

**Bundesanstalt für Wasserbau  
( B A W )**

**Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe  
Gutachten  
Ausbaubedingte Änderung der Tidedynamik**

Auftraggeber:

Wasser- und Schiffsamt Hamburg  
Moorweidenstraße 14, 20148 Hamburg

und

Freie und Hansestadt Hamburg, Strom und Hafenbau  
Dalmanstraße 1, 20457 Hamburg

Auftragsnummer: 9353 3387

Seitenzahl: 115

Aufgestellt von: Außenstelle Küste  
Referat: K3 Bearbeiter: Dipl.-Ozeanograph Marcus J. Boehlich  
Dr.-Ing. Peter Ruland

Hamburg, im Oktober 1996

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

## Inhalt

<b>VORWORT</b>	<b>1</b>
<b>1 EINLEITUNG - VERANLASSUNG</b>	<b>2</b>
1.1 Grundsätzliche physikalische Veränderungsmerkmale des Ausbaus	4
1.2 Informationssystem Elbe-CD	5
<b>2 MODELLTECHNIK</b>	<b>7</b>
2.1 Übersicht über das Modell	7
2.1.1 Leistungsmerkmale	7
2.1.2 Entwicklungsgeschichte	8
2.1.3 Pre- und Postprozessoren	8
2.2 Physikalisches System	9
2.2.1 Physikalische Prozesse	10
2.3 Konzeptionelles Modell	11
2.3.1 Mathematische Formulierung	12
2.3.2 Annahmen und Näherungen	15
2.4 Algorithmische Implementierung	18
2.4.1 Annahmen und Näherungen	18
2.5 Wasserbauliche Systemanalyse	22
2.5.1 Bedeutung der Annahmen und Näherungen für die wasserbauliche Systemanalyse	22
2.5.1.1 Zeitliche Mittelung zur Parametrisierung der Turbulenz	22
2.5.1.2 Parametrisierung der turbulenten Spannungen nach dem Wirbelviskositätsprinzip	23
2.5.1.3 Vertikale Integration	24
2.5.1.4 Räumliche Diskretisierung	24
2.5.1.5 Boden- und Windreibung	25
2.5.1.6 Bemerkungen	25
2.5.2 Genauigkeit der Berechnungsergebnisse	26
<b>3. VERIFIKATION</b>	<b>28</b>
3.1. Topographie des IST-Zustands	28
3.1.1. Morphologie	28
3.1.2. Küstenlinie	30
3.1.3. Strombauwerke	30
3.1.4. Kartennull-Bezug im Untersuchungsgebiet	30
3.1.5. Gitternetzgenerierung	31
3.1.5.1 Das Finite Differenzen Gitter	31
3.1.6. Graphische Darstellungen	33
3.2. Hydrologische Situation	34
3.3. Meßkampagne	39
3.3.1. Pegelstationen	39

---

3.3.2. Zeitweilig verankerte Meßgeräte	39
3.3.2.1. Pegel	40
3.3.2.2. Strömungsmeßgeräte	41
3.3.2.3. Leitfähigkeitsmeßgeräte	43
<b>3.4. Steuerung des mathematischen Tidemodells</b>	<b>44</b>
3.4.1. Randwerte am seeseitigen Modellrand	44
3.4.2. Randwerte am Wehr Geesthacht	46
3.4.3. Koeffizienten und Parameter	46
<b>3.5 Ergebnisse</b>	<b>47</b>
3.5.1. Genauigkeit von Naturmessungen	47
3.5.2. Vergleich von Meßdaten mit Rechenergebnissen	50
3.5.3. Wasserstände	50
3.5.4. Strömungsgeschwindigkeiten an den Meßstationen	53
3.5.5. Salzgehalt an den Leitfähigkeitsmeßstellen	57
<b>3.6. Zusammenfassung der Verifikation</b>	<b>60</b>
3.6.1. Beurteilung der Ergebnisse	60
3.6.2. Schlußfolgerungen	64
<b>4 AUSBAUVARIANTE</b>	<b>66</b>
4.1 Ausbauplanung	66
<b>5 TOPOGRAPHIE</b>	<b>68</b>
5.1 Morphologischer Nachlauf	68
5.2 Einarbeitung des Ausbaus und des morphologischen Nachlaufs in die Topographie des IST-Zustands	69
<b>6. TIDEDYNAMIKSZENARIOS</b>	<b>71</b>
6.1. Szenario "Hoher Oberwasserzufluß" (Qh)	72
6.1.1. Oberwasserzufluß	72
6.1.2. Tidewasserstände und Tidehub	72
6.1.3. Salzgehalte	72
6.2. Szenario "Mittlerer Oberwasserzufluß" (Qm)	76
6.2.1. Oberwasserzufluß	76
6.2.2. Tidewasserstände und Tidehub	76
6.2.3. Salzgehalte	76
6.3. Szenario "Niedriger Oberwasserzufluß" (Ql)	79
6.3.1. Oberwasserzufluß	79
6.3.2. Tidewasserstände und Tidehub	79
6.3.3. Salzgehalte	79
6.4. Szenario "Niedriger Oberwasserzufluß mit starkem Ostwind" (Qlw)	81
6.4.1. Oberwasserzufluß	81
6.4.2. Tidewasserstände und Tidehub	81
6.4.3. Salzgehalte	82

---

<b>7 ERGEBNISSE</b>	<b>86</b>
<b>7.1 Berechnung abgeleiteter Größen</b>	<b>87</b>
<b>7.2 Wasserstandskenngrößen</b>	<b>91</b>
7.2.1 Tidehoch- und Tideniedrigwasser, Tidehub	91
7.2.2 Ausbreitung der Tidewelle	93
7.2.2.1 Laufzeiten der Tidescheitel	93
7.2.2.2 Flut- und Ebbedauern	94
7.2.2.3 Überflutungsdauern, Wattgebietsgrößen und Flachwassergrößen	95
<b>7.3 Strömungskenngrößen</b>	<b>97</b>
7.3.1 Synoptische Strömungsfelder	97
7.3.2 Abgeleitete Größen	98
7.3.2.1 Mittlere und Maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit	98
7.3.2.2 Flut- und Ebbestromdauer	99
7.3.2.3 Reststrom und Eulersche Wege	99
7.3.2.4 Tidevolumen und Durchflüsse	100
7.3.2.5 Aufenthaltszeiten und Ausbreitungsverhalten von Wasserkörpern	102
<b>7.4 Salzgehalt</b>	<b>102</b>
7.4.1 Synoptischer Salzgehalt	103
7.4.2 Minimaler und maximaler Salzgehalt - Salzgehaltsvariation	104
<b>7.5 Geschiebetransport</b>	<b>105</b>
7.5.1 Voraussetzungen und Annahmen	105
7.5.2 Synoptische Geschiebetransportkapazitäten	106
7.5.3 Flut- und Ebbestromgeschiebefracht - residuelle Geschiebetransportkapazität	107
<b>8 PROGNOSE</b>	<b>109</b>
<b>9 ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>111</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>112</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wasserspiegelauslenkung $\eta$ , der bathymetrischen Tiefe $z_b$ (Sohllage) und der Wassertiefe $H$ .	12
Abb. 2.2: Lage der Berechnungspunkte im FD-Gitter Lage der Berechnungspunkte der Gitterzelle $(i, j)$ in einem Arakawa C-Gitternetz. Die Positionen der Gitterpunkte zur Berechnung der Komponenten $(U, V)$ der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit sind um jeweils eine halbe Gitterweite gegenüber der Position des Punktes zur Berechnung der Wasserspiegelauslenkung $\eta$ verschoben.	19
Abb. 3.1: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung im Simulationszeitraum und im ganzen Jahr 1992 in 45° breiten Sektoren	35
Abb. 3.2: Windgeschwindigkeit und -richtung während des Simualtionszeitraums	36
Abb. 3.3: Tidehub entlang der Kilometrierung der Elbe während des Simulationszeitraums um 10-Jahresmittelwert 1982/91	36
Abb. 3.4: Hoch- und Niedrigwasser entlang der Kilometrierung der Elbe während des Simulationszeitraums und 10-Jahresmittelwert 1982/91	37
Abb. 3.5: Entwicklung des MTnw und MThw 1960 bis 1993 am Pegel St. Pauli (Quelle: Daten Pegel St. Pauli)	37
Abb. 3.6: Salzgehaltsverteilung entlang der Kilometrierung der Elbe während des Simulationszeitraum	38
Abb. 3.7: Häufigkeit des Abflusses an der Meßstelle Neu Darchau 1992	38
Abb. 3.8: Positionen der während ELBEX '92 Phase I zeitweiligim Bereich Außen- und Untereibe ausgebrachten Meßgeräte	43
Abb. 3.9: Oberwasserzufluß in Neu Darchau im Jahre 1992	46
Abb. 4.1 Längsschnitt Unter- und Außenelbe entlang der Fahrrinnenachse mit den Lagen der heutigen und zukünftigen Sollsohle	67
Abb. 5.1 Konstruktion der seitlichen Böschungen bei dem Einbau der neuen Trasse in die IST-Topographie	69
Abb. 6.1 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngrößen mit gemittelten Meßwerten bei hohem Oberwasserzufluß	73
Abb. 6.2: Vergleich der berechneten mit Tidhübe mit gemittelten Meßwerten bei hohem Oberwasserzufluß	74
Abb. 6.3: Vergleich der Variation innerhalb eines Spring-Nipp-Zyklus der Tidehochwasserstände für die vier untersuchten Lastfälle, hohes, mittleres und niedriges Oberwasser sowie niedriges Oberwasser mit Ostwind.	74
Abb. 6.4 Vergleich der Variation innerhalb eines Spring-Nipp-Zyklus der Tideniedrigwasserstände für die vier untersuchten Lastfälle, hohes, mittleres und niedriges Oberwasser sowie niedriges Oberwasser mit Ostwind.	75
Abb. 6.5 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minmalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei hohem Oberwasserzufluß.	75
Abb. 6.6 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngrößen mit gemittelten Meßwerten bei mittlerem Oberwasserzufluß	77
Abb. 6.7 Vergleich der berechneten mit Tidhübe mit gemittelten Meßwerten bei mittlerem Oberwasserzufluß	78
Abb. 6.8 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minmalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei mittlerem Oberwasserzufluß.	78
Abb. 6.9 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngrößen mit mittleren Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß	80
Abb. 6.10 Vergleich der berechneten mit Tidhübe mit gemittelten Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß	80

---

Abb. 6.11 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minimalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei niedrigem Oberwasserzufluß.	81
Abb. 6.12 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngrößen mit mittleren Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß mit Ostwind	83
Abb. 6.13 Vergleich der berechneten mit Tidehöhe mit gemittelten Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß mit Ostwind.	83
Abb. 6.14 Windstärke und Windrichtung bei Schhörn während des Lastfalls niedriges Oberwasser mit Ostwind.	84
Abb. 6.15 Vergleich vorausberechneter (gemäß Gezeitentabelle BSH) und eingetretener Tidewasserstände bei niedrigem Oberwasser mit Ostwind.	84
Abb. 6.16 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minimalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei niedrigem Oberwasserzufluß mit Ostwind.	85
Abb. 7.1: Wirkung der ausbaubedingten Phasenverschiebung der Tidewelle auf die Strömungsgeschwindigkeiten bei (theoretisch) unverändertem Tidehub.	88
Abb. 7.2: Schematische Darstellung der Relationen zwischen verschiedenen Zeitpunkten, die das Tidegeschehen charakterisieren.	89
Abb. 7.3: Definitionsskizzen zu den Zeitphasen einer Tide (DIN 4049)	90
Abb. 8.1 Prognosewerte der ausbaubedingten Veränderungen der Tidewasserstände.	110

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1 Liste der Pegel (mit Kurzbezeichnungen), welche für die Verifikation und die Steuerung des Elbe Modells herangezogen wurden	40
Tab. 3.2: Liste der Rohrpegel mit Kurzbezeichnungen und Positionsangaben	41
Tab. 3.3: Liste der während der Meßkampagne ELBEX '92 Phase I eingesetzten Strömungsmeßgeräte mit Kurzbezeichnungen und Positionsangaben.	42
Tab. 3.4: Liste der während der Meßkampagne ELBEX '92 Phase I benutzten Leitfähigkeits- und Temperaturmeßgeräte mit Kurzbezeichnungen und Positionsangaben	44
Tab. 3.5: Zusammenstellung wesentlicher Parameter und Koeffizienten für die mit dem hydro-numerischen Verfahren <i>TRIM-2D</i> durchgeführten Simulationsrechnungen.	46
Tab. 3.6: Zusammenstellung ausgewählter Tidekennwerte des Tidehoch- und -niedrigwassers für die Pegel entlang der Elbe. Simulationsrechnung: SN	52
Tab. 3.7 Zusammenstellung der Differenz zwischen Messung und Rechnung der Eintrittszeiten von Tidehoch- und -niedrigwasser für die Pegel entlang der Elbe. Simulationsrechnung: SN	53
Tab. 3.8 Zusammenstellung der Kennwerte des Tidhubs für die Pegel entlang der Elbe. Simulationsrechnung: SN	53
Tab. 3.9: Einige Strömungskennwerte: für Position 1.5, 2m und 6m über Grund; Position 1.7, 2m und 5 m über Grund; Position 2.2, 2 m und 7 m über Grund. Simulationsrechnung SN	55
Tab. 3.10: Einige Strömungskennwerte: für Position 2.4, 2m und 6m über Grund; Position 3.2, 2m über Grund; Position 4.2, 2 m und 6 m über Grund. Simulationsrechnung SN	56
Tab. 3.11: Einige Strömungskennwerte: für Position 5.3, 2 m und 7 m über Grund; Position 6.3, 2 m und 9 m über Grund; Position 6.4, 2 m und 4 m über Grund. Simulationsrechnung SN	57
Tab. 3.12: Einige Salzgehaltskennwerte: für Position 1.6, 2 m und 9 m über Grund; Position 1.7, 2 m über Grund; Position 2.2, 2 m über Grund; Position 2.4, 6 m über Grund; Position 5.3, 2 m über Grund; Position 5.4, 2 m über Grund; Position 6.5, 2 m über Grund. Simulationsrechnung: SN	59

## **Vorwort**

Im Rahmen der Bearbeitung dieses Gutachtens sind von vielen Stellen Informationen jeglicher Art (Pläne, digitale Daten, persönliche Gespräche, Ortsbesichtigungen, Literatur, etc.) gegeben worden. Dies waren unter anderem: Die Wasser- und Schifffahrtsämter Hamburg, Cuxhaven, Lauenburg und Tönning, das Amt für Strom und Hafengebäude der Freien und Hansestadt Hamburg und das Amt für Land und Wasserwirtschaft Heide. Dafür und für die vertrauensvolle Zusammenarbeit sei den Mitarbeitern dieser Institutionen gedankt. Besonderer Dank gebührt dem Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven, das die Meßkampagne ELBEX'92, Phase I durchgeführt hat. Geräte haben freundlicherweise das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, das Wasser und Schifffahrtsamt Hamburg und das Wasser und Schifffahrtsamt Bremerhaven, welches auch das Profil 1 betreut hat, ausgeliehen. Besonderer Dank gilt Herr Dipl.-Ing. Miessner vom Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven für die Betreuung der Messungen. Es ist ein qualitativ hochwertiger Datensatz zur Verifikation des mathematischen Tidemodells entstanden.



## 1 Einleitung - Veranlassung

Veranlassung ist die geplante Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt. Für diese Fahrrinnenanpassung ist nach dem Wasserstraßen-Staatsvertrag von 1921 und dem Zusatzvertrag von 1922 der Bund zuständig. In diesem Vertragswerk sichert das damalige Reich der Freien und Hansestadt Hamburg zu, die Fahrrinne der Unter- und Außenelbe so auszubauen, daß in der Regel die größten Seeschiffe Hamburg unter Ausnutzung des Hochwassers erreichen können.

Träger des Vorhabens sind

- die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, zuständig für die Bereiche des WSA Hamburg und des WSA Cuxhaven und
- die Freie und Hansestadt Hamburg, vertreten durch das Amt für Strom- und Hafenanbau, zuständig für Teile der Fahrrinne, die zum Hamburger Hafen gehören.

Im Rahmen der Planfeststellung ist für die Fahrrinnenanpassung nach dem Gesetz zur Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) eine Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) erforderlich, deren vorläufiger Untersuchungsrahmen (§5-Gespräch) im Bericht der „Planungsgruppe Ökologie + Umwelt, Hannover/Hamburg“ vom September 1993 dargestellt und mit Ergänzungen von den Planfeststellungsbehörden vorgegeben ist.

Zur Erstellung der UVU ist es Aufgabe der Bundesanstalt für Wasserbau, folgende Daten und Informationen über den IST-Zustand und über ausbaubedingte Veränderungen zu ermitteln, darzustellen und zu bewerten:

- Tidedynamik
- Sturmflutkenngößen
- Morphologie
- Seegangsbelastungen auf Ufer, Watten und Deiche
- Schiffserzeugte Belastungen (Schiffswellen und Strömungen)

Gegenstand dieses Gutachtens ist die vollständige Darstellung der Untersuchungen zur Tidedynamik. Dabei stützt sich das Gutachten im wesentlichen auf Analyseergebnisse, die mit dem mathematischen Tidemodell der Elbe berechnet wurden. Dieses Modell wurde für die Untersuchung der Fahrrinnenanpassung aufgebaut und betrieben. Ein Teil des vorliegenden Berichts befaßt sich deswegen mit

dem Modell und seiner Eignung, die Veränderung der Tidedynamik zu prognostizieren.

Die Veränderungen der Tidedynamik sind substantieller Bestandteil der UVU. Gleichzeitig sind sie vielfach auch als abiotische Systemfaktoren Eingangsgröße für andere Teile der UVU, da sie die ökologischen Rahmenbedingungen bestimmen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Sturmflutkenngößen sind in einem weiteren Bericht dargestellt. Die Beauftragung für diese beiden Gutachten erfolgte mit Schreiben vom 31.03.93 durch das WSA Hamburg und mit Schreiben vom 25.06.93 durch das Amt für Strom- und Hafenaubau.

Beide Berichte stützen sich in der graphischen Darstellung auf das Informationssystem „Elbe-CD“<sup>1</sup> ab. Eine CD liegt diesem Bericht bei. Für die Berichte Tide- und Sturmflutkenngößen existiert darüberhinaus eine Zusammenfassung, die ohne CD verständlich ist.

Die Untersuchungen zum Seegang, zu schiffserzeugten Belastungen und zur Morphologie sind in getrennten Berichten dokumentiert.

Dieser Bericht enthält im Kapitel 2 eine Beschreibung der Modelltechnik mit deren Hilfe ein grundlegendes Verständnis des gewählten Verfahrens wie auch der zugrunde liegenden Vereinfachungen (physikalisches Ersatzsystem) möglich ist. Kapitel 3 stellt die Ergebnisse der Verifikation des zweidimensional tiefengemittelten Modells der Elbe dar. Kapitel 4 und 5 beschreiben die Ausbauplanung sowie die daraus resultierende Erstellung der Ausbautopographie. Kapitel 6 enthält eine Darstellung der Oberwasser- und Windszenarios, die Randbedingung für die Untersuchung der ausbaubedingten Änderungen sind. Diese untersuchten Zustände werden in die hydrographische Situation der Elbe eingeordnet. Kapitel 7 beschreibt die Simulationsergebnisse bezüglich Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit, Salzgehalt und Transportkapazität.

Da ein Modell ein Ersatzsystem (siehe auch Kapitel 2) der sehr komplexen natürlichen physikalischen Prozesse ist, welches bestimmte Vereinfachungen enthält, sind in Kapitel 8 gerundete Prognosewerte für die ausbaubedingten Veränderungen aufgeführt.

---

<sup>1</sup> Zur Nutzung der CD ist mindestens ein 486 IBM-PC mit Microsoft Windows 3.x, SVGA-Graphikkarte mit 800x600 Pixeln, 256 Farben und einem Quad-Speed CD-ROM-Laufwerk erforderlich

## 1.1 Grundsätzliche physikalische Veränderungsmerkmale des Ausbaus

Die Tidedynamik in einem Ästuar wird durch die Topographie (Morphologie), die von See einschwingende Tidewelle mit ihren meteorologisch induzierten Veränderungen und den Oberwasserzufluß beeinflusst. Die damit einhergehenden Strömungsvorgänge treten in Wechselwirkung mit der Morphologie und bilden so die Grundlage für ständige Veränderungen. Wetterbedingte Sonderereignisse wie Sturmfluten spielen bei der Gestaltung der Morphologie ebenfalls eine große Rolle. Die Ausbildung von Strukturen (Rinnen, Inseln und Sandbänken) geschieht durch eine Wechselwirkung zwischen Strömungsbelastung und der Variabilität des anstehendem Sohlmaterial hinsichtlich seiner Transportierbarkeit durch die Strömung.

Der künstliche Eingriff durch wasserbauliche Maßnahmen überlagert die natürlichen Vorgänge. Es entsteht eine Interaktion zwischen beiden mit eigenständigen Auswirkungen. Grundsätzlich lassen sich aber folgende physikalische Wirkungsmerkmale identifizieren.

Durch Vertiefung entsteht eine Stärkung der Hauptrinne. Sie wird im Verhältnis zu den Nebenrinnen- und Flachwasserbereichen hydraulisch glatter, da die Wirkung der Sohlrauheit sich auf eine größere Tiefe verteilt. Die von See einschwingende Tidewelle unterliegt damit einer geringeren Dämpfung und Reflexion so daß mehr Tideenergie das Ästuar stromaufwärts gelangt. Daher rührt eine Zunahme des Tidehubs. Die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit unterliegt der Wechselwirkung zwischen einer Abnahme, die durch die Querschnittsaufweitung bedingt ist, und einer Zunahme, die sich aus dem größeren Tidevolumen ergibt (Tidehubzunahme). Über den Querschnitt betrachtet werden die Strömungsgeschwindigkeiten in der Hauptrinne gestärkt und in den Nebenbereichen geschwächt. Durch die größeren Wassertiefen vergrößert sich die Tidewellengeschwindigkeit, es verändern sich die Laufzeiten der Hochwasser- und Niedrigwasserscheitel.

Die grundlegenden physikalischen Prozesse,

- die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle,
- die Dämpfung der Tidewelle durch Energiedissipation aufgrund von Reibung im Ästuar,
- die Reflexion der Tidewelle durch die topographische Form des Ästuars und
- die Veränderung der Topographie durch die Strömung

bilden komplexe, nichtlineare Wechselwirkungen zu denen noch weitere Phänomene hinzukommen.

Die Wirkung von Ausbaumaßnahmen kann daher nicht aus bisherigen Ausbauten durch lineare Extrapolation abgeschätzt werden. Im Interesse einer möglichst genauen Quantifizierung ist dafür ein Modell erforderlich, welches die maßgeblichen physikalischen Prozesse berücksichtigt und die Wechselwirkungen nachbilden kann. Dieses Modell wird nachfolgend genauer beschrieben.

## 1.2 Informationssystem Elbe-CD

Ein grundsätzliches Problem moderner Informationsverarbeitung mittels numerischer Berechnungsverfahren ist die Übermittlung der dabei gewonnen Informationen. Letztendlich geschieht der Umgang mit dem Computer mittels Zahlen und es bedarf eines geeigneten Mediums, um die Fülle des Zahlenmaterials zugänglich zu machen. Bei Berechnungen zur Strömungsmechanik in einem Ästuar geschieht dies durch geeignete graphische Visualisierung der Eingangs- und Ausgangsdaten des Modells. Die Computergraphik und auch weitergehende Medien wie Animationen durch Ton und Video, sind daher Mittler zwischen dem Modell und seinen Nutzern. Nur durch geeignete graphische Visualisierungsmöglichkeiten der physikalischen Größen, die durch das Modell beschrieben werden, ist eine Kontrolle und Analyse der Simulationen möglich.<sup>2</sup>

Dabei ist die Visualisierung nicht nur für die direkten Nutzer, also in diesem Falle die Mitarbeiter der BAW, von entscheidender Wichtigkeit, sondern sie wird auch benötigt, um die Informationen anderen Gruppen, die am Projekt beteiligt oder interessiert sind, zu erklären.

Für das vorliegende Gutachten wurden etwa 4000 Graphiken teilweise mehrfach erzeugt und analysiert. Um die ausbaubedingten Veränderungen der Tidedynamik darzustellen und zu plausibilisieren sind etwa 2000 (Farb-) Graphiken notwendig. In Papierform würde die Erstellung und Verbreitung eines solchen Gutachtens erhebliche Kosten verursachen. Weiterhin ist es natürlich schwierig, bei 2000 Graphiken Übersicht zu behalten.

Dieses Problem wird mit Hilfe von Multi-Media Techniken gelöst. Dabei werden die Graphiken in eine Benutzeroberfläche eingebettet, die durch eine Multi-Media-Basis-Software programmiert ist. Die Benutzeroberfläche erlaubt das "Navigieren" durch die Graphiken und erleichtert so das Auffinden und Analysieren von Informationen. Aus einer wenig geordneten Sammlung von Computergraphiken wird so ein strukturiertes Informationssystem.

---

<sup>2</sup> Zur Bedeutung von Werkzeugen der Computerwissenschaften (Numerik, Computergraphik und -animation) im Wasserbau gibt es folgende interessante Literatur: Abbott, M. B., 1991, Hydroinformatics - Informationstechnology and the aquatic environment, Avebury Technical, Aldershot, England

Gleichzeitig ermöglicht die Verwendung einer Standard-Multi-Media-Software die Verbreitung des Informationssystems auf CD-ROM Datenträgern, die äußerst kostengünstig herzustellen sind. Das Informationssystem, welches integraler Bestandteil dieses Gutachtens ist, wird deswegen im weiteren auch kurz mit "Elbe-CD" bezeichnet.

## 2 Modelltechnik

In diesem Kapitel wird das verwendete Modell in einer sehr gestrafften Form beschrieben mit dem Ziel, die Eignung für die Untersuchung der ausbaubedingten Veränderungen darzustellen.

Dabei setzt die Darstellung grundlegende Kenntnisse der Strömungsmechanik voraus. Eine gute Einführung in die Strömungsmechanik findet sich z. B. in BOLLRICH & PREIßLER, 1992, Kap. 1-4. Die Ableitung der Flachwassergleichungen und vertikale Integration der Strömungsgleichungen ist z. B. bei KUIPERS & VREUGDENHIL, 1973 gut dargestellt.

### 2.1 Übersicht über das Modell

Dieses einführende Kapitel enthält einige wenige Angaben zu dem hydronumerischen Verfahren TRIM-2D (HN-Verfahren TRIM-2D). Hierbei wird die zu dem HN-Verfahren TRIM-2D vorhandene Software vorgestellt. Ferner werden die Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Komponenten erläutert.

#### 2.1.1 Leistungsmerkmale

Die wesentliche Aufgabe des auf der Methode der Finiten Differenzen basierenden HN-Verfahrens TRIM-2D besteht in der numerischen Lösung verschiedener über die Wassertiefe integrierter nichtlinearer Differentialgleichungen, welche den zeitabhängigen tiefengemittelten Transport folgender Erhaltungsgrößen in einem Gewässer mit freier Oberfläche beschreiben:

- Wassermasse
- Strömungsimpuls
- Salz
- Schwebstoff
- Geschiebe

Die für die Beschreibung benutzten Differentialgleichungen sind dabei Ausdruck grundlegender Erhaltungssätze der Physik (Massenerhaltung, Impulserhaltung, etc.). Als Lösung aus diesen Gleichungen erhält man die nachstehend aufgeführten physikalischen Größen, nämlich die

- Wasserspiegelauslenkung  $\eta$  bezüglich Normal Null, die

- Komponenten ( $U$ ,  $V$ ) der über die Wassertiefe gemittelten horizontalen Strömungsgeschwindigkeit, den
- über die Wassertiefe gemittelten Salzgehalt  $S$ , die
- über die Wassertiefe gemittelte Schwebstoffkonzentration  $C^3$ , den
- Schwebstoffvorrat  $B$  an der Gewässersohle, sowie die
- Komponenten ( $q_x^t$ ,  $q_y^t$ ) des sohlernen Geschiebetransportes und den
- Geschiebevorrat  $L$  an der Sohle.

Die Berechnungsmodule der vorgenannten Größen bilden den zentralen Kern des mathematischen Verfahrens TRIM-2D, wobei die Module für den Salz-, Schwebstoff- und Geschiebetransport wahlweise aktiviert oder deaktiviert werden können. Unbedingt erforderlich ist in jedem Fall die Berechnung der Wasserspiegelaußenlenkung  $\eta$  sowie der tiefengemittelten Horizontalgeschwindigkeit ( $U$ ,  $V$ ).

Der FORTRAN-Code der rechenzeitintensiven zentralen Module des mathematischen Verfahrens TRIM-2D kann effizient auf Supercomputern mit parallel arbeitenden Vektor CPUs und gemeinsam genutztem Hauptspeicher ausgeführt werden. Gleichwohl ist TRIM-2D ebenso für den Einsatz auf Workstations mit nur einer skalaren CPU geeignet.

### 2.1.2 Entwicklungsgeschichte

Die Grundversion des mathematischen Verfahrens TRIM-2D ist das Resultat einer Gemeinschaftsentwicklung mehrerer (Casulli, 1990 sowie Cheng et al., 1993). Im Rahmen einer wissenschaftlichen Kooperation mit Prof. Casulli und Prof. Cheng wurde das HN-Verfahren TRIM-2D im Laufe des Jahres 1994 von der BAW-AK übernommen und an schon vorhandene Softwarebausteine und Datenschnittstellen angepaßt. Im Anschluß daran wurden bei der BAW-AK umfangreiche Arbeiten zur Verbesserung des Programms (Vektorisierung und Parallelisierung) sowie zur Erweiterung der physikalischen Funktionalität der Software geleistet (Schwebstofftransport und Geschiebetransport). Seit November 1994 wird TRIM-2D bei der BAW-AK intensiv und erfolgreich im Rahmen verschiedener Projekte und Forschungsarbeiten eingesetzt.

### 2.1.3 Pre- und Postprozessoren

Neben dem eigentlichen (Berechnungs-) Kern gehören zu dem HN-Verfahren TRIM-2D eine Vielzahl von Pre- und Postprozessoren. Deren Verfügbarkeit ist für

---

<sup>3</sup> Bei dieser Beschreibung wird der Schwebstoff als zusätzliche physikalische Größe der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Im Rahmen der Untersuchung zur Fahrrinnenanpassung wurden mit diesem Teilmodul des Verfahrens TRIM-2D keine Simulationen durchgeführt.

den ordnungsgemäßen Betrieb von TRIM-2D unverzichtbar, da sie einerseits wesentliche Daten für eine mit TRIM-2D durchgeführte Simulation vorbereiten und andererseits helfen, die von TRIM-2D erzeugten Ergebnisse zu analysieren und zu visualisieren. Eine Beschreibung dieser Module ist nicht Bestandteil dieses Berichts.

## 2.2 Physikalisches System

Das Ziel dieser Beschreibung liegt darin, die theoretischen und zum Teil auch numerischen Grundlagen des HN-Verfahrens TRIM-2D zu erläutern. Hierzu werden zunächst die bei der Vereinfachung der Differentialgleichungen getroffenen Annahmen vorgestellt. Ferner werden ihre möglichen Konsequenzen für die Anwendbarkeit des Modells diskutiert (konzeptionelles Modell).

Zunächst einmal wird dargestellt, was und nicht wie das beschriebene System modelliert wird. Bei dem mathematischen Verfahren TRIM-2D handelt es sich um ein abstraktes Modell des nachfolgend charakterisierten nichtlinearen zeitabhängigen physikalischen Systems:

- homogener Wasserkörper mit freier Oberfläche bei voll entwickelter turbulenter Strömung unter Berücksichtigung
  - der Massenerhaltung,
  - der Fortpflanzung von langen Oberflächenwellen,
  - des advektiven Impulstransports, der
  - turbulenten Diffusion des Strömungsimpulses,
  - der Coriolisbeschleunigung,
  - der horizontalen Gradienten der Dichte des Wassers,
  - von Energieverlusten durch Bodenreibung (Bodenschubspannung),
  - des Energieeintrages durch den Wind (Windschubspannung), sowie
  - der zeitvariablen Höhenlage von Sohlschwellen (überströmte Wehre).
- Transport von gelösten Substanzen (Salz) oder suspendierten Sedimenten (Schwebstoffen) im Wasserkörper unter Berücksichtigung
  - der Advektion durch die Strömung,
  - der turbulenten Diffusion, sowie
  - der turbulenzabhängigen Sinkgeschwindigkeit der suspendierten Schwebstoffe.
- Austausch von suspendierten Sedimenten mit dem Bodensediment unter Berücksichtigung
  - der Resuspension und
  - der Deposition von Schwebstoffen am Boden.



- sohnaher Transport von Sedimenten (Geschiebe) unter dem Einfluß der Bodenschubspannung
- die Geometrie des Oberflächengewässers kann dabei eine beliebige Form aufweisen
- das zu modellierende System kann zeitweise trockenfallende Flächen (z.B. Wattgebiete) enthalten

### **2.2.1 Physikalische Prozesse**

In diesem Abschnitt wird der gültige Anwendungsbereich des HN-Verfahrens TRIM-2D weiter präzisiert. Dies erfolgt dadurch, daß das physikalische System, für welches das Modell konzipiert wurde, so weit wie möglich in Einzelprozesse aufgespalten wird. Diese sollen einerseits einfach zu verstehen und zugleich bedeutsam und sinnvoll sein.

#### **Wellenausbreitung:**

Eine Sinuswelle läuft in einen geraden Kanal ein und breitet sich in ihm mit konstanter Fortschrittsgeschwindigkeit aus; ein Vergleich mit der analytischen Lösung zeigt die Übereinstimmung zwischen numerisch berechneter und analytischer Lösung und damit die korrekte Funktion des numerischen Verfahrens (siehe CASULLI & CATTANI 1992).

#### **Windeinfluß:**

Simulation der durch den Einfluß des Windes hervorgerufenen Wasserstandsänderung in einem geraden Kanal mit einseitig offenem/geschlossenen Ende; bei abruptem Einsetzen des Windes wird zunächst eine Schwingung der Wasserspiegelauslenkung um die spätere Gleichgewichtslage hervorgerufen, welche auf Grund der energiezehrenden Prozesse (Bodenreibung, turbulente Diffusion) allmählich abklingt; der windinduzierte Anstieg des Wasserspiegels ist dabei von der Windgeschwindigkeit und der Wassertiefe abhängig; die numerische Lösung stimmt mit der analytischen Lösung überein und zeigt somit die korrekte Implementierung des durch Windschub hervorgerufenen Impulseintrages in den Wasserkörper.

#### **Stationärer Abfluß:**

In einem geraden Kanal ist unter Verwendung stationärer Randwerte der Durchfluß durch alle Querschnitte auf der gesamten Kanallänge konstant; dies demonstriert die Konservativität der in TRIM-2D benutzten Implementierung bezüglich der Wassermasse.

### **Trockenfallen und Überflutung:**

hydrodynamische Vorgänge und Transportprozesse können auch auf Wattgebieten untersucht werden (BAW 1995a).

### **Wirbelentstehung:**

Entstehung von Strömungswirbeln im Bereich von Ablösungszonen (BAW 1995b)

### **Schwebstofftransport:**

Die Simulation des Schwebstofftransportes sowie der Deposition und Resuspension abgelagerten Schwebstoffes am Boden zeigt die (qualitativ) korrekte Funktion der implementierten physikalischen Prozesse (BAW 1995b).

### **Gezeitenspektrum:**

Nachahmung des Gezeitenspektrums ( $M_2$ ,  $M_4$ ,  $M_6$  und  $M_8$ ) und damit der Tidewasserstände in dem Elbeästuar; berechnetes und gemessenes Spektrum zeigen in bezug auf Amplitude und Phase gute Übereinstimmung; dies demonstriert, daß die nichtlinearen Prozesse, welche in der Natur eine Energieübertragung zwischen den diskreten Frequenzen des Gezeitensignals hervorrufen, von dem HN-Verfahren TRIM-2D naturähnlich simuliert werden (BAW 1995a).

### **Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt:**

Im Elbeästuar wurde ein Vergleich von gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehaltswerten an einer größeren Anzahl von Meßpositionen durchgeführt; hierbei stimmen gemessene und berechnete Werte im allgemeinen gut überein (Kap. 3).

### **Geschiebetransport:**

Für das Elbeästuar wurde der sohlnahe Geschiebetransport flächendeckend berechnet; berechnete Diskontinuitäten der Geschiebefracht zeigen eine gute Übereinstimmung mit Zonen der Unterhaltsbaggerung (siehe auch Informationssystem Elbe-CD und Beschreibung Kapitel 7).

## **2.3 Konzeptionelles Modell**

In diesem Unterkapitel wird das dem HN-Verfahren TRIM-2D zu Grunde liegende konzeptionelle Modell vorgestellt. Hierbei werden insbesondere Abweichungen zwischen dem natürlichen physikalischen System und dem konzeptionellen Modell hervorgehoben. Das konzeptionelle Modell ist zugleich Grundlage für das später erläuterte Berechnungsverfahren. Das konzeptionelle Modell des HN-

Verfahrens TRIM-2D besteht im wesentlichen aus einem System von partiellen Differentialgleichungen, die eine mathematisch logische Beschreibung des natürlichen physikalischen Systems repräsentieren.

### 2.3.1 Mathematische Formulierung

Die Grundlagen des mathematischen Verfahrens TRIM-2D bilden Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für die Wassermasse, den Impuls der Strömung, sowie für die im Wasser befindliche Salz- und Schwebstoffmenge darstellen. Die Geschiebefracht wird mit Hilfe einer Transportkapazitätsberechnung ermittelt.

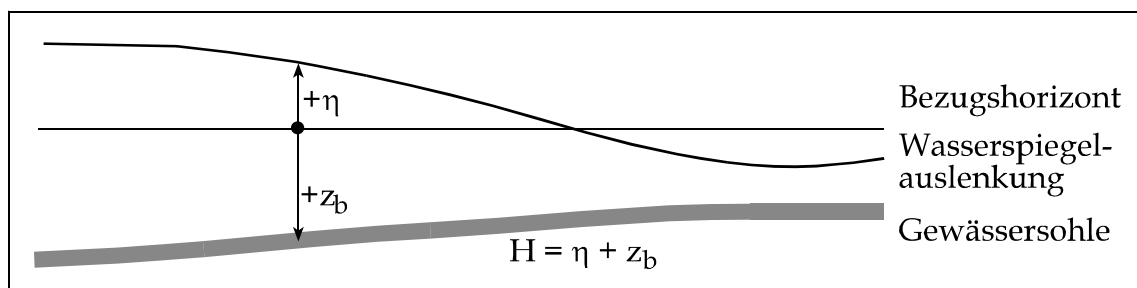


Abb. 2.1: graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Wasserspiegelauslenkung  $\eta$ , der bathymetrischen Tiefe  $z_b$  (Sohllage) und der Wassertiefe  $H$ .

Unter Verwendung des in Abb. 2.1 dargestellten Zusammenhangs zwischen Wasserspiegelauslenkung, Sohllage und Wassertiefe wird zur Beschreibung der Erhaltung der Wassermasse folgende *konervative* Form der Kontinuitätsgleichung verwendet.

$$\underbrace{\frac{\partial \eta}{\partial t}}_{L_m} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(HU) + \frac{\partial}{\partial y}(HV)}_{D_m} = 0 \quad (2.1)$$

Die einzelnen Terme haben folgende physikalische Bedeutung:

- $L_m$  lokale Veränderung der Wasserspiegelauslenkung  $\eta$
- $D_m$  Divergenz des Massentransports

Die Erhaltung des linearen Impulses (x- und y-Komponente) wird mit Hilfe der nachfolgenden, in *nichtkonservativer* Form geschriebenen Gleichungen 2.2 und 2.3 ausgedrückt.

**x-Impulsgleichung:**

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial U}{\partial t}}_{L_i} + \underbrace{U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}}_{D_i} - \underbrace{2V\Omega \sin \varphi}_{C_i} = \\ - \underbrace{\frac{\rho}{\rho_0} g \frac{\partial \eta}{\partial x}}_{P_1} - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} g \frac{H}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x}}_{P_2} - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x}}_{P_3} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_{\mu t}}{\rho_0} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{D_{\mu t}}{\rho_0} \frac{\partial U}{\partial y} \right)}_{T_i} \quad (2.2) \\ - \underbrace{\frac{1}{H} C_D U \sqrt{U^2 + V^2}}_{B_i} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\rho_a}{\rho_0} C_W u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}_{S_i} \end{aligned}$$

**y-Impulsgleichung**

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial V}{\partial t}}_{L_i} + \underbrace{U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y}}_{D_i} + \underbrace{2u\Omega \sin \varphi}_{C_i} = \\ - \underbrace{\frac{\rho}{\rho_0} g \frac{\partial \eta}{\partial y}}_{P_1} - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} g \frac{H}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y}}_{P_2} - \underbrace{\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y}}_{P_3} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{D_{\mu t}}{\rho_0} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{D_{\mu t}}{\rho_0} \frac{\partial V}{\partial y} \right)}_{T_i} \quad (2.3) \\ - \underbrace{\frac{1}{H} C_D V \sqrt{U^2 + V^2}}_{B_i} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\rho_a}{\rho_0} C_W v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}_{S_i} \end{aligned}$$

Die Bedeutung der darin auftretenden Terme ist wie folgt

- $L_i$  lokale Beschleunigung
- $A_i$  advective Beschleunigung
- $C_i$  Coriolisbeschleunigung
- $P_1$  barotroper Druckgradient
- $P_2$  barokliner Druckgradient
- $P_3$  Luftdruckgradient
- $T_i$  turbulente Diffusion und Dispersion
- $B_i$  Bodenreibung
- $S_i$  Windreibung

Zur Beschreibung der räumlich-zeitlichen Verteilung des (passiven) Tracers Salzgehalt wird die nachfolgende *nicht konservativ* formulierte Transportgleichung 2.4 (Advektions-Diffusions Gleichung für den Salzgehalt) verwendet; hierin treten keine Quellen und Senken für den Salzgehalt auf.

$$\underbrace{\frac{\partial S}{\partial t}}_{L_t} + \underbrace{U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y}}_{A_t} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( H \frac{\Gamma_t}{\rho_0} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( H \frac{\Gamma_t}{\rho_0} \frac{\partial S}{\partial y} \right)}_{T_t} \quad (2.4)$$

Die in dieser Gleichung vorkommenden Terme haben folgende physikalische Bedeutung:

- $L_t$  lokale Konzentrationsänderung
- $A_t$  advective Konzentrationsänderung
- $T_t$  turbulente Diffusion und Dispersion

Auf die Beschreibung der Advektions-Diffusionsgleichung für Schwebstoff wird an dieser Stelle verzichtet.

Der sohnnahe Transport von Geschiebe wird für jede Kornfraktion mit Hilfe der nachfolgenden Transportformeln 2.6 bis 2.8 beschrieben (siehe de VRIEND et al. 1993).

$$\underbrace{q_x^t}_{\underline{Q}_G} = \underbrace{q_x}_{\underline{T}_G} + \underbrace{\beta |q| \frac{\partial z_b}{\partial x}}_{\underline{G}_G} \quad (2.5)$$

$$\underbrace{q_y^t}_{\underline{Q}_G} = \underbrace{q_y}_{\underline{T}_G} + \underbrace{\beta |q| \frac{\partial z_b}{\partial y}}_{\underline{G}_G} \quad (2.6)$$

$$|q| = 0,053 \cdot \sqrt{g \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right)} \cdot d_{50}^{1,5} \cdot D^{*-0,3} \cdot T^{2,1} \quad (2.7)$$

Die entsprechende Bilanzgleichung für den Geschiebevorrat an der Sohle lautet:

$$\underbrace{\frac{\partial L}{\partial t}}_{\underline{V}_G} = - \underbrace{\left[ \frac{\partial q_x^t}{\partial x} + \frac{\partial q_y^t}{\partial y} \right]}_{D_G} \quad (2.8)$$

Die in der Geschiebetransportgleichung sowie in der Bilanzgleichung für den Geschiebevorrat vorkommenden Größen haben folgende physikalische Bedeutung:

$Q_G$  Gesamt-Geschiebetransport

$T_G$  Geschiebetransport durch die Strömung nach der Transportkapazitätsformel

$G_G$  gravitativer Geschiebetransport

$D_G$  Divergenz des Geschiebetransportes

$V_G$  Änderung des Geschiebevorrates an der Sohle

### 2.3.2 Annahmen und Näherungen

Folgende Annahmen und Vereinfachungen liegen dem im vorangehenden Abschnitt vorgestellten konzeptionellen Modell zu Grunde.

- die Druckverteilung ist hydrostatisch ( $z$  ist die vertikale Koordinate mit positiver Richtung nach oben)

$$p = \rho g(\eta - z) + p_a \quad (2.9)$$

Die Annahme, daß sich die Vertikalbeschleunigung und die Schwerebeschleunigung gegenseitig aufheben, bedeutet, daß in dem simulierten System nur geringe Vertikalbewegungen auftreten dürfen. Die Geschwindigkeitsvektoren müssen in guter Näherung in der Horizontalebene liegen.

- das vertikale Strömungsprofil wird durch die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit angenähert

$$U = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{\eta} u dz \quad (2.10)$$

$$V = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{\eta} v dz \quad (2.11)$$

Diese Annahme bedeutet, daß der Transport des Wasservolumens exakt wiedergegeben werden kann. Der Transport von Impuls und Energie wird hingegen nur in guter Näherung beschrieben, da für eine präzise Beschreibung die genaue Kenntnis des orts- und zeitabhängigen Strömungsprofils notwendig wäre. Durch Parametrisierung mit Hilfe des horizontalen turbulenten Dispersionskoeffizienten kann diese Näherung verbessert werden (Terme  $T_i$  in den Gleichung 2.2 und 2.3)

- das vertikale Konzentrationsprofil des Salzgehalts wird durch den tiefengemittelten Salzgehalt ersetzt

$$S = \frac{1}{H} \int_{z_b}^{\eta} s \, dz \quad (2.12)$$

Diese Annahme bedeutet, daß der Salzgehalt ausschließlich für gut durchmischte oder zeitweise teildurchmischte natürliche Systeme in guter Näherung beschrieben werden kann. Hinsichtlich des (advektiven) Salztransportes gelten hier auch die beim Transport von Impuls gemachten Aussagen.

- die Strömungsturbulenz wird durch die Annahme einer zeitlich und örtlich konstanten Wirbelviskosität beschrieben.

Diese Annahme bedeutet, daß insbesondere kein Transport der turbulenten kinetischen Energie und der Dissipationsrate simuliert wird. Außerdem entfällt der Einfluß der Strömungsintensität, da ein zeit- und ortsunabhängiger konstanter Wert für die Wirbelviskosität verwendet wird.

- der von der Strömungsturbulenz hervorgerufene Transport eines passiven oder aktiven Tracers wird durch einen konstanten Wert für die Wirbeldiffusivität angenähert.

Diese Approximation berücksichtigt den in Anwesenheit von Vertikalgradienten (Strömung, Salz, Schwebstoff) hervorgerufenen zusätzlichen horizontalen advektiven Transport, der nicht durch den aus der Verknüpfung der tiefengemittelten Größen resultierenden Transport abgedeckt wird (Stoff-Dispersion durch das Strömungsfeld).

- der dimensionslose Reibungskoeffizient  $C_D$  zur Berechnung der Bodenschubspannung (Terme  $B_i$  in den Gleichungen 2.2 und 2.3) kann aus den bekannten Beiwerten der Formeln zur Gerinnehydraulik nach folgender Beziehung abgeleitet werden:

$$\sqrt{\frac{g}{C_D}} = C_z = k_{St} \cdot r_{hy}^{1/6} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \quad (2.13)$$

Hierin ist  $C_z$  [ $m^{1/2}/s$ ] der Chezy-Beiwert,  $k_{St}$  [ $m^{2/3}/s$ ] der Strickler-Beiwert und  $\lambda$  ein dimensionsloser Beiwert, der den Fließwiderstand in Analogie zur Rohrhydraulik beschreibt (ROUVE 1987).

- der Impulsaustauschkoeffizient  $C_W$  zur Berechnung der Windschubspannung an der Wasseroberfläche (Terme  $S_i$  in den Gleichungen 2.2 und 2.3) variiert mit der bodennahen Windgeschwindigkeit in folgender Weise:

$$C_W = \left[ \alpha + \beta \sqrt{u_w^2 + v_w^2} \right] \cdot 10^{-3} \quad (2.14)$$

mit  $\alpha = 0,63$  und  $\beta = 0,066$  (SMITH & BANKE, 1975)

- die Berechnung des sohnahen Geschiebetransportes greift auf folgende jede Fraktion des Sediments charakterisierenden Parameter zurück:

$$D^* = \left[ \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) \cdot \frac{g}{\nu^2} \right]^{1/3} \cdot d_{50} \quad (2.15)$$

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho) g d_{50} \Theta_{cr} \quad (2.16)$$

$$T = \max \left[ \frac{\tau_b - \tau_{cr}}{\tau_{cr}}, 0 \right] \quad (2.17)$$

Für den kritischen Shieldsparameter  $\Theta_{cr}$  werden in der Literatur angegebene Werte verwendet (siehe van RIJN, 1989, Seite 5.2).

In dem sedimentologischen Korndurchmesser  $D^*$  spiegelt sich der Einfluß der Schwerkraft, des Dichtunterschieds und der Viskosität des Wassers wider.

Die bodennahe Sedimentbewegung tritt ein, wenn die hydromechanischen Kräfte den für den Bewegungsbeginn kritischen Grenzwert übersteigen. Der kritische Shields-Parameter  $\Theta_{cr}$  ist von den sohnahen hydromechanischen Verhältnissen und der Partikel-Reynoldszahl abhängig.

Mit diesen  $D^*$  und  $\Theta_{cr}$  läßt sich nach Shields die Schubspannung  $\tau_{cr}$  berechnen, die durch die Strömung auf das Sediment ausgeübt werden muß, um Bewegung zu verursachen (sogenannte kritische Shieldsschubspannung).

Die Beziehung (2.17) suggeriert, daß es einen festen sedimentspezifischen Schwellenwert der Bodenschubspannung gibt, der die Zustände Sedimentbewegung und Sedimentruhe trennt. Physikalisch gesehen ist dies aber eine Vereinfachung, denn es existiert ein unscharfer Übergang von Ruhe zur Bewegung, der durch die natürliche Variabilität von Strömungsangriff (Turbulenz) und Sedimenteigenschaften (Größe, Form, Lagerung) verursacht wird.

Die tatsächlich wirksame Schubspannung  $\tau_b$  ergibt sich aus der tiefengemittelten Fließgeschwindigkeit nach dem allgemeinen logarithmischen Wandschubspannungsgesetz, das für offene Gerinne durch empirische Beziehungen modifiziert wird.



$$\tau_b = \rho \cdot g \cdot \left[ \frac{\bar{U}}{C'} \right]^2 \quad (2.18)$$

$\tau$  ist die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit.  $C'$  ist der sogenannte kornbezogene Chezy-Koeffizient. Im Rahmen der Geschiebetransportberechnung beschreibt dieser die Kornrauigkeit und wird deswegen in Abhängigkeit vom Korndurchmesser bestimmt:

$$C' = 18 \log[4H / d_{90}] \quad (2.19)$$

## 2.4 Algorithmische Implementierung

In diesem Abschnitt werden wesentliche Aspekte der algorithmischen Implementierung des HN-Verfahrens TRIM-2D beschrieben. Hierbei werden insbesondere die vorhandenen Unterschiede zu dem konzeptionellen Modell herausgearbeitet. Unter der algorithmischen Implementierung von TRIM-2D ist die Umsetzung des konzeptionellen Modells des physikalischen Systems in einen endlichen Satz für die Berechnung geeigneter Beziehungen zu verstehen.

### 2.4.1 Annahmen und Näherungen

Die Lösungen der partiellen Differentialgleichungen sind sowohl orts- als auch zeitabhängig. In der algorithmischen Implementierung von TRIM-2D werden die darin auftretenden Differentialquotienten durch Differenzenquotienten approximiert.

#### Ortsdiskretisierung

Die Funktionswerte der Unbekannten werden an den Berechnungspunkten eines sogenannten ARAKAWA C Gitters berechnet (siehe auch Abb. 2.2).

Die Positionen der auf dem versetzten Gitter (Gitterweiten  $\Delta x$  und  $\Delta y$ ) liegenden Berechnungspunkte des Wasserstandes und der Komponenten der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit sind für die Gitterzelle  $(i,j)$  wie folgt relativ zum Ursprung  $(x_o, y_o)$  des Gitters definiert:

$$\text{Position } (U_{i+0.5,j}) = (x_o + i\Delta x, y_o + (j-0.5)\Delta y)$$

$$\text{Position } (V_{i,j+0.5}) = (x_o + (i-0.5)\Delta x, y_o + j\Delta y)$$

$$\text{Position } (\eta_{i,j}) = (x_o + (i-0.5)\Delta x, y_o + (j-0.5)\Delta y)$$

## Topographie

Die bathymetrische Tiefe  $z_b$  (Topographie) wird dabei sowohl an den U (Geschwindigkeitskomponente in Ost-West-Richtung) wie auch an den V-Punkten (Geschwindigkeitskomponente in Nord-Süd-Richtung) spezifiziert. Dies erlaubt die bestmögliche Wiedergabe der Bathymetrie auf einem Finite Differenzen Gitter mit vorgegebener Gitterweite.

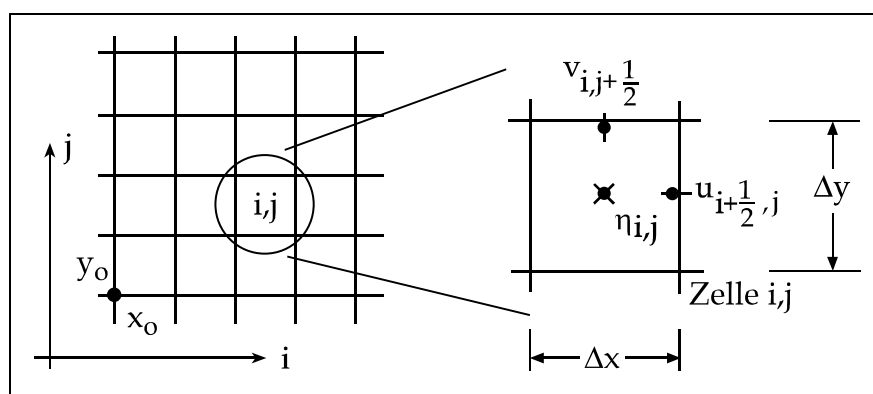


Abb. 2.2: Lage der Berechnungspunkte im FD-Gitter Lage der Berechnungspunkte der Gitterzelle (i,j) in einem Arakawa C-Gitternetz. Die Positionen der Gitterpunkte zur Berechnung der Komponenten (U, V) der tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit sind um jeweils eine halbe Gitterweite gegenüber der Position des Punktes zur Berechnung der Wasserspiegelauslenkung  $\eta$  verschoben.

Die Positionen sind damit wie folgt gegeben:

$$\text{Position } (z_{b_{i+0.5,j}}) = (x_0 + i\Delta x, y_0 + (j-0.5)\Delta y)$$

$$\text{Position } (z_{b_{i,j+0.5}}) = (x_0 + (i-0.5)\Delta x, y_0 + j\Delta y)$$

Die Speichertiefe  $z_s$  einer Zelle - diese bestimmt das Volumen der Gitterzelle - ist definiert als das Maximum der vier an den Zellenrändern liegenden Tiefenpunkte:

$$z_{s_{i,j}} = \max \left[ z_{b_{i+0.5,j}}, z_{b_{i-0.5,j}}, z_{b_{i,j+0.5}}, z_{b_{i,j-0.5}} \right]$$

Diese aus rechentechnischen Gründen gewählte Form der Definition der Speichertiefe  $z_s$  hat zur Folge, daß das Volumen des Systems systematisch überschätzt wird. Der absolute Fehler F beträgt für eine Gitterzelle

$$F = \Delta x \Delta y \left[ z_{s_{i,j}} - \frac{z_{b_{i+0.5,j}} + z_{b_{i-0.5,j}} + z_{b_{i,j+0.5}} + z_{b_{i,j-0.5}}}{4} \right]$$

Auf die Berechnung der Zustandsgrößen (Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit etc.) hat dieses Verfahren einen vernachlässigbaren Einfluß.

### Differenzenbildung des Ortes

Folgende Terme der partiellen Differentialgleichungen werden durch zentrale Differenzen wiedergegeben:

- Divergenz des Massentransports (Gl. 2.1)
- barotroper Druckgradient (Gln. 2.2, 2.3)
- barokliner Druckgradient (Gln. 2.2, 2.3)
- Diffusion (Gln. 2.2, 2.3, 2.4)
- Topographiegradient (Gln. 2.5, 2.6)

Beispiel: 
$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i-0.5,j} - u_{i+0.5,j}}{\Delta x}$$

Die advective Terme (Gln. 2.2, 2.3, 2.4) werden mit Hilfe eines Euler-Lagrangeschen Ansatzes approximiert. Bei diesem Ansatz werden Berechnungspositionen zwischen den regulären Gitterpunkten bestimmt, die sich aus der Advektion eines Teilchen zwischen zwei Zeitschritten ergeben (CASULLI 1990).

Die Form dieser Diskretisierung bringt es mit sich, daß die Quantität der advektiv transportierten Größe nicht streng konservativ erhalten wird.

### Differenzenbildung der Zeit

Für die Diskretisierung der Funktionswerte einer Funktion  $f$  an den Zeitschritten  $n$  und  $n+1$  wird folgender semi-impliziter Ansatz für die Approximation benutzt:

$$f = \Theta f^{n+1} + (1 - \Theta) f^n \quad (2.20)$$

Mit Hilfe dieser semi-impliziten Formulierung werden folgende Terme der partiellen Differentialgleichungen approximiert:

- Divergenz des Massentransports (Gl. 2.1)

$$\frac{\partial}{\partial x} (HU) \approx \frac{\partial}{\partial x} [(1 - \Theta) H^n U^n + \Theta H^n U^{n+1}] \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (HV) \approx \frac{\partial}{\partial y} [(1 - \Theta) H^n V^n + \Theta H^n V^{n+1}] \quad (2.22)$$

- barotroper Druckgradient (Gl. 2.2, 2.3)

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} \approx \frac{\partial}{\partial x} [(1 - \Theta) \eta^n + \Theta \eta^{n+1}] \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} \approx \frac{\partial}{\partial y} \left[ (1 - \Theta) \eta^n + \Theta \eta^{n+1} \right] \quad (2.24)$$

Im Falle  $\Theta = 0.5$  liefert dieser Ansatz eine Genauigkeit zweiter Ordnung. Man beachte die Linearisierung der Terme für die Divergenz des Massentransportes (hier müsste an Stelle von  $H^n U^{n+1}$  das Produkt  $H^{n+1} U^{n+1}$  stehen). Diese Vereinfachung ist nur in Gebieten mit sehr geringer Wasserbedeckung relevant, da dort die zwischen zwei Zeitschritten auftretende Veränderung der Wassertiefe relativ groß gegenüber der mittleren Wassertiefe sein kann. Die exakte Erhaltung der Wassermasse wird von dem Programm unabhängig davon in jedem Fall gewährleistet. Alle anderen Terme in den Differentialgleichungen werden ausschließlich mit Hilfe der Funktionswerte auf der zurückliegenden Zeitebene  $n$  approximiert.

Die vorgenannten Diskretisierungen ermöglichen die numerische Integration der partiellen Differentialgleichungen auf beliebigen Lösungsgebieten unter Berücksichtigung des Überflutens und Trockenfallens von nur zeitweise wasserbedeckten Flächen.

Das entstehende Gleichungssystem ist symmetrisch und positiv definit.

Für das Gleichungssystem existiert eine eindeutige Lösung, welche auf iterativem Wege mit Hilfe des PCG-Verfahrens (Preconditioned Conjugate Gradient Method) ermittelt werden kann (siehe auch BARETT et al., 1993).

Das mathematische Verfahren TRIM-2D ermöglicht die Benutzung folgender unterschiedlicher Arten von Randbedingungen:

- Wasserstand
  - wasserdurchströmter Rand mit vorgegebenem Wasserstand
  - wasserundurchlässiger Rand
- Strömungsgeschwindigkeit
  - wasserdurchströmter Rand mit vorgegebenem Durchfluß
  - wasserundurchlässiger Rand mit einer Partial-Slip-Bedingung
- Substanz (Salzgehalt und Schwebstoffkonzentration)
  - wasserdurchströmter Rand mit vorgegebener Substanzkonzentration
  - wasserdurchströmter Rand mit freier Substanzkonzentration
  - wasserundurchlässiger Rand

Jede einzelne Zelle des Finite Differenzen Gitters kann mit einer der oben angegebenen Randbedingungen belegt werden. Im allgemeinen können sowohl zeitabhängige als auch zeitunabhängige Randwerte für die Modellsteuerung verwendet werden.

## **2.5 Wasserbauliche Systemanalyse**

Wie bereits teilweise im vorstehenden Kapitel zum Ausdruck gekommen, ist es für den Einsatz eines Modells für einen bestimmten Zweck von entscheidender Bedeutung, die zugrunde liegenden Vereinfachungen und Annahmen zu kennen. Nur so kann beurteilt werden, ob das Modell die zu untersuchenden physikalischen Prozesse genügend genau wiedergibt. Man spricht dabei auch von einem „Ersatzsystem“ für die natürlichen Prozesse.

Mit diesem Ersatzsystem ist es möglich, anders als in der Natur bestimmte Einflußgrößen systematisch hinsichtlich ihrer Sensitivität auf das Gesamtsystem zu untersuchen, was auch als „wasserbauliche Systemanalyse“ bezeichnet wird. Die Ermittlung der ausbaubedingten Veränderungen der Tidedynamik ist beispielsweise eine solche Systemanalyse, bei der gezielt die Topographie des Modells im Bereich der Fahrrinne variiert wird. Das Modell kann bestimmte ausbaubedingte Veränderungen berechnen. Welche das sind, und mit welcher Genauigkeit sie berechnet werden wird in diesem Kapitel aufgezeigt.

### **2.5.1 Bedeutung der Annahmen und Näherungen für die wasserbauliche Systemanalyse**

#### **2.5.1.1 Zeitliche Mittelung zur Parametrisierung der Turbulenz**

Die Navier-Stoke'schen Gleichungen, auf denen die Gleichungen 2.1 - 2.3 beruhen, beschreiben vollständig exakt die Strömung eines Fluides. Sie enthalten somit auch die Bewegung der Wasserteilchen aufgrund von Turbulenz. Turbulenz, die sich in einer wirbelbehafteten Bewegung äußert, weist eine große Bandbreite räumlicher und zeitlicher Skalen auf. Räumlich reichen die Wirbelgrößen von einer Ausdehnung, die der Breite und Tiefe des Gewässers entspricht, bis zu Größenordnungen, bei denen die viskosen Spannungen des Fluids bestimmend werden. Korrespondierend dazu verhalten sich die zeitlichen Skalen, die aus der Geschwindigkeit der Teilchen und der Wirbelgröße abgeleitet werden können.

Da eine numerische Lösung der Navier-Stoke'schen Gleichungen wegen der notwendigen räumlichen und zeitlichen Auflösung nicht möglich ist, werden deshalb durch eine geeignete zeitliche Mittelung die sogenannten Reynoldsgleichungen abgeleitet. Geeignete zeitliche Mittelung bedeutet hier, daß die Zeitspanne genügend lang sein muß, um den Effekt der turbulenten Wirbel auszumitteln, so daß mittlere Strömungsgrößen abgeleitet werden können. Die Gleichungen berücksichtigen aber weiterhin zeitliche Veränderungen, die aber vergleichsweise langfristiger Natur sind, z. B. Strömungsveränderung durch die Tide- oder durch

Hochwasserwellen. Die Gleichungen beschreiben dann die mittleren Geschwindigkeiten sowie den mittleren Druck in einem Strömungsfeld.

Durch die zeitliche Mittelung entstehen Terme, die die Geschwindigkeitsschwankungen durch Turbulenz berücksichtigen. Sie haben die physikalische Dimension einer Spannung und werden deswegen auch als turbulente Spannungen bezeichnet. Sie sind zusätzliche Unbekannte in den Strömungsgleichungen, so daß mehr Unbekannte als Gleichungen existieren (sogenanntes Schließungsproblem der Turbulenz).

### **Bedeutung für den Modelleinsatz**

Bei der Beschreibung der Strömungsvorgänge in der Elbe können nur zeitliche Variationen betrachtet werden, die lang im Vergleich zum Zeitmaßstab der Turbulenz sind. Dies führt dazu, daß die ausbaubedingten Veränderungen in Form der zeitlich gemittelten Größen für die Strömungsgeschwindigkeit und Transport berechnet werden. Der signalgebende Prozeß im Elbeästuar ist die Tidewelle, deren Zeitmaßstab lang im Vergleich zu dem der Turbulenz ist. Dies bedeutet, daß die Berechnungsgrößen zwar gemittelte Werte darstellen, die aber hinsichtlich der Veränderung der Tidewelle zeitabhängig sind. Im Gutachten werden diese Berechnungsgrößen als „synoptische“ Werte bezeichnet.

### **2.5.1.2 Parametrisierung der turbulenten Spannungen nach dem Wirbelviskositätsprinzip**

Um das Schließungsproblem zu lösen müssen die turbulenten Spannungen durch ein Modell beschrieben werden, welches normalerweise einen funktionalen Zusammenhang zwischen den turbulenten Spannungen und den gemittelten Strömungsgrößen bildet. Für das Modellverfahren TRIM-2D wird das Wirbelviskositätsprinzip nach Boussinesq verwendet. Hierbei werden die turbulenten Spannungen aus dem Produkt einer Konstante, der turbulenten Wirbelviskosität, und den räumlichen Gradienten der mittleren (synoptischen) Strömungsgeschwindigkeit berechnet. Die turbulente Wirbelviskosität wird häufig auch als turbulente Diffusion bezeichnet, weil sie in den Gleichungen analog zur molekularen Diffusion auftritt. Da die turbulente Diffusion um Größenordnungen größer als die molekulare Diffusion ist wird Letztere vernachlässigt.

### **Bedeutung für den Modelleinsatz**

Die oben aufgeführten Konstanten müssen für jedes Modell angepaßt gewählt werden, da nur so die Turbulenz in ihrer Auswirkung auf die zeitlich gemittelten Größen richtig erfaßt wird. Dies geschieht bei der Modellverifizierung, in dem die

berechneten Größen mit in der Natur gemessenen Größen verglichen werden. Durch Variation der Konstante wird eine korrekte Berücksichtigung der Turbulenz erreicht. Für Tideästuare schwankt die Konstante in engen Grenzen. Sie ist allerdings auch von dem gewählten numerischen Verfahren wie auch von der räumlichen Diskretisierung abhängig.

### **2.5.1.3 Vertikale Integration**

Die Reynoldsgleichungen werden mathematisch über die Tiefe integriert. Dabei werden die zeitlichen Mittelwerte der Berechnungsgrößen (Strömungsgeschwindigkeiten, Druck, Salzgehalt) vertikal über die Tiefe integriert, d. h. es wird praktisch ein Mittel über die Wassertiefe gebildet. Durch die Integration wird der Wasserkörper als eine Schicht variabler Dicke angesehen, bei der eine Variation der Berechnungsgrößen nur in horizontaler Richtung berücksichtigt ist. Durch die vertikale Integration gelangen Terme in die Gleichung, die die Reibung am Boden und an der Wasseroberfläche (Wind) durch Schubspannungen in Form äußerer Kräfte beschreiben. Bei der Integration entstehen ebenfalls Terme, die die Ungleichförmigkeit der Strömung, die durch Querschnittvariationen entsteht (sogenannte Dispersion), berücksichtigen. Diese Terme werden vernachlässigt, der physikalische Effekt, ein zusätzlicher Austausch von Impuls oder transportierter Masse wird durch zusätzliche turbulente Diffusion gemäß dem vorstehenden Abschnitt berücksichtigt.

### **Bedeutung für den Modelleinsatz**

Alle Berechnungsgrößen werden als tiefengemittelte Werte bestimmt. Variationen können in horizontaler und zeitlicher Dimension berücksichtigt werden. Einflüsse aus dreidimensionalen Strömungsstrukturen aufgrund von Bauwerksumströmungen und gekrümmter Gerinneführung werden durch die Parametrisierung der Turbulenz (Wirbelviskosität) und der Bodenreibung berücksichtigt. Der Nachweis über die richtige Wahl der Parameter wird durch die Verifizierung anhand der gemessenen Daten erbracht (siehe Kap. 3, Tab. 3.5).

### **2.5.1.4 Räumliche Diskretisierung**

Das Modell beschreibt die natürlich vorhandene Topographie durch Abtastung an diskreten Punkten. Hier wurde ein Finite-Differenzen-Gitter mit einem Gitterabstand von 50 m eingesetzt (siehe Kap. 3). Durch die spezielle Definition als „u,v-Topographie“ (siehe Kapitel 2.4.1) im Finite-Differenzen-Gitter wird die Topographie in mit einem Punktabstand von 35,4 m abgetastet.

## **Bedeutung für den Modelleinsatz**

Geometrische Strukturen mit geringerer räumlicher Ausdehnung (z. B. Rinnen oder Mulden) werden durch die Abtastung nicht erfaßt. Berechnungen des Wasserstands sind aber auch in solchen Bereichen zutreffend, da der Wasserspiegel nur geringe Gradienten aufweisen kann.

Linienbauwerke wie z. B. Buhnen werden speziell behandelt. Sie erfahren eine korrekte Berücksichtigung in ihrer Höhe, werden aber lagemäßig auf die Gitterkonturen abgebildet, so daß sich im Extremfall eine Zickzacklinie ergeben kann.

### **2.5.1.5 Boden- und Windreibung**

Die Boden- und Windreibung gelangen als Randbedingung (äußere Kraft) in das Gleichungssystem (siehe Kap. 2.3.1). Beide Einflüsse werden durch Konstanten abgebildet, die verifiziert werden müssen (siehe Kap. 3, Tab. 3.5).

Durch die oben genannten Approximationen, vertikale Integration und räumliche Diskretisierung sind die Kennwerte der Bodenreibung nicht nur von der vorhandenen Bodenrauheit (Korngröße, Bewuchs) abhängig, sondern enthalten auch Abhängigkeiten aus räumlicher Diskretisierung und Diffusions/Dispersionseinflüsse aus der Tiefenintegration.

### **2.5.1.6 Bemerkungen**

Grundsätzlich ist es wünschenswert, eine hohe geometrische Auflösung und eine möglichst dreidimensionale Nachbildung der physikalischen Prozesse im Modell zu realisieren, da dann in geringerem Maße Einflüsse durch Parameter, die durch Verifikation anzupassen sind, entstehen. Allerdings gibt es hier wirtschaftliche und wissenschaftliche Grenzen, die in der Rechenleistung der Computer und in der Entwicklung der numerischen Verfahren liegen.

Das vorliegende zweidimensional tiefengemittelte Modell der Elbe kann nur von einem superschnellen Vektorrechner, wie er in der BAW-AK verfügbar ist, in akzeptabler Zeit bearbeitet werden. Das eingesetzte Verfahren TRIM-2D ist wissenschaftlich auf höchst aktuellen internationalen Stand. Eine vollständig dreidimensionale Berechnung bei gleichbleibender horizontaler Auflösung ist zur Zeit aufgrund der Begrenzung der Rechnerleistung nicht möglich.



## 2.5.2 Genauigkeit der Berechnungsergebnisse

Die Angabe einer Berechnungsgenauigkeit hängt von vielen Faktoren ab. Daher kann sie nicht mit einem Wert angegeben werden, sondern ist je nach Ort, Berechnungsgröße und Berechnungsvariante unterschiedlich. Nachfolgend wird ein Überblick über die wesentlichen Einflußfaktoren gegeben.

### Absolute Genauigkeit

Mit absoluter Genauigkeit bezeichnet man die Fehlertoleranz bezüglich der Wiedergabe eines bestimmten Zustandes (beispielsweise, die Wasserstände bei mittleren Tiden). Absolute Genauigkeit kann nur durch Verifikation nachgewiesen werden. Dabei entsteht das Problem, den Naturzustand einerseits meßtechnisch genau genug zu erfassen und andererseits im Modell auch alle Einflüsse zu berücksichtigen, die während der Naturmessung existierten. Beispielsweise beträgt

- die Genauigkeit der Pegel zur Wasserstandsmessung hinsichtlich des absoluten Höhenwertes etwa  $\pm 2-3$  cm und hinsichtlich der Zeitablesung  $\pm 2-3$  min,
- und ist die Messung des lokalen Windes in der Natur nicht möglich und dessen korrekte Berücksichtigung im Modell aufgrund der natürlichen, zeitlichen und räumlichen Variabilität des Windes schwierig und nur näherungsweise möglich.

Bei der Verifikation werden Naturmessungen an Einzelpunkten mit den Ergebnissen des Modells verglichen. Aus der Betrachtung des Gesamtbildes kann dann auf Genauigkeit des Modells geschlossen werden. Ein Gütekriterium für Tidemodelle ist beispielsweise ob Phasenlage und Höhe der Tidewelle korrekt im Modell nachgebildet wird.

Im Kapitel 3 ist die Verifikation des Elbmodells beschrieben. Daraus kann eine Genauigkeit bezüglich des Wasserstandes von 2 cm abgeleitet werden. Die Genauigkeit bezüglich der Strömungsgeschwindigkeit ist stark ortsabhängig. Sie richtet sich nach der Exaktheit, mit der das Modell die geometrischen Strukturen in dem jeweiligen Bereich wiedergibt.

Im Bereich der Hauptrinnen ist die Genauigkeit deswegen recht hoch. Abweichungen zwischen Modell und Natur liegen etwa in einer Größenordnung von 5 cm/s. Im Bereich der Nebenrinnen und insbesondere in nur knapp überfluteten Bereichen ist die Approximation im 50 m Gitter zu grob, hier können die Abweichungen örtlich größer sein. Ihr Ausmaß muß im Einzelfall abgeschätzt werden.

Das Modell beschreibt den Transport von gelösten Salz als tiefengemittelten Prozeß. Da die Elbe nur bei voller Tideströmung (Turbulenz) ein gut durchmischtes Ästuar ist, kann die insbesondere während der Kenterphase in der Natur auftre-

tende Schichtung aufgrund der Dichteunterschiede im Wasser nicht im Modell nachgebildet werden. Das Modell parametrisiert den Transport, der in der Natur durch die Schichtung (Transport von Salz in bodennahen Schichten) verursacht wird, durch Diffusion. Die Verifikation weist jedoch nach, daß die gemessenen und dann tiefengemittelten Salzkonzentrationen gut approximiert werden.

Bei der Berechnung des Geschiebetransportes ist aufgrund des Verfahrens und der nur eingeschränkten Verifikationsmöglichkeiten keine Angabe von absoluter Genauigkeit möglich. Hier dient das Modell zur qualitativen Analyse der Prozesse und ist wertvolles Hilfsmittel für „Wenn-Dann“-Szenarios.

### **Relative Genauigkeit**

Unter relativer Genauigkeit versteht man die Genauigkeit mit der das Modell die Abweichungen wiedergibt, die sich aus bestimmten Veränderungen von Systemparametern (beispielsweise Topographie) ergeben. Die Genauigkeit ist naturgemäß von der Systemparametervariation und vom betrachteten Wert abhängig.

Die Variationen der Fahrrinentopographie, die Gegenstand des hier vorliegenden Berichts sind, sind aus modelltechnischer Sicht klein, so daß die Parametrisierungen der verschiedenen Teilprozesse (Turbulenz, Bodenreibung, etc.) sich mit der Variation nicht verändern. Daher ist die relative Genauigkeit wesentlich höher als die absolute Genauigkeit. Sie ist bezogen auf die Wasserstände besser als 1 cm.

In diesem Bericht wird trotzdem zwischen Rechenwerten und Prognosewerten unterschieden (siehe Kapitel 8). Dies hat seinen Grund in der gegebenen Variabilität der Randbedingungen (Ungenauigkeit der Baggerung, morphologischer Nachlauf, etc.). Mit anderen Worten, die Modellgenauigkeit ist zwar sehr hoch, jedoch ist die Bestimmung der Randbedingungen mit einer gewissen Schwankungsbreite behaftet.

### 3. Verifikation

Zur Berechnung der ausbaubedingten Änderungen der Tidedynamik des Elbeästuars ist die Verifikation des Ist-Zustandes notwendig. Deren Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargestellt. Betrieb und Verifikation des Elbmodells erfordern das Vorhandensein von Informationen über die Topographie (Morphologie und Strombauwerke) des Untersuchungsgebietes, von Randwerten zur Steuerung des mathematischen Tidemodells sowie von an unterschiedlichen Positionen gemessenen Wasserstands- und Strömungs- und Salzgehaltsdaten.

#### 3.1. Topographie des IST-Zustands

Mit Hilfe des mathematischen Verfahrens *TRIM-2D* wird Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt an den jeweiligen Gitterpunkten berechnet. Zur Generierung der Gitternetze ist ein *digitales Geländemodell* des gesamten Untersuchungsgebietes die Grundlage. Dabei werden Informationen über die Bathymetrie, die Strombauwerke und den Verlauf der Küstenlinie benötigt. Zur Erstellung des digitalen Geländemodells für den Ist-Zustand standen die in den nachfolgenden Unterabschnitten aufgeführten Eingangsdaten zur Verfügung.

##### 3.1.1. Morphologie

Die hinsichtlich der Morphologie des Untersuchungsgebietes benötigten Informationen wurden den folgenden Quellen entnommen:

- *Peildaten* der KUEDAT-Datenbank (SEITZ & ZEH, 1991) für die Bereiche Außenelbe und *Untereelbe* (WSA Cuxhaven, WSA Tönning, WSA Hamburg und BSH Hamburg):
  1. Jahrespeilungen 1985
  2. Jahrespeilungen 1986
  3. Jahrespeilungen 1987
  4. Jahrespeilungen 1988
  5. Jahrespeilungen 1989
  6. Jahrespeilungen 1990
  7. Jahrespeilungen 1991
  8. Jahrespeilungen 1992

(Anmerkung: Bei der Erstellung des digitalen Geländemodelles für das mathematische Tidemodell wurden für jeden Bereich des Elbeästuars jeweils die

aktuellsten in der Peildatenbank vorhandenen Daten dieses Gebietes benutzt!)

- *Peildaten* des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide, Abt. Wasserwirtschaft, Dezernat Gewässerkunde Büsum für den Bereich des *Watts zwischen Neufeld und Trischen*:
  1. Peilungen 1984
  2. Peilungen 1985
  3. Peilungen 1987
  4. Peilungen 1988
- *Peildaten* des Amtes für Strom- und Hafengebäude der Wirtschaftsbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg für den Bereich der *Delegationsstrecke* (HT-SB 23):
  1. Jahrespeilungen 1991
- *Peildaten* des WSA Lauenburg für den Bereich der *oberen Tideelbe*:
  1. Querprofilpeilungen 1986
  2. Querprofilpeilungen 1990

#### **Kartenmaterial:**

- Luftbildkarten
  1. Bundeswasserstrassenkarte 1:2000 (Luftbild), Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsgeschichte Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg, 1985, Blätter 07-54 bis 07-79.
  2. Luftbildkarten von Hamburg 1:5000, Herausgeber: Vermessungsamt der Freien und Hansestadt Hamburg. Blätter für den Bereich von Elbe-Kilometer 608 bis 639, Aufnahmedaten 1991 bis 1993.
  3. Karten der Bundeswasserstrassen 1:5000 Luftbildplan, Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsgeschichte Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 1987. Blätter für den Bereich von Elbe-Kilometer 631,5 bis 689.
- Tiefenkarten
  1. Elbe 1:10000, Hauptpeilung 1988, Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsgeschichte Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg. Blätter 1 bis 8.
  2. Tiefenkarte der Elbe von Elbe 1 bis St.Margarethen 1991 1:20000, Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsgeschichte Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven 1994. Blätter 1 bis 4.
- Sonstige Karten
  1. Der Hafen von Hamburg 1:10000. Herausgeber: Freie und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafengebäude 1986.

2. Bundeswasserstrassenkarte 1:2000, Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg, 1985, Blätter 07-54 bis 07-79.

### **3.1.2. Küstenlinie**

Die landseitige Berandung (Küstenlinie) des Modellgebietes stimmt mit der MThw-Linie überein; diese wurde den im Abschnitt 3.1.1 genannten Karten entnommen.

### **3.1.3. Strombauwerke**

Für die Erstellung des digitalen Geländemodells werden auch Angaben zur Lage der Strombauwerke und des Fahrwassers benötigt; es wurden folgende Informationen ausgewertet:

- Die Lage der Strombauwerke wurde den im Abschnitt 3.1.1 genannten Karten entnommen.
- Die Höhenlage der Strombauwerke wurde vom jeweiligen Wasser- und Schifffahrtsamt bzw. Strom- und Hafenbau mitgeteilt.

### **3.1.4. Kartennull-Bezug im Untersuchungsgebiet**

KN-Bezug im Bereich der Elbe von Bunthaus bis zur Außenelbe nach Angaben der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord und Strom- und Hafenbau sowie des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie (Bezug alte Elbekilometer):

- Bereich der Freien und Hansestadt Hamburg (Norderelbe):
  1. konstant für Km 610.25 - 612.00 auf NN - 1.10 m
  2. konstant für Km 612.00 - 614.15 auf NN - 1.30 m
  3. konstant für Km 614.15 - 625.58 auf NN - 1.40 m
- Bereich der Freien und Hansestadt Hamburg (Süderelbe):
  1. konstant für Km 610.15 - 613.22 auf NN - 1.20 m
  2. konstant für Km 613.22 - 615.00 auf NN - 1.30 m
  3. konstant für Km 615.00 - 624.00 auf NN - 1.40 m
- Elbe:
  1. konstant für Km 625.58 - 638.90 auf NN - 1.40 m
- Bereich des Wasser- und Schifffahrtsamtes Hamburg:

1. konstant für Km 638.90 - 689.10 auf NN - 1.40 m
- Bereich des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven: Das KN(1988) wird durch die lineare Verbindung folgender Höhen definiert:
  1. Km 689.10 NN - 1.40 m
  2. Km 696.50 NN - 1.46 m
  3. Km 703.80 NN - 1.53 m
  4. Km 714.20 NN - 1.62 m
  5. Km 724.00 NN - 1.73 m
  6. Km 745.60 NN - 1.78 m

### 3.1.5. Gitternetzgenerierung

Die in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Informationsquellen waren die Ausgangsbasis zur Erzeugung des Finite Differenzen Gitters (für TRIM-2D) für die hydro-numerischen Modelluntersuchungen. Das Gitternetz wurde für folgendes Modellgebiet erstellt (siehe Informationssystem Elbe-CD):

- das Gitternetz umfaßt die *Teilsysteme* der Unter- und Außenelbe, des Hamburger Stromspaltungsgebietes und der oberen Tideelbe zwischen Bunthaus und dem Wehr bei Geesthacht
- die *seeseitige Berandung* wird durch die Linie Cuxhaven-Sahlenburg - Neuwerk - Nigehörn (dabei den höchsten Wattrücken folgend) - Bake A - Bake Z - Dieksand südlich des Trischen Damms beschrieben
- die *landseitige Grenze* entspricht der MThw-Linie; das Teilsystem obere Tideelbe wurde bis zum Wehr bei Geesthacht nachgebildet
- die Nebenflüsse der Elbe wurden in dem zweidimensional-tiefengemittelten, mathematischen Modell der Elbe nicht nachgebildet

Zum Zwecke der Verifikation des mathematischen Tidemodells des Elbeästuars wurden im Anschluß an die Gitternetzgenerierung Tiefenlinienpläne im Maßstab 1 : 20000 und 1:10000 erstellt und mit zur Verfügung stehenden Kartenwerken verglichen, so daß Unstimmigkeiten aufgedeckt und beseitigt werden konnten.

#### 3.1.5.1 Das Finite Differenzen Gitter

Bei der Erzeugung des Gitternetzes für das hydro-numerische Verfahren TRIM-2D wurde wie folgt vorgegangen:

1. Festlegung der Gitterweite
2. Festlegung der Lage des Gitters im Raum

3. Entscheidung für jedes Gitterelement ob es an Land oder im Wasser liegt
4. Belegung der im Wasser liegenden Elemente mit Höhenwerten.

Das Vorgehen bei den o.g. Punkten soll, da es von zentraler Bedeutung für die Qualität der Resultate der Simulationen ist, näher beschrieben werden.

Die Festlegung der Gitterweite erfolgt in erster Linie nach physikalischen Gesichtspunkten: Das gesamte Untersuchungsgebiet umfaßt zwar die Elbe in einer Länge von ca. 165 km, die hydraulisch wichtigen und wirksamen Strukturen sind jedoch erheblich kleiner. Besonders hervorzuheben ist die Fahrrinnttrasse mit einer Breite von 180 m im Hamburger Hafen bis zu 500 m im Außenelbebereich.

Im Rahmen der geplanten Anpassung des Fahrwassers der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt sollen Vertiefungen, Verlagerungen, Verbreiterungen und Verengungen untersucht werden. Diese geometrischen Systemveränderungen müssen hinreichend genau durch das Gitternetz des Modells nachgebildet, d.h. approximiert werden, um die hydraulischen Folgen dieser Veränderung berechnen zu können.

Der o.g. Argumentation folgend wäre eine Gitterweite von wenigen Metern wünschenswert. Dem stehen aber verschiedene Hemmnisse entgegen: Mit der Verkleinerung der Gitterweite steigt die Anzahl der Gitterelemente. Eine Halbierung der Gitterweite führt zu einer Vervierfachung der Anzahl der Gitterelemente und damit zu einem Anstieg des Bedarfs an Rechnerleistung. Einerseits wird mehr Haupt- und Plattenspeicher benötigt, andererseits wird die benötigte CPU-Zeit länger. So sind die zur Verfügung stehenden Computerressourcen und die zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit der die Gitterweite nach unten hin limitierende Faktor und es ergibt sich die zu wählende Gitterweite als Kompromiß aus der nahezu exakten Approximation, dem technisch Machbaren und dem wirtschaftlichen Einsatz der zur Verfügung stehenden Computerressourcen.

Im Vordergrund muß jedoch stehen: Das Gitternetz muß die hydraulisch wirksamen Strukturen des Untersuchungsgebietes sowie die geometrischen Systemveränderungen infolge der geplanten Anpassung mit hinreichender Genauigkeit nachbilden können.

Für das mathematische Tidemodell der Elbe wurde aus den o.g. Gründen eine Gitterweite von 50\*50 m gewählt.

Die Ausrichtung des Gitters im Raum erfolgte so, daß das Gitter in Nord - Süd bzw. in Ost - West-Richtung liegt.

Durch die Kenntnis der in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Küstenlinie konnte die Grenze zwischen Land und Wasser bestimmt werden und die Landelemente als solche markiert werden.

Als letzter Schritt bei der Gitternetzgenerierung erfolgte die Belegung der im Wasser liegenden (feuchten) Elemente mit Höhenwerten. Diese Höhenwerte sollen die mittlere Höhenlage der Fläche des Elementes repräsentieren. Da ca. 325000 Elemente mit Höhen zu belegen waren, konnte dies nicht manuell geschehen. Es wurde ein Algorithmus entwickelt welcher die feuchten Elemente mit digital vorliegenden Höhendaten aus den in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Datenquellen belegt und unter Berücksichtigung vorhandener Strukturen (Inseln, Bauwerke, etc.) interpoliert. Nur wo keine digitalen Daten verfügbar waren (vorwiegend Flachwassergebiete), wurden die in Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Karten benutzt. Dabei wurde die erste Topographie für das Jahr 1987 erzeugt (unter Verwendung der Daten aus 1985, 1986 und 1987). Immer wenn neuere digitale Daten verfügbar waren, wurde die Topographie für diese Gebiete auf den neuesten Stand gebracht.

Dieses Vorgehen führt zu einer qualitativ hochwertigen Modelltopographie, die für jeden Bereich des Elbeästuars die bis 1992 jeweils aktuelle verfügbare Information enthält. Das Gitternetz des Finite Differenzen Verfahrens TRIM-2D kann zusammenfassend für den *Ist-Zustand* durch folgende Angaben näher beschrieben werden:

- Größe der Gitternetzes
  - Anzahl der Gitterzellen in Ost-West-Richtung: ca. 2670
  - Anzahl der Gitterzellen in Nord-Süd-Richtung: ca. 1380
  - Gesamtzahl der feuchten Gitterzellen: ca. 325000
- räumliche Diskretisierung
  - Gitterweite in Ost-West-Richtung:  $\Delta x = 50 \text{ m}$
  - Gitterweite in Nord-Süd-Richtung:  $\Delta y = 50 \text{ m}$
- Sonstiges
  - gleichmäßig hohe Auflösung (Abstand zwischen zwei benachbarten Berechnungspunkten) im gesamten Modellgebiet

### 3.1.6. Graphische Darstellungen

Die mit den vorstehend beschriebenen Schritten generierte Topographie ist auf dem Informationssystem Elbe-CD sowohl als ganzes als auch in Ausschnitten dargestellt.



### 3.2. Hydrologische Situation

Die numerischen Berechnungen wurden für den Zeitraum vom 30.6.1992 bis zum 13.7.1992 durchgeführt. Hierbei zeichnet sich der im Rahmen der Modelleichung verwendete Zeitraum durch folgende Merkmale aus:

1. Meteorologisch meist ruhige Wetterlage, die mittlere Windgeschwindigkeit betrug 6.4 m/s entsprechend 4 Bft; nur an 2 Tagen überschritt die Windgeschwindigkeit den Wert 6 Bft (siehe Bild 3.1). Daher konnte auf eine Berücksichtigung des Windeinflusses bei der Durchführung der Simulationsrechnung verzichtet werden. Allerdings ist es notwendig, den Einfluß des Windes bei der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere bei dem Vergleich Natur - Modell, zu berücksichtigen. Die Windmessungen für die Station Scharhörn wurden durch Strom und Hafengebäude bereitgestellt.
2. Der Tidehub während dieses Zeitraums entspricht in etwa mittleren Verhältnissen, wie aus den nachfolgend aufgeführten 10-jährigen Mittelwerten der Jahresreihe 1982/1991 für Cuxhaven bzw. den 5-jährigen Mittelwerten der Jahresreihe für St. Pauli (Hamburg 1995) hervorgeht, dahinter werden in Klammern jeweils die Mittelwerte für den Simulationszeitraum angegeben:

1. Pegel Cuxhaven Steubenhöft
  - (a) MThw = +1.52 m (Thw = +1.44 m)
  - (b) MTnw = -1.47 m (Tnw = -1.60 m)
  - (c) MThb = +2.99 m (Thb = 3.04 m)
2. Pegel St. Pauli
  - (a) MThw = +2.06 m (Thw = +1.98 m)
  - (b) MTnw = -1.36 m (Tnw = -1.62 m)
  - (c) MThb = +3.42 m (Thb = 3.60 m)

Diese Situation wird auch in Bild 3.3 dargestellt: Ersichtlich ist, daß die mittleren Hochwasserstände nur wenig (ca. 5 cm) unterhalb der 10-jährigen bzw. 5-jährigen Mittelwerte liegen, während die mittleren Niedrigwasserstände während des Simulationszeitraumes von See Richtung Oberstrom zunehmend vom 5-10-jährigen Mittel abweichen (bis ca. 25 cm bei Km 615 (Pegel Schöpfstelle)).

Die großen Abweichungen der Tidewasserstände des Simulationszeitraumes von den 5-10-jährigen Mittelwerten sind oberhalb von Km 615 auf den unterdurchschnittlichen Oberwasserzufluß am Wehr Geesthacht innerhalb des Simulationszeitraumes zurückzuführen (siehe Bild 3.9). Unterhalb von Km 615 bis ca. Brunsbüttel ist das 5-10-jährige Mittel des Niedrigwasserstandes 1982/1991 nicht mehr typisch für heutige Verhältnisse. So ist nach 1988 bis 1992 der Niedrigwasserstand in St. Pauli im Laufe der Jahre bis zu 25 cm tiefer eingetreten (siehe Bild 3.5).

Weiterhin liegt eine Kopplung an die Wasserstandsverhältnisse in der Deutschen Bucht vor, die durch die großräumige Luftdruckverteilung und den lokalen Wind gesteuert werden. Bild 3.2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtung im Simulationszeitraum und im ganzen Jahr 1992 in 45 Grad breiten Sektoren. Hier ist kein Grund für eine Wasserstandsabsenkung in der Deutschen Bucht zu finden, da der Wind häufiger aus wasserstandserhöhenden Sektoren weht als aus solchen, die den Wasserstand erniedrigen.

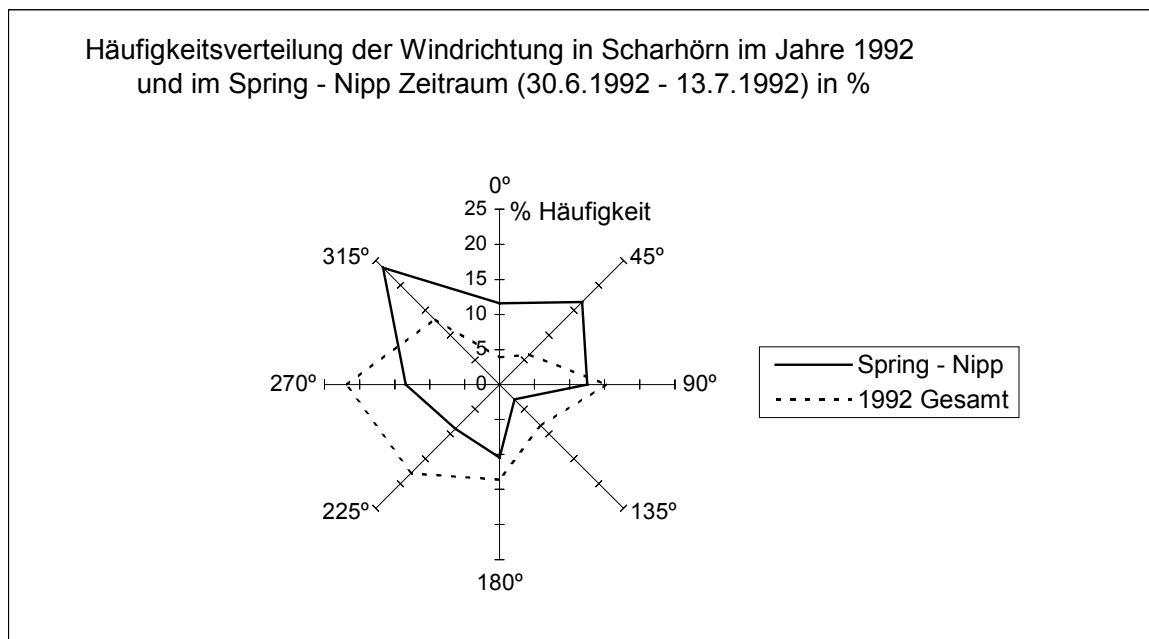


Abb. 3.1: Häufigkeitsverteilung der Windrichtung im Simulationszeitraum und im ganzen Jahr 1992 in 45° breiten Sektoren

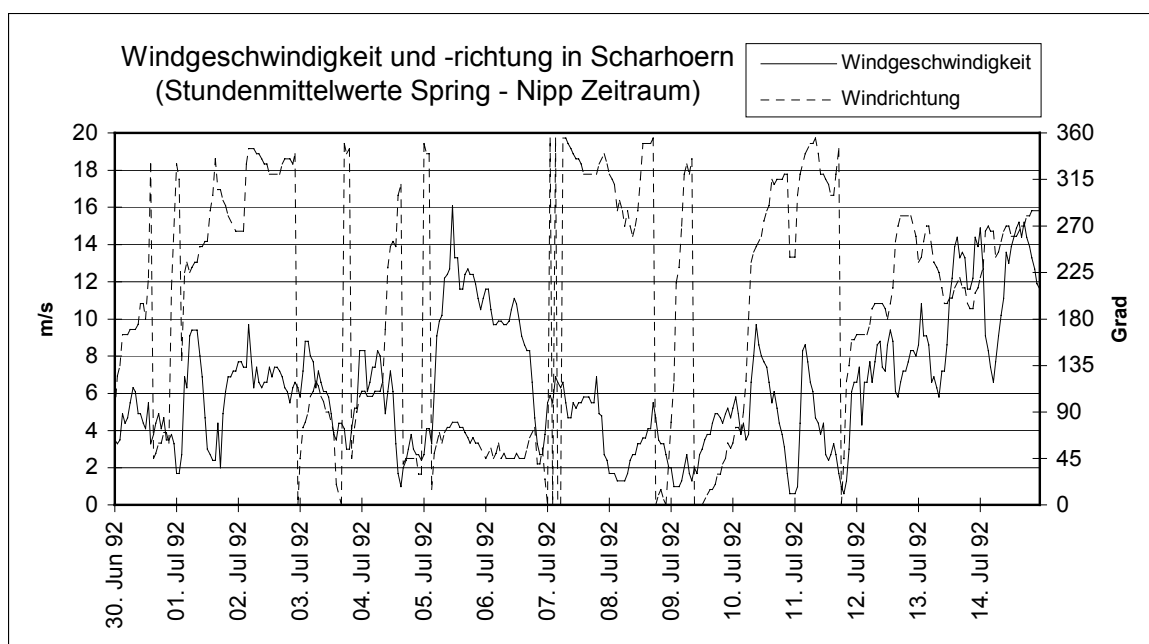


Abb. 3.2: Windgeschwindigkeit und -richtung während des Simualtionszeitraums

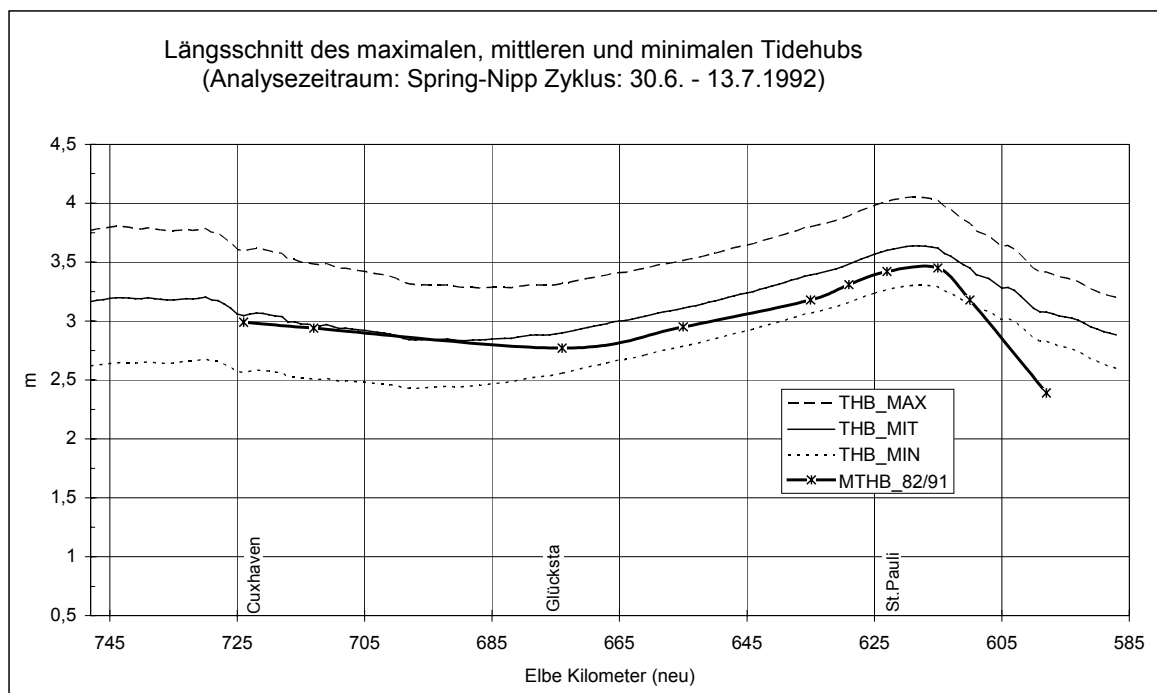


Abb. 3.3: Tidehub entlang der Kilometrierung der Elbe während des Simulationszeitraums und 10-Jahresmittelwert 1982/91

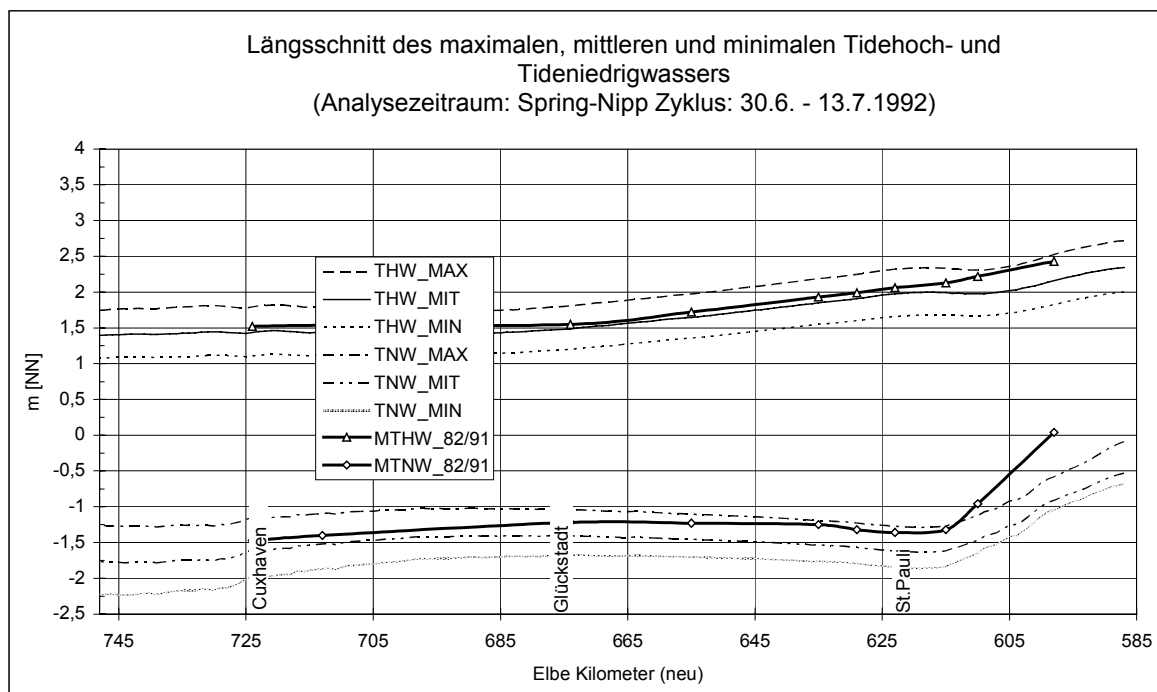


Abb. 3.4: Hoch- und Niedrigwasser entlang der Kilometrierung der Elbe während des Simulationszeitraums und 10-Jahresmittelwert 1982/91

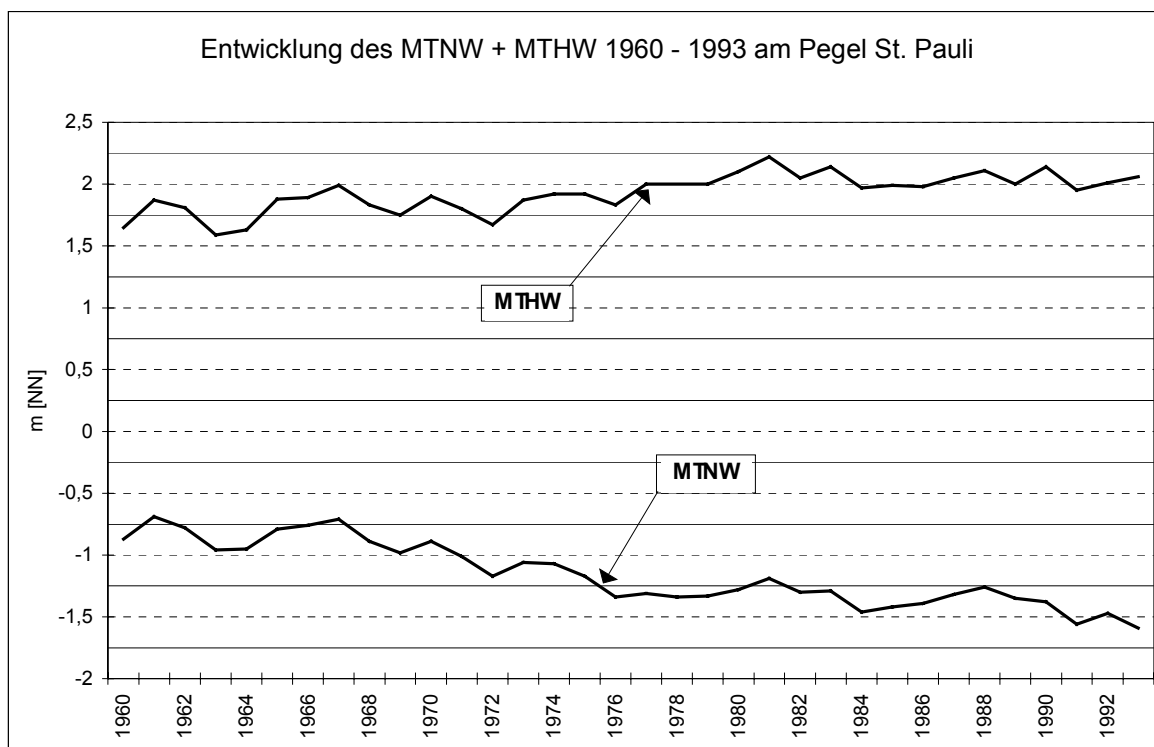


Abb. 3.5: Entwicklung des MTnw und MThw 1960 bis 1993 am Pegel St. Pauli (Quelle: Daten Pegel St. Pauli)

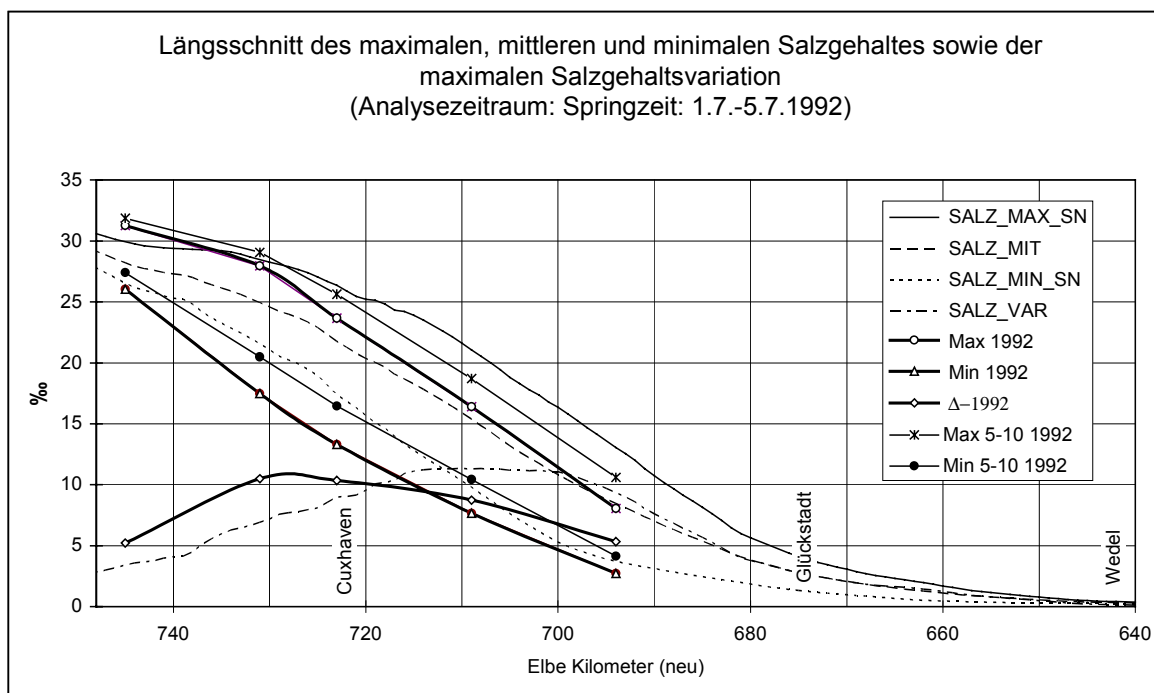


Abb. 3.6: Salzgehaltsverteilung entlang der Kilometrierung der Elbe während des Simulationszeitraum

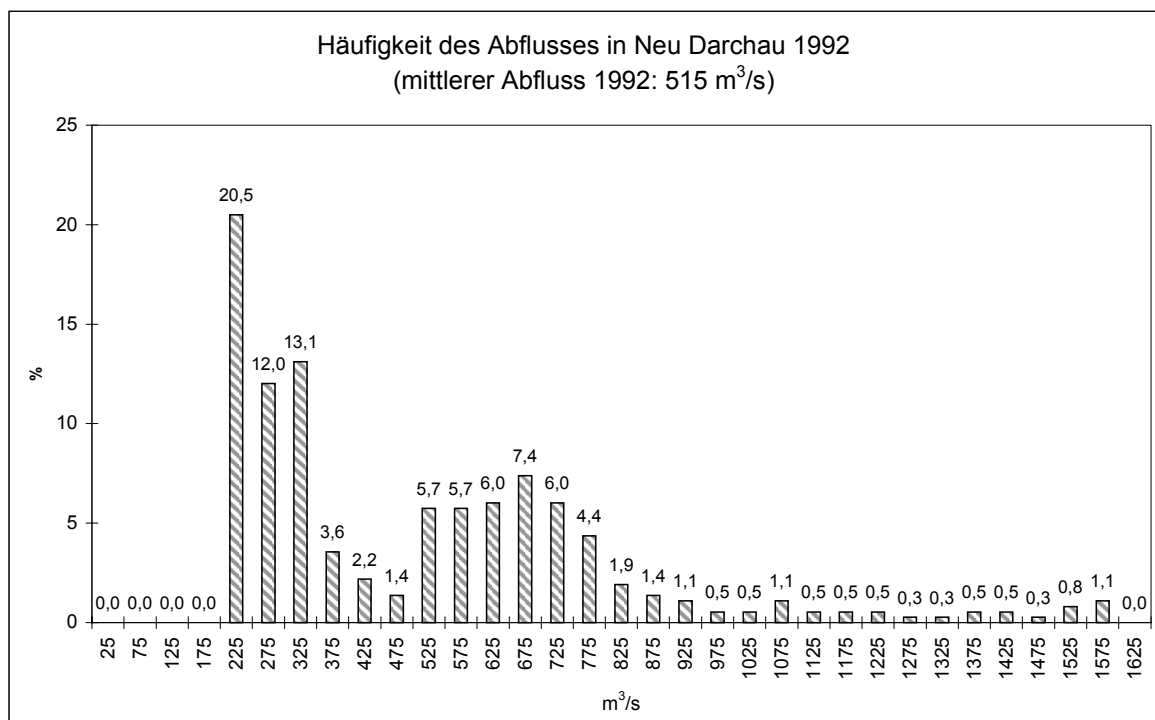


Abb. 3.7: Häufigkeit des Abflusses an der Meßstelle Neu Darchau 1992

Der Salzgehalt in der Elbe ist als Folge des längeranhaltenden relativ niedrigen Oberwasserzuflusses gegenüber dem Mittel der Jahre 1988 - 1990 (WSD-Nord, 1992) erhöht. So ist die gesamte Brackwasserzone in der Elbe gegenüber den mittleren Verhältnissen für Sommer-Herbst 1992 stromauf verschoben. In Bild 3.6 ist die Salzgehaltsverteilung entlang der Kilometrierung der Elbe für den Simulationszeitraum, für den Jahresmittelwert 1992 und für den Mittelwert der Monate Mai bis Oktober 1992 dargestellt (Die Mittelwerte wurden aus Daten des WSA Cuxhaven berechnet). Diese Darstellung verdeutlicht, daß der Simulationszeitraum typisch für die Monate mit geringerem Oberwasserzufluß (Mai bis Oktober) ist.

Der mittlere Oberwasserzufluß der Elbe bei Neu Darchau beträgt im Simulationszeitraum ca. 300 m<sup>3</sup> und damit erheblich weniger als das Jahresmittel des Jahres 1992 von 515 m<sup>3</sup>. Der langjährige Mittelwert für den Oberwasserzufluß liegt bei 715 m<sup>3</sup>/s (Sommer: 575 m<sup>3</sup>/s, Winter: 858 m<sup>3</sup>/s),(Jahresreihe 1926/1991, HAM-BURG, 1995) Typisch ist der Zeitraum jedoch insofern, als daß zu 45% der Zeit des Jahres 1992 ein Oberwasserzufluß von 200 - 325 m<sup>3</sup> herrscht (siehe Bild 3.7)

### **3.3. Meßkampagne**

Zur Steuerung eines mathematischen Tidemodelles werden Randwerte benötigt, die aus (in der Regel) gemessenen Daten aufbereitet werden; darüberhinaus sind gemessene Daten auch zur Modell-Verifikation notwendig.

#### **3.3.1. Pegelstationen**

Für die Verifikation des mathematischen Tidemodelles des Elbeästuars werden der numerisch berechnete Wasserstand mit gemessenen Wasserstandszeitreihen für die in Tabelle 3.1 aufgeführten Stationen verglichen. Die Pegelzeitreihen wurden bei der BAW-AK von Originalpegelbögen oder Kopien digitalisiert, korrigiert und auf EDV-Datenträger übertragen. Die notwendigen Korrekturen erfolgten auf der Basis der zu jedem Pegelbogen zugehörigen Eintragungen auf dem Pegelbeobachtungsbogen.

#### **3.3.2. Zeitweilig verankerte Meßgeräte**

Neben den Daten der fest installierten Pegel standen zusätzlich die während der Meßkampagne ELBEX '92, Phase I gemessenen Daten der nachfolgend aufgeführten, zeitweilig eingesetzten Meßgeräte zur Verfügung (siehe auch Bild 3.8).

##### **3.3.2.1. Pegel**

<b>Pegelstationen (Übersicht)</b>			
<i>Pegel</i>	<i>Kurz- bezeichnung</i>	<i>Gebiet</i>	<i>Elbe km (alt)</i>
Geesthacht Wehr	GEW	Obere Tideelbe	585.9
Drennhaus	DHS	Obere Tideelbe	591.4
Zollenspieker	ZOL	Obere Tideelbe	598.2
Bunthaus	BUN	Obere Tideelbe	609.8
Schöpfstelle	SOP	Norderelbe (FHH)	615.3 N
St. Pauli	STP	Norderelbe (FHH)	623.1 N
Harburg	HAR	Süderelbe	615.0 S
Seemannshoef	SEE	Unternelbe	628.9
Cranz	CRA	Unternelbe	634.4
Schulau	SUL	Unternelbe	641.0
Lühort	LUH	Unternelbe	645.5
Hetlingen	HET	Unternelbe	650.5
Stadersand	STA	Unternelbe	654.8
Grauerort	GRA	Unternelbe	660.6
Krautsand	KRA	Unternelbe	671.1
Glückstadt	GLU	Unternelbe	674.3
Brokdorf	BRO	Unternelbe	684.0
Brunsbüttel	BRU	Unternelbe	696.5
Osteriff	OST	Unternelbe	703.8
Otterndorf	OTT	Unternelbe	714.2
Steubenhöft	SEU	Unternelbe	724.0
Bake W	BKW	Außenelbe	ca. 734
Bake F	BKF	Außenelbe	733.7
Bake C	BKC	Außenelbe	ca. 745
Vogelsand	VOG	Außenelbe	745.6
Bake A	BKA	Außenelbe	ca. 756
Bake C	BKC	Außenelbe	ca. 756
Gelbsand Nord	GSN	Norderelbe	

Tab. 3.1 Liste der Pegel (mit Kurzbezeichnungen), welche für die Verifikation und die Steuerung des Elbmodells herangezogen wurden

Der zeitvariable Wasserstand entlang des nördlichen seeseitigen Modellrandes wurde an den in Tabelle 3.2 aufgeführten Positionen mit Hilfe von 7 Rohrpegeln des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven in der Zeit vom 18. 06. 1992 bis zum 10. 07. 1992 erfaßt. Die Registrierungen der Pegel NE 5 und NE 6 ergaben jedoch nur ab 22.6.1992 bzw. 24.6.1992 verwertbare Daten.



Die Aufzeichnungen der Rohrpegel wurden der BAW-AK ebenfalls als Original-Pegelbögen vom Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven zur Verfügung gestellt.

<b>Rohrpegel (Übersicht)</b>			
<i>Station</i>	<i>Kurz- bezeichnung</i>	<i>Lagekoordinaten</i>	
		<i>Rechtswert</i>	<i>Hochwert</i>
Norderelbe 1	NE 1	3482380	5987200
Norderelbe 2	NE 2	3468740	5987200
Norderelbe 3	NE 3	3461920	5987200
Norderelbe 4	NE 4	3475560	5987200
Norderelbe 5	NE 5	3458510	5987200
Norderelbe 6	NE 6	3465330	5987200
Norderelbe 8	NE 8	3478970	5987200

Tab. 3.2: Liste der Rohrpegel mit Kurzbezeichnungen und Positionsangaben

### 3.3.2.2. Strömungsmeßgeräte

Die Strömungsgeschwindigkeit in Außen- und Unterelbe im Bereich des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven wurde nach Betrag und Richtung von Ende Juni bis Mitte Juli des Jahres 1992 ( **ELBEX '92, Phase I** ) an den in Tabelle 3.3 aufgeführten Meßpositionen erfaßt. Die Aufzeichnungen der Strömungsmeßgeräte wurden der BAW-AK auf EDV-Datenträger durch das Wasser- und Schiffsamt Cuxhaven zur Verfügung gestellt.

<b>Strömungsmeßgeräte (ELBEX '92, Phase I)</b>			
<i>Station</i>	<i>Kurz- bezeichnung</i>	<i>Lagekoordinaten</i>	
		<i>Rechtswert</i>	<i>Hochwert</i>
Neuwerk Reede Süd	Pos 1.1	3467987	5980705
Neuwerk Reede Nord	Pos 1.2	3468000	5981590
Neuer Luechtergrund Süd	Pos 1.4	3467992	5983122
Neuer Luechtergrund Nord	Pos 1.5	3468007	5983603
Norderrinne	Pos 1.6	3468000	5984460
Gelbsand Süd	Pos 1.7	3467996	5985093
Leitdamm km 7	Pos 2.1	3475720	5978870
Bake F	Pos 2.2	3476440	5978870
Norderrinne bei Bake W	Pos 2.4	3478043	5979978
Zehnerloch Süd	Pos 2.5	3478699	5980977
Zehnerloch	Pos 2.6	3478981	5981870
Tonne 32a	Pos 3.2	3481220	5973300
Kratzsand Nord	Pos 3.3	3482040	5973540
Kratzsand Ost	Pos 3.4	3483280	5973930
Tonne 40	Pos 4.2	3487180	5968280
Medemgrund West	Pos 4.3	3487180	5967580
Medemgrund Nordwest	Pos 4.4	3487180	5969680
Medem Reede Süd	Pos 4.5	3487180	5970680
Medem Reede	Pos 4.6	3487180	5971730
Otterndorf	Pos 5.1	3494000	5967630
Medemgrund Südost	Pos 5.3	3494000	5968660
Medemgrund Ost	Pos 5.4	3494000	5969250
Medem Rinne	Pos 5.5	3494000	5969780
Medem Rinne Nord	Pos 5.6	3494000	5970570
Balje	Pos 6.1	3504420	5970430
Neufeld Reede Südost	Pos 6.3	3504000	5971500
Neufeld Reede Ost	Pos 6.4	3503750	5972070
Neufeld Reede Nordost	Pos 6.5	3503500	5972690

Tab. 3.3: Liste der während der Meßkampagne ELBEX '92 Phase I eingesetzten Strömungsmeßgeräte mit Kurzbezeichnungen und Positionsangaben.

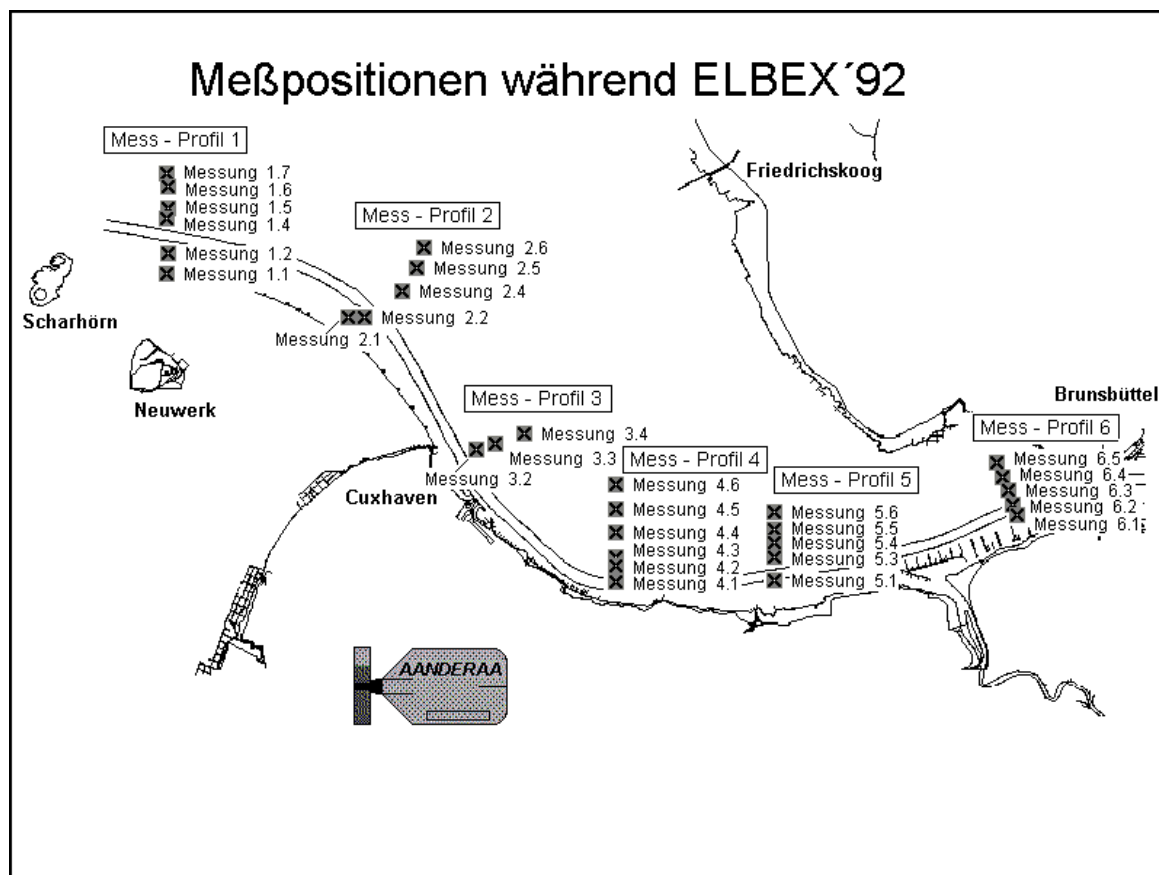


Abb. 3.8: Positionen der während ELBEX '92 Phase I zeitweiligim Bereich Außen- und Unterelbe ausgebrachten Meßgeräte

### 3.3.2.3. Leitfähigkeitsmeßgeräte

Die Leitfähigkeit und die Wassertemperatur in Außen- und Unterelbe im Bereich des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven wurde von Ende Juni bis Mitte Juli des Jahres 1992 (**ELBEX '92, Phase I**) an den in Tabelle 3.4 aufgeführten Meßpositionen erfasst. Die Aufzeichnungen der Meßgeräte wurden der BAW-AK auf EDV-Datenträger von seiten des Wasser- und Schiffsamtes Cuxhaven zur Verfügung gestellt. Aus der Leitfähigkeit und der Temperatur wurde der Salzgehalt des Wassers berechnet.

<b>Leitfähigkeitsmeßgeräte (ELBEX'92, Phase I)</b>			
<i>Station</i>	<i>Kurz- bezeichnung</i>	<i>Lagekoordinaten</i>	
		<i>Rechtswert</i>	<i>Hochwert</i>
Neuwerk Reede Süd	Pos 1.1	3467987	5980705
Neuwerk Reede Nord	Pos 1.2	3468000	5981590
Neuer Luechtergrund Süd	Pos 1.4	3467992	5983122
Neuer Luechtergrund Nord	Pos 1.5	3468007	5983603
Norderrinne	Pos 1.6	3468000	5984460
Gelbsand Süd	Pos 1.7	3467996	5985093
Leitdamm km 7	Pos 2.1	3475720	5978870
Bake F	Pos 2.2	3476440	5978870
Norderrinne bei Bake W	Pos 2.4	3478043	5979978
Zehnerloch Süd	Pos 2.5	3478699	5980977
Zehnerloch	Pos 2.6	3478981	5981870
Otterndorf	Pos 5.1	3494000	5967630
Tonne 46	Pos 5.2	3494000	5968040
Medemgrund Südost	Pos 5.3	3494000	5968660
Medemgrund Ost	Pos 5.4	3494000	5969250
Medem Rinne Nord	Pos 5.6	3494000	5970570
Neufeld Reede Nordost	Pos 6.5	3503500	5972690

Tab. 3.4: Liste der während der Meßkampagne ELBEX '92 Phase I benutzten Leitfähigkeits- und Temperaturmeßgeräte mit Kurzbezeichnungen und Positionsangaben

### 3.4. Steuerung des mathematischen Tidemodells

Für den Betrieb des mathematischen Elbemodels müssen Randwerte sowie weitere Koeffizienten und Parameter für die Simulation vorgegeben werden; in diesem Abschnitt wird das Vorgehen bei der Erzeugung der Randwerte des mathematischen Elbemodels beschrieben. Ferner werden die für die Parameter und Koeffizienten gewählten Werte in einer Tabelle zusammengefaßt.

#### 3.4.1. Randwerte am seeseitigen Modellrand

Der seeseitige Modellrand ist (siehe 3.1.5) durch die Linie Cuxhaven-Sahlenburg - Neuwerk - Nigehörn (dabei den höchsten Wattrücken folgend) Bake A - Bake Z - Dieksand südlich des Trischendamms beschrieben. Etwa zwei Drittel des südlichen Teils des eben beschriebenen Modellrandes ist während des größten Teils einer Tide trockengefallen. Aus diesem Grunde gibt es dort keine Wasserstandsmessungen, so daß dieser Rand als geschlossen, d.h. wasserundurchlässig angenommen wird. Diese Annahme ist in erster Näherung richtig, führt aber, wie spä-

ter gezeigt wird, in unmittelbarer Nähe dieses Randes zu lokalen Abweichungen bei der Simulation des Salzgehaltes. Der Rest des oben beschriebenen seeseitigen Randes ist offen, also soweit nicht trockengefallen wasserdurchströmt. Für diesen Teil des Randes muß der zeit- und ortsabhängige Wasserstand für den gesamten Simulationszeitraum vorgegeben werden; die hierfür benötigten Wasserstandswerte wurden aus den Daten der Pegel Bake A und Bake Z sowie den in Abschnitt 3.3.2 genannten Pegeln gewonnen:

- Der offene Westrand wurde in 3 Teile zerlegt, die unterschiedlich mit Randwerten versorgt wurden: Der südliche Teil wurde mit Werten der Bake A, der nördliche mit Werten der Bake Z und der mittlere mit einer in Phase und Amplitude geeigneten Mittelung aus beiden gesteuert, wobei die Gitterpunkte auf den jeweiligen Teilen mit identischen Werten belegt wurden.
- Der offene Nordrand wurde in 7 Teile zwischen 2500 und 7600 m Länge zerlegt, für die mit Hilfe der Messungen der in 3.3.2 genannten Pegel eine Übertragungsfunktion für die Wasserstandswerte der Bake Z gefunden wurde, so daß für diesen Rand analog zum Westrand vorgegangen werden konnte.

Für die Randwerte des Salzgehaltes an den o.g. Teilen des offenen Randes wurden Übertragungsfunktionen aus den in 3.3.2 angegebenen randnahen Leitfähigkeits- und Temperaturmessungen und den Wasserstandswerten von Bake Z erstellt, da keine Messungen in unmittelbarer Randnähe vorlagen. Da der Salzgehalt nur in seiner zeitlichen Variation, nicht jedoch in seinem Absolutwert mit dem Wasserstand gekoppelt ist, ist dieses Vorgehen nur dann vertretbar, wenn sich der mittlere Salzgehalt in Randnähe während der Simulation nur wenig verändert. Dies war für den simulierten Zeitraum der Fall, da der Oberwasserzufluß (siehe auch Bild 3.9):

- bereits über einen Zeitraum von ca. 1 Monat vor Simulationsbeginn nahezu konstant war und
- während der Simulation ebenfalls nur unwesentlich variierte.

Es kann daher davon ausgegangen werden, daß die mittlere Lage der Salzgehaltszone in der Elbe im Simulationszeitraum nahezu unverändert war. Dies wird auch durch die Salzgehaltsmessungen (siehe 3.3.2) belegt.

Es ist aber festzuhalten, daß dieses Vorgehen nicht zu idealen Ergebnissen führen kann. Besonders hat die Annahme des auf dem Neuwerker und Scharhörner Watt geschlossenen Randes negative Auswirkungen auf die Simulation des Salzgehaltes in Randnähe, da offenbar bei Flut salzhaltiges Wasser über die Watten in die Elbe einströmt und dort den Salzgehalt erhöht. Auf die Berechnung der ausbaubedingten Veränderungen hat diese Vorgehensweise aber keinen negativen Einfluß.

### 3.4.2. Randwerte am Wehr Geesthacht

Auf dem landseitigen offenen Rand am Wehr Geesthacht wurde als Randwert der zeitabhängige Oberwasserzufluß der Meßstelle Neu Darchau wie in Bild 3.9 dargestellt mit einem Zeitversatz von +24 Stunden sowie ein konstanter Wert für den Salzgehalt (0.25 ‰) für den gesamten Simulationszeitraum spezifiziert. 24 Stunden ist laut Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg die Zeit, die im Mittel vergeht, bis ein in Neu Darchau gemessener Durchflußwert am Wehr Geesthacht eintritt.

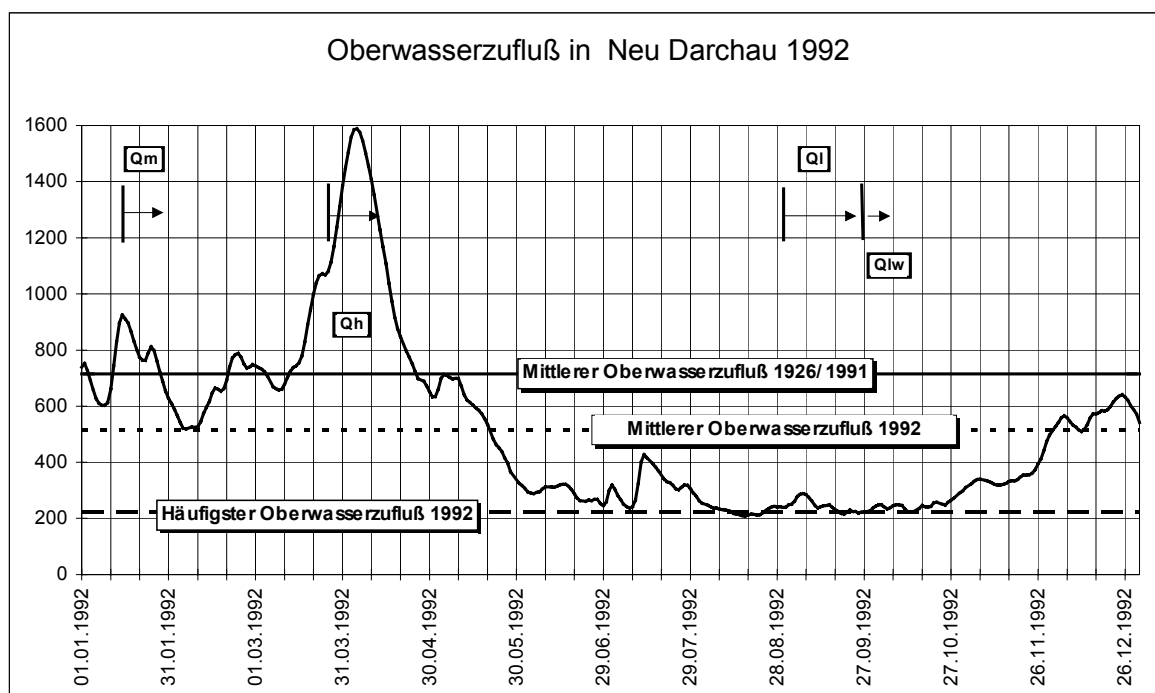


Abb. 3.9: Oberwasserzufluß in Neu Darchau im Jahre 1992

### 3.4.3. Koeffizienten und Parameter

Parameter und Koeffizienten - Elbmodell TRIM-2D	
Zeitschritt:	30 [s]
Bodenreibungskoeffizient $C_D$ : (Gesamtgebiet)	0,00185 [-] entspricht $C_z \cong 72 [m^{1/2} s^{-1}]$
turbulente Wirbelviskosität $D_{\mu t}$ :	1,0 [kg/(m s)]
turbulenter Diffusionskoeffizient $\Gamma_t$ :	20 [kg/(m s)]

Tab. 3.5: Zusammenstellung wesentlicher Parameter und Koeffizienten für die mit dem hydro-numerischen Verfahren TRIM-2D durchgeführten Simulationsrechnungen.

### 3.5 Ergebnisse

Die in diesem Bericht vorgelegten Daten sind das Ergebnis der Simulationsrechnungen die den Zeitraum vom 30.6.1992 bis zum 13.7.1992 umfassen (Spring - Nipp Zyklus, Springzeit: 1.7.1992 - 5.7.1992, Nippzeit: 8.7.1992 bis 12.7.1992); Luftdruck- und Sturmfluteinflüsse blieben in diesen Simulationsrechnungen unberücksichtigt; diese werden gesondert in einem Sturmflutmodell des Elbeästuars untersucht (siehe Bericht zum Gutachten Sturmfluten).

Mit den Ergebnissen soll gezeigt werden, daß von dem mathematischen Elbemo- dell die maßgebenden, wesentlichen Eigenschaften des natürlichen Systemverhal- tens wiedergegeben werden. Dieses Ziel wird durch einen *quantitativen* Vergleich von berechneten und gemessenen Wasserständen und Strömungsgeschwindigkei- ten - einschließlich der jeweiligen Tidekennwerte - für mehrere, flächenhaft ver- teilte Pegelstandorte und Strömungsmessstellen sowie für den an verschiedenen Leitfähigkeitsmessstellen erfaßten Salzgehalt erreicht.

#### 3.5.1. Genauigkeit von Naturmessungen

Beim Vergleich von berechneten Werten mit in der Natur gemessenen Daten muß stets mit in Betracht gezogen werden, daß die gemessenen Naturdaten fehlerbe- haftet sind, so daß eine absolute Übereinstimmung zwischen Messung und dazu- gehöriger Berechnung unwahrscheinlich ist. Im folgenden werden mögliche Quellen der Unsicherheit beim Erfassen von Naturwerten genannt.

##### 1. Unsicherheiten bei der Bestimmung der Wassertiefe:

Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Wassertiefe mittels Echolotung ist ab- hängig von:

1. der Genauigkeit der Echolotung selbst,
2. der Genauigkeit der Ortung des Peilpunktes und
3. von der Genauigkeit der Beschickung mit der an dem Ort der Peilung zum Zeitpunkt der Peilung auf NN bezogenen vorhandenen Wassertiefe. Die hier erreichbare Genauigkeit wird auf 30 cm geschätzt.

##### 2. Unsicherheiten bei der Bestimmung des Wasserstandes:

Die Bestimmung des Wasserstandes erfolgt an der Elbe größtenteils mit Pegeln, die den Wasserstand durch einen in einem Rohr schwimmenden Körper erfassen. Durch eine Mechanik wird der gemessene Wasserstand auf ein Schreibgerät über- tragen. Die Genauigkeit bei der Bestimmung des Wasserstandes mit Schwim- merpegeln ist abhängig von:

1. der Genauigkeit der geodätischen Einmessung in der Höhe

2. dem Zustand der Pegelmechanik (Präzision der Übertragung)
3. der Sorgfalt des Pegelbeobachters (genaue Bestimmung des Wasserstandes mittels Lichtlot, genaue Bestimmung der Uhrzeit und genaue Einstellung der beiden Variablen am Pegel)
4. der Dämpfung des Pegelzulaufs (Schieberöffnung, Verschlickung)

Weiter bei der Digitalisierung der Wasserstandswerte von Pegelbögen von

1. der Genauigkeit des Digitalisiertabletts
2. dem Verzug des Pegelbogens
3. der Lesbarkeit der Pegelkurven
4. der Vollständigkeit des Pegelbeobachtungsbogens

Nach der Digitalisierung der Wasserstandskurven werden die digitalen Werte nach den Angaben im Beobachtungsbogen korrigiert. Oft tritt der Fall auf, daß der Pegelbeobachter bei einer Kontrolle des Pegels keine Abweichungen zwischen Aufzeichnung und Wasserstandshöhe bzw. Uhrzeit feststellt, bei der nächsten Kontrolle aber bei einem oder beiden Parametern eine Abweichung vorhanden ist. Wenn nun auf dem Bogen keine plötzliche Änderung eines der beiden Parameter zu sehen ist, wird die Korrektur von der vorhergehenden Kontrolle von Null linear ansteigend angebracht. Dies ist sicher nicht immer richtig, denn die Abweichung muß nicht unbedingt sofort nach dem Weggang des Pegelbeobachters nach der ersten Kontrolle aufgetreten sein.

Aus den genannten Gründen wird die Genauigkeit der Bestimmung des Wasserstandes mit  $\pm 2-3$  cm angegeben.

### **3. Unsicherheiten bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit:**

Die Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte während der Meßkampagne ELBEX '92 mit Strömungsmessgeräten der Fa. Aanderaa. Die Geräte sind an einem Draht befestigt, an dessen unteren Ende ein Ankergewicht und an dessen oberen Ende ein Auftriebskörper befestigt ist. Sie messen die Strömungsgeschwindigkeit indem ein Rotor durch die Anströmung gedreht wird. Die Anzahl der Umdrehungen des Rotors pro Zeit ergibt dann ein Maß für die Geschwindigkeit. Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit mit Aanderaa-Geräten ist abhängig von:

1. der Eichung der Geräte vor und nach dem Meßeinsatz und der daraus resultierenden korrekten Beschickung der Daten
2. in der Wassersäule mitgeführtem Material (Verkrautung, Kollision mit sonstigem Treibsel)



3. der Abweichung der Meßkette von der Lotrechten. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist, desto mehr wird die Meßkette der o.b. Anordnung aufgrund ihres eigenen Strömungswiderstandes gegenüber der Lotrechten schiefgezogen. Einerseits verringert sich hierdurch die Meßtiefe in unbekanntem Maß, andererseits ist ab einer gewissen Schiefe die Anströmung der Rotoren, da die Geräte nur bis zu einem bestimmten Grad kardanisch aufgehängt sind nicht mehr korrekt. Eine qualifizierte Aussage über die Genauigkeit der Strömungsmessungen läßt sich aus den o.g. Gründen nicht treffen. Möglich wäre diese nur bei redundanten Messungen, bei gleichzeitigem Betrieb mehrerer Meßgeräte an einem Ort. Festzustellen ist aber, daß die während ELBEX '92 gewonnenen Strömungsmessungen plausibel sind.

#### **4. Unsicherheiten bei der Bestimmung des Salzgehaltes:**

Die Bestimmung des Salzgehaltes erfolgte während der Meßkampagne ELBEX '92 mit Temperatur- und Leitfähigkeitssensoren der Fa. Aanderaa die in einige der oben benannten Strömungsmessgeräte eingebaut waren. Die Leitfähigkeit im Wasser ändert sich in Abhängigkeit von Temperatur und Salzgehalt. Daher ist aus einer Messung der Temperatur und der Leitfähigkeit unter der Annahme der Konstanz der verschiedenen Salzanteile im Wasser der Salzgehalt berechenbar. Die Genauigkeit bei der Bestimmung des Salzgehaltes mit Aanderaa-Geräten ist abhängig von:

1. Der Eichung der Geräte vor und nach dem Meßeinsatz und der daraus resultierenden korrekten Beschickung der Daten.
2. Von der Verschmutzung der Sensoren während des Meßeinsatzes (z.B. durch Bewuchs).
3. Für die Genauigkeit der Meßhöhe über der Sohle gilt das für die Strömungsgeschwindigkeit beschriebene ebenfalls. Bei der Auswertung der während ELBEX '92 gewonnenen Daten wurde festgestellt, daß einige Salzgehaltsdaten nicht korrekt sein konnten, da laut Messung salzreiches, schweres Wasser über salzärmerem, leichtem Wasser lag. Eine daraufhin vorgenommene Nacheichung der betroffenen Sensoren ergab plausible Werte. Eine derartige Plausibilitätsprüfung konnte aber nur für die Positionen vorgenommen werden in denen mehrere Geräte übereinander in einer Meßkette angebracht waren. Für diese Geräte wird die Genauigkeit mit 2 ‰ Salzgehalt angenommen. Bei den übrigen Geräten ist die Unsicherheit größer.

### 3.5.2. Vergleich von Meßdaten mit Rechenergebnissen

Die Qualität der Ergebnisse eines mathematischen Modells wird üblicherweise am Grad der Übereinstimmung der berechneten Werte mit den gemessenen Naturdaten beurteilt. Wie im Vorgegangenen ausgeführt ist diese Übereinstimmung schon durch die Qualität der Naturdaten nur beschränkt möglich. Ein weiterer Grund für die Unwahrscheinlichkeit der Übereinstimmung von Rechnung und Messung ist die eingeschränkte Qualität der Randsteuerung (siehe Abschnitt 3.4.1, fehlende Wasserstandswerte auf dem Scharhörner und Neuwerker Watt, fehlende Salzgehaltswerte am seeseitigen Rand). In Betracht zu ziehen ist weiterhin, daß die Berechnungen ohne Windeinfluss vorgenommen wurden und lokale und globale Wirkungen des Windes daher nicht berücksichtigt sind. Zuletzt muß noch erwähnt werden, daß die Topographie nur annähernd den Zustand des Juni/Juli 1992 darstellt, da einerseits an den Stellen an denen keine Peilungen des Jahres 1992 vorlagen, ältere Peilungen verwendet wurden, andererseits auch die Peilungen des Jahres 1992 keinen synoptischen Zustand darstellen, da auch innerhalb eines Jahres die Morphologie des Ästuars sich natürlicherweise oder durch Unterhaltungsbaggerung ändert.

Es ist also festzustellen, daß Abweichungen zwischen Naturmessung und Berechnung

- durch die oben benannten Einschränkungen bezüglich der Naturdaten und der Steuerung des Modells und
- durch die Tatsache, daß es sich bei dem mathematischen Modell um ein sog. vereinfachtes Ersatzsystem handelt, welches die maßgeblichen Eigenschaften nachbildet und nicht alle physikalischen Prozesse bis ins kleinste reproduziert (z.B. Vernachlässigung der vertikalen Dimension),

systembedingt und unvermeidbar sind.

Primäre Aufgabe des mathematischen Modells der Tideelbe ist auch nicht die exakte Nachbildung aller tidedynamischen Prozesse (der Natur) eines bestimmten Zeitraums, sondern die Nachrechnung der maßgeblichen Strukturen und Systemeigenschaften und deren Veränderung unter dem Einfluß eines Ausbaus. Dies ist durch die extrem hohe Auflösung des Modells und die hohe Qualität des verwendeten numerischen Verfahrens mit Sicherheit gewährleistet.

### 3.5.3. Wasserstände

In diesem Abschnitt werden die an den in Tabelle 3.1 aufgeführten Pegelstandorten durch das mathematische Elbmodell berechneten Wasserstände mit den je-

weiligen gemessenen Daten in graphischer sowie teilweise auch in tabellarischer Form einander gegenübergestellt.

### **Graphischer Vergleich**

Graphische Vergleichsdarstellungen wurden als Anhang A diesem Gutachten beigefügt. Die Bilder zeigen eine vergleichende Darstellung des numerisch berechneten und des gemessenen Wasserstandes zusammen mit der für beide Zeitreihen berechneten Differenzganglinie.

### **Tabellarischer Vergleich**

Zusätzlich zu den graphischen Vergleichsdarstellungen wurden für dieselben Pegelstandorte (soweit die Messung vollständig war) die Tidekennwerte des Wasserstandes (Thw, Tnw, Thb; Eintrittszeitdifferenzen für Thw und Tnw) einzeln für die gemessenen und für die berechneten Daten ermittelt.

Die Tabellen 3.6 bis 3.8 enthalten eine zusammenfassende, vergleichende Auflistung der wichtigsten Tidekennwerte aller analysierten Pegel (Tabelle 3.1) für die gemessenen (*Messung*) und berechneten (*Ist-Zustand*, SN) Daten (*Modell*). Aufgeführt werden die Werte für das Thw, das Tnw und den Thb sowie für die Differenz zwischen Messung und Rechnung der Eintrittszeiten des Thw und des Tnw. Für alle genannten Größen werden die für den Simulationszeitraum gültigen Mittelwerte angegeben. Tabelle 3.8 zeigt für alle analysierten Pegelstationen eine abschließende Aufstellung der Differenzen zwischen dem berechneten und dem gemessenen mittleren Tidehub.

<b>Zusammenfassung Tidekennwerte (Thw, Tnw)</b>						
<i>Station</i>	<i>Thw [m NN]</i>			<i>Tnw [m NN]</i>		
	<i>Messung</i>	<i>Modell</i>	$\Delta$	<i>Messung</i>	<i>Modell</i>	$\Delta$
<b>BUN</b>	+1.98	+2.05	+0.07	-1.45	-1.40	+0.05
<b>HAR</b>	+1.98	+2.00	+0.02	-1.61	-1.67	-0.06
<b>SOP</b>	+2.00	+1.99	-0.00	-1.62	-1.67	-0.05
<b>STP</b>	+1.98	+1.93	-0.04	-1.62	-1.67	-0.05
<b>SEE</b>	+1.86	+1.82	-0.04	-1.56	-1.55	+0.00
<b>CRA</b>	+1.86	+1.82	-0.04	-1.56	-1.55	+0.00
<b>SUL</b>	+1.78	+1.75	-0.03	-1.50	-1.49	+0.02
<b>HET</b>	+1.69	+1.66	-0.03	-1.46	-1.45	+0.01
<b>GRA</b>	+1.61	+1.59	-0.02	-1.44	-1.41	+0.03
<b>GLU</b>	+1.48	+1.46	-0.02	-1.40	-1.41	-0.01
<b>BRO</b>	+1.43	+1.50	+0.07	-1.40	-1.38	+0.02
<b>OST</b>	+1.46	+1.47	+0.01	-1.48	-1.52	-0.04
<b>OTT</b>	+1.46	+1.47	+0.00	-1.55	-1.55	-0.00
<b>SEU</b>	+1.45	+1.49	+0.04	-1.67	-1.63	+0.04
<b>BKF</b>	+1.43	+1.43	+0.00	-1.77	-1.69	+0.08
<b>BKW</b>	+1.42	+1.43	+0.01	-1.72	-1.70	+0.03
<b>BKC</b>	+1.40	+1.37	-0.03	-1.78	-1.80	-0.02
<b>GSN</b>	+1.39	+1.43	+0.04	-1.78	-1.75	+0.03

Tab. 3.6: Zusammenstellung ausgewählter Tidekennwerte des Tidehoch- und -niedrigwassers für die Pegel entlang der Elbe. Simulationsrechnung: SN

Die Abweichungen der Tidekennwerte  $\Delta$  dürfen nicht irrtümlich als Modellfehler interpretiert werden. Sie sind im wesentlichen auf äußere Einflüsse (z. B. Wind) zurückzuführen.

<b>Zusammenfassung Eintrittszeitdifferenzen (Thw, Tnw)</b>		
<i>Station</i>	<i>Eintrittszeitdifferenzen [Min]</i>	
	$\Delta T$ -Thw	$\Delta T$ -Tnw
<b>ZOL</b>	+4	+0
<b>BUN</b>	+8	-1
<b>HAR</b>	+9	-2
<b>SOP</b>	+13	+1
<b>STP</b>	+17	+5
<b>SEE</b>	+16	+3
<b>CRA</b>	+16	+3
<b>SUL</b>	+18	+5
<b>HET</b>	+16	+1
<b>GRA</b>	+9	+2
<b>GLU</b>	+12	+3
<b>BRO</b>	+13	+1
<b>OST</b>	+8	+3
<b>OTT</b>	+9	-4
<b>SEU</b>	+4	+4
<b>BKF</b>	+5	+7
<b>BKW</b>	+4	+6
<b>BKC</b>	+0	-1
<b>GSN</b>	+2	-2

Tab. 3.7 Zusammenstellung der Differenz zwischen Messung und Rechnung der Eintrittszeiten von Tidehoch- und -niedrigwasser für die Pegel entlang der Elbe. Simulationsrechnung: SN

<b>Zusammenfassung Tidekennwerte (Thb)</b>			
<i>Station</i>	<i>Thb[m]</i>		
	Messung	Modell	$\Delta$
<b>ZOL</b>	+3.08	+3.01	-0.06
<b>BUN</b>	+3.43	+3.45	+0.02
<b>HAR</b>	+3.60	+3.68	+0.08
<b>SOP</b>	+3.62	+3.67	+0.04
<b>STP</b>	+3.60	+3.61	+0.01
<b>SEE</b>	+3.42	+3.38	-0.04
<b>CRA</b>	+3.42	+3.38	-0.04
<b>SUL</b>	+3.30	+3.25	-0.05
<b>HET</b>	+3.16	+3.12	-0.04
<b>GRA</b>	+3.05	+3.01	-0.04
<b>GLU</b>	+2.89	+2.88	-0.02
<b>BRO</b>	+2.84	+2.88	+0.05
<b>OST</b>	+2.95	+3.00	+0.05
<b>OTT</b>	+3.02	+3.02	+0.01
<b>SEU</b>	+3.13	+3.13	-0.01
<b>BKF</b>	+3.20	+3.13	-0.08
<b>BKW</b>	+3.15	+3.14	-0.01
<b>BKC</b>	+3.19	+3.18	-0.01
<b>GSN</b>	+3.18	+3.19	+0.01

Tab. 3.8 Zusammenstellung der Kennwerte des Tidhubs für die Pegel entlang der Elbe. Simulationsrechnung: SN

### 3.5.4. Strömungsgeschwindigkeiten an den Meßstationen

Für die Mehrzahl der in Tabelle 3.3 aufgeführten Strömungsmeßpunkte wurde die von dem hydro-numerischen Verfahren *TRIM-2D* für das mathematische Elbmodell berechnete tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit mit der gemessenen in graphischer und (teilweise) tabellarischer Form verglichen. Hierbei ist zu beachten, daß es sich bei der berechneten Strömungsgeschwindigkeit sowohl um einen über die Wassertiefe integrierten Wert handelt als auch um einen Wert der aufgrund der Auflösung des verwendeten Gitters von 50\*50 m für eine Fläche von 2500 m<sup>2</sup> repräsentativ ist. Hingegen ist die gemessene Strömungsgeschwindigkeit einerseits als Folge des vertikalen Geschwindigkeitsprofils stark von der Position des Meßgerätes über Grund abhängig und andererseits auf einer Fläche von 2500 m<sup>2</sup> nicht konstant.

#### Graphischer Vergleich

Graphische Vergleichsdarstellungen wurden als *Anhang B* diesem Gutachten beigefügt. Die Bilder zeigen eine vergleichende Darstellung für den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit sowie für die Strömungsrichtung.

#### Tabellarischer Vergleich

In Ergänzung zu den graphischen Strömungsvergleichen wurden für einen Teil der dargestellten Strömungsmeßpunkte mit Hilfe des Postprozessors *TIDKEN* die Tidekennwerte für die Strömungsgeschwindigkeit (Maximale und mittlere Ebbe- und Flutstromgeschwindigkeit; Ebbe- und Flutstromdauer) berechnet.

Die Tabellen 3.9 bis 3.11 geben eine zusammenfassende Übersicht für einige wichtige Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit für die gemessenen (*Messung*) und für den *Ist-Zustand*, (Lauf SN) berechneten Daten (*Modell*). Aufgeführt werden die Werte für die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit  $v_{e,mit}$ , die mittlere Flutstromgeschwindigkeit  $v_{f,mit}$  sowie die Ebbe- und die Flutstromdauer. Kennwerte für gemessene Daten werden für bis zu zwei übereinander, in unterschiedlichen Wassertiefen, an einer Position verankerte Meßgeräte (G - 1 und G - 2) angegeben. Für alle angeführten Größen werden neben den für den Simulationszeitraum gültigen Mittelwerten zusätzlich auch die darin erreichten mittleren Extremwerte (Maximale und minimale Mittelwerte für eine Tide) aufgeführt. Der Tabellarische Vergleich ist ein Versuch das Maß der Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung zu objektivieren. Oft gibt aber ein Blick auf den graphischen Vergleich (*Anhang B*) einen besseren Eindruck.

<b>Zusammenfassung Tidekennwerte (Strömung)</b>								
Position	Art	Ebbestrom			Flutstrom			
		$v_{e,mit} [m s^{-1}]$			$v_{f,mit} [m s^{-1}]$			
		Extremum	Messung	Modell	Messung	Modell	Modell	
		G-1	G-2		G-1	G-2		
<b>POS 1.5</b>		2 m	6 m		2 m	6 m		
	Mittelwert	0.61	0.94	0.72	0.59	0.87	0.75	
	Maximum	0.77	1.10	0.80	0.67	0.96	0.83	
	Minimum	0.40	0.76	0.62	0.48	0.73	0.67	
		<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>						
	Mittelwert	6:47	6:47	6:45	5:38	5:38	5:39	
	Maximum	7:27	7:28	7:09	5:55	5:59	5:54	
	Minimum	6:18	6:19	6:19	5:17	5:20	5:30	
	<b>POS 1.7</b>		2 m	5 m		2 m	5 m	
Mittelwert		0.57	0.74	0.72	0.31	0.34	0.51	
Maximum		0.60	0.80	0.78	0.39	0.38	0.54	
Minimum		0.53	0.67	0.69	0.26	0.31	0.47	
		<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>						
Mittelwert		7:32	7:37	7:58	4:53	4:48	4:26	
Maximum		7:54	7:55	8:17	5:09	5:20	4:37	
Minimum		7:08	7:17	7:42	4:31	4:33	4:20	
<b>POS 2.2</b>			2 m	7 m		2 m	7 m	
	Mittelwert	0.56	0.88	0.87	0.65	0.96	0.79	
	Maximum	0.66	0.96	0.96	0.76	1.04	0.85	
	Minimum	0.45	0.78	0.77	0.47	0.82	0.72	
		<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>						
	Mittelwert	6:28	6:33	6:52	5:56	5:51	5:32	
	Maximum	6:45	6:53	7:10	6:06	6:03	5:41	
	Minimum	6:06	6:10	6:33	5:49	5:40	5:22	

Tab. 3.9: Einige Strömungskennwerte: für Position 1.5, 2m und 6m über Grund; Position 1.7, 2m und 5 m über Grund; Position 2.2, 2 m und 7 m über Grund. Simulationsrechnung SN

<b>Zusammenfassung Tidekennwerte (Strömung)</b>								
Position	Art	Ebbestrom			Flutstrom			
		$v_{e,mit} [m s^{-1}]$			$v_{f,mit} [m s^{-1}]$			
		Extremum	Messung	Modell	Messung	Modell		
		G-1	G-2		G-1	G-2		
POS 2.4		2 m	6 m		2 m	6 m		
	Mittelwert	0.54	0.79	0.72	0.48	0.71	0.71	
	Maximum	0.65	0.91	0.78	0.54	0.82	0.77	
	Minimum	0.44	0.68	0.65	0.42	0.65	0.61	
			<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>					
	Mittelwert	6:52	7:05	6:46	5:32	5:20	5:39	
	Maximum	7:32	7:29	7:08	5:52	5:36	5:50	
	Minimum	6:18	6:42	6:26	5:10	5:06	5:28	
	POS 3.2		2 m	m		2 m	m	
Mittelwert		0.49	-	0.57	0.72	-	0.80	
Maximum		0.52		0.58	0.76		0.81	
Minimum		0.46		0.55	0.70		0.79	
			<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>					
Mittelwert		5:57	-	6:32	6:23	-	5:55	
Maximum		6:04		6:36	6:38		5:58	
Minimum		5:53		6:24	6:13		5:51	
POS 4.2			2 m	6 m		2 m	6 m	
	Mittelwert	0.72	1.09	0.89	0.62	0.91	0.78	
	Maximum	0.87	1.20	0.93	0.66	0.98	0.83	
	Minimum	0.62	1.00	0.85	0.58	0.86	0.74	
			<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>					
	Mittelwert	6:35	6:49	6:40	5:49	5:36	5:45	
	Maximum	6:59	7:08	6:59	5:58	5:46	5:55	
	Minimum	6:13	6:27	6:22	5:41	5:24	5:33	

Tab. 3.10: Einige Strömungskennwerte: für Position 2.4, 2m und 6m über Grund; Position 3.2, 2m über Grund; Position 4.2, 2 m und 6 m über Grund. Simulationsrechnung SN



<b>Zusammenfassung Tidekennwerte (Strömung)</b>								
Position	Art	Ebbestrom			Flutstrom			
		$v_{e,mit} [m s^{-1}]$						
		Messung		Modell	Messung		Modell	
	Extremum	G-1	G-2		G-1	G-2		
POS 5.3		2m	7m		2m	7m		
	Mittelwert	0.45	1.00	0.79	0.44	0.85	0.70	
	Maximum	0.50	1.11	0.84	0.52	0.98	0.74	
	Minimum	0.37	0.90	0.73	0.35	0.71	0.65	
		<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>						
	Mittelwert	6:41	7:34	6:57	5:44	4:52	5:28	
	Maximum	6:58	8:02	7:16	6:11	5:22	5:39	
	Minimum	6:01	6:54	6:38	5:19	4:37	5:19	
	POS 6.3		2m	9m		2m	9m	
Mittelwert		0.57	1.12	0.93	0.59	0.80	0.80	
Maximum		0.63	1.22	0.98	0.65	0.87	0.84	
Minimum		0.51	1.05	0.89	0.49	0.74	0.77	
		<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>						
Mittelwert		6:20	6:40	6:37	6:07	5:44	5:50	
Maximum		6:40	7:09	6:55	6:14	5:53	5:58	
Minimum		6:03	6:26	6:22	6:00	5:29	5:40	
POS 6.4			2m	4m		2m	4m	
	Mittelwert	0.54	0.70	0.73	0.47	0.57	0.61	
	Maximum	0.64	0.83	0.80	0.59	0.70	0.67	
	Minimum	0.46	0.60	0.65	0.39	0.47	0.54	
		<i>Ebbe- und Flutstromdauer [hh:mm]</i>						
	Mittelwert	6:16	6:25	6:43	6:12	6:02	5:44	
	Maximum	6:46	6:52	7:04	6:34	6:17	6:03	
	Minimum	5:50	5:58	6:26	5:47	5:41	5:31	

Tab. 3.11: Einige Strömungskennwerte: für Position 5.3, 2 m und 7 m über Grund; Position 6.3, 2 m und 9 m über Grund; Position 6.4, 2 m und 4 m über Grund. Simulationsrechnung SN

### 3.5.5. Salzgehalt an den Leitfähigkeitsmeßstellen

Wie in dem Kapitel 2.2 erläutert, wurde mit Hilfe des hydro-numerischen Verfahrens TRIM-2D zusätzlich zu Wasserstand und (tiefengemittelter) Strömungsgeschwindigkeit noch der über die Wassertiefe gemittelte Wert für den Salzgehalt berechnet. Für die in der Tabelle 3.4 aufgeführten Leitfähigkeitsmeßstellen wurde der numerisch berechnete Salzgehalt mit dem vor Ort gemessenen verglichen.

Hierbei ist, ähnlich wie bei dem zuvor gezeigten Vergleich berechneter und gemessener Strömungsgeschwindigkeiten, zu beachten, daß der für den Salzgehalt berechnete Wert einen für die gesamte Wassertiefe repräsentativen Mittelwert beschreibt, wohingegen der gemessene Wert, als Folge der zeitweise innerhalb des Bereiches der Brackwasserzone vorkommenden Salzgehaltsdifferenzen über die Vertikale, von der genauen Position des Meßgerätes innerhalb der Wassersäule abhängig ist.

### **Graphischer Vergleich**

Graphische Vergleichsdarstellungen wurden als Anhang C diesem Gutachten beigefügt.

### **Tabellarischer Vergleich**

In Ergänzung zu den graphischen Vergleichen des Salzgehaltes wurden für einen Teil der dargestellten Salzgehaltsmeßpunkte die Tidekennwerte für den Salzgehalt (Maximaler und minimaler Salzgehalt während einer Tide ; maximale Salzgehaltsvariation über eine Tide (über mehrere Tiden gemittelt)) berechnet.

Die Tabelle 3.12 gibt eine zusammenfassende Übersicht für einige wichtige Tidekennwerte des Salzgehaltes für die gemessenen (*Messung*) und für den *Ist-Zustand*, (Lauf SN) berechneten Daten (*Modell*). Aufgeführt werden die Werte für den maximalen und minimalen Salzgehalt sowie für die maximale Salzgehaltvariation während einer Tide ( $s_{mit}$ ) über mehrere Tiden gemittelt. Kennwerte für gemessene Daten werden für bis zu zwei übereinander, in unterschiedlichen Wassertiefen, an einer Position verankerte Meßgeräte (G-1 und G-2) angegeben. Für alle angeführten Größen werden neben den für den Simulationszeitraum gültigen Mittelwerten zusätzlich auch die darin erreichten mittleren Extremwerte (Maximum und Minimum) aufgeführt.

Zusammenfassung Tidekennwerte (Salzgehalt)				
Position	Extremum	Messung		Modell
		$s_{mit}$ [‰]		
		G-1	G-2	
POS 1.6		2 m	9 m	
	Maximum	30.7	31.5	31.7
	Minimum	25.1	26.6	26.8
	Variation	5.6	4.9	4.9
POS 1.7		2 m	- m	
	Maximum	32.0	-	32.5
	Minimum	27.4	-	27.0
	Variation	4.5	-	5.5
POS 2.2		2 m	- m	
	Maximum	30.4	-	28.6
	Minimum	22.8	-	23.4
	Variation	7.5	-	5.1
POS 2.4		6 m	- m	
	Maximum	29.7	-	28.6
	Minimum	22.4	-	23.4
	Variation	7.3	-	5.1
POS 5.3		2 m	- m	
	Maximum	22.1	-	21.4
	Minimum	12.6	-	11.4
	Variation	9.4	-	9.9
POS 5.4		2 m	- m	
	Maximum	20.8	-	20.7
	Minimum	12.0	-	12.0
	Variation	8.9	-	8.8
POS 6.5		2 m	- m	
	Maximum	16.6	-	13.6
	Minimum	8.0	-	7.8
	Variation	8.6	-	5.7

Tab. 3.12: Einige Salzgehaltskennwerte: für Position 1.6, 2 m und 9 m über Grund; Position 1.7, 2 m über Grund; Position 2.2, 2 m über Grund; Position 2.4, 6 m über Grund; Position 5.3, 2 m über Grund; Position 5.4, 2 m über Grund; Position 6.5, 2 m über Grund. Simulationsrechnung: SN

### 3.6. Zusammenfassung der Verifikation

In Unterkapitel 3.5 sind die Berechnungsergebnisse des mathematischen Elbmodells sowie die Analyseergebnisse der Tidekennwerte des Wasserstandes, der Strömungsgeschwindigkeit und des Salzgehaltes vorgestellt worden. Mit der an dieser Stelle folgenden Interpretation der Ergebnisse soll gezeigt werden, daß die wesentlichen, tidedynamischen Eigenschaften des natürlichen Systemverhaltens, die für die Beurteilung der aubaubedingten Veränderungen notwendig sind, von dem mathematischen Tidemodell reproduziert werden.

#### 3.6.1. Beurteilung der Ergebnisse

Die in den Abschnitten 3.5.3, 3.5.4 und 3.5.5 angesprochenen und in den *Anhangskapiteln A, B sowie C* für ausgewählte Pegelstandorte und Strömungsmeßstellen vorgestellten graphischen Vergleiche der gemessenen und berechneten Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten sowie des Salzgehalts werden nachfolgend zusammenfassend bewertet:

##### **Wasserstand (siehe Abschnitt 3.5.3 und Anhangkapitel A)**

Es soll gezeigt werden, daß die regional in den Tidekennwerten des Wasserstandes zu beobachtenden Veränderungen, hier insbesondere die Veränderungen des Tidehubes, sowie das Laufzeitverhalten und die Formveränderung der Tidewelle bei ihrem Durchgang durch das System von dem mathematischen Modell der Tidewelbe wiedergegeben werden.

**Tidewelle entlang der Außen- und Unterelbe:** die für die Pegelstationen berechneten Wasserstände sind in guter Übereinstimmung mit den gemessenen Daten, insbesondere stimmen berechneter und gemessener (mittlerer) Tidehub sehr gut überein (maximale Differenz: 8 cm). Hieraus ist zu schließen, daß

1. die, das mathematische Tidemodell steuernden, aus gemessenen Daten aufbereiteten Randwerte, die Tidewelle entlang des seeseitigen Modellrandes gut beschreiben und
2. die, dem Modell zugrunde liegende, Topographie die natürlichen Verhältnisse sehr gut erfaßt. Die Ausbreitung und Verformung der Tidewelle auf ihrem Weg vom seeseitigen Rand bis zu den Pegelstationen entlang der Unterelbe wird vom mathematischen Elbmodell ebenfalls korrekt wiedergegeben. Hieraus folgt, daß die berechnete Dynamik des Wasserstandes im Übergangsbereich zu den inneren Teilen des Elbeästuars die natürlichen Verhältnisse wiedergibt.

**Dynamik des Tidehubs entlang der Außen- und Unterelbe:** Der Tidehub unterliegt entlang der Elbe charakteristischen Veränderungen; so fällt der Tidehub von See kommend von im Mittel (1986/1990) (Hamburg, 1995) ca. 3,00 m auf ein Minimum von ca. 2,75 m bei Brokdorf und erreicht dann sein Maximum von ca. 3,40 m im Bereich des Hamburger Hafens. Der weitere Verlauf ist stark vom jeweiligen Oberwasserzufluß geprägt. Dieses Verhalten spiegelt sich auch in den berechneten Werten wieder; so wurden für den Spring-Nipp-Zeitraum für die Station *Scharhörn (BKC)* ein mittlerer Tidehub von 3,18 m, für *Brokdorf (BRO)* 2,88 m und für *Schöpfstelle (SOP)* 3,67 m berechnet.

Diese Ergebnisse zeigen, daß die in der Natur beobachtete deutliche Veränderung des Tidehubs in dem mathematischen Elbmodell wiedergegeben wird, wodurch gewährleistet ist, daß die Größe der dem System mit der einlaufenden Tidewelle zugeführten sowie der im System dissipierten, gespeicherten und zum Teil reflektierten Energie im richtigen Verhältnis zueinander wiedergegeben wird.

**Laufzeit der Tidewelle:** Das Fortschreiten der Tidewelle im Elbeästuar wird von dessen hydrologischer Charakteristik (Topographie, mittlere Wassertiefe, Reflexionseigenschaften etc.) beeinflusst. Diese Charakteristik verändert sich aber ständig unter dem Einfluß des Gezeitengeschehens. So ist die Veränderlichkeit der Fortschrittgeschwindigkeit der Tidewelle auf ihrem Weg von der Nordsee das Ästuar hinauf im wesentlichen von der momentanen lokalen Wassertiefe abhängig. Der Wellenberg der Tidewelle (Tidehochwasser) läuft daher schneller die Elbe hinauf als das Wellental (Tideniedrigwasser). Der gemessene mittlere Zeitunterschied (1991) für den Tidehochwassereintritt bezogen auf Cuxhaven-Steubenhöft beträgt für die Station Brokdorf *BRO*  $96 \pm 2$  Minuten, für die Station Stadersand *STA*  $162 \pm 2$  Minuten, für die Station St. Pauli *STP*  $222 \pm 2$  Minuten und für die Station Zollenspieker *ZOL*  $270 \pm 4$  Minuten (HAMBURG 1995); berechnet wurden als Eintrittszeitdifferenzen für dieselben Stationen 86, 153, 207 bzw. 276 Minuten. Für den Tideniedrigwassereintritt weist der gemessene (mittlere für 1991) Zeitunterschied ebenfalls bezogen auf Cuxhaven-Steubenhöft für die Station Brokdorf *BRO*  $104 \pm 2$  Minuten, für die Station Stadersand *STA*  $174 \pm 2$  Minuten, für die Station St. Pauli *STP*  $247 \pm 2$  Minuten und für die Station Zollenspieker *ZOL*  $336 \pm 3$  Minuten (ebenfalls [HAMBURG 1995]); berechnet wurden als Eintrittszeitdifferenzen für dieselben Stationen 103, 170, 242 bzw. 334 Minuten (die Meßgenauigkeit bezüglich der Zeit bei Pegelmessungen beträgt  $\pm 2-3$  Minuten). Aus den genannten Zahlen geht hervor, daß die mit Hilfe des mathematischen Tidemodells berechnete Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Tidewelle trotz der großen Gesamtlaufzeit von fast 6 Stunden in sehr guter Näherung wiedergegeben wird.

**Verformung der Tidewelle:** Bei ihrem Weg durch das Elbeästuar unterliegt die Tidewelle einer permanenten Formänderung, welche durch nichtlineare Prozesse

(Abhängigkeit der Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle von der momentanen lokalen Wassertiefe) sowie durch Reflexionserscheinungen verursacht wird. Die Folge ist eine flußauf unregelmäßig stärker werdende Asymetrie zwischen Flut- und Ebbast der Tide mit längerer Ebbe- als Flutdauer. Ist die Form der Tidewelle an der Station Cuxhaven-Steubenhöft *STEU* noch nahezu sinusförmig, so nimmt sie im Raum oberhalb Hamburgs (Station Zollenspieker *ZOL* und oberhalb) eine Form an, bei der der Flutast deutlich steiler als der Ebbast ist. Diese charakteristische Formänderung des Tidesignals spiegelt sich ebenfalls in den von dem mathematischen Tidemodell berechneten Wasserstandszeitreihen wieder.

Die naturnahe Wiedergabe der komplexen Verhältnisse der Tidewasserstände im Elbeästuar ist nur durch die hohe Qualität des verwendeten numerischen Verfahrens und der für ein so großes Gebiet extrem hohen räumlichen Auflösung mit dem damit einhergehenden großen Rechenaufwand ermöglicht. Modelle mit geringeren räumlichen Auflösungen sind nicht in der Lage die Verhältnisse im Elbeästuar und deren ausbaubedingter Änderung mit so hoher Qualität zu beschreiben.

### **Strömungsgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 3.5.4 und das Anhangkapitel B)**

Bei einem Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten ist zu berücksichtigen, daß es sich bei den von dem mathematischen Elbemodell berechneten Werten um einen über die gesamte Wassertiefe und eine Fläche von 2500 m<sup>2</sup> integrierten Mittelwert handelt, während die gemessenen Werte als Folge des Vertikalprofils der Strömung stark mit der Höhenlage des Meßgerätes über Grund variieren. Zusätzlich spielen an einigen Strömungsmessstellen die für Ebbe und Flut voneinander abweichenden Formen des vertikalen Strömungsprofils eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Unter Berücksichtigung der vorgenannten Einflußfaktoren ist eine sinnvolle quantitative Bewertung der von dem mathematischen Tidemodell berechneten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit ausschließlich für Strömungsmesspositionen mit wenigstens zwei übereinander, in der Vertikalen, angeordneten Strömungssensoren möglich; diese Bedingung wird u.a. von den Positionen *POS 1.5*, *POS 1.7*, *POS 2.2*, *POS 2.4*, *POS 4.2*, *POS 5.3*, *POS 6.3* und *POS 6.4* erfüllt, an denen in der Regel ein Meßgerät in Bodennähe, meist ca. 2 m über Grund, sowie eines in größerem Abstand vom Boden, ca. 6 m über Grund, verankert war (siehe hierzu die Werte in den Tabellen 3.9 bis 3.11).

**Mittlere Strömungsgeschwindigkeit:** Wie aus den tabellarischen und graphischen Vergleichsdarstellungen der Strömungsgeschwindigkeit hervorgeht, liegen bei allen vorgenannten Strömungsmesspositionen die berechneten Werte der tiefen-

gemittelten Geschwindigkeit zwischen oder sehr nahe an den in unterschiedlichen Wassertiefen gemessenen Werten.

**Ebbe- und Flutstromdauer:** Eine analoge vertikale Abhängigkeit ist ebenfalls für die beobachtete Dauer des Ebbe- und des Flutstromes vorhanden; trotzdem liegt für alle vorgenannten Meßpositionen die von dem mathematischen Tidemodell für den Ebbe- und Flutstrom berechnete Zeitdauer immer in der Nähe von den in unterschiedlichen Wassertiefen gemessenen Werten.

**Strömungsrichtung und Stromkenterung:** Aus den graphischen Vergleichsdarstellungen der Strömungsgeschwindigkeit und -richtung an den oben angeführten Strömungsmessstellen wird deutlich, daß die von dem mathematischen Tidemodell für diese Positionen berechnete Strömungsrichtung sehr gut zu der in der Natur beobachteten paßt und außerdem die Zeiten der für die tiefengemittelte Geschwindigkeit berechneten Stromkenterung in der Regel zwischen den boden- und oberflächenah beobachteten Kenterungszeiten liegen (siehe hierzu die Anlagen im *Anhangkapitel B*).

Für einige Positionen der ausgelegten Strömungsmessgeräte sind im *Anhangkapitel B* alle Ganglinien von berechneter und gemessener Strömungsgeschwindigkeit und -richtung dargestellt. Diese Bilder zeigen die außerordentlich gute Übereinstimmung zwischen den Modellergebnissen und den Naturmessungen.

### **Salzgehalt (siehe Abschnitt 3.5.5 und das Anhangkapitel C)**

Ähnlich wie für den Vergleich gemessener und berechneter Strömungsgeschwindigkeiten gilt auch für den Salzgehalt, daß es sich bei dem gemessenen Wert um einen von der Tiefe abhängigen Wert handelt, da im Bereich der Brackwasserzone Veränderungen des Salzgehalts in der Vertikalen in örtlich und zeitlich begrenztem Umfang auftreten können, während der berechnete Wert den über die Wassertiefe gemittelten Salzgehalt widerspiegelt; dieser Effekt ist bei dem Vergleich der gemessenen und berechneten Zeitreihen zu beachten.

**Dynamik der zeitlichen Variation des Salzgehalts:** ein charakteristisches Merkmal des Elbeästuars ist die Variabilität des Salzgehaltes entlang der Brackwasserzone in der Außen- und der Unterelbe, die sich in einer (örtlichen) Veränderung des mittleren Salzgehaltes sowie dem Unterschied zwischen maximalen und minimalen Salzgehalt innerhalb einer Gezeit (der Salzgehaltsvariation) ausdrückt.

Nähert sich der Salzgehalt in den Außengebieten des Elbeästuars allmählich demjenigen des Nordseewassers an, so sinkt er landeinwärts, im Gebiet der Unterelbe oberhalb Glückstadts, allmählich auf Werte unterhalb von 2 ‰ ab (siehe auch Bild 3.6). Die tabellarische Gegenüberstellung in Tabelle 3.12 zeigt für einige ausge-

wählte Positionen die angesichts der notwendigen Vereinfachungen bei der Modellierung des Salzgehaltes sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung in der Natur und Modellrechnung. Die im Anhang C dargestellten Ganglinien für einige während ELBEX '92 gemessene und berechnete Salzgehaltswerte zeigen größtenteils ebenfalls sehr gute Übereinstimmung.

### 3.6.2. Schlußfolgerungen

In vorangegangenen wurden insbesondere die physikalischen Grundlagen der eingesetzten mathematischen Verfahren (*Kap. 2*), die bei der Erzeugung der Modelltopographie benutzten Daten sowie die zum Zwecke der Steuerung und der Verifikation verfügbaren Meßdaten vorgestellt. Ein weiterer Schwerpunkt war die Gegenüberstellung gemessener und berechneter Daten im Rahmen der Modellverifikation.

Hier wird eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse zur Verifikation des mathematischen Tidemodells gegeben, aus der eine Aussage über die Eignung des mathematischen Elbmodells zur Berechnung der für die geplante Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Cointainerschiffahrt zu erwartenden großräumigen hydrographischen Veränderungen hervorgeht.

Von dem mathematischen Tidemodell des Elbeästuars werden der Wasserstand, die über die Wassertiefe integrierte, tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit sowie zusätzlich der über die Wassertiefe gemittelte Wert des Salzgehaltes berechnet. Die Modellergebnisse wurden sowohl für den Wasserstand (Abschnitt 3.5.3) wie auch für die Strömungsgeschwindigkeit (Abschnitt 3.5.4) und den Salzgehalt (Abschnitt 3.5.5) an ausgewählten Positionen mit gemessenen Daten verglichen.

Mit diesen Ergebnissen konnte die in der Natur beobachtete Änderung des *Tidehubs*, die Änderung der *Form der Tidewelle* sowie deren *Fortpflanzungsgeschwindigkeit*, die sich aus den örtlich verschiedenen Eintrittszeiten für das Thw und das Tnw ablesen läßt, flächendeckend naturähnlich nachgebildet werden. Dies bedeutet, daß auch der mit der Tidewelle einhergehende *Energiestrom* (potentielle und kinetische Energie), die *Energiespeicherung* im System Außen- und Unterelbe sowie die durch Reibungseffekte hervorgerufene *Energiedissipation* im richtigen Verhältnis zueinander wiedergegeben werden, ein Erfolg, der in engem Zusammenhang mit der bei der Erstellung der Modelltopographie aufgewandten Sorgfalt steht, und der sich auch in der aufgezeigten Übereinstimmung zwischen den in unterschiedlichen Wassertiefen gemessenen und der berechneten tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeit äußert (Betrag und Richtung der Strömungsgeschwindigkeit, Dauer der Tidephasen).



Darüberhinaus geben die Berechnungsergebnisse des hydro-numerischen Verfahrens *TRIM-2D* die hohe räumliche wie auch zeitliche Auflösung des Salzgehalts im Bereich der Brackwasserzone in naturähnlicher Weise wieder.

Aus den in diesem Gutachten zu dem mathematischen Tidemodell des Elbeästuars vorgestellten Informationen und Berechnungsergebnissen geht hervor, daß sowohl Strombaumaßnahmen wie auch die abschnittsweise Vertiefung und Verlagerung der Fahrrinne der Elbe, welche beide eine Veränderung der Topographie des Elbeästuars darstellen, in dem Berechnungsgitter abgebildet werden können. Daher sind die mit diesen Maßnahmen einhergehenden Veränderungen des Energiestromes (als Folge der veränderten Strömungsquerschnitte) und der Energiedissipation (als Folge der veränderten Wassertiefen), die von einer Veränderung der Wasserstände und der Strömungsgeschwindigkeiten begleitet werden, mit den in dem mathematischen Tidemodell benutzten physikalischen Naturgesetzen berechenbar (Kapitel 2).

Die Qualität der in diesem Gutachten vorgestellten Berechnungsergebnisse bietet die Gewähr dafür, daß sowohl die Größe der Veränderungen wie auch die räumliche Ausdehnung des Gebietes, für welches mit einer ausbaubedingten Veränderung der Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und des Salzgehalts gerechnet werden muß, von dem mathematischen Tidemodell korrekt vorausberechnet werden kann.

## **4 Ausbauvariante**

Sämtliche Voruntersuchungen und weitere wirtschaftliche und technische Randbedingungen münden in eine Ausbauplanung der Fahrrinnenanpassung, die der BAW zur Untersuchung vom den Auftraggebern übergeben wurde.

### **4.1 Ausbauplanung**

Grundlage der UVU und damit auch Untersuchungsobjekt für dieses Gutachten ist die in Abbildung 4.1 dargestellte Variante der geplanten Trasse. Sie besteht aus einem sogenannten Sockel mit einer Tiefe von 15,80 m unter NN, der von km 648 (Lühesand) bis zu km 689,5 (St. Margarethen) reicht. Durch Anpassung an das sich verändernde Kartennull wird der Sockel bis km 713,2 (Otterndorf) auf 16,05 m unter NN abgesenkt. Erst unterhalb dieser Stelle setzt die eigentliche Rampe ein, die zu einer Tiefe von 16,99 m unter NN bei km 748 führt. Die Tiefe im Bereich des Hamburger Hafens beträgt 16,70 m unter NN.

Die Breite der Fahrrinne beträgt in der Regel 300 m.

Weitere Informationen zur geplanten Fahrrinnenanpassung können der Baubeschreibung der Träger des Vorhabens entnommen werden.

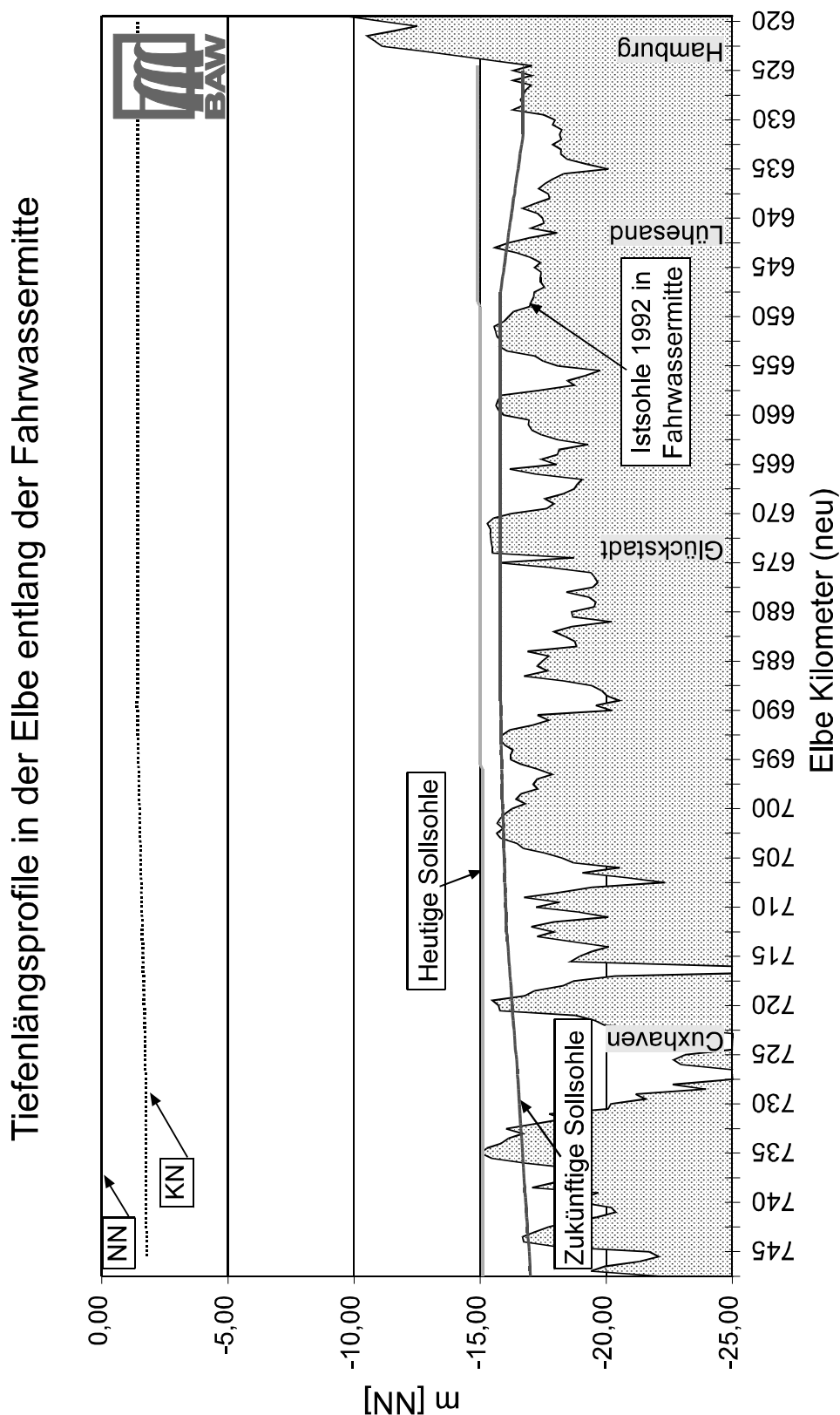


Abb. 4.1 Längsschnitt Unter- und Außenelbe entlang der Fahrrinnenachse mit den Lagen der heutigen und zukünftigen Sollsohle

## 5 Topographie

Bei der Darstellung der Modellverifikation in Kapitel 3 wurde bereits ausführlich auf die Modelltopographie eingegangen. Aufgabe dieses Kapitels ist es zu beschreiben, wie der geplante Ausbau in diese Topographie des IST-Zustands eingearbeitet wurde.

### 5.1 Morphologischer Nachlauf

Weitere Informationen zum morphologischen Nachlauf finden sich in Kapitel 2 und Kapitel 7 (Diskussion der ausbaubedingten Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten und des Geschiebetransports).

Bei der Vertiefung von Teilabschnitten, wie sie dem Längsschnitt in Abb. 4.1 entnommen werden können, wird der Abflußquerschnitt im jeweiligen Baggerbereich vergrößert. Bei gleichbleibendem Energiedargebot aus der Tidewelle (Energieliniengefälle) bleiben auch die Fließgeschwindigkeiten gleich, so daß die Querschnittsaufweitung zu einer Vergrößerung des Durchflusses führt. Diese Durchflußerhöhung setzt erst allmählich ein, da sie ja aus Gründen der Kontinuität durch benachbarte Abschnitte, die nicht ausgebagert werden, behindert wird.

In diesen benachbarten Abschnitten (oberstrom und unterstrom) wird es aufgrund der Kontinuität durch die Baggerung zu einer allmählichen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten kommen, die eine erosive Sedimenttransportreaktion hervorruft.

Grundsätzliche Annahme ist dabei, daß sich das morphologische Transportregime vor dem Ausbau in den Bereichen mit Übertiefen im Gleichgewicht befindet. Bei nicht erosionsstabilen Sohlmaterialien führen dann ausbaubedingte Strömungserhöhungen zu Erosion, bis daß sich der Abflußquerschnitt zu einem neuen Gleichgewicht vergrößert hat und die Strömungsgeschwindigkeiten wieder die gleiche Größenordnung wie vor dem Ausbau aufweisen.

Der Tidehub in einem Ästuar wird maßgeblich durch Dämpfung und Reflexion beeinflusst. Typischerweise werden durch Vertiefungsmaßnahmen genau die Bereiche beseitigt, die zuvor überproportional zur Dämpfung beigetragen haben. Die Durchflußerhöhung in diesen Bereichen ruft Folgereaktionen des Sedimenttransports in den angrenzenden Bereichen hervor, bis daß sich ein neues morphologisches Gleichgewicht einstellt. Diese Folgereaktion des Sedimenttransports wird als

morphologischer Nachlauf bezeichnet. Er findet zeitgleich mit den Baggermaßnahmen statt, die sich in der Regel über einen längeren Zeitraum erstrecken.

Da das numerische Modell von einer festen unveränderlichen Sohle ausgeht, und sich derartige morphologische Prozesse nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft in einem so großen Bereich kaum modellieren lassen, wird der morphologische Nachlauf aufgrund von Erfahrungswerten bei der Erstellung der Ausbautopographie berücksichtigt.

## **5.2 Einarbeitung des Ausbaus und des morphologischen Nachlaufs in die Topographie des IST-Zustands**

Zu Einarbeitung der Ausbauplanung in die Topographie des IST-Zustands wurde wie folgt vorgegangen:

- Die Lage der Trasse wurde den Plänen des Auftraggebers entnommen.
- Zusätzlich zu der geplanten, nautisch nutzbaren Breite wird ein Toleranzmaß von 15 m für die Breite an jeder Seite der Fahrrinne angesetzt, so daß die Fahrrinne im Modell insgesamt 30 m breiter ist. Im Bereich der Delegationsstrecke wurde an Stellen, wo die Fahrrinne dicht am Ufer entlang führt, dieses Toleranzmaß auf 0 gesetzt, da in diesen Bereichen mit präziser Ortung gearbeitet wird.
- Die Solltiefen werden entsprechend der Abb. 4.1 in die Fahrrinne eingebaut.
- Zur Berücksichtigung von Herstellungsungenauigkeiten bei der Baggerung in der Tiefe wird im Modell um eine Toleranz von 0,5 m zusätzlich zur Solltiefe vertieft.

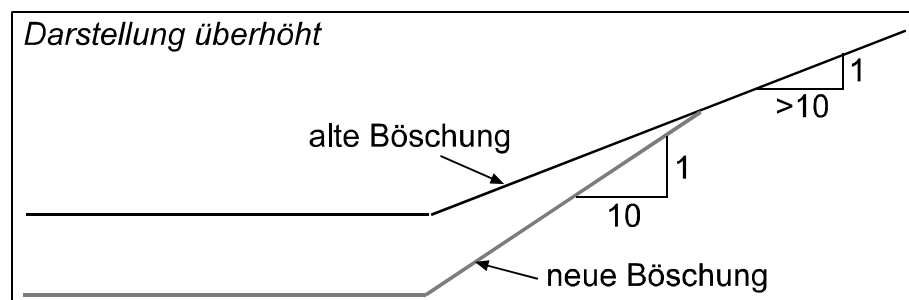


Abb. 5.1 Konstruktion der seitlichen Böschungen bei dem Einbau der neuen Trasse in die IST-Topographie

- Soweit durch die Vertiefung im Modell an den Seiten Böschungsneigungen steiler als 1:10 entstehen werden diese auf 1:10 abgeflacht, bis daß sich neue und alte Böschung schneiden (siehe Abb. 5.1).
- Ein Element wird dann als zur Trasse gehörig betrachtet, wenn 10 % seiner Fläche im Bereich der Trasse bzw. im Toleranzmaß liegen.
- Riffel und Übertiefen sind Bereiche, in denen im IST-Zustand morphologisch aktive Verhältnisse vorliegen, in denen sich also ein morphologisches Gleichgewicht entsprechend Abschnitt 5.1 eingestellt hat. Bei diesen Bereichen muß ein morphologischer Nachlauf berücksichtigt werden:
  - Mit Übertiefen sind Tiefenbereiche gemeint, die bereits heute mindestens 2 m tiefer sind also die heutige Sollsohle. Diese Tiefen werden zur Berücksichtigung des morphologischen Nachlaufs um den jeweils gültigen Betrag aus "neue Sollsohle minus alte Sollsohle" zusätzlich vertieft. Diese Übertiefen können natürlich auch aus Riffelstrecken bestehen.
  - Bei Riffelstrecken, wo die Kuppen der Riffel in das Vertiefungsmaß hereinragen, werden nicht nur die Kuppen vertieft, sondern es wird der gesamte Bereich - also auch die Riffeltäler - um den jeweils gültigen Betrag aus "neue Sollsohle minus alte Sollsohle" vertieft.

Das hier beschriebene Verfahren zur Erstellung der zukünftigen Fahrrinne in der vorhandenen IST-Topographie geht von Annahmen aus, die einer gewissen Variabilität unterliegen. Diese Variabilität ist einer der Gründe für die in Kap. 8 dargestellte Prognose der Wasserstände, die einen Sicherheitsaufschlag im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen enthält.

## 6. Tidedynamikszenarios

Unter "Tidedynamikszenarios" werden hier bestimmte Gruppierungen von hydrologischen Randbedingungen verstanden, welche u.a. die Tidedynamik steuern (im Bauwesen würde dafür der Terminus "Lastfall" gebraucht). Im Untersuchungsrahmen zur UVU (Paragraph 5 UVPG) wird in Kapitel 5.2 (Hydromechanik) festgestellt, daß das Untersuchungsprogramm sich auf "... mittlere Tideverhältnisse (Naturwerte) in Verbindung mit

- niedrigem Oberwasserzufluß,
- mittlerem Oberwasserzufluß,
- hohem Oberwasserzufluß sowie
- niedrigem Oberwasserzufluß und Ostwind"

erstreckt (PÖU, 1993). Für alle o.g. Lastfälle sollen die Differenzen zwischen dem "Ist-Zustand" und dem "Ausbau-Zustand" berechnet werden. Dabei soll es sich nicht um syntetische Szenarien handeln, sondern um solche die auch in der Natur abgelaufen sind. Um die Konsistenz der Lastfälle mit der Modelltopographie (Stand 1992) zu gewährleisten, mußten die Zeiträume der Szenarien ebenfalls aus dem Jahre 1992 stammen.

Das TidedynamikszENARIO "Spring-Nipp-Zyklus", der im Rahmen der Ergebnisdiskussion oft herangezogen ist, wird hier nicht noch einmal vorgestellt, da er in Kap. 3 im Rahmen der Verifikation bereits beschrieben wurde.

Die gewählte zeitliche Lage der Lastfälle und der Verlauf des Oberwasserzuflusses bei Neu Darchau ist Bild 3.9 zu entnehmen. Auffällig ist, daß der mittlere Oberwasserzufluß des Jahres 1992 von 575 m<sup>3</sup>/s deutlich unter dem langjährigen Mittel (1926/1991) von 715 m<sup>3</sup>/s lag. Das im Jahre 1992 häufigste Oberwasser von ca. 225 m<sup>3</sup>/s fand zu 20,5% des Jahres statt, niedrige Oberwasserzuflüsse unter 350 m<sup>3</sup>/s fanden zu ca. 45% des Jahres statt. Niedriger Oberwasserzufluß in der Elbe war somit typisch für das Jahr 1992. Im folgenden sollen die Szenarien hydrographisch charakterisiert werden, d.h. es sollen Oberwasserzufluß, Tidewasserstände und Salzverteilungen mit den (soweit verfügbar) langjährigen Mittelwerten verglichen werden.

Langjährige Mittelwerte sind nur für die Wasserstände und den Oberwasserzufluß verfügbar (Hamburg, 1995). Für die Beurteilung der mittleren Lage der Brackwasserzone liegen Zeitserien des Salzgehalts für 1992 an 5 Meßpositionen im Bereich des WSA Cuxhaven vor (LZ 1 - LZ 5). Diese Zeitserien wurden bei der

BAW hinsichtlich ihrer Tidekennwerte für verschiedene Zeiträume analysiert, so daß für 1992 und einzelne Monate des Jahres mittlere Werte vorliegen.

Soweit im folgenden auf Mittelwerte Bezug genommen wird sind die eben beschriebenen gemeint.

## **6.1. Szenario "Hoher Oberwasserzufluß" (Qh)**

### **6.1.1. Oberwasserzufluß**

Das Szenario "Hoher Oberwasserzufluß" (Qh), liegt zwischen dem 30.3.1992 und dem 13.4.1992. Der Oberwasserzufluß schwankt in dieser Zeit zwischen 1228 m<sup>3</sup>/s und 1588 m<sup>3</sup>/s. Ein Oberwasserzufluß dieser Größenordnung ist 1992 nur im genannten Zeitraum aufgetreten und betrifft somit nur ca. 4% des Jahres 1992.

### **6.1.2. Tidewasserstände und Tidehub**

Bild 6.1 zeigt den Verlauf von berechneten maximalem, mittlerem und minimalem Tidehoch- und Tideniedrigwasser während des Zeitraums Qh sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991 dieser Größen. Bild 6.2 zeigt den dazugehörigen berechneten maximalen, mittleren und minimalen Tidehub sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991. Die mittleren Werte dieses Szenarios sind nahezu identisch mit den 10-jährigen Mittelwerten von Thw und Tnw und damit auch mit denen des Tidehubs. Die in dieser Zeit auftretende Variation des Tidehochwassers beträgt 1.25 m bei Km 748, erreicht ihr Maximum mit 1.95 m bei Km 600 und fällt stromauf bis auf 1.55 bei Km 585 (siehe Bild 6.3). Die Variation des Tideniedrigwassers beträgt 0.95 m bei Km 748, erreicht ihr Maximum bei Km 615 mit 1.25 m und fällt stromauf bis auf 0.85 m ab (siehe Bild 6.4). Die Variation des Thw dieses Zeitraums ist zwischen Km 690 und Km 600 ist im Vergleich zu den anderen untersuchten Szenarien maximal.

Oberhalb Hamburgs ist die Elbe gegenüber den weiter unterhalb gelegenen Strecken schmal und flach. Daher wird hier der Einfluß des Oberwasserzuflusses am deutlichsten sichtbar. Das hohe Oberwasser führt hier zu einer deutlichen Erhöhung des Tideniedrigwassers gegenüber dem 10-jährigen Mittelwert.

### **6.1.3. Salzgehalte**

In Bild 6.5 ist ein Längsschnitt des berechneten maximalen, mittleren und minimalen Salzgehaltes während des Szenarios Qh sowie der Mittelwerte des maxi-



malen und minimalen Salzgehaltes für das Jahr 1992 sowie für den Monat April desselben Jahres dargestellt. Die Brackwasserzone ist als Folge des hohen Oberwasserzuflusses gegenüber mittleren Verhältnissen

- stromab verlagert und
- in ihrer Ausdehnung zusammengestaucht.

Daher tritt in dieser Zeit die größte lokale Salzgehaltvariation von ca. 16 ‰ auf. Gegenüber den anderen Szenarien ist zu bemerken, daß dieses Maximum weit stromab bei Km 730 auftritt. Ein Wert von 2 Promille erreicht maximal Km 696.

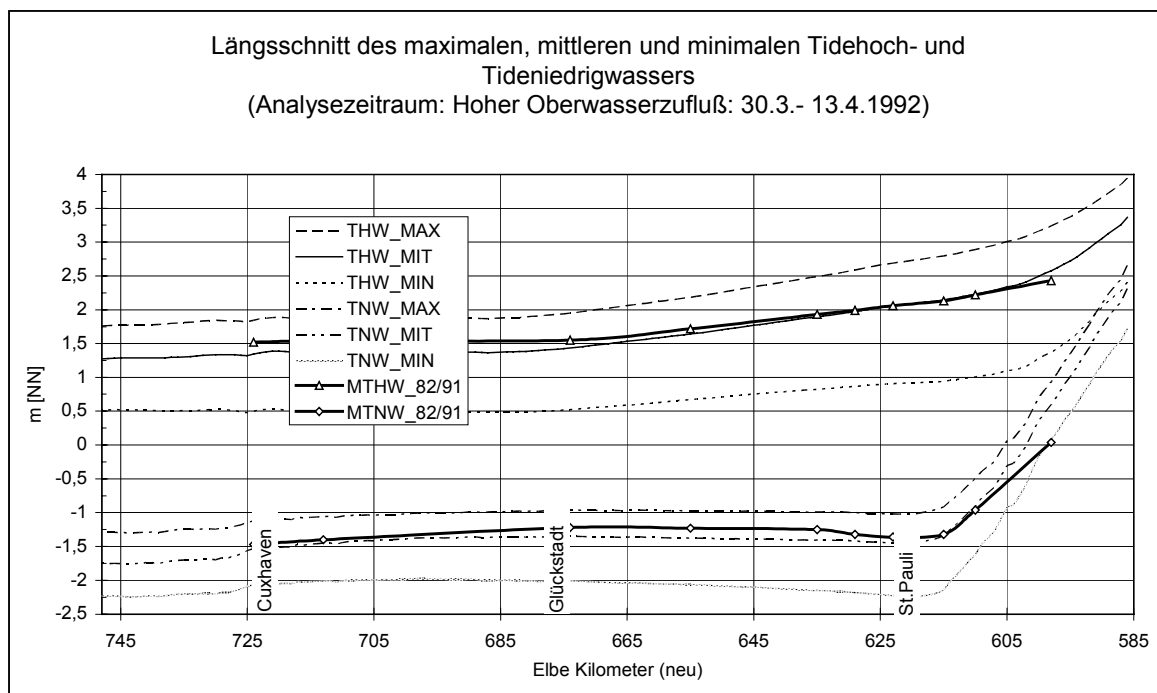


Abb. 6.1 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngößen mit gemittelten Meßwerten bei hohem Oberwasserzufluß

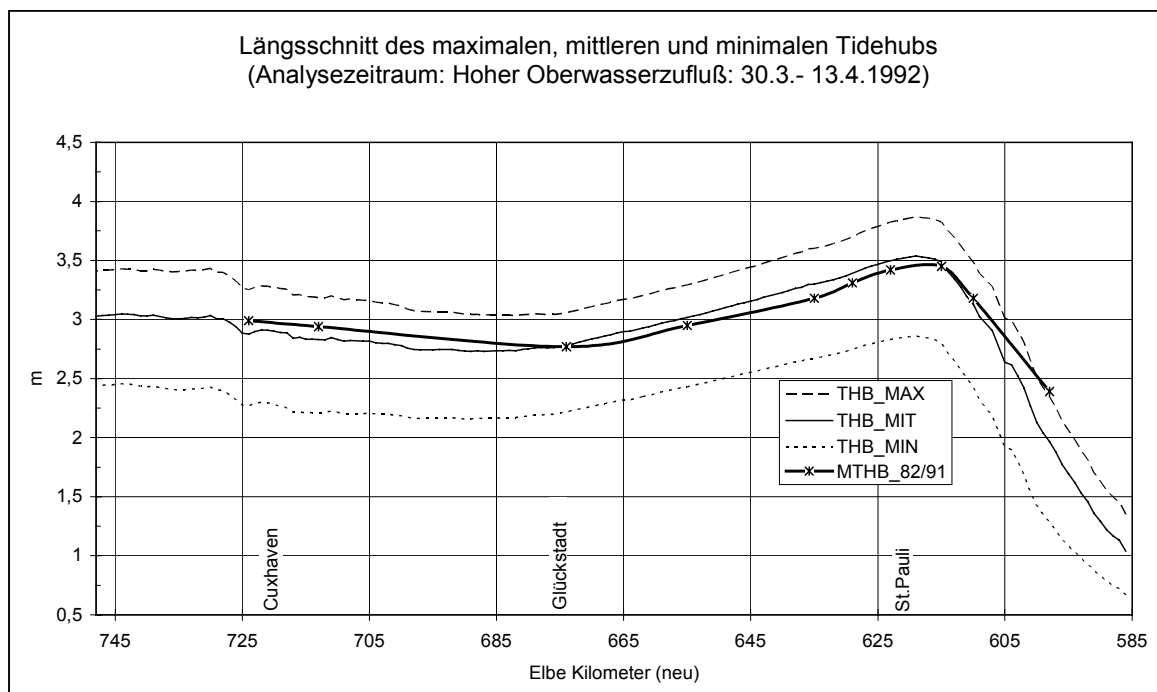


Abb. 6.2: Vergleich der berechneten mit Tidehübe mit gemittelten Meßwerten bei hohem Oberwasserzufluß

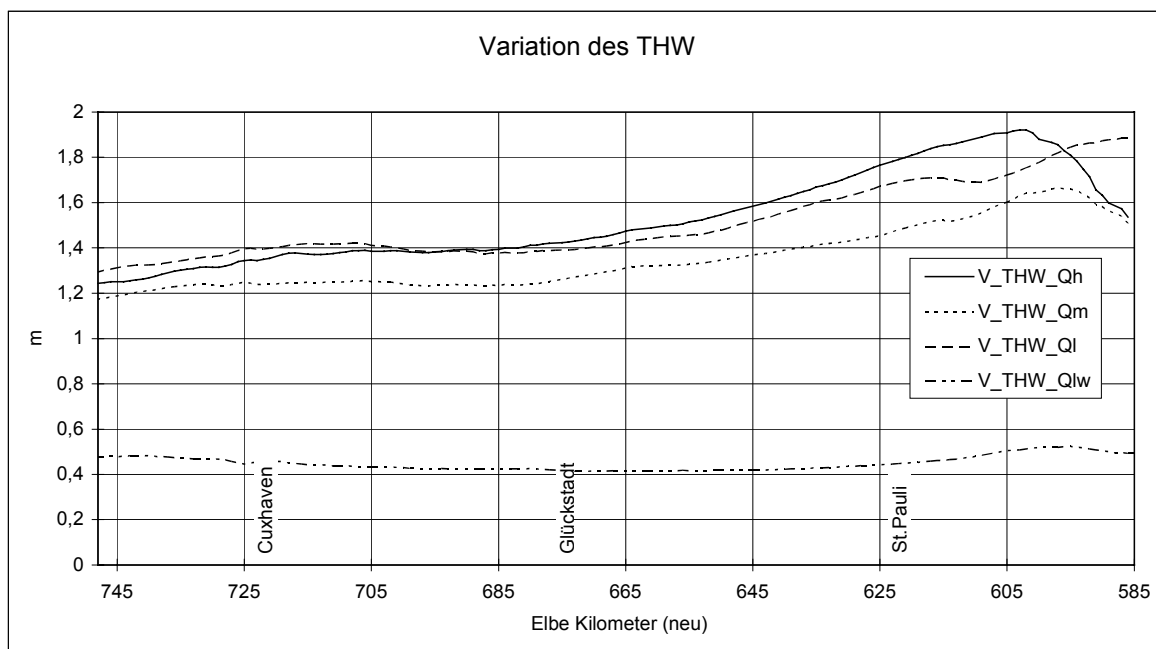


Abb. 6.3: Vergleich der Variation innerhalb eines Spring-Nipp-Zyklus der Tidehochwasserstände für die vier untersuchten Lastfälle, hohes, mittleres und niedriges Oberwasser sowie niedriges Oberwasser mit Ostwind.

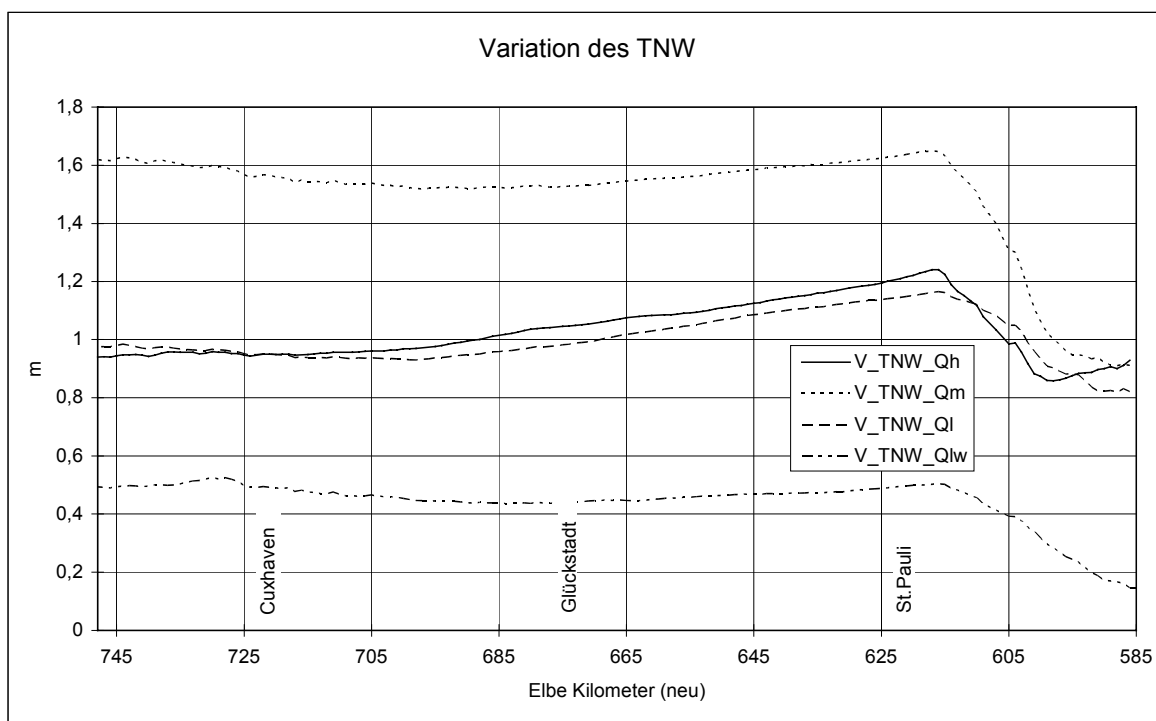


Abb. 6.4 Vergleich der Variation innerhalb eines Spring-Nipp-Zyklus der Tideniedrigwasserstände für die vier untersuchten Lastfälle, hohes, mittleres und niedriges Oberwasser sowie niedriges Oberwasser mit Ostwind.

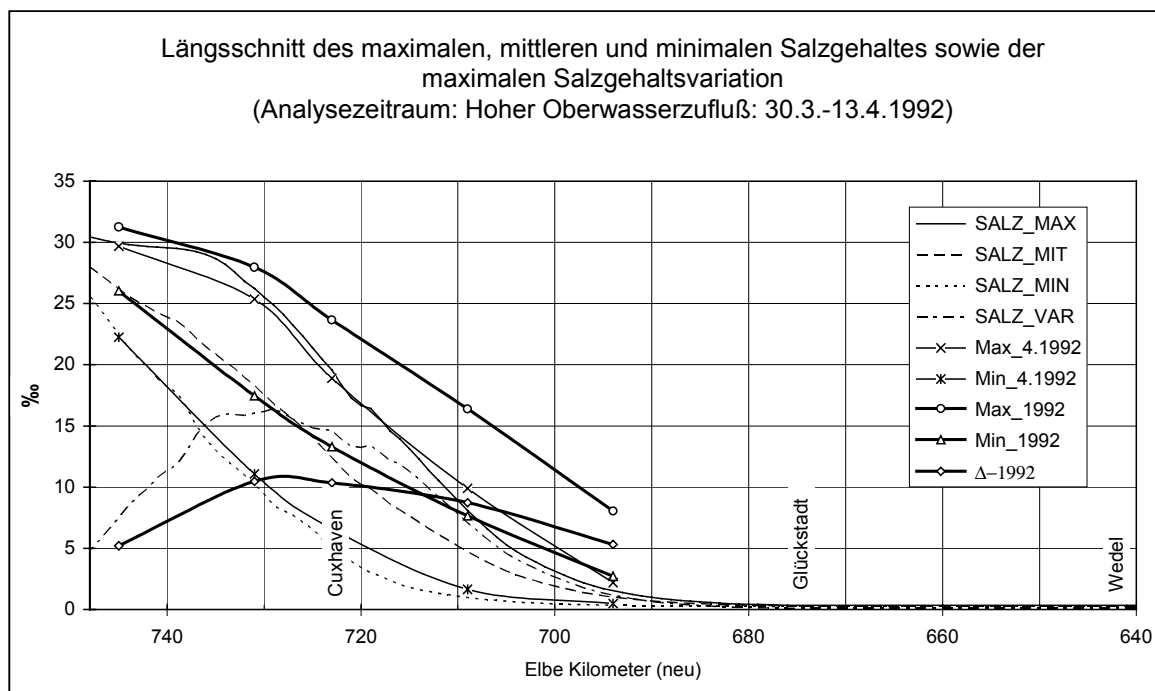


Abb. 6.5 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minimalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei hohem Oberwasserzufluß.

## 6.2. Szenario "Mittlerer Oberwasserzufluß" (Qm)

### 6.2.1. Oberwasserzufluß

Das Szenario "Mittlerer Oberwasserzufluß" (Qm) liegt zwischen dem 16.1.1992 und dem 30.1.1992. Der Oberwasserzufluß schwankt in dieser Zeit zwischen 650 m<sup>3</sup>/s und 910 m<sup>3</sup>/s. Der mittlere Oberwasserzufluß dieses Zeitraums beträgt 790 m<sup>3</sup>/s, das langjährige Mittel (1926/1991) beträgt 715 m<sup>3</sup>/s.

### 6.2.2. Tidewasserstände und Tidehub

Bild 6.6 zeigt den Verlauf von berechnetem maximalen, mittleren und minimalen Tidehoch- und Tideniedrigwasser während des Zeitraums Qm sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991 dieser Größen. Bild 6.7 zeigt den dazugehörigen berechneten maximalen, mittleren und minimalen Tidehub sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991. Die mittleren Wasserstände dieses Szenarios sind abgesehen vom Tnw ab Km 675 seewärts gegenüber den 10-jährigen Mittelwerten um ca. 0.25 m erniedrigt. Das Tnw nähert sich ab Km 675 seewärts dem Mittelwert an. Daher ist auch der Tidehub bis Km 675 nahezu identisch mit dem mittleren und fällt von da

seewärts bis zu ca. 0.2 m gegenüber dem Mittelwert ab. Die in dieser Zeit auftretende Variation des Tidehochwassers beträgt zwischen 1.20 m bei Km 748, erreicht ihr Maximum mit 1.65 m bei Km 597 und fällt stromauf bis auf 1.55 bei Km 585 (siehe Bild 6.3). Die Variation des Tideniedrigwassers beträgt 1.60 m bei Km 748, durchläuft stromauf bei Km 697 mit 1.52 m ein lokale Minimum, erreicht ihr Maximum bei Km 617 mit 1.65 m und fällt stromauf bis zum Wehr Geesthacht auf 0.91 m ab (siehe Bild 6.4). Die Variation des Tnw während dieses Zeitraums ist im Vergleich zu den anderen Szenarien auf der gesamten Strecke maximal.

### 6.2.3. Salzgehalte

In Bild 6.8 ist ein Längsschnitt des berechneten maximalen, mittleren und minimalen Salzgehaltes während des Szenarios Qm sowie der Mittelwerte des maximalen und minimalen Salzgehaltes für das Jahr 1992 sowie für den Monat Januar des gleichen Jahres dargestellt. Da der mittlere Oberwasserzufluß für 1992 deutlich unter dem langjährigen mittleren Oberwasserfluß liegt, ist dieses Szenario bezogen auf 1992 unter der Kategorie "hoher Oberwasserzufluß" einzuordnen. Daher ist die Brackwasserzone in gleicher Weise wie beim Szenario Qh

- stromab verlagert und
- in ihrer Ausdehnung zusammengestaucht.

Allerdings ist die Abweichung gegenüber den mittleren Verhältnissen für 1992 nicht so stark wie bei dem Szenario Qh. Die in dieser Zeit größte lokale Salzgehaltvariation von über 12 ‰ tritt über einen größeren Bereich von Km 713 bis Km 732 auf. Ein Wert von 2 ‰ erreicht maximal Km 688.

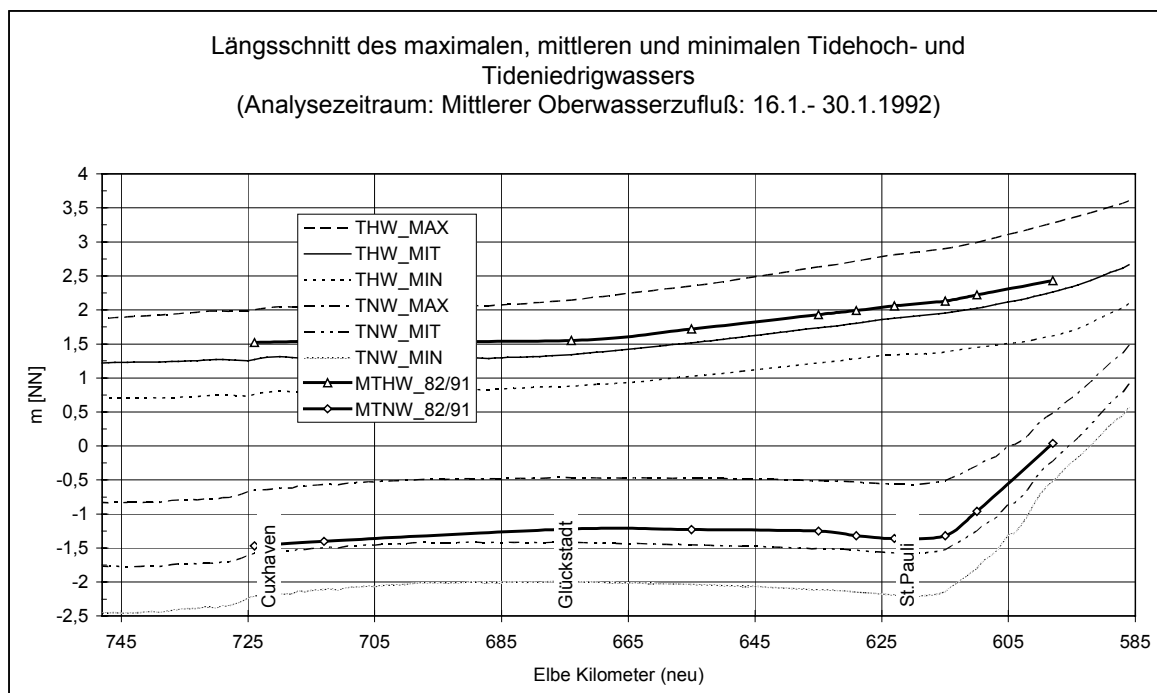


Abb. 6.6 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngrößen mit gemittelten Meßwerten bei mittlerem Oberwasserzufluß

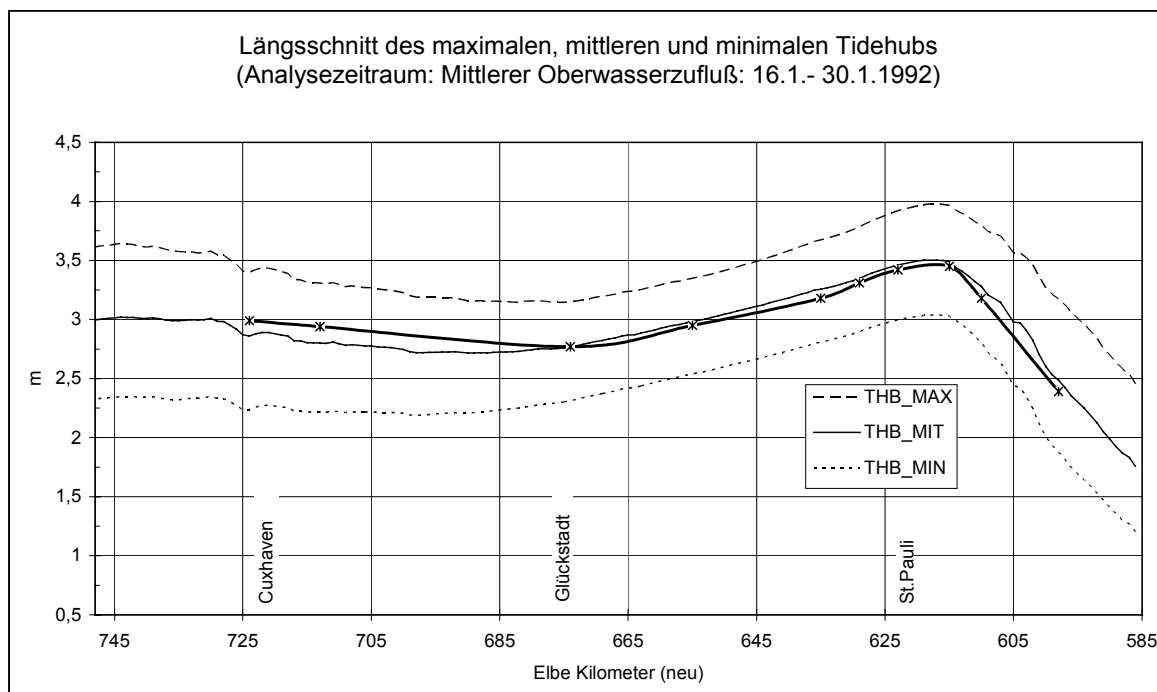


Abb. 6.7 Vergleich der berechneten mit Tidehübe mit gemittelten Meßwerten bei mittlerem Oberwasserzufluß

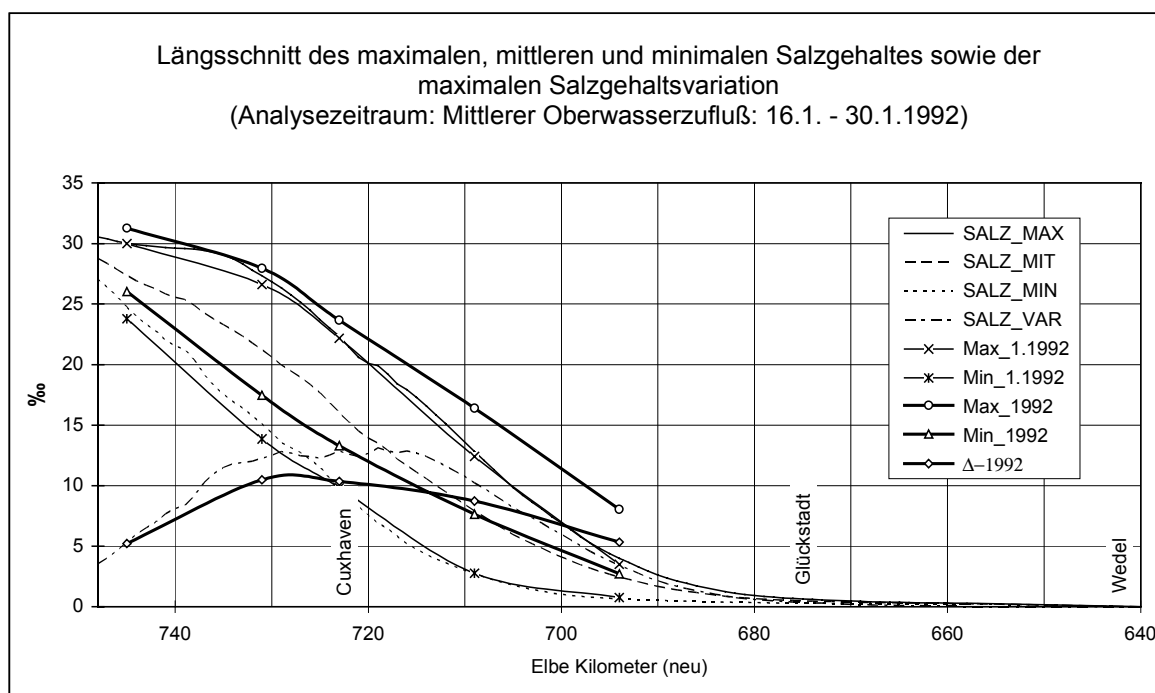


Abb. 6.8 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minimalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei mittlerem Oberwasserzufluß.

### 6.3. Szenario "Niedriger Oberwasserzufluß" (QI)

#### 6.3.1. Oberwasserzufluß

Das Szenario "Niedriger Oberwasserzufluß" (QI) liegt zwischen dem 12.9.1992 und dem 27.9.1992. Der Oberwasserzufluß schwankt in dieser Zeit zwischen 215 m<sup>3</sup>/s und 248 m<sup>3</sup>/s. Ein Oberwasserzufluß dieser Größenordnung ist zu 20% des Jahres 1992 aufgetreten und daher für einen längeren Zeitraum typisch.

#### 6.3.2. Tidewasserstände und Tidehub

Bild 6.9 zeigt den Verlauf von berechnetem maximalen, mittleren und minimalen Tidehoch- und Tideniedrigwasser während des Zeitraums QI sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991 dieser Größen. Bild 6.10 zeigt den dazugehörigen berechneten maximalen, mittleren und minimalen Tidehub sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991. Die mittleren Wasserstände dieses Szenarios sind abgesehen vom Tnw ab Km 675 seewärts gegenüber den 10-jährigen Mittelwerten um ca. 0.4 m erniedrigt. Das Tnw nähert sich ab Km 670 seewärts dem Mittelwert an. Daher ist auch der Tidehub bis Km 670 nahezu identisch mit dem mittleren und fällt von da see-

wärts bis zu ca. 0.3 m gegenüber dem Mittelwert ab. Oberhalb Km 615 sinken die Tidewasserstände, besonders das Tnw, als Folge des geringen Oberwassers gegenüber den Mittelwerten ab. Das Tnw in Zollenspieker liegt um 1 m niedriger als der 10-jährige Mittelwert. Das Thw an diesem Ort liegt um ca. 0.45 m niedriger. Die in dieser Zeit auftretende Variation des Tidehochwassers beträgt 1.30 m bei Km 748 und erreicht ihr Maximum mit 1.90 m beim Wehr Geesthacht (siehe Bild 6.3). Die Variation des Tideniedrigwassers beträgt 0.98 m bei Km 748, erreicht ihr Maximum bei Km 615 mit 1.18 m und fällt stromauf bis auf 0.81 m ab (siehe Bild 6.4).

### 6.3.3. Salzgehalte

In Bild 6.11 ist ein Längsschnitt des berechneten maximalen, mittleren und minimalen Salzgehaltes während des Szenarios Q1 sowie der Mittelwerte des maximalen und minimalen Salzgehaltes für das Jahr 1992 sowie für den Monat September desselben Jahres dargestellt. Die Brackwasserzone ist als Folge des niedrigen Oberwasserzuflusses gegenüber mittleren Verhältnissen

- stromauf verlagert und
- in ihrer Ausdehnung gestreckt.

Die in dieser Zeit größte lokale Salzgehaltvariation von über 10 ‰ tritt über einen Bereich von Km 700 bis Km 711 auf. Ein Wert von 2 ‰ erreicht maximal Km 663.



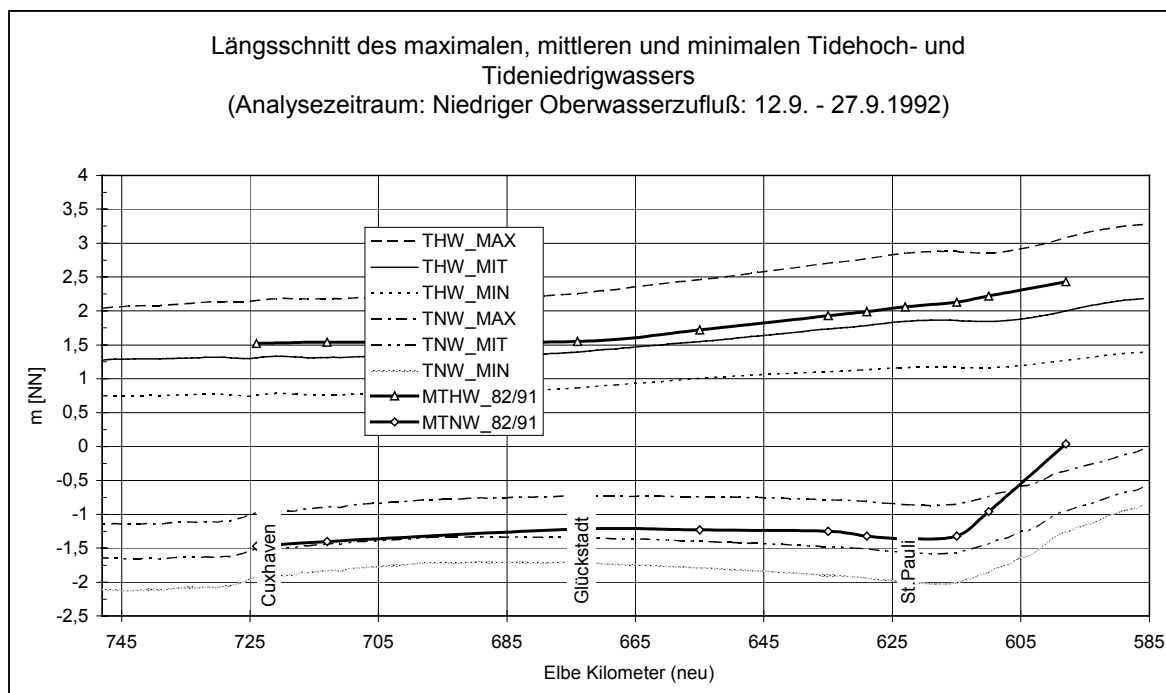


Abb. 6.9 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngrößen mit mittleren Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß

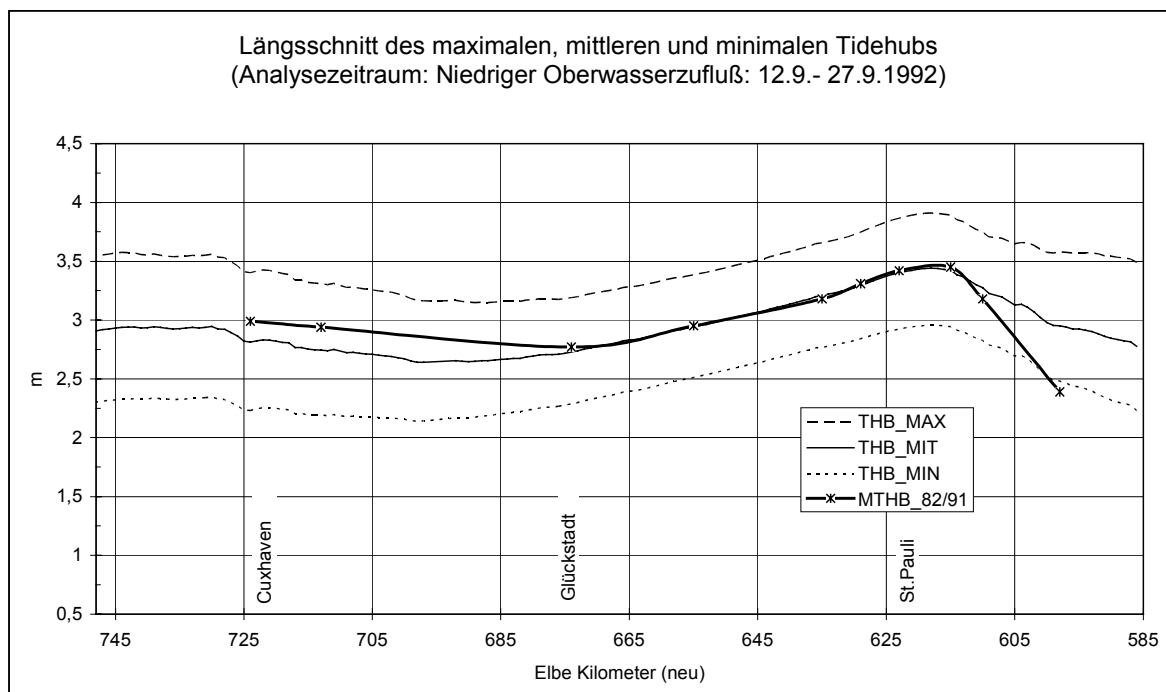


Abb. 6.10 Vergleich der berechneten mit Tidehöhe mit gemittelten Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß

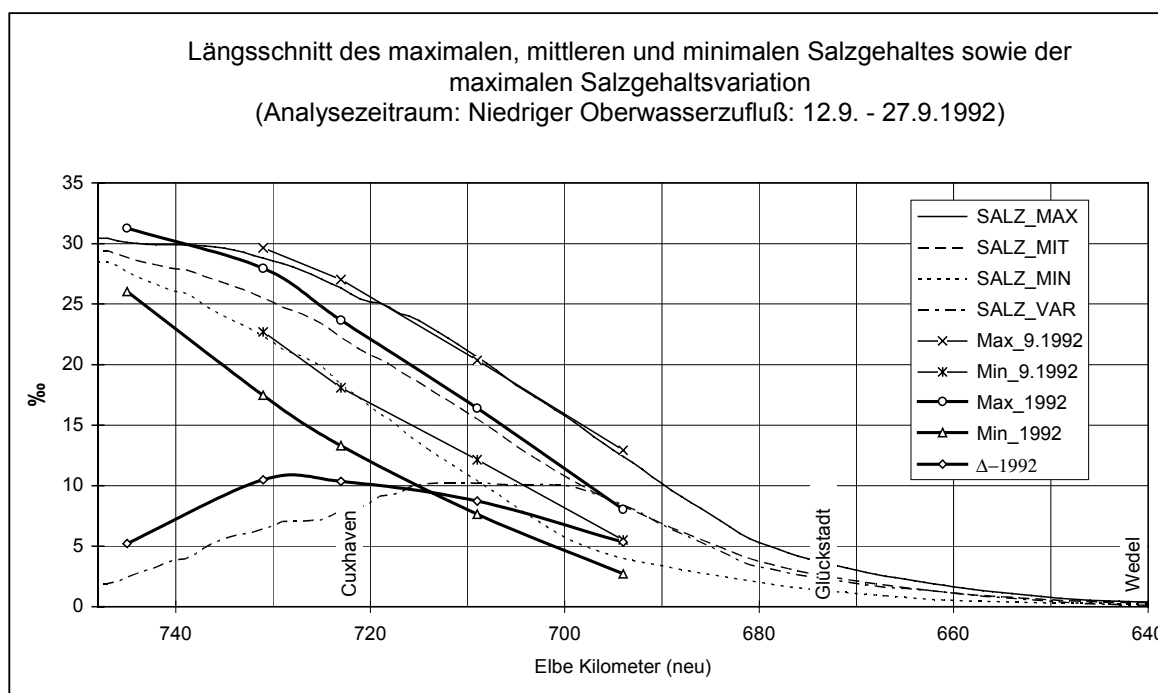


Abb. 6.11 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minimalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei niedrigem Oberwasserzufluß.

#### 6.4. Szenario "Niedriger Oberwasserzufluß mit starkem Ostwind" (Qlw)

##### 6.4.1. Oberwasserzufluß

Das Szenario "Niedriger Oberwasserzufluß mit starkem Ostwind" (Qlw) liegt zwischen dem 2.10.1992 und dem 6.10.1992. Der Oberwasserzufluß schwankt in dieser Zeit zwischen 233 m<sup>3</sup>/s und 248 m<sup>3</sup>/s.

##### 6.4.2. Tidewasserstände und Tidehub

Bild 6.12 zeigt den Verlauf von berechnetem maximalen, mittleren und minimalen Tidehoch- und Tideniedrigwasser während des Zeitraums Qlw sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991 dieser Größen. Bild 6.13 zeigt den dazugehörigen berechneten maximalen, mittleren und minimalen Tidehub sowie das 10-jährige Mittel 1982/1991. Bei der Beurteilung dieses Zeitraums ist zu beachten, daß er

1. gegenüber den anderen Zeiträumen nur 5 Tage umfaßt und
2. ein starker Ostwind (10 - 16 m/s entsprechend Stärke 5 - 7 auf der Beaufort Skala) weht (siehe Bild 6.14).

Das Szenario fällt in die Nippzeit. Durch den starken Ostwind werden die Amplituden des Wasserstands stark gedämpft, wie der Vergleich zwischen vorausberechneten und eingetretenen Wasserständen zeigt (siehe Bild 6.15). Außerdem wird der mittlere Wasserstand erniedrigt. Durch die im Vergleich zu den anderen Szenarien kurze Dauer von 5 Tagen wird die Variationsbreite der Variablen eingeschränkt, so daß Thw und Tnw nur um bis zu 0.5 m schwanken. Die mittleren Werte dieses Szenarios zeigen die größten Abweichungen aller Szenarien von den 10-jährigen Mittelwerten des Thw und Tnw. Das Thw liegt auf der gesamten Strecke um 1.30 bis 1.80 m niedriger als der Mittelwert. Die Abweichung des Tnw nimmt von 0.1 m in Cuxhaven stromauf bis Km 615 bis auf ca 0.7 m zu und erreicht ihr Maximum bei Zollenspieker wo das Tnw 1.30 m niedriger als der 10-jährige Mittelwert liegt. Als Folge dessen weicht der Tidehub ebenfalls stark vom 10-jährigen Mittelwert ab. So ist der Thb bei Cuxhaven 1.25 m kleiner als der Mittelwert. Dies verdeutlicht die Wirkung des Ostwindes im Trichter der Elbmündung, der auf einer relativ großen Fläche gegen die Tide gerichtet ist. Die Abweichung (1.25 m) vom 10-jährigen Mittelwert verringert sich nach oberstrom auf ca. 1 m bei Km 615 und nimmt dann weiter bis auf 0.4 m bei Zollenspieker ab.

#### **6.4.3. Salzgehalte**

In Bild 6.16 ist ein Längsschnitt des berechneten maximalen, mittleren und minimalen Salzgehaltes während des Szenarios Qh sowie der Mittelwerte des maximalen und minimalen Salzgehaltes für das Jahr 1992 dargestellt. Die Brackwasserzone entspricht in ihrer maximalen oberstromseitigen Ausdehnung etwa mittleren Verhältnissen, wohingegen die minimale oberstromseitige Ausdehnung durch die geringe Gezeitenamplitude um ca. 10 Km stromauf verschoben ist. Als Folge ist auch die maximale lokale Variation des Salzgehalts für dieses Szenario am geringsten. Maximal erreicht die Variation 7.5 Promille bei Km 701. Ein Wert von 2 Promille erreicht maximal Km 670.

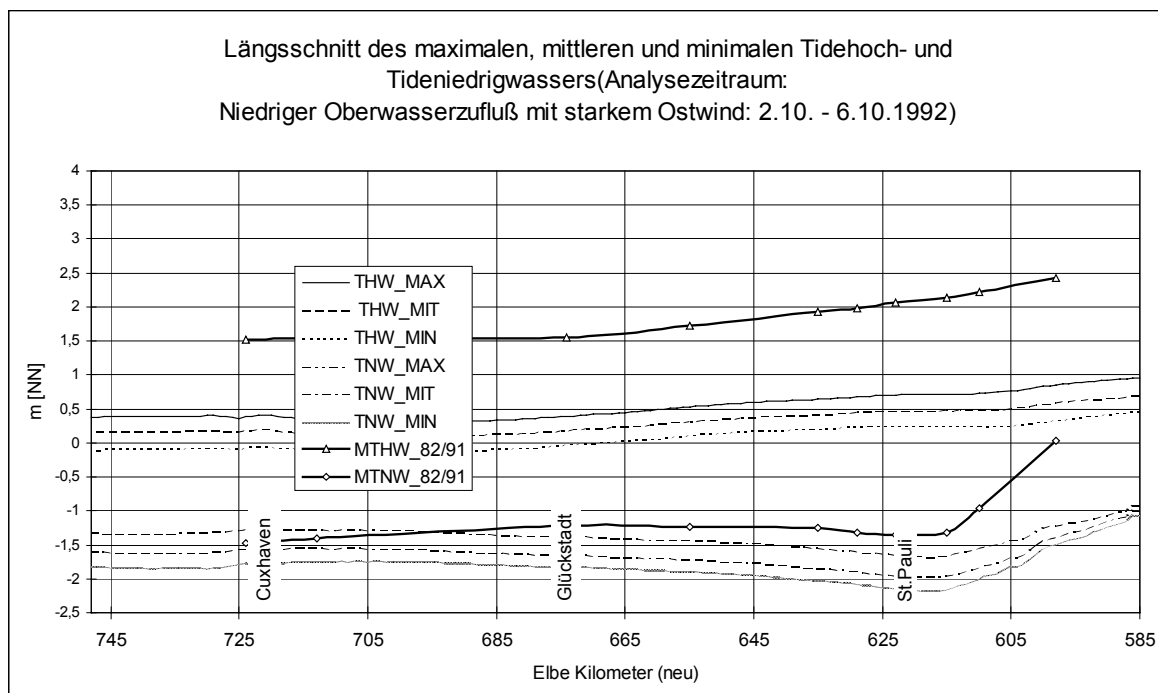


Abb. 6.12 Vergleich der berechneten Tidewasserstandskenngrößen mit mittleren Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß mit Ostwind

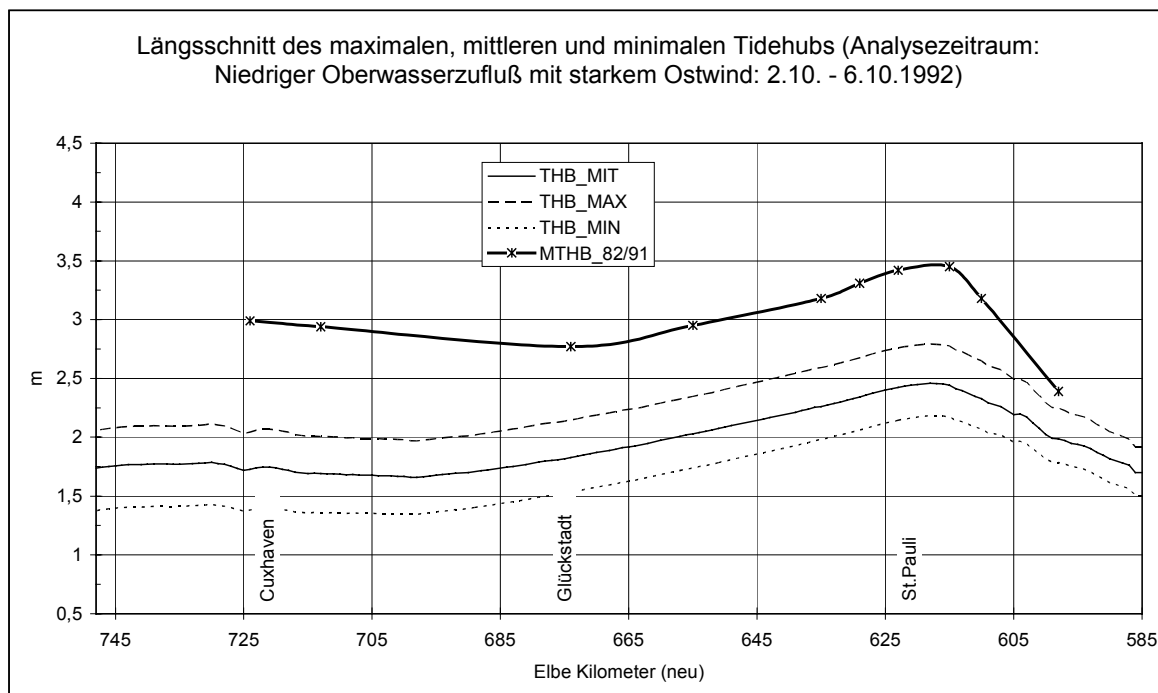


Abb. 6.13 Vergleich der berechneten mit Tidehübe mit gemittelten Meßwerten bei niedrigem Oberwasserzufluß mit Ostwind.

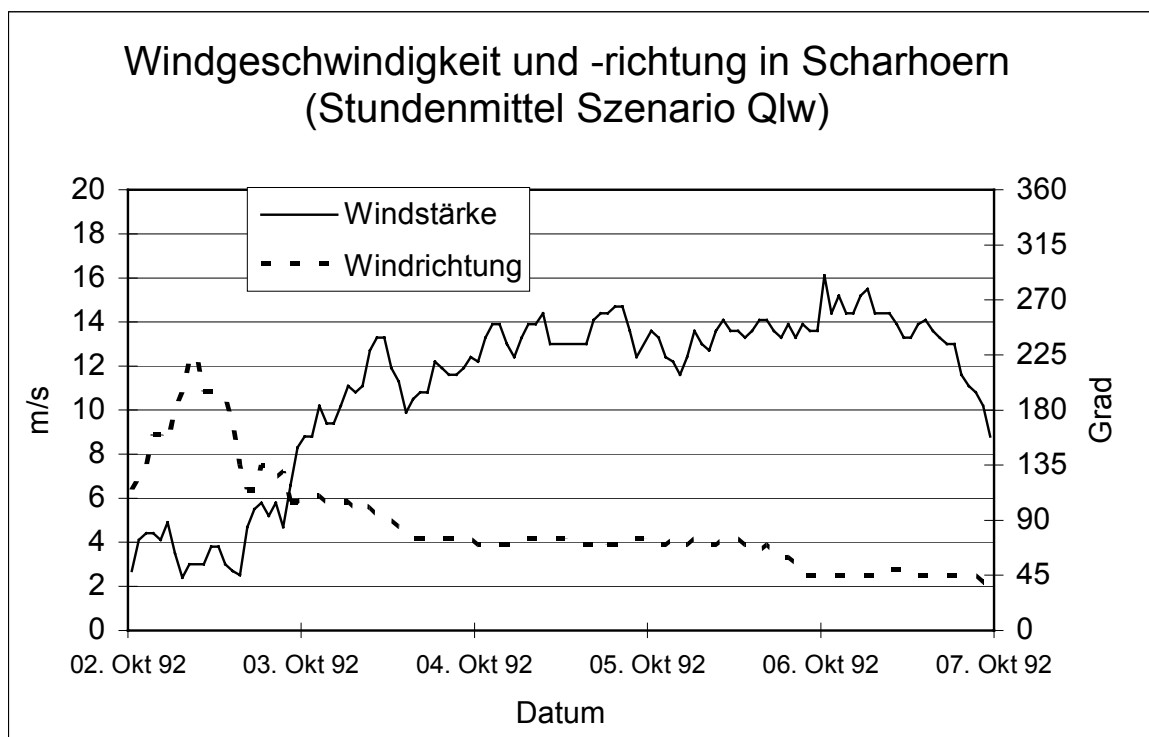


Abb. 6.14 Windstärke und Windrichtung bei Schhörn während des Lastfalls niedriges Oberwasser mit Ostwind.

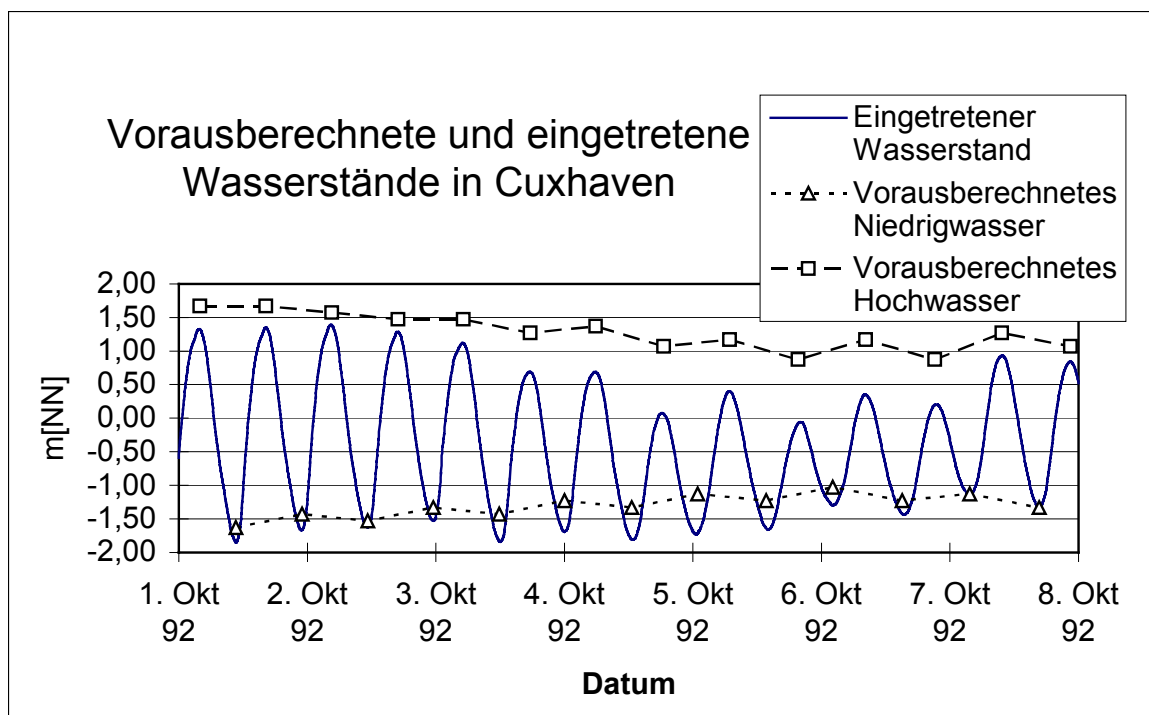


Abb. 6.15 Vergleich vorausgerechneter (gemäß Gezeitentabelle BSH) und eingetretener Tidewasserstände bei niedrigem Oberwasser mit Ostwind.

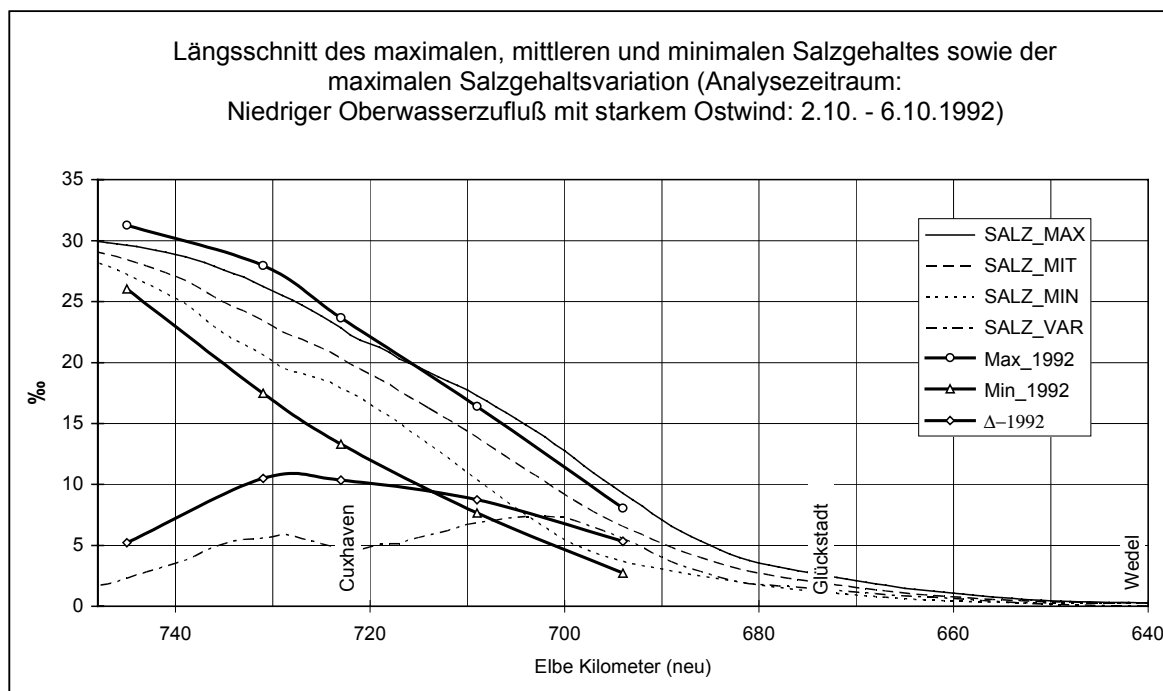


Abb. 6.16 Vergleich der maximalen, mittleren und minimalen Salzgehalte mit minimalen und maximalen gemessenen Salzgehalten einschließlich der Salzgehaltsvariation bei niedrigem Oberwasserzufluß mit Ostwind.

## 7 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Modellsimulationen sind mittels eines Informationssystems auf Basis einer Multimedia-Software zusammengefaßt worden. Dieses Informationssystem befindet sich auf einer Compact Disc, auf die im weiteren Verlauf vereinfachend mit "Elbe-CD" verwiesen wird. Das Informationssystem ermöglicht die "Navigation" durch die verschiedenen Graphiken und erleichtert damit ganz wesentlich das Auffinden und Vergleichen von Prognoseergebnissen. Insgesamt sind etwa 2000 Graphiken für das Informationssystem verarbeitet worden.

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Darstellungsformen:

- 1 Längsschnittdarstellung:** Diese Form wurde immer dann gewählt, wenn sich die darzustellende Variable über den Querschnitt nur wenig ändert. Dies trifft insbesondere auf den Wasserstand zu, so daß Hoch und Niedrigwasserstände, Tidehub, Fortschrittsgeschwindigkeit der Scheitelwasserstände und Flut-/Ebbedauern auf diese Art dargestellt werden. Auch für den Salzgehalt wurde eine solche Darstellung erzeugt, obwohl er über dem Querschnitt insbesondere in Bereichen der Außenelbe mit ausgedehnten Wattgebieten relativ große Variationen aufweist.

Für diese Darstellungsform wurden die Ergebnisse von Berechnungspunkten entlang der Fahrrinnenachse herangezogen. Es handelt sich dabei also nicht um Mittelungen über den Querschnitt. Für die dargestellten Größen ermöglichen die Längsschnitte eine gute Übersicht des gesamten Ästuars und damit eine Einschätzung der ausbaubedingten Veränderungen „auf einen Blick“.

- 2 Kartographische Darstellungen:** Diese Form wurde immer dann gewählt, wenn die Berechnungsgröße einer großen Variabilität über den Querschnitt unterliegt. Dies ist besonders bei den Strömungsgeschwindigkeiten, beim Geschiebetransport und im geringeren Maße auch beim Salzgehalt der Fall. Um den Umfang übersichtlich zu halten sind nur die Simulationsergebnisse des Szenarios „Spring-Nipp-Zyklus“ dargestellt. Dabei wurden aus diesem Zeitraum fünf Tage der Springzeit für die Analyse und Darstellung ausgewählt, da hier die größten ausbaubedingten Veränderungen vorliegen.

Die 2-D-Darstellungen lassen sich in zwei Gruppen einordnen. Zum einen werden synoptische Simulationsergebnisse, d. h. die Berechnungsergebnisse zu einem bestimmten Tidezeitpunkt, dargestellt, zum andern sind abeleitete Größen (siehe folgender Abschnitt) enthalten, die jeweils das Ergebnis einer Zeitreihen-

analyse darstellen. Nur bei diesen Größen erfolgt eine Berechnung der ausbaubedingten Veränderungen, da nur so eine Berücksichtigung der Phasenverschiebung aufgrund veränderter Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle möglich ist.

Die Topographie als wichtigste Randbedingung für das Modell ist ebenfalls zweidimensional dargestellt. Die dazugehörigen ausbaubedingten Veränderungen enthalten die Fahrrinnenmodifikationen durch Baggerung und morphologischen Nachlauf (siehe Kapitel 5).

Die 5 Tidedynamikszenerarien

- hoher Oberwasserzufluß „Qh“
- mittlerer Oberwasserzufluß „Qm“
- niedriger Oberwasserzufluß „Ql“
- niedriger Oberwasserzufluß mit Ostwind „Qlw“
- Spring-Nippzyklus „SN“ (auch Verifikationszeitraum)

können mit Hilfe der Längsschnittdarstellungen verglichen werden. Eine Erläuterung der Lastfälle bzw. eine Begründung für deren Auswahl ist in Kapitel 6 zu finden.

Nachfolgend werden die ausbaubedingten Veränderungen der Tidedynamik dargestellt. Die schriftlichen Ausführungen konzentrieren sich auf das Aufzeigen der Veränderungen sowie auf die Erläuterung der physikalischen Zusammenhänge. Darüberhinaus gehende Informationen können und sollen aus den Darstellungen des Informationssystems Elbe-CD entnommen werden. Es ist notwendig, dieses Kapitel in Kombination mit der Elbe-CD zu lesen.

Grundlage der folgenden Diskussion sind die Rechenwerte (Ergebnisse der Modellsimulation), die auch auf der Elbe-CD zu finden sind. Die Prognosewerte werden in Kapitel 8 dargestellt.

## 7.1 Berechnung abgeleiteter Größen

Die Berechnungen mit dem Modell ergeben Zeitreihen der Berechnungsgrößen für jeden Berechnungspunkt. Typischerweise wird mit einer Zeitschrittweite von 30 Sekunden gerechnet, jedoch werden die Berechnungsergebnisse nur alle 10 min abgespeichert, da sonst die Datenmengen zu groß werden. Für die Beurteilung der Tidedynamik ist es jedoch nicht alleine ausreichend, für bestimmte Gebiete die synoptischen Ergebnisse als Zeitreihe zu analysieren sondern bestimmte charakteristische Merkmale wie Kenterpunkte, maximale Geschwindigkeiten der Flut oder Ebbe und viele Kenngrößen mehr zu bestimmen.



Besonders wichtig ist dies für den Vergleich von IST-Zustand mit dem Ausbauzustand. Durch den Ausbau ändert sich die Phasengeschwindigkeit der Tidewelle, so daß sich die charakteristischen Zeiträume der Tide verschieben (siehe Abb. 7.1). Selbst wenn die Amplitude der Tidewelle gleich bliebe, wäre es nicht möglich, IST-Zustand und Ausbau zu bestimmten Zeitpunkten, also synoptisch, zu vergleichen, weil dann durch die Phasenverschiebung falsche Differenzen aufträten.

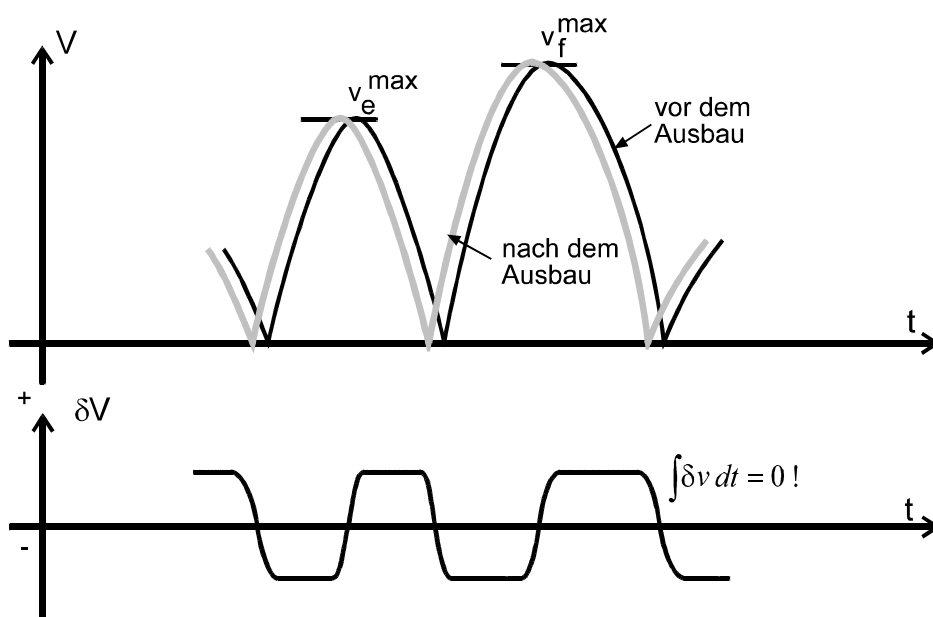


Abb. 7.1: Wirkung der ausbaubedingten Phasenverschiebung der Tidewelle auf die Strömungsgeschwindigkeiten bei (theoretisch) unverändertem Tidehub.

Statt dessen ist es notwendig, die Eintrittszeiten des Hoch- und Niedrigwassers sowie die Kenterzeitpunkte der Strömung aus den Zeitreihen zu bestimmen. Dies geschieht durch eine Zeitreihenanalyse der Berechnungsergebnisse an jedem Punkt des Untersuchungsgebietes. Dahinter verbirgt sich ein erheblicher Rechen- und Bearbeitungsaufwand, der die gleiche Größenordnung wie die eigentliche Modellsimulation einnimmt. Abbildung 7.2 verdeutlicht schematisch, wie diese Zeitpunkte sich zueinander verhalten.

Die dort gezeichneten Kurven für Wasserstand und den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit, sind idealisiert. In dieser Form wären sie einer Extremalwertanalyse leicht zugänglich. In der Praxis weisen die Kurven Nebenextrema und Lücken auf, so daß bei der Identifizierung der Kenterzeitpunkte Mehrdeutigkeiten entstehen können. Dies ist insbesondere auch auf Wattgebieten der Fall, wenn die Strömung nicht zur Ruhe kommt, sondern nur ihre Richtung ändert. Auch Wasserstandskurven können Nebenextremwerte aufweisen, die Mehrdeutigkeiten verursachen.

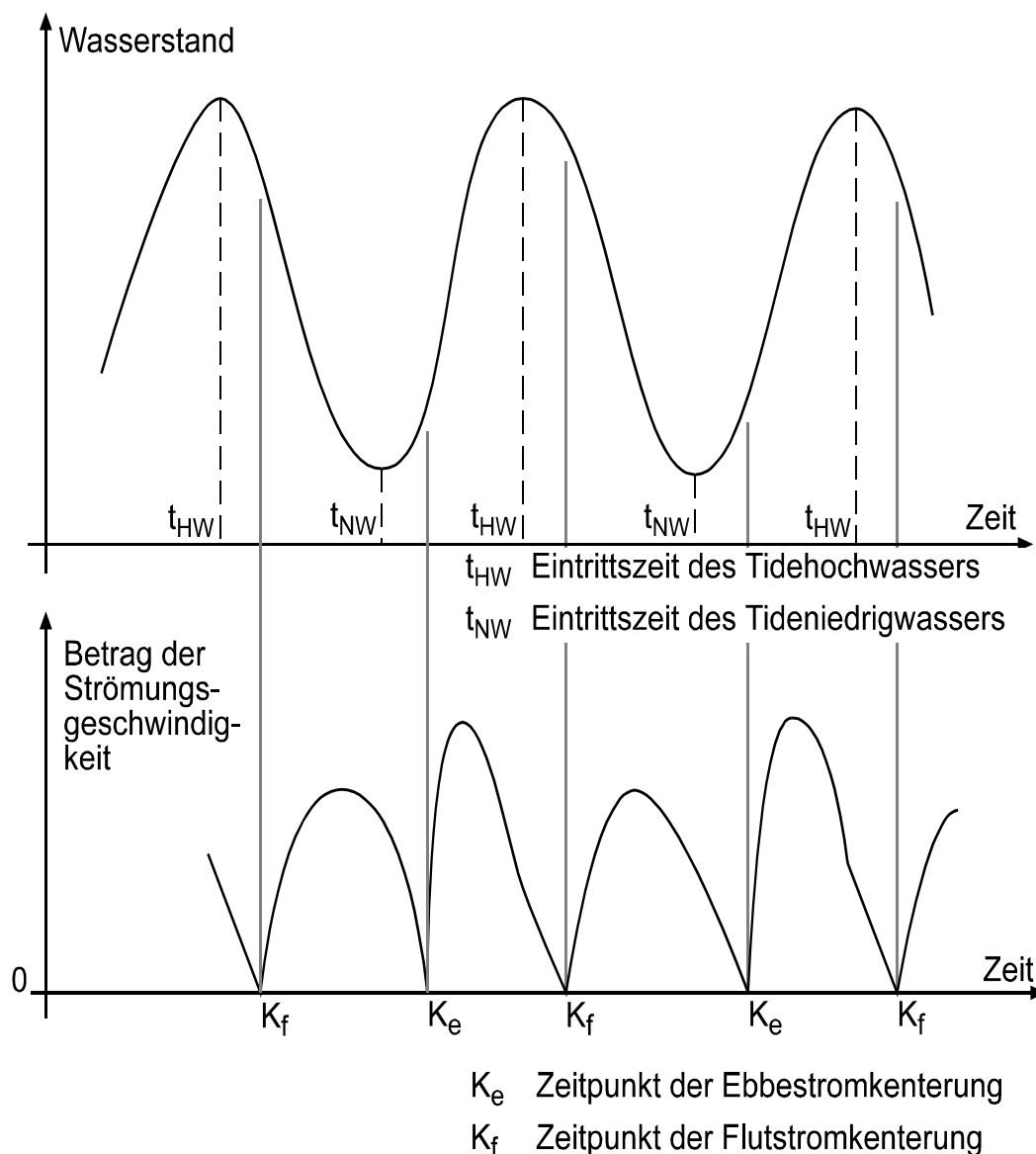


Abb. 7.2: Schematische Darstellung der Relationen zwischen verschiedenen Zeitpunkten, die das Tidegeschehen charakterisieren.

Die algorithmische Implementierung für Identifikation der Zeitpunkte aus den Zeitreihen ist recht robust und stabil. Trotzdem kann es insbesondere auf Wattflächen und an trockengefallenen Uferbereichen zu einer ungenauen Identifikation der Zeitpunkte kommen, da zum einen die Zeitpunkte  $t_{NW}$  und  $K_e$  wegen des Trockenfallens nicht existieren und auch  $K_f$  wegen des nur gering ausgeprägten Minimums der Strömungsgeschwindigkeiten ungenau berechnet wird. Ein besonderes Problem bilden dabei zurückbleibende Pfützen auf den Wattgebieten, die das Ergebnis der Analyse zusätzlich beeinflussen.

Diese Eigenschaften, die grundsätzlich mit der Analyse der Strömungsdaten in Form von abgeleiteten Größen verknüpft sind, führen dazu, daß die Ergebnisse

punktuell insbesondere in Flachwasserbereichen vom eigentlichen Gesamttrend abweichen (gelegentlich bezeichnet mit „numerischen Schmutzeffekten“). Hierbei handelt es sich aber nicht um Ungenauigkeiten der Modellberechnungen, sondern lediglich um Effekte, die in der Analyse der Tidekennwerte begründet liegen. Es handelt sich dabei um algorithmisch bedingte, fehlerhafte Zeitreiheninterpretationen, die zwar theoretisch manuell korrigierbar wären, was aber praktisch aufgrund des Aufwands nicht durchgeführt werden kann.

Mit den oben genannten Zeitpunkten ist es möglich, einzelne Phasen der Tide zu identifizieren und daraus Kennwerte wie maximale Flut- oder Ebbestromgeschwindigkeit zu berechnen. Abb. 7.3 zeigt zur Übersicht eine Definitionsskizze der verschiedenen Tidekenngrößen und Tidephasen.

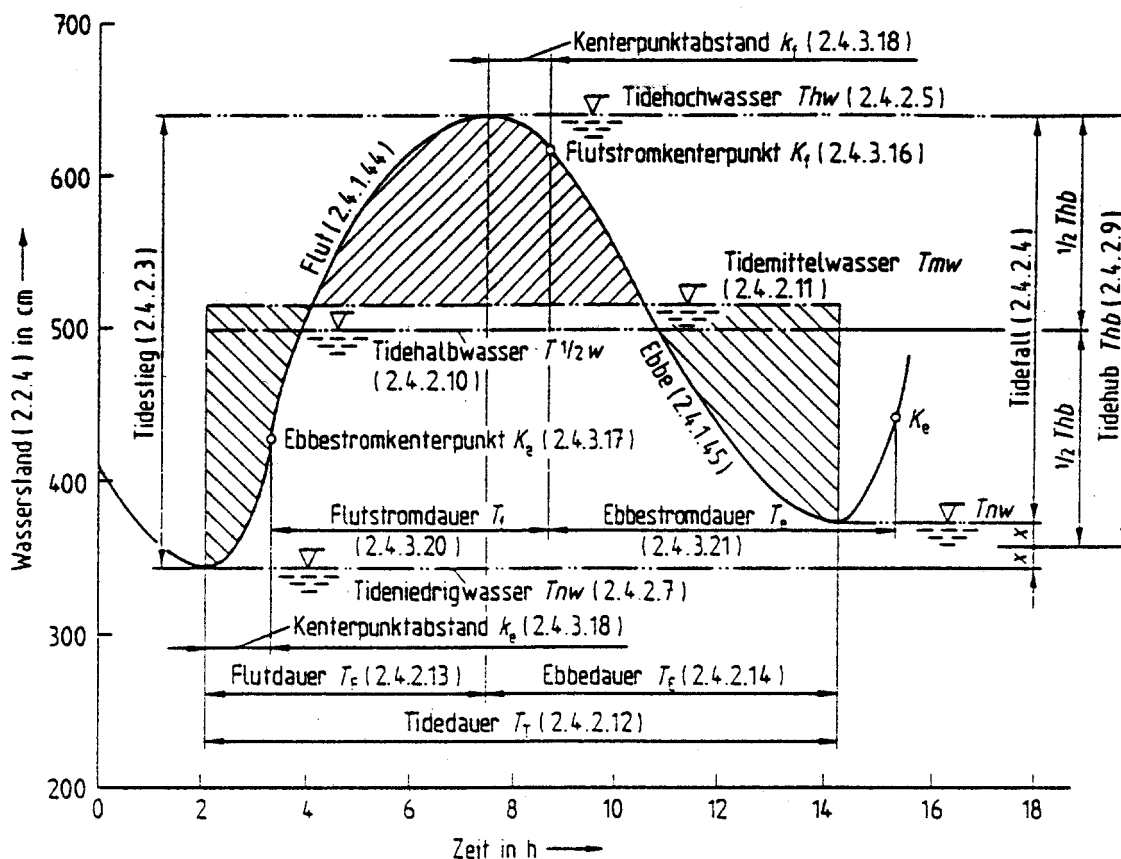


Abb. 7.3: Definitionsskizzen zu den Zeitphasen einer Tide (DIN 4049)

Die Berechnung der abgeleiteten Größen bezieht sich immer auf einen Analysezeitraum, der durch eine frei wählbare Anzahl von Tiden definiert werden kann (beispielsweise der 14-tägige Spring-/Nippzyklus). Innerhalb eines solchen Analysezeitraum ist es beispielsweise für jeden Punkt möglich, alle zugehörigen Zeitphasen mit Flutstrom zu identifizieren und auszuwerten. Aus einer Gruppe von

Flutphasen lassen sich dann z. B. die mittleren, maximalen und minimalen Werte der maximalen Flutströmungsgeschwindigkeit berechnen oder analog auch den mittleren, maximalen und minimalen Wert der mittleren Flutstromgeschwindigkeit bestimmen.

Dabei muß der Analysezeitraum in dem Berechnungszeitraum für die Modellsimulation eingebettet sein, damit für jeden Punkt des Ästuars eine identische Abfolge von Tiden zu Analyse herangezogen werden kann. Für die Elbe bedeutet dies, daß der Berechnungszeitraum mindestens 6 Stunden länger als der Analysezeitraum sein muß, da die Laufzeit einer Tidewelle von der Außenelbe bis Geesthacht etwa 6 Stunden beträgt. Praktisch muß der Berechnungsvorlauf und Nachlauf im Vergleich zum Analysezeitraum noch größer gewählt werden, um die Analyse mit den Tidehoch- bzw. Tideniedrigwasserständen beginnen und beenden zu können.

Abschließend ist festzustellen, daß nur durch die Zeitreihenanalyse zur Bestimmung der abgeleiteten Tidekennwerte die Beurteilung der Tidedynamik und deren ausbaubedingter Veränderungen möglich wird. Sie ist damit ein sehr mächtiges Werkzeug, bei dem die Vorteile bei weitem die gewissen Nachteile überwiegen.

## 7.2 Wasserstandskenngrößen

### 7.2.1 Tidehoch- und Tideniedrigwasser, Tidehub

*Elbe\_CD > Längsprofile > Variationen des Oberwassers > Tidewasserstände und Tidehub*

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > abgeleitete Kenngrößen des Wasserstands*

Das Tidegeschehen in der Außen- und Unterelbe weist eine recht große natürliche Variabilität auf. Die Schwankungen erklären sich aus

- astronomischen Einflüssen: Spring- und Nippzyklen (häufige und regelmäßige Schwankung)
- Oberwasserschwankungen: jahreszeitlich bedingte Änderungen der Wasserführung in der Elbe (Schwankungen im Jahreszyklus)
- Wetterbedingungen: Wind- und Luftdruckverteilungen in der Deutschen Bucht (stochastische Schwankungen)

Bei häufig anzutreffenden Verhältnissen (Spring-Nipp-Zyklus mit Oberwasser bei etwa 300 m<sup>3</sup>/s) variiert der Tidehub in Bereich des Ästuars wie folgt: In der Außenelbe beträgt der Tidehub etwa 3,2 m, er nimmt dann im Bereich bis zur Ostemündung durch Dämpfung auf 3,0 m ab, um dann, bedingt durch Teilreflek-

tionen an steilen Uferböschungen und durch Konzentration des Stroms auf ein Hauptfahrwasser, auf bis zu 3,7 m im Hamburger Hafen anzusteigen. Oberhalb des Hafens reduziert sich die Wassertiefe rasch von 14 m auf 3 m (bezogen auf Tnw). Die damit verbundene größere Reibung und Dämpfung erhöht die Niedrigwasserstände, so daß der Tidehub in Geesthacht nur noch 2,9 m beträgt. Die Längsschnitte der Wasserstände und des Tidehubs, zeigen die für einen Spring-Nipp-Zyklus typischen Variationen.

Die zweidimensionalen Darstellungen auf der Elbe-CD enthalten den minimalen, mittleren und maximalen Tidehub. Sie weisen nach, welche geringen Schwankungen der Wasserstand innerhalb eines Querschnitts unterliegt. Die Analyse der ausbaubedingten Änderungen des Wasserstands auf der Basis von Längsschnitten ist daher gerechtfertigt.

Von den fünf Tidedynamikszenarios führen die Szenarios niedriger Oberwasserzufluß, mittlerer Oberwasserzufluß, hoher Oberwasserzufluß und Spring-Nipp-Zyklus zu annähernd gleichen ausbaubedingten Veränderungen. Dies sind die bei weitem häufigsten, regelmäßig anzutreffenden Randbedingungen für die Tidedynamik. Die für diese Lastfälle berechneten Auswirkungen des Ausbaus sind daher auch die Lastfälle, die für die Eingriffsbeurteilung in das Ökosystem maßgeblich sind.

Im Bereich zwischen Cuxhaven und Glückstadt sinkt das Niedrigwasser um 2 cm ab. Dieses Absenkungsmaß steigt bis St. Pauli kontinuierlich auf maximal 7 cm an. Die in diesem Bereich auftretenden Reflexionserscheinungen, die sich in einem Anstieg des Tidehubs dokumentieren, verursachen diese kontinuierliche Zunahme der ausbaubedingten Veränderungen. Gleichzeitig steigen hier ausbaubedingt auch die Hochwasserstände um bis zu 4 cm an. Beide Effekte führen zu einer maximalen Vergrößerung des Tidehubs von 10,5 cm im Bereich von St. Pauli. Durch die oberhalb des Hamburger Hafens vorhandene hohe Dämpfung, klingt die Veränderung des Tidehubs wieder ab und beträgt bei Geesthacht maximal 5 cm.

Das Szenario „niedriges Oberwasser mit Ostwind“ reduziert die Tidewasserstände und führt allgemein zu den niedrigsten Niedrigwasserhöhen, weil hier der Windschub gegen die von der Nordsee einlaufende Tidewelle gerichtet ist. Im Verhältnis ist daher der Einfluß der Fahrrinnenanpassung bei diesen Wasserständen am größten. Dem überlagert ist eine allgemeine Dämpfung des Tidesignals, so daß das Energiedargebot aus der Tidewelle geringer wird. Dieser Effekt reduziert die Wirkung des Ausbaus, so daß sich insgesamt geringere Veränderungswerte als bei „normalen“ Tiden ergeben.

Aufgrund des Vergleichs der verschiedenen Szenarien, der für dieses Gutachten durchgeführt wurde, wird also deutlich, daß die maximale Reduktion der Nied-

rigwasserstände nicht mit den niedrigsten Wasserständen aufgrund von Ostwind einhergeht. Dieser Effekt stellt sich ein, obwohl aufgrund der geringeren Wassertiefen der Einfluß des Ausbaus maximal sein sollte. Die Reduktion der Energieanregung in Form der Tidewelle ist also so stark, daß die ausbaubedingten Veränderungen geringer als bei den übrigen Szenarien ausfallen.

Ebenso tritt die maximale Erhöhung des Tidehochwassers nicht bei erhöhten Wasserständen aufgrund von Windstau durch Westwindlagen auf, da sich in dieser Situation die Wirkung des Ausbaus aufgrund der insgesamt größeren Wassertiefe reduziert.

### 7.2.2 Ausbreitung der Tidewelle

Im Grundsatz verhält sich die Fortschrittsgeschwindigkeit  $c$  einer Tidewelle wie die einer Flachwasserwelle, sie wird also durch die Wassertiefe  $h$  gemäß folgender Beziehung begrenzt:

$$c = \sqrt{g \cdot h} \quad (7.1)$$

Diese Formel ist so nur für Rechteckgerinne mit einheitlicher Wassertiefe gültig. Im Falle des Elbeästuars handelt es sich aber um eine stark variable Tiefe und eine Aufteilung des Fließquerschnitts in Hauptrinne und Nebenrinnen. Durch diese Querschnittsgliederung kommt es zu einer Veränderung der Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit, zu Teilreflektion und Dämpfung.

Ein einfaches Rechenbeispiel kann dies zeigen: Die Entfernung zwischen Cuxhaven und Hamburg beträgt etwa 100 km, bei einer mittleren Wassertiefe von 15 m würde sich ein  $c$  von etwa 12 m/s ergeben. Die Laufzeit betrüge etwa 140 min. Die in der Natur zu beobachtende Laufzeit liegt hingegen bei 190 min. Dies bedeutet, daß die Querschnittsgliederung einerseits aber auch die zeitlich variable Wassertiefe andererseits die Fortpflanzungsgeschwindigkeit beeinflussen.

Die Anwendung der obigen Formel vermittelt daher nur den grundsätzlichen physikalischen Zusammenhang, daß nämlich bei zunehmender Wassertiefe die Laufzeit der Tidewelle verkürzt wird. Dieser allgemeine Trend kann durch lokale Abweichungen unterbrochen werden.

#### 7.2.2.1 Laufzeiten der Tidescheitel

Laufzeiten der Tidescheitel können nicht unbedingt mit der Laufzeit der Tidewelle gleichgesetzt werden, da sich in den Laufzeitveränderungen der Scheitel auch Deformationen der Tidewelle ausdrücken können. Da sich hier aber die Laufzeiten

der Scheitel in der Regel synchron verändern kann daraus auch auf die Veränderung der Welle rückgeschlossen werden.

*Elbe\_CD>Längsprofile>Variationen des Oberwassers>Laufzeit des Tidehoch- und Tideniedrigwassers*

Die ausbaubedingten Veränderungen der Laufzeit führen für alle Szenarios im allgemeinen Trend zu einer Verkürzung gemäß obigen Überlegungen.

Dies bedeutet beispielsweise, daß sich die Laufzeit der Tidewelle zwischen Außenelbe (km 748) und St. Pauli um etwa 4 bis 6 Minuten verkürzt, ein Effekt der sich gleichermaßen für Tidehochwasserstände und Tideniedrigwasserstände einstellt. Im IST-Zustand liegt die Laufzeit zwischen Außenelbe und St. Pauli bei 240 min für das Hochwasser und 300 min für das Niedrigwasser.

Eine Besonderheit ist für die Laufzeitveränderung der Hoch- und Niedrigwasserscheitel bei Gückstadt erkennbar. Hier vergrößert sich lokal die Laufzeit um etwa ein bis zwei Minuten. Der Grund dafür liegt in der starken Querschnittsgliederung (Brammer Bank), der Ausbildung von Nebenrinnen (Wischhafener Fahrwasser und Glückstädter Nebenelbe) sowie der im Verhältnis zu den angrenzenden Bereichen relativ geringen Wassertiefen. In diesem Bereich unterliegt die Tidewelle einer gewissen, geringen Formveränderung. Physikalisch gesehen ist dies ein Zeichen für die Abminderung von Teilreflektion der Tidewelle, die durch die Fahrrinnenanpassung in diesem Bereich hervorgerufen wird.

### **7.2.2.2 Flut- und Ebbedauern**

*Elbe\_CD>Längsprofile>Variationen des Oberwassers>Flut- und Ebbedauern*

Typisch für Ästuare wie die Elbe ist es, daß die Ebbedauer zunimmt je weiter man zur Tidegrenze vordringt und dazu korrespondierend die Flutdauer abnimmt. Bei der Elbe bedeutet dies im IST-Zustand, daß die Flutdauer in der Außenelbe (km 748) etwa 5,8 Stunden und die Ebbedauer 6,7 Stunden beträgt. Das Verhältnis verschiebt sich bei St. Pauli zu 5 Stunden für die Flutdauer und 7,5 Stunden für die Ebbedauer.

Die ausbaubedingten Veränderung folgen keinem allgemeinen Trend. Vielmehr sind hier lokale topographische Randbedingungen ursächlich für Veränderungen.

Die Flut- und Ebbedauern könnten sich auch deswegen nur gegeneinander verschieben, weil das anregende Tidesignal unbeeinflusst vom Ausbau bleibt.

Die ausbaubedingten Veränderungen weisen für alle Szenarios eine Vergrößerung der Flutdauer auf, mit einem lokalen Maximum bei Glückstadt. Hier wird die Ti-

dewelle aufgrund der Topographie (siehe auch vorstehendes Kapitel) so deformiert, daß sich die Flutdauer dort um etwa 3 min erhöht und korrespondierend die Ebbedauer um 3 min reduziert. Dieser Effekt ist besonders stark bei hohem Oberwasserzufluß wo die Flutdauer bei Glückstadt um 5 min ansteigt. Alle diese Veränderungswerte klingen bis St. Pauli auf etwa eine Minute wieder ab.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel (Bereich Glückstadt) > Kenterpunktsabstand >  $K_f$*

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel (Bereich Glückstadt) > Flut > Flutstromdauer*

Die lokale Erhöhung der Flutdauer bei Glückstadt reduziert wiederum den Kenterpunktsabstand  $k_f$  der Flut, so daß sich die Flutstromdauer durch den Ausbau nicht verändert (siehe auch Kap. 7.3.2.2).

### **7.2.2.3 Überflutungsdauern, Wattgebietsgrößen und Flachwassergrößen**

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > abgeleitete Kenngrößen des Wasserstands > Überflutungsdauer*

Bei einer ausbaubedingten Vergrößerung des Tidehubs, führt die Erhöhung der Hochwasserstände zu einer Vergrößerung der Überflutungsdauern in den höher gelegenen Wattgebieten und die Reduktion der Niedrigwasserstände zu einer Verringerung der Überflutungsdauern in den niedrig liegenden Wattgebieten.

Im Falle des geplanten Ausbaus, ist die Veränderung des Tidehubs bzw. der Hoch- und Niedrigwasserstände so gering, daß sich daraus keine eindeutige Veränderungstendenz für die Überflutungsdauern ableiten läßt. Dies gilt insbesondere für die äußeren Bereiche des Ästuars, wo die großen Wattflächen vorhanden sind.

Die Veränderungen der Überflutungsdauern nehmen dann stromauf zu, wobei die zugehörigen Wattflächen hier kleiner werden. Beispielsweise gibt es im Bereich Glückstadt Verringerungen der Überflutungsdauern tiefer liegender Wattflächen in der Größenordnung von bis zu 7 min und Erhöhungen der Überflutungsdauern von bis zu 4 min, die flächenmäßig geringer sind.

Im Bereich des Mühlenberger Lochs, wo die Veränderung des Niedrigwassers relativ am stärksten auftritt, werden die Überflutungsdauern um bis zu 10 min (lokal bis zu 13 min) abnehmen. Diese Abnahmen sind auf die tieferliegenden Bereiche des Watts beschränkt, also auf die Bereiche, in denen die Überflutungsdauer im IST-Zustand in der Größenordnung von 10 bis 12 Stunden liegt.



Bei der Betrachtung der Graphiken auf der Elbe-CD fallen die vielen einzelnen Punkte auf den Wattflächen auf, die von der Umgebung abweichende Werte ausweisen. Verantwortlich dafür sind die in Kapitel 7.1 dargestellten Einschränkungen bei der Anwendbarkeit der Tidekennwertanalyse.

Eine Vergrößerung der Wattgebiete tritt prinzipiell bei einer Verringerung der Niedrigwasserhöhen und einer Vergrößerung der Hochwasserstände ein. Sie ist aber zusätzlich von der Steilheit der Böschungskanten abhängig, die im Höhenniveau des Hoch- bzw. Niedrigwassers liegen.

Bei den vorliegenden Veränderungen der Wasserstände läßt die erreichbare Lagegenauigkeit der topographischen Daten keine genauen Angaben über die Größenveränderungen aus den Modellsimulationen zu. Einerseits ist die Vermessungsgenauigkeit (Peilgenauigkeit) einschließlich des Höhenanschlusses mit einem Fehler in der Größenordnung von rund 30 cm behaftet und beträgt die Lagegenauigkeit der Höhenpunkte lediglich 5 bis 10 m. Andererseits wird die Topographie durch das Modell nur mit einem Gitterabstand von etwa 35 m abgetastet, was eine gewisse Vergrößerung der tatsächlich vorhandenen Topographie bewirkt.

Geht man von einer Böschungsneigung von 1:10 im Niedrig- oder Hochwasser aus, so variiert eine Wasserstandsänderung von einem Zentimeter die Fläche um einen 10 cm breiten Streifen. Eine wesentlich geringere Böschungsneigung von 1:100 würde zu einem 1 m breiten Streifen führen. Diese geringen Variationswerte machen deutlich, daß die Größenveränderung der Wattflächen bei den gegebenen ausbaubedingten Veränderungen kleiner als 1 ‰ bezogen auf die gesamte Wattfläche sind.

#### **Folgende Abschätzungen sind möglich:**

- Im Elbabschnitt zwischen Brunsbüttel und Lühesand werden die Wattgebiete in Abhängigkeit der jeweils örtlichen Geländegefälle in der Größenordnung um einen Streifen von rd. 1 m verbreitert. Im Bereich des Fährmannssander Watts ist in Höhe der Bühnenköpfe im Bereich der Niedrigwasserlinie eine relativ steile Unterwasserböschung mit einer Neigung von etwa 1:10 vorhanden. In diesem Bereich ergeben sich durch die Niedrigwasserabsenkung von 5 cm Streifenbreiten von 0,5 bis 1 m. Die Uferböschungen haben üblicherweise ebenfalls Neigungen zwischen 1:3 und 1:10, so daß sich auch hier Streifenbreiten von 0,15 bis 0,5 m ergeben.
- Für das Mühlenberger Loch werden die Niedrigwasserabsenkungen von 4 bis 7 cm bei Neigungen von etwa 1:50 zu Wattstreifenbreiten von 2 bis 5 m führen. Bei den auch hier vorhandenen steileren Neigungen (1:10) ergeben sich Streifenbreiten von etwa 1 m.

- Im Bereich des Naturschutzgebietes Heukenlock werden die ausbaubedingten Wasserstandsänderungen in Abhängigkeit der kleinräumigen Geländeneigungen zu Wattgebietsvergrößerungen führen.

Im Tidehochwassersaum sind häufig steilere Uferkanten mit 1:2 bis 1:10 anzutreffen, so daß sich bei Thw-Anstiegen von 2 bis 4 cm zusätzliche Wattgebietsstreifen von 4 bis 40 cm Breite mit kurzer Wasserbedeckung ergeben.

Durch die ausbaubedingten Änderungen der Tidewasserstände werden die Flachwasserbereiche (0 bis 2 m Wassertiefe) leicht abnehmen, da in den tieferen Gewässerbereichen in der Regel etwas steilere Neigungen vorliegen und somit durch die ausbaubedingte Niedrigwasserabsenkung die Flächenbilanz zu einer Vergrößerung der Wattgebiete führt. Dieser Effekt wird sich deswegen in noch geringeren Größenordnungen bewegen als bei den Wattgebietsflächen, so daß hier auf eine weitere Abschätzung verzichtet werden kann.

### 7.3 Strömungskenngrößen

Grundlage der Analyse sind die berechneten horizontalen Geschwindigkeitsvektoren innerhalb der Zellen des Finite-Differenzen-Gitters. Bei der zeitabhängigen Simulation werden die Berechnungsergebnisse alle 10 min abgespeichert und können dann für die folgenden Analysen verwendet werden.

Da die Strömungsgeschwindigkeiten eine starke Variabilität über den Querschnitt aufweisen, wurden keine Längsschnittdarstellungen erzeugt. Für diese Größe ist die kartographische Darstellung Grundlage der Analyse. Als Analysezeitraum wurde hier die Springphase des Spring-Nipp-Zyklus gewählt, um hinsichtlich der ausbaubedingten Veränderungen die stärksten Veränderungen zu erfassen. Wie der Vergleich der Tidedynamikszenarios bei den Wasserstandsgrößen gezeigt hat, ist dieses Szenario sehr repräsentativ für die Bestimmung der ausbaubedingten Veränderungen.

#### 7.3.1 Synoptische Strömungsfelder

*Elbe\_CD>kartographische Darstellungen>Kachel n>Strömung>synoptisch*

Für jede Kachel wurde der gleiche Zeitraum (14 Zeitpunkte) in Stundenschritten auf der Elbe-CD gespeichert. Die Schrittweite ist zwar noch recht grob, läßt aber ein gutes Studium der tidebedingten Dynamik zu. Durch das Einblenden der Tideuhr benachbarter Pegelstandorte werden zusätzlich die Abstände der Flut- und Ebbestromkenterung deutlich.

Einige typische Phänomene der Tidedynamik im Elbästuar:

- Auf den Abschnitten Steubenhöft Süd und Otterndorf ist die Flutstromdominanz der südlichen Medemrinne deutlich sichtbar. Ebenfalls klar erkennbar ist der deutlich früher einsetzende Ebbestrom in der nördlichen Medemrinne.
- Im Bereich Brunsbüttel zeigt sich die frühere Kenterung in den Flachwasserbereichen. Dies ist sowohl bei einsetzendem Flut- wie Ebbestrom der Fall.
- Beim Gebiet Glückstadt Mitte wird sichtbar, daß der Ebbestrom im Flachwasserbereichen, z. B. Brammer Bank und Glückstädter Nebenelbe früher und vor allen Dingen kräftiger einsetzt als im Hauptfahrwasser.
- Bei der Pagensander Nebenelbe läßt sich beobachten, wie die Tidewelle bei einsetzender Flut im Hauptfahrwasser schneller fortschreitet als im Nebenfahrwasser. Bei den Zeitpunkten 0:00 und 13:00 (einsetzende Flut) erhält die Pagensander Nebenelbe auch von dem südlichen Ende einen Zustrom, weil auch dort der Wasserstand höher ist als in der Nebenelbe. Erst etwa eine Stunde später wird diese Nebenelbe vom Flutstrom vollständig durchströmt.
- Im Gebiet Bunthaus ist erkennbar, wie Flut- und Ebbestrom 1 - 2 Stunden nach Niedrigwasser aufeinander treffen.

### 7.3.2 Abgeleitete Größen

#### 7.3.2.1 Mittlere und Maximale Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit

Im Kapitel 5 wurde das Prinzip des morphologischen Nachlaufs erläutert. Daraus ergibt sich, daß sich die Strömungsgeschwindigkeiten durch den Ausbau nicht signifikant verändern dürfen. Wäre dies der Fall, so wäre die Größenordnung des morphologischen Nachlaufs falsch abgeschätzt. Eine genauere Analyse zu dieser Frage ergibt sich aus der Betrachtung der Sedimenttransportkapazitäten (siehe 7.5.3).

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Flut > mittlere und maximale Flutstromgeschwindigkeit*

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Ebbe > mittlere und maximale Ebbestromgeschwindigkeit*

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Flut/Ebbe > mittlere und maximale Geschwindigkeit*

Die mittleren Flutstromgeschwindigkeiten verändern sich in einer Größenordnung von  $\pm 3$  cm/s. Die Veränderungen sind örtlich sehr variabel, wobei in der Tendenz die Erhöhung im Bereich der Fahrrinne stattfindet und die Verringerung im Bereich der Nebenfahrwasser. Die relativ starke Vertiefung im Bereich des Köhlbrandes führt zu einer signifikanten Reduktion der mittleren Flutstromgeschwindigkeit in der Größenordnung von 10 cm/s.

Bei der Betrachtung der Veränderungswerte zur maximalen Flutstromgeschwindigkeit ergibt sich ein ähnliches Bild. Das Veränderungsmaß bewegt sich hier in einer Größenordnung von  $\pm 5$  cm/s

Gleichlautende Aussagen können für die Veränderung der mittleren und maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten gemacht werden. Die Verhältniswerte mittlere Flutstromgeschwindigkeit zu mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit sowie maximale Flutstromgeschwindigkeit zu maximaler Ebbestromgeschwindigkeit verändern sich daher durch den Ausbau nicht.

Insgesamt ist die Änderung der Strömungsklimas aus tidedynamischer Sicht klein. Damit ist das Prinzip des morphologischen Nachlaufs sicher erfüllt.

### 7.3.2.2 Flut- und Ebbestromdauer

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Flut oder Ebbe > Flut oder Ebbestromdauer*

Das Elbeästuar zeigt die typische Veränderung der Flut- und Ebbestromdauern. Der Flutstrom dauert in der Außenelbe etwa 5,8 h und verringert sich bis Zollenspieker auf etwa 3 h. Korrespondierend hat der Ebbestrom in der Außenelbe eine Dauer von etwa 6,5 h, die sich bis Zollenspieker auf etwa 9 h erhöht. Lokal kann es von diesem Muster deutliche Abweichungen geben, die insbesondere aus der Ausbildung von Flut- und Ebberinnen resultieren (Beispiel: Südlich Vogelsand, Medemgrund oder Mühlenberger Loch östlich von Neßsand).

Außbaubedingt vergrößert sich die Flutstromdauer unterhalb von Brunsbüttel um bis zu 3 min und verringert sie sich kleinräumig oberhalb von Brunsbüttel um ebenfalls bis zu 3 min. Von diesem Muster kann es lokale Abweichungen geben wie z. B. östlich von Neßsand und südlich des Großen Vogelsands

### 7.3.2.3 Reststrom und Eulersche Wege

Der Reststrom wird als Addition der Fließgeschwindigkeitsvektoren nach folgender Formel berechnet,

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} \quad (7.2)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Zeitschritte eines Tidezyklus ist. Die Größe enthält somit zunächst den Einfluß des Oberwassers, sie drückt aber auch Ungleichverteilungen des Flut- und Ebbestroms im Querprofil aus.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Restrom > Reststrom*

Deutlich werden solche Ungleichverteilungen beispielsweise in den Gebieten großer Vogelsand oder Steubenhöft Süd. Weiter stromauf wird die Verteilung des Reststroms immer gleichmäßiger bis oberhalb von Hamburg eine einheitliche Verteilung über den Fließquerschnitt vorliegt. Ausbaubedingt verändert sich der Reststrom um bis zu 2,5 % des ursprünglichen Wertes (IST-Zustand). Örtlich sind die Änderungswerte stark von lokalen Gegebenheiten abhängig. Einen generellen Trend gibt es nicht.

Im Gegensatz zum Reststrom enthalten die Eulerschen Flut- und Ebbewege, die Zeitinformation und können daher integriert Auskunft über Strömungsgeschwindigkeit und dazugehöriger Dauer an einem Ort geben. Sie werden mit nachfolgender Formel berechnet:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} \cdot \Delta t \quad (7.3)$$

Hierbei ist  $\Delta t$  die Zeitschrittweite und  $n$  die Anzahl der Zeitschritte während der Flut- bzw Ebbestromdauer. Die Eulerschen Flut- und Ebbewege können daher als Maß für die Strömungsintensität in einem Bereich angesehen werden. Das Verhältnis zwischen beiden Größen zeigt wiederum Flut- bzw Ebbestromdominanz an.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Flut oder Ebbe oder Flut/Ebbe > mittlerer Eulerscher Weg*

Die mittleren Eulerschen Flut- und Ebbewege weisen ausbaubedingte Veränderungen auf, die durch die lokalen Gegebenheiten bestimmt werden. Dabei bleiben die Veränderungen unter  $\pm 5$  % des Ausgangswertes (Ist-Zustand).

### 7.3.2.4 Tidevolumen und Durchflüsse

Durch den Ausbau wird der Tidehub größer (Kap. 7.2), dies bedeutet, daß eine größere Masse Wasser mit der Tide auf- und abschwingt. Damit erhöhen sich die

Tidevolumina und die Durchflüsse. Die Durchflußerhöhung ist durch die größeren Fließquerschnitte (Baggerung und morphologischer Nachlauf) möglich, da durch den Ausbau das Energiedargebot aus der Tidewelle unverändert bleibt. Gleichzeitig vermindert sich durch die Vergrößerung der Wassertiefe der Einfluß der Sohlrauheit, was zu einer relativen Reduktion der Energiedissipation führt.

Die Elbe-CD enthält als kartographische Darstellungen die Flut- und Ebbstromvolumina sowie den Restdurchfluß. Der Restdurchfluß wird als vektorielle Größe nach folgender Formel bestimmt:

$$\begin{pmatrix} D_u \\ D_v \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} \cdot h_i \cdot T \quad (7.4)$$

mit  $h_i$  die Wassertiefe am Knotenpunkt und  $n$  die Anzahl der Zeitschritte über eine volle Tide. Der Durchfluß wird für die Einheitsbreite "1" senkrecht zur Strömungsrichtung berechnet.

Bezüglich der Aussagekraft gelten die Aussagen für den Reststrom auch hier. Die größeren Wasservolumina fallen durch die Bildung des Residuums weg. Auch die Veränderungen verhalten sich wie beim Reststrom.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Reststrom > Restdurchfluß*

Die Flut und Ebbestromvolumina werden nach folgender Formel bestimmt:

$$\begin{pmatrix} V_{O_u} \\ V_{O_v} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \end{pmatrix} \cdot h_i \cdot T \cdot \Delta t \quad (7.5)$$

Hierbei ist  $\Delta t$  die Zeitschrittweite und  $n$  die Anzahl der Zeitschritte in der Flutstrom- bzw. Ebbephase. Auch diese Größe wird pro Einheitsbreite senkrecht zu Fließrichtung berechnet.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Strömung > abgeleitet > Flut oder Ebbe > mittleres Volumen*

Im IST-Zustand zeigen die Bilder des Flut- und Ebbestromvolumens über den Verlauf des Ästuars deutlich die Verteilung der Volumina. Z. B. nehmen im Bereich des Hamburger Hafens in Norder- und Süderelbe die Volumina stark ab, da sich hier die Hafenbecken befinden, die wesentlich zum Schwingungsraumvolumen beitragen.

Die Veränderungen des Flut- bzw. Ebbestromvolumens konzentrieren sich auf den Bereich der Fahrrinne und zeigen deutlich, daß der Durchfluß dort gebündelt

und gestärkt wird, während die Volumina in den Nebenbereichen abnehmen. Die Durchflußerhöhung beträgt im Bereich der Rinne z. B. bei Cuxhaven etwa 10.000 bis 15.000 m<sup>3</sup>/m, was etwa 1,6 - 2,5 % des Ausgangswertes ( $\cong$  600.000 m<sup>3</sup>/m) entspricht. Sie nimmt stromaufwärts nach Hamburg ab, wobei dies vor allen Dingen durch eine ungleichmäßigere Verteilung der Volumenänderung im Bereich der Hauptrinne sichtbar wird.

### **7.3.2.5 Aufenthaltszeiten und Ausbreitungsverhalten von Wasserkörpern**

Vergleicht man das Becken der Tideelbe mit einem großen Wassertank, so wird deutlich, daß eine Vergrößerung des Tanks bei konstanten und gleichen Zu- und Abflüssen zu einer Vergrößerung der Aufenthaltszeit führt. Aufgrund der Querschnittsaufweitung kommt es also zu einer Aufenthaltszeiterhöhung. In Relation zum Gesamtvolumen ist die Volumenvergrößerung aber so gering, daß die Erhöhung der Aufenthaltszeit unter 2 % bleibt.

Die oben genannte Tankanalogie stimmt mit den natürlichen Verhältnissen nur sehr grob überein. Tatsächlich wird die Aufenthaltszeit und auch das Ausbreitungsverhalten von Wasserkörpern ganz maßgeblich durch turbulente Diffusion und querschnittsbedingte Dispersion bestimmt. Beide physikalischen Prozesse werden durch den Ausbau nicht wesentlich verändert, so daß sich das Ausbreitungsverhalten von Wasserkörpern ebenso wenig verändert.

In der Tendenz führt der Ausbau zu einer Konzentration der Strömung auf die tiefe, hydraulisch glatte Hauptrinne, so daß ein geringerer Austausch mit den Randbereichen stattfindet. Dieser Effekt wird durch die Vergrößerung der Aufenthaltszeit wieder kompensiert! Da die generelle Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten im Querschnitt nicht verändert wird, wird auch die Turbulenz, die die Diffusion und Dispersion steuert, nicht verändert. Eine bedeutsame Veränderung des Ausbreitungsverhaltens ist daher nicht zu erwarten.

## **7.4 Salzgehalt**

Die Lage der Brackwasserzone wird in einem Ästuar durch Gezeiten und den Oberwasserzufluß bestimmt. Während der Oberwasserzufluß das salzhaltige Wasser zur See hin drängt, gelangt aufgrund der höheren Dichte Salzwasser vor allen Dingen in den tiefen Schichten der Hauptrinne in das Ästuar hinein. Der Dichteeffekt ist so stark, daß bei langanhaltend niedrigen Oberwasserzuflüssen, wie sie bei der Elbe im Sommer und Herbst typisch sind, die Brackwasserzone bis in den Bereich Stadersand/Wedel vordringt. Das Vordringen der Brackwasserzo-

ne benötigt allerdings mehrere Wochen, während eine Erhöhung des Oberwassers innerhalb weniger Tiden die Zone wieder stromab drängt.

Große Salzgehaltsvariationen sind daher ein typisches Merkmal des Elbeästuars. Die Salzgehaltsverhältnisse des IST-Zustands sind bereits durch vorangegangenen Ausbaumaßnahmen nachhaltig beeinflusst. Untersuchungen (BERGEMANN 1995) deuten daraufhin, daß die obere Brackwasserzone in diesem Jahrhundert bis 20 km weiter stromauf vorgedrungen ist. Genauere Untersuchungen zu diesem Thema sind aufgrund fehlender systematischer Salzgehaltsmessungen nicht möglich.

### **Modelltechnik**

Das für diese Untersuchung benutzte Modellverfahren TRIM2D modelliert den Transport von gelöstem Salz in einer tiefenintegrierten Form. Die Variation des Salzgehalts über die Tiefe wird nicht berechnet. Die der Tidedynamik überlagerte ästuarine Zirkulation, die verantwortlich für die Ausbreitung und Mischungsvorgänge der Brackwasserzone ist, kann in der Form, wie sie in der Natur auftritt, im Modell nicht nachgebildet werden. Ihre Wirkung auf die Ausbreitung und Vermischung des Salzes wird durch Diffusion und Dispersion modelliert.

Durch die Verifikation wird die Parametrisierung überprüft und gegebenenfalls angepaßt. Das Modell ist dann in der Lage in einer tiefenintegrierten Betrachtungsweise die Variation des Salzgehaltes im Ästuar in Übereinstimmung mit den natürlichen Vorgängen wiederzugeben.

Da die ausbaubedingten Veränderungen auf das Strömungsklima so gering sind, verändert sich auch die Parametrisierung der Diffusion/Dispersion nicht, so daß eine Prognose der ausbaubedingten Veränderung (tiefenintegriert) mit dem Modell sehr gut möglich ist. Das Modell kann damit die Veränderung des Salzgehalts über eine Tide (Salzgehaltsvariation) ebenso beschreiben, wie auch langfristige Verlagerungen der Brackwasserzone aufgrund jahreszeitlich bedingten Schwankungen des Oberwassers.

#### **7.4.1 Synoptischer Salzgehalt**

Ähnlich wie bei den Strömungsdaten sind für den Salzgehalt synoptische Werte für die Teilgebiete Großer Vogelsand bis Grauerort auf der Elbe-CD enthalten.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Salz > synoptisch > 0:00 bis 13:00*

Die Betrachtung der Ergebnisse sowohl in der räumlichen Abfolge zu einem bestimmten Zeitpunkt, wie auch in der zeitlichen Abfolge in einem bestimmten Ge-



biet zeigt die Variabilität des Salzgehalts über den Tidezyklus. Dabei ist feststellbar, daß die Salzgehaltsvariation bezüglich des Querschnitts geringer ist als beispielsweise die Variation der Strömungsgeschwindigkeit.

Eine Betrachtung der ausbaubedingten Veränderungen in Form von Längsschnitten ist daher beim Salz besser möglich als bei den Strömungsgeschwindigkeiten. Es gibt aber auch beim Salzgehalt kleinräumige Variationen wie zum Beispiel auf dem Neufelder Watt, die durch einen Längsschnitt entlang der Fahrrinne verloren gehen. Daher ist eine Auswahl von Tideparametern des Salzgehalts, die sich dann auf den Springzeitraum des Spring-Nipp-Zyklus beziehen, ebenfalls in kartographischer Form im Informationssystem Elbe-CD enthalten.

#### **7.4.2 Minimaler und maximaler Salzgehalt - Salzgehaltsvariation**

*Elbe\_CD > Längsprofile > Variationen der Tidedynamikszenerarien > Salzgehalte*

Die Längsschnittdarstellungen enthalten entlang der Fahrrinnenachse die minimalen, mittleren und maximalen Salzgehalte sowie die aufgetretene Salzgehaltsvariation für verschiedene Tidedynamikszenerarien. Bei den Werten handelt es sich jeweils um das Mittel der im Analysezeitraum betrachteten Tidephasen.

Gut zu erkennen ist die Verschiebung der Brackwasserzone mit der Variation des Oberwasserzuflusses. Die Salzgehaltsvariation liegt etwa bei 10 bis 15 ‰. Sie ist damit von gleicher Größenordnung wie der absolute Salzgehalt in dem jeweiligen Gebiet.

Die ausbaubedingten Veränderungen bleiben für alle Lastfälle mit niedrigem Oberwasserzufluß auf etwa  $\pm 0,1$  ‰ beschränkt. Für mittleren und maximalen Oberwasserzufluß erhöhen sich die Veränderungswerte auf etwa 0,2 bis 0,3 ‰. Diese Veränderungen bleiben dabei deutlich unter 0,2 % der in den jeweiligen Bereichen auftretenden maximalen Salzgehalte.

Der Ausbau führt im Regelfall zu einer Vergrößerung der Salzgehaltsvariation, die sich automatisch aus der Vergrößerung der Tidedynamik ergibt (mehr Wasservolumen schwingt im Tideverlauf auf und ab).

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Salz > abgeleitet > maximaler Salzgehalt*

Die Analyse der kartographischen Darstellungen zum Salzgehalt zeigt beispielsweise bei der Veränderung der maximalen Salzgehalte, daß eine leichte Verlagerung der Brackwasserzone nach Oberstrom eintritt, die mit Erhöhungswerten von 0,1 bis 0,3 ‰ einhergeht. Die Konzentration des Durchfluß auf die Hauptrinne

zeigt sich z. B. im Gebiet Medemgrund dadurch, daß in den angrenzenden Bereichen die Salzgehalte ausbaubedingt etwas abnehmen.

Insgesamt ist die weitere Stromaufverlagerung der Brackwasserzone bei niedrigen Oberwasserzuflüssen bei diesem Ausbau recht gering im Vergleich zu den vorangegangenen Maßnahmen. Die Zunahme der Salzgehalte (siehe Längsschnitte) beträgt bei Wedel etwa 0,02 ‰, bei Stadersand 0,05 ‰ und bei Glückstadt rd. 0,1 ‰. Dies ist auf die "Sockellösung" des Ausbaus zurückzuführen, bei der der Sockel um lediglich 0,8 m vertieft wird. Dieses geringe Vertiefungsmaß bewirkt eine relativ geringe Erhöhung des dichteinduzierten Stromauftransports von salzhaltigem Wasser an der Sohle der tiefen Rinne.

## 7.5 Geschiebetransport

### 7.5.1 Voraussetzungen und Annahmen

Zur Ermittlung der ausbaubedingten Veränderungen auf den Geschiebetransport wird ein Verfahren gewählt, bei der das Vermögen der Strömung Sediment zu transportieren berechnet wird (sogenannte Sedimenttransportkapazität). Dabei wird das am Boden vorhandene Sohlmaterial als Einkornsediment idealisiert, dessen Widerstand gegen Transport ausschließlich auf Korngröße und Korndichte beruht. Das Verfahren geht von folgenden grundlegenden Vereinfachungen aus:

- Das Korngemisch kann durch eine charakteristische Korngröße repräsentiert werden.
- Der Anteil der Feinsedimente (Ton) ist gering (etwa < 5 %), so daß Kohäsion vernachlässigt werden kann.
- Ein Beeinflussung der Sedimenteigenschaften durch biologische Besiedlung existiert nicht.
- Es steht ein unbegrenzter Vorrat Sediment zur Verfügung.

Aufgrund dieser Vereinfachungen spricht man von Geschiebetransportkapazität, da es ja durchaus möglich ist, daß bei Erosion Sedimentschichten zu Tage treten, die eine höhere Festigkeit aufweisen und deswegen nicht mehr erodiert werden können. Die berechneten Sedimenttransportraten beschreiben dann nur noch das Vermögen der Strömung, Sediment der zu Grunde gelegten Korngröße zu transportieren.

Morphologische Änderungen aufgrund Erosion und Sedimentation werden nicht modelliert, so daß auch Wechselwirkungen zwischen Querschnittsveränderungen und Strömung nicht berücksichtigt werden können.

Die Aussagekraft des Verfahrens besteht darin, den Zusammenhang zwischen Strömungsklima und Sedimenttransport zu modellieren. Aus der Ableitung der Berechnung (siehe Kap. 2) wird deutlich, daß die Geschiebetransportkapazität  $q$  eine Funktion der vierten Potenz des Betrags der Fließgeschwindigkeit ist. Er reagiert damit sehr sensitiv auf Veränderungswerte der Fließgeschwindigkeiten wie auch der Stromdauern.

Durch die Berechnung der Geschiebetransportkapazität sind gerade die auf die auf die ausbaubedingten Änderungen des Strömungsklimas zurückgehenden Änderungsmöglichkeiten des Sedimenttransport berechenbar.

Das Modell gibt grundsätzliche Sedimenttransportmuster, wie sie in einem Ästuar auftreten, wieder. Es erlaubt damit eine Systemanalyse der strömungsbedingten Einflußfaktoren auf den Geschiebetransport.

Eine genaue quantitative Analyse des Geschiebetransports ist mit dem vorliegenden Modell nicht möglich, da dafür die Erfassung der Sedimenteigenschaften in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität notwendig wäre. Die dafür notwendigen Naturdaten und Grundlagen sind nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft und Technik nicht verfügbar.

### 7.5.2 Synoptische Geschiebetransportkapazitäten

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Geschiebetransport > synoptisch > 0:00 - 13:00*

Betrachtet man die berechneten Werte der Geschiebetransportkapazität in ihrer synoptische Folge, so zeigt sich deutlich die starke Sensitivität des Geschiebetransports hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten. Zum einen tritt Geschiebetransport fast ausschließlich im Bereich der Hauptrinne auf, zum anderen ist das Zeitfenster innerhalb des Tidezyklus, in dem Geschiebetransport stattfindet, auf die Zeit der starken Strömungsgeschwindigkeiten beschränkt. Dabei ist die Geschiebetransportkapazität in der Außenelbe naturgemäß erheblich größer als z. B. bei Blankenese.

Vergleiche der Geschiebetransportkapazität entlang des Stroms zu einem Zeitpunkt zeigen Unstetigkeiten auf. Beispiele sind:

- westliche Einfahrt in die Hahnöfer Nebenelbe (2:00, Flutstrom)
- südliches Ende der Rhinplatte (2:00, Flutstrom)

Zeitliche Vergleiche der Geschiebetransportkapazität in einem Gebiet zeigen Flut- und Ebbdominanz in Teilgebieten. Dadurch können Zirkulationen erkannt wer-

den. Beispiele dafür finden sich im Gebiet nordöstlich des Kugelbakenleitdamms (Mittelgrund) oder vor den Osteriffstacks.

### **7.5.3 Flut- und Ebbestromgeschiebefracht - residuelle Geschiebetransportkapazität**

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Geschiebetransport > abgeleitete > mittlere Ebbe- oder Flutstromgeschiebefracht*

Die Analyse der mittleren Geschiebefracht für Flut oder Ebbestrom zeigt die Zunahme der Transportkapazität von Hamburg bis zur Außenelbe. Gleichzeitig werden auch bei dieser Größe die Unstetigkeitsstellen wieder deutlich sichtbar.

Die berechneten ausbaubedingten Veränderungen zeigen kein einheitliches Bild. Im Bereich der Haupttrinne wechseln sich Zu- und Abnahmen ab. Die Veränderungen sind aber immer kleiner als 3 % (in Ausnahmefällen 5 %) der Ausgangswerte.

Diese Veränderungswerte sind stark durch die Abschätzung des morphologischen Nachlaufs geprägt. Das uneinheitliche Veränderungsbild bei recht geringen Veränderungswerten bedeutet, daß die Größenordnung des morphologischen Nachlaufs korrekt abgeschätzt wurde.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Geschiebetransport > abgeleitete > Verhältniswert Ebbe- zu Flutstromgeschiebefracht*

Die Verhältniswerte zeigen deutlich Gebiete mit Ebbe- oder Flutstromgeschiebetransportdominanz an. Im Vergleich zu den Verhältniswerten der mittleren oder maximalen Strömungsgeschwindigkeiten sind diese Verhältniswerte weitaus extremer. Dies resultiert aus dem grundsätzlichen physikalischen Zusammenhang, daß der Geschiebetransport eine Funktion der vierten Potenz der Strömungsgeschwindigkeit ist. Beispiele für starke Asymmetrien sind die Medemrinnen, Einfahrt nach Wischhafen und das südliche Ende der Rhinplatte.

*Elbe\_CD > kartographische Darstellungen > Kachel n > Geschiebetransport > abgeleitete > residuelle Geschiebefracht*

Die residuelle Geschiebefracht gibt Größe und Richtung des resultierenden Geschiebetransports als Mittel einer Reihe von Tiden an. Diese Größe zeigt die Richtung des resultierenden Geschiebetransports an. Grundsätzlich wird deutlich, daß unterhalb von Brunsbüttel eine resultierende Transportkapazität stromab und oberhalb von Pagensand eine resultierende Kapazität stromauf existiert. Gleichzeitig treten lokale Unstetigkeiten hervor, z. B. nordöstlich des Kugelbakenleitdamms, bei den Osteriffstacks, oberhalb der Brammer Bank oder vor der Wedeler

Au. Diese Gebiete decken sich mit den derzeitigen Baggerstellen der WSV, womit die Leistungsfähigkeit des Verfahrens deutlich unter Beweis gestellt ist.

Die ausbaubedingten Veränderungen verhalten sich wie bei den mittleren Werten. Insgesamt sind sie in einer so geringen Größenordnung, daß aus diesen Änderungswerten keine weiteren morphologischen Folgereaktionen resultieren. Der bereits in der Modelltopographie berücksichtigte morphologische Nachlauf ist damit richtig abgeschätzt worden.

## 8 Prognose

In Kapitel 7 wurden die Ergebnisse der mathematischen Simulationen zu den ausbaubedingten Veränderungen der Fahrrinnenanpassung im Detail dargestellt. Die Änderungswerte der Wasserstände sind sowohl für die Beurteilung der Gesamtmaßnahme wie auch für die Beurteilung des Umwelteingriffs von zentraler Bedeutung. Deswegen werden die Veränderungen des Wasserstandes in diesem Kapitel noch einmal gesondert betrachtet.

Abb. 8.1 zeigt eine Zusammenstellung der Wasserstandsveränderungen. Dargestellt sind sämtliche Kurven der Veränderung für alle untersuchten hydrodynamischen Szenarien einschließlich der Variationen maximaler, minimaler und mittlerer Werte (Kurven im grau unterlegten Band).

Die im grau unterlegten Band dargestellten Wasserstandsveränderungen gehören zu Randbedingungen, die regelmäßig auftreten werden. Die Änderungen, die sich aus den Szenarien niedriges und mittleres Oberwasser ergeben, werden regelmäßig und häufig eintreten. Deshalb sind die im grau unterlegten Band dargestellten Wasserstandsveränderungen bedeutsam für die Beurteilung des Umwelteingriffs.

Die gewählten hydrodynamischen Szenarien (z. B. Variation der Oberwasserzuflüsse) können nicht sämtliche denkbaren Randbedingungen umfassen. Um auch extreme, sehr selten auftretende Zusammenstellungen von Randbedingungen (Fernwellen, außergewöhnliche meteorologische Ereignisse, besonders energiereiche Tiden) zu berücksichtigen, wird für diese Fälle eine Abschätzung der Tidewasserstandsveränderung durchgeführt. Sie ist zusätzlich zu den Änderungsbändern aus der Simulation in Abb. 8.1 dargestellt. Diese Änderungswerte sind im Sinne einer „worst case“ Betrachtung zu sehen. Sie werden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht eintreten. Bedeutsam können diese Werte beispielsweise für die Standsicherheit von Bauwerken sein.

Danach beträgt der Änderungswert für das Tideniedrigwasser in St. Pauli 1 dm, er reduziert sich stromauf und beträgt bei Geesthacht 0,3 dm. Wie auf Abb. 8.1 zu sehen, wird der Änderungswert auch stromab von St. Pauli geringer und ist unterhalb der Kugelbake kleiner als 0,1 dm. Der Änderungswert für das Tidehochwasser beträgt bei St. Pauli 0,5 dm, er reduziert sich stromauf und beträgt bei Geesthacht 0,4 dm. Er klingt auch elbeabwärts rasch ab und ist unterhalb von Brunsbüttel kleiner als 0,1 dm. Für diese Abschätzung kann die Änderung des Ti-

dehubs näherungsweise aus der Addition der Änderungswerte für die Tidehoch- und Tideniedrigwasser ermittelt werden.

Weil der Impulseintrag eines Ostwindes zu einer Dämpfung der einlaufenden Tidewelle führt, kann die maximale ausbaubedingte Niedrigwasserabsenkung jedoch nicht mit den niedrigsten Tideniedrigwasserständen, die infolge von Ostwind entstehen, auftreten. Ebenso kann der maximale ausbaubedingte Anstieg des Tidehochwassers am Pegel St. Pauli nicht zusammen mit allgemein höheren Wasserständen durch Westwindwetterlagen auftreten, da dann die Wirkung des Ausbaus auf die Tidewasserstände geringer wird. Deshalb treten bei Sturmfluten geringere ausbaubedingte Veränderungen auf.

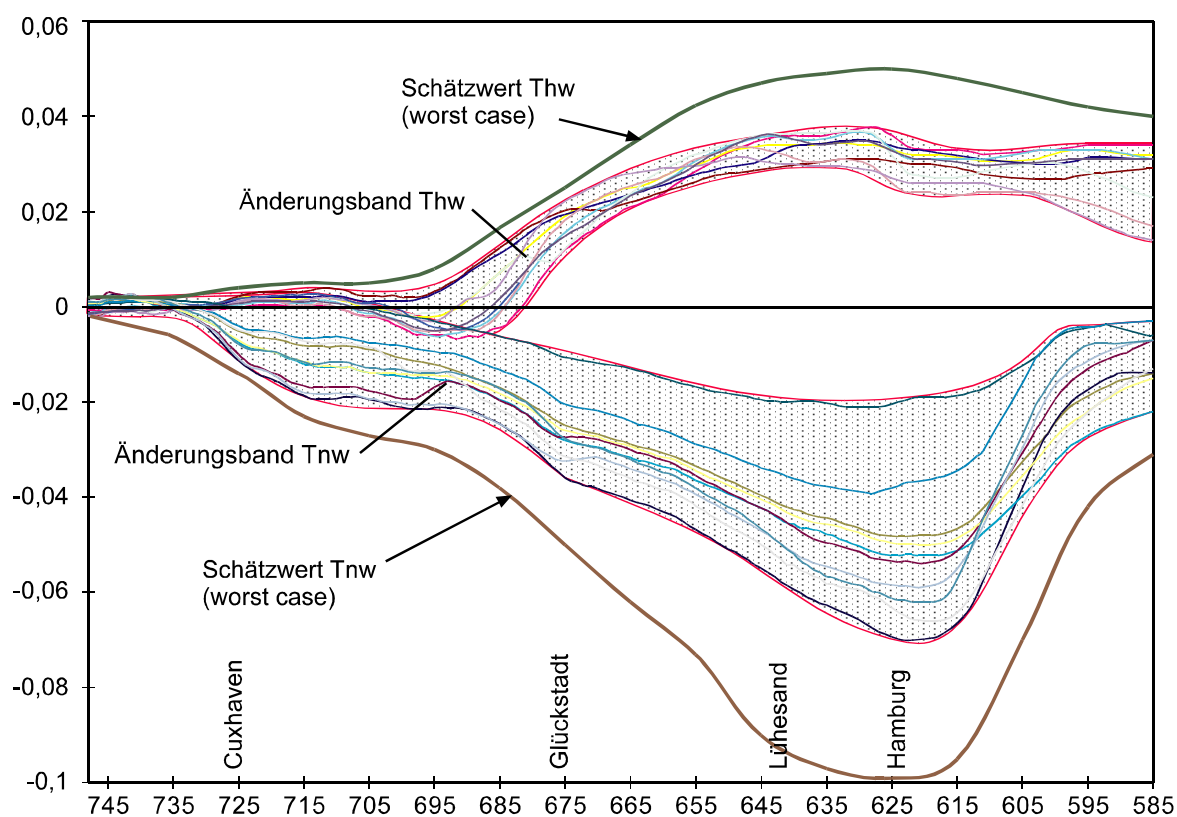


Abb. 8.1 Zusammenstellung der Prognosewerte für die ausbaubedingten Veränderungen der Tidewasserstände.

## 9 Zusammenfassung

Veranlassung für dieses Gutachten ist die geplante Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe. Für dieses Vorhaben wird eine UVU durch die Planungsgruppe Ökologie+Umwelt Nord durchgeführt. Im Rahmen dieser UVU ist es Aufgabe der Bundesanstalt für Wasserbau, ein Gutachten über die ausbaubedingten Veränderungen der Tidedynamik zu erstellen.

Für dieses Gutachten wurde ein mathematisches Tidemodell der Elbe aufgebaut. Es basiert auf dem Berechnungsverfahren TRIM-2D, welches mit der Methode der Finiten Differenzen die partiellen Differentialgleichungen der physikalischen Erhaltungsgrößen für Strömung und Transport in Tidegewässern löst. Dem Modell der Elbe liegt ein Gitter mit einem Gitterabstand von 50 m zugrunde. Mit diesem Gitter wird die Topographie abgetastet und werden die physikalischen Größen berechnet.

Zur Darstellung der Simulationsergebnisse wird ein Informationssystem auf der Basis einer Multit-Media-Software eingesetzt, das auf CD-ROM verbreitet wird.

Die Ergebnisse der Modellsimulationen werden in Kap. 7 dieses Berichts beschrieben. Für das Verständnis ist die Nutzung des Informationssystems "Elbe-CD" notwendig. Von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung ausbaubedingter Veränderungen der Tidedynamik sind die Veränderungen der Tidewasserstände. Bei der Untersuchung wurden verschiedene Szenarien hydrodynamischer Randbedingungen zugrunde gelegt. Eine Bewertung dieser Randbedingungen und ihre verschiedenen Auswirkungen auf die Änderungswerte der Tidewasserstände enthält Kap. 8.

Aus den Ergebnissen der Modellsimulationen wird die im folgenden zusammenfassend dargestellte Prognose abgeleitet.

Regelmäßig und teilweise auch häufig auftretende hydrodynamische Randbedingungen führen zu ausbaubedingten Veränderungen der Wasserstände, die für die Beurteilung des Umwelteingriffs bedeutsam sind. Für diese Randbedingungen ergeben sich die größten ausbaubedingten Veränderungen der Wasserstände für das Gebiet des Hamburger Hafens (siehe Abb. 8.1). Dort tritt eine maximale Absenkung des Niedrigwassers von 7 cm auf. Das Hochwasser erhöht sich um maximal 4 cm. Der Tidehub vergrößert sich um maximal 10,5 cm (die maximale Änderung des Niedrigwassers tritt nicht gleichzeitig mit der maximalen Änderung des Hochwassers ein). Die Änderungswerte des Wasserstands klingen stromauf- und



stromabwärts ab: Sie sind bei Cuxhaven kleiner als 0,5 cm. Bei Geesthacht betragen die Änderungswerte für das Niedrigwasser - 2 cm, für das Hochwasser + 4 cm und für den Tidehub + 6 cm. Bei niedrigem Oberwasser und Ostwind, wo besonders niedrige Niedrigwasserereignisse auftreten, sind die ausbaubedingten Veränderungen geringer, da die Tidewelle bereits in der Deutschen Bucht gedämpft wird und so mit geringerer Amplitude in das Elbeästuar einschwingt.

Für extrem selten auftretende Zusammenstellungen von Randbedingungen wurde eine Abschätzung vorgenommen (Abb. 8.1). Diese ist im Sinne einer „worst case“ Betrachtung zu sehen. Ihre Werte werden mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht eintreten. Danach beträgt der Änderungswert für das Tideniedrigwasser bei St. Pauli 1 dm, bei Geesthacht 0,3 dm und an der Kugelbake 0,1 dm. Der Änderungswert für das Tidehochwasser beträgt bei St. Pauli 0,5 dm, bei Geesthacht 0,4 dm und bei Brunsbüttel 0,1 dm. Diese Änderungswerte können z. B. für die Beurteilung der Standsicherheit von Bauwerken bedeutsam sein.

Die mit dem Ausbau verbundene größere Wassertiefe führt dazu, daß die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit ansteigt. Dadurch verkürzt sich die Laufzeit der Tidescheitel zwischen Außenelbe (Km 748) und St. Pauli um 4 bis 6 Minuten. Von diesem generellen Veränderungsmuster gibt es bedingt durch eine Veränderung der Tidewellenreflexionseigenschaften des Ästuars lokale Abweichungen.

Die Veränderung der Überflutungsdauern der Wattgebiete und die Veränderung der Wattgebietsgröße ist räumlich gesehen variabel. Ursächlich dafür ist, daß im Gebiet der Außenelbe, wo die meisten Wattflächen vorhanden sind, die ausbaubedingten Veränderungen des Wasserstands gering oder gar nicht mehr vorhanden sind. Die Veränderung der Wattgebietsgröße ist insgesamt kleiner als 1 ‰ bezogen auf die gesamte Wattfläche der Außenelbe. Spürbare Veränderungen ergeben sich nur für Gebiete in der Nähe des Hamburger Hafens. Beispielsweise wird für kleine Bereiche des Mühlenberger Lochs die Überflutungsdauer um bis zu 10 min (lokal bis zu 13 min) abnehmen.

Die Veränderungen der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit sind überwiegend kleiner als  $\pm 3$  cm/s (bereichsweise bis zu  $\pm 5$  cm/s). Sie sind örtlich sehr variabel und aus hydromechanischer Sicht sehr klein. Diese geringen Änderungswerte der Strömungsgeschwindigkeiten sind ein Nachweis für die richtige Einschätzung des morphologischen Nachlaufs.

Die Tidevolumina und Durchflüsse nehmen ausbaubedingt zu, da bei unverändertem Energiedargebot aus der Tidewelle durch die größeren Querschnitte eine größere Menge Wasser fließen kann. Gleichzeitig wird relativ zum Durchfluß die Energiedissipation aus der Sohlreibung gemindert. Beide Effekte führen zu einer

Stärkung des Wasserstroms in der tiefen Rinne und teilweise zu einer geringen Minderung in den fahrrinnennahen Randbereichen.

Der Ausbau bewirkt bei niedrigen Oberwasserabflüssen eine leichte Stromaufverlagerung der Brackwasserzone, die mit Erhöhungswerten des maximalen Salzgehalts von 0,1 bis 0,3 ‰ einhergeht. Insgesamt ist die Stromaufverlagerung der Brackwasserzone bei diesem Ausbau gering im Vergleich zu vorangegangenen Ausbauten (BERGEMANN 1995), was auf die "Sockellösung" zurückzuführen ist. Die maximale Zunahme des Salzgehalts am oberen Ende der Brackwasserzone beträgt bei Wedel 0,02 ‰, bei Stadersand 0,05 ‰ und bei Glückstadt 0,1 ‰.

Die Veränderung der Geschiebetransportkapazität ist stark durch die Abschätzung des morphologischen Nachlaufs geprägt. Die berechneten ausbaubedingten Veränderungen zeigen eine hohe räumliche Variabilität und sind aus hydrodynamischer Sicht gering. Die Veränderungen sind in der Regel kleiner als 0,3 %, in Ausnahmefällen kleiner als 0,5 %.

Hamburg, den 24. Oktober 1996

im Auftrag

Bearbeiter

(Dr.-Ing. Ruland)  
Baudirektor

(Dipl.-Ozeanograph Boehlich)  
Wiss. Angestellter

## Literaturverzeichnis

- BARETT, R., BERRY, M., CHAN, T.F., DEMMEL, J., DONATO, J., DONGARRA, J., EIJKHOUT, V., POZO, R., ROMINE, C and van der VORST, H.A., 1993, *Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods*, SIAM, Philadelphia
- BAW, 1995a, HNModell der Tideelbe, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, *Supercomputing News Heft 1/1995*, pp. 2-13.
- BAW, 1995b, Sedimenttransport, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, *Supercomputing News Heft 2/1995*, pp. 9-19
- BERGEMANN, M., 1995, Die Lage der oberen Brackwassergrenze, DGM 39. J.
- BOLLRICH, G., PREIßLER, G., 1992, *Technische Hydromechanik Band 1*, Verlag für Bauwesen Berlin
- CASULLI, V., 1990, Semi-Implicit Finite Difference Methods for the Two-Dimensional Shallow Water Equations, *Journal of Computational Physics*, Vol. 86, pages 56-74.
- CASULLI, V.; CATTANI, E., 1992, Stability, Accuracy and Efficiency of a SemiImplicit Method for ThreeDimensional Shallow Water Flow, *Computers Math. Applic.*, Vol. 27, No. 4, pages 99-112
- CHENG, R.T., CASULLI, V.; GARTNER, J.W., 1993, Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 36, pp. 235-280.
- HAMBURG 1995, *Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Elbegebiet, Teil III, Abflußjahr 1991*, Wirtschaftsbehörde, Strom- und Hafengebäude, S. u. H.
- HAMBURG 1993, *Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe*, Hamburger Informationspapier vor Einleitung der Umweltverträglichkeitsuntersuchung, Wirtschaftsbehörde, Strom- und Hafengebäude, März 1993
- KUIPERS, J., VREUGDENHIL, C.B., 1973, Calculations of two-dimensional horizontal flow, Report S163-1; Delft Hydraulics Laboratories, NL
- PÖU, 1993, Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt, Vorschlag über den voraussichtlichen Untersuchungsrahmen der

Umweltverträglichkeitsuntersuchung nach § 5 UVPG, Planungsgruppe Ökologie und Umwelt Nord, Hamburg

van RIJN, L.C., 1989, Handbook Sediment Transport by Currents and Waves, Delft Hydraulics, Report H 461, Delft, The Netherlands.

ROUVE, G., Hrsg., 1987, Hydraulische Probleme beim naturnahen Gewässerausbau, VCH Verlagsgesellschaft Weinheim

SEITZ, R., ZEH, H., 1991, Archivierung von Küstenpeildaten auf dem Zentralrechner der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bei der BAW in Karlsruhe, Bericht Bundesanstalt für Wasserbau, Kußmaulstraße 17, D-76187 Karlsruhe, Januar 1991

SMITH, S.D., BANKE, E.G., 1975, Variation of the Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 101, pp. 655-673.

de VRIEND, H.J., ZYSERMAN, J., NICHOLSON, J., ROELVINK, J.A., PECHON, P. and SOUTHGATE, H.N., 1993, Medium-term 2DH Coastal Area Modelling, Coastal Engineering, Vol. 21, pages 193-224.

WSD NORD, 1992, Untersuchung mit Salzgehalts-Jahresmittelwerten Cuxhaven bis Pinnau-Sperrwerk, Untersuchungsbericht 2, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, 1992