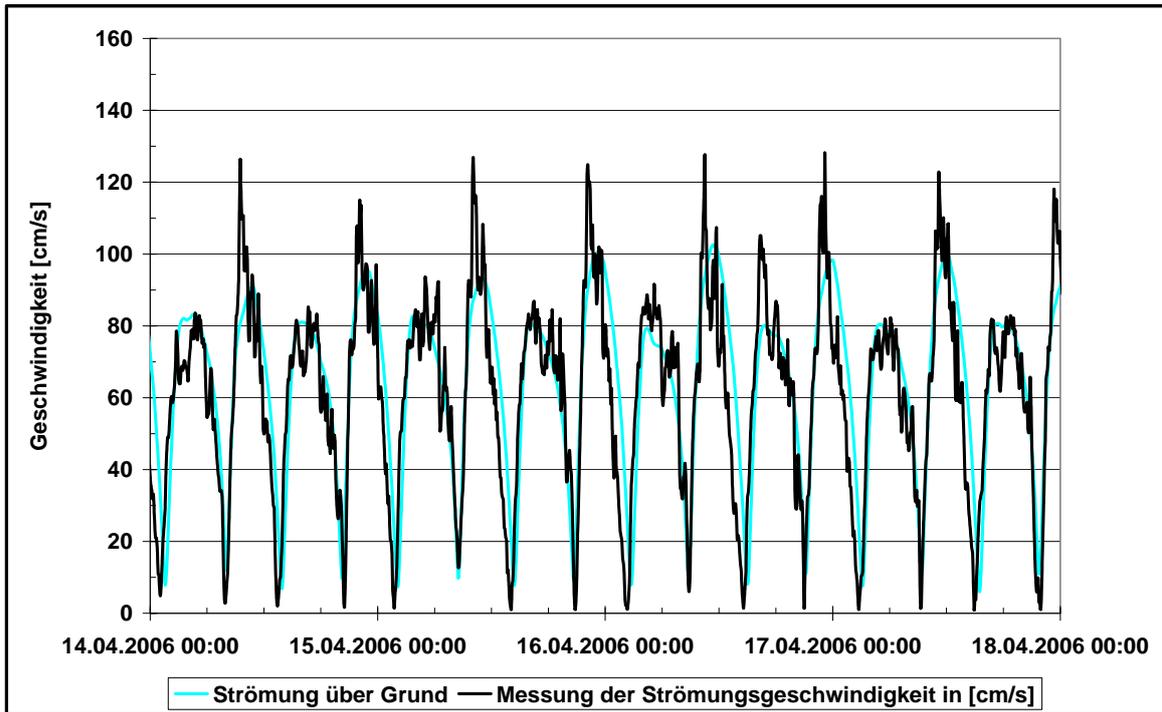


Bild 39: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ4

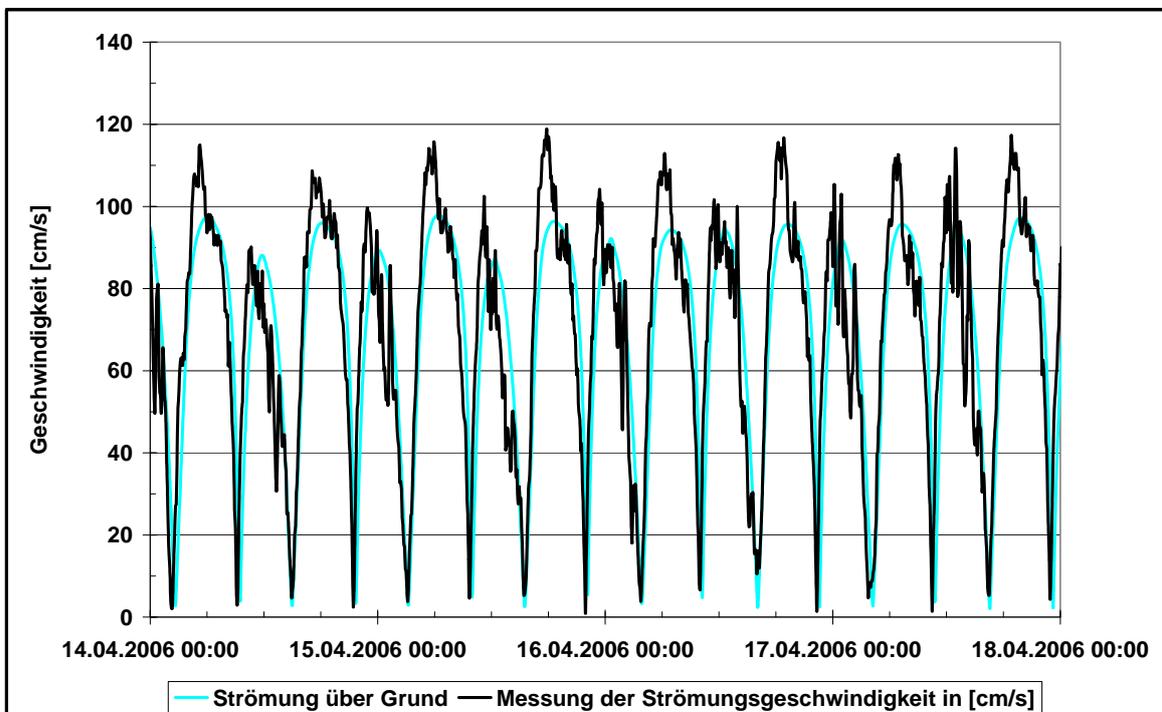


Bild 40: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ2 T

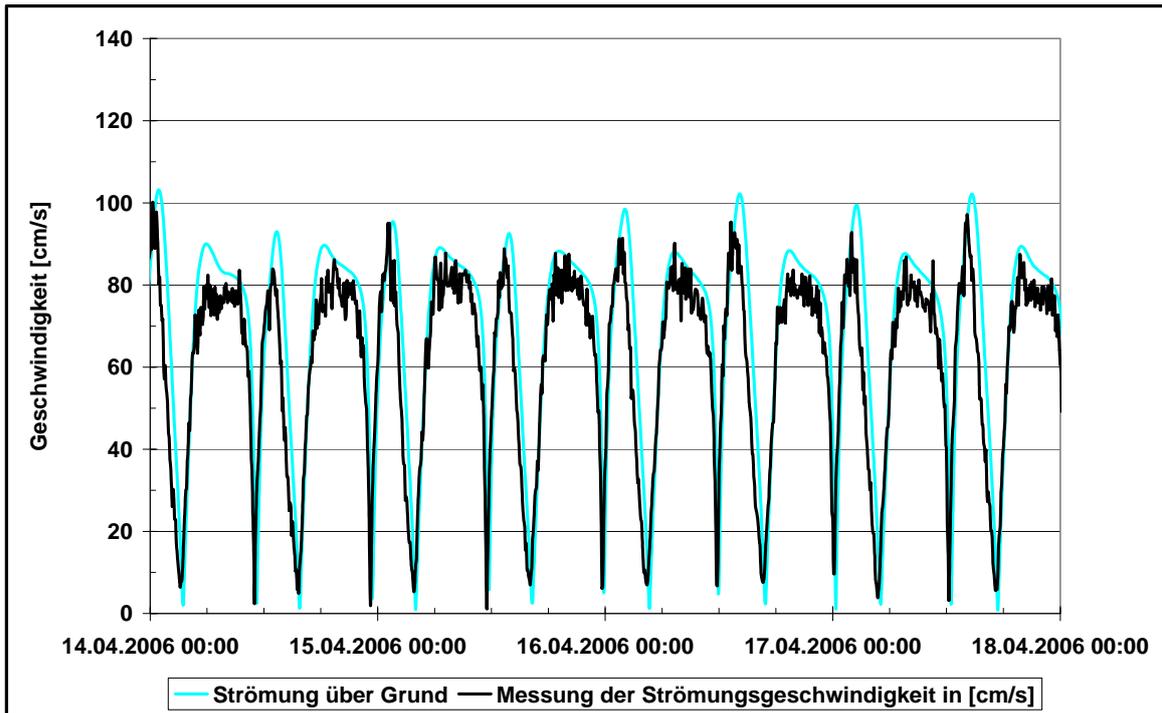


Bild 41: 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

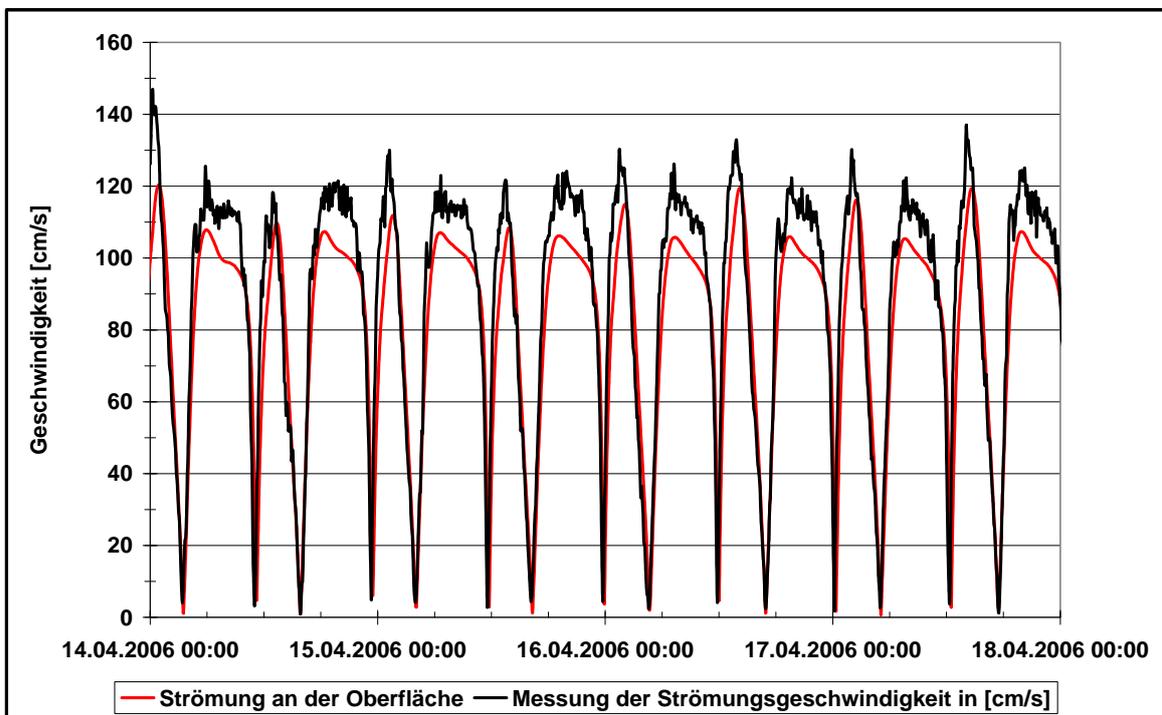


Bild 42: 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

### 3.4 Szenario 4

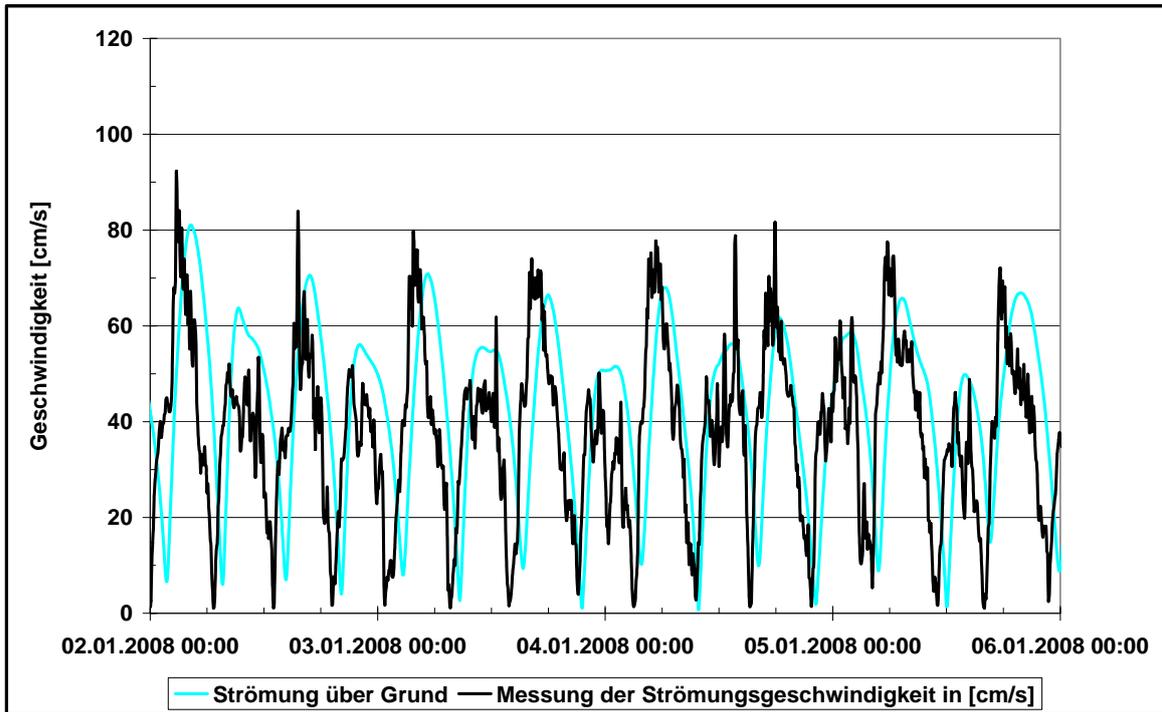


Bild 43: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ4

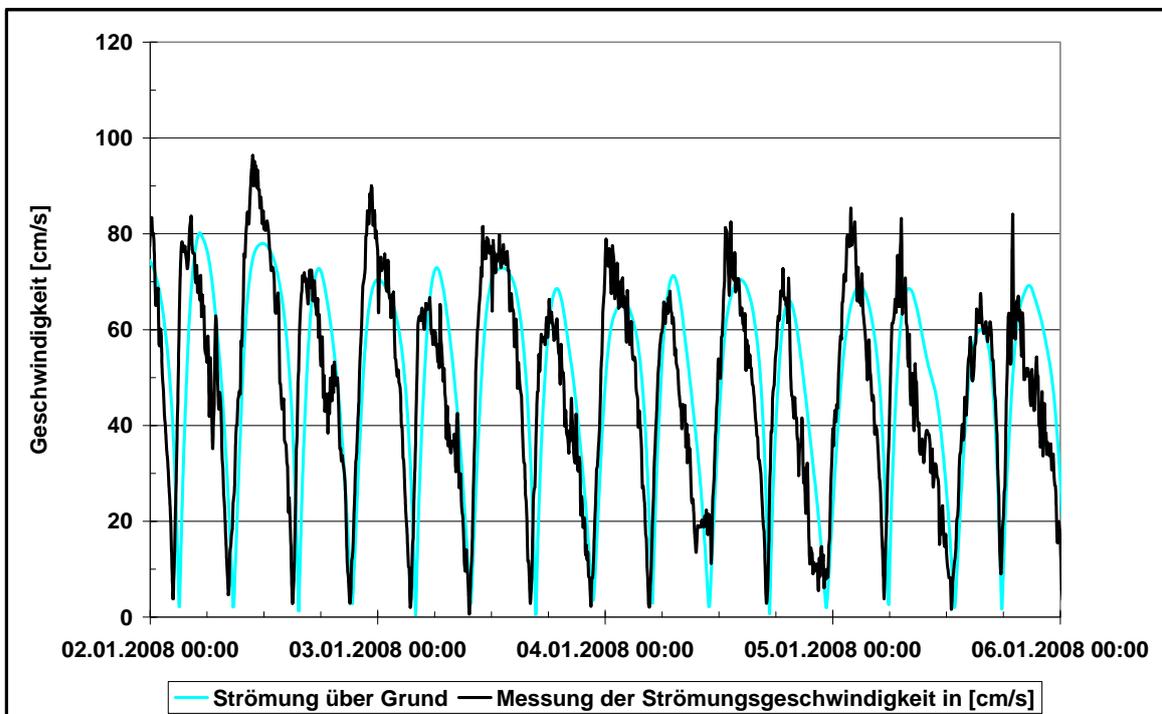


Bild 44: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmessstation LZ2 T

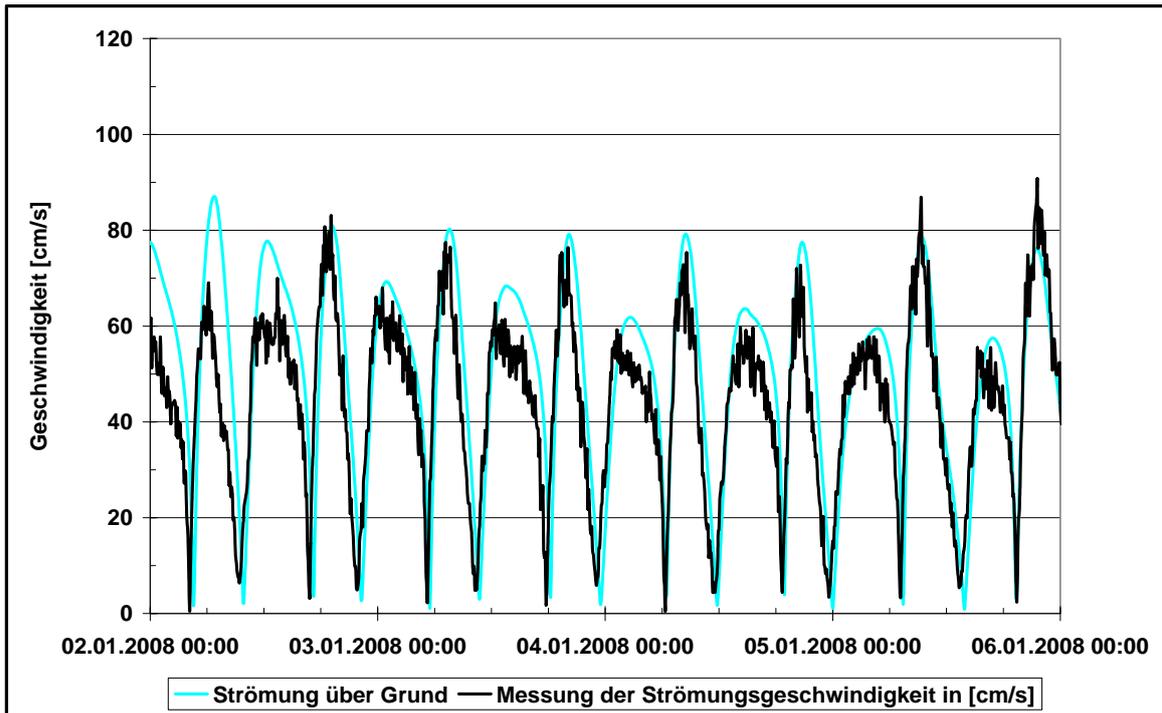


Bild 45: 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

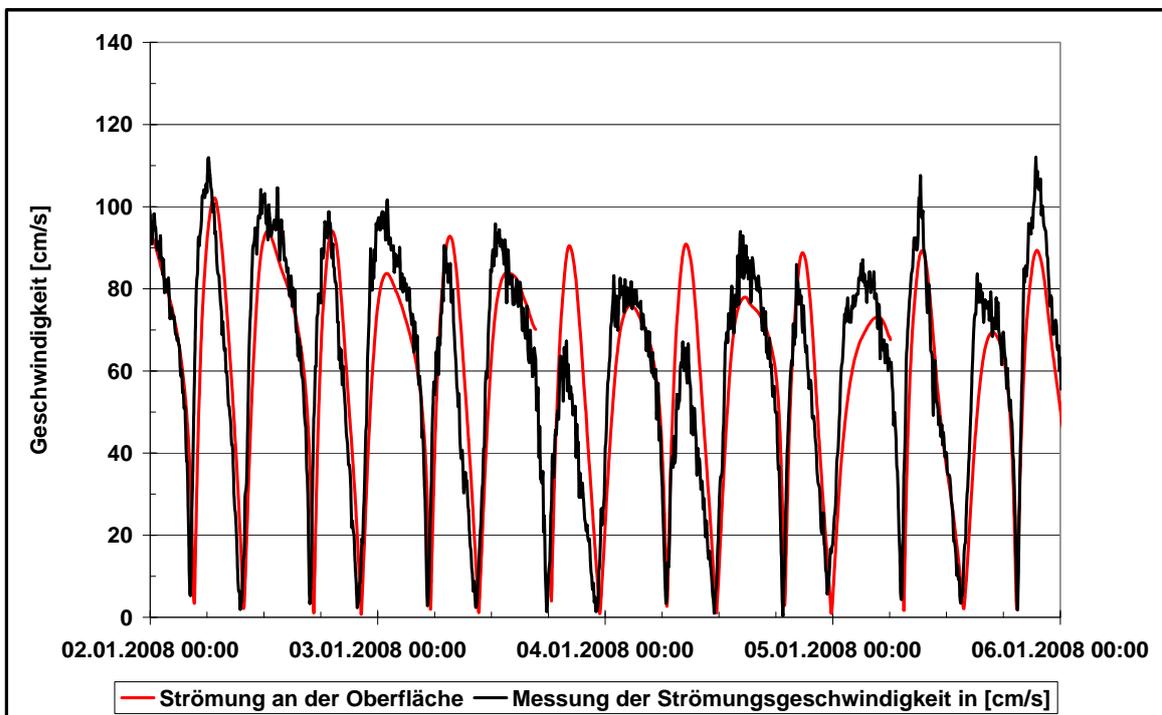


Bild 46: 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

### 3.5 Szenario 5

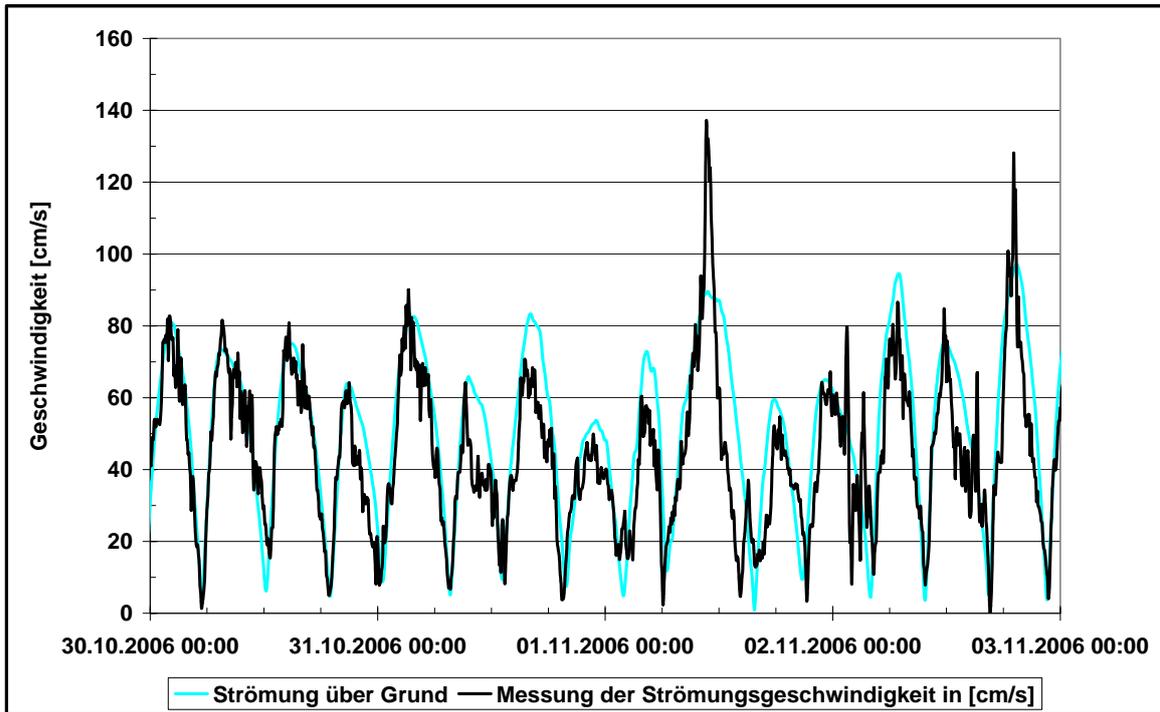


Bild 47: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ4

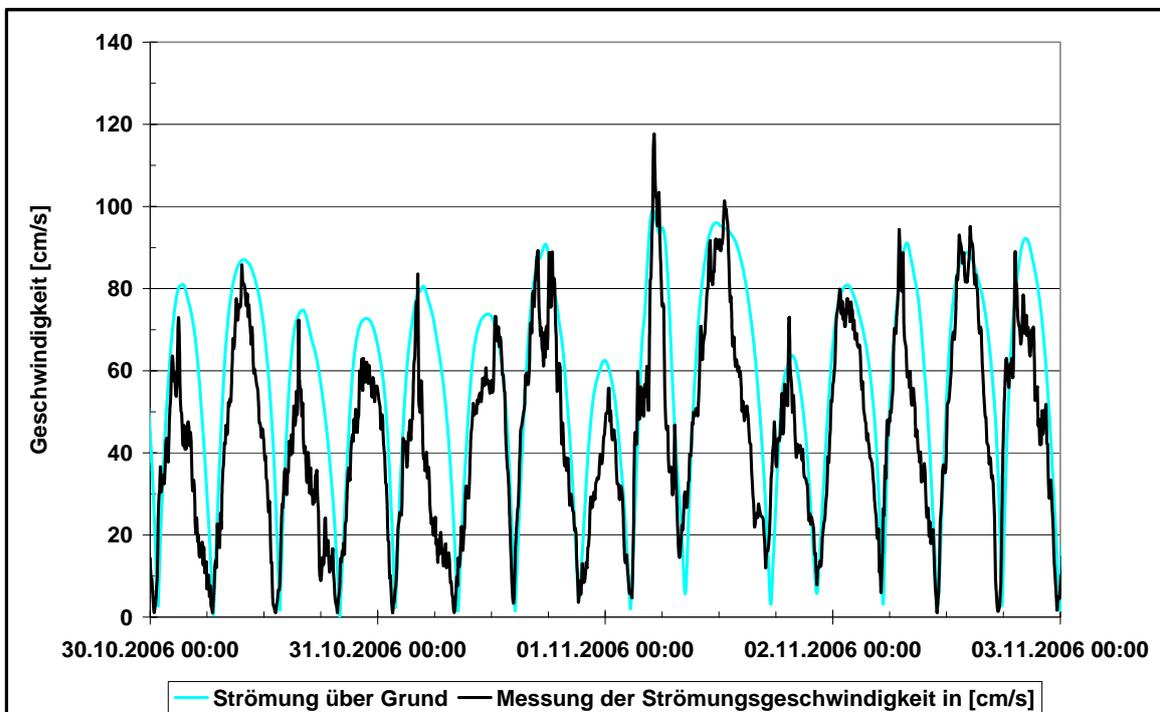


Bild 48: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ2 T

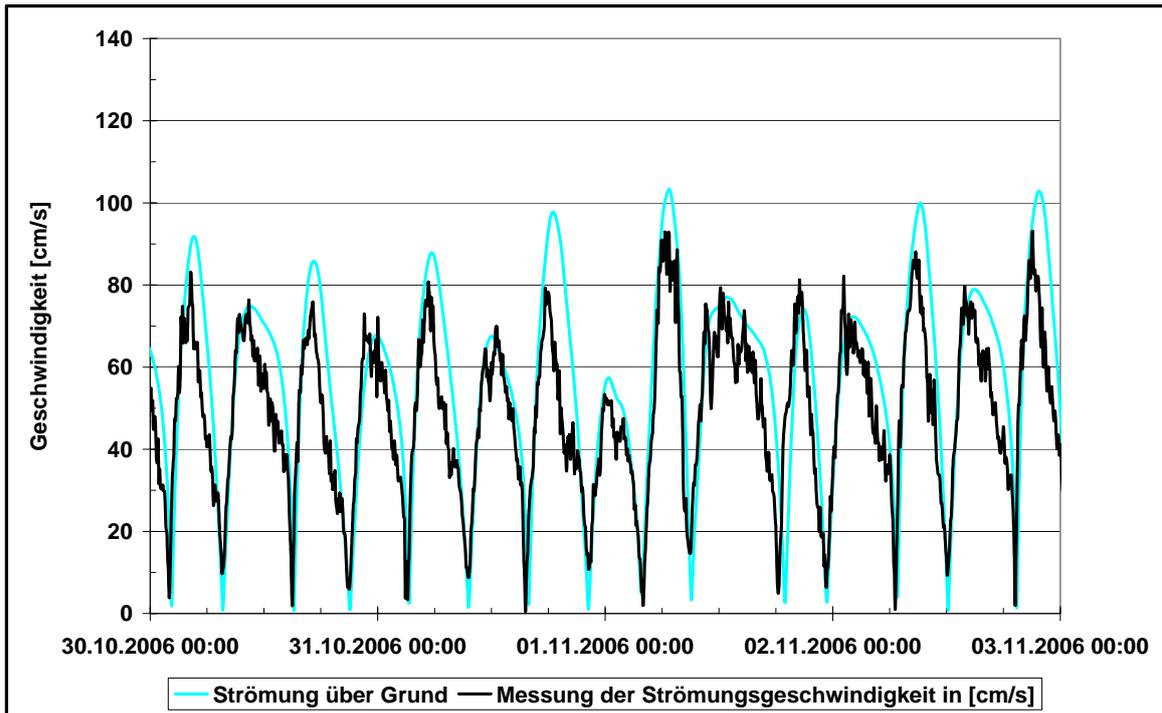


Bild 49: 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

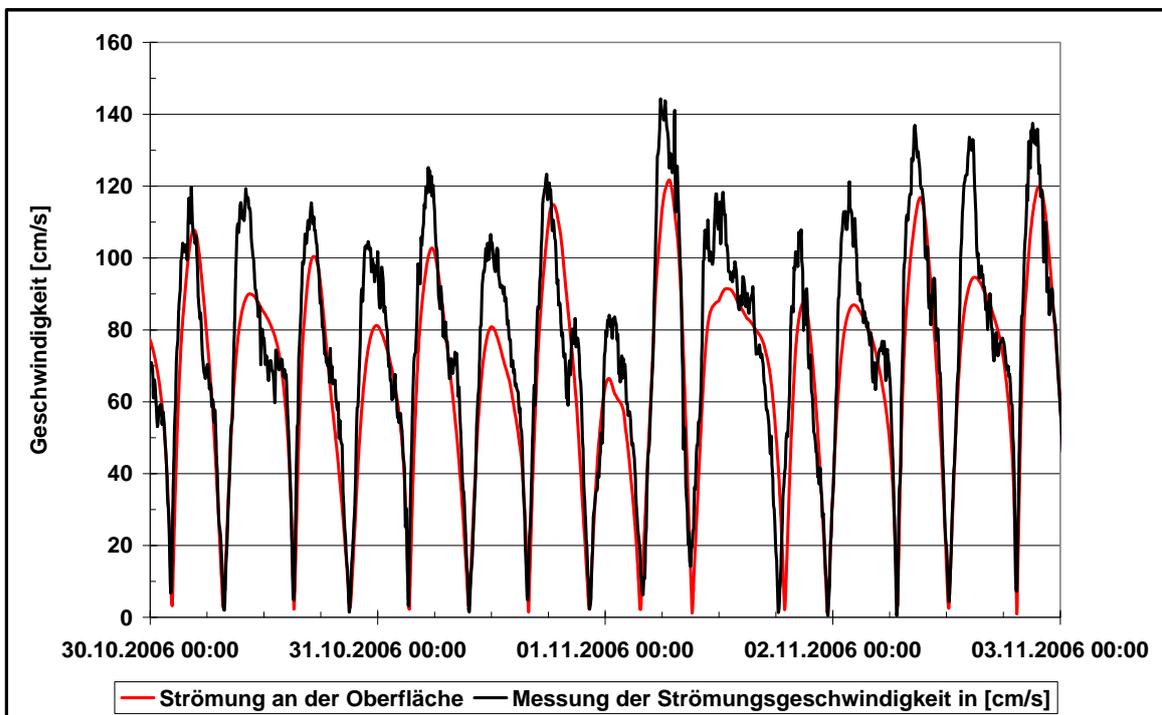


Bild 50: 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

### 3.6 Szenario 6

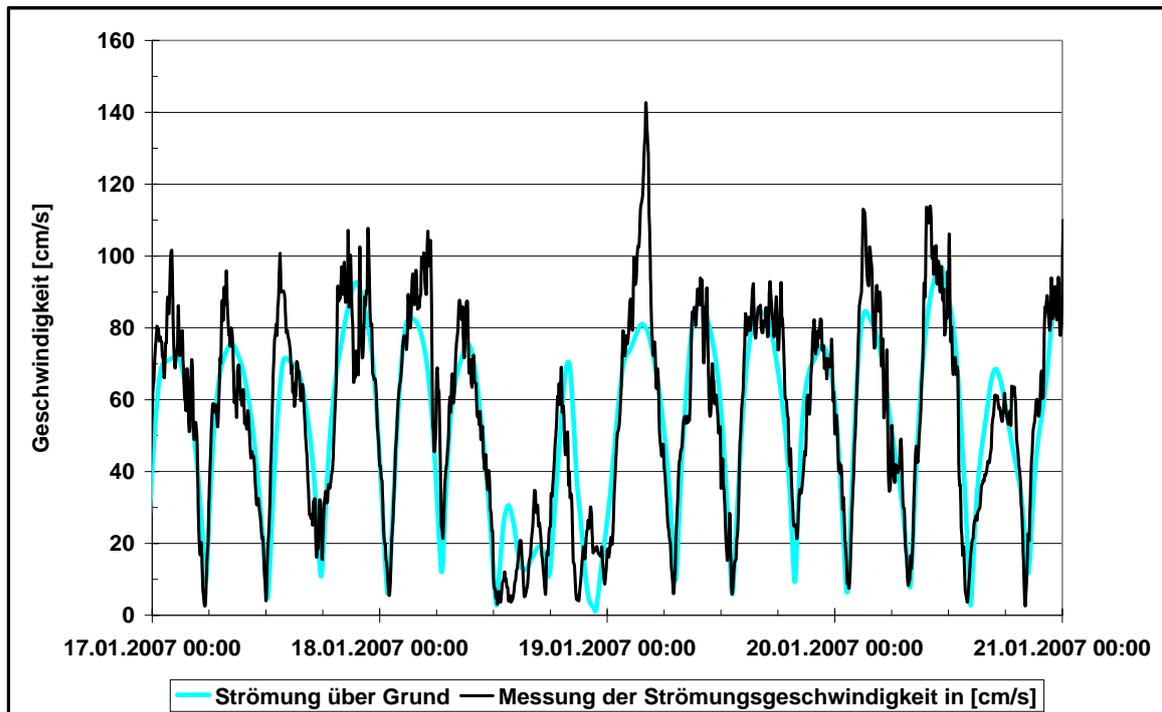


Bild 51: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ4

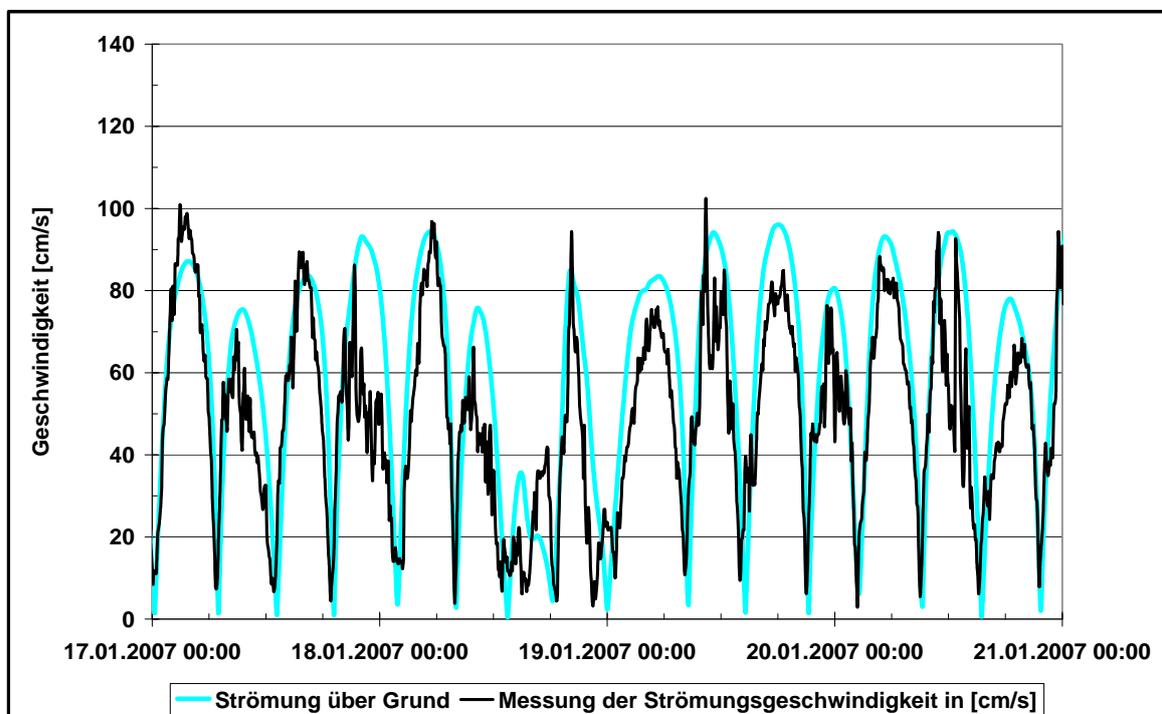


Bild 52: Gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Langzeitmesstation LZ2 T

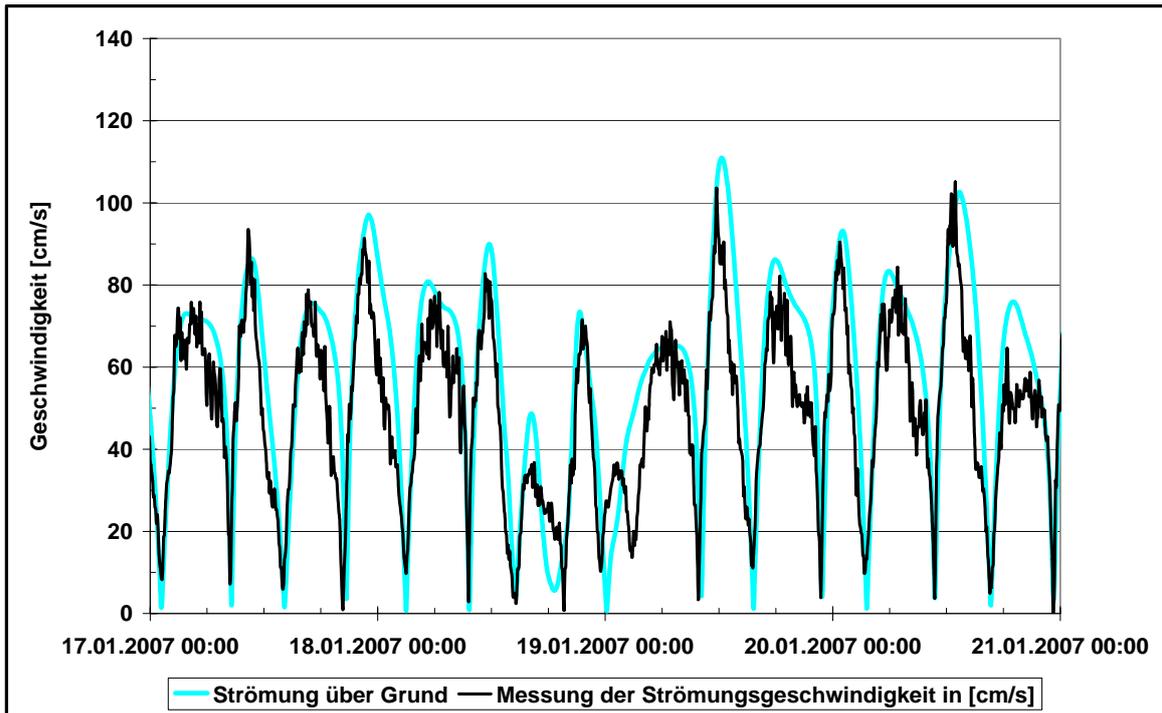


Bild 53: 1,1 m über Grund gemessene (schwarz) und modellierte (türkis) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

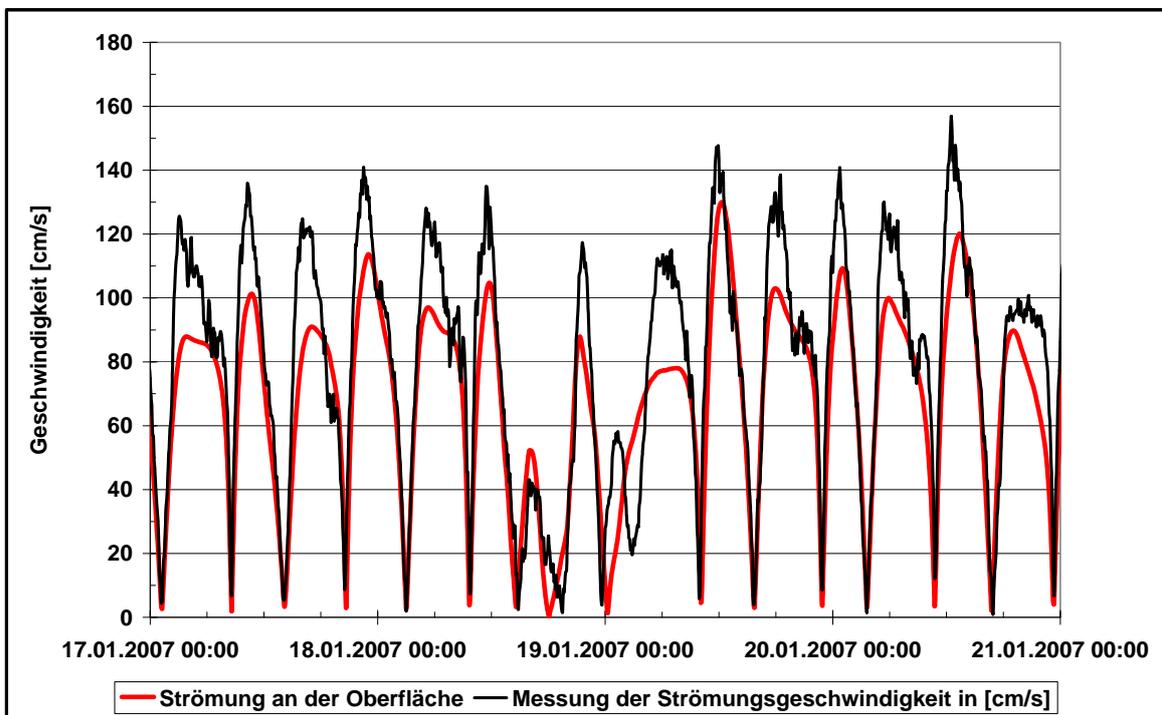


Bild 54: 0,8 m unter der Oberfläche gemessene (schwarz) und modellierte (orange) Strömungsgeschwindigkeit an der Dauermesstation D2

#### 4 Salzgehalt

Die mit dem BAW-Vorhersagemodell-Elbe modellierten Salzgehalte werden im Folgenden für alle von der HPA zur Verfügung gestellten Zeitreihen an den entsprechenden Langzeitmessstationen verglichen. Eine Beschreibung der gemessenen Daten befindet sich in Abschnitt 3 Tabelle 4 des Berichtes zu OPTEL-D. Die Randwerte für die Salzgehalte im Modell sind immer die Werte aus dem BSHcmod.

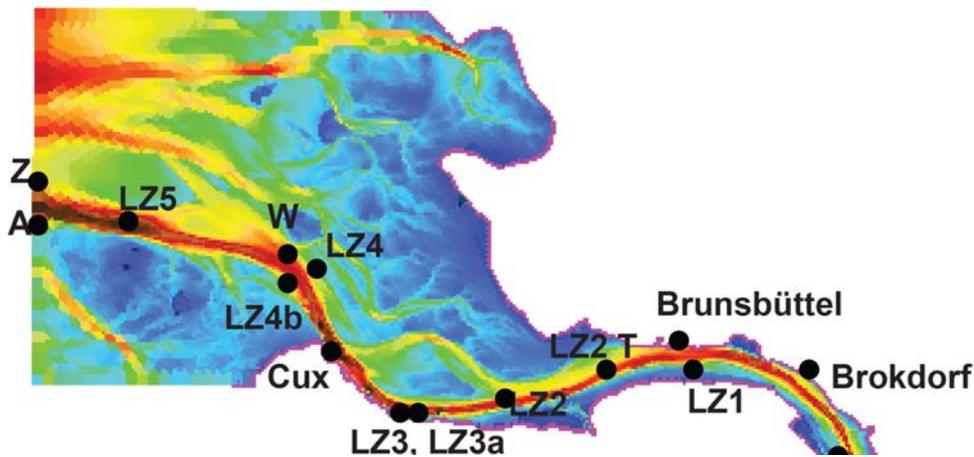


Bild 55: Lage der Messstationen im vom Salzwasser aus der Nordsee beeinflussten Bereich des Elbeästuares.

#### 4.1 Szenario 1

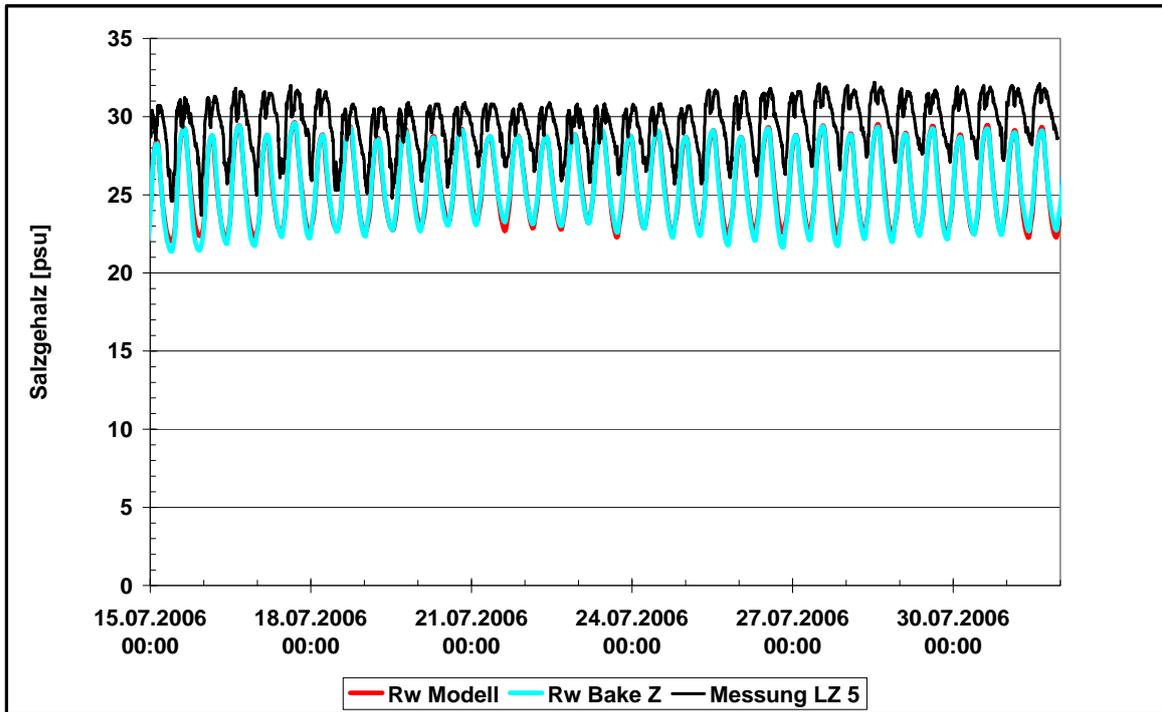


Bild 56: Gemessenen (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

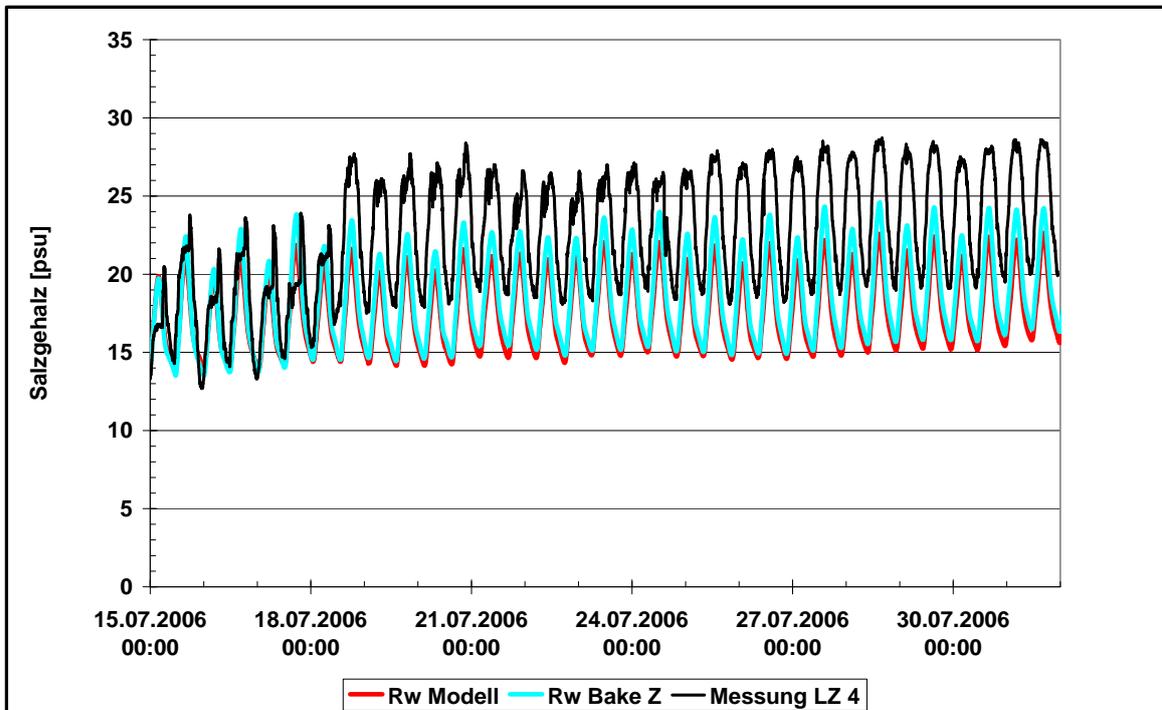


Bild 57: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

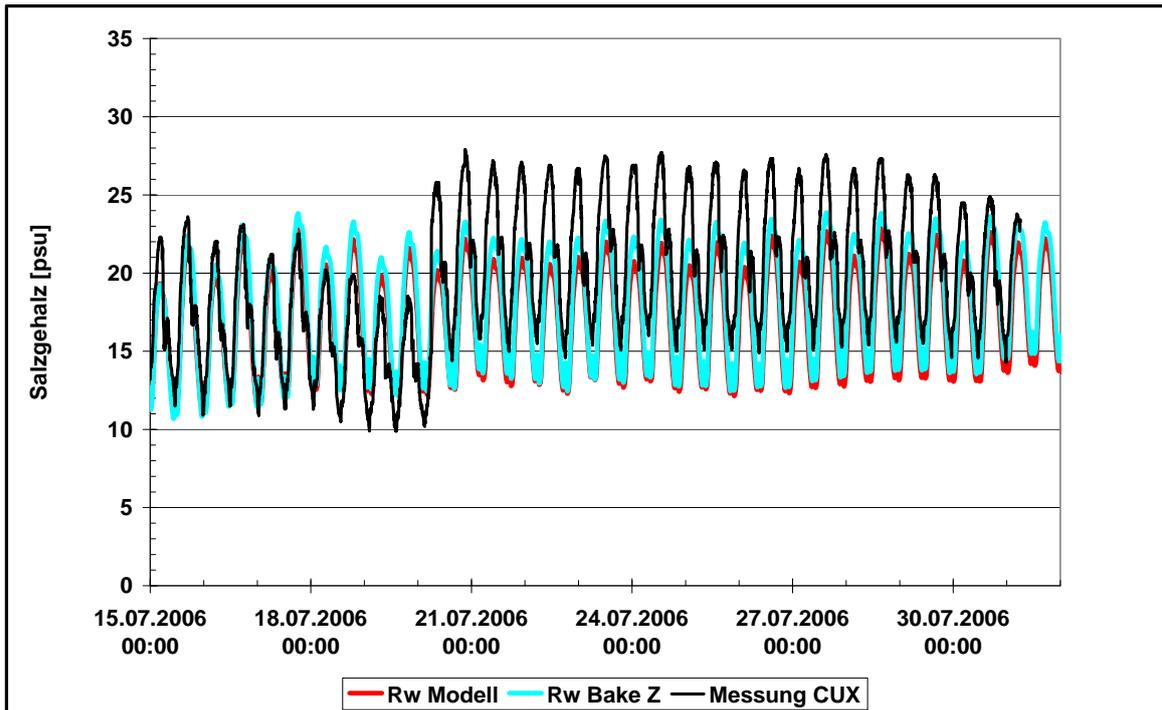


Bild 58: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

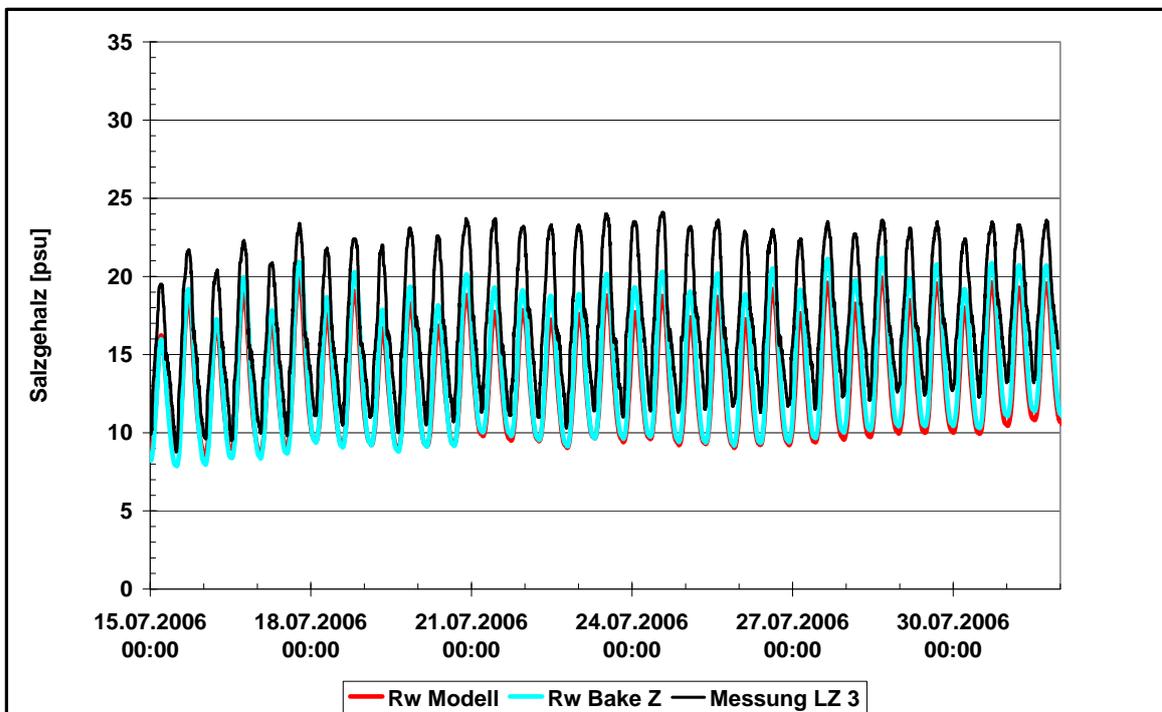


Bild 59: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

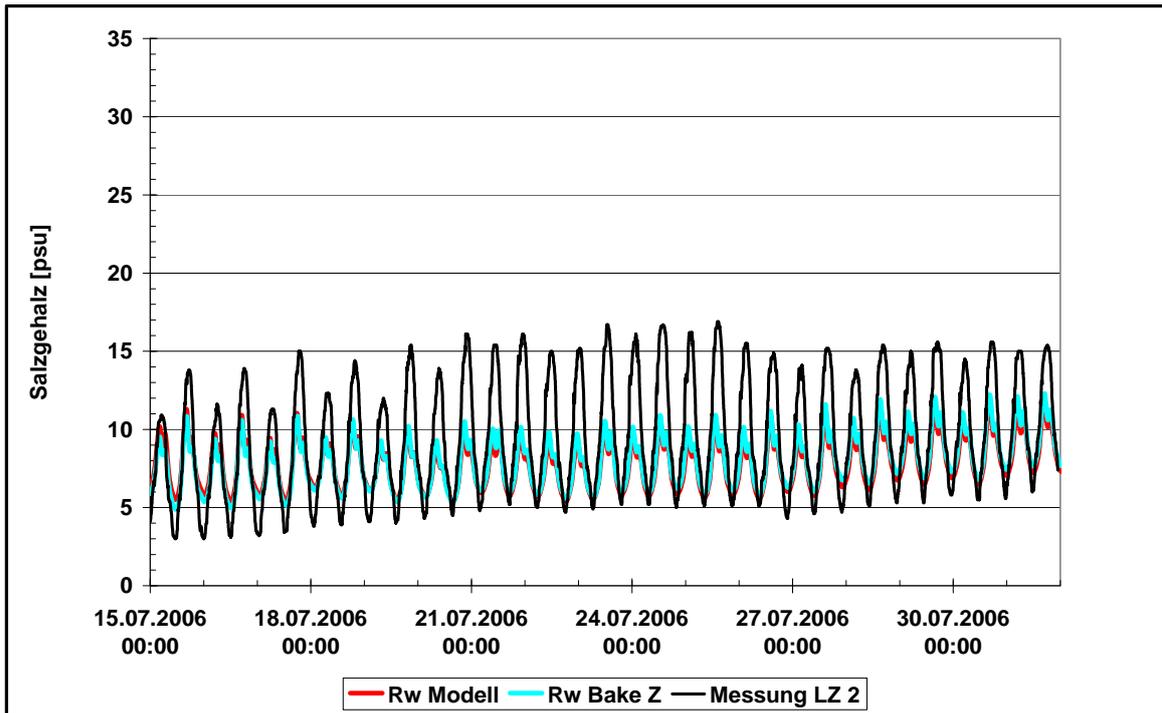


Bild 60: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

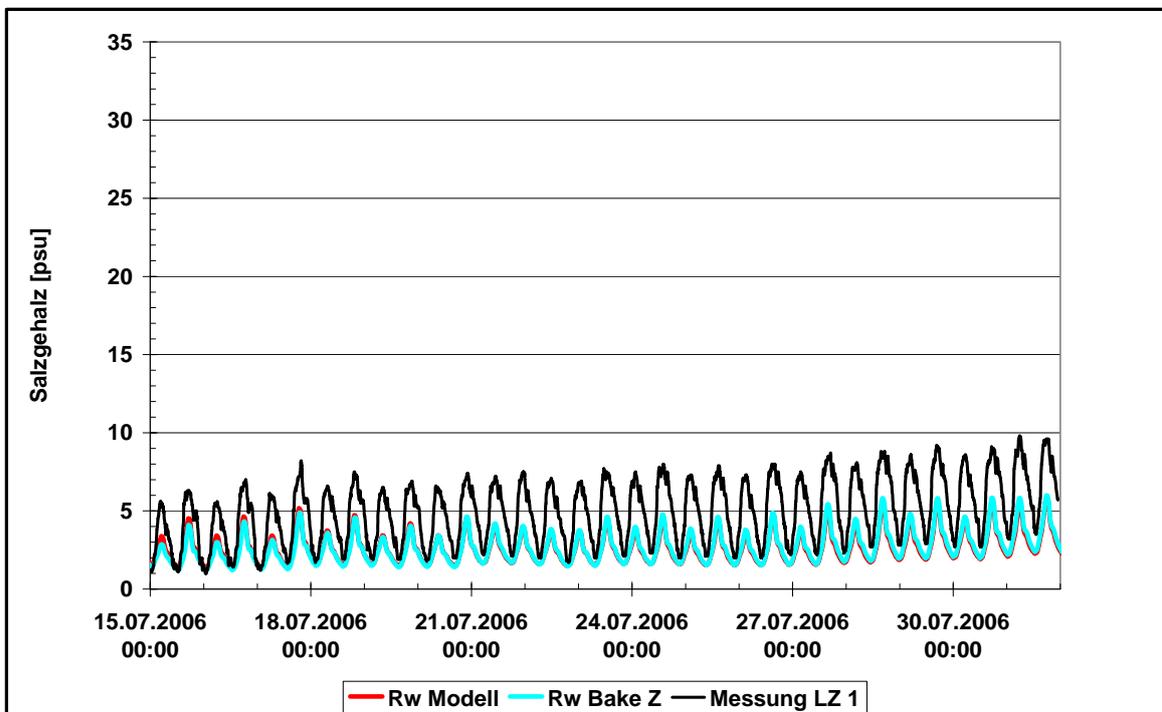


Bild 61: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

## 4.2 Szenario 2

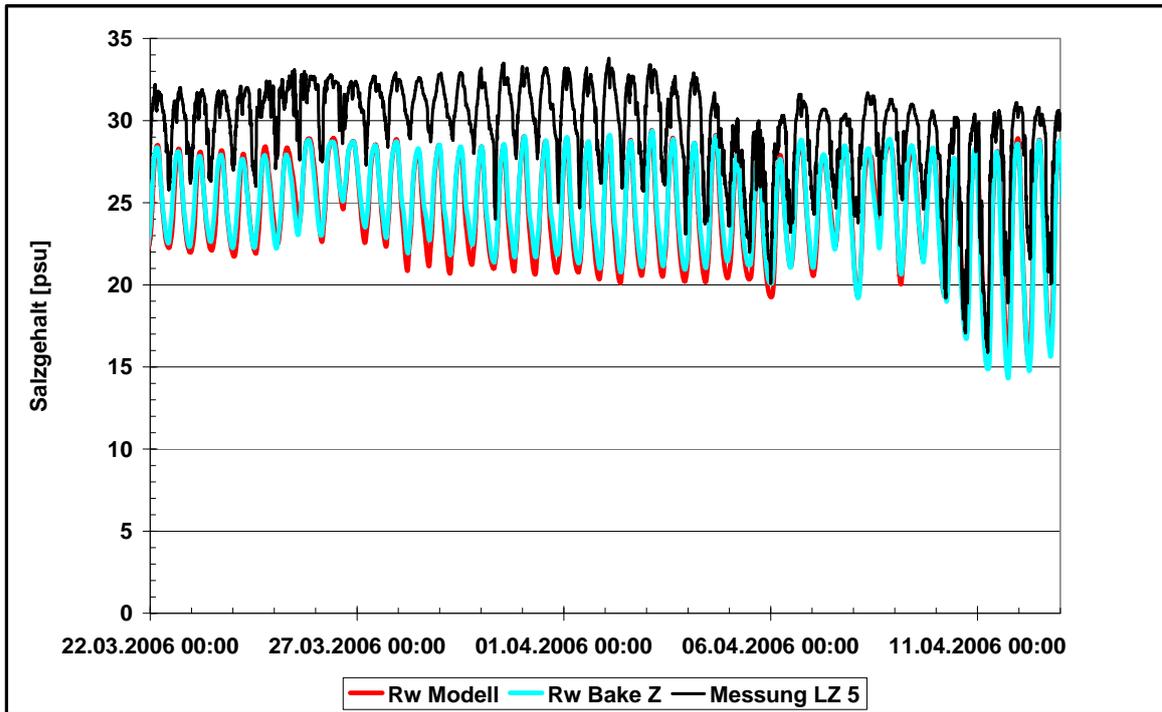


Bild 62: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

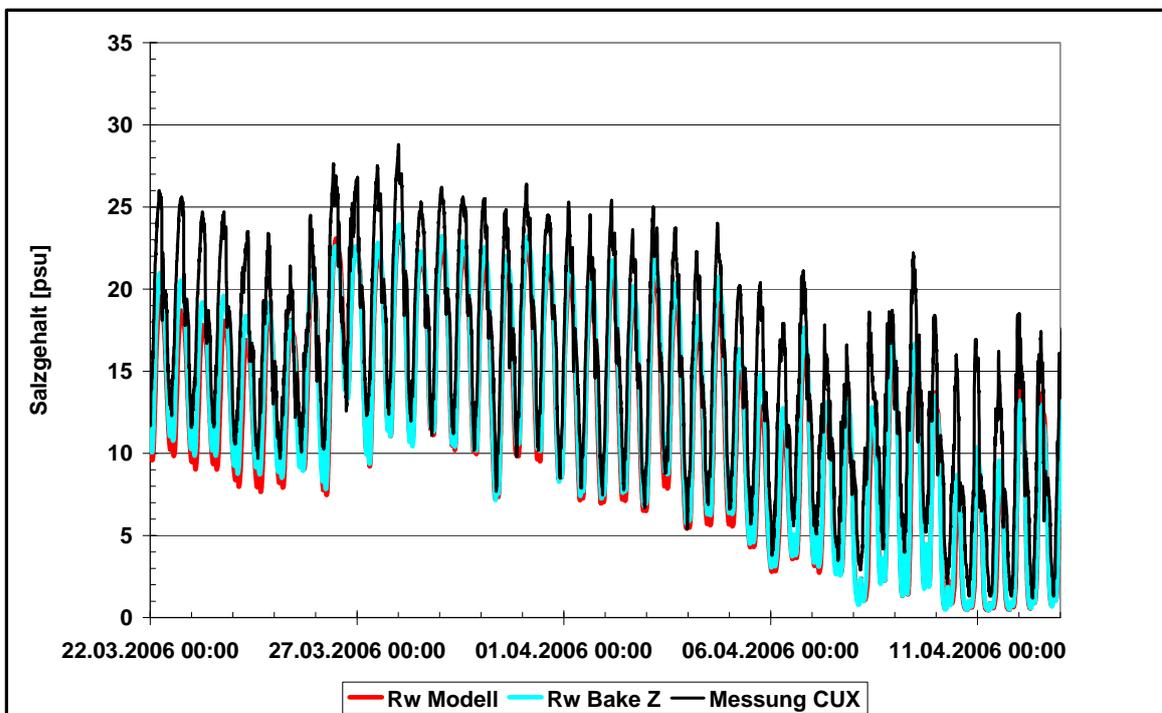


Bild 63: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

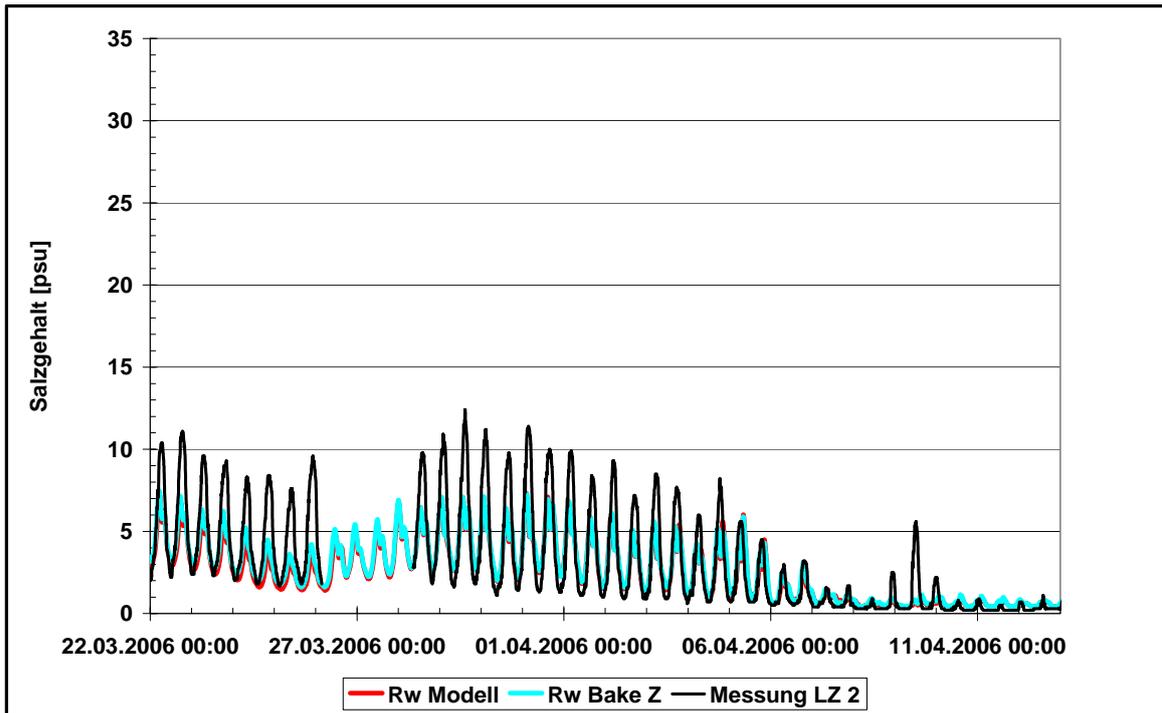


Bild 64: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

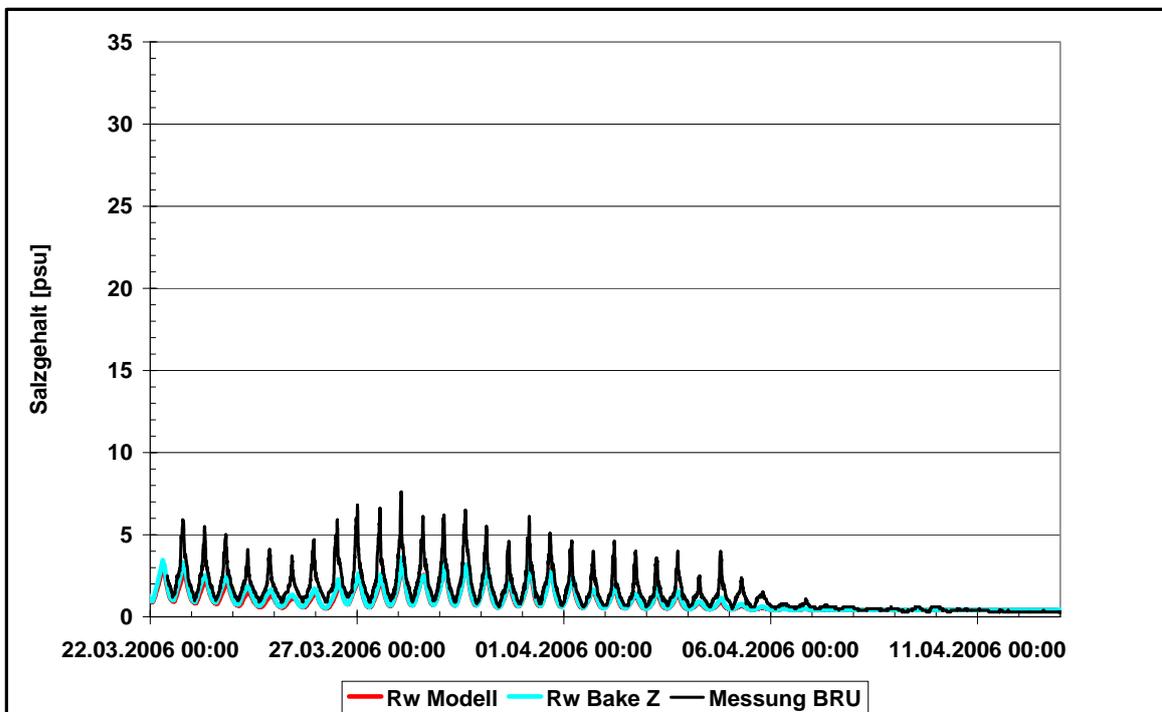


Bild 65: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Brunsbüttel. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

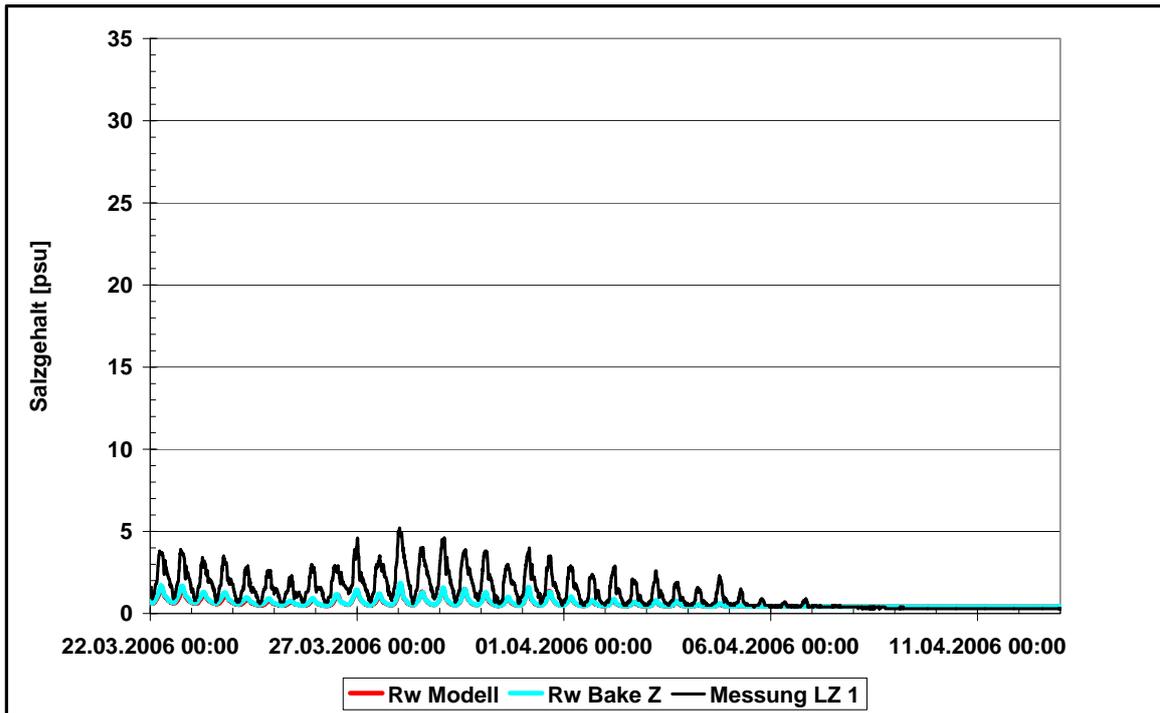


Bild 66: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet

### 4.3 Szenario 3

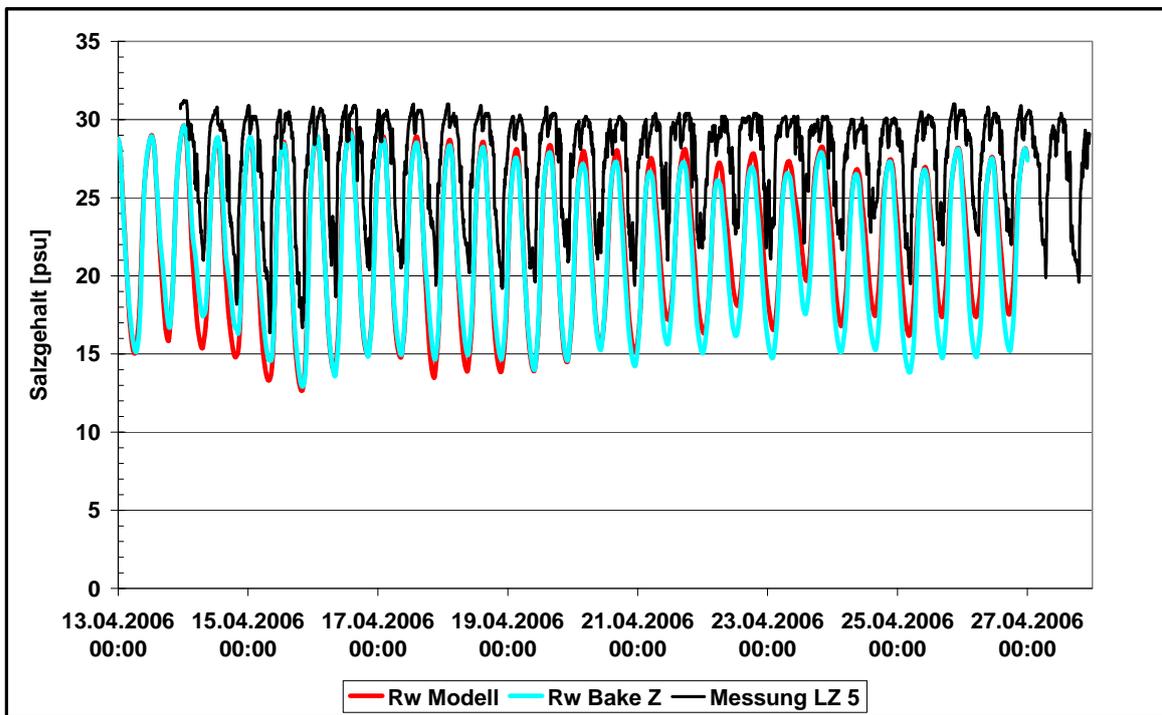


Bild 67: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet

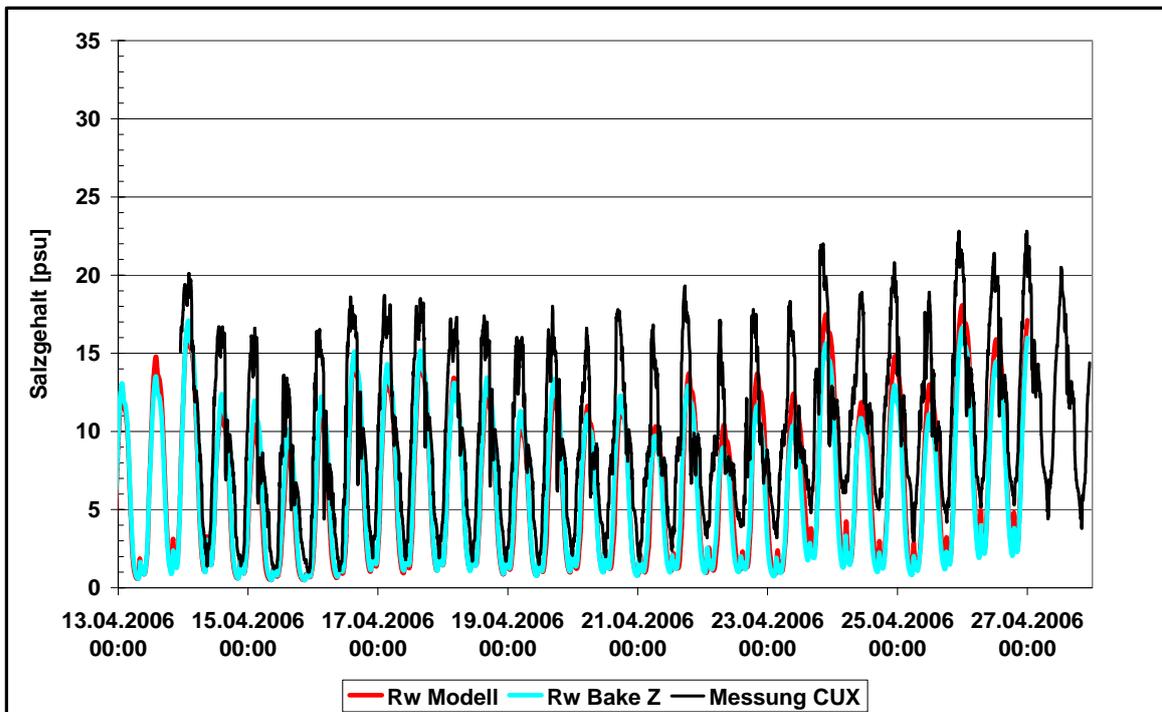


Bild 68: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

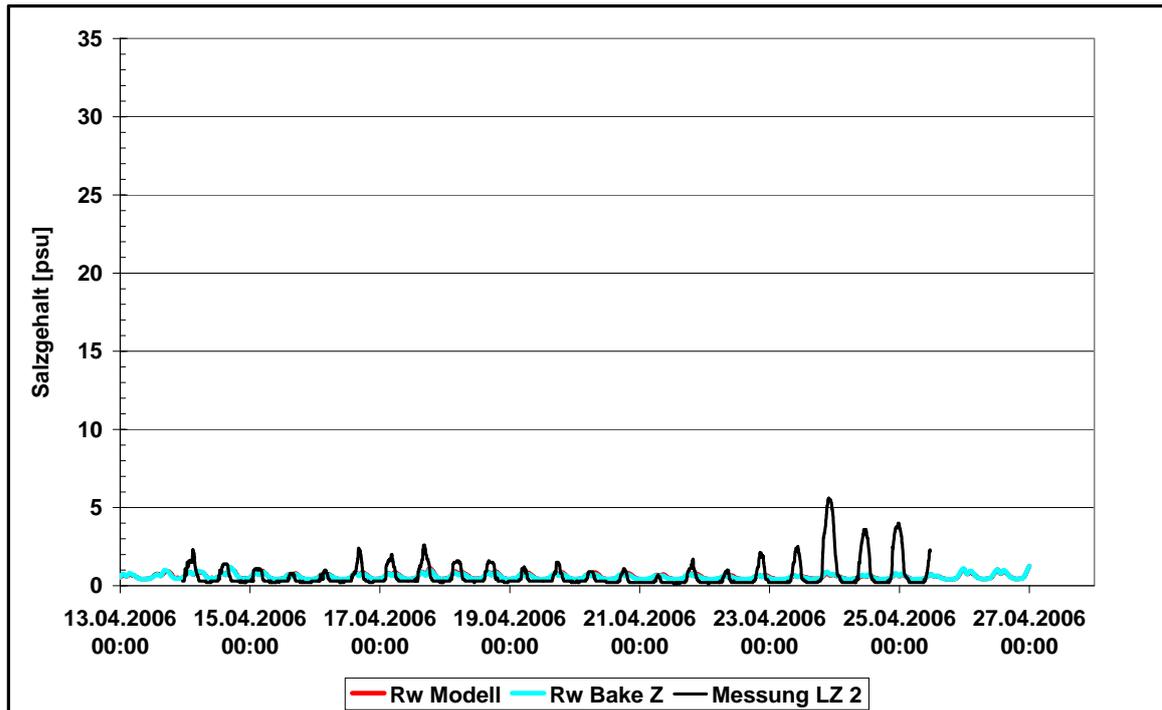


Bild 69: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet

#### 4.4 Szenario 4

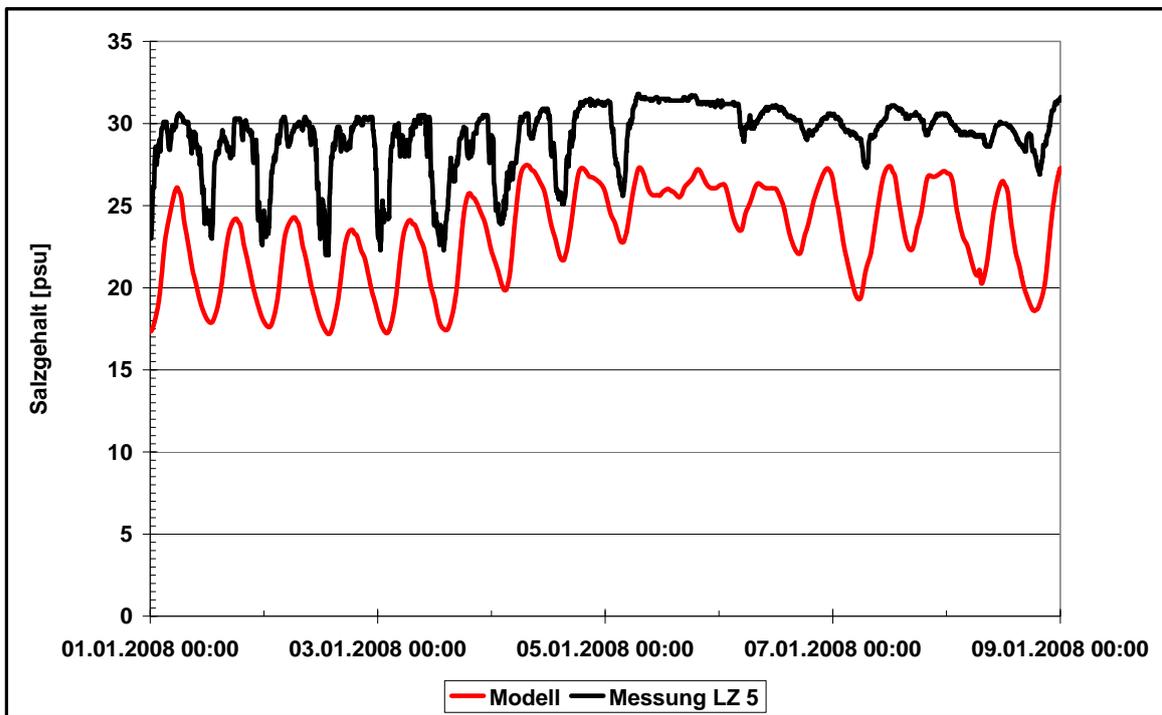


Bild 70: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

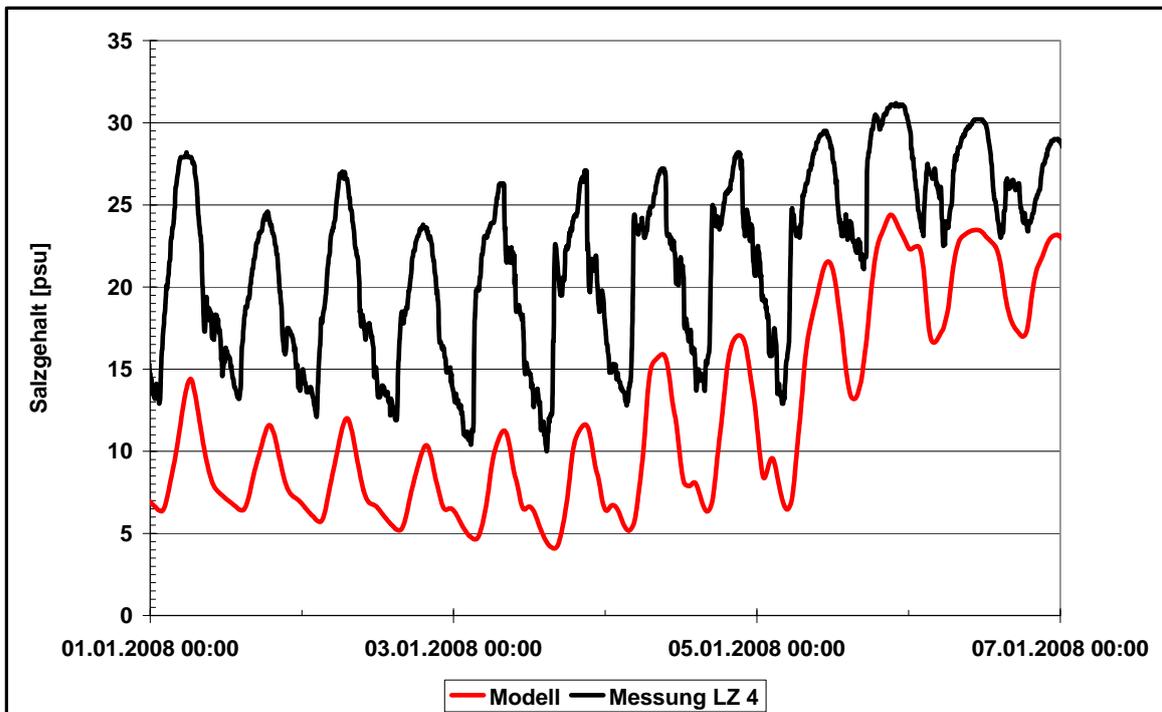


Bild 71: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

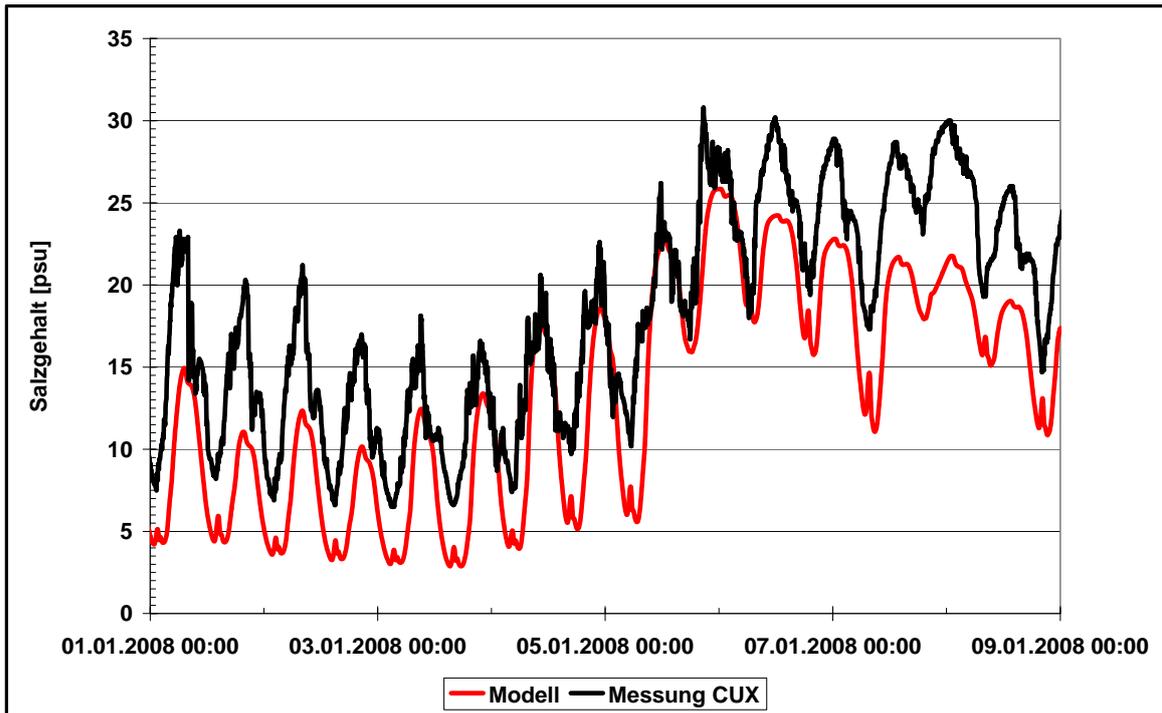


Bild 72: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

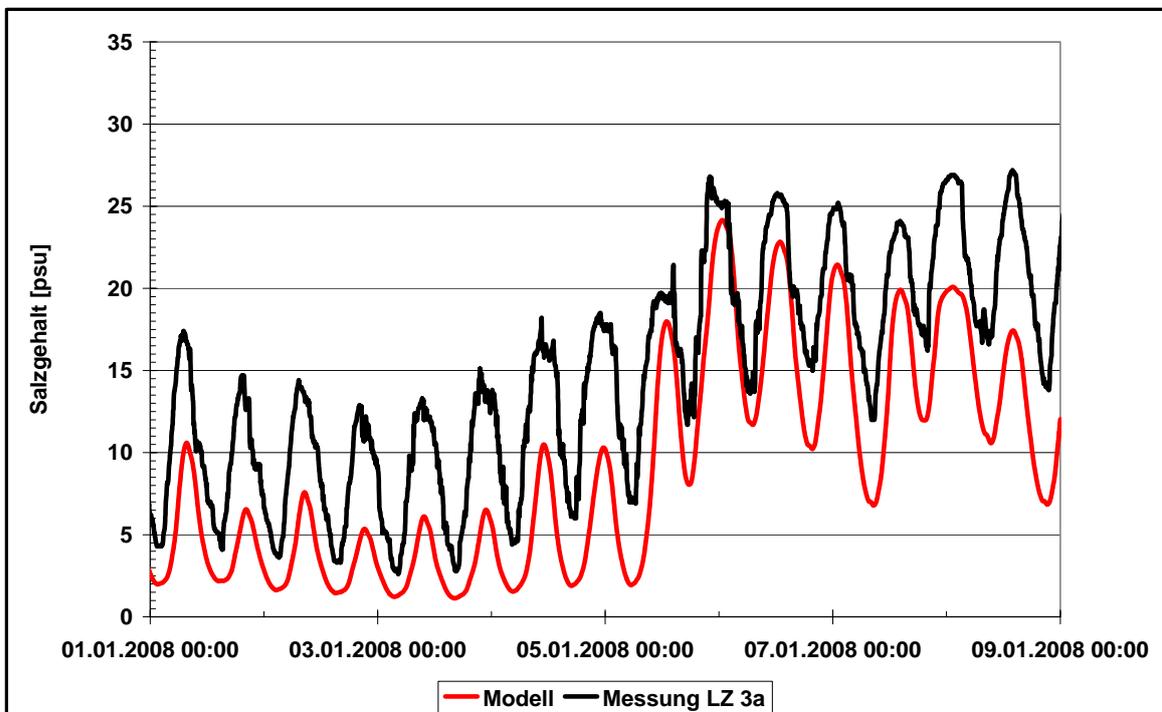


Bild 73: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3a. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

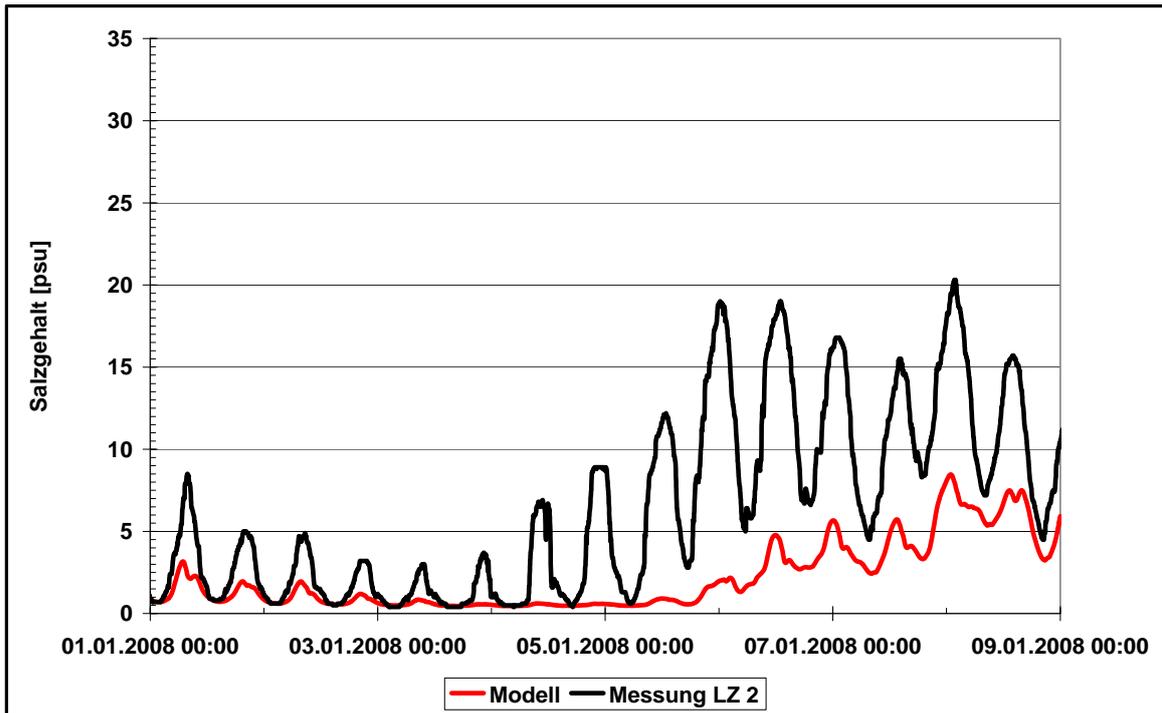


Bild 74: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

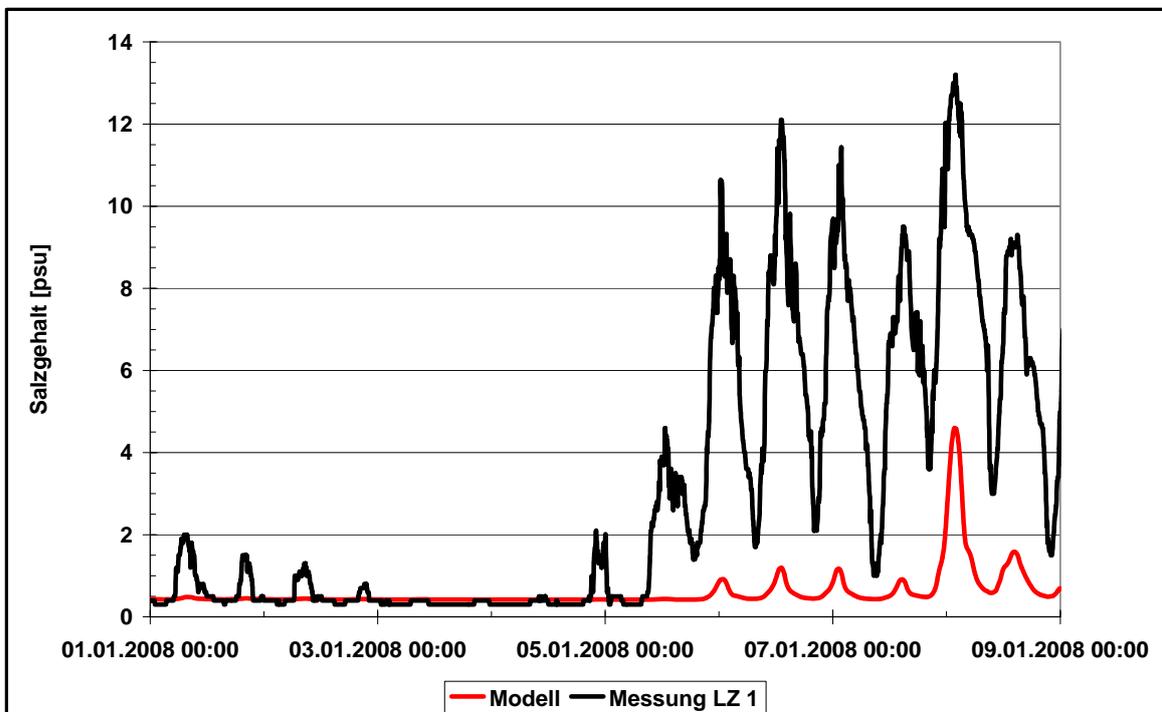


Bild 75: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

#### 4.5 Szenario 5

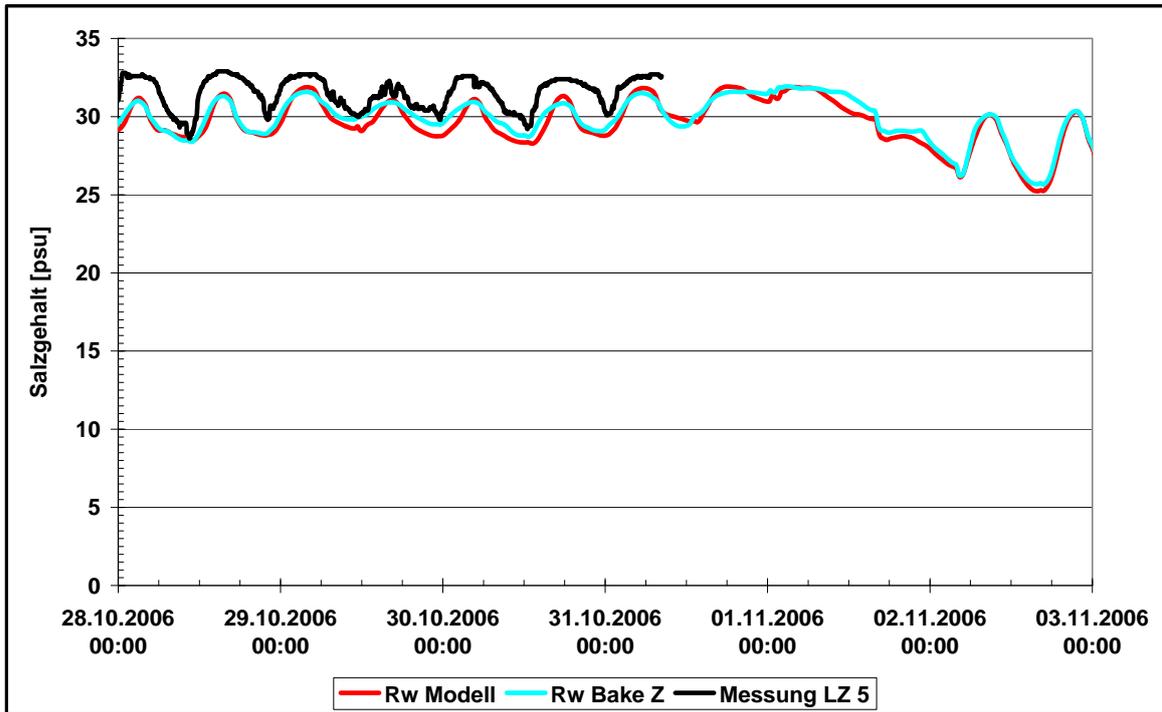


Bild 76: Gemessenen (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

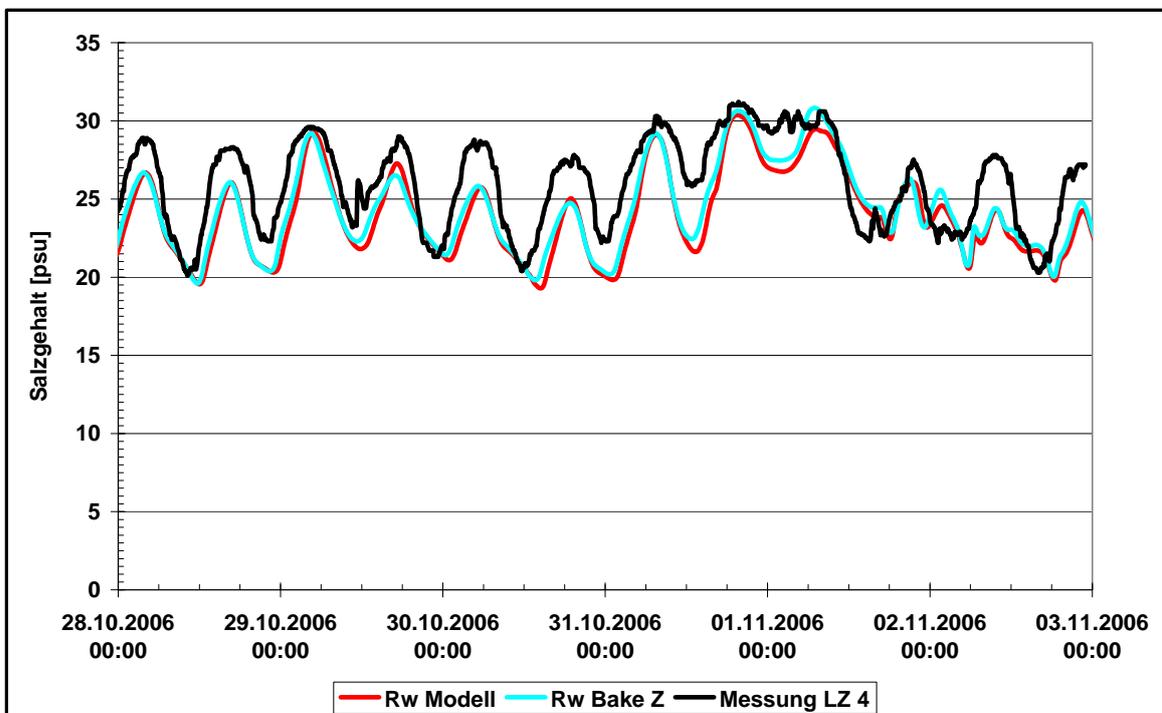


Bild 77: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

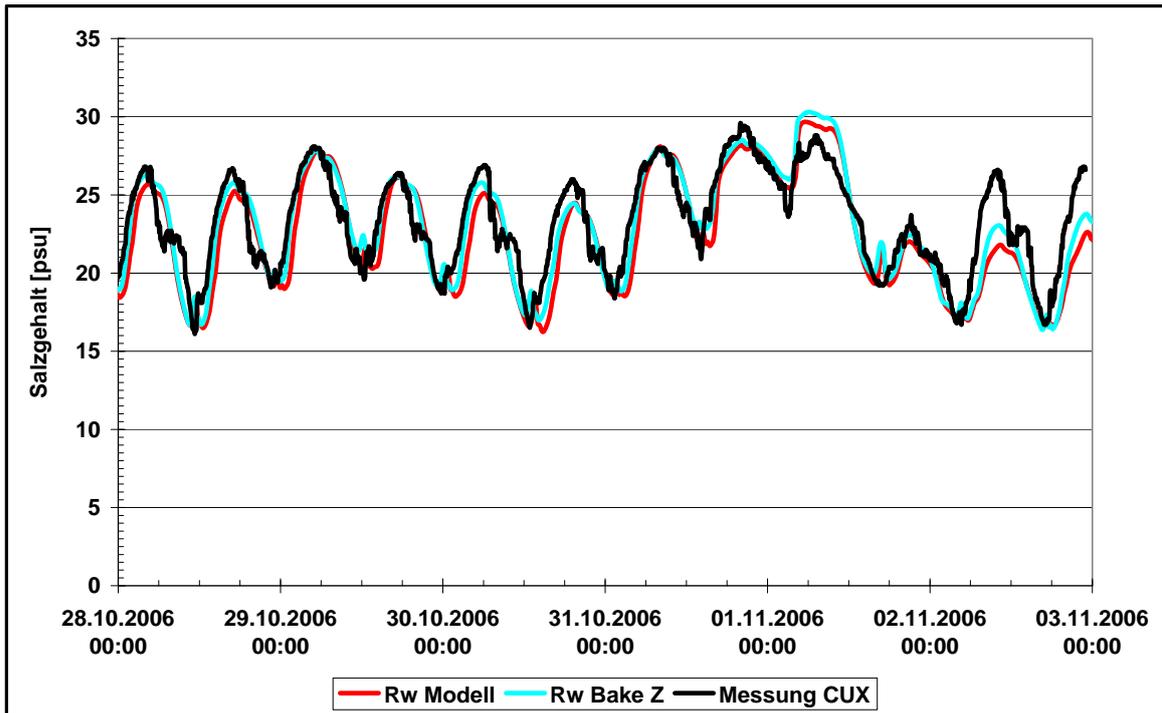


Bild 78: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

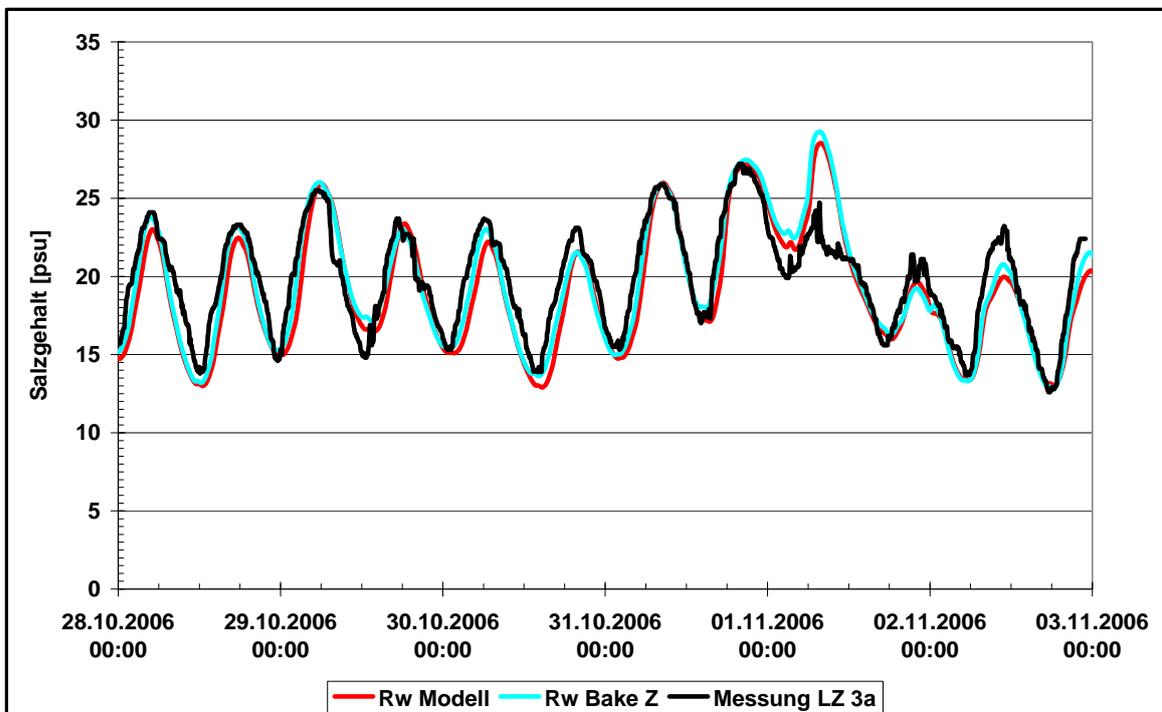


Bild 79: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3a. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

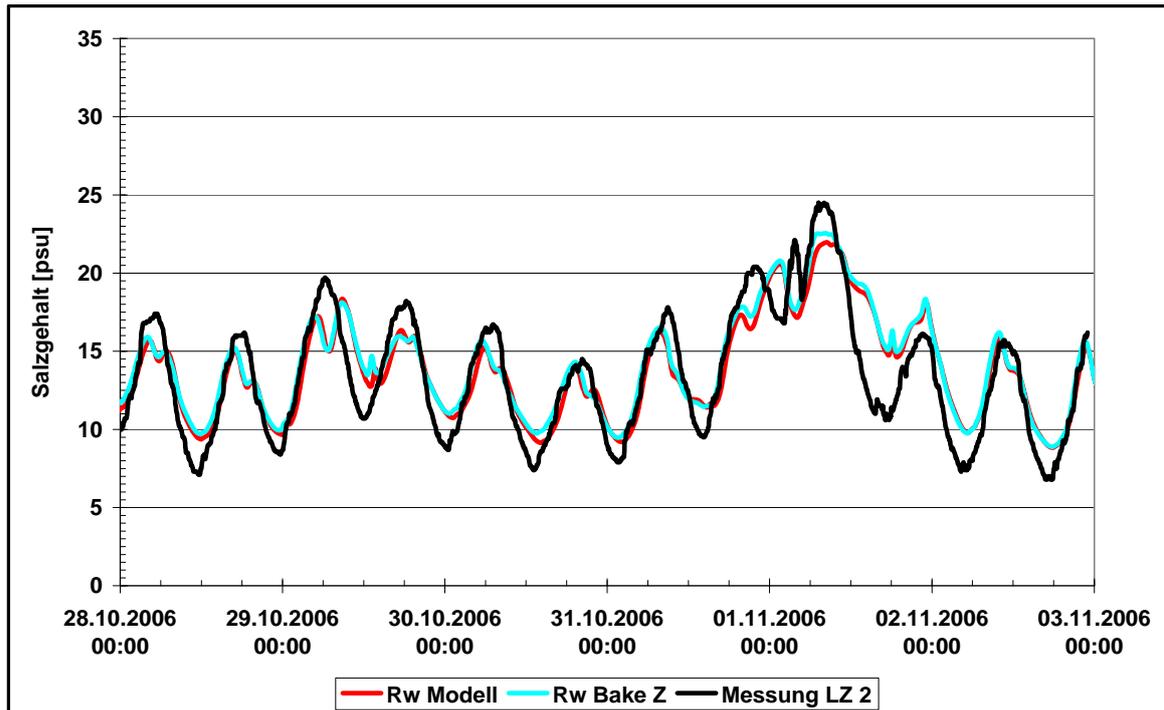


Bild 80: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

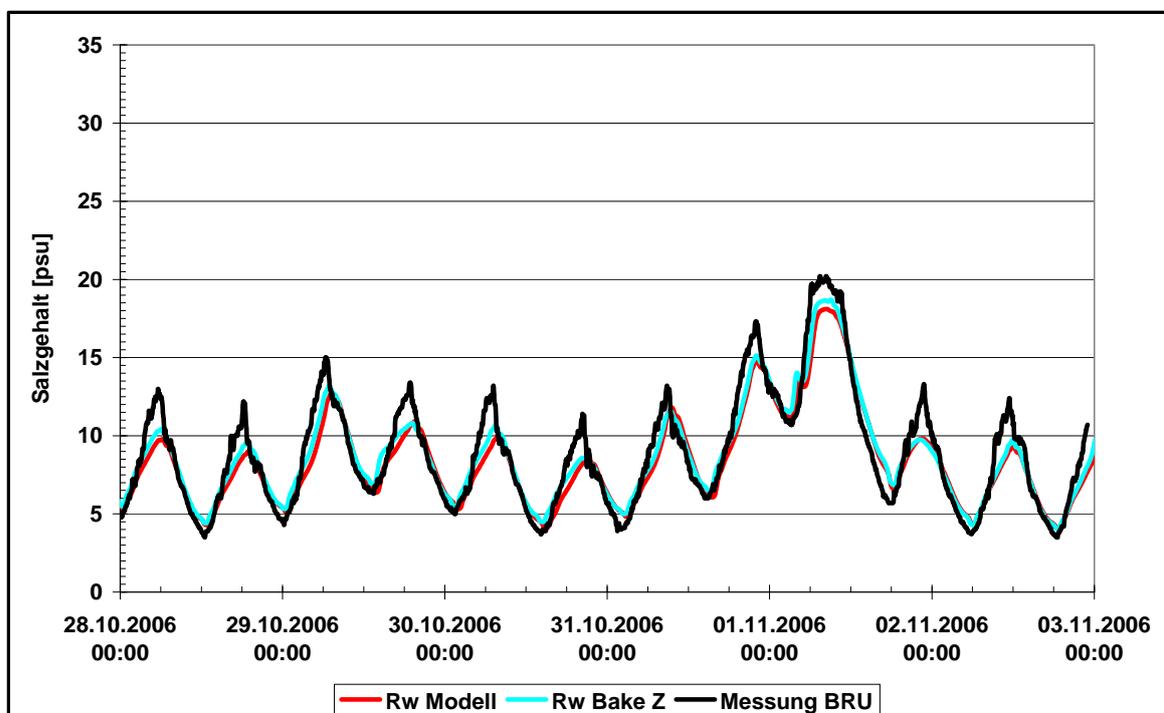


Bild 81: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Brunsbüttel. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

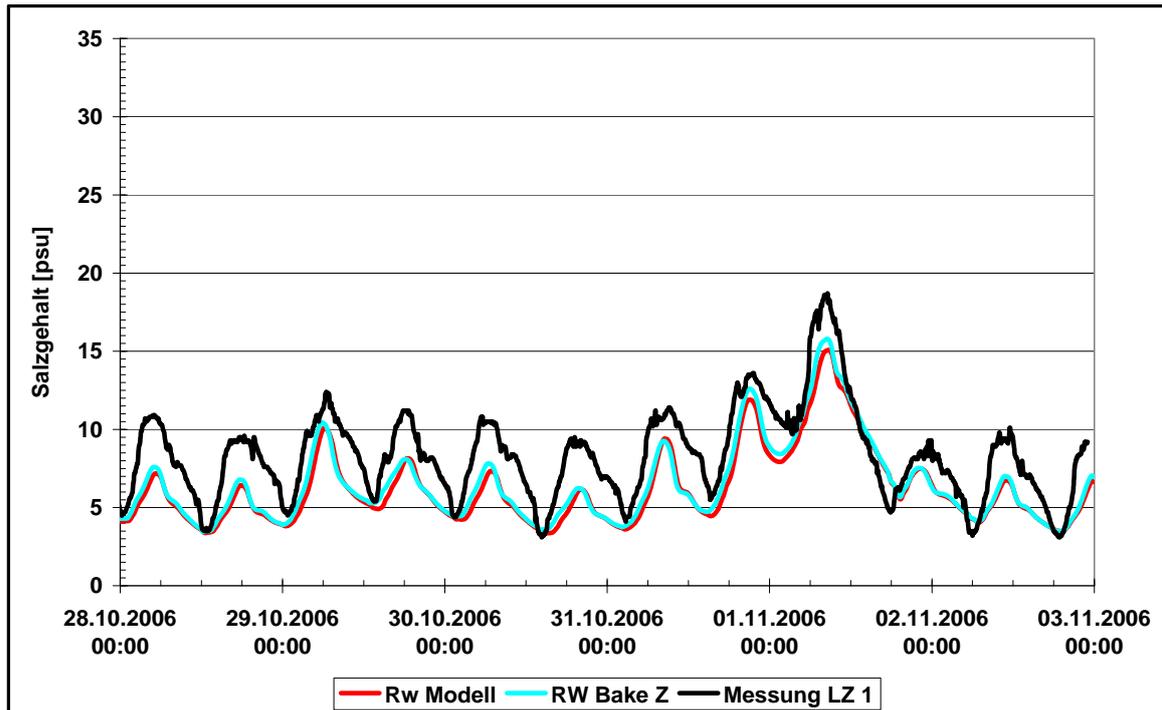


Bild 82: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Werte aus Messungen an der Bake Z abgeleitet (türkis) und Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

#### 4.6 Szenario 6

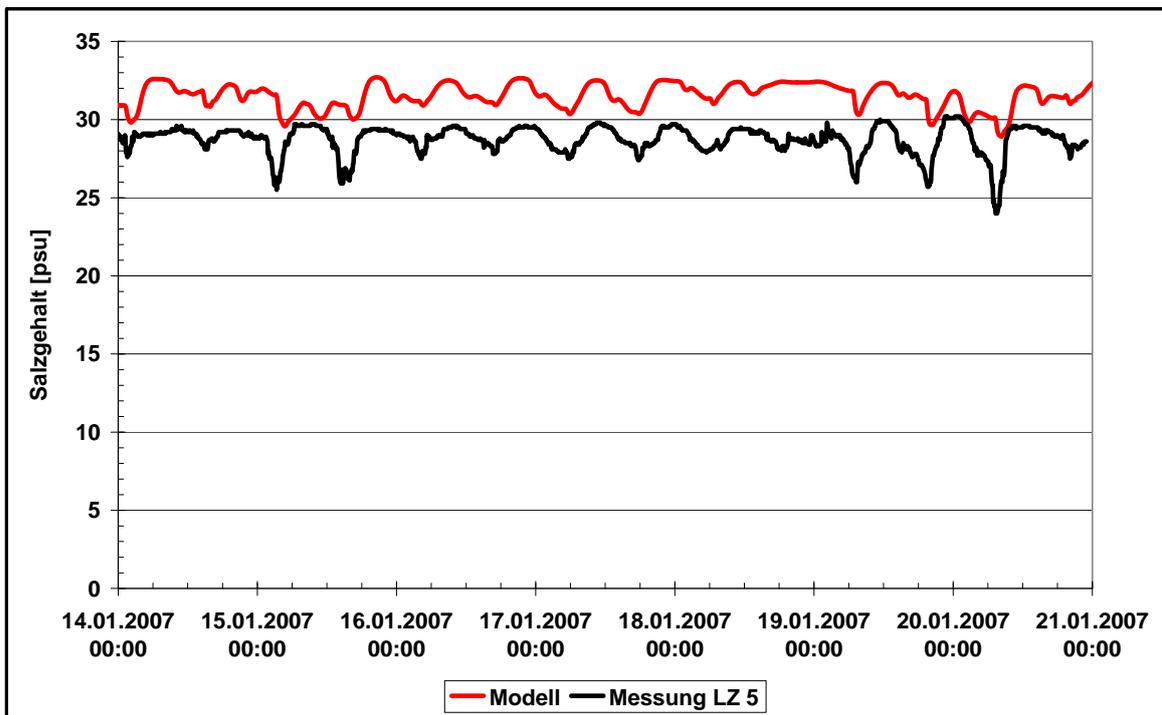


Bild 83: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ5. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

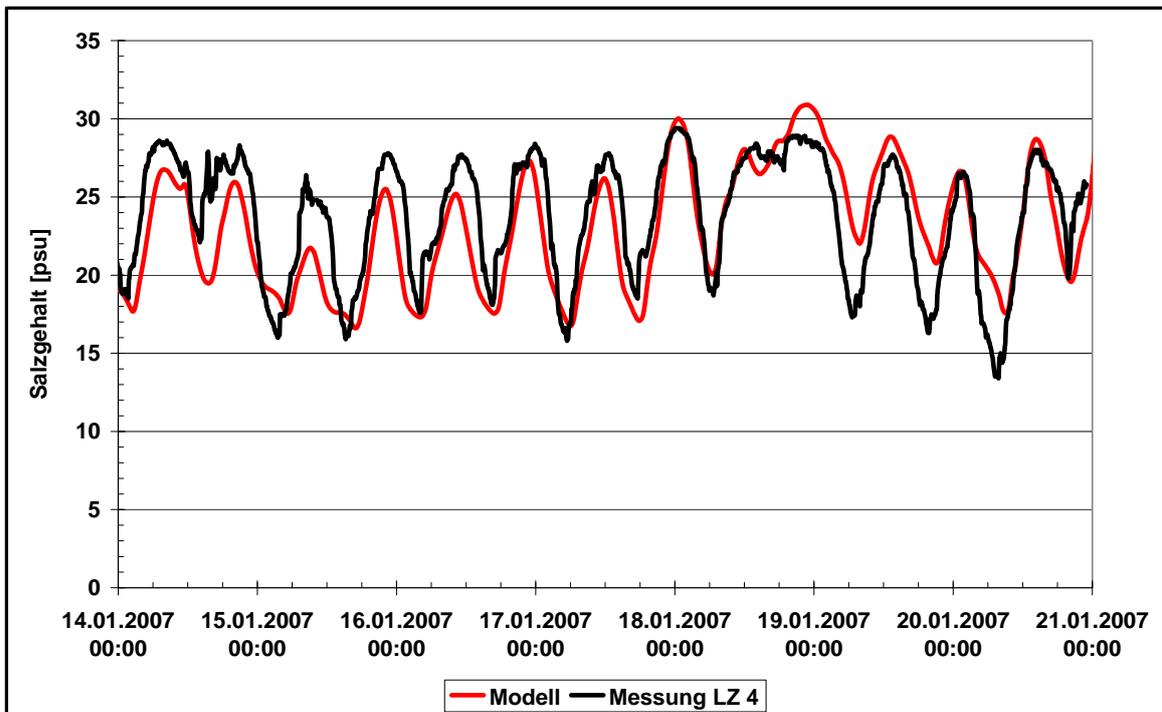


Bild 84: Gemessener (schwarz) und den modellierter Salzgehalt an der Station LZ4. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

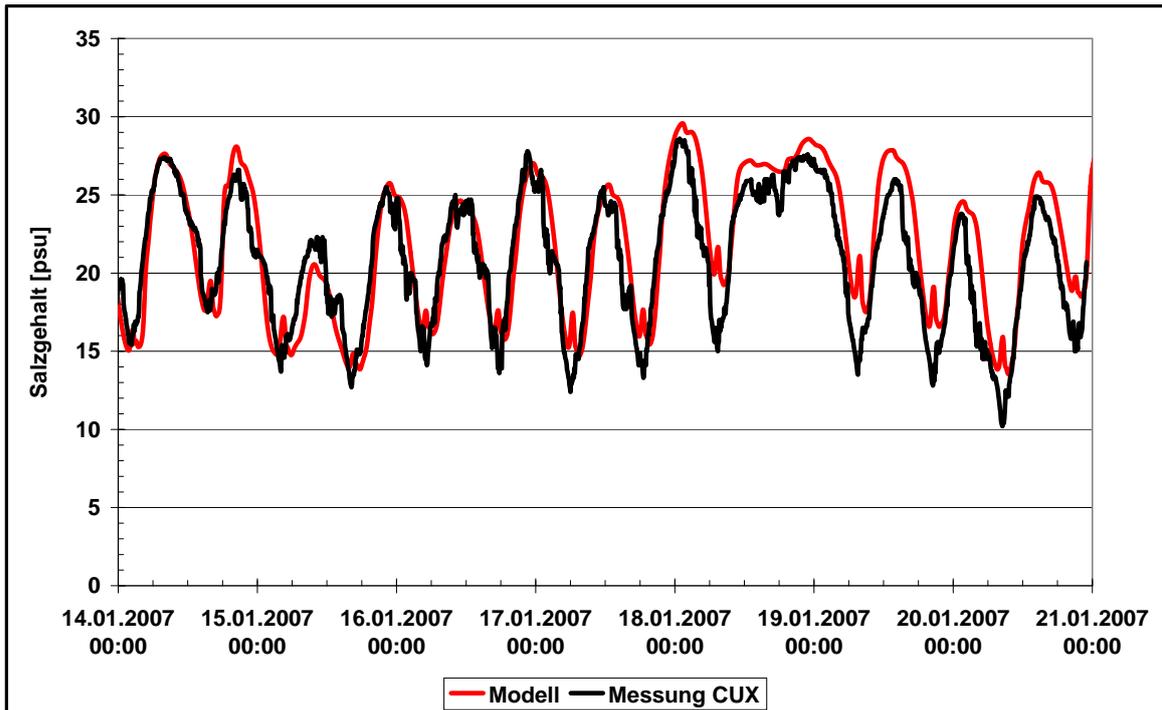


Bild 85: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Cuxhaven. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

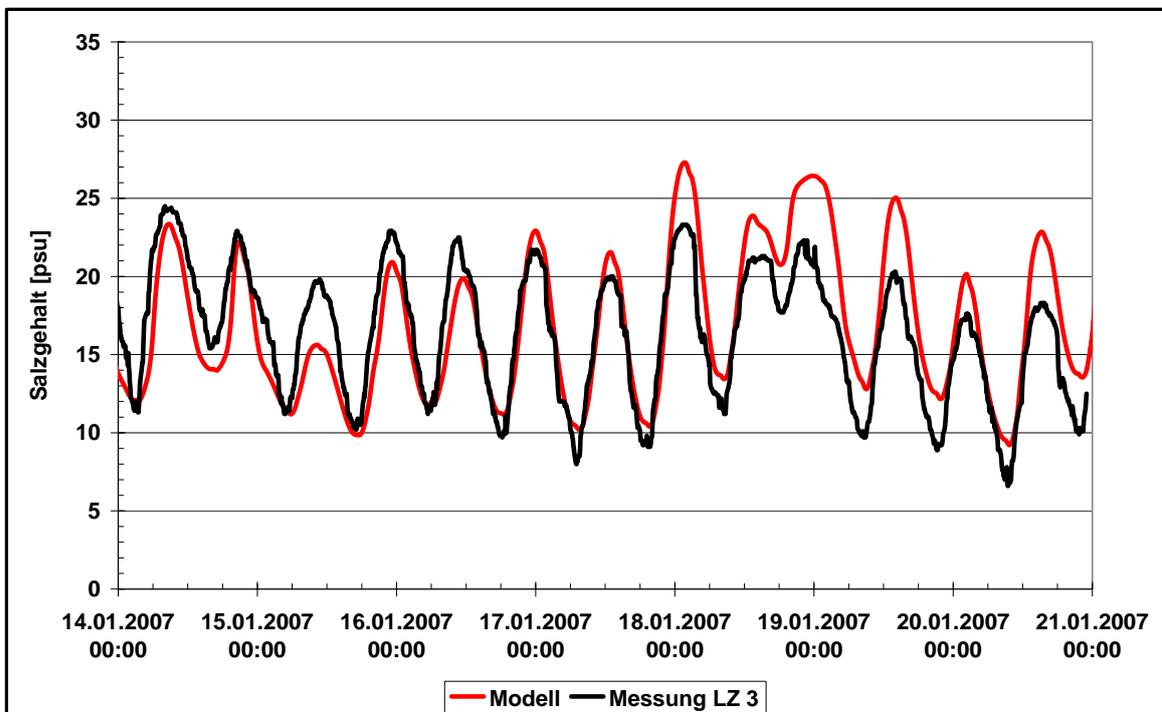


Bild 86: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ3. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

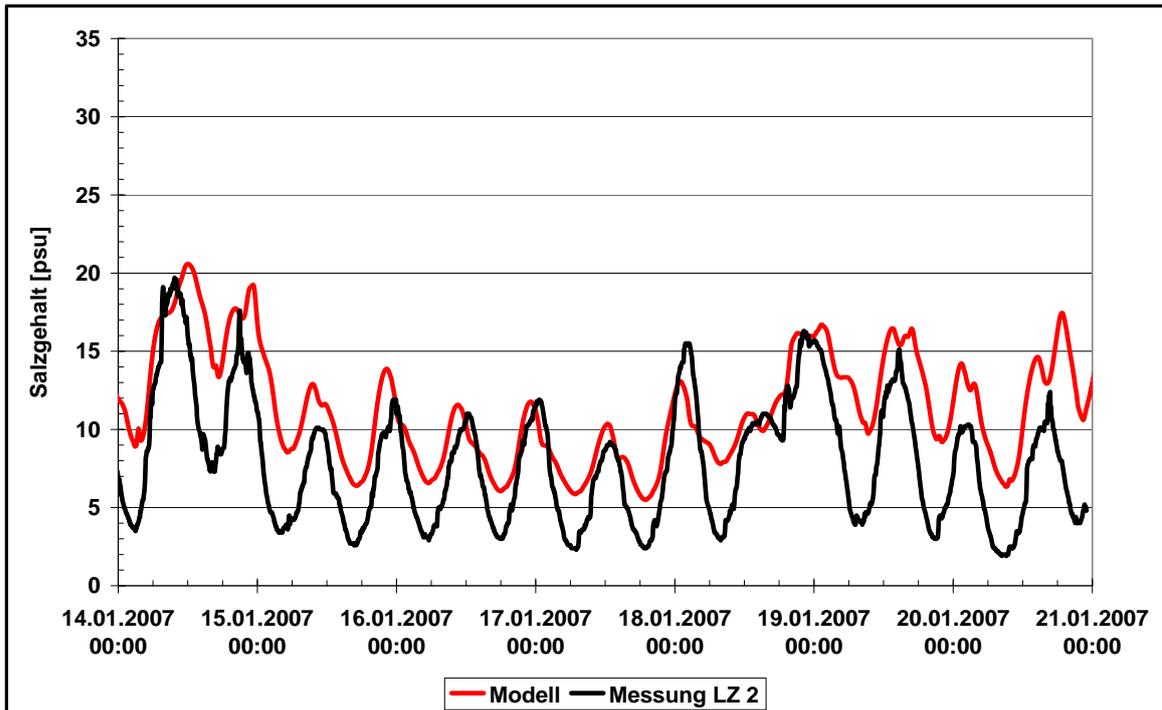


Bild 87: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ2. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

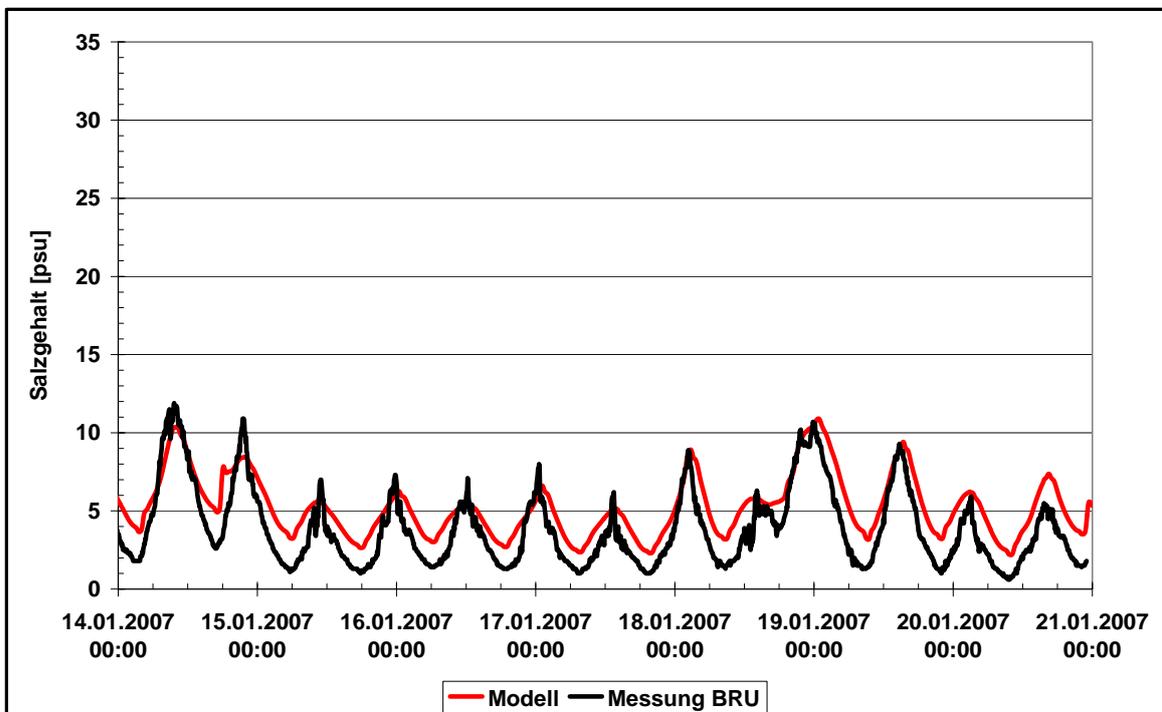


Bild 88: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station Brunsbüttel. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.

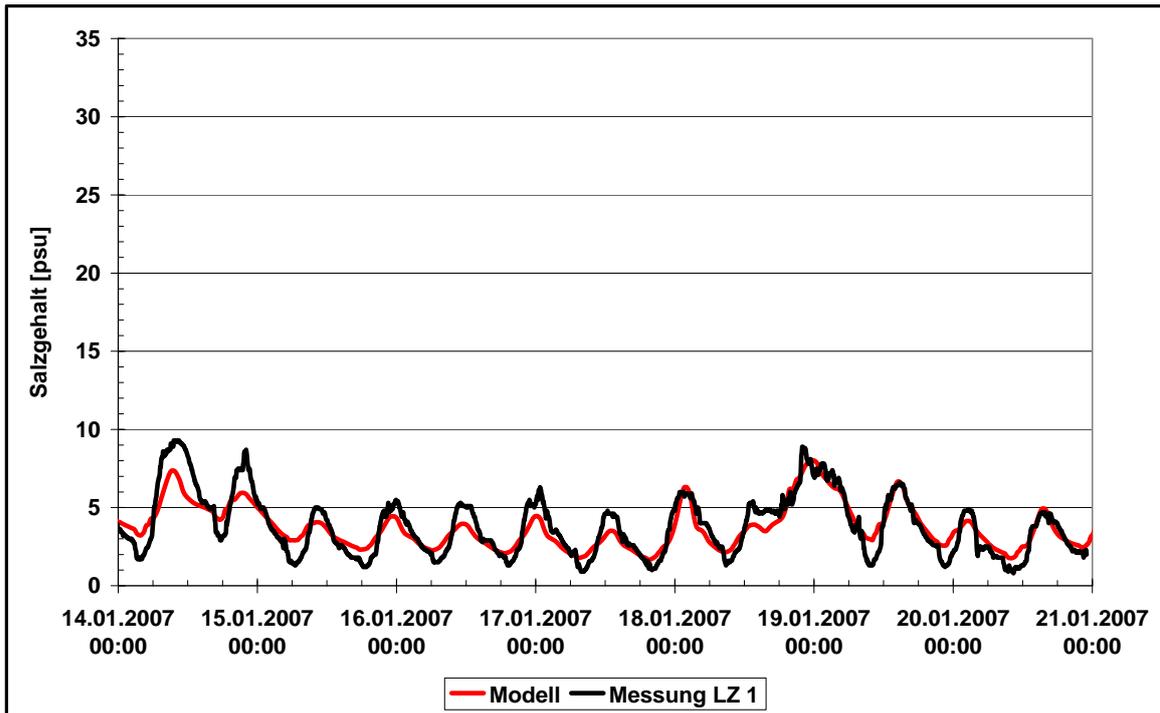


Bild 89: Gemessener (schwarz) und modellierter Salzgehalt an der Station LZ1. Für den Wasserstand am seeseitigen Rand wurden Randwerte aus dem BSHcmod (rot) verwendet.