

Bundesanstalt für Wasserbau
(BAW)

Fahrrinnenanpassung der
Unter- und Außenelbe
Gutachten

Ausbaubedingte Änderungen der
Tidedynamik bei Sturmfluten
Bericht Sturmfluten

Hamburg, den 19. November 1996

Bundesanstalt für Wasserbau
(BAW)

Fahrrinnenanpassung der
Unter- und Außenelbe
Gutachten

Ausbaubedingte Änderungen der
Tidedynamik bei Sturmfluten
Bericht Sturmfluten

Auftraggeber : Wasser- und Schiffsamt Hamburg
Moorweidenstraße 14, 20148 Hamburg
und
Freie und Hansestadt Hamburg
Strom- und Hafengebäude
Dalmanstraße 1, 20457 Hamburg

Auftrags-Nr. : BAW 9353 3387

Aufgestellt von : Abteilung: Außenstelle Küste
Referat : K3
Bearbeiter: Dr.rer.nat. E.Rudolph

Hamburg, den 19. November 1996

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

Zusammenfassung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Veranlassung	1
2	Wasserbauliche Systemanalyse Sturmfluten	2
3	Verifikation	4
3.1	Untersuchte Sturmflutereignisse	4
3.2	Übersicht über das numerische Modell	4
3.3	Meßdaten	8
3.3.1	Pegelmessungen	8
3.3.2	Oberwasser	11
3.3.3	Wehr Geesthacht	12
3.3.4	Wind	12
3.4	Randbedingungen und Randwerte	13
3.4.1	Topographie	13
3.4.2	Ausbaupographie	15
3.4.3	Rand zur Mittelelbe: Oberwasser	18
3.4.4	Seeseitiger Rand: Steuerpegel	18
3.4.5	Oberer Rand: Atmosphäre	19
3.4.6	Koeffizienten und Parameter	21
3.5	Ergebnisse	21
3.5.1	Sensitivitätsstudie	22
4	Sturmflutszenarien	36
4.1	Zugrundeliegende historische und synthetische Sturmflutereignisse	36
4.1.1	Sturmflut am 3.1.1976	36
4.1.2	Sturmflut am 28.1.1994	37
4.1.3	Bemessungssturmflut 2085A	38
5	Ergebnisse	39
5.1	Wasserstände	39
5.1.1	Scheitelwasserstände, Eintrittszeiten	39
5.1.2	Verweilzeiten	49
5.2	Strömung	51
5.2.1	Untersuchungszeitraum	51
5.2.2	Flutstromgeschwindigkeit	56
5.2.3	Ebbestromgeschwindigkeit	59
5.2.4	Flut- und Ebbestromvolumen	62

6 Zusammenfassung und Prognose

63

Abbildungsverzeichnis

3.1	Längsschnitt Unter- und Außenelbe entlang der Fahrrinnenachse	16
3.2	Sensitivitätsstudie Wind: Pegel Brunsbüttel	26
3.3	Sensitivitätsstudie Wind: Pegel Schulau	27
3.4	Sensitivitätsstudie Wind: Pegel St.Pauli	28
3.5	Sensitivitätsstudie Wind: Längsprofil der Sturmflutscheitelwasserstände . . .	30
3.6	Sturmflut 28.1.1994 Pegel Schulau	32
3.7	Sturmflut 28.1.1994 Pegel St.Pauli	33
3.8	Sensitivitätsstudie ausbaubed. Änderungen: Sturmflutscheitelwasserstände .	35
3.9	Sensitivitätsstudie ausbaubed. Änderungen: Änderungen Scheitelwasserstände	35
5.1	Sturmflut 3.1.1976: Wasserstand am Pegel Brunsbüttel	41
5.2	Sturmflut 3.1.1976: Wasserstand am Pegel St.Pauli	42
5.3	Sturmflut 28.1.1994: Wasserstand am Pegel Brunsbüttel	43
5.4	Sturmflut 28.1.1994: Wasserstand am Pegel St.Pauli	44
5.5	Bemessungssturmflut: Wasserstand am Pegel Brunsbüttel	46
5.6	Bemessungssturmflut: Wasserstand am Pegel St.Pauli	47
5.7	Längsprofil der Sturmflutscheitelwasserstände	48
5.8	Längsprofil der ausbaubed. Änderungen der Scheitelwasserstände	48
5.9	Sturmflut 3.1.1976: Wasserstand und Strömung bei Elbe Km 641	52
5.10	Sturmflut 28.1.1994: Wasserstand und Strömung bei Elbe Km 641	53
5.11	Bemessungssturmflut: Wasserstand und Strömung bei Elbe Km 641	54
5.12	Längsprofil der maximalen Flutstromgeschwindigkeit	58
5.13	Längsprofil der ausbaubed. Änderungen der max. Flutstromgeschwindigkeit	58
5.14	Längsprofil der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit	61
5.15	Längsprofil der ausbaubed. Änderungen der max. Ebbestromgeschwindigkeit	61

Tabellenverzeichnis

3.1	Liste der Pegel Sturmflutzeitraum 3.1.1976	9
3.2	Liste der Pegel Sturmflutzeitraum 28.1.1994	10
3.3	Oberwasserzufluß am Pegel Neu Darchau 1.1.1976 bis 5.1.1976.	11
3.4	Oberwasserzufluß am Pegel Neu Darchau 25.1.1994 bis 29.1.1994.	11
3.5	Parameter und Koeffizienten des Modells TRIM-2D	21
3.6	Sensitivitätsstudien: Zusammenfassung der Ergebnisse	29
5.1	Ausbaubedingte Änderungen der Verweilzeiten	50

Liste der Abkürzungen

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
BAW AK	Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste
DWD	Deutscher Wetterdienst
MKW	Massenkonsistentes Windfeld (Modell)
NOAA	National Oceanographic and Atmospheric Administration
NOABL	NOAA Atmospheric Boundary Layer
SFB	Bemessungssturmflut
SF76	Sturmflut 3.1.1976
SF94	Sturmflut 28.1.1994
THWMAX	maximales Tidehochwasser
TRIM-2D	Tidal Residual and Intertidal Mudflat Model
UVPG	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVU	Umweltverträglichkeitsuntersuchung
WSA	Wasser- und Schiffsamt

1 Einleitung und Veranlassung

Für die Unter- und Außenelbe ist eine Fahrrinnenanpassung an die Bedürfnisse der Containerschifffahrt geplant. Träger des Vorhabens sind

- die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Wasser- und Schiffsamt Hamburg für den Bereich des WSA Hamburg und des WSA Cuxhaven
- die Freie und Hansestadt Hamburg, vertreten durch das Amt für Strom- und Hafenbau für die Teile der Fahrrinne im Bereich der Hamburger Delegationsstrecke.

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 ist (Planungsgruppe Ökologie und Umwelt, 1993).

Gegenstand dieses Gutachtens ist die Darstellung der ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen. Das Untersuchungsgebiet umfaßt die Tideelbe von der Außenelbe (Km 756) bis zum Wehr Geesthacht (Km 586) ohne Nebenflüsse (Sturmflutsperrwerke) bis zur Deichlinie. Das Untersuchungsprogramm besteht aus Modellrechnungen für drei ausgewählte Sturmflutsituationen. Ermittelt und dargestellt werden die ausbaubedingten Änderungen folgender Parameter: Scheitelwasserstände, Eintrittszeitdifferenzen der Scheitelwasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten, Wassermengen und Durchflüsse.

2 Wasserbauliche Systemanalyse Sturmfluten

Die Tidedynamik eines Ästuars wird durch die Topographie, die von See einschwingende Tidewelle, die herrschenden meteorologischen Verhältnisse und den Oberwasserzufluß bestimmt. Ausbaubedingt wird sich die Topographie (die Tiefe der Fahrrinne) verändern.

Die Vertiefung der Fahrrinne führt zu einer Vergrößerung des Querschnittes und somit zu einer Vergrößerung des Stromvolumens. Der Einfluß der Sohlrauheit nimmt mit zunehmendem Abstand zur Sohle ab. Eine Vertiefung der Fahrrinne bewirkt somit eine hydraulisch glattere Hauptrinne, d.h. sie führt in Bezug auf die Strömung zu einer Stärkung der Hauptrinne im Verhältnis zu den Nebenrinnen und den Flachwasserbereichen.

Die von See einschwingende Tidewelle unterliegt damit einer verringerten Dämpfung und Reflexion, so daß mehr Tideenergie stromauf gelangt. Dies führt zu einer Zunahme des Tidehubs.

Die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit wird durch zwei Prozesse hervorgerufen: Die ausbaubedingte Querschnittsaufweitung bewirkt eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten, während die Zunahme des Tidehubs zu einer Erhöhung führt.

Durch die größeren Wassertiefen erhöht sich die Phasengeschwindigkeit der Tidewelle, d.h. es verändern sich die Laufzeiten der Hochwasser- und Niedrigwasserscheitel und somit die Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände.

Die mit den Sturmfluten einhergehenden hohen Wasserstände bewirken, daß sich das Tidegeschehen bei höheren Wasserspiegellagen in der Elbe vollzieht, d.h. die Tidewelle schwingt auf einem höheren Wasserspiegelniveau in das Ästuar ein. Dadurch wird der Einfluß der Querschnittsvergrößerung kleiner. Der hydraulisch wirksame Querschnitt ist im Vergleich zu mittleren Wasserständen erheblich größer. Es ergibt sich, daß bei diesen physikalischen Bedingungen die ausbaubedingten Veränderungen generell geringer sein müssen, als bei mittleren Wasserständen. Dies wird durch die hier beschriebenen Ergebnisse der Modellsimulationen bestätigt.

Für den Verlauf einer Sturmflut ist der zeitliche Zusammenhang zwischen Tidephase und Sturmentwicklung entscheidend. Die im Elbe-Ästuar auftretenden Wasserstände werden durch den Oberwasserzufluß, den durch die Sturmflutentwicklung über der Nordsee vorgegebenen Wasserstand im Elbmündungsgebiet und auch durch die Entwicklung der Windgeschwindigkeit über dem Elbe-Ästuar selbst beeinflusst.

Um diesen lokalen Einfluß der Windgeschwindigkeit über dem Elbeästuar auf die Sturmflutwasserstände berücksichtigen zu können, werden vom Deutschen Wetterdienst Geschäftsfeld Seeschifffahrt (DWD GF Seeschifffahrt) für die zu untersuchenden Sturmflutereignisse die über dem Elbeästuar herrschenden Windverhältnisse in Form von Windfeldern bereitgestellt.

Zur Ermittlung und Darstellung der ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen sollen drei Sturmfluttypen mit unterschiedlichem charakteristischen Verlauf untersucht werden:

- Sturmflut mit fülliger Windstaukurve

- Sturmflut mit steiler Windstaukurve
- Bemessungssturmflut

Als Windstau bezeichnet man strenggenommen die durch Wind verursachte Erhöhung des Wasserstandes (vgl. DIN 4049-3/2.2.5). Die Windstaukurve erhält man aus der Differenz zwischen der Sturmflutkurve und der mittleren Tidekurve (vgl. hierzu auch Länderarbeitsgruppe, 1988).

Dies führt dazu, daß nach dieser Definition neben dem Windeinfluß auch der Luftdruckeinfluß, der Temperatureinfluß, astronomische Anteile (Spring- bzw. Nippenflüsse), Eigenschwingungen der Nordsee und Fernwellen in der Windstaukurve enthalten sein können. Je nach Form der Windstaukurve, d.h. je nach Anstieg bzw. Dauer des Windstaus unterscheidet man zwischen steiler und fülliger Windstaukurve.

Als zu untersuchende Ereignisse wurden die Sturmflut am 28.1.1994 (füllige Windstaukurve), die Sturmflut am 3.1.1976 (steile Windstaukurve) sowie die Bemessungssturmflut 2085A (steile Windstaukurve und hohes Oberwasser) ausgewählt. Im Untersuchungsrahmen der UVU ist festgelegt, daß alle Untersuchungen mit einer Topographie, die den Stand 1992 repräsentiert, durchgeführt werden. Für die Prognose der ausbaubedingten Änderungen ist von der Topographie dieses Zustandes auszugehen. Die ausgewählten Sturmfluten sind deshalb als Ereignisse (Sturmfluttypen) zu betrachten, die als Systemzustand des Elbeästuars möglich sind.

3 Verifikation

Die durch die geplante Anpassung des Fahrinne der Unter- und Außenelbe an die Bedürfnisse der Containerschiffahrt zu erwartenden großräumigen hydrologischen Veränderungen werden auf der Basis des bei der BAW-AK vorhandenen mathematischen Modells für das Elbe-Ästuar unter Verwendung des hydro-numerischen Modellverfahrens TRIM-2D (BAW, 1996) untersucht.

Der Berechnung der ausbaubedingten Änderungen der Hydrologie des Elbe-Ästuars geht die Verifikation des IST-Zustandes voraus. Für mittlere Tideverhältnisse wurde diese Verifikation bereits in Kapitel 3 des Gutachtens Hydromechanik vorgestellt. Betrieb und Verifikation des Elbe-Modells erfordern das Vorhandensein von Informationen über die Topographie (Morphologie und Strombauwerke) des Untersuchungsgebietes sowie Randwerte zur Steuerung des mathematischen Tidemodells. Zur Modellierung von Sturmfluten benötigt man als Randwerte an unterschiedlichen Positionen gemessene Wasserstandsdaten, den gemessene Oberwasserzufluß sowie Informationen über Windgeschwindigkeit und Windrichtung.

3.1 Untersuchte Sturmflutereignisse

Zur Ermittlung und Darstellung der ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen werden drei unterschiedliche Sturmfluttypen untersucht: Eine Sturmflut mit fülliger Windstaukurve, eine Sturmflut mit steiler Windstaukurve sowie die Bemessungssturmflut (vgl. Planungsgruppe Ökologie und Umwelt, 1993).

Unter dieser Vorgabe wurden als zu untersuchende Ereignisse die Sturmflut am 28.1.94, die Sturmflut am 3.1.76 sowie die Bemessungssturmflut 2085A (vgl. Kapitel 4.1.3) ausgewählt. Weiterhin wurde im Untersuchungsrahmen der UVU festgelegt, daß alle Untersuchungen mit einer Topographie, die den Stand 1992 repräsentiert, durchgeführt werden.

Für die beiden erstgenannten Sturmfluten werden die berechneten Werte aus dem HN-Modell TRIM-2D mit Messungen des Wasserstandes verglichen.

Die mit TRIM-2D berechneten Wasserstände der Bemessungssturmflut werden mit den für die Tideelbe festgelegten Bemessungswasserständen (Länderarbeitsgruppe, 1988) verglichen.

3.2 Übersicht über das numerische Modell

TRIM-2D ist ein 2-dimensionales Finite Differenzen Modell, das die Flachwassergleichungen löst. Das Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen ist möglich.

Die Grundlage des mathematischen Verfahrens TRIM-2D sind Differentialgleichungen, welche eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für die Wassermasse, den Impuls der Strömung, sowie für die im Wasser befindliche Salzmenge darstellen.

Bei TRIM-2D handelt es sich um ein abstraktes Modell eines nichtlinearen zeitabhängigen physikalischen Systems. Es beschreibt einen homogenen Wasserkörper mit freier Oberfläche

bei voll entwickelter turbulenter Strömung unter Berücksichtigung von

- Massenerhaltung
- Fortpflanzung von Oberflächenwellen
- advektivem Impulstransport
- turbulenter Diffusion des Strömungsimpulses
- Coriolisbeschleunigung
- horizontaler Gradient der Dichte des Wassers
- Energieverlusten durch Bodenreibung (Bodenschubspannung)
- Energieeintrag durch den Wind (Windschubspannung)
- zeitvariable Höhenlage von Sohlschwellen (überströmte Wehre)

Der Transport von gelösten Substanzen (Salz) im Wasserkörper wird unter Berücksichtigung der Advektion durch die Strömung und der turbulenten Diffusion durchgeführt.

Als Lösung des Differentialgleichungssystems erhält man die Wasserspiegelauslenkung η bezüglich Normal Null, die Komponenten (U, V) der über die Wassertiefe gemittelten horizontalen Strömungsgeschwindigkeit und den über die Wassertiefe gemittelten Salzgehalt S .

Zur Beschreibung der Erhaltung der Wassermasse wird folgende konservative Form der Kontinuitätsgleichung 3.1 verwendet.

$$\underbrace{\frac{\partial \eta}{\partial t}}_{L_m} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}(HU) + \frac{\partial}{\partial y}(HV)}_{D_m} = 0 \quad (3.1)$$

Die einzelnen Terme haben folgende physikalische Bedeutung:

L_m lokale Veränderung der Wasserspiegellage η
 D_m Divergenz des Massentransports

Die Erhaltung des linearen Impulses (x - und y -Komponente) wird mit Hilfe der nachfolgenden, in nicht-konservativer Form geschriebenen Gleichungen 3.2 und 3.3 ausgedrückt.

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial U}{\partial t}}_{L_i} &+ \underbrace{U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}}_{A_i} - \underbrace{2V\Omega \sin \varphi}_{C_i} \\
 &= \underbrace{-\frac{\rho}{\rho_o} g \frac{\partial \eta}{\partial x}}_{P_1} - \underbrace{\frac{1}{\rho_o} g \frac{H}{2} \frac{\partial \rho}{\partial x}}_{P_2} - \underbrace{\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial x}}_{P_3} \\
 &\quad + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_{\mu_t}}{\rho_o} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_{\mu_t}}{\rho_o} \frac{\partial U}{\partial y} \right)}_{T_i} \\
 &\quad - \underbrace{\frac{1}{H} C_D U \sqrt{U^2 + V^2}}_{B_i} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\rho_a}{\rho_o} C_W u_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}_{S_i}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\frac{\partial V}{\partial t}}_{L_i} &+ \underbrace{U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y}}_{A_i} + \underbrace{2U\Omega \sin \varphi}_{C_i} \\
 &= \underbrace{-\frac{\rho}{\rho_o} g \frac{\partial \eta}{\partial y}}_{P_1} - \underbrace{\frac{1}{\rho_o} g \frac{H}{2} \frac{\partial \rho}{\partial y}}_{P_2} - \underbrace{\frac{1}{\rho_o} \frac{\partial p_a}{\partial y}}_{P_3} \\
 &\quad + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_{\mu_t}}{\rho_o} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{D_{\mu_t}}{\rho_o} \frac{\partial V}{\partial y} \right)}_{T_i} \\
 &\quad - \underbrace{\frac{1}{H} C_D V \sqrt{U^2 + V^2}}_{B_i} + \underbrace{\frac{1}{H} \frac{\rho_a}{\rho_o} C_W v_w \sqrt{u_w^2 + v_w^2}}_{S_i}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Die Bedeutung der darin auftretenden Terme ist jeweils 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 Variabilität des (passiven) Tracers Salzgehalt wird die nachfolgende *nicht-konservativ* formulierte Transportgleichung 3.4 (Advektions-Diffusions Gleichung für den Salzgehalt) verwendet; hierin treten keine Quellen und Senken

für den Salzgehalt auf.

$$\underbrace{\frac{\partial S}{\partial t}}_{L_T} + \underbrace{U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y}}_{A_T} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\Gamma_t}{\rho_o} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\Gamma_t}{\rho_o} \frac{\partial S}{\partial y} \right)}_{T_T} = \quad (3.4)$$

Die in dieser Gleichung vorkommenden Terme haben folgende physikalische Bedeutung:

L_T	lokale Konzentrationsänderung
A_T	advective Konzentrationsänderung
T_T	turbulente Diffusion und Dispersion

Das beschriebene Differentialgleichungssystem wird durch geeignete Verfahren numerisch gelöst. Dafür werden die Differentialquotienten durch Differenzenquotienten approximiert.

Zur Ortsdiskretisierung ist anzumerken, daß die Funktionswerte der Unbekannten an den Berechnungspunkten eines Arakawa C Gitters berechnet werden. Die folgenden Terme der partiellen Differentialgleichung werden durch zentrale Differenzen wiedergegeben: Divergenz des Massentransportes (D_m), barotroper Druckgradient (P_1), barokliner Druckgradient (P_2) und Diffusion (vgl. T_i und T_T). Die advektiven Terme (A_i und A_T) werden durch einen Euler-Lagrange-Ansatz approximiert.

Für die Zeitdiskretisierung, d.h. die Approximation der Funktion f durch die Funktionswerte der Zeitebenen n und $n + 1$, wird ein semi-impliziter Ansatz verwendet. Mit dieser semi-impliziten Formulierung werden folgende Terme der partiellen Differentialgleichung approximiert: Divergenz des Massentransportes (D_m) und barotroper Druckgradient (P_1). Die übrigen Terme in den Differentialgleichungen werden durch die 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 Wattflächen.

Durch Verwenden der beschriebenen Diskretisierungen ergibt sich aus den Gleichungen 3.1, 3.2 und 3.3 ein System von Differenzgleichungen. Für das Gleichungssystem existiert eine eindeutige Lösung, die auf iterativem Wege mit Hilfe eines PCG-Verfahrens (Preconditioned Conjugate Gradient) ermittelt wird.

Das numerische 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)
 - wasserdurchströmter Rand mit vorgegebener Substanzkonzentration
 - wasserundurchlässiger Rand

Jede einzelne Zelle des Finite Differenzen Gitters kann mit den genannten Randbedingungen belegt werden. Im Allgemeinen können sowohl zeitabhängige als auch zeitunabhängige Randwerte für die Modellsteuerung verwendet werden.

3.3 Meßdaten

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

3.3.1 Pegelmessungen

Für die zu untersuchenden Zeiträume 25.1.94 - 30.1.94 sowie 1.1.76 - 6.1.76 wurden von den WSÄ Cuxhaven, Hamburg, Lauenburg und Strom- und Hafengebäude Hamburg Pegelbögen und Pegelbeobachtungsbögen für die Pegel entlang der Elbe zwischen Km 756 (Bake A und Bake Z) bis Km 550 (Bleckede) zur Verfügung gestellt. Tabelle 3.1 auf der nächsten Seite und Tabelle 3.2 auf Seite 10 geben eine Übersicht über die in den einzelnen Zeiträumen zu Verfügung stehenden Pegelzeitreihen.

Die Pegelzeitreihen waren zum Teil in digitaler Form vorhanden. Der größte Teil der Pegelzeitreihen wurde 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.

Pegelstationen 1976 (Übersicht)			
<i>Pegel</i>	<i>Kurz- bezeichnung</i>	<i>Gebiet</i>	<i>Elbe- kilometer (alt)</i>
Hohnstorf	HOH	Mittelelbe	569.0
Geesthacht Wehr	GEW	Obere Tideelbe	585.9
Over	OVE	Obere Tideelbe	605.2
Bunthaus	BUN	Obere Tideelbe	609.8 N
Schöpfstelle	SOP	Norderelbe	615.3 N
Amerikahöft	AMH	Norderelbe	621.1 N
St. Pauli	STP	Norderelbe	623.1 N
Harburg	HAR	Süderelbe	615.0 S
Seemannshöft	SEE	Unternelbe	628.9
Blankenese	BLA	Unternelbe	634.8
Cranz	CRA	Unternelbe	634.4
Schulau	SUL	Unternelbe	641.0
Lühort	LUH	Unternelbe	645.5
Stadersand	STA	Unternelbe	654.8
Grauerort	GRA	Unternelbe	660.6
Kollmar	KOL	Unternelbe	666.8
Krautsand	KRA	Unternelbe	671.7
Brokdorf	BRO	Unternelbe	684.2
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
Mittelgrund West	MWE	Außenelbe	740.8

Tabelle 3.1: Liste der Pegel (mit Kurzbezeichnung), die für den Zeitraum 1.1.1976 bis 5.1.1976 zu Verfügung standen.

Pegelstationen 1994 (Übersicht)			
<i>Pegel</i>	<i>Kurz- bezeichnung</i>	<i>Gebiet</i>	<i>Elbe- kilometer (alt)</i>
Bleckede	BLE	Mittelelbe	549.7
Boizenburg	BOI	Mittelelbe	559.0
Hohnstorf	HOH	Mittelelbe	569.0
Artlenburg	ART	Mittelelbe	573.8
Geesthacht Wehr	GEW	Obere Tideelbe	585.9
Altengamme	ALG	Obere Tideelbe	588.9
Over	OVE	Obere Tideelbe	605.2
Bunthaus	BUN	Obere Tideelbe	609.8 N
Schöpfstelle	SOP	Norderelbe	615.3 N
St. Pauli	STP	Norderelbe	623.1 N
Harburg	HAR	Süderelbe	615.0 S
Seemannshöft	SEE	Unternelbe	628.9
Blankenese	BLA	Unternelbe	634.8
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	671.7
Glückstadt	GLU	Unternelbe	674.0
Brokdorf	BRO	Unternelbe	684.2
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
Vogelsand	VOG	Außenelbe	745.6
Bake A	BKA	Außenelbe	ca. 756
Bake Z	BKZ	Außenelbe	ca. 756
Gelbsand Nord	GSN	Außenelbe	
Neuwerk	NWE	Außenelbe	
Scharhörn	SHÖ	Außenelbe	

Tabelle 3.2: *Liste der Pegel (mit Kurzbezeichnung), die für den Zeitraum 25.1.1994 bis 29.1.1994 zu Verfügung standen.*

3. Verifikation

3.3.2 Oberwasser

Vom WSA Lauenburg wurde der tägliche Oberwasserzufluß der Mittelelbe am Pegel Neu Darchau für Januar 1994 sowie Januar 1976 bereitgestellt und für die Modellsteuerung eingesetzt. Für die Bemessungsturmflut 2085A ist das Oberwasser bei Neu Darchau als konstanter Wert festgelegt.

- mittlerer Abfluß Anfang Januar 1976: etwa 500 m³/s (vgl. auch Tabelle 3.3)
- mittlerer Abfluß Ende Januar 1994: etwa 1360 m³/s (vgl. auch Tabelle 3.4)
- konstanter Abfluß Bemessungsturmflut: 2200 m³/s

Der langjährige Mittelwert für den Oberwasserzufluß liegt bei 727 m³/s (Jahresreihe 1926/1991).

Oberwasserzufluß Neu Darchau 1976	
<i>Datum</i>	<i>Zufluß (m³/s)</i>
1.1.1976	461.0
2.1.1976	473.0
3.1.1976	492.0
4.1.1976	519.0
5.1.1976	526.0

Tabelle 3.3: Oberwasserzufluß am Pegel Neu Darchau 1.1.1976 bis 5.1.1976.

Oberwasserzufluß Neu Darchau 1994	
<i>Datum</i>	<i>Zufluß (m³/s)</i>
25.1.1994	1391.0
26.1.1994	1366.0
27.1.1994	1351.0
28.1.1994	1356.0
29.1.1994	1386.0

Tabelle 3.4: Oberwasserzufluß am Pegel Neu Darchau 25.1.1994 bis 29.1.1994.

3.3.3 Wehr Geesthacht

Zwischen 1957 und 1960 wurde die Staustufe Geesthacht bestehend aus einem Stauwehr in der Elbe und der Schifffahrtsschleuse im Seitenkanal errichtet. Sie bildet bei mittleren Tide- und Oberwasserverhältnissen die Grenze zwischen tidebeeinflusster und tideunbeeinflusster Elbe.

Die Aufgabe des Wehres Geesthacht ist, den Wasserspiegel auf NN + 4,00 m am Pumpspeicherwerk Geesthacht zu halten. Für den Wehrbetrieb gilt außerdem generell, daß bei Unterwasserständen \geq Oberwasserstand die Verschlusskörper gelegt werden. Bei Hochwasser (Oberwasserabfluß $> 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) werden die Verschlusskörper (Stahlsektoren) vollständig in die Sektorgruben abgesenkt, so daß das Oberwasser der Elbe ungehindert abfließen kann. Auch bei Sturmfluten wird das Wehr gelegt, da dann die Unterwasserstände deutlich höher als die Oberwasserstände sind.

Im einzelnen ergeben sich für die drei Untersuchungszeiträume folgende Wehrhöhen:

- aufgrund des hohen Oberwassers (vgl. Tabelle 3.4 auf der vorherigen Seite) war das Wehr Geesthacht im Januar 1994 gelegt.
- für den Januar 1976 (Oberwasser ca. $500 \text{ m}^3/\text{s}$, vgl. Tabelle 3.3 auf der vorherigen Seite) wurden Angaben über die Wehrsteuerung vom WSA Lauenburg zur Verfügung gestellt:

von	bis	Wehrhöhe
1.1.76 00:00	3.1.76 13:00	3.40 m
3.1.76 13:00	4.1.76 04:00	Tiefstlage
4.1.76 04:00	6.1.76 00:00	3.40 m

- während der Bemessungssturmflut ist das Wehr aufgrund des hohen Oberwassers gelegt.

3.3.4 Wind

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellte Messungen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung auf Scharhörn (Elbmündungsgebiet) bereit.

Außerdem wurden für die drei zu untersuchenden Sturmflutzeiträume räumlich und zeitlich hochaufgelöste Windfelder vom DWD zur Verfügung gestellt. Diese werden in Abschnitt 3.4.5 ausführlicher beschrieben.

3.4 Randbedingungen und Randwerte

3.4.1 Topographie

Das Modellgebiet umfaßt den Bereich der Elbe von der Außenelbe (Km 756) bis Bleckede (Km 550) jeweils bis zur Deichlinie.

Mit dem numerischen Modells TRIM-2D wird Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt an den jeweiligen Gitterpunkten berechnet. Die Grundlage zur Generierung des Gitternetzes ist ein digitales Geländemodell des gesamten Untersuchungsgebietes. Für dessen Erstellung werden Informationen über die Wassertiefen bzw. Geländehöhen, die Strombauwerke und der Verlauf der Küstenlinie (hier der Deichlinie) benötigt.

Zur Erstellung des digitalen Geländemodells des Modellgebietes standen zusammengefaßt folgende Eingangsdaten zur Verfügung:

- Peildaten
 - Peildaten der KUEDAT-Datenbank (Seitz und Zeh, 1991) für die Bereiche Außenelbe und Unterelbe (WSA Cuxhaven, WSA Töning, WSA Hamburg und BSH Hamburg). Es standen die Jahrespeilungen von 1985 bis 1992 zu Verfügung. Zur Erstellung des digitalen Geländemodells wurden für jeden Bereich des Elbe-Ästuars die jeweils aktuellsten Peildaten benutzt.
 - Peildaten des Amtes für Land- und Wasserwirtschaft Heide für den Bereich des Watts zwischen Neufeld und Trischen.
 - Peildaten des Amtes Strom- und Hafengebäude der Wirtschaftsbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg für den Bereich der Delegationsstrecke
 - Peildaten des WSA Lauenburg für den Bereich Elbe Km 585 bis 550 aus Querprofilpeilungen des Jahres 1992
- Luftbildkarten
 - Wasserstraßenkarte 1:2000 (Luftbild), Herausgeber: Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schiffsamt Lauenburg, 1985, Blätter 07-54 bis 07-79.
 - 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.
 - Karten der Bundeswasserstraßen 1:5000 Luftbildplan, Herausgeber: Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schiffsamt Hamburg, 1987. Blätter für den Bereich von Elbe Km 631.5 bis Km 689.
- Tiefenkarten
 - Elbe 1:10000, Hauptpeilung 1988, Herausgeber: Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schiffsamt Hamburg. Blätter 1 bis 8.

- Tiefenkarte der Elbe von Elbe 1 bis St.Margarethen 1991 1:20000, Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven 1994. Blätter 1 bis 4.

- Sonstige Karten

- Der Hafen von Hamburg 1:10000. Herausgeber: Freie und Hansestadt Hamburg, Strom- und Hafenbau 1986.
- Bundeswasserstraßenkarte 1:2000, Herausgeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Lauenburg, 1985, Blätter 07-25 bis 07-79.

Die Vorlandhöhen sowie die Lage und Höhe von Strombauwerken wurden aus den oben aufgeführten Karten der Elbe entnommen.

Da bei Sturmflut alle Nebenflüsse durch Sperrwerke von der Elbe getrennt sind, werden diese in der Modelltopographie nur bis zum jeweiligen Sperrwerk berücksichtigt.

Gitternetzgenerierung

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Informationsquellen waren die Basis zur Erzeugung des Finite Differenzen Gitters (für TRIM-2D) für die hydronumerischen Modelluntersuchungen der erweiterten Elbe-Sturmfluttopographie. Das Gitternetz wurde für das im folgenden beschriebene Modellgebiet erstellt:

- das Modellgebiet umfaßt die Unter- und Außenelbe, das Hamburger Stromspaltungsgebiet, die obere Tideelbe zwischen Bunthaus und dem Wehr Geesthacht sowie die Elbe zwischen dem Wehr Geesthacht und Bleckede
- die seeseitige Berandung wird durch die gedachte Linie Cuxhaven-Sahlenburg - Neuwark - Scharhörn - Bake A - Bake Z - Dieksand gebildet
- die landseitige Grenze entspricht der Deichlinie; die Elbe wurde bis Bleckede (Km 550) nachgebildet

Das Finite Differenzen Gitter

In der Sturmfluttopographie sind alle Flächen, die während der extrem hohen Sturmflut-scheitelwasserstände überflutet werden, enthalten. Bei der Erzeugung der Sturmfluttopographiegitternetzes wurde in folgenden 3 Schritten vorgegangen:

1. Festlegen der Gitterweite
2. Festlegen der Lage des Gitters im Raum
3. Belegen aller vor dem Deich liegenden Elemente mit Höhenwerten.

Das Gitternetz ist so gewählt, daß die hydraulisch wirksamen Strukturen des Untersuchungsgebietes sowie die geometrischen Systemveränderungen infolge der geplanten Anpassung mit hinreichender Genauigkeit nachbildet werden können.

Als Gitterweite wurde 50 m * 50 m gewählt. Die Lage des Gitters wurde gegenüber dem für die Untersuchung mittlerer Tideverhältnisse (vgl. Bericht zum Gutachten Hydromechanik) verwendeten Gitter nicht verändert.

Als letzter Schritt bei der Gitternetzgenerierung erfolgt die Belegung der potentiell im Wasser liegenden (aktiven) Elemente mit Höhenwerten. Diese Höhenwerte repräsentieren die mittlere Höhenlage der Fläche des Elementes.

Das Gitternetz des Finiten Differenzenverfahrens TRIM-2D kann zusammenfassend durch folgende Angaben beschrieben werden:

- Größe des Gitternetzes
 - Anzahl der Gitterzellen in Ost-West-Richtung: 3232
 - Anzahl der Gitterzellen in Nord-Süd-Richtung: 1582
 - Gesamtzahl der aktiven Gitterzellen: 376000
- räumlich Diskretisierung
 - Gitterweite in Ost-West-Richtung: $\Delta x = 50$ m
 - Gitterweite in Nord-Süd-Richtung: $\Delta y = 50$ m

3.4.2 Ausbautopographie

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

Grundlage der UVU und damit auch Untersuchungsobjekt für dieses Gutachten ist die in Abbildung 3.1 auf der nächsten Seite 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 die Anpassung an das sich verändernde Kartennull wird der Sockel bis Km 713.2 (Otterndorf) auf 16.05 m unter NN abgesenkt. Unterhalb dieser Stelle wird die Tiefe des Fahrwassers allmählich bis auf 16.99 m unter NN bei Km 748 abgesenkt. Die Tiefe im Bereich der Ausbaustrecke innerhalb 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.

Zur Einarbeitung der Ausbauplanung in die Topographie des IST92-Zustandes 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 den Stellen, an denen die Fahrrinne dicht am Ufer entlang führt, dieses Toleranzmaß auf 0 gesetzt.

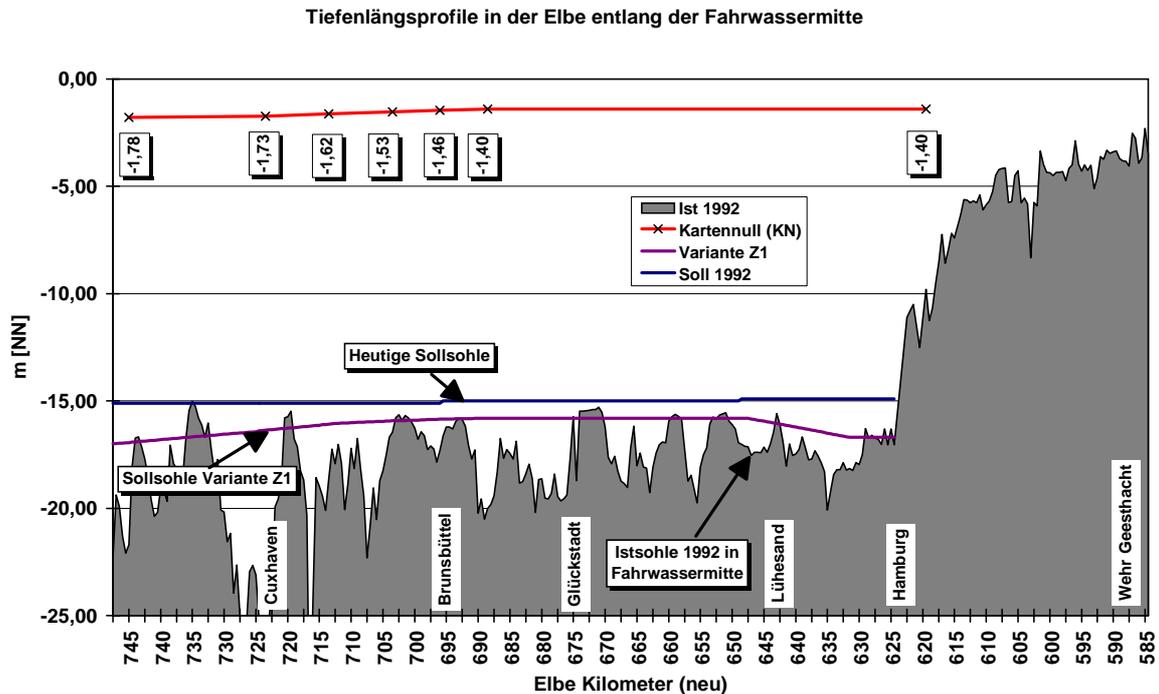


Abbildung 3.1: Längsschnitt Unter- und Außenelbe entlang der Fahrinnenachse mit der Lage der heutigen und zukünftigen Sollsohle

- Die Solltiefen werden entsprechend Abbildung 3.1 in die Fahrrinne eingebaut.
- Zur Berücksichtigung von Herstellungsungenauigkeiten bei der Baggerung wird im Modell um eine Toleranz von 0.5 m zusätzlich zur Solltiefe vertieft.
- Soweit durch die Vertiefung im Modell an den Seiten Böschungsneigungen steiler als 1:10 entstehen, werden diese auf 1:10 abgeflacht, bis sich die neue und die alte Böschung schneiden.
- Ein Element wird dann als zur Trasse gehörig bezeichnet, 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 durch 'morphologischen Nachlauf' ein Gleichgewicht eingestellt hat. In diesen Bereichen wird der morphologische Nachlauf wie folgt berücksichtigt:
 - Mit Übertiefen sind Tiefenbereiche gemeint, die bereits heute mindestens 2 m tiefer sind als die heutige Sollsohle. Diese Tiefen werden um den jeweils gültigen Betrag aus 'neuer Sollsohle minus alter Sollsohle' vertieft.
 - Bei Riffelstrecken, in denen 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 für die Ausbautopographie erzeugte Gitternetz des Finiten Differenzenverfahrens TRIM-2D ist mit dem der IST92-Topographie identisch.

3.4.3 Rand zur Mittelelbe: Oberwasser

Auf Grund der erweiterten Modelltopographie wird abweichend zu den Modellläufen zur Untersuchung der mittleren Tideverhältnisse während der Sturmflutzeiträume das Oberwasser am östlichen Modellrand bei Bleckede und nicht am Wehr Geesthacht vorgegeben. Es wird mit einem Zeitversatz von +7 Stunden (pers. Mitteilungen WSA-Lauenburg) aus dem am Pegel Neu Darchau gemessenen Durchflußwert bestimmt.

3.4.4 Seeseitiger Rand: Steuerpegel

Der Rand zur Nordsee wird über den Wasserstand gesteuert. Für die einzelnen Sturmflutzeiträume standen unterschiedliche Wasserstandszeitreihen zur Verfügung:

- für den Januar 1994: Pegelmessungen an Bake A und an Bake Z
- für den Januar 1976: Pegelaufzeichnungen der Bake W. Die Pegel Bake A und Bake Z gab es 1976 noch nicht.
- für die Bemessungssturmflut wurde der Wasserstand am Steuerpegel so erzeugt, daß folgende Vorgaben am Pegel Cuxhaven Steubenhöft berücksichtigt wurden:
 - 1.1. 00:00 - 2.1. 21:00 mittlere Tide Cuxhaven
 - 2.1. 21:00 - 3.1. 21:30 Bemessungssturmflut 2085A
(berechneter Pegel Cuxhaven (Knoten 97)
aus dem Model System 11 des dhi
(vgl. Siefert und Havnø, 1989)
 - 3.1. 21:30 - 5.1. 00:00 gemessener Pegel Cuxhaven
vom 3.1. - 5.1.1976

Diese Vorgaben ergeben sich aus dem im Bericht der Länderarbeitsgruppe (vgl. hierzu Länderarbeitsgruppe, 1988) beschriebenen Verfahren zur Festlegung der Bemessungswasserstände der Tideelbe. Darin ist festgelegt, daß eine maßgebende Sturmtidekurve für Cuxhaven bestimmt wird. Diese maßgebende Sturmtidekurve wird aus der Addition der mittleren Tidekurve und einer extremen Windstaukurve gebildet (vgl. auch Kapitel 4.1.3).

Die Wasserstandszeitreihen werden für die jeweiligen Sturmfluten zum Erzeugen der Randwerte verwendet. Dafür werden aus den Wasserstandszeitreihen mit Hilfe von Übertragungsfunktionen Randwertzeitreihen für den ca 75 km langen Rand zur Nordsee berechnet.

3.4.5 Oberer Rand: Atmosphäre

Die räumliche und zeitliche Variabilität des lokalen Windfeldes erzeugt einen zusätzlichen räumlich und zeitlich variablen Impulseintrag aus der Atmosphäre, der Strömung und Wasserstand von Flüssen und Ästuarien kleinräumig beeinflusst. Dieser Effekt ist bei Extremereignissen wie Sturmfluten nicht zu vernachlässigen und muß deshalb im Rahmen der Untersuchung der ausbaubedingten Veränderungen bei Sturmfluten in hydrodynamischen numerischen Modellen mitberücksichtigt werden.

Durch eine Zusammenarbeit mit dem DWD GF Seeschifffahrt konnten für ausgewählte Zeiträume räumlich und zeitlich hochaufgelöste, mit einem numerischen Modell erzeugte, lokale Windfelder als Eingabegröße für das Modell TRIM-2D bereitgestellt werden.

Diese Windfelder beinhalten neben der großräumigen meteorologischen Situation auch kleinräumige Prozesse, wie durch Inseln, Sandbänke oder trockengefallene Wattflächen erzeugte Windschatten oder die durch die unterschiedliche Rauigkeit von Land und Wasser erzeugte Veränderung der Windgeschwindigkeit und Windrichtung über die Strombreite. Sie beinhalten detailliertere Informationen als Windfelder, die durch Interpolation von über Land gewonnenen Messungen entstanden sind.

Vom DWD GF Seeschifffahrt wurden für alle drei Sturmflutzeiträume Windfelder (Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 10 m Höhe) mit einer räumlichen Auflösung von 450 m und einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden zu Verfügung gestellt. Diese Windfelder wurden mit dem numerischen Modell MKW (**M**assen**K**onsistentes **W**ind**f**eld) (Schmidt und Pätsch, 1992) berechnet. MKW ist ein 3-dimensionales Potentialflußmodell. Es wurde beim DWD aus dem Modell NOABL (**N**OAA **A**tmospheric **B**oundary **L**ayer) der NOAA (**N**ational **O**ceanographic and **A**tmospheric **A**dministration, USA) weiterentwickelt. Ziel der ursprünglichen Entwicklung von NOABL war es, die räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung aus Punktmessungen für eine Region zu berechnen (Traci et al., 1978).

In einem Potentialflußmodell wie MKW werden nicht wie in TRIM-2D (vgl. Kapitel 3.2) prognostische Gleichungen gelöst, vielmehr wird zu vorgegebenen Randwerten (hier Windmessungen entlang der Elbe) ein Lösungsfeld im Inneren des Modellgebietes berechnet.

Vorgegeben werden Topographie, Rauigkeitsverteilung, im Modellgebiet gemessene Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie vertikale Schichtung. Als Ergebnis erhält man die Windgeschwindigkeitsverteilung im Modellgebiet.

Für die Sturmfluten im Januar 1976 und Januar 1994 wurden Messungen der Windrichtung und Windgeschwindigkeit als Eingabegrößen in MKW verwendet. Für die synthetische Bemessungssturmflut wurden als Eingabegrößen die im Januar 1976 gemessene Windrichtung und die um 10 % erhöhte Windgeschwindigkeit verwendet (vgl. auch Kapitel 4.1.3).

Die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe \vec{u}_{10} wird benötigt, um den Quellterm S_i in der Bewegungsgleichung (Gleichung 3.2 und 3.3) zu berechnen. Dieser Term beschreibt den Impulseintrag aus der Atmosphäre in das Ästuar auf Grund von Windschub.

Aus der Windgeschwindigkeit \vec{u}_{10} wird die Windschubspannung $\vec{\tau}$ berechnet

$$\vec{\tau} = \rho_{Luft} \cdot C_W \vec{u}_{10} |\vec{u}_{10}|$$

Der Quellterm S_i ergibt sich aus

$$S_i = \frac{1}{H} \frac{\rho_{Luft}}{\rho_{Wasser}} \cdot C_W \vec{u}_{10} |\vec{u}_{10}|$$

Hierbei wurde für den Impulsaustauschkoeffizienten C_W

$$C_W = (0.63 + 0.066 \cdot |\vec{u}_{10}|) \cdot 10^{-3}$$

nach Smith und Banke, 1975 im numerischen Modell TRIM-2D verwendet.

3.4.6 Koeffizienten und Parameter

In Tabelle 3.5 sind die wesentlichen Parameter und Koeffizienten für die mit TRIM-2D durchgeführten Simulationsläufe im Tidebereich der Elbe zusammengestellt. Für den Bereich oberhalb des Wehres Geesthacht wurde aufgrund der unterschiedlichen Rauheitscharakteristik ein erhöhter Bodenreibungskoeffizient im überfluteten Vorlandbereich verwendet. Er lag je nach Bewuchs des Vorlandes zwischen $C_D=0.0175$ und $C_D=0.056$.

Koeffizienten und Parameter - Elbe Modell TRIM-2D (Tidebereich)	
Zeitschritt:	30 s
Bodenreibungskoeffizient C_D :	0.00185
(\cong Chezy-Beiwert C_Z)	($\cong C_Z = 72 \text{ m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$)
turbulente Wirbelviskosität D_{turb}	$1.0 \text{ m}^2/\text{s}$
turbulenter Diffusionskoeffizient Γ	$20 \text{ m}^2/\text{s}$

Tabelle 3.5: Zusammenstellung wesentlicher Parameter und Koeffizienten für die mit dem hydronumerischen Verfahren TRIM-2D durchgeführten Simulationsrechnungen.

3.5 Ergebnisse

Mit dem numerischen Modell des Elbe-Ästuars wurden Simulationsrechnungen zur Verifikation des IST-Zustandes sowie zur Ermittlung der charakteristischen, die Hydrographie des Elbe-Ästuars kennzeichnenden Größen durchgeführt. Im Bericht zum Gutachten Hydromechanik Kapitel 3.5 werden die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen für den Zeitraum 30.6.1992 bis 14.7.1992 vorgestellt. Es wird gezeigt, daß die wesentlichen Eigenschaften des natürlichen Systemverhaltens von dem mathematischen Elbe-Modell wiedergegeben werden.

Auch für den Sturmflutfall können die modellierten Wasserstände mit den gemessenen Wasserständen verglichen werden. Die Sturmfluten wurden jedoch aufgrund ihres charakteristischen Verlaufs ausgewählt und werden unter Verwendung einer 1992 aufgenommenen Topographie untersucht. Dies bedeutet, daß als Steuerwerte Meßwerte aus dem Jahr 1976 bzw. 1994 verwendet werden, während die Topographie dem IST-Zustand 1992 entspricht. Auf Grund von Änderungen in der Topographie zwischen 1976 und 1992 kann es keine Übereinstimmung zwischen den modellierten und gemessenen Ergebnissen geben. Dies wird besonders in der Phasengeschwindigkeit der Tidewelle und somit in den Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände deutlich. Eine Vergrößerung der Tiefe führt zu einer Erhöhung der Phasengeschwindigkeit. Auf Grund der größeren Tiefe der Elbe 1992 erreicht deshalb das mit den Meßwerten 1976 modellierte Hochwasser z.B. St.Pauli früher als die Messung (vgl. Abbildung 5.2 auf Seite 42).

Wichtig ist also im Rahmen dieser Verifikation nicht nur, ob die Meßwerte exakt getroffen werden, sondern ob die Charakteristika der einzelnen Sturmfluten vom numerischen Mo-

dell nachgebildet werden. Unter diesen Voraussetzungen sind Aussagen über die Größe von ausbaubedingten Veränderungen möglich.

Zusätzlich zum Vergleich mit Meßwerten soll im folgenden Kapitel in einer Sensitivitätsstudie gezeigt werden, wie das numerischen Modell des Elbeästuars im Falle von Sturmfluten auf Veränderungen der Topographie, des Oberwassers und des Windes reagiert. Außerdem wird dargestellt, wie sensitiv die ausbaubedingte Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände auf Variationen der absoluten Höhe des Scheitelwasserstandes reagieren.

3.5.1 Sensitivitätsstudie

Topographie

Für das Modellieren von Sturmfluten mußte die vom numerischen Modell verwendete Topographie wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben um Vorlandbereiche, Teile des Hamburger Hafens und den Bereich zwischen dem Wehr Geesthacht und Bleckede erweitert werden. So konnte sichergestellt werden, daß alle potentiellen Überflutungsflächen in der Modelltopographie enthalten sind.

Um zu untersuchen, wie sensibel das Modell auf Veränderungen der Topographie reagiert, wurden zwei Vergleichsläufe durchgeführt. Zum einen wurde die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Sturmfluttopographie verwendet, zum anderen wurde ein Lauf mit einer modifizierten Topographie durchgeführt, die im Hamburger Hafen keine zusätzlichen Überflutungsflächen besitzt, d.h. im Bereich des Hamburger Hafens wurde die Sturmfluttopographie durch die ursprüngliche bei mittleren Tideverhältnissen verwendete Topographie ersetzt.

Es wurden zwei Modellläufe mit identischen Randwerten durchgeführt. Der Simulationszeitraum war der 25.1.1994 bis 29.1.1994. Untersucht wurde das Verhalten des Wasserstandes am 28.1.1994 während des Nachmittagshochwassers, d.h. während des Sturmflutscheitelwasserstandes.

Der Vergleich der berechneten Wasserstände zeigt, daß das Verringern der Überflutungsflächen im Hamburger Hafen zu einer nur geringfügigen Zunahme der Wasserstände stromab von Schulau führen. Hier steigt der Wasserstand um weniger als 1 cm. In Hamburg St.Pauli führt die veränderte Topographie zu einem Anstieg der Wasserstände um 4 cm und in Bunthaus um 8 cm. Stromauf von Bunthaus klingt diese Zunahme ab, so steigt bei Zollenspieker der Wasserstand um weniger als 1 cm, und am Wehr Geesthacht ist keine Differenz im Wasserstand mehr festzustellen.

Es zeigt sich, daß eine genaue Kenntnis der Topographie auch in den gewöhnlich nicht überfluteten Bereichen notwendig ist, um Wasserstände mit einer Genauigkeit im cm-Bereich zu modellieren. Vorlandhöhen werden jedoch üblicherweise nicht mit der gleichen räumlichen Auflösung vermessen wie das Fahrwasser. Der bei Sturmfluten zu Verfügung stehende Flutraum im Vorlandbereich kann deshalb von der Modelltopographie bereichsweise über- oder unterschätzt sein.

Die oben beschriebene Untersuchung zeigt, daß die Auswirkungen der Variation der Topographie jedoch lokal begrenzt sind.

In Tabelle 3.6 auf Seite 29 sind für ausgewählte Pegelorte die Veränderungen im Vergleich zum Referenzlauf dargestellt. Als Referenzlauf wird der Lauf mit den unveränderten Randwerten, d.h. mit Sturmfluttopographie, Oberwasser wie gemessen und lokalen Windfelder bezeichnet.

Oberwasser

Ein weiterer Randwert für das numerische Modell ist der Oberwasserzufluß, der am östlichen Modellrand bei Bleckede vorgegeben wird.

Während des Januars 1994 hatte die Elbe ungewöhnlich hohes Oberwasser mit einem Maximalwert von 2095 m³/s am 3.1.1994. Bis Ende Januar fiel das Oberwasser dann auf 1350 m³/s.

Um zu untersuchen, wie sensibel das Modell auf Veränderungen im Oberwasser reagiert, wurden drei Vergleichsläufe durchgeführt. Alle Läufe verwendeten die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Sturmfluttopographie und identische Randwerte am Rand zur Nordsee, lediglich die Oberwasserzuflüsse wurden variiert:

- gemessenes Oberwasser Q
- gemessenes Oberwasser + 300 m³/s ($\approx Q + 25\%$)
- gemessenes Oberwasser + 1000 m³/s ($\approx Q + 75\%$)

Der Simulationszeitraum war der 25.1.1994 bis 29.1.1994. Untersucht wurde das Verhalten des Wasserstandes am 28.1.1994 während des Nachmittagshochwassers, d.h. während des Sturmflutscheitelwasserstandes.

Der Vergleich der berechneten Wasserstände zeigt, daß eine Erhöhung des Oberwassers um ca. 25 % zu einer geringen Zunahme der Wasserstände stromab von Schulau führt. Hier steigt der Wasserstand um weniger als 1 cm. In Hamburg St.Pauli führt die Erhöhung des Oberwassers zu einem Anstieg des Wasserstandes um 2 cm und in Bunthaus um 6 cm.

Eine Erhöhung des Oberwassers um 1000 m³/s (ca. 75 %) führt zu einer Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände bei Brunsbüttel um 2 cm und bei Schulau um 5 cm. In Hamburg St.Pauli führt die Erhöhung des Oberwassers zu einem Anstieg des Wasserstandes um 10 cm und in Bunthaus um 18 cm.

Es zeigt sich, daß eine genaue Kenntnis des Oberwasserzuflusses auch bei Sturmfluten notwendig ist, um Wasserstände mit einer Genauigkeit im cm-Bereich zu modellieren. Der Einfluß des Oberwassers auf die Wasserstände ist im Bereich stromauf des Hamburger Hafens besonders groß.

Tabelle 3.6 auf Seite 29 zeigt für ausgewählte Pegelorte die Veränderungen im Vergleich zum Referenzlauf.

Wind

Aus der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe wird im numerischen Modell der Impulseintrag aus der Atmosphäre berechnet.

Um zu untersuchen, wie sensibel das Modell auf Veränderungen im Impuleintrag aus der Atmosphäre reagiert, wurden drei Vergleichsläufe durchgeführt. Alle Läufe verwendeten die in Kapitel 3.4.1 beschriebene Sturmfluttopographie und identische Randwerte, lediglich die verwendeten Windgeschwindigkeiten über der Elbe wurden variiert:

- Berücksichtigen der mit MKW berechneten zeitlich und räumlich hochaufgelösten Windfelder
- Berücksichtigen des auf Scharhörn gemessenen Windes als homogenen Wind über dem gesamten Modellgebiet
- Windgeschwindigkeit = 0 über dem Elbeästuar

Der Simulationszeitraum war der 25.1.1994 bis 29.1.1994. Untersucht wurde das Verhalten des Wasserstandes am 28.1.1994 während des Nachmittagshochwassers, d.h. während des Sturmflutscheitelwasserstandes.

Im ersten Lauf wird der Impulseintrag aus der Atmosphäre mit Hilfe von lokalen Windfeldern, die mit dem Modell MKW modelliert wurden, berechnet. Diese Felder beinhalten Informationen über Windgeschwindigkeit und Windrichtung in einer räumlichen Auflösung von 450 m und einer zeitlichen Auflösung von 2 Stunden.

Im zweiten Lauf wird der Impulseintrag aus der Atmosphäre mit Hilfe der auf der Insel Scharhörn im Elbmündungsgebiet gemessenen Windgeschwindigkeit und Windrichtung berechnet. Der auf Scharhörn gemessene Wind ist nur für das Elbmündungsgebiet charakteristisch. Im Vergleich zu den Windgeschwindigkeiten weiter im Landesinneren liegt er zu hoch, so daß er dort die Windgeschwindigkeit überschätzt und somit auch der Impulseintrag aus der Atmosphäre überschätzt wird.

Der dritte Lauf wird mit Windgeschwindigkeit = 0 über dem Elbeästuar, d.h. ohne Berücksichtigung des Windeinflusses durchgeführt, so daß entlang der Elbe kein Impulseintrag aus der Atmosphäre auftritt.

Die unter den oben genannten Vorgaben modellierten Sturmflutscheitelwasserstände werden für drei ausgewählte Stationen entlang der Elbe betrachtet: Brunsbüttel, Schulau und Hamburg St.Pauli.

Abbildung 3.2 auf Seite 26 stellt den Verlauf des modellierten Wasserstandes für den 27.1.-29.1.1994 am Pegel Brunsbüttel dar. Man erkennt, daß die rote (mit Wind Scharhörn) und die schwarze (mit MKW-Windfeldern) Kurve hier sehr dicht beieinander liegen. Das deutet darauf hin, daß der auf Scharhörn gemessene Wind in diesem Fall (Westwindlage) für das Elbmündungsgebiet bis Brunsbüttel in der gleichen Größenordnung liegt, wie die mit MKW modellierten Windfelder. Die grüne Kurve (ohne Wind) liegt stets unter den beiden anderen. Ohne die Berücksichtigung des Windeinflusses wird der Wasserstand, besonders das Hochwasser während der Sturmflut, unterschätzt.

In Abbildung 3.3 auf Seite 27 sind die für den Pegel Schulau (Elbe Km 641.0) berechneten Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten für den Zeitraum 27.1. bis 29.1.1994 dargestellt. Während dieses Zeitraums herrscht über dem Elbeästuar Westwind. Bereits am Vormittag des 27.1.1994 werden über Scharhörn Windgeschwindigkeiten größer 18 m/s gemessen. Am Nachmittag liegen die Geschwindigkeiten bei 12 - 15 m/s und nehmen dann am Mittag des 28.1.1994 wieder auf mehr als 20 m/s zu (vgl. auch Kapitel 4.1.2).

Die berechneten Wasserstände sind besonders für die Sturmflutscheitelwasserstände deutlich unterschiedlich. So liegt der unter Berücksichtigung des auf Scharhörn gemessenen Windes berechnete Wasserstand 30 cm höher, der ohne Windeinfluß berechnete Wasserstand um 70 cm tiefer als der unter Berücksichtigung des mit MKW modellierten lokalen Windfeldes berechnete Sturmflutscheitelwasserstand.

Im unteren Teil von Abbildung 3.3 auf Seite 27 sind die für den Pegel Schulau modellierten Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die niedrigsten Strömungsgeschwindigkeiten werden jeweils in den Ebbphasen bei Berücksichtigung des auf Scharhörn gemessenen Windes erreicht. Dieser starke Westwind ist während der Ebbphase entgegen der Strömungsrichtung gerichtet und behindert so ein Abfließen des Wassers und eine höhere Strömungsgeschwindigkeit. So ist auch verständlich, warum ohne Berücksichtigung des Windes über dem Elbeästuar in den Ebbphasen deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten errechnet werden.

Abbildung 3.4 auf Seite 28 zeigt den Einfluß des Windes auf den Wasserstand am Pegel Hamburg St.Pauli (Elbe Km 623.1 N) für den Zeitraum 27.1. bis 29.1.1994. Die Höhe der Wasserstände unterscheidet sich hier ebenfalls deutlich. Das Nachmittagshochwasser am 28.1.1994 liegt ohne Berücksichtigung des Windes um 75 cm unter dem bei Berücksichtigung des mit MKW berechneten Windfeldes modellierten Wasserstand. Bei Berücksichtigung des auf Scharhörn gemessenen Windes, der für den Bereich des Hamburger Hafens als zu hoch gelten kann, liegt der Sturmflutscheitelwasserstand um 35 cm über dem mit MKW-Windfeldern berechneten.

Die Auswirkungen des Windeinflusses auf die Wasserstände entlang der Elbe sind in Abbildung 3.5 auf Seite 30 dargestellt. Im Außenbereich liegen die Werte der modellierten Wasserstände dicht beieinander, da sie hier stark durch die Steuerung am Modellrand geprägt werden. Schon westlich von Cuxhaven ist der ohne Windeinfluß berechnete Wasserstand deutlich niedriger als der mit Windeinfluß. Ab Elbe Km 680 (Stör-Mündung) wird deutlich, daß der am 28.1.1994 auf Scharhörn gemessene Wind für den Bereich der gesamten Tideelbe zu hoch ist. In Hamburg St.Pauli liegen die drei mit unterschiedlichem Windeinfluß berechneten Sturmflutscheitelwasserstände um mehr als 1 m auseinander. Tabelle 3.6 auf Seite 29 zeigt für ausgewählte Pegelorte die Veränderungen im Vergleich zum Referenzlauf. Als Referenzlauf wird auch hier der Lauf mit den unveränderten Randwerten, d.h. mit Sturmfluttopographie, Oberwasser wie gemessen und mit MKW modellierten lokalen Windfeldern bezeichnet.

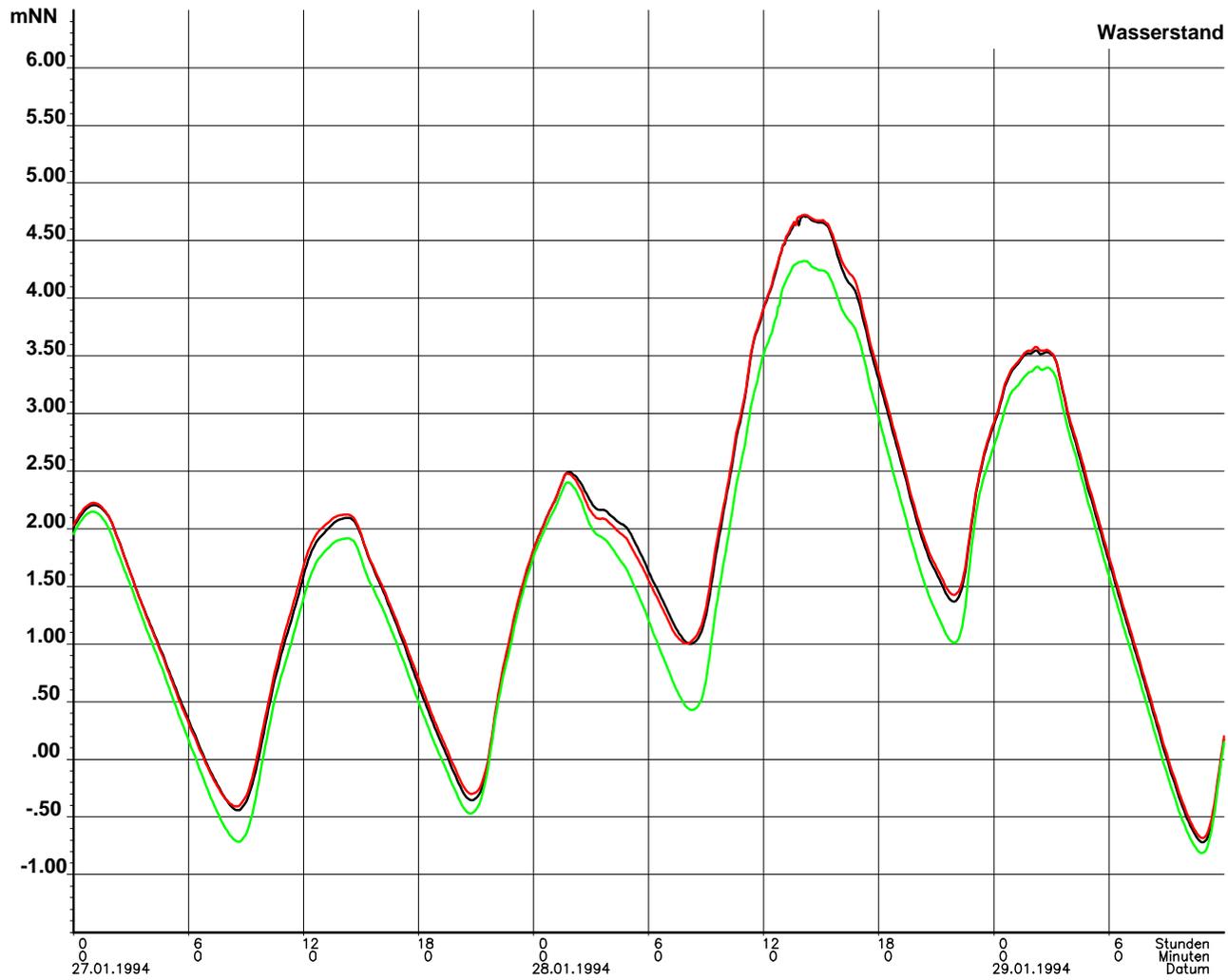


Abbildung 3.2: Sensitivitätsstudie Wind. Dargestellt sind für den Zeitraum 27.1.-29.1.1994 die mit TRIM-2D berechneten Wasserstandszeitreihen am Pegel Brunsbüttel: schwarz: unter Berücksichtigung des MKW-Windfeldes; rot: unter Berücksichtigung des auf Scharhorn gemessenen Windes; grün: ohne Windeinfluß

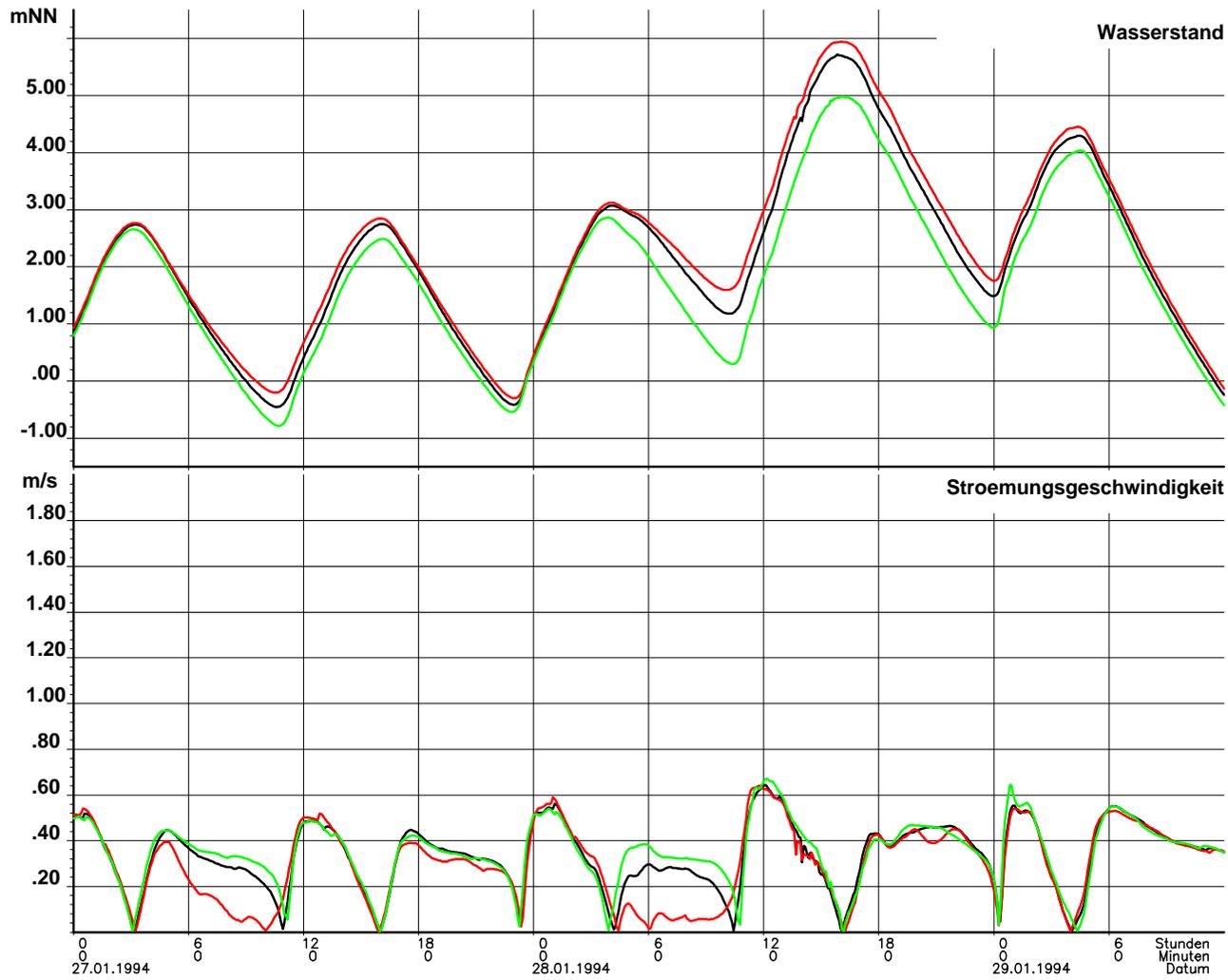


Abbildung 3.3: Sensitivitätsstudie Wind. Dargestellt sind für den Zeitraum 27.1.-29.1.1994 die mit TRIM-2D berechneten Wasserstandszeitreihen (oben) sowie die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten (unten) am Pegel Schullau: schwarz: unter Berücksichtigung des MKW-Windfeldes; rot: unter Berücksichtigung des auf Scharhorn gemessenen Windes; grün: ohne Windeinfluß

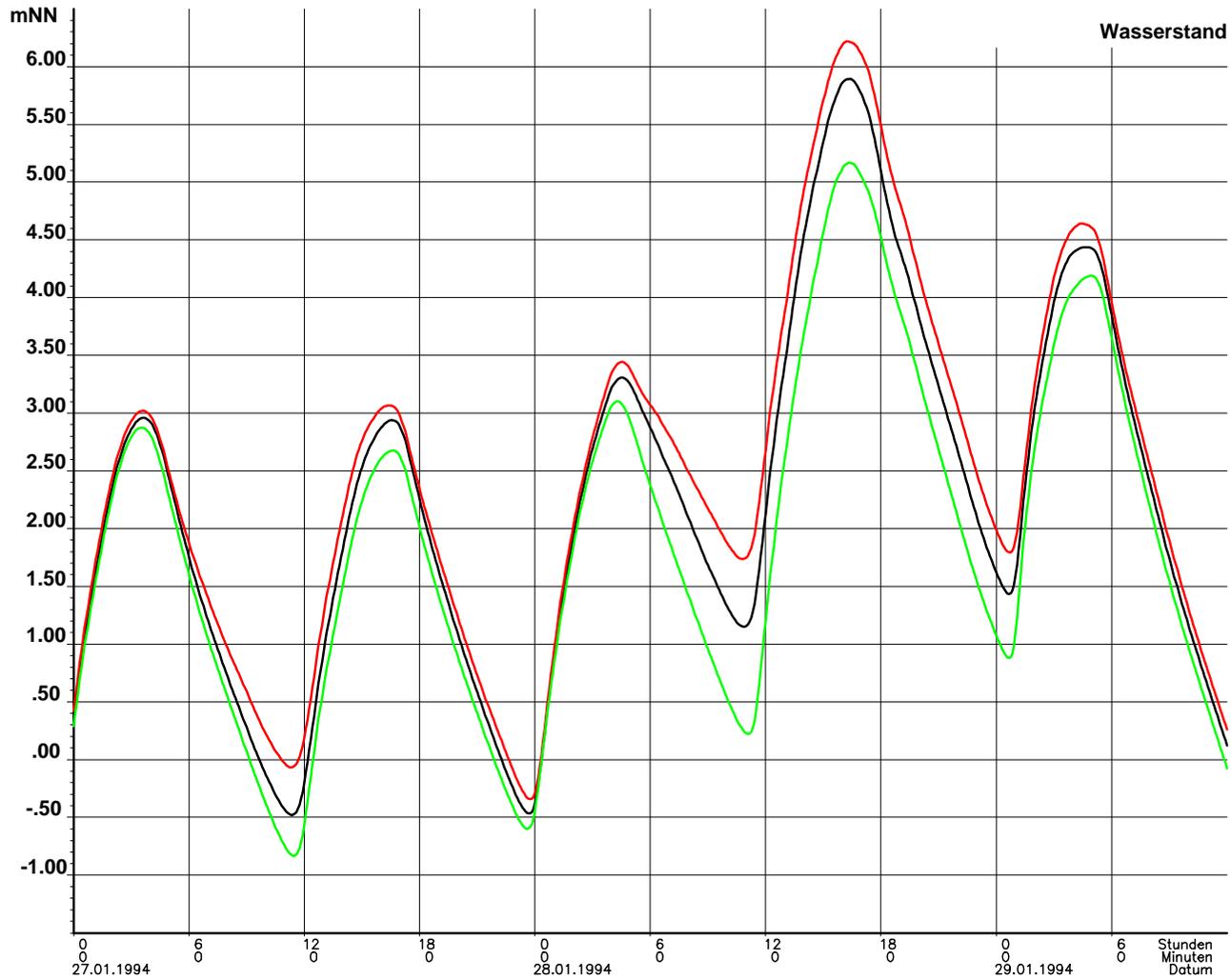


Abbildung 3.4: Sensitivitätsstudie Wind. Dargestellt sind für den Zeitraum 27.1.-29.1.1994 die mit TRIM-2D berechneten Wasserstandszeitreihen am Pegel St.Pauli: schwarz: unter Berücksichtigung des MKW-Windfeldes; rot: unter Berücksichtigung des auf Scharhorn gemessenen Windes; grün: ohne Windeinfluß

**Veränderung des Sturmflutscheitelwasserstände während der
 Sturmflut am 28.1.1994 im Vergleich zum Referenzlauf**

	Brunsbüttel	Schulau	St.Pauli	Bunthaus
Topographie:				
Hafen ohne Überflutungs- flächen	< 1 cm	< 1 cm	+4 cm	+8 cm
Oberwasser:				
Q + 300 m ³ /s	< 1 cm	< 1 cm	+ 2 cm	+ 6 cm
Q + 1000 m ³ /s	+ 2 cm	+ 5 cm	+ 10 cm	+18 cm
Wind:				
ohne Wind	- 35 cm	- 70 cm	- 75 cm	- 70 cm
Wind Scharhörn	< 1 cm	+ 30 cm	+ 35 cm	+ 45 cm

Tabelle 3.6: Sensitivitätsstudie: Differenzen in den modellierten Wasserständen im Vergleich zum Referenzlauf (28.1.1994). Im Referenzlauf wird das gemessene Oberwasser bei Bleckede, die mit MKW modellierten Windfelder sowie die Sturmfluttopographie als Eingabegrößen verwendet.

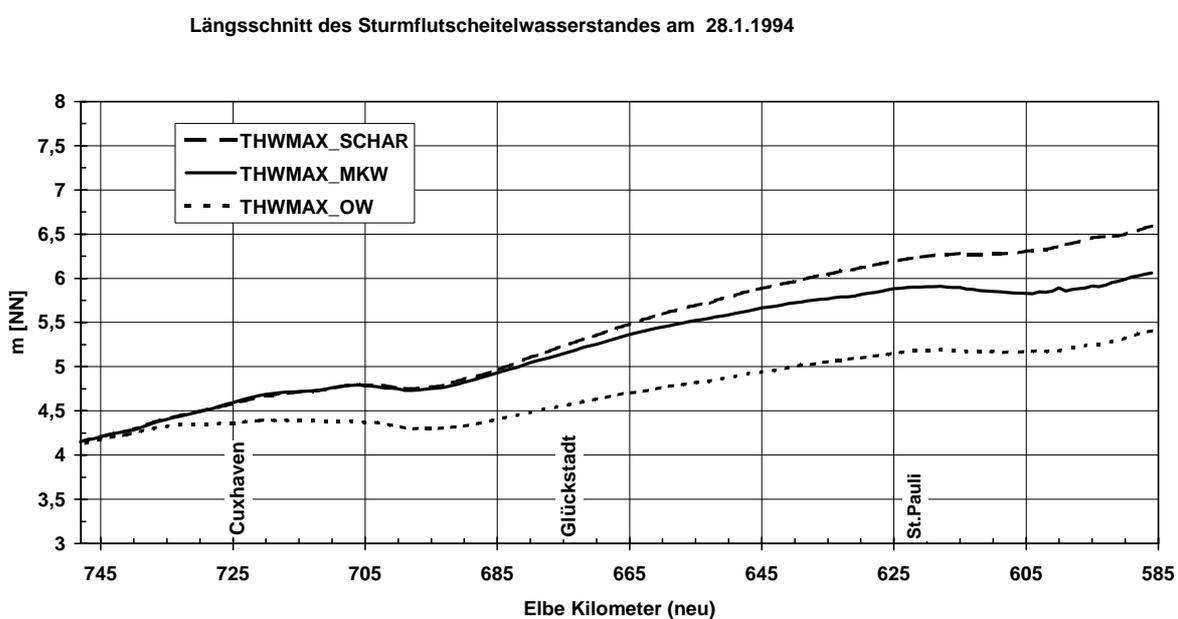


Abbildung 3.5: Sensitivitätsstudie Wind: Längsprofilardarstellung der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe von Scharhörn bis zum Wehr Geesthacht: schwarz: unter Berücksichtigung des MKW-Windfeldes; gestrichelt: unter Berücksichtigung des auf Scharhörn gemessenen Windes; gepunktet: ohne Windeinfluß

Vergleich mit Messungen

Im folgenden Abschnitt sollen die für die Sturmflut am 28.1.1994 modellierten Wasserstände mit den im gleichen Zeitraum gemessenen Wasserständen verglichen werden. Dies soll beispielhaft für zwei Pegel erfolgen.

Die Abbildung 3.6 auf der nächsten Seite und die Abbildung 3.7 auf Seite 33 zeigen die modellierten Wasserstände am Pegel Schulau und am Pegel St.Pauli im Vergleich zur Messung (blaue Kurve). Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Modell ergibt sich für den Referenzlauf. Dieser berücksichtigt die Sturmfluttopographie, den gemessenen Oberwasserabfluß und die mit MKW modellierten lokalen Windfelder.

Die Modelltopographie 1992 basiert auf den bis 1992 verfügbaren Peil- und Höhendaten. Streng genommen müßte die Sturmflut vom 28.1.1994 mit der zu diesem Zeitpunkt hydraulisch wirksamen Topographie gerechnet werden, um eine exakte Übereinstimmung zu ermöglichen. Da der zugehörige Topographiedatensatz 1994 nicht verfügbar ist, mußte im Sinne einer wasserbaulichen Systemanalyse die Sturmflutuntersuchung mit der Topographie 1992 durchgeführt werden.

Die Abweichungen im Wasserstand, besonders auch im Sturmflutscheitelwasserstand, zwischen Messung und Modell sind stets kleiner als 10 cm. Berechneter und gemessener Tidehub stimmen sehr gut überein. Auch die Phasenlage der berechneten Wasserstandszeitreihe stimmt gut mit der gemessenen Kurve überein. Hieraus ist zu schließen, daß die das hydrodynamische Modell der Elbe steuernden aus gemessenen Daten aufbereiteten Randwerte die Tidewelle entlang des seeseitigen Modellrandes gut beschreiben. Da die Ausbreitung und Verformung der Tidewelle vom seeseitigen Rand bis zu den Pegelstationen ebenfalls korrekt wiedergegeben wird, sind in der zugrunde liegenden Topographie die natürlichen Verhältnisse richtig erfaßt. Die charakteristischen Veränderungen, denen die Tidewelle entlang der Tideelbe unterliegt, werden vom Modell gut wiedergegeben. Dies bedeutet, daß die Größe der dem System Tideelbe zugeführten sowie der im System dissipierten, gespeicherten und zum Teil reflektierten Energie im richtigen Verhältnis zueinander wiedergegeben ist.

Abweichungen zwischen Modell und Messung können unterschiedliche Ursachen haben. Auch Messungen sind nur im Rahmen der Meßgenauigkeit ein exaktes Abbild der Natur. Unterschiedliche Meßwerte wie Windgeschwindigkeiten, Wasserstände an den Steuerpegeln etc. gehen als Randwerte in das Modell ein. Die Sensitivitätsstudie hat gezeigt, daß Variationen des Oberwassers oder der Überflutungsfläche Wasserstandsänderungen im cm-Bereich hervorrufen, während Variationen des Windes zu Wasserstandsänderungen im dm-Bereich führen können.

Es konnte gezeigt werden, daß auch im Falle der Modellierung von Sturmfluten Modell und Messung eine gute Übereinstimmung zeigen.

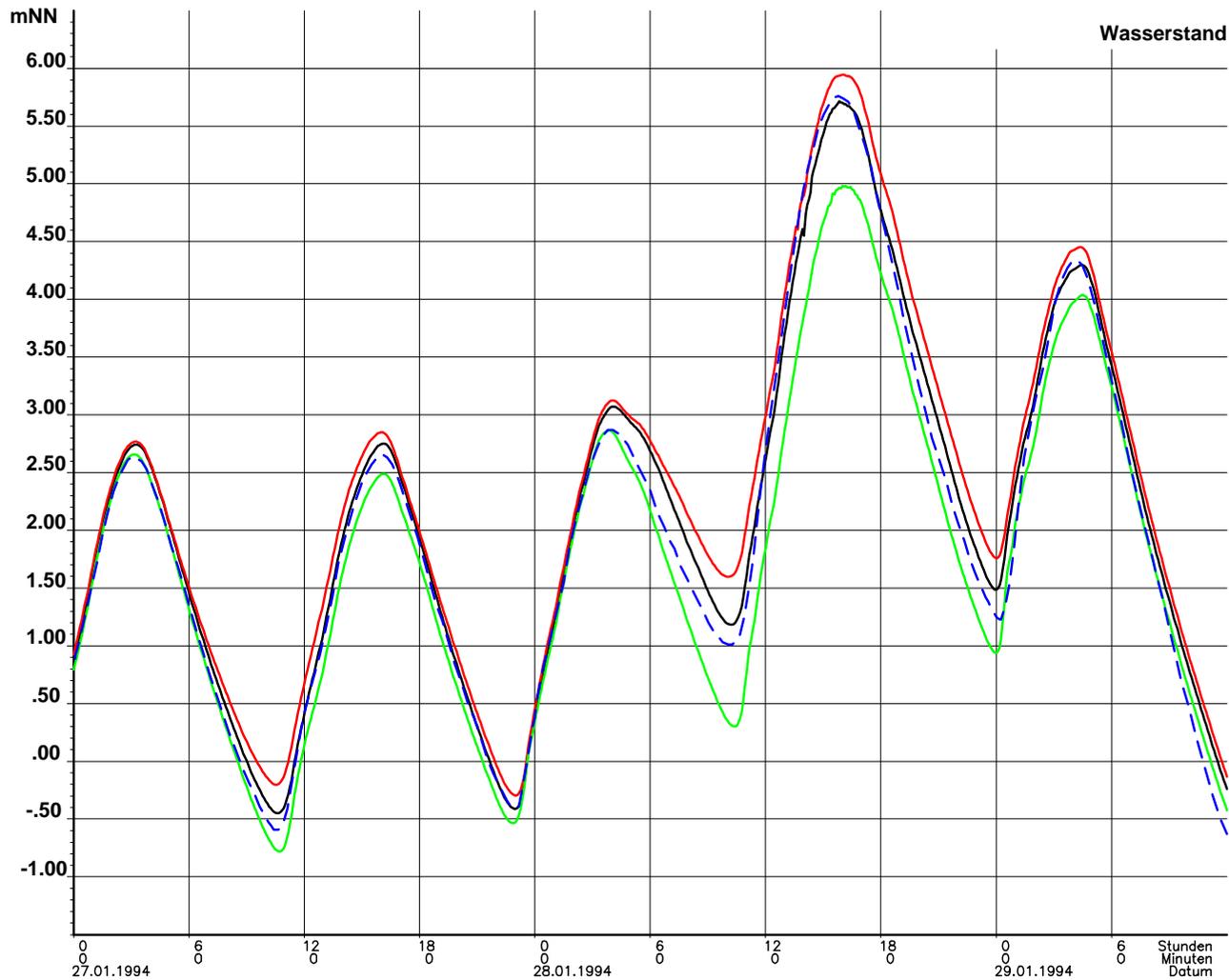


Abbildung 3.6: Wasserstand am Pegel Schulau. Dargestellt sind für den Zeitraum 27.1.-29.1.1994 die mit TRIM-2D berechneten Wasserstandszeitreihen am Pegel Schulau: schwarz: unter Berücksichtigung des MKW-Windfeldes; rot: unter Berücksichtigung des auf Scharhorn gemessenen Windes; grün: ohne Windeinfluß; blau: Pegelmessung

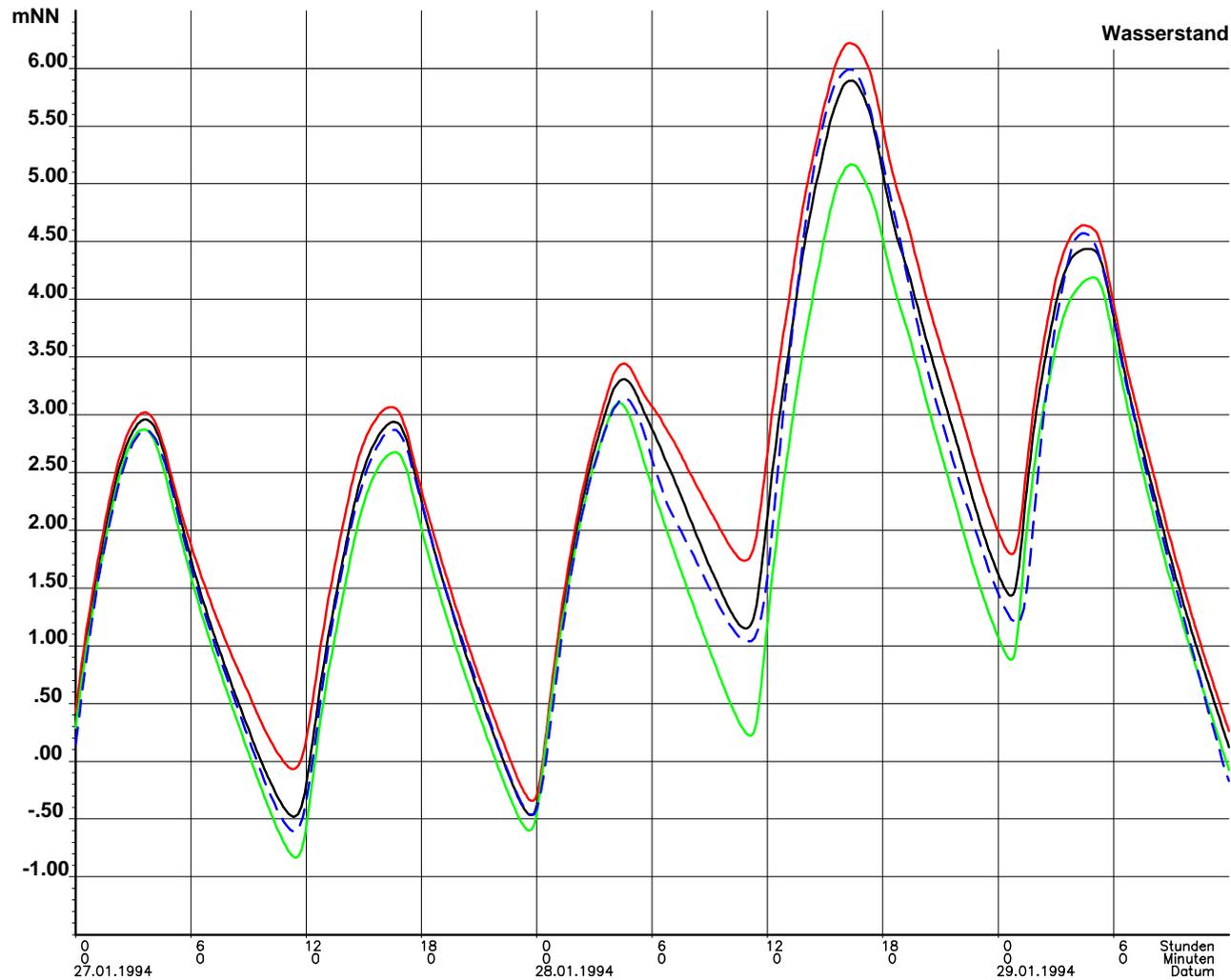


Abbildung 3.7: Wasserstand am Pegel St.Pauli. Dargestellt sind für den Zeitraum 27.1.-29.1.1994 die mit TRIM-2D berechneten Wasserstandszeitreihen am Pegel St.Pauli: schwarz: unter Berücksichtigung des MKW-Windfeldes; rot: unter Berücksichtigung des auf Scharhorn gemessenen Windes; grün: ohne Windeinfluß; blau: Pegelmessung

Sensitivität der ausbaubedingten Änderungen

Im Sturmflutfall ist der Sturmflutscheitelwasserstand die Kenngröße, deren ausbaubedingte Veränderung mit größtmöglicher Sicherheit vorhergesagt werden muß.

Im folgenden Abschnitt soll die Abhängigkeit der ausbaubedingten Änderungen vom Absolutwert der Sturmflutscheitelwasserstände betrachtet werden. Dafür werden die ausbaubedingten Veränderungen für zwei Sturmflutscheitelwasserstände, die sich um ± 10 cm unterscheiden, berechnet. Variationen dieser Größenordnung entsprechen ebenso der Meßgenauigkeit von Pegeln wie auch der maximal auftretenden Scheitelwasserstandsdifferenz zwischen Modell und Messung.

Für diese Untersuchung wurden zwei Modellläufe durchgeführt, zum einen der schon beschriebene sogenannte Referenzlauf und zum anderen ein Lauf mit verändertem Reibungsbeiwert. Der ursprüngliche Bodenreibungskoeffizient C_D liegt bei 0.00185 (vgl. auch Tabelle 3.5 auf Seite 21), der veränderte Koeffizient bei 0.00155.

Der Reibungsbeiwert parametrisiert die Energiedissipation im System Tideelbe. Ein Herabsetzen dieses Wertes erhöht die Energie im Elbeästuar und erzeugt somit höhere Wasserstände entlang des Elbeästuars. Abbildung 3.8 auf der nächsten Seite zeigt den Verlauf der Sturmflutscheitelwasserstände für beide Modellläufe entlang der Elbe von Km 748 bis Km 585. Man erkennt bis Km 700 keinen Unterschied zwischen den beiden Modellläufen. Stromauf von Glückstadt liegen auf Grund des niedrigeren Reibungsbeiwertes die Sturmflutscheitelwasserstände um ca 20 cm höher als beim Referenzlauf.

Die ausbaubedingten Änderungen sind in Abbildung 3.9 auf der nächsten Seite für beide Läufe dargestellt. Trotz der unterschiedlichen absoluten Wasserstände sind die ausbaubedingten Veränderungen entlang der Tideelbe gleich groß.

Variationen in den absoluten Sturmflutscheitelwasserständen im Bereich von ± 10 cm führen zu keinen signifikanten Variationen in den prognostizierten ausbaubedingten Änderungen.

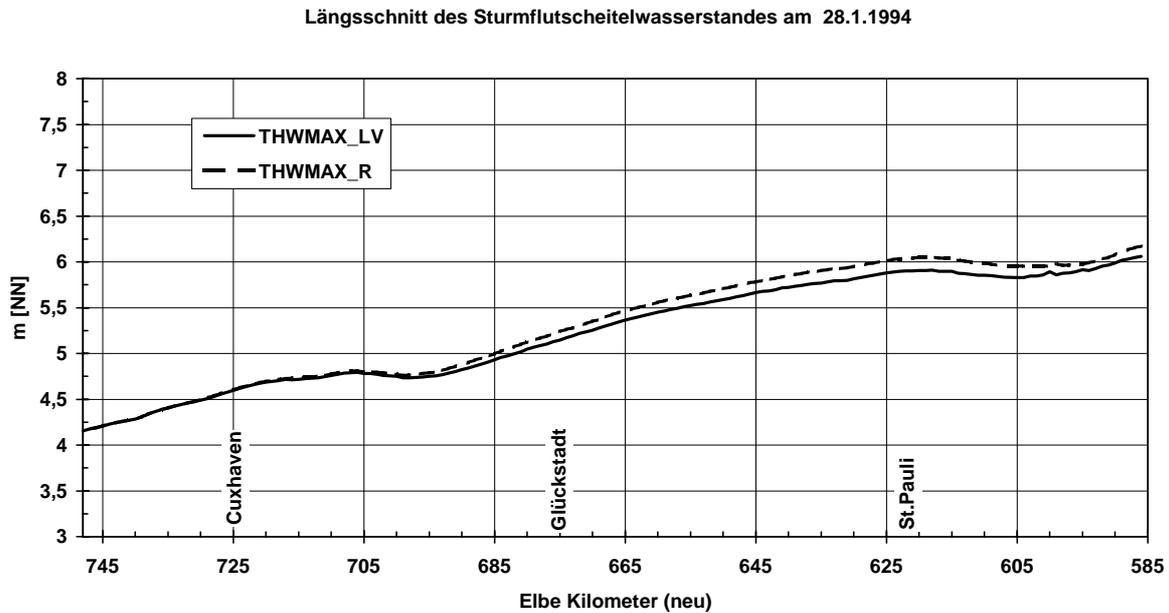


Abbildung 3.8: Längsprofilardarstellung der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe von Scharhörn bis zum Wehr Geesthacht: schwarz: Referenzlauf ($C_D=0.00185$); gestrichelt: mit verändertem Reibungsbeiwert ($C_D=0.00155$).

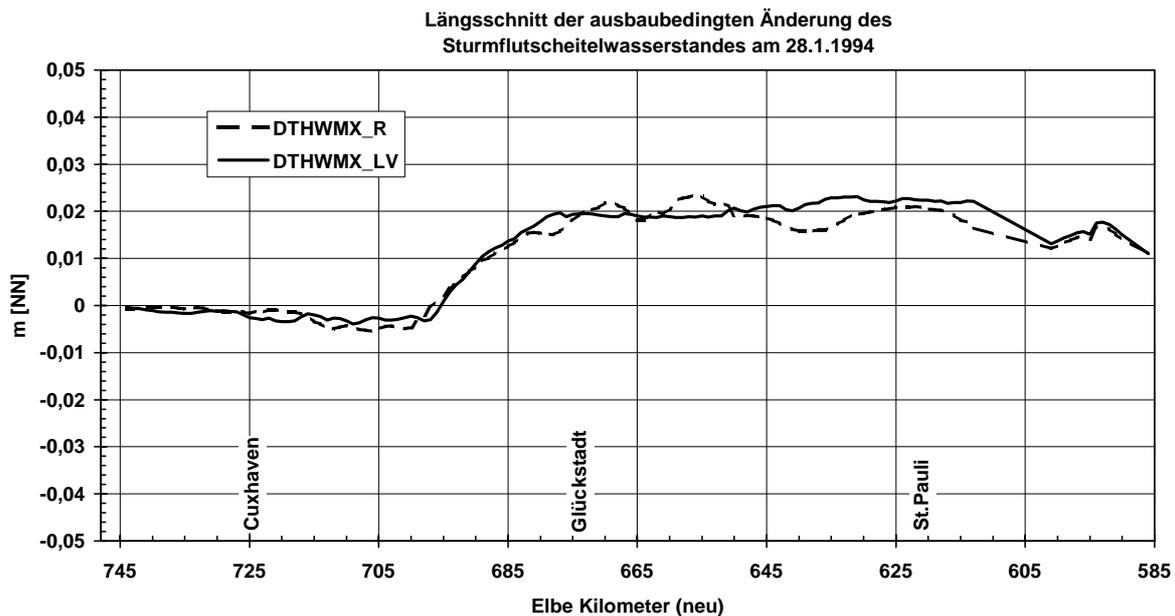


Abbildung 3.9: Längsprofilardarstellung der ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe von Scharhörn bis zum Wehr Geesthacht: schwarz: Referenzlauf ($C_D=0.00185$); gestrichelt: mit verändertem Reibungsbeiwert ($C_D=0.00155$).

4 Sturmflutszenarien

4.1 Zugrundeliegende historische und synthetische Sturmflutereignisse

Zur Ermittlung und Darstellung der ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngrößen sollen drei ausgewählte Sturmflutsituationen mit unterschiedlichem charakteristischen Verlauf untersucht werden.

Als zu untersuchende Ereignisse wurden die Sturmflut am 28.1.94 (als Sturmflut mit fülliger Windstaukurve), die Sturmflut am 3.1.76 (als Sturmflut mit steiler Windstaukurve) und die Bemessungssturmflut 2085A durch den Untersuchungsrahmen (vgl. Planungsgruppe Ökologie und Umwelt, 1993) festgelegt. Weiterhin wurde festgelegt, daß alle Untersuchungen für den IST-Zustand, d.h. mit einer Topographie, die den Stand 1992 repräsentiert, durchgeführt werden.

4.1.1 Sturmflut am 3.1.1976

Am 3.1.76 entwickelte sich aus einer Atlantischen Störung nach kurzem Zwischenhocheinfluß über der Nordsee ein Orkantief mit einem Kerndruck von weniger als 970 hPa, das südostwärts abzog. In den Morgenstunden des 3.1.1976 herrschte im Bereich der Deutschen Bucht Sturm aus südlichen Richtungen mit Stärken von 8 Bft. Er drehte bis zum Mittag auf westliche Richtungen und nahm auf 10 bis 11 Bft, in Böen 12 Bft zu. So verzeichnete Cuxhaven um 9 Uhr Westwind mit 8 Bft (in Böen 12 Bft), um 12 Uhr Westwind mit 9 Bft (in Böen 12 Bft) und um 12 Uhr Westnordwestwind der Stärke 7 Bft (in Böen 12 Bft). Die Windstärke betrug bis in den späten Abend 7 bis 8 Bft. Auch zu diesem Zeitpunkt wurden noch Orkanböen verzeichnet.

Diese meteorologische Situation bedingte am 3.1.1976 im Bereich der Deutschen Bucht und des Elbegebietes eine sehr schwere Sturmflut. Die durch diese Sturmflut hervorgerufenen Wasserstände lagen im Unterelbegebiet höher als die bei der Sturmflut am 16./17.2.1962 erreichten. Die Elbdeiche waren durch die extreme Höhe des Wasserstandes und den Wellenangriff besonderen Belastungen ausgesetzt. An der Elbe traten Deichbrüche größeren Ausmaßes an der Deichlinie bei Krautsand und im Bereich der Haseldorfer Marsch auf (vgl. hierzu auch Heerten und Partensky, 1977). In diesen Bereichen war die nach der Sturmflut von 1962 empfohlene Verstärkung und der Neubau von Deichen noch nicht abgeschlossen.

Nach einer Analyse der Sturmflut vom 3.1.1976 führten Heerten und Partensky, 1977 die sehr hohen Wasserstände in der Unterelbe auf die ungewöhnlich lange Winddauer mit Windstärken über 10 Bft zurück. Dadurch wurde das Abfließen des Wassers während der Ebephase am Morgen des 3.1.1976 verhindert.

Der Oberwasserzufluß lag Anfang Januar 1976 bei ca 500 m³/s (langjähriger Mittelwert: 727 m³/s).

Die Sturmflut vom 3.1.1976 wurde als charakteristisches Beispiel für Sturmflut mit steiler Windstaukurve ausgewählt. Diese Sturmflut ist von einer maximalen Windstauhöhe am

Pegel Cuxhaven von 4.15 m gekennzeichnet, die etwa zum Zeitpunkt des astronomischen Niedrigwassers nach einem sehr raschen Anstieg des Windstaus erreicht wurde. Noch rund sechs Stunden zuvor war die Windstauhöhe = 0. Der darauf folgende Anstieg des Windstaus in Cuxhaven betrug über mehrere Stunden mehr als 100 cm/h (steile Windstaukurve). Ein zweites sekundäres Maximum des Windstaus trat mit 3.65 m genau zur Zeit des astronomischen Tideniedrigwassers in Cuxhaven auf.

4.1.2 Sturmflut am 28.1.1994

Am 28.1.1994 kam es im Bereich der Deutschen Bucht und des Elbegebiets zu einer schweren Sturmflut. Diesem Ereignis war ein durch ergiebige Niederschläge im Elbeeinzugsgebiet gekennzeichnete Herbst und Winter vorausgegangen. Die Elbe hatte hohe Oberwasserabflüsse mit einem Maximalwert von 2095 m³/s am 3.1.1994 (langjähriges Mittel: 727 m³/s). Anschließend fielen die Wasserstände am Pegel Neu Darchau wieder und erreichten am 28.1.1994 mit einem Oberwasserzufluß von 1350 m³/s den niedrigsten Wert, um dann wieder auf Werte von 1600 m³/s zu steigen. Bei Abflüssen > 1100 m³/s ist das Wehr Geesthacht gelegt. Die Tidewelle kann in den Stauraum des Wehres Geesthacht einlaufen (vgl. hierzu auch WSA-HH, 1994).

Die Sturmflutsituation am Nachmittag des 28.1.1994 wurde durch einen langanhaltenden Nordweststurm über der Nordsee hervorgerufen. Über der Deutschen Bucht wehte während des ganzen Tages anfangs ein westnordwestlicher, später nordwestlicher Wind der Stärke 8 bis 9 Bft mit Böen von 11 vereinzelt 12 Bft. Der Höhepunkt der Sturmentwicklung wurde nachmittags zwischen 12 Uhr und 17 Uhr erreicht. So lag der Höhepunkt des Sturms bei Helgoland gegen 15 Uhr, bei Cuxhaven gegen 16 Uhr. Zum Abend hin nahmen die Windgeschwindigkeiten etwas ab, behielten aber bis nach Mitternacht Windgeschwindigkeiten von 7 bis 8 Bft bei (siehe auch Anlage 1 in WSA-HH, 1994).

Obwohl die Windgeschwindigkeiten in der Deutschen Bucht keine Orkanstärke erreichten, wurden am Pegel St.Pauli die nach dem 3.1.1976 höchsten Wasserstände gemessen (3.1.1976: 6.45 m NN, 28.1.1994: 6.02 m NN). Aufgrund des hohen Oberwassers der Elbe wurden oberhalb von Zollenspieker die bislang höchsten gemessenen Tidehochwasserstände erreicht bzw. überschritten.

Die Sturmflut vom 28.1.1994 wurde als charakteristisches Beispiel einer Sturmflut mit fülliger Windstaukurve gewählt. Der maximale Windstau in Cuxhaven betrug bei dieser Sturmflut lediglich 3.10 m. Kennzeichnend für diese Sturmflut ist, daß dieses Windstau-niveau mehrere Stunden lang anhielt. Am 28.1.1994 war am Pegel Cuxhaven rund neun Stunden lang ein Windstau von ca. 3.00 m zu verzeichnen (füllige Windstaukurve). Dieses Windstau-niveau wurde nach einem eher allmählichen Anstieg erreicht. Die Anstiegsgeschwindigkeit betrug im Mittel rund 40 cm/h und war somit nicht einmal halb so groß wie bei der Sturmtide vom 3.1.1976.

4.1.3 Bemessungssturmflut 2085A

Der Bemessungswasserstand ist der für einen vorgegebenen Zeitraum zu erwartende höchste Wasserstand, auf den eine Hochwasserschutzanlage zu bemessen ist. Das Verfahren zur Festlegung der Bemessungswasserstände der Tideelbe wurde in einem Bericht der Länderarbeitsgruppe, 1988 festgelegt. Es besteht aus folgenden Schritten:

- Bestimmung einer maßgebenden Sturmflut für Cuxhaven
- Modelluntersuchungen für die Elbe mit dieser Sturmflutkurve, Ergebnis ist der maßgebende Sturmflutablauf in der Elbe
- daraus Festlegung der Scheitelwerte (HThw) für jeden Ort als Bemessungswasserstände
- Bestimmung des zeitlichen und örtlichen Ablaufes der maßgebenden Sturmflut aus den Kurven

Die Bemessungssturmflut 2085A ist eine synthetische Sturmflut, die sich in ihrem Verlauf an die Sturmflut am 3.1.1976 anlehnt. Auf die mittlere Tidekurve Cuxhaven wurde die um ca 0.5 m erhöhte Windstaukurve der Sturmflut vom 3.1.1976 addiert.

Die maßgebende Sturmflutkurve ergibt sich also aus der Addition der mittleren Tidekurve und einer extremen Windstaukurve. Der Stau für eine maßgebende Windstaukurve wurde laut Länderarbeitsgruppe, 1988 folgendermaßen festgelegt:

- maximaler Stau um MTnw: 430 cm
- maximaler Stau um MThw: 385 cm

Das Oberwasserzufluß der Elbe ist auf 2200 m³/s festgelegt.

Die Bemessungswasserstände der Tideelbe wurden dann entsprechend der oben genannten im Bericht der Länderarbeitsgruppe, 1988 festgelegten Tide-, Wind- und Stauwerte für Cuxhaven und den Oberwasserwerten durch Modellrechnungen (vgl. hierzu auch Siefert und Havnø, 1989) bestimmt.

Für die numerische Modellierung der Bemessungssturmflut 2085A im Rahmen der in diesem Gutachten vorgestellten Untersuchungen wurde von Strom- und Hafenbau Hamburg die maßgebende Sturmflutkurve für Cuxhaven zur Verfügung gestellt. Die Entwicklung des Windes wurde wie folgt vorgegeben:

- 1.1. Windstille (1.1.1976: Ostwind)
- 2.1.-4.1. Windrichtung wie 1976,
jedoch Erhöhen der Geschwindigkeit um 10 %

Die Datumsangabe hat bei dieser synthetischen Sturmflut keine Bedeutung. Sie deutet lediglich auf die Ähnlichkeit zur Sturmflut am 3.1.1976 hin.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den mit dem Modell TRIM-2D durchgeführten Modellläufen vorgestellt. Es wurden wie in Kapitel 2 beschrieben drei in ihrem Verlauf unterschiedliche Sturmfluten untersucht.

Diese drei Sturmfluttypen wurden zum einen unter Berücksichtigung der Elbe-Topographie mit Stand 1992 (IST92) und zum andern unter Berücksichtigung der Ausbautopographie einschließlich morphologischem Nachlauf (vgl. Kapitel 3.4.1 und 3.4.2) modelliert.

In den folgenden Abschnitten werden die ausbaubedingten Veränderungen der Sturmflutkenngrößen gezeigt. Die einzelnen Sturmflutszenarien werden z.T. abgekürzt mit SF76 (Sturmflut 3.1.1976), SF94 (Sturmflut 28.1.1994) und SFB (Bemessungssturmflut).

5.1 Wasserstände

5.1.1 Scheitelwasserstände, Eintrittszeiten

Für die drei Sturmflutszenarien werden die Wasserstände an ausgewählten Pegeln, Brunsbüttel (Elbe-Km 696.5) und St.Pauli (Elbe Km 623.1 N), dargestellt. In schwarz ist die Entwicklung des Wasserstandes unter Berücksichtigung der IST92-Topographie und in rot die Entwicklung unter Berücksichtigung der Ausbautopographie dargestellt. Die blaue Kurve zeigt die an den jeweiligen Pegeln gemessenen Wasserstände.

- *Sturmflut 1976*

In Abbildung 5.1 auf Seite 41 und Abbildung 5.2 auf Seite 42 sind die Wasserstände für den Zeitraum 2.1.1976 00:00 Uhr bis 4.1.1976 12:00 Uhr dargestellt. Man erkennt deutlich den Anstieg des Wasserstandes am frühen Morgen des 3.1.1976. Das Vormittagshochwasser wurde gegen 5:00 Uhr in Brunsbüttel und gegen 8:00 Uhr in St.Pauli erreicht. Danach fiel der Wasserstand für ca. 90 Minuten, um dann wieder anzusteigen. Der Sturmflutscheitelwasserstand wurde in Brunsbüttel gegen 14:30 Uhr und in St.Pauli gegen 17:00 Uhr erreicht. Bis auf die 90-minütige Unterbrechung dauerte die Flutphase an diesem Tag 16 Stunden, was zu extrem hohen Wasserständen entlang der gesamten Tideelbe führt. Während dieser 16 Stunden stieg der Wasserstand in Brunsbüttel um 6.50 m und in St.Pauli um 8.00 m.

Der Vergleich zwischen der Rechnung mit IST92-Topographie und der mit Ausbautopographie zeigt ausbaubedingte Veränderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes im Bereich von Brunsbüttel deutlich kleiner 1 cm (vgl. hierzu auch Abbildung 5.8 auf Seite 48). Die rote und die schwarze Kurve sind in der Graphik nicht voneinander zu unterscheiden. Die Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes ist kleiner als 1 Minute. Für St.Pauli ergeben sich ausbaubedingte Veränderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes von 1 cm (vgl. hierzu auch Abbildung 5.8). Durch ausbaubedingte Veränderungen tritt der Sturmflutscheitelwasserstand 2 Minuten früher ein.

- *Sturmflut 1994*

In Abbildung 5.3 auf Seite 43 und Abbildung 5.4 auf Seite 44 sind die Wasserstände für den Zeitraum 27.1.1994 00:00 Uhr bis 29.1.1994 12:00 Uhr dargestellt.

Am frühen Morgen des 28.1.1994 wurde das Hochwasser gegen 2:00 Uhr in Brunsbüttel und gegen 4:30 Uhr in St.Pauli erreicht. Danach fiel der Wasserstand für ca. 6 Stunden wieder, erreichte aber in Brunsbüttel nur einen Wasserstand von ca 1.00 m ü.NN (St.Pauli: 1.10 m ü.NN) im Gegensatz zu -0.5 m ü.NN (St.Pauli: -0.5 m ü.NN) bei den Niedrigwassern am 27.1.1994. Anschließend stieg der Wasserstand wieder und zwar in Brunsbüttel um mehr als 3.80 m und in St.Pauli um mehr als 4.80 m in 6 Stunden. Der Sturmflutscheitelwasserstand wurde in Brunsbüttel gegen 14:00 Uhr und in St.Pauli gegen 16:00 Uhr erreicht.

Der Vergleich zwischen der Rechnung mit IST92-Topographie und Ausbautopographie zeigt ausbaubedingte Veränderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes im Bereich von Brunsbüttel deutlich kleiner 1 cm (vgl. hierzu auch Abbildung 5.8 auf Seite 48). Durch ausbaubedingte Veränderungen tritt der Sturmflutscheitelwasserstand 3 Minuten früher ein. Für St.Pauli ergeben sich ausbaubedingte Veränderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes von 2.5 cm (vgl. hierzu auch Abbildung 5.8). Durch ausbaubedingte Veränderungen tritt der Sturmflutscheitelwasserstand 4 Minuten früher ein.

- *Bemessungssturmflut*

In Abbildung 5.5 auf Seite 46 und Abbildung 5.6 auf Seite 47 sind die Wasserstände für den Zeitraum 2.1. 00:00 Uhr bis 4.1. 12:00 Uhr dargestellt. Die blaue Kurve zeigt in diesen Abbildungen die Wasserstände der vom Dänisch Hydraulischen Institut mit dem 1-dimensionalen Modell SYSTEM11 modellierten Bemessungssturmflut am Pegel Brunsbüttel und St.Pauli (vgl. auch Siefert und Havnø, 1989).

Man erkennt deutlich die Ähnlichkeit zum Verlauf des Wasserstandes während der Sturmflut 3.1.1976. Das Hochwasser wurde in Brunsbüttel gegen 4:30 Uhr und in St.Pauli gegen 6:30 Uhr erreicht. Danach fiel der Wasserstand für ca. 2 Stunden, um dann wieder anzusteigen. Der Sturmflutscheitelwasserstand wurde in Brunsbüttel gegen 15:00 Uhr und in St.Pauli gegen 16:45 Uhr erreicht. Bis auf die 2-stündige Unterbrechung dauerte die Flutphase für diesen synthetischen Fall 18 Stunden, was zu extrem hohen Wasserständen entlang der gesamten Tideelbe führte.

Der Vergleich zwischen der Rechnung mit IST92-Topographie und Ausbautopographie zeigt ausbaubedingte Veränderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes im Bereich von Brunsbüttel deutlich kleiner 1 cm und im Bereich von St.Pauli von 1 cm (vgl. hierzu auch Abbildung 5.8 auf Seite 48). Die Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes ist in Brunsbüttel kleiner als 1 Minute. Durch ausbaubedingte Veränderungen tritt der Sturmflutscheitelwasserstand in St.Pauli 2 Minuten früher ein.

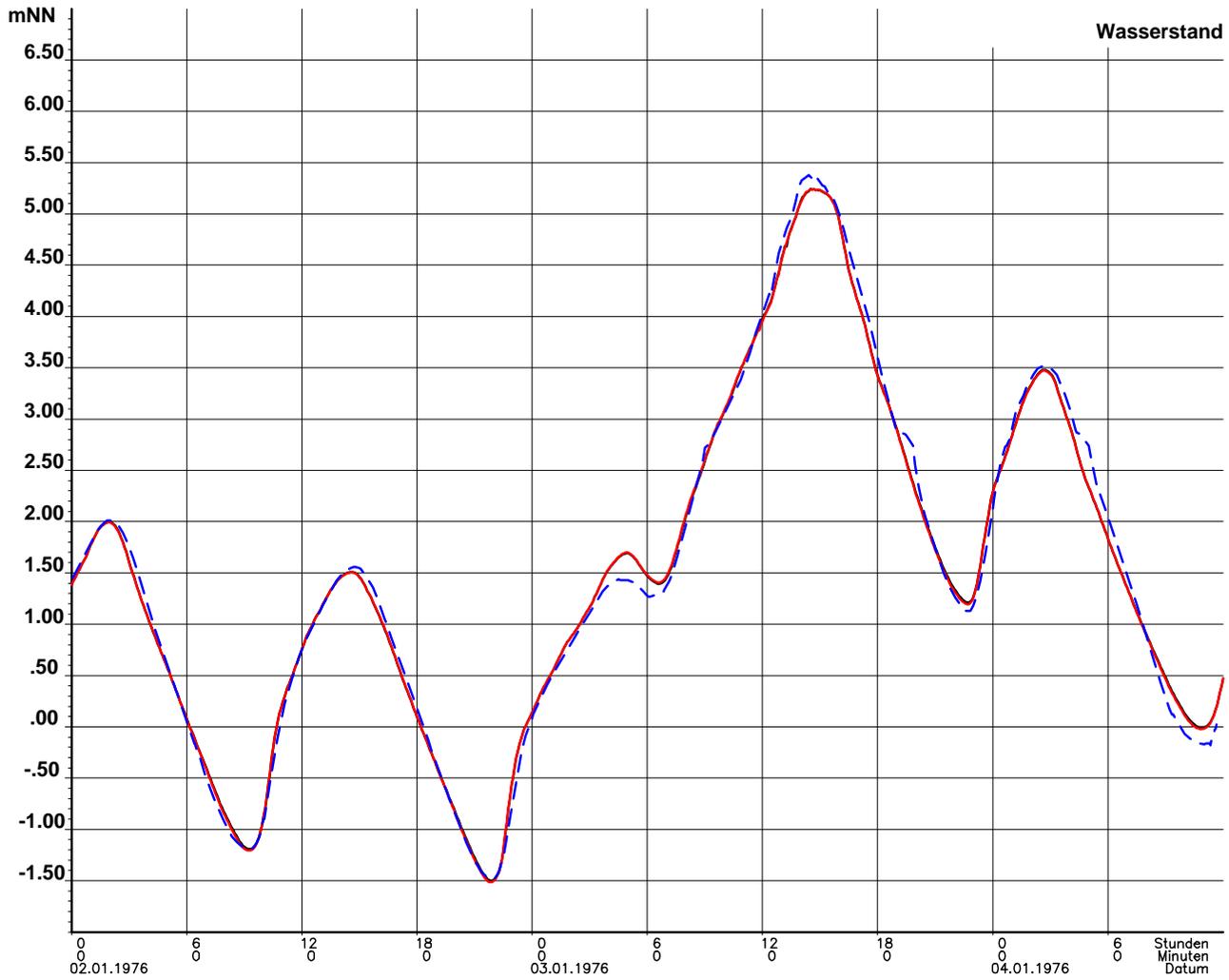


Abbildung 5.1: Wasserstand am Pegel Brunsbüttel für den Zeitraum 2.1.1976 bis 4.1.1976: schwarz: IST92-Topographie (Modellrechnung); rot: Ausbauto-pographie (Modellrechnung); blau: Pegelmessung

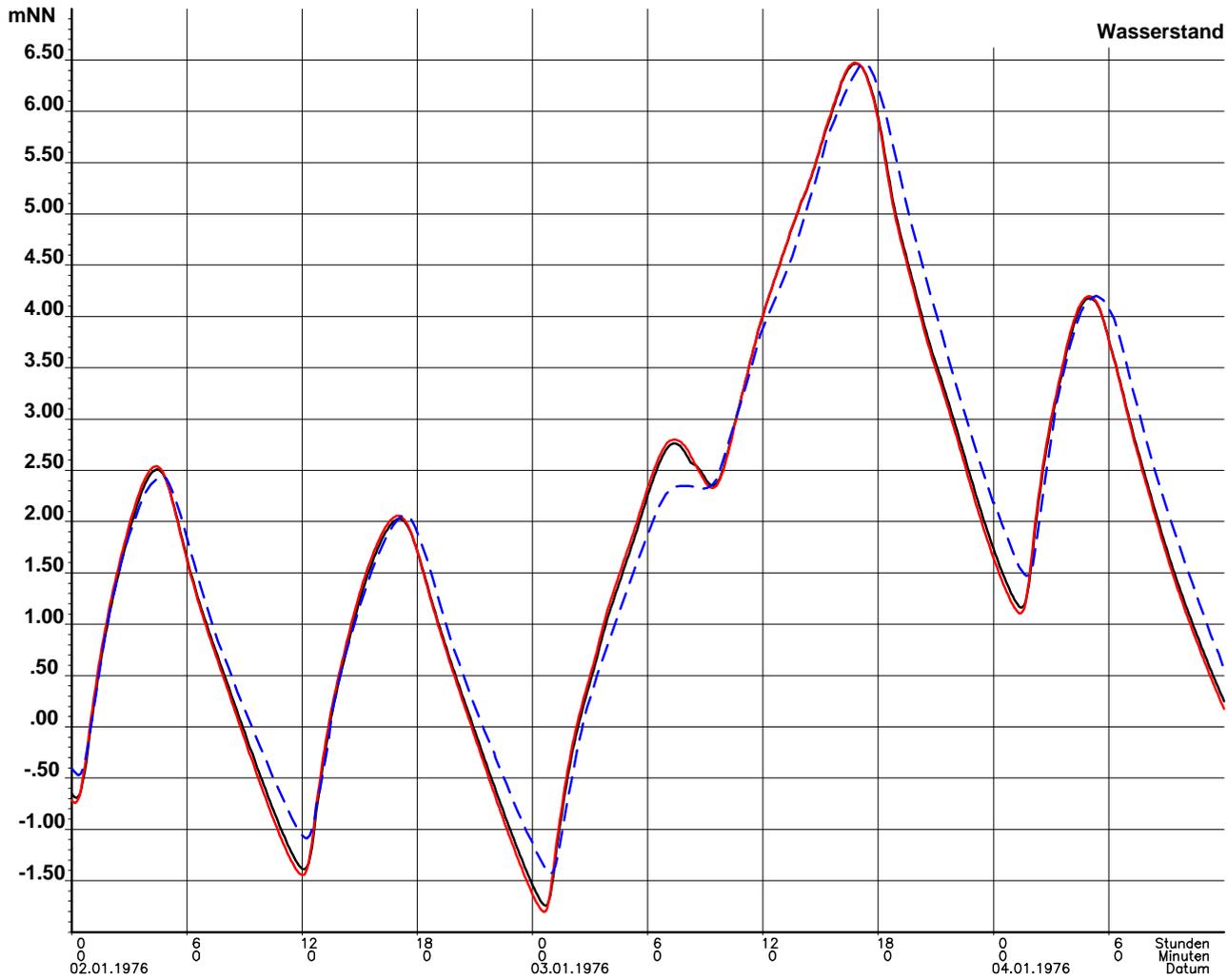


Abbildung 5.2: Wasserstand am Pegel St.Pauli für den Zeitraum 2.1.1976 bis 4.1.1976: schwarz: IST92-Topographie (Modellrechnung); rot: Ausbautopographie (Modellrechnung); blau: Pegelmessung

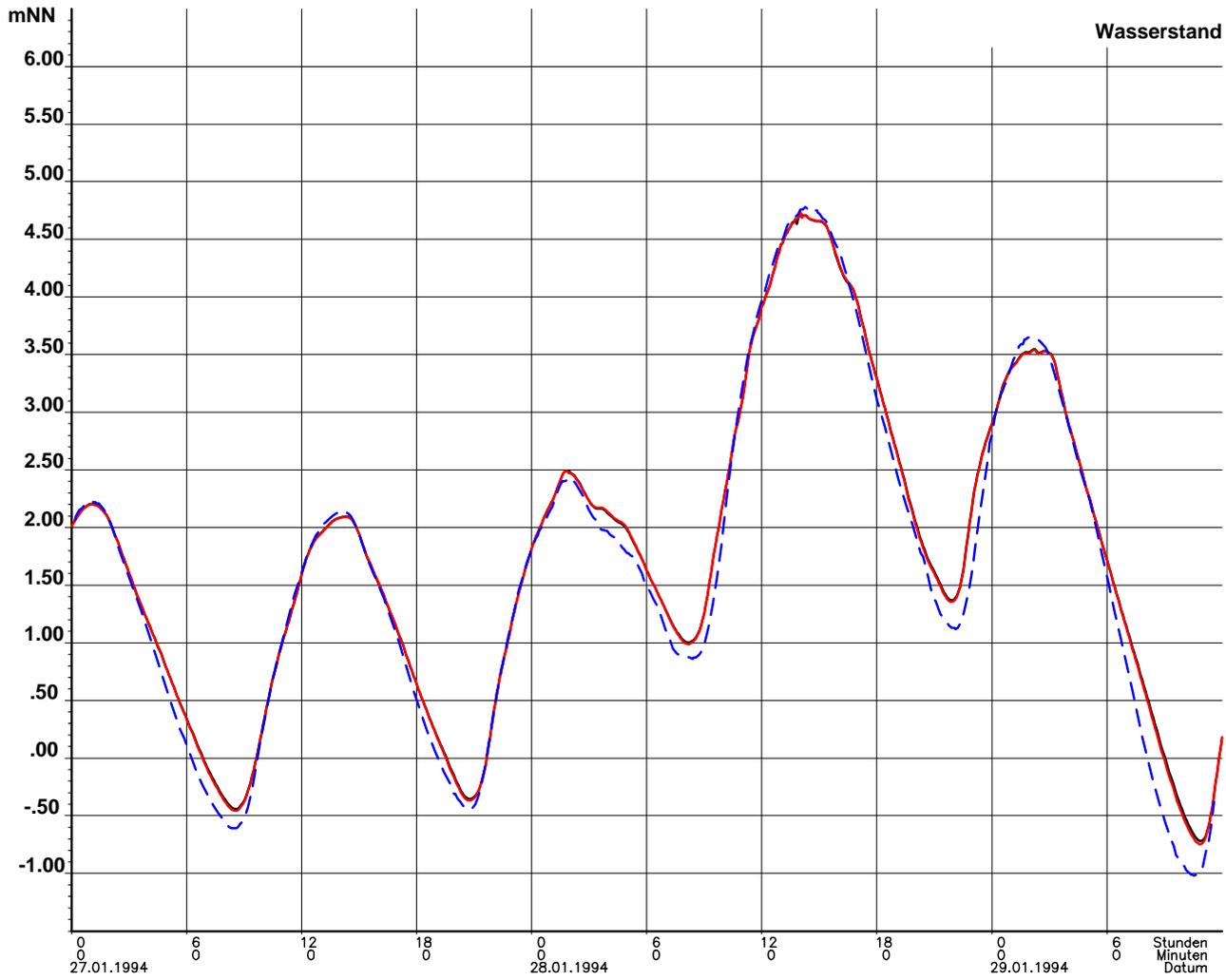


Abbildung 5.3: Wasserstand am Pegel Brunsbüttel für den Zeitraum 27.1.1994 bis 29.1.1994: schwarz: IST92-Topographie (Modellrechnung); rot: Ausbautopographie (Modellrechnung); blau: Pegelmessung

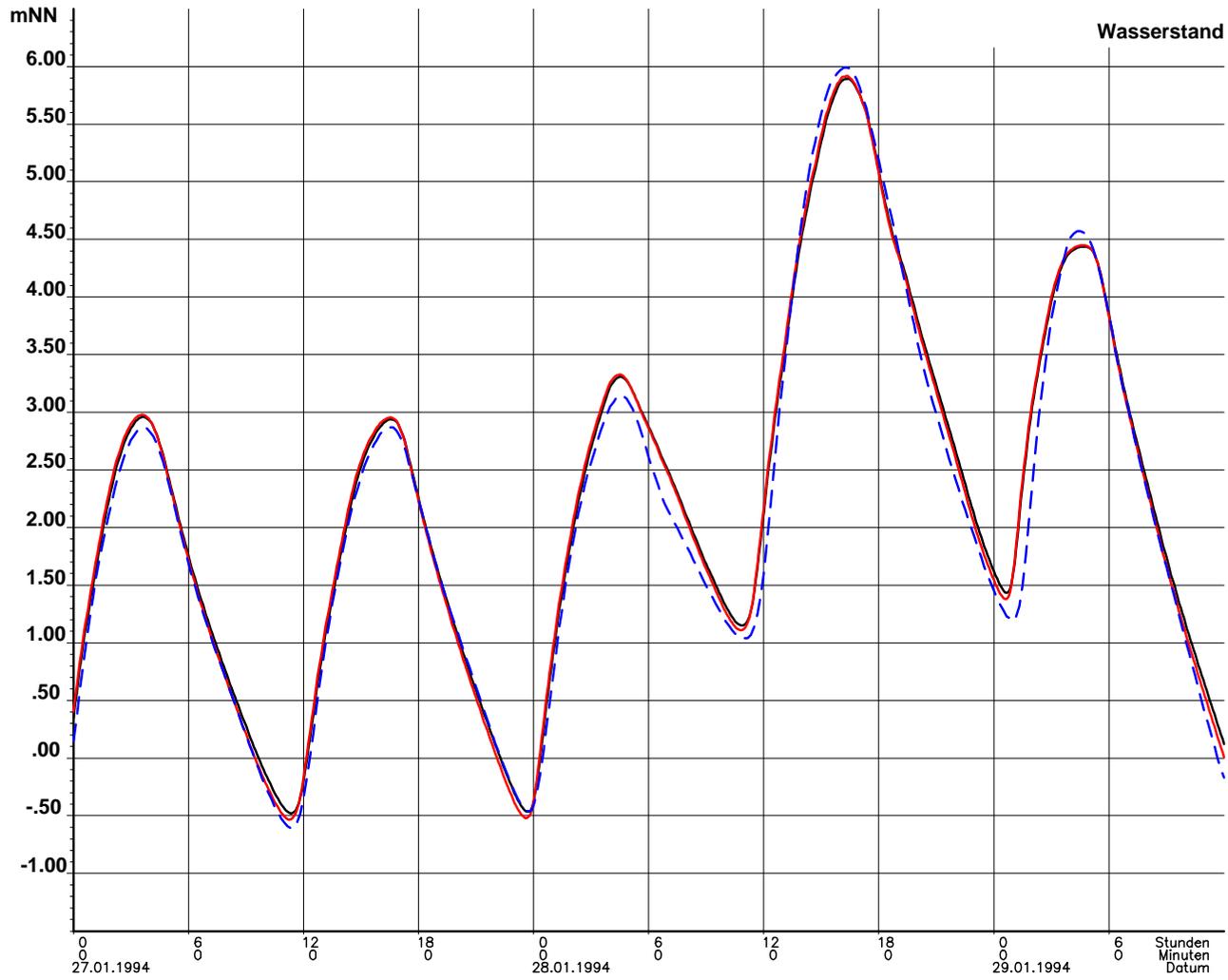


Abbildung 5.4: Wasserstand am Pegel St. Pauli für den Zeitraum 27.1.1994 bis 29.1.1994: schwarz: IST92-Topographie (Modellrechnung); rot: Ausbautopographie (Modellrechnung); blau: Pegelmessung

- *Vergleich*

Die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe von Km 745 (\approx Scharhörn) bis Km 585 (\approx Wehr Geesthacht) sind in Abbildung 5.7 auf Seite 48 für die drei betrachteten Sturmfluttypen aufgetragen. Die höchsten Wasserstände werden von der synthetischen Bemessungssturmflut und die niedrigsten von der Sturmflut am 28.1.1994 erreicht.

Abbildung 5.8 auf Seite 48 zeigt die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände für die drei betrachteten Sturmfluttypen.

Von Scharhörn bis in den Bereich von Brunsbüttel sind die ausbaubedingten Änderungen für diese drei untersuchten Sturmfluttypen deutlich kleiner als 1 cm. Die größten ausbaubedingten Änderungen ergeben sich für die Sturmflut am 28.1.1994, die die niedrigsten absoluten Sturmflutscheitelwasserstände hat (vgl. Abbildung 5.7 auf Seite 48). Für den Bereich zwischen Glückstadt und Bunthaus ergeben sich bis zu 2.5 cm, während für die Sturmfluten mit höheren absoluten Wasserständen in diesem Bereich nur ausbaubedingte Veränderungen von 1 cm berechnet werden. Man erkennt deutlich, daß die ausbaubedingten Veränderungen mit größerem absolutem Wasserstand abnehmen. Die relative Änderung des hydraulisch wirksamen Fließquerschnittes ist bei gleicher Ausbaumaßnahme bei hohen absoluten Wasserständen kleiner. Dies führt zu kleineren ausbaubedingten Änderungen bei Systemzuständen mit höheren Wasserständen. Für Spring-Nipp-Zeiträume mit normalen Tidewasserständen werden zum Vergleich ausbaubedingte Veränderungen im Tidehochwasser von bis zu 4 cm erwartet.

Die ausbaubedingten Änderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes wurden für die drei Sturmfluttypen in Richtung Oberstrom bis Bleckede untersucht. Zwischen Geesthacht und Bleckede ergeben sich Änderungen im Bereich von -2 cm (Sturmflut 3.1.76), -0.2 cm (Bemessungssturmflut) sowie +1 cm (Sturmflut 28.1.1994). Es ist jedoch zu bedenken, daß für das Gebiet der Mittel- und Unterelbe das Bemessungshochwasser nicht durch Sturmfluten, sondern durch extrem hohe Oberwasserabflüsse definiert wird. So wird für diesen Bereich ein Bemessungshochwasser zugrunde gelegt, das in der Form der Hochwasserwelle von 1920 gleicht und einen Scheitelabfluß von $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ bei einem Wasserstand von NN+24.11 m am Pegel Wittenberge erreicht (vgl. hierzu Wasserwirtschaftsamt Lüneburg, 1983).

Die ausbaubedingte Vertiefung der Fahrrinne führt zu einer Erhöhung der Tidewellenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Die Sturmflutscheitelwasserstände treten früher ein. So liegen die ausbaubedingten Veränderungen der Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände für die Bemessungssturmflut und die Sturmflut mit steiler Windstaukurve (3.1.1976) bei weniger als 3 Minuten, für die Sturmflut mit fülliger Windstaukurve (28.1.1994) bei weniger als 5 Minuten. Auch hier zeigt sich, daß die ausbaubedingten Änderungen mit zunehmendem absoluten Wasserstand abnehmen.

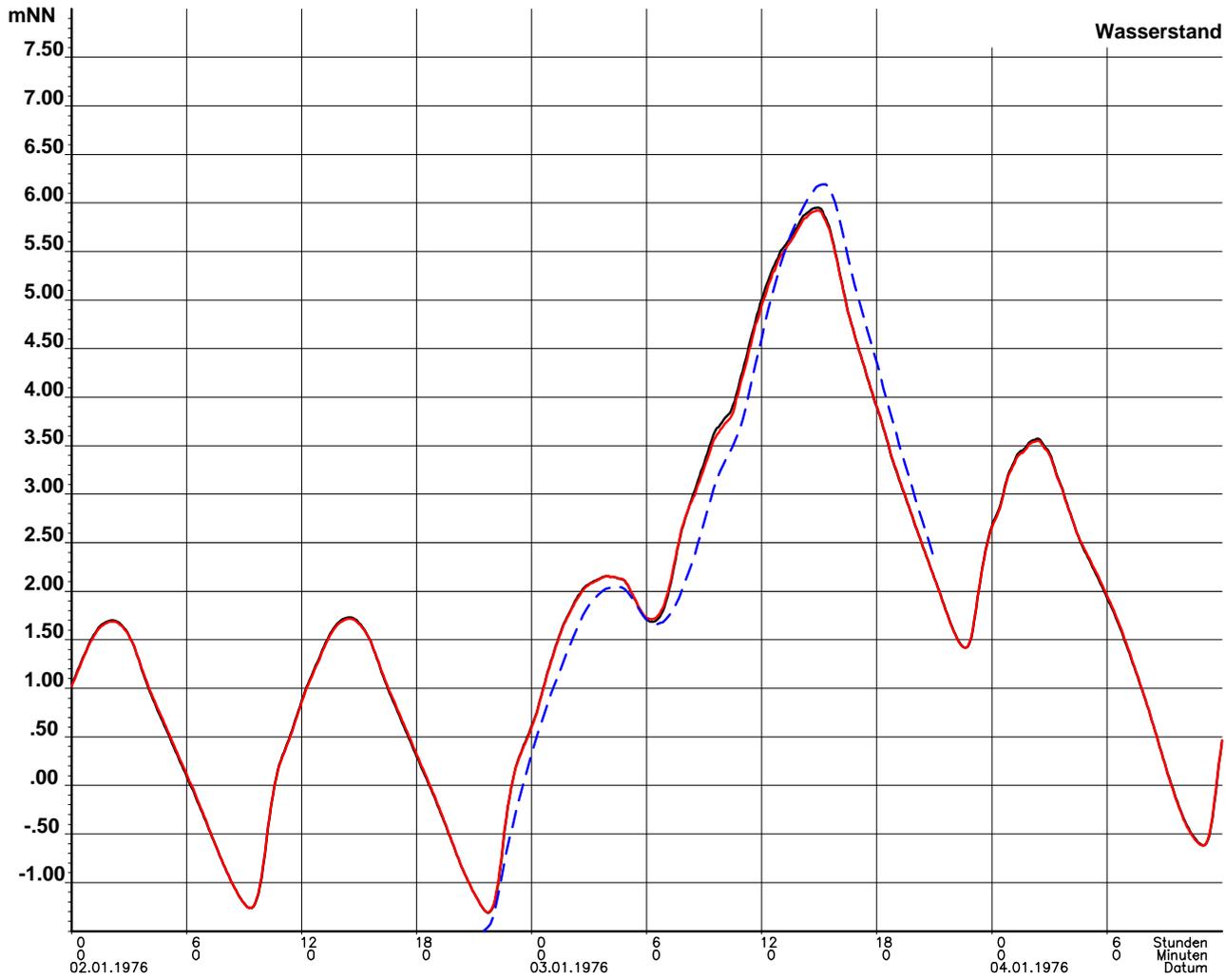


Abbildung 5.5: Wasserstand am Pegel Brunsbüttel für den Zeitraum 2.1. bis 4.1.: schwarz: IST92-Topographie (Modellrechnung); rot: Ausbautopographie (Modellrechnung); blau: Bemessungssturmflut Wasserstand am Knoten 85 (Modellrechnung).

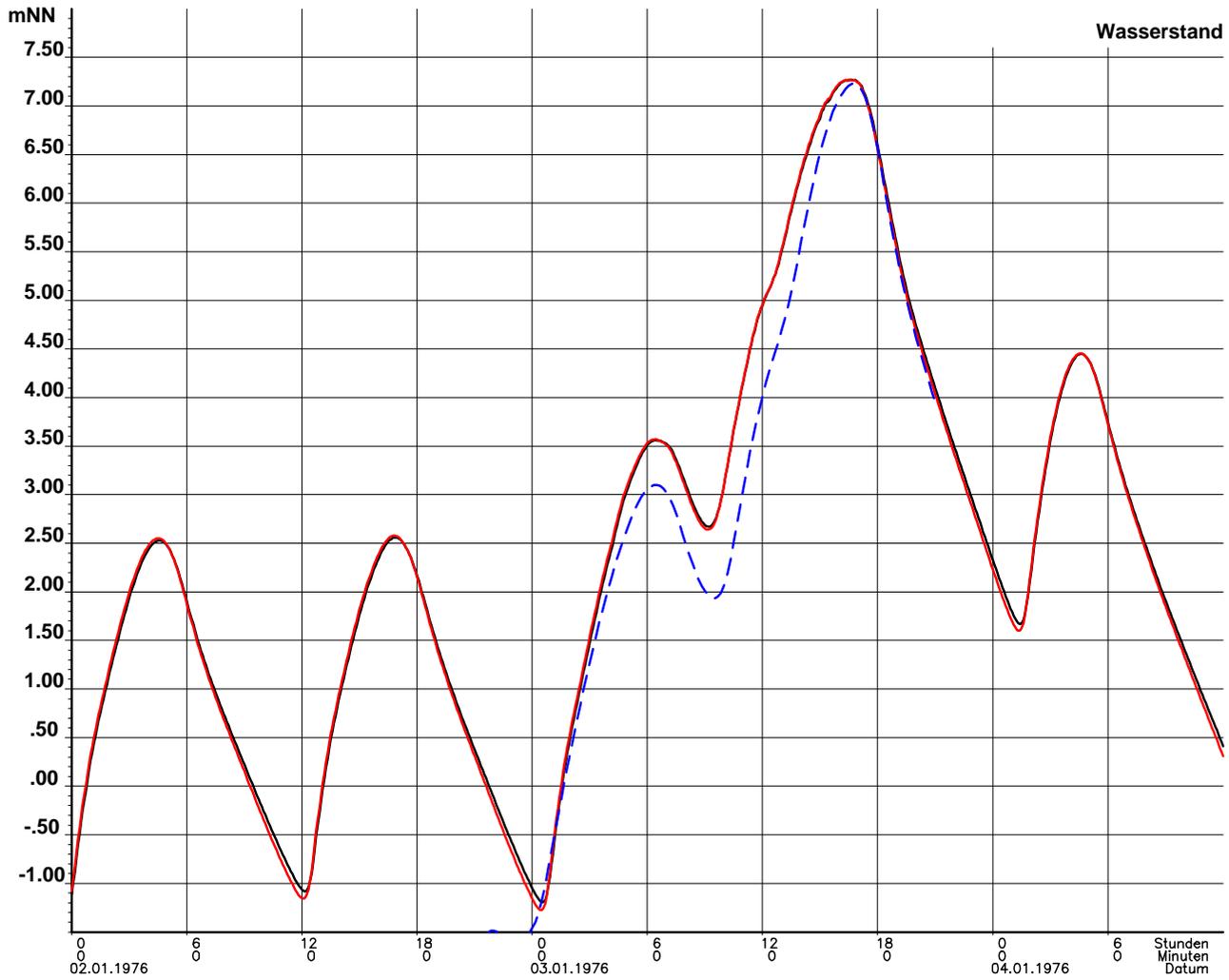


Abbildung 5.6: Wasserstand am Pegel St.Pauli für den Zeitraum 2.1. bis 4.1.: schwarz: IST92-Topographie (Modellrechnung); rot: Ausbaupographie (Modellrechnung); blau: Bemessungssturmflut Wasserstand am Knoten 173 (Modellrechnung)

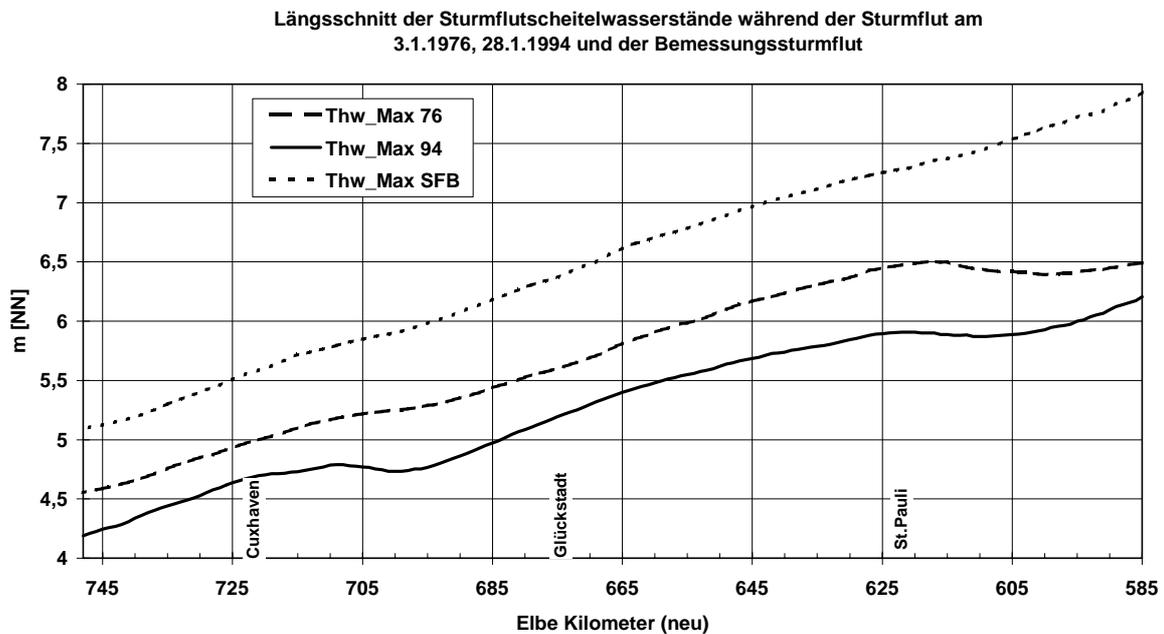


Abbildung 5.7: Längsschnitt der Sturmflutscheitelwasserstände zwischen Elbe Km 745 (\approx Scharhörn) und Elbe Km 585 (\approx Wehr Geesthacht); gestrichelt: am 3.1.1976; durchgezogen: am 28.1.1994; gepunktet: Bemessungsturmflut

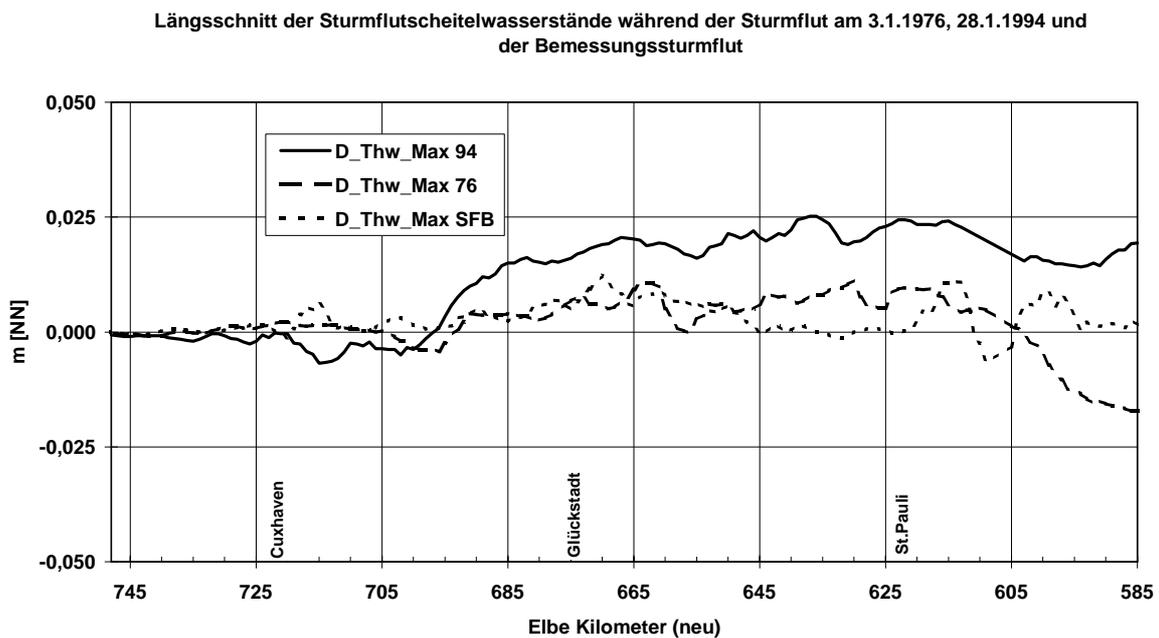


Abbildung 5.8: Längsschnitt der ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände zwischen Elbe Km 745 (\approx Scharhörn) und Elbe Km 585 (\approx Wehr Geesthacht); gestrichelt: 3.1.1976; durchgezogen : 28.1.1994; gepunktet: Bemessungsturmflut

5.1.2 Verweilzeiten

Ausbaubedingt verändert sich die Form und die Geschwindigkeit der Tidewelle entlang der Elbe. Dies führt zu uneinheitlichen ausbaubedingten Veränderungen der Verweilzeiten.

In Tabelle 5.1 auf der nächsten Seite sind die ausbaubedingten Veränderungen der Verweilzeiten der Wasserstände für die Pegel Brunsbüttel (Km 696), Stadersand (Km 654), Schulau (Km 641) und St.Pauli (Km 623) für die drei untersuchten Sturmflutszenarien eingetragen. Die Wasserstände (in mNN) sind nach 6 Höhenbereichen sortiert: > 2 m, > 3 m, > 4 m, > 5 m, > 6 m und > 7 m. Eingetragen sind die Verweilzeiten im IST92-Zustand sowie die ausbaubedingten Änderungen.

Für die Sturmflut am 3.1.1976 ergibt sich eine zeitliche Abnahme der Wasserstände > 3 m um bis zu ca. 7 Minuten, während Wasserstände > 6 m ausbaubedingt weniger als 1 Minute länger auftreten.

Für die Sturmflut am 28.1.1994 ergibt sich ein ausbaubedingter Rückgang der Verweilzeiten der Wasserstände > 2 m um bis zu 8.3 Minuten. Bei Wasserständen > 5 m ergibt sich eine ausbaubedingte Verlängerung der Verweilzeit um bis zu 5 Minuten.

Für die Bemessungssturmflut (SFB) kommt es am Pegel St.Pauli für Wasserstände > 3 m mit 8.9 Minuten zum größten ausbaubedingten Rückgang der Verweilzeiten. Ausbaubedingte Zunahmen der Verweilzeiten ergeben sich für Wasserstände > 6 m am Pegel Schulau mit +1.5 Minuten.

Da sich durch den Ausbau sowohl die Form der Tidewelle als auch ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit verändert, kommt es zu keinen systematischen Veränderungen der Verweilzeit entlang des Elbeästuars. Die prozentualen Veränderungen der Verweilzeiten bleiben entlang der Tideelbe unter $\pm 2\%$.

Ausbaubedingte Änderungen der Verweildauer

Bereich (m über NN)	Sturmflut	Brunsbüttel (Minuten)		Stadersand (Minuten)		Schulau (Minuten)		St.Pauli (Minuten)	
		IST	Δ	IST	Δ	IST	Δ	IST	Δ
> 2 m	3.1.76	753.3	-0.9	-	-	-	-	-	-
	28.1.94	621.2	-1.9	670.5	-5.4	671.8	-6.7	675.8	-8.3
	SFB	853.6	-1.8	-	-	-	-	-	-
> 3 m	3.1.76	540.0	+0.9	640.6	-3.0	655.1	-5.7	679.5	-6.6
	28.1.94	456.4	-0.3	504.0	-2.2	508.0	-2.5	527.6	-4.3
	SFB	656.9	-0.3	746.5	-4.8	758.0	-6.5	776.5	-8.9
> 4 m	3.1.76	309.4	-1.0	437.4	-2.4	464.4	-3.0	498.0	-5.4
	28.1.94	281.0	-1.3	347.2	-0.8	358.7	+0.3	373.7	+0.3
	SFB	425.5	+1.2	559.0	-3.6	581.7	-4.2	619.7	-5.9
> 5 m	3.1.76	127.9	0	243.4	0	275.2	-2.1	307.9	-3.0
	28.1.94	-	-	174.0	+3.0	197.0	+5.0	215.5	+3.5
	SFB	256.5	0	383.8	+0.3	408.2	0	453.1	-4.8
> 6m	3.1.76	-	-	-	-	107.1	0	139.8	+0.6
	28.1.94	-	-	-	-	-	-	-	-
	SFB	-	-	223.1	0	258.8	+1.5	297.5	-0.9
> 7m	3.1.76	-	-	-	-	-	-	-	-
	28.1.94	-	-	-	-	-	-	-	-
	SFB	-	-	-	-	-	-	46.3	+0.3

Tabelle 5.1: Ausbaubedingte Änderung der Verweilzeiten der Wasserstände bei Sturmflut für die Pegel Brunsbüttel, Stadersand, Schulau und St.Pauli. Die Wasserstände sind nach Höhenbereichen sortiert.

5.2 Strömung

In diesem Unterkapitel zum Thema Strömung werden die ausbaubedingten Veränderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit, der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit, des maximalen Flutstromvolumens sowie des maximalen Ebbestromvolumens im Sturmflutfall dargestellt. Diese Änderungen werden zum einen entlang der Fahrwasserachse der Elbe gezeigt, zum anderen für zwei ausgewählte Teilgebiete, Krautsand und Schulau, flächenhaft über die gesamte Breite der Elbe.

Bei der Interpretation der flächenhaften Darstellung der ausbaubedingten Änderungen einzelner von der Strömungsgeschwindigkeit abhängiger Parameter sind generell folgende Hinweise zu beachten. Auf den relativ hochgelegenen Vorlandbereichen und Wattflächen erkennt man dicht nebeneinanderliegend rote und blaue Farbflecken, die laut Legende auf verhältnismäßig große ausbaubedingte Veränderungen hindeuten. Diese relativ hochgelegenen Flächen werden bei relativ hohen Wasserständen erstmalig überflutet. Auf diesen Flächen findet man geringe Wasserstände und geringe Strömungsgeschwindigkeiten (vgl. auch Anlagen zum IST92-Zustand). Geringfügige Erhöhungen im Wasserstand können im numerischen Modell zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten führen, wenn durch diesen Wasserstandsanstieg bisher trockene Gebiete erstmalig überflutet werden. Diese hohen Geschwindigkeiten treten im IST92- und im Ausbauzustand nicht zwangsläufig an den gleichen Stellen auf und führen so bei der Differenzenbildung zum beschriebenen Fleckenmuster im Vorlandbereich. Für die Interpretation der ausbaubedingten Änderungen sind diese Differenzen folglich ohne Bedeutung.

5.2.1 Untersuchungszeitraum

Im Gegensatz zu den Auswertungen des Spring-Nipp Zeitraums im Juli 1992 wurde nun ein zeitlich eng begrenztes Ereignis untersucht. Zur Bestimmung der maximalen Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflutereignisse wurde die höchste Geschwindigkeit in der Flutphase während des Anstieges der Wasserstände zum Sturmflutscheitelwasserstand ermittelt. Die maximale Ebbestromgeschwindigkeit wurde für die sich an den Sturmflutscheitelwasserstand anschließende Ebbephase bestimmt.

In Abbildung 5.9 auf der nächsten Seite, Abbildung 5.10 auf Seite 53 und Abbildung 5.11 auf Seite 54 sind die Entwicklungen der Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten bei Elbe Km 641 (Schulau) für die drei Sturmflutszenarien dargestellt. Die für die Auswahl der Analysezeiträume relevanten Kenterpunkte sind in den jeweiligen Bildunterschriften vermerkt.

Beispielhaft sei hier die Entwicklung am 3.1.1976 erläutert. Während der ersten Flutphase am Morgen des 3.1.1976 entsprechen die Flutstromgeschwindigkeiten in ihrem Betrag den Geschwindigkeiten während windunbeeinflusster Tiden. Die folgende Ebbephase ist extrem kurz. Der Wasserstand sinkt nur um ca. 40 cm und die erreichten Strömungsgeschwindigkeiten sind mit ca. 0.5 m/s verhältnismäßig gering. Während dieses Zeitraums verhindern sowohl der Weststurm als auch die durch diesen verursachten hohen Wasserstände entlang der Deutschen Bucht ein Abfließen. Dieser Ebbephase folgt

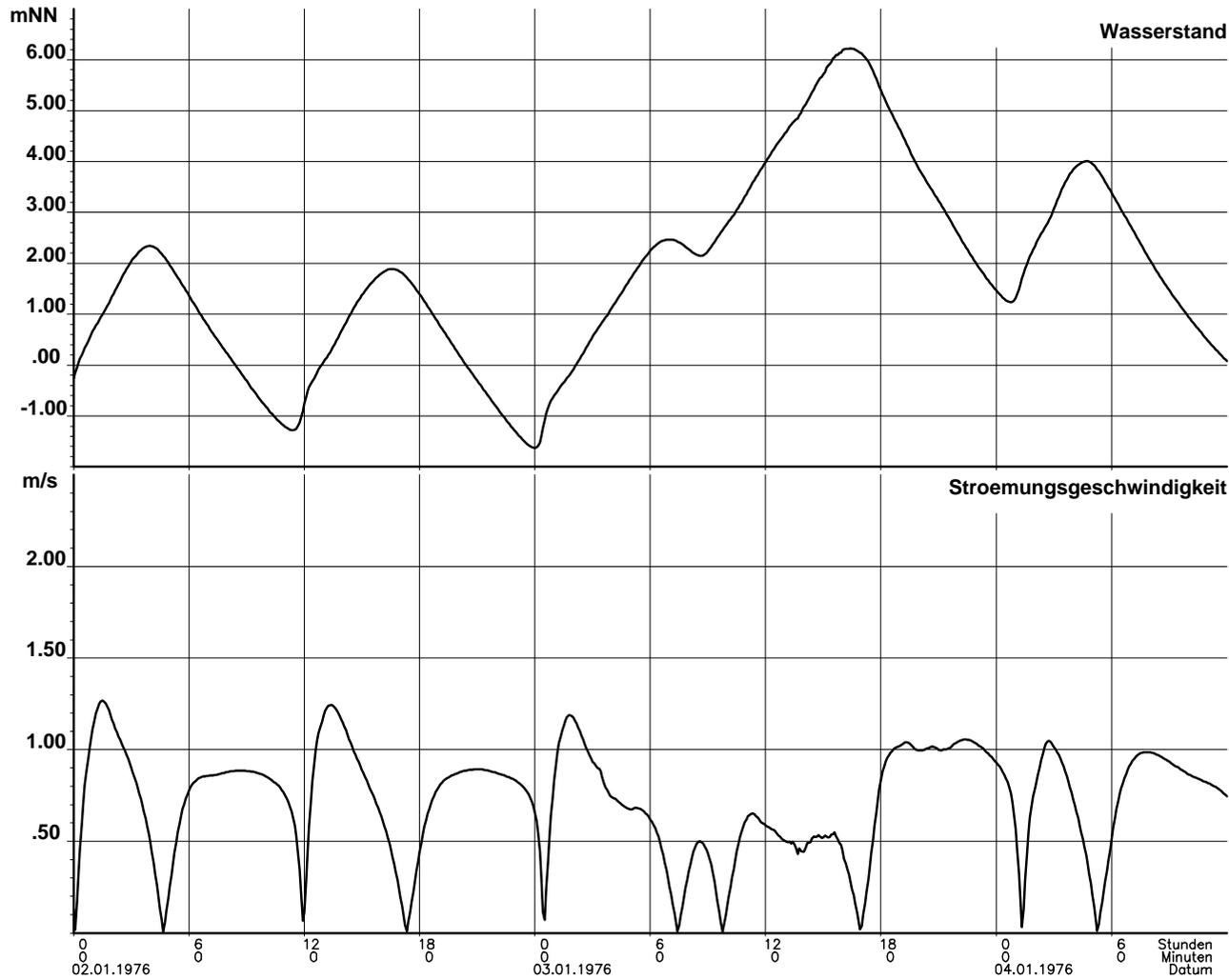


Abbildung 5.9: Wasserstand und Strömung bei Elbe Km 641 (SF76). Oben: Entwicklung des Wasserstandes bei Km 641. Unten: Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten. Die für die Analyse der Sturmflut entscheidenden Kenterpunkte Ebbe liegen am 3.1.1976 09:43 Uhr sowie am 4.1.1976 01:20 Uhr, der Kenterpunkt Flut am 3.1.1976 16:54 Uhr. Der Sturmflutscheitelwasserstand wird am 3.1.1976 16:27 Uhr erreicht.

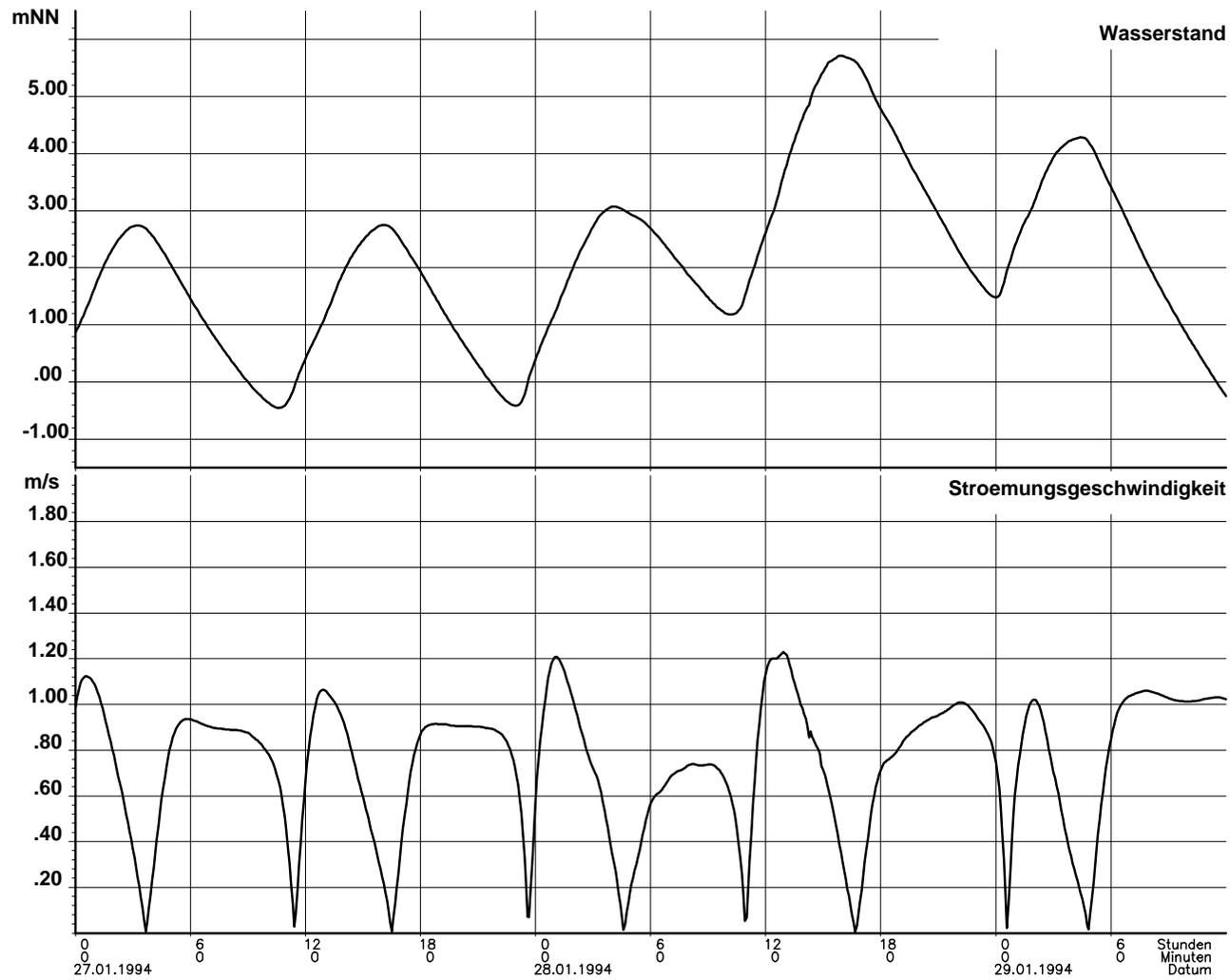


Abbildung 5.10: Wasserstand und Strömung bei Elbe Km 641 (SF94). Oben: Entwicklung des Wasserstandes bei Km 641. Unten: Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten. Die für die Analyse der Sturmflut entscheidenden Kenterpunkte Ebbe liegen am 28.1.1994 10:57 Uhr sowie am 29.1.1994 00:34 Uhr, der Kenterpunkt Flut am 28.1.1994 16:58 Uhr. Der Sturmflutscheitelwasserstand wird am 28.1.1994 15:54 Uhr erreicht.

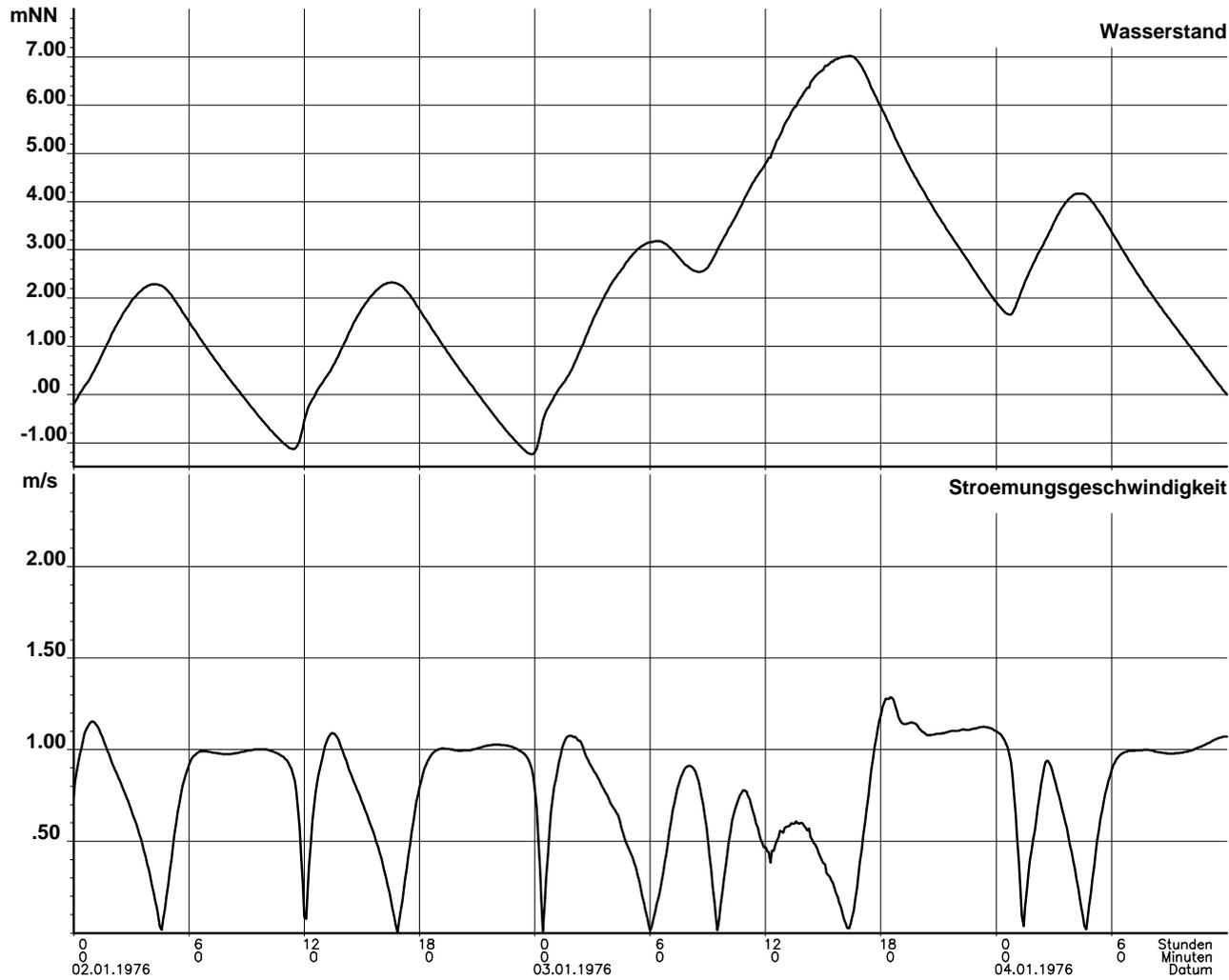


Abbildung 5.11: Wasserstand und Strömung bei Elbe Km 641 (SFB). Oben: Entwicklung des Wasserstandes bei Km 641. Unten: Verlauf der Strömungsgeschwindigkeiten. Die für die Analyse der Sturmflut entscheidenden Kenterpunkte Ebbe liegen am 3.1. 09:28 Uhr sowie am 4.1. 01:22 Uhr, der Kenterpunkt Flut am 3.1. 16:16 Uhr. Der Sturmflutscheitelwasserstand wird am 3.1. 16:22 Uhr erreicht.

eine zweite ausgeprägte Flutphase, die zu den extrem hohen Wasserständen entlang der gesamten Elbe führt. Die Strömungsgeschwindigkeiten während dieser zentralen Phase der Sturmflut liegen bei Km 641 im Maximum bei ca. 0.6 m/s und sind damit deutlich niedriger als in den Flutphasen während eines Spring-Nipp-Zeitraums mit mittleren Wasserständen.

Zur Untersuchung der maximalen bei Sturmflut auftretenden Ebbestromgeschwindigkeiten wurden die Strömungsgeschwindigkeiten während der dem Sturmflutscheitelwasserstand folgenden Ebbephase analysiert. In Abbildung 5.9 auf Seite 52 ist zu erkennen, daß die höchsten Geschwindigkeiten am 3.1.1976 zwischen 18:00 Uhr und 24:00 Uhr erreicht werden. Sie liegen bei Km 641 um ca 1.0 m/s, und damit höher als die Ebbestromgeschwindigkeiten während windunbeeinflusster Tidephasen (vgl. z.B. 2.1.1976). Im Laufe des Abends des 3.1.1976 beginnt die Windgeschwindigkeit abzunehmen und die Windrichtung dreht auf Nord, so daß der Windeinfluß über der Elbe abnimmt. Auch der Wasserstand in der Deutschen Bucht fällt, so daß der Ebbestrom einsetzen und das im Gebiet der Tideelbe durch die Sturmflut aufgestaute Wasser relativ schnell (s.o.) abfließen kann.

Die Entwicklung des Wasserstandes und der Strömungsgeschwindigkeiten während der Bemessungssturmflut (Abbildung 5.11 auf der vorherigen Seite) ähnelt dem Verlauf am 3.1.1976. Auch hier sind die Strömungsgeschwindigkeiten während des Wasserstandsanstieges zum Sturmflutscheitelwasserstand relativ niedrig und die Strömungsgeschwindigkeiten während der darauffolgenden Ebbephase im Vergleich zu windunbeeinflussten Situationen (z.B. am 2.1.) etwas höher.

Während der Sturmflut am 28.1.1994 beobachtet man ein anderes Strömungsverhalten (Abbildung 5.10 auf Seite 53). Sowohl während der Flut als auch während der Ebbephase liegen die Strömungsgeschwindigkeiten etwas höher als bei windunbeeinflussten Tiden (z.B. 27.1.1994). Jedoch entspricht die Form der Wasserstandsentwicklung der einer mittleren Tide, d.h. Hoch- und Niedrigwasser bzw. Ebbe- und Flutphase der Tide sind im Gegensatz zur Sturmflut am 3.1.1976 deutlich zu erkennen. Der astronomisch bedingte Verlauf Tidekurve wird durch die windbedingte Wasserstandsentwicklung lediglich verstärkt, da die Entwicklung des Sturms gleichzeitig mit dem Tidestieg verläuft. (Die hohen Windgeschwindigkeiten (> 20 m/s) werden im Elbmündungsgebiet gegen 5 Uhr morgens erreicht und halten bis zum späten Nachmittag an. Das vom BSH vorausberechnete Tideniedrigwasser sollte am 28.1.1994 in Scharhörn um 7:19 Uhr und 19:33 Uhr eintreten.)

In den nachfolgenden Abschnitten sind die maximale Flutstromgeschwindigkeit und die maximale Ebbestromgeschwindigkeit entlang der Elbe in Fahrwassermitteln sowie die ausbaubedingten Änderungen für diese Parameter dargestellt.

Im Anlagenband Sturmfluten sind für den Bereich Schulau und Krautsand außerdem die maximale Flutstromgeschwindigkeit, die maximale Ebbestromgeschwindigkeit, das maximale Flutstromvolumen und das maximale Ebbestromvolumen flächenhaft dargestellt. Für die gleichen Parameter sind auch die ausbaubedingten Änderungen flächenhaft dargestellt.

In Anlage I.1.SF.10.A (I.1.SF.14.A) ist die Sturmfluttopographie für das Gebiet Krautsand (Schulau) und in Anlage I.2.SF.10.A (I.2.SF.14.A) die Differenz zwischen IST92- und Ausbau-topographie dargestellt.

Die Anlagennummer setzt sich aus dem Namen der Sturmflut (SF76, SF94 oder SFB), der

Teilgebietsnummer (10 oder 14) und einem Buchstaben, der die dargestellte Größe kennzeichnet, zusammen. Die Ziffer 1 bezeichnet den IST92-Zustand, die 2 die ausbaubedingten Änderungen.

5.2.2 Flutstromgeschwindigkeit

Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten sind in Abbildung 5.12 auf Seite 58 als Längsprofil entlang der Fahrwassermittelle der Elbe von Km 748 bis Km 620 dargestellt. Die größten maximalen Flutstromgeschwindigkeiten ergeben sich für die Sturmflut am 28.1.1994 und die niedrigsten für die Sturmflut am 3.1.1976. Während der drei untersuchten Sturmflutszenarien treten die höchsten maximalen Flutstromgeschwindigkeiten im Bereich von Km 680 bis Km 700 (Störmündung bis Brunsbüttel) auf.

Im Bereich von Altenbruch/Medemgrund (Km 720) und elbaufwärts Km 660 (Pagensand) liegen die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten unter 0.75 m/s).

In Abbildung 5.13 auf Seite 58 sind die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit entlang der Elbe in Fahrwassermittelle dargestellt. Entlang der Elbe Km 748 bis Km 620 sind die ausbaubedingten Änderungen der Flutstromgeschwindigkeiten kleiner ± 4.5 cm/s. Lediglich im Bereich von Elbe Km 625 (Ende der Ausbaustrecke) kommt es für alle Sturmflutszenarien durch die örtliche ausbaubedingte Querschnittsaufweitung zu einem Rückgang der maximalen Flutstromgeschwindigkeit um bis zu 15 cm/s.

Wie für die Strömungsgeschwindigkeiten während des Spring-Nipp-Zeitraums im Juli 1992 wurde für die drei Sturmflutszenarien für zwei Teilgebiete (Krautsand(10) und Schulau(14)) eine flächenhafte Analyse der Modellergebnisse durchgeführt.

- *Sturmflut 1976*

Anlage I.1.SF76.10.F1 (I.1.SF76.14.F1) zeigt die maximale Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF76. Man erkennt für diese Sturmflut nur eine geringe räumliche Variabilität der maximalen Flutstromgeschwindigkeit über den Querschnitt der Elbe. Sie liegt z.B. in Strommitte bei Krautsand bei 0.9 m/s und in den Seitenbereichen geringfügig darunter. Die ausbaubedingten Veränderungen sind in Anlage I.2.SF76.10.F1 dargestellt. Man erkennt lediglich in Strommitte ausbaubedingte Zunahmen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten von 0.03 m/s. Im Bereich von Schulau dagegen zeigt Anlage I.2.SF76.14.F1 einen ausbaubedingten Rückgang der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in der Fahrrinne von 0.03 m/s. In den Seitenbereichen kommt es nur zu geringfügigen ausbaubedingten Veränderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten.

- *Sturmflut 1994*

Anlage I.1.SF94.10.F1 (I.1.SF94.14.F1) zeigt die maximale Flutstromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94. Die räumliche Variabilität der maximalen Flutstromgeschwindigkeit über den Querschnitt der Elbe ähnelt der räumlichen Verteilung dieses Parameters auch in der Größenordnung während des Spring-Nipp Zeitraums.

Die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in Strommitte bei Krautsand liegen bei 1.5 m/s und nehmen in den Seitenbereichen deutlich bis auf 0.3 m/s ab.

Die ausbaubedingten Veränderungen sind in Anlage I.2.SF94.10.F1 dargestellt. In Strommitte ergeben sich ausbaubedingte Zunahmen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten von 0.03 m/s. Im Bereich von Schulau dagegen zeigt Anlage I.2.SF94.14.F1 einen ausbaubedingten Rückgang der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten in der Fahrrinne von 0.03 m/s bis 0.06 m/s. Auch in den Seitenbereichen wie z.B. dem Wedeler Watt kommt es zu einem ausbaubedingten Rückgang der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten um 0.03 m/s.

- *Bemessungssturmflut*

Anlage I.1.SFB.10.F1 zeigt die maximale Flutstromgeschwindigkeit im Bereich Krautsand während der Sturmflut SFB. Während dieser Sturmflut ist die räumliche Variabilität der maximalen Flutstromgeschwindigkeit über den Querschnitt der Elbe ausgeprägter als bei der Sturmflut am 3.1.1976 aber bei weitem nicht so ausgeprägt wie bei der Sturmflut 28.1.1994. Die maximale Flutstromgeschwindigkeit liegt z.B. in Strommitte bei Krautsand bei 1.2 m/s und in den Seitenbereichen deutlich darunter bei 0.6 m/s. Die ausbaubedingten Veränderungen sind in Anlage I.2.SFB.10.F1 dargestellt. Es ergeben sich lediglich geringe ausbaubedingte Veränderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten von ± 0.03 m/s.

Im Bereich von Schulau gibt es bei der Bemessungssturmflut vergleichbar der Sturmflut 3.1.1976 nur eine geringe räumliche Variabilität der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten. Der ausbaubedingte Rückgang der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten liegt in der Fahrrinne bei 0.03 m/s. In den Seitenbereichen kommt es nur zu geringfügigen ausbaubedingten Veränderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten.

- *Vergleich*

Der Vergleich der flächenhaften Ergebnisse für alle drei Sturmfluttypen zeigt, daß sich die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten bis zu ± 0.05 m/s ändern. Die Veränderungen sind räumlich stark variabel, wobei die größten Veränderungen im Bereich der Fahrrinne stattfinden. In den Seitenbereichen findet man ausbaubedingte Veränderungen bis zu ± 0.03 m/s. Die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit liegen in der gleichen Größenordnung wie die für den Spring-Nipp-Zeitraum Juli 1992 berechneten.

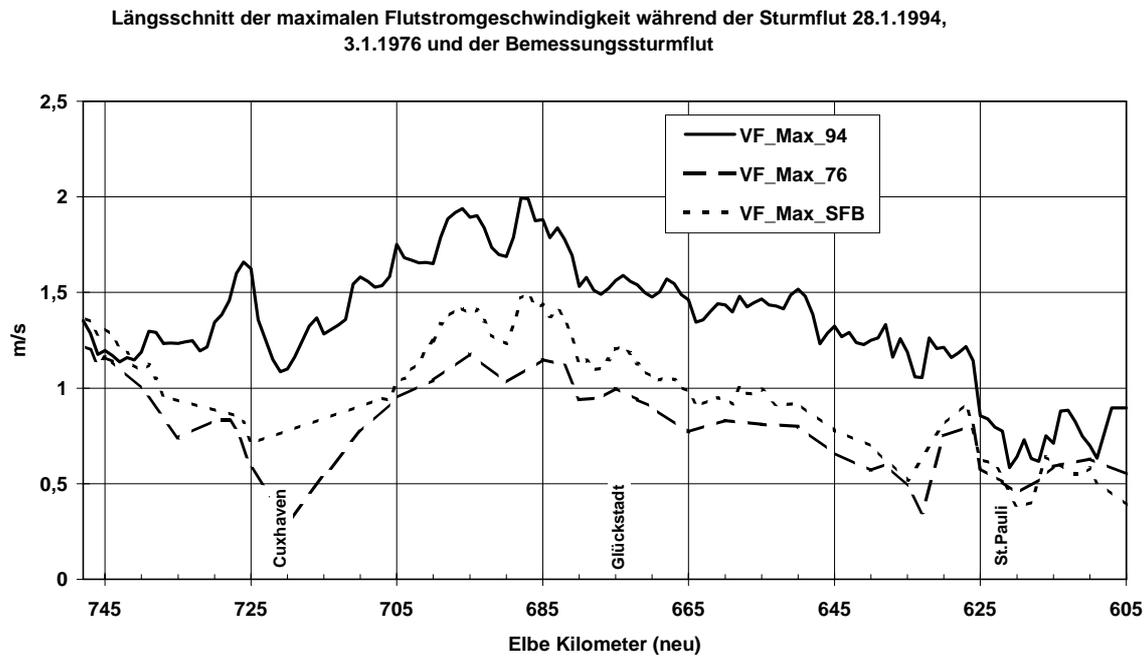


Abbildung 5.12: Längsschnitt der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten bei der Sturmflut 3.1.1976, 28.1.1994 und der Bemessungsturmflut.

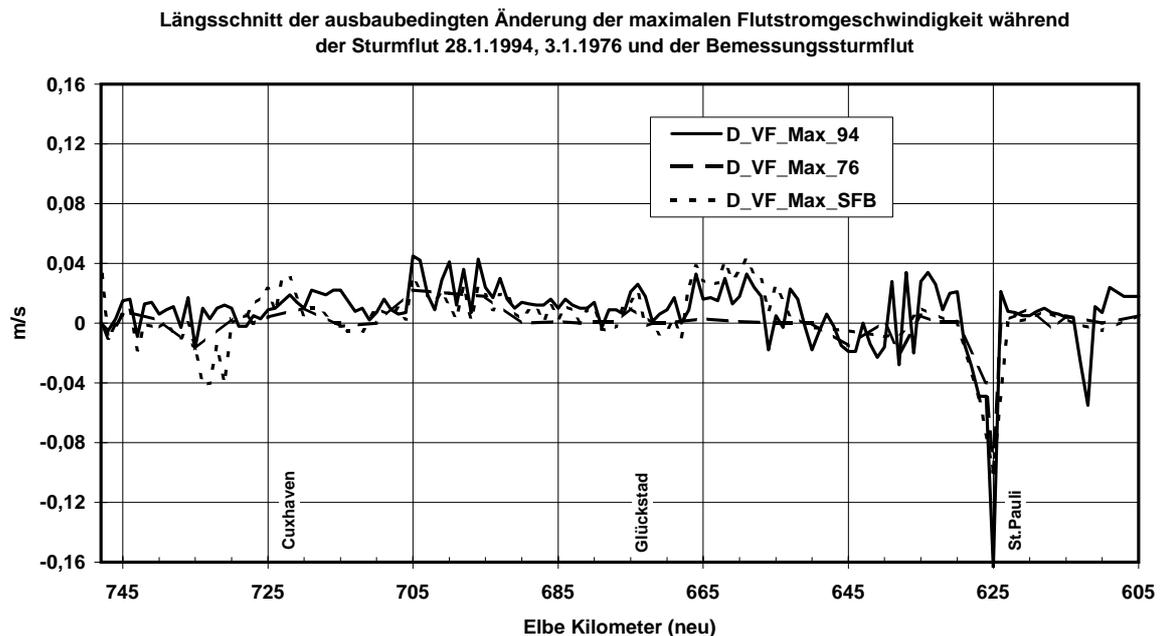


Abbildung 5.13: Längsschnitt der ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeiten bei der Sturmflut 3.1.1976, 28.1.1994 und der Bemessungsturmflut.

5.2.3 Ebbestromgeschwindigkeit

Die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten für die drei Sturmflutszenarien sind in Abbildung 5.14 auf Seite 61 als Längsprofil entlang der Fahrwassermitte der Elbe von Km 748 bis Km 620 dargestellt. Man erkennt, daß die höchsten Ebbestromgeschwindigkeiten im Bereich von Km 730 (\approx Cuxhaven Kugelbake) mit mehr als 2.2 m/s auftreten. Elbaufwärts nehmen die Ebbestromgeschwindigkeiten ab und erreichen im Bereich von Km 620 nur noch Werte zwischen 0.5 m/s und 1.0 m/s. Die ausbaubedingten Änderungen der Ebbestromgeschwindigkeiten liegen entlang der gesamten Elbe unter 5 cm/s. Wie bei den ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flutstromgeschwindigkeit kommt es für die drei Sturmfluttypen im Bereich von Km 625 (Ende der Ausbaustrecke) zu einem ausbaubedingten Rückgang der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit um ca. 11 cm/s.

Für die drei Sturmflutszenarien wurde für zwei Teilgebiete (Krautsand(10) und Schulau(14)) eine flächenhafte Analyse der Modellergebnisse zur Bestimmung der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit durchgeführt.

- *Sturmflut 1976*

Anlage I.1.SF76.10.G1 (I.1.SF76.14.G1) zeigt die maximale Ebbestromgeschwindigkeit für SF76. Die höchsten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten (< 1.2 m/s) liegen in der Fahrwassermitte. Sie liegen jedoch nur unwesentlich höher als im Spring-Nipp Zeitraum (< 1.1 m/s).

Anlage I.2.SF76.10.G1 zeigt die ausbaubedingten Änderungen im Bereich von Krautsand. Man erkennt, daß es bereichsweise zu einer Zunahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit um 0.03 m/s kommt. Im Teilgebiet Schulau, Anlage I.2.SF76.14.G1, kommt es nördlich von Hanskalbsand bis in die Fahrrinne hinein zu einem durch die in diesem Gebiet relativ großen Topographieänderungen (vgl. hierzu I.2.SF.14.A) bedingten Rückgang der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten um bis zu 0.15 m/s. In den Seitenbereichen sind die Abnahmen mit 0.03 m/s deutlich geringer.

- *Sturmflut 1994*

Anlage I.1.SF94.10.G1 (I.1.SF94.14.G1) zeigt die maximale Ebbestromgeschwindigkeit während der Sturmflut SF94. Die höchsten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten liegen in der Fahrwassermitte. Sie liegen im Bereich Krautsand um 0.3 m/s höher als während des Spring-Nipp Zeitraums. Im Bereich Schulau unterscheiden sie sich in der räumlichen Verteilung und der Größenordnung nicht von den maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten während des Spring-Nipp Zeitraums.

Anlage I.2.SF94.10.G1 zeigt die ausbaubedingten Änderungen im Bereich von Krautsand. Es ergibt sich nur in wenigen Bereichen eine ausbaubedingte Zunahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit um bis zu 0.03 m/s. Im Bereich von Schulau, Anlage I.2.SF94.14.G1, kommt es im Fahrwasser zu einem Rückgang der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten um bis zu 0.07 m/s. In den Seitenbereichen sind die Abnahmen mit 0.02 m/s deutlich geringer.

- *Bemessungssturmflut*

Anlage I.1.SFB.10.G1 (I.1.SFB.14.G1) zeigt die maximale Ebbestromgeschwindigkeit während der Bemessungssturmflut. Die höchsten maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten liegen in der Fahrwassermitte. Sie liegen mit Werten >1.2 m/s deutlich höher als im Spring-Nipp Zeitraum.

Anlage I.2.SFB.10.G1 zeigt die ausbaubedingten Änderungen im Bereich von Kraut-sand. Es kommt bereichsweise zu einer Zunahme der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit um 0.03 m/s. Im Bereich von Schulau, Anlage I.2.SFB.14.G1, kommt es im Fahrwasser zu einem Rückgang der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten um bis zu 0.06 m/s. Auch in den Seitenbereichen wie dem Wedeler Watt tritt ein Rückgang der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit um bis zu 0.03 m/s auf.

- *Vergleich*

Der Vergleich der flächenhaften Ergebnisse für alle drei Sturmfluttypen zeigt, daß sich die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten in der gleichen Größenordnung wie die maximalen Flutstromgeschwindigkeiten um bis zu ± 0.05 m/s ändern. Auch hier gilt, daß die Veränderungen räumlich stark variable sind, wobei die größten Veränderungen im Bereich der Fahrrinne stattfinden. In den Seitenbereichen findet man ausbaubedingte Veränderungen in der Größenordnung von bis zu ± 0.03 m/s. Die ausbaubedingten Änderungen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeit liegen in der gleichen Größenordnung wie die für den Spring-Nipp-Zeitraum Juli 1992 berechneten.

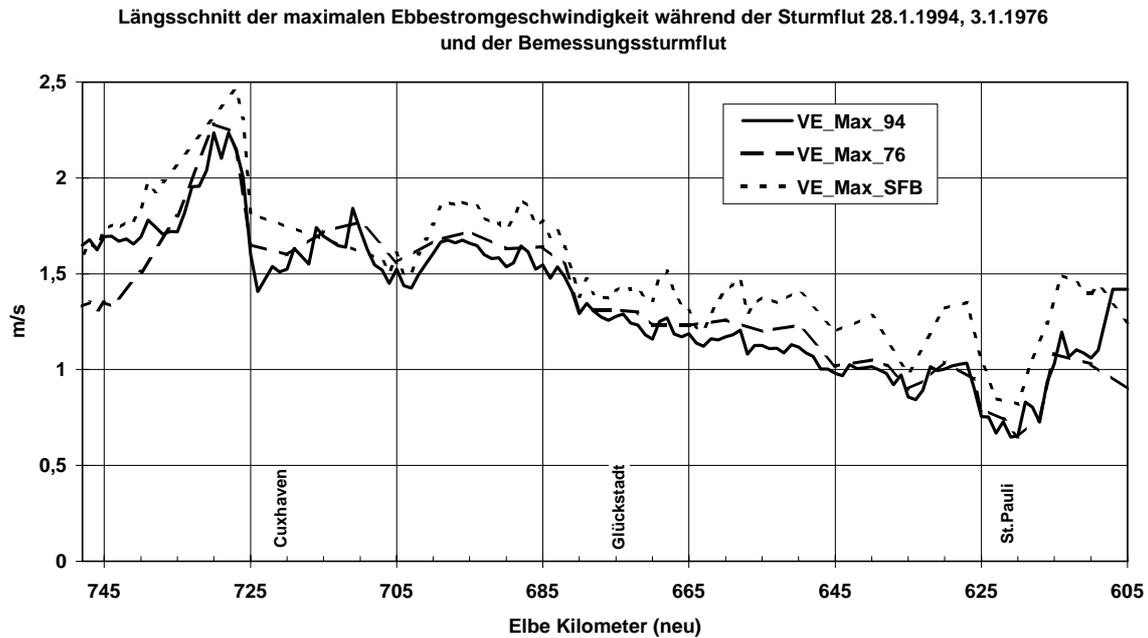


Abbildung 5.14: Längsschnitt der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten bei der Sturmflut 3.1.1976, 28.1.1994 und der Bemessungsturmflut.

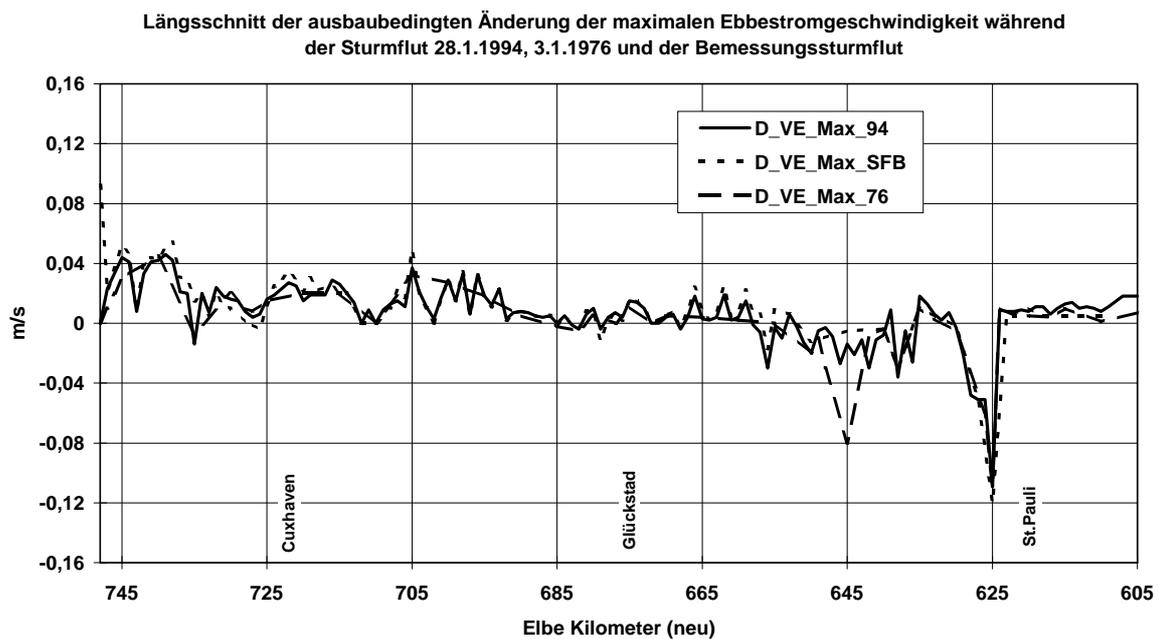


Abbildung 5.15: Längsschnitt der ausbaubedingten Änderungen der maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten bei der Sturmflut 3.1.1976, 28.1.1994 und der Bemessungsturmflut.

5.2.4 Flut- und Ebbestromvolumen

Die maximalen Flut- und Ebbestromvolumen (M1 und N1) und ihre ausbaubedingten Veränderungen wurden entlang der Tideelbe untersucht und beispielhaft für zwei Teilgebiete, Krautsand (10) und Schulau (14), im Anlagenband dargestellt.

Für alle drei Sturmfluttypen ergeben sich einheitliche ausbaubedingte Änderungen dieser Parameter. Sowohl für das maximale Flutstromvolumen als auch das maximale Ebbestromvolumen zeigt sich, daß die größten ausbaubedingten Zunahmen sich auf den Bereich der Fahrrinne konzentrieren, während in den Nebengebieten die Abnahmen dominieren.

6 Zusammenfassung und Prognose

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 bei Sturmfluten 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. Auf diesem Gitter wird die Topographie abgebildet und werden die physikalischen Größen berechnet.

In Kapitel 5 wird die mit einem hydro-numerischen Modell der Elbe berechneten ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen im Detail dargestellt. Zur Bewertung der Änderungen werden drei unterschiedliche Sturmfluttypen (Kapitel 2) untersucht.

Die Sensitivität der Ergebnisse auf unterschiedliche Eingabegrößen wird in Kapitel 3 abgeschätzt. Es zeigt sich, daß die Kenntnisse des lokalen, über der Elbe herrschenden Windverhältnisse von entscheidender Bedeutung bei der Reproduktion der Systemzustände der Elbe während Sturmfluten sind. Nur durch die Berücksichtigung dieses zusätzlichen Impulseintrages aus der Atmosphäre können die Wasserstände entlang des Elbeästuares richtig wiedergegeben werden.

Zusätzlich wird in Kapitel 3 die Auswirkungen von geringen Wasserstandsänderungen auf ausbaubedingte Änderungen untersucht. Es konnte gezeigt werden, daß sich die ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände bei kleinen Variationen der absoluten Wasserstände nicht verändern.

Die Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände und ihrer ausbaubedingten Änderungen für drei unterschiedliche Sturmfluttypen zeigt, daß die ausbaubedingten Änderungen bei höheren absoluten Wasserständen am kleinsten sind. Die relative Änderung des hydraulisch wirksamen Fließquerschnittes ist bei gleicher Ausbaumaßnahme bei den während Sturmfluten herrschenden hohen Wasserständen kleiner als bei mittleren Wasserständen. Dadurch ist zu erklären, daß die größten ausbaubedingten Änderungen im Wasserstand nicht während Extremereignissen wie Sturmfluten auftreten.

Die größten ausbaubedingten Zunahmen der Sturmflutscheitelwasserstände mit bis zu 2.5 cm ergeben sich für die Sturmflut 28.1.1994, die die niedrigsten Sturmflutscheitelwasserstände hatte, während die durch extrem hohe Wasserstände gekennzeichnete Bemessungssturmflut nur ausbaubedingte Änderungen von bis zu 1.5 cm erreicht. Im Vergleich hierzu ergeben sich während mittlerer Verhältnisse ausbaubedingte Änderungen im Tidehochwasser von bis zu 4 cm. Die Sturmflutscheitelwasserstände treten ausbaubedingt bis zu 5 Minuten früher ein. Auch hier ergeben sich die größten Veränderungen für die Sturmflut mit dem niedrigsten absoluten Wasserstand. Die Verweildauern der hohen Wasserstände verändern sich um bis zu ± 10 Minuten. Da sich ausbaubedingt die Form und die Geschwindigkeit der Tidewelle verändert, ergeben sich keine einheitlichen Veränderungen der

Verweilzeiten in bestimmten absoluten Wasserstandsbereichen.

Für alle drei Sturmfluttypen kommt es zu ausbaubedingten Änderungen der maximalen Flut- und Ebbestromgeschwindigkeit bis zu ± 4 cm/s. Lediglich im Bereich Elbe Km 625 (Ende der Ausbaustrecke) ergeben sich Änderungen dieser Sturmflutkenngößen bis zu -16 cm/s. Da ausbaubedingt der Durchfluß in der Fahrrinne gestärkt wird, erhöht sich hier das maximale Flut- und Ebbestromvolumen um ca 2 %.

Die Untersuchung der ausbaubedingten Veränderungen der Sturmflutkenngößen für drei Sturmfluttypen zeigt, daß mit zunehmendem Sturmflutscheitelwasserstand die Änderungen kleiner werden.

Bei Sturmfluten treten aufgrund der bei höheren Wasserständen größeren hydraulisch wirksamen Querschnitte geringere ausbaubedingte Wasserstandsänderungen als bei mittleren Tideverhältnissen auf.

Hamburg, den 19.11.1996

im Auftrag

Bearbeiterin

Dr.-Ing. Ruland
Baudirektor

Dr.rer.nat. Rudolph
Wiss. Angestellte

Literatur

- BAW, 1995a, *HN-Modell der Tideelbe*, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, Supercomputing News Heft 1/1995, pp. 2-13.
- BAW, 1996, *Validierungs Dokument HN-Verfahren TRIM-2D*, Bundesanstalt für Wasserbau, Außenstelle Küste, 1996, pp. 1-40.
- Heerten, G. und Partenscky, H.-W., 1977, *Ein Vergleich der Sturmflut von 3. Januar 1976 auf der Elbe mit anderen Sturmfluten nach 1962*, Mitteilungen des Franzius-Institutes für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover, Heft 45, pp. 221-325.
- Länderarbeitsgruppe, 1988, *Bemessungswasserstände entlang der Elbe*, Bericht der Länderarbeitsgruppe, Die Küste, Heft 47, pp. 31-50.
- Planungsgruppe Ökologie und Umwelt, 1993, *Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt, Vorschlag über den voraussichtlichen Untersuchungsrahmen der Umweltverträglichkeitsuntersuchung nach §5 UVPG*
- Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992, *Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen*, Die Küste, Heft 54, pp. 131-142.
- Seitz, R. und Zeh, H. 1991, *Archivierung von Küstenpeildaten auf dem Zentralrechner der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bei der BAW in Karlsruhe*, Bericht der Bundesanstalt für Wasserbau, Kußmaulstraße 17, D-76187 Karlsruhe, Januar 1991.
- Siefert, W. und Havnø, K., 1989, *Sturmflutuntersuchungen für die Elbe mit den mathematisch-hydraulischen Modellen des Dänischen Hydraulischen Instituts*, Hamburger Küstenforschung, Heft 46.
- Smith, S.D. und 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.
- Traci, R.U., Phillips, G.T., Patnaik, P.C., 1978, *Developing a site selection methodology for wind energy conversion systems*, Science applications, Inc. La Jolla, California.
- WSA-HH, 1994, *Die Sturmflut am 28.1.1994 in der Elbe*, Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, Sachgruppe Gewässerkunde, Bericht.
- Wasserwirtschaftsamt Lüneburg, 1983, *Veränderungen des Abflußverhaltens der Elbe*, Wasserwirtschaftsamt Lüneburg für den Gartower Deich- und Wasserverband, den Dannenberger Deichverband und den Artlenburger Deichverband, Bericht.