Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

- Dienststelle Hamburg -

Bericht

KFKI-Forschungsvorhaben „Sturmfluten “

Sturmfluten in den deutschen Ästuaren
BMBF-Förderungsnummer: MTK 0600
Fortschungszentrum Jülich Projektträger BEO Vorhaben 03KIS 311

Bundesanstalt für Wasserbau

(BAW)

Bericht

Untersuchung regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzustände und Oberwassereinflüsse auf das Sturmflut-geschehen in Tideästuarien

gefördert im Rahmen des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen

durch das	Bundesministerium für Bildung und Forschung
	1. Januar 1997 bis 30. Juni 2000
Projektleitung	Dr.-Ing. G. Flügge / Dr.-Ing. H. Heyer
Aufgestellt:	Dr.-Ing. Harro Heyer
	Dr. rer. nat. Elisabeth Rudolph
	Dr.-Ing. Andreas Plüß
	Dr.-Ing. Günther Lang
	Dipl.-Ing. (FH) Dirk Schrödter
	Dipl.-Ing. (FH) Andreas Cords

Hamburg, 5. Juli 2000

Deckblatt: Kupferstich aus dem Jahre 1675 nach C. Griese, H. 7, S.2, 1894: „Schlendertage in Cuxhaven und Ritzebüttel “Zur Feier d. 500 jährigen Vereinigung Ritzebüttels mit Hamburg. -Hamburger Küstenforschung Heft37-

Form des Berichts

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

Für den vorliegenden Forschungsbericht wurden der Bericht des Deutschen Wetterdienstes sowie die Dokumentation der Windfeldanalysen als separate Dokumente beigelegt.

Die elektronische Form dieser Berichte ist als **P**ortable **D**ocument **F**ormat der Firma **A**dobe abgelegt. Technische Dokumentationen zum PDF-Format gibt es als:

- Überblick über Adobe Acrobat
- Portable Document Format - Reference Manual -
- Hilfedatei

Durch Verknüpfung dieser Ausarbeitungen mittels „Sprungmarken “kann bei der Betrachtung des BAW-Berichtes auf Texte, Abbildungen, und weitere Dokumente zugegeriffen werden. Diese „Sprungmarken “sind im Bericht durch einen farbigen Rahmen hervorgehoben:

Rot - Verweise auf Abbildungen und spezielle Seiten innerhalb des Berichtes,

Grün - Verweise auf zitierte Literaturstellen,

Blau - Verweise auf andere PDF-Dokumente auf dieser CD,

Graublau - Verweise auf die Internetseiten der BAW.

Alle Verbindungen können per ”Mausklick” aktiviert werden. Jede Darstellung auf dem Bildschirm ist vergrößerbar. Aus dem PDF-Dokument heraus lassen sich einzelne Seiten oder das gesamte Schriftstück ausdrucken.

Zusammenfassung

Für die großen Ästuare entlang der Deutschen Bucht **Ems**, **Jade/Weser** und **Elbe** wurde die ≫Sturmflutempfindlichkeit≪ durch geeignete Variation von historischen Sturmfluten unterschiedlicher Charakteristik bestimmt. Als Beispiel für eine Sturmflut mit steiler Windstaukurve und mittlerem Oberwasserzufluß wurde die Sturmflut vom 3./4. Januar 1976 ausgewählt, sowie als Beispiel für eine Sturmflut mit fülliger Windstaukurve und hohem Oberwasser die Sturmflut vom 28. Januar 1994.

Diese Sturmfluten wurden für die genannten Ästuare mit Hilfe hydrodynamisch-numerischer (HN) Modelle untersucht. Hierbei wurden zur Berechnung des räumlich und zeitlich variablen Impulseintrags aus der Atmosphäre regionale Windfelder verwendet, die vom Deutschen Wetterdienst - GF Seeschifffahrt- mit Hilfe eines numerischen Windmodells im Rahmen dieses Forschungsprojektes (Teilprojekt Regionale Windwirkung) berechnet wurden.

Aus den vom DWD berechneten Windfeldern der Sturmflutzeiträume wurde mit einem neu entwickelten Auswerteprogramm eine flächenhafte Windstatistik erstellt und dokumentiert. Diese Statistik gibt z.B. Auskunft über die Dauer hoher Windgeschwindigkeiten aus bestimmten Windrichtungssektoren über dem gesamten Ästuar.

Nach der Verifikation der modellierten Sturmfluten anhand von Wasserstandsmessungen wurden für alle o. g. Ästuare systematische Variationen des Oberwasserzufluss, der regionalen Windfeldern sowie der Topographie vorgenommen. Neben der Auswertung der Scheitelwasserstände wurden eine Reihe zusätzlicher Kenngrößen, wie z. B. Durchflüsse, Steig- und Fallgeschwindigkeiten des Wasserstandes, Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes, Dauer hoher Wasserstände, ausgewertet und verglichen. Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung von Veränderungen der ästuarspezifischen Sturmflutdynamik im Hinblick auf Variationen der bestimmenden Einflussgrößen in physikalisch begründeten Bandbreiten. Aus den Ergebnissen wird die Sturmflutempfindlichkeit der charakteristischen Gebiete in den einzelnen Ästuaren bestimmt.

Die Ergebnisse dieser hier vorgestellten Untersuchungen sind ein wichtiger Schritt auf dem Weg zum besseren Verständnis, der für die Höhe und Dauer einer Sturmflut entlang eines Ästuars verantwortlichen Einflüsse.

Inhaltsverzeichnis

Form des Berichtes **i**

1 Ziel des Forschungsvorhabens **1**

2 Konzeptionelle Vorgehensweise **2**
2.1 Grundlagen des systemanalytischen Ansatzes 2
2.2 Methoden zur Bewertung der Untersuchungsergebnisse 4

3 Dynamik der untersuchten Sturmflutereignisse **5**
3.1 Windsituation 5
3.1.1 Windfelder 5
3.1.2 Windstatistik 8
3.2 Windstau 11
3.3 Oberwasser 13

4 Aufbau und Verifikation der Sturmflutmodelle **14**
4.1 Allgemeines 14
4.2 Sturmflutmodell der Ems 17
4.3 Sturmflutmodell der Jade / Weser 21
4.4 Sturmflutmodell der Elbe 26

5 Ergebnisse der Systemvariationen **29**
5.1 Oberwassereinfluss 29
5.2 Topographieeinfluss 33
5.3 Windeinfluss 36
5.4 Energie / Durchfluss 38
5.4.1 Durchflüsse 39
5.4.2 Energetische Größen 45

6 Bewertung der Ergebnisse **59**

7 Zusammenfassung und Ausblick **62**

Literatur **65**

1 Ziel des Forschungsvorhabens

Die Höhen und Dauern der Sturmfluten in den deutschen Ästuarien werden nicht ausschließlich durch die astronomischen Gezeiten, Fernwellen oder meteorologische Verhältnisse (Windstau) über der Nordsee, sondern auch durch die lokale Tiefenstruktur bzw. räumliche Ausrichtung zur Hauptwindrichtung des Ästuars sowie durch das jeweilige örtliche Windfeld selbst geprägt.

Die instationären, nichtlinearen hydrodynamischen Prozesse in einem Ästuar während einer Sturmflut sollen im Rahmen einer Systemanalyse mit einem hydrodynamisch-numerischen (HN)-Modell untersucht werden. Hierbei sollen charakteristische Sturmflutereignisse auf der Grundlage verschiedener Systemzustände simuliert werden.

Als Einflussfaktoren auf die Sturmflutwasserstände in einem Ästuar lassen sich hauptsächlich folgende Vorgänge nennen:

- Gezeitendynamik und Windstau in der Deutschen Bucht,
- lokale Windwirkung innerhalb des Ästuars und
- veränderlicher Oberwasserzufluss.

Durch sinnvolle Variation und Kombination dieser Einflussgrößen lassen sich die unterschiedlichen Sturmflutcharakteristiken der drei deutschen Ästuare **Ems**, **Jade-Weser** und **Elbe** berechnen.

In den vergangenen Jahren und Jahrzehnten ist der Verlauf von historischen Sturmfluten entlang der Deutschen Bucht und in den Ästuaren eingehend mit statistischen Methoden untersucht worden, um Erkenntnisse für die Vorhersage von Sturmfluten zu gewinnen, um Folgerungen für den Küstenschutz zu ziehen, aber auch um Trends der Scheitelwasserstände und Laufzeiten zu finden, die auf langfristige Entwicklungen hindeuten.

2 Konzeptionelle Vorgehensweise

2.1 Grundlagen des systemanalytischen Ansatzes

Die wissenschaftlich-technischen Arbeitsziele lassen sich nach folgenden Einflussgrößen klassifizieren:

1. *Gezeiten und Wind in der Deutschen Bucht:*
   Windstärke, Winddauer, Windrichtung, Dynamik des Wettergeschehens sowie die Überlagerung mit der astronomischen Gezeit erzeugen sehr variable Sturmflutabläufe in den räumlich differenzierten Ästuaren.

2. *Örtlicher Wind:*
   Die durch den lokalen Wind erzeugten Wirkungen auf die Sturmflut im Inneren des Ästuars sind signifikant und somit nicht zu vernachlässigen.

3. *Oberwasser:*
   Besonders in den Oberläufen der Ästuare ist ein enger Zusammenhang zwischen dem Sturmflutwasserstand und dem Oberwasserzufluss zu beobachten. Wenn sich durch anhaltende, erhöhte Niederschläge bedingte hohe Oberwasserzuflüsse mit Wind in Sturmstärke überlagern, kommt es zu besonders hohen Wasserständen.

4. *Topographie:*
   Antropogene Eingriffe in die Topographie eines Ästuars wie z. B.: die Verkleinerung des Flutraumes durch Eindeichungen oder Fahrrinnenvertiefungen sollen bezüglich der daraus möglichen resultierenden unterschiedlichen Sturmflutwasserstände gegenübergestellt werden.

Die verschiedenen Sturmflutereignisse sollen jeweils separat für die drei Untersuchungsgebiete Ems, Jade-Weser und Elbe berechnet werden, weil für jedes Ästuar unterschiedliche Systemzustände bzw. Sturmflutcharakteristiken massgebend sind.

Bei der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde der nachfolgende Ablauf eingehalten:

- Auswahl der für die Untersuchung geeigneten historischen Sturmfluten in Zusammenarbeit mit dem DWD,
- Bereitstellung der Topographieinformationen zur Modellerstellung,
- Bereitstellung aller benötigten Anfangs- und Randwerte wie Tidewasserstände, Oberwasserzufluss, (modellierte) Windfelder,
- Numerische Simulation einer Sturmflut mit Vergleich der berechneten Daten mit Messdaten zur Verifikation,

- Bestimmung des Systemverhaltens durch Variation bzw. Kombination von:
  - Topographie,
  - Windverhältnissen,
  - Oberwasserzufluss,
  - Richtung, Größe und Dauer des Sturmes,
  - Zeitliches Zusammentreffen zw. Sturm und astronomischer Tide sowie
  - Berechnung verschiedener historischer Sturmfluten.

In Zusammenarbeit mit dem KFKI-Projekt „Windstauanalysen zur Änderung des Sturmflutklimas in Nord- und Ostsee“ Siefert, Gönnert [Siefert, W. und Gönnert, G., 1996] wurden die Sturmfluten vom 3./4.01.1976 und vom 28.1.1994 ausgewählt. Sie stehen beispielhaft für jeweils eine Sturmflut mit steiler Windstaukurve und mittlerem Oberwasser (3./4.1.1976) bzw. für eine Sturmflut mit fülliger Windstaukurve und hohem Oberwasser (28.1.1994).

Um die vorgenannten Ziele erreichen zu können wurde ein Arbeitsplan erstellt, bei dem die Anzahl und Notwendigkeit der Variationsrechnung bestimmt wurde. Die so entstandene Übersicht der berechneten Varianten für ein Sturmflutereignis zeigt die Tabelle 1.

Anzahl der Varianten		Ems	Jade/Weser	Elbe	Bemerkungen
1	astronomische Tide	1	1	1	Vergleich f. Energieauswertungen
2	gelaufene Sturmflut	2	2	2	mit/ohne regionalem Windfeld
3	Oberwasser	2	2	2	kleines/grosses OW (MNQ, HHQ)
4	Topographie	4	4	4	Flutraum- und Tiefenvariation
5	Wind	3	3	3	Erhöhung, Glättung u. Drehung [1]
Summe		12	12	12	d. h. 36 Rechenläufe pro Sturmflut

Tabelle 1: Übersicht der berechneten Varianten für eine Sturmflut

[1] Bei der Drehung des Windfeldes wurden z. T. mehrere Rechenläufe durchgeführt

2.2 Methoden zur Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Der Ablauf zur Bewertung der Simulationsergebnisse folgt einer logischen Reihenfolge:

- Auswertung der Ergebnisse
- Darstellung der Ergebnisse
- Vergleich der Ergebnisse
- Zusammenstellung
- abschließende Analyse

Neben der üblichen Darstellung von Sturmflutscheitelwasserständen in flächenhafter Form (z.B.: Abbildung 13 auf Seite 25) sowie als Zeitreihe für ausgewählte Orte (z.B.: Abbildungen 10 auf Seite 20 für die Ems, Abbildung 12 auf Seite 24 für die Weser und Abbildung 15 auf Seite 28 für die Elbe) sollen hier auch Auswertungen von Scheitelwasserständen entlang von Profilen erfolgen. Hierdurch werden die Ergebnisse konzentriert und übersichtlich dokumentiert.

Die Sturmflutscheitelwasserstände treten im Verlauf der Sturmflut nicht zeitgleich entlang des Ästuars ein, sondern hängen vom dynamischen Verlauf der jeweiligen Sturmflut ab. Aus diesem Grunde müssen die Extremwerte durch ein nachfolgendes Analyseprogramm berechnet werden. Das in der BAW entwickelte Analyseverfahren LZKWF dient zur Berechnung der maximalen, nicht zur gleichen Zeit auftretenden Sturmflutscheitelwasserstände, der Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände, der Hochwasserdauer sowie der maximalen Steiggeschwindigkeiten.

Die Auswertung dieser Kennwerte entlang von vorgegebenen Profilen, hier Längsprofile in der Achse der Fahrrinne erfolgte mit Hilfe des Programmes Xtrlq2.

Zur Berechnung der querschnittsintegrierten Größen, wie Durchfluss und Geschwindigkeit wurde das Programm DidaMintQ verwendet.

Weitergehende Beschreibungen und Beispiele sind über die Homepage der BAW unter `http://www.hamburg.baw.de/` dokumentiert

3 Dynamik der untersuchten Sturmflutereignisse

3.1 Windsituation

3.1.1 Windfelder

Die Windsituation im Gebiet der Nordsee bzw. der Deutschen Bucht wird durch die Zugbahnen, der dynamischen Entwicklung des Kerndruckes, der Druckgradienten sowie der Ausdehnung der Tiefdruckgebiete bestimmt.

Bei der Simulation von Sturmfluten ist die direkte Wirkung des Windes von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung und Höhe der Wasserstände in den Ästuaren. Da Windmessungen nur an vereinzelten Messpositionen existieren, wird damit die räumliche / zeitliche Variabilität der Windstärke und -richtung nicht ausreichend erfasst.

Die zur Berücksichtigung der Windwirkung benötigte flächenhafte Verteilung der Windvektoren über dem Untersuchungsgebiet kann nach verschiedenen Verfahren durchgeführt werden; z. B:

1. Interpolation (Extrapolation) anhand von einzelnen Messpositionen oder
2. meteorologische Ausgleichsrechnung unter Zuhilfenahme von Messpositionen sowie der unterschiedlichen Rauhigkeiten zwischen Land und Wasser (hier MKW-Modell des DWD).

Hierzu wird auf Abbildung 2 auf Seite 7 das regionale Windfeld exemplarisch dargestellt, wenn es nur aus Messwerten an drei Stationen interpoliert / extrapoliert wird. Als Vergleich dazu wird für den gleichen Zeitpunkt das vom DWD mit Hilfe des MKW-Modells errechnete Windfeld auf Abbildung 3 auf Seite 7 gegenübergestellt (vergleiche →*DWD-Bericht*). Hieraus wird klar ersichtlich, dass die berechneten Windfelder die lokalen / regionalen Gegebenheiten (Land / Wasserverteilung, Abschattung hinter Inseln und Ortschaften ...) naturähnlicher beschreiben, als es bei der blo$\check{s}$en Interpolation / Extrapolation von Einzelmessungen der Fall ist.

Aus diesen Gründen war die Berechnung der raum / zeitvariablen Windfelder durch den DWD für den Erfolg dieses Forschungsprojektes notwendig. Eine ausführliche Beschreibung zur Theorie und zur Anwendung auf die Ermittlung der Windfelder für die deutschen Ästuare wird in dem Bericht von [Schmidt, H. und Behrens, K., 1998] gegeben →*DWD-Bericht*.

Auf der Abbildung 1 soll prinzipiell das Zusammenwirken von meteorologischem Netz und dem hydrodynamischen Modell zur Sturmflutsimulation am Beispiel der Ems demonstriert werden.

Das met. Gitter überdeckt das Sturmflutmodellgebiet vollständig. Die dargestellte Auflösung von 5 km wird nur bei der Interpolation (Extrapolation) von Windmesswerten verwendet. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wird bei jedem Rechnezeitschritt auf die vom DWD mit Hilfe des MKW in zweistündigem Intervall berechneten Windfelder zurückgegriffen. Von diesen meteorologischen Gitterzellen werden zeitabhängig die Windvektoren auf die darunterliegenden Rechenpunkte des HN-Modells übernommen.
Die meteorologische Gitterweite beträgt für das Ems- und das Jade / Weserästuar 250 Meter und für das Elbästuar 450 Meter.

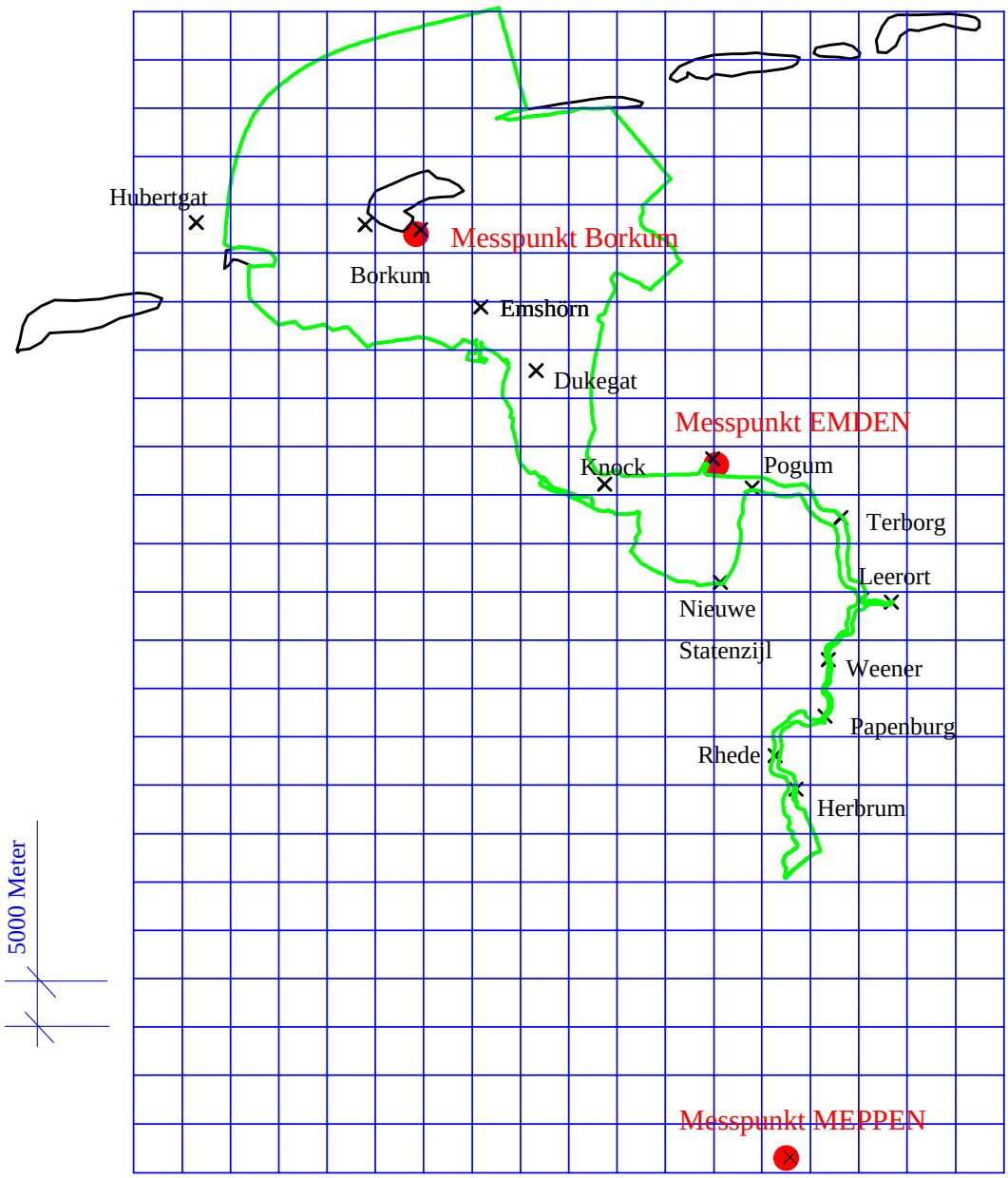


Abbildung 1: Meteorologisches Netz des Emsästuars

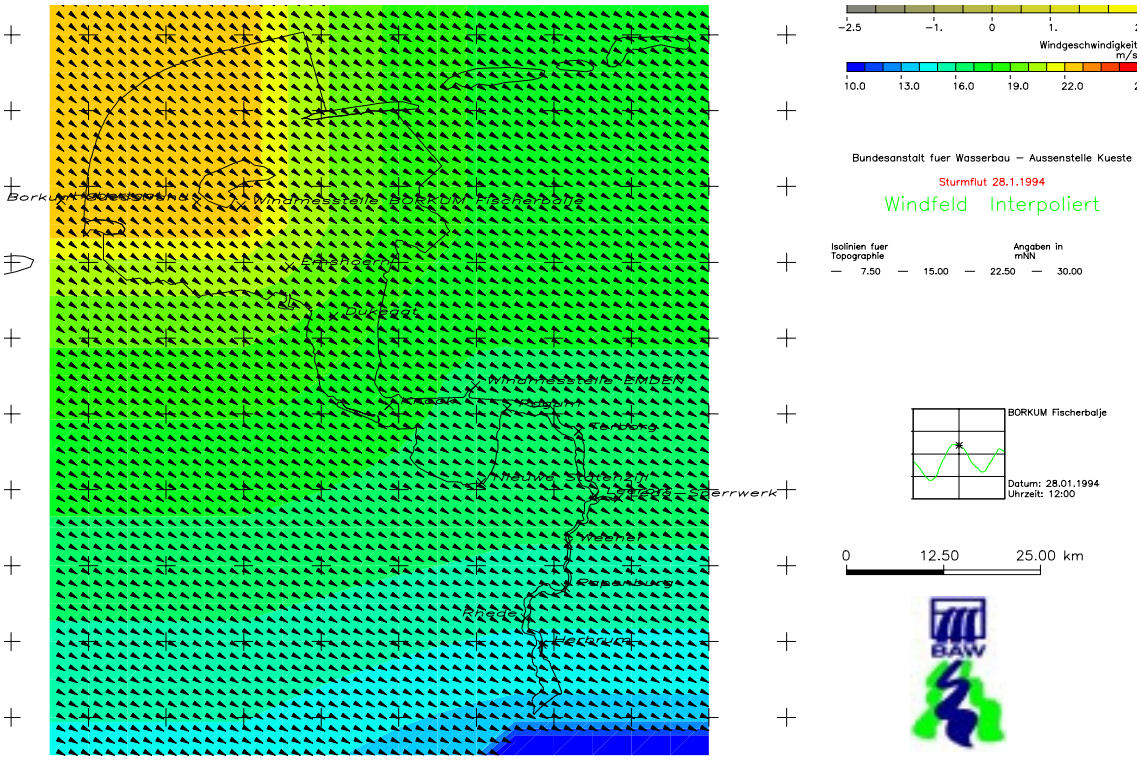


Abbildung 2: Aus drei Messpunkten interpoliertes Windfeld 28.1.1994 12 Uhr

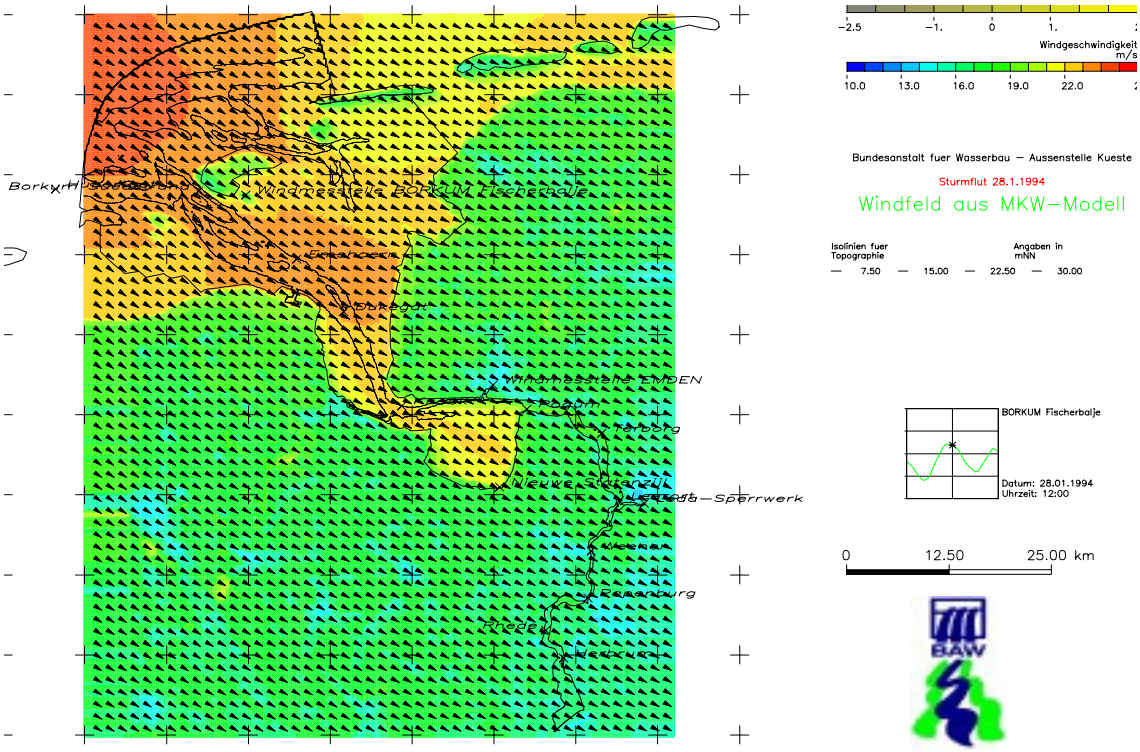


Abbildung 3: Mit dem MKW-Modell berechnetes Windfeld 28.1.1994 12 Uhr

3.1.2 Windstatistik

Um sowohl die berechneten (MKW)-Windfelder als auch Windmesswerte statistisch auswerten und darstellen zu können, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes jeweils das Programm (LZKAF bzw. METDIDA) eingesetzt.

Detaillierte Beschreibungen zu den Programmen *LZKAF* sowie *METDIDA* befinden sich auf der *homepage der BAW-AK.*

Eine weitergehende Beschreibung zur Darstellung der Windfelder ist in der Supercomputing News 1/98 (Cords, A. und Rudolph, E., 1998) sowie zur Analyse der Windfelder in der Supercomputing News 1/99 (Plüß, A. und Schrödter, D., 1999) der BAW gegeben.

Mit Hilfe des Windstatistikprogrammes *LZKAF* können für den Analysezeitraum folgenden Größen ermittelt werden:

- maximale Windgeschwindigkeit
- Eintrittszeit der maximalen Windgeschwindigkeit
- Dauer hoher Windgeschwindigkeit
- Dauer niedriger Windgeschwindigkeit
- Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit

Beispielhaft werden die aus dem MKW-Datensatz analysierten maximalen Windgeschwindigkeiten der Sturmflut vom Januar 1994 für das Emsästuar auf Abbildung 4 auf der nächsten Seite dargestellt. Hierauf ist deutlich die Abschattung der Insel Borkum sowie die geringere Reibung auf dem Wasser im Vergleich zum Land und damit erhöhten Windgeschwindigkeiten im Mündungsbereich der Ems (Dukegat) bis hin zum Dollart erkennbar.

Für weitere Informationen siehe →*PDF-Dokument Windfeldstatistik*

Bei der Analyse der Dauer hoher Windgeschwindigkeiten ($W > 15$ m/s) zeigt sich auf Abbildung 5 auf Seite 10, dass im Mündungsbereich der Ems bis hinein in den Dollart hohe Windgeschwindigkeiten von mehr als acht Stunden herrschen.

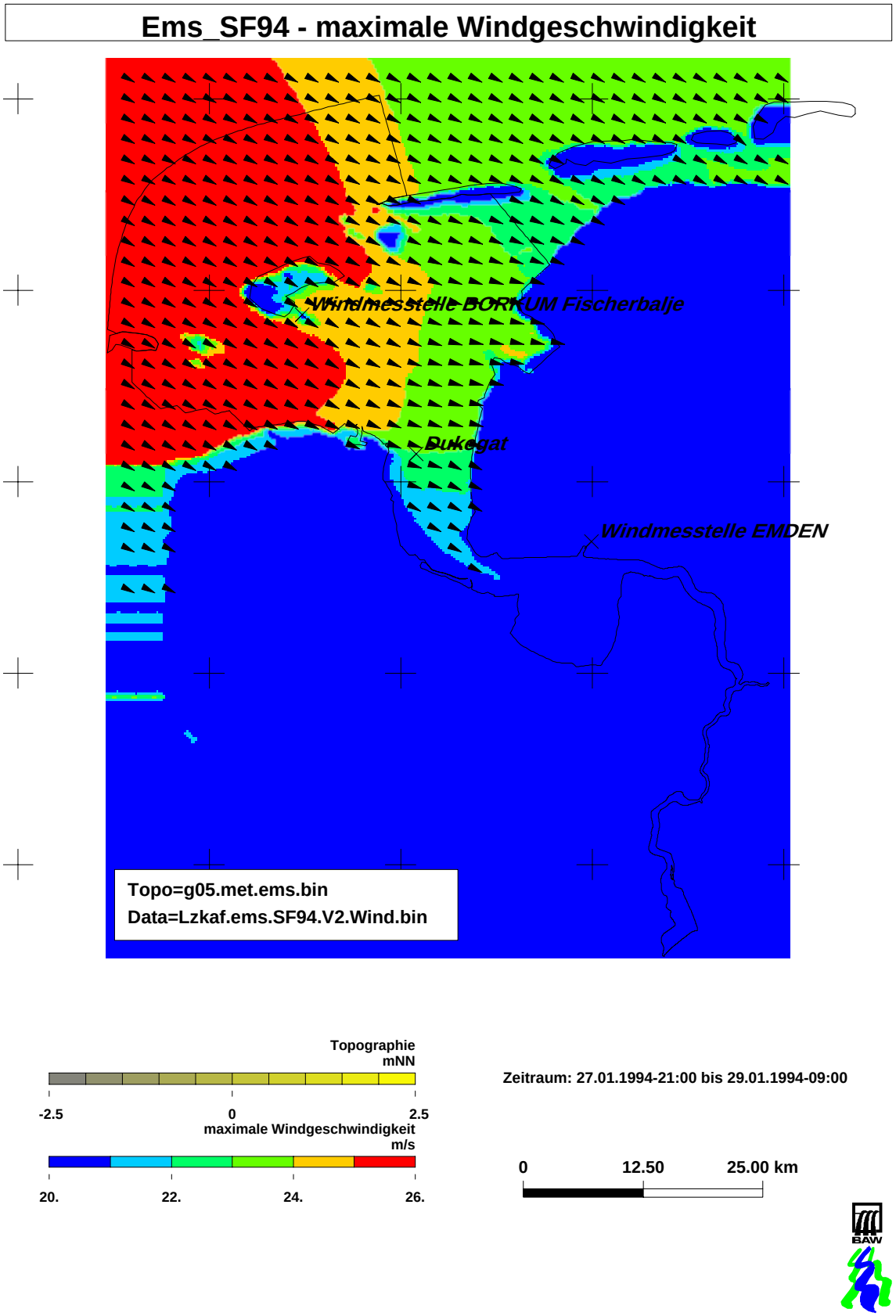


Abbildung 4: Analyse der maximalen Windgeschwindigkeiten in der Ems im Verlauf der Sturmflut vom Januar 1994

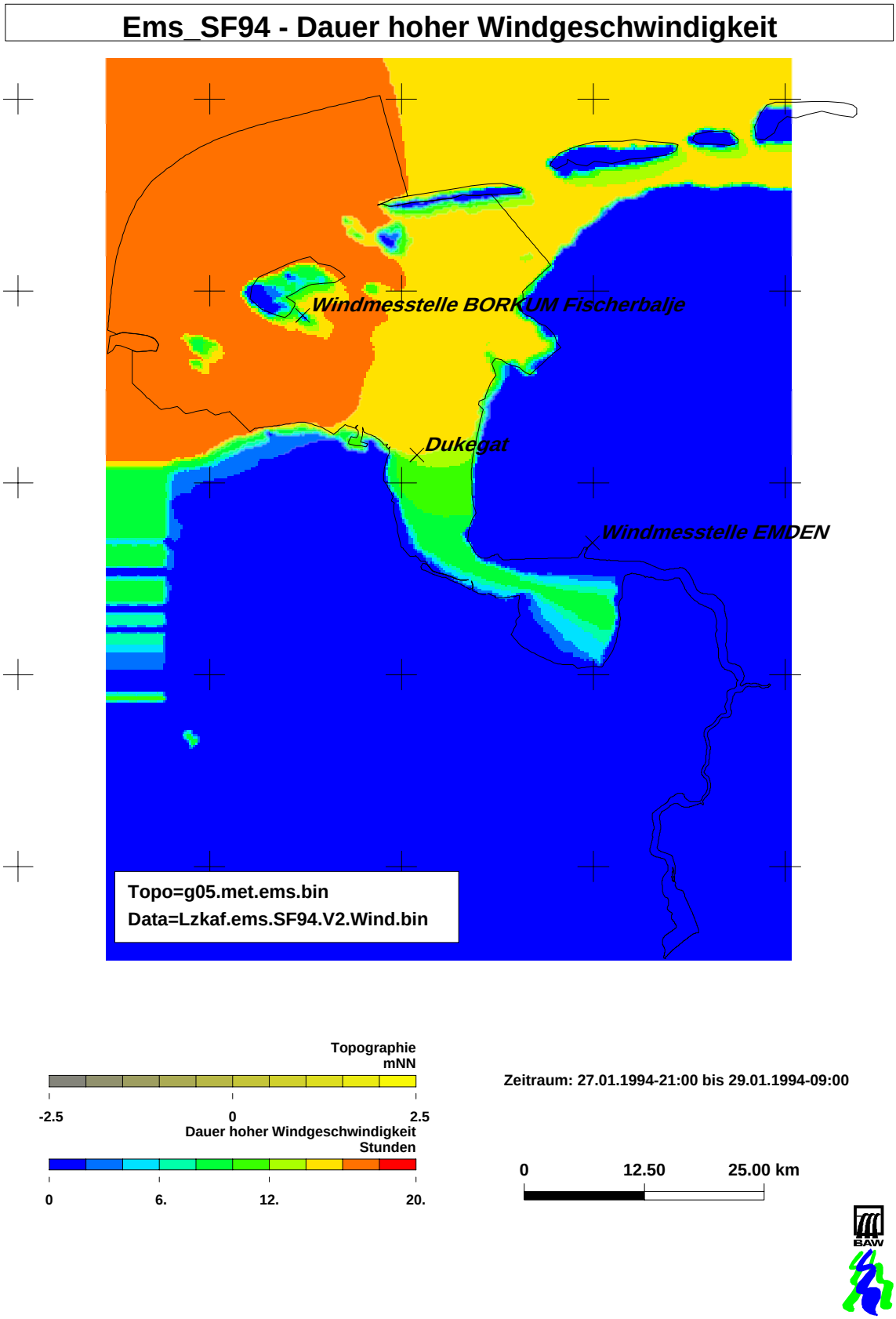


Abbildung 5: Analyse der Dauer hoher Windgeschwindigkeiten (W>15 m/s) in der Ems im Verlauf der Sturmflut vom Januar 1994

3.2 Wasserstandsentwicklung am Rand zur Deutschen Bucht

Bei Sturmfluten verändern sich die durch die Tide geprägten, periodisch ablaufenden Wasserstandsverhältnisse. Es werden höhere Wasserstände erreicht, als es bei der normal vorhandenen Tide ohne Windeinfluss der Fall gewesen wäre. Die Differenz zwischen den Wasserstandsentwicklungen bei Sturmflut und bei Tiden ohne Windeinfluss wird als (Wind)-Staukurve bezeichnet. Als Beispiel zur Berechnung einer Staukurve jeweils mit einer „mittleren“ und einer berechneten astronomischen Tide sind auf Abbildung 6 die Staukurven für den Pegel Borkum-Fischerbalje dargestellt.

Am seeseitigen, durchströmten Rand der Ästuarmodelle zur Nordsee (vergleiche Abbildung 8 auf Seite 16) müssen bei der Simulation von Sturmfluten die Wasserstandswerte zeitvariabel eingesteuert werden. Diese enthalten bereits den Windstau der von der Nordsee / Deutschen Bucht herrührt. Der weitere Stau innerhalb der Ästuare (Untersuchungsgebiet) wird durch den hier vorgegebenen regionalen Wind bewirkt.

Der Vergleich zwischen den steilen Staukurven im Januar 1976 und den flachen Staukurven im Januar 1994 wird auf Abbildung 7 für Ems, Jade / Weser und Elbe gegeben. Deutlich ist der Anstieg der Windstaukurven für beide Sturmflutereignisse von der Ems über die Jade / Weser bis hin zur Elbmündung erkennbar. Dieses erklärt sich aus den aus nordwestlichen Richtungen wehenden Winden bei hohen Sturmfluten in der inneren Deutschen Bucht.

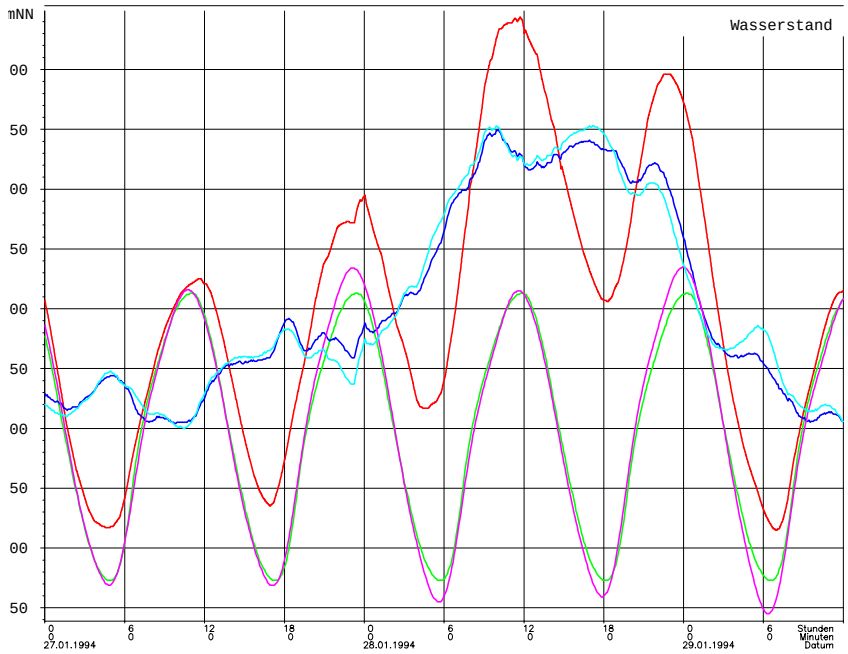


Abbildung 6: Ermittlung der Staukurven am Pegel Borkum als Differenz zwischen der Messung und der Tide ohne Windeinfluss vom Januar 1994:
1. Staukurve berechnet aus einer langjährig gemittelten Tide
2. Staukurve berechnet aus einer astronomischen Tide

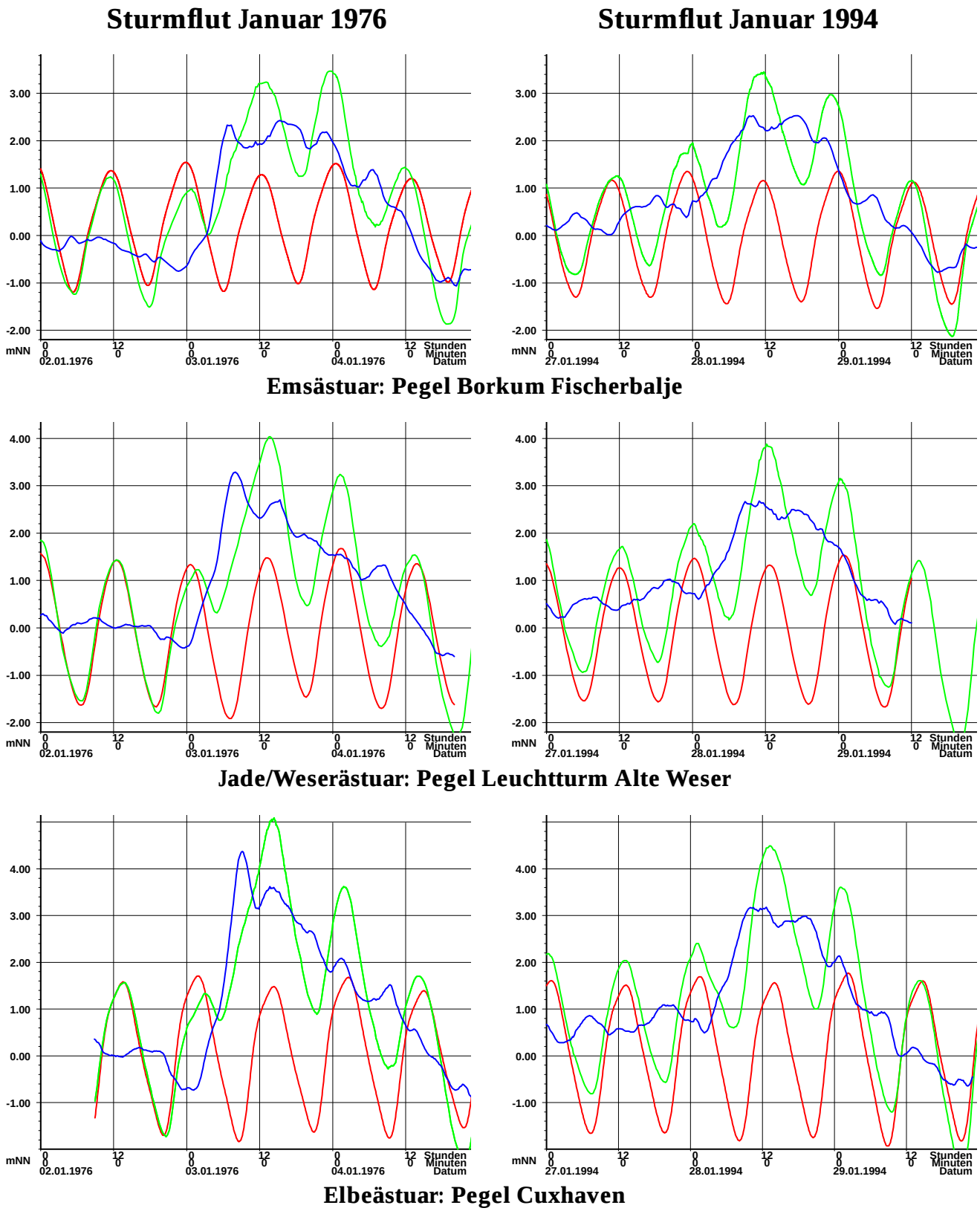


Abbildung 7: Übersicht der Staukurven, als Differenz zwischen der Sturmtide und der astronomischen Tide, für die Sturmfluten vom Januar 1976 und 1994

3.3 Oberwasser

Besonders in den Oberläufen der Ästuare ist ein enger Zusammenhang zwischen dem Sturmflutwasserstand und dem Oberwasserzufluss zu beobachten. Wenn sich durch anhaltende, erhöhte Niederschläge bedingte hohe Oberwassermengen mit Sturmtiden überlagern, kommt es zu besonders hohen Sturmflutwasserständen in den Ästuaren.

Der Einfluss veränderter Oberwassermengen auf die Sturmflutwasserstände wird anhand der untersuchten Sturmfluten für die drei Ästuare berechnet. Hierfür werden die eingetretenen Sturmflutwasserstände den Wasserständen gegenübergestellt, die den simulierten Szenarien

- mittleres niedriges Oberwasser (MNQ_o)
- bisher höchstes gemessenes Oberwasser (HHQ_o)

entsprechen.

Die Größen der Oberwassermengen der zwei berechneten Sturmfluten sowie der Szenarien MNQ_o und HHQ_o sind in der Tabelle 2 für die drei untersuchten Ästuare aufgetragen. Hierauf zeigen sich die deutlich geringeren Oberwassermengen bei der Sturmflut vom Januar 1976 im Vergleich zu 1994.

Oberwasser $[m^3/s]$	**Ems**		**Jade/Weser**		**Elbe**	
Sturmflutereignis	28.01.94	3./4.1.76	28.01.94	3./4.1.76	28.01.94	3./4.1.76
OW vom 28.01.1994	348		1140		1356	
OW vom 3./4.1.1976		166		249		500
MNQ_o	38	38	80	80	277	277
HHQ_o	1200	1200	3500	3500	3620	3620

Tabelle 2: Übersicht der berechneten Variationen des Oberwasserzuflusses

4 Aufbau und Verifikation der Sturmflutmodelle

4.1 Allgemeines

In einer Sturmfluttopographie müssen alle Flächen enthalten sein, die während der unter Umständen extrem hohen Sturmflutscheitelwasserstände überflutet werden, damit für eine Sturmflutsimulation das gesamte Gebiet eines Ästuars zwischen dem seeseitige Rand und der Tidegrenze des Flusses (Wehr, Sohlsprung) bis zur Höhe des jeweiligen Sturmflutwasserstandes modellseitig berücksichtigt werden kann.

Dieses bedeutet für die Nachbildung der Topographie und der Ausdehnung der Modellgrenzen andere Anforderungen, als sie für den Betrieb von reinen Tidemodellen der Fall sind. Hier müssen z. B. die Nebenflüsse in das Modell mit eingearbeitet sein und häufig reichen die Tidemodelle in ihrer räumlichen Ausdehnung nur bis zur Tidehochwassergrenze.

Da zu Zeiten einer Sturmflut alle Nebenflüsse der Ästuare von Ems, Jade / Weser und Elbe durch Sperrwerke von den jeweiligen Ästuaren abgesperrt sind, werden diese in den Modelltopographien nur bis zum jeweiligen Sperrwerk berücksichtigt. Um sicher zu stellen, dass alle Überflutungsfächen in der Modelltopographie enthalten sind, reicht diese jeweils bis zur Deichlinie.

Bei den hier verwendeten mathematischen Verfahren TRIM-2D bzw. TELEMAC2D handelt es sich um international anerkannte Verfahren.

`TRIM-2D` (Casulli, 1990 und Cheng, R.T. et al., 1993) ist ein 2-dimensionales Finite Differenzen Modell, das die Flachwassergleichungen löst. Das Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen ist möglich. Eine detaillierte Modellbeschreibung bietet das Validierungsdokument HN - Verfahren `TRIM-2D` (BAW, 1998).

`TELEMAC2D` ist ein 2-dimensionales Finite Element Modell, das die Flachwassergleichungen auf Grundlage unstrukturierte Dreiecksnetze löst. Das Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen ist möglich. Das Modell wurde durch die *Electricité de France* erstellt und wird durch das *Laboratoire National d'Hydraulique* vertrieben. Eine detaillierte Modellbeschreibung geben Hervouet, J.M. and Van Haren, L., 1996.

Die Simulationssoftware TELEMAC2D wurde für dieses Forschungsprojekt um die Option zur Berücksichtigung von zeitvariablen Windfeldern (MKW-Wind) erweitert (vergleiche hierzu Plüß, 1997).

In beiden Modellverfahren wird der Impulseintrag aus der Atmosphäre durch die Windschubspannung $\vec{\tau}_{Wind}$ beschrieben:

$$\vec{\tau}_{Wind} = \rho_a \, C_D \, \vec{v}_{rel} \, |\vec{v}_{rel}|$$

Hierbei bezeichnet ρ_a die Dichte der Luft und $\vec{v}_{rel}$ ist definiert als Differenzgeschwindigkeit zwischen der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe $\vec{v}_{Wind,10}$ und der Strömungsgeschwindigkeit $\vec{v}$.

$$\vec{v}_{rel} = \vec{v}_{Wind,10} - \vec{v}$$

Der Impulsaustauschkoeffizient C_D wird gegeben durch

$$C_D = (a + b\,|\vec{v}_{rel}|)\,10^{-3}$$

wobei für a und b die von Smith, S.D. and Banke, E.G, 1975 vorgeschlagenen Werte

$$C_D = (0.63 + 0.066\,|\vec{v}_{rel}|)\,10^{-3}$$

verwendet werden. Die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe $\vec{v}_{Wind,10}$ wird mit dem meteorologischen Modell MKW berechnet (vergleiche Abschnitt 3.1.1 auf Seite 5 bzw. Schmidt, H. und Pätsch, J., 1984).

Zur Verifikation der berechneten Sturmflutereignisse wurden für alle drei Ästuare die Aufzeichnungen aller verfügbaren Pegelmessungen (Pegelschriebe) digitalisiert und mit den modellierten Wasserstandsverläufen verglichen.

Die Lage, Ausrichtung und seeseitigen Ränder der verwendeten Sturmflutästuarmodelle **Ems**, **Jade/Weser** und **Elbe** innerhalb der Deutschen Bucht werden auf Abbildung 8 gezeigt.

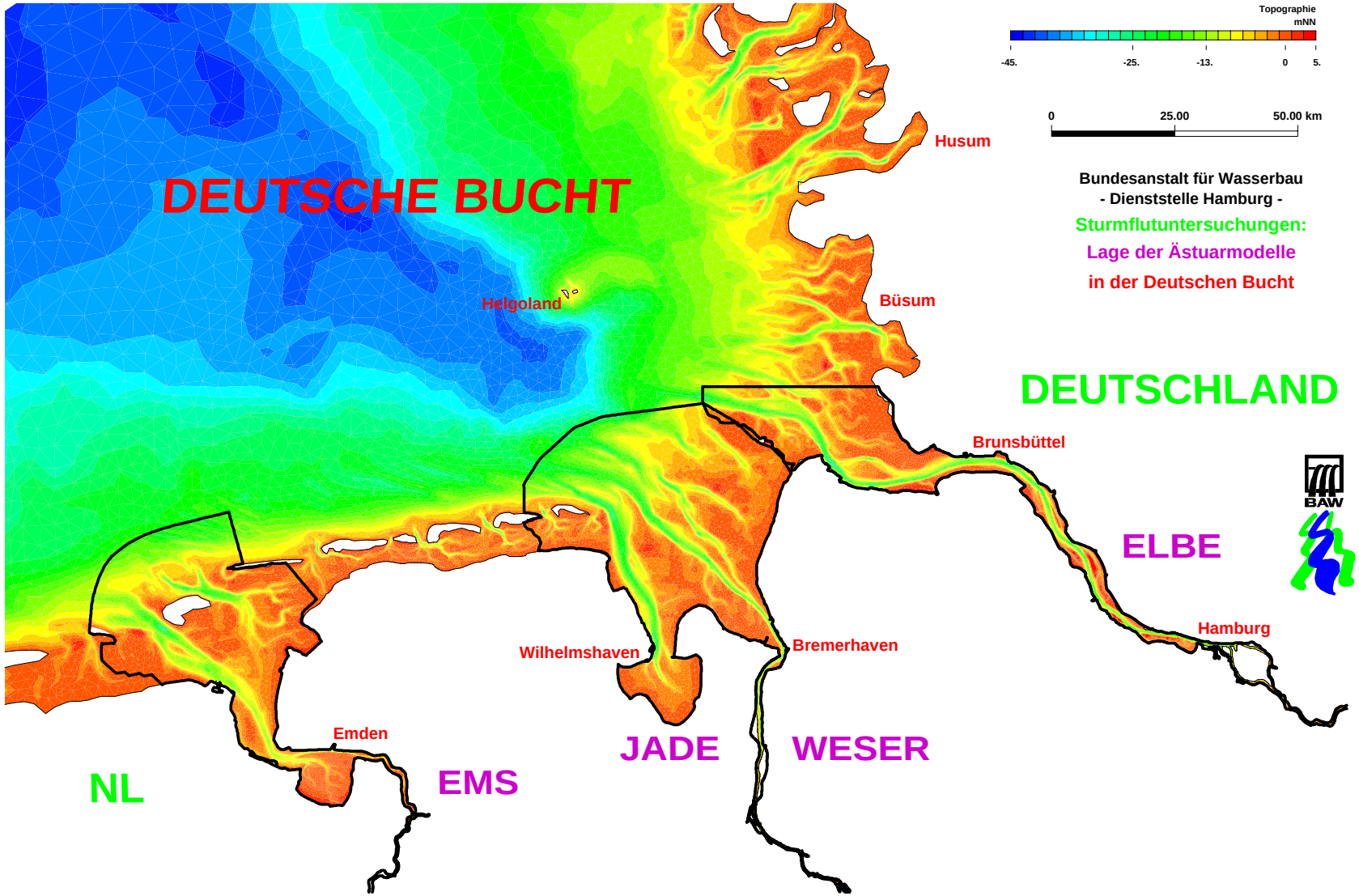


Abbildung 8: Lage der verwendeten Sturmflutästuarmodellmodelle Ems, Jade / Weser und Elbe in der Deutschen Bucht

4.2 Sturmflutmodell der Ems

Die Außenems erstreckt sich von Borkum über Dukegat und Knock bis in den Dollart südlich von Emden. Zwischen Dukegat und Knock verbreitert sich die Tiderinne der Ems nach Holland in die Bucht von Watum. Landwärts der Biegung bei Knock verengt und teilt sich die Ems in das Emder Fahrwasser in Richtung Emden bzw. Pogum, und südlich davon in den Dollart.

Die Tideems reicht stromauf des Dollart bei Pogum, über Leerort und Papenburg bis zur künstlichen Tidegrenze am Wehr Herbrum. Bei hohen Sturmflutwasserständen werden die Wehre Herbrum und Bollingerfähr gelegt und die Sturmtide überflutet den Bereich oberstrom Herbrum bis hinauf zum Küstenkanal. Aus diesem Grunde musste das vorhandene Topographiemodell der Ems um den Bereich oberstrom Herbrum einschliesslich der Vorländer erweitert werden. Da die Leda bei Sturmfluten durch das Ledasperrwerk östlich von Leerort geschützt wird, ist dieser Bereich nicht im Sturmflutmodell der Ems enthalten (vergleiche die Topographieabbildung 9 auf Seite 19).

Als Eingangsgrößen für die Sturmflutberechnung wurden die Topographie der Ems, der Oberwasserzufluss bei Versen, die Wasserstandsverläufe am seeseitigen Rand sowie die Windgeschwindigkeiten über dem Modellgebiet (vergleiche Abschnitt 3.1.1) verwendet.

Angaben zum Sturmflutmodell der Ems:

HN-Verfahren: TELEMAC2D (vergleiche 4.1)

Elemente/Punkte: $\sim$ 110.000 / $\sim$ 57.000

Maschenweite: 5,5 - 800 Meter im Dreiecknetz

Zeitschritt: 6 Sekunden

Zur Verifikation der berechneten Sturmflutereignisse wurden für das Emsästuar Wasserstandsmessungen an 12 Pegelorten für die beiden untersuchten Sturmfluten digitalisiert. Beispielhaft wird hier der berechnete Wasserstandsverlauf während der Sturmflut vom 28.01.1994 den Messwerten am Pegel Leerort/Ems gegenübergestellt. Sowohl der Sturmflutscheitelwasserstand als auch die Steig- und Fallgeschwindigkeiten werden durch das Modell zufriedenstellend nachgebildet.

Der Vergleich zwischen den gemessenen (magenta) und den modellierten Wasserständen (blau, unter Verwendung der mit MKW berechneten lokalen Windfelder, Referenzlauf) zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl in den Scheitelwasserständen (maximaler Hochwasserwert im Verlauf der Sturmflut) als auch im Tidestieg bzw. -fall (gesamter Wasserstandsverlauf) (Abbildung 10 auf Seite 20).

Die Abweichungen im Tideverlauf vom 28.01.1994 0:00 Uhr bis etwa 08:00 Uhr sind auf das Ledasperrwerk zurückzuführen. während der Modellrechnung war das Ledasperrwerk

geschlossen, in der Natur wurden hier jedoch vor der Sturmflut noch Sielzüge durchgeführt.

Zum Vergleich ist auf der Abbildung 10 auf Seite 20 zusätzlich der Wassserstandsverlauf ohne regionalen Wind über dem jeweiligen Ästuar (grün) und die astronomische Tide (rot) eingezeichnet. Hieraus wird deutlich, dass ohne zusätzlichen regionalen Wind über dem Ästuar die Wasserstände während des gesamten Sturmflutzeitraums mit rund 95 cm deutlich niedriger liegen als im Referenzlauf. Ein Vergleich mit der astronomischen Tide zeigt, dass im Sturmflutzeitraum nicht nur die Hoch- und Niedrigwasser, sondern auch ihre Eintrittszeiten verschoben sind.

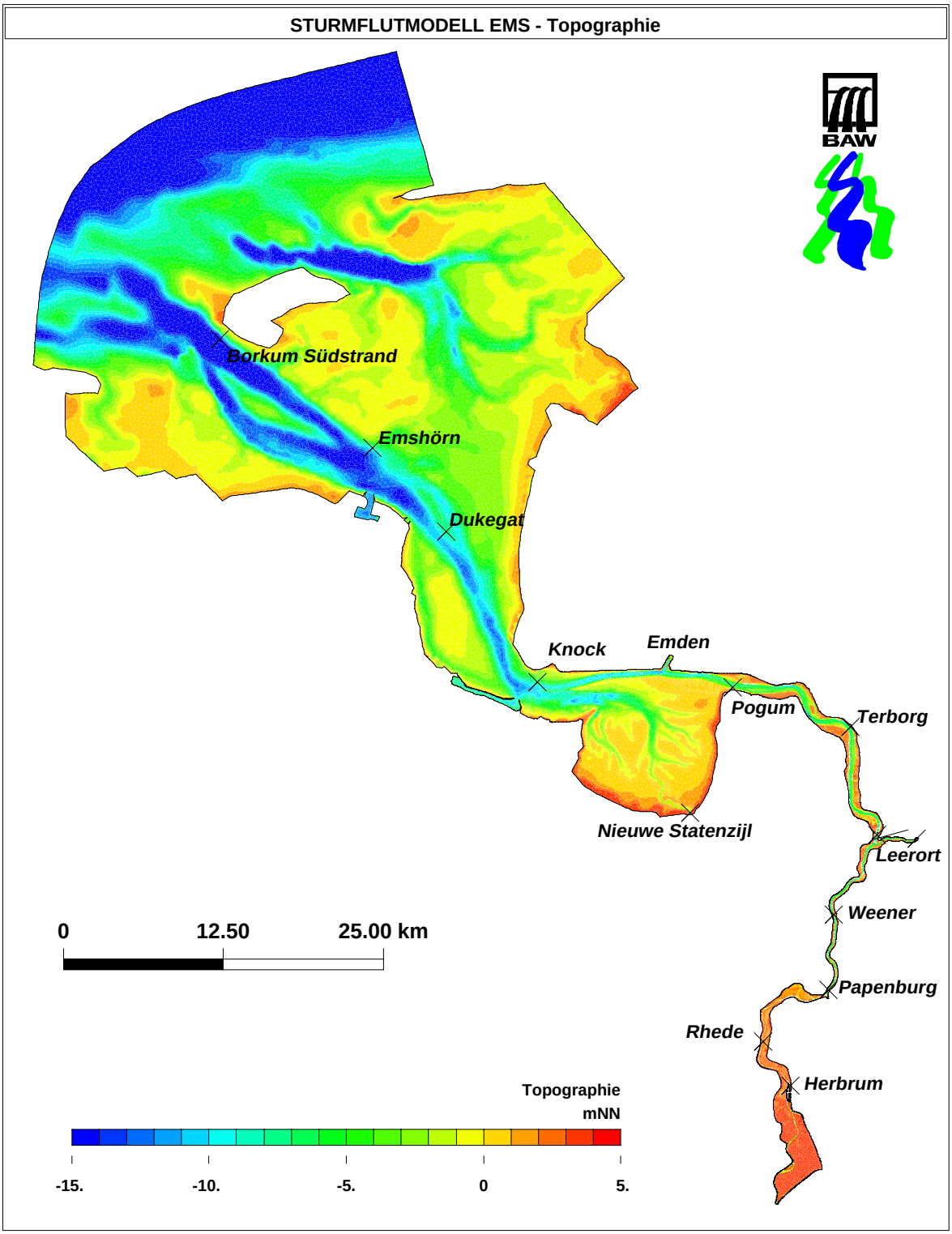


Abbildung 9: Tiefenverteilung im Sturmflutmodell der Ems

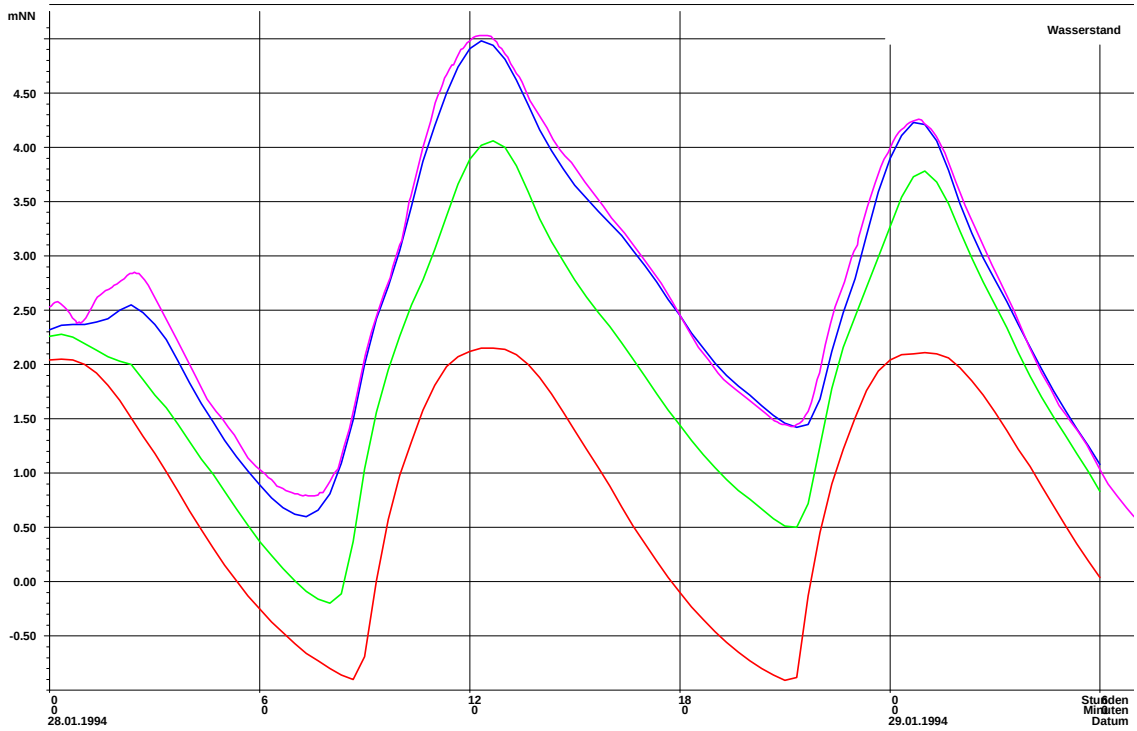


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen Wasserstandszeitreihe mit der Sturmflutsimulation sowie die Sturmflut ohne regionalen Windeinfluss und die astronomische Tide für den Pegel Leerort / Ems (Sturmflut vom 28.01.1994)

4.3 Sturmflutmodell der Jade/Weser

Grundlage für die Erstellung des Sturmflutmodells des Jade / Weser Ästuars war das *Modell des Jade-Weser Ästuars zur Berechnung der Sturmflutwasserstände für den SKN-14 m Ausbau der Außenweser von 1992* [BAW, 1994]. Der Mündungsbereich der Jade und der Weser wird von der Mellumplate bis zum Deich bei Butjadingen durch das Hohewegwatt getrennt. Es existiert so jeweils eine Haupttiderinne mit dem Jade- und dem Weserfahrwasser. Die Haupttiderinne in der Jade reicht von Wilhelmshaven, über Voslapp und Schillig bis um die Insel Wangerooge herum. Sie ist deutlich breiter, als die schmale Rinne in der Weser vom Leuchtturm Alte Weser, über Dwarsgat und Robbensüdsteert bis nach Bremerhaven. Stromauf von Bremerhaven krümmt sich das Fahrwasser erst sehr stark im Blexer Bogen und danach erneut bei Nordenham.

Zur Berücksichtigung der Überflutungsflächen im Weserästuar mussten zusätzlich die bei Sturmfluten überfluteten, höher als MTHw gelegenen Randbereiche mit in das Modell einbezogen werden. Hierfür wurden die Vorlandhöhen aus den Befliegungsdaten der Fa. *TOP_ SCAN* herangezogen. Als größte Überflutungsflächen sind hier die Luneplate, Tegeler Plate, Strohauser Plate sowie der Harrier Sand zu nennen.

Bei hohen Sturmflutwasserständen wird das Wehr Hemelingen gelegt und die Sturmtide überflutet den Bereich oberstrom von Bremen bis hinauf zum Flusspegel Dreye. Hier musste die Wesertopographie anhand von Karten ergänzt werden (vergleiche Abbildung 11).

Angaben zum Sturmflutmodell der Jade / Weser:

HN-Verfahren: TELEMAC2D

Elemente/Punkte: $\sim$ 106.000 / $\sim$ 55.500

Maschenweite: 22 - 850 Meter im Dreiecknetz

Zeitschritt: 6 Sekunden

Zur Verifikation der berechneten Sturmflutereignisse wurden für das Jade / Weserästuar Wasserstandsmessungen an 20 Pegelorten für die beiden untersuchten Sturmfluten digitalisiert. Beispielhaft wird hier der berechnete Wasserstandsverlauf während der Sturmflut vom 28.01.1994 den Messwerten am Pegel Brake / Unterweser gegenübergestellt (vergleiche Abbildung 12 auf Seite 24).

Der Vergleich zwischen den gemessenen (magenta) und den modellierten Wasserständen (blau, unter Verwendung der mit MKW berechneten lokalen Windfelder, Referenzlauf) zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl in den Scheitelwasserständen (maximaler Hochwasserwert im Verlauf der Sturmflut) als auch im Tidestieg bzw. -fall (gesamter Wasserstandsverlauf).

Zum Vergleich ist auf der Abbildung 12 auf Seite 24 zusätzlich der Wassserstandsverlauf ohne regionalen Wind über dem jeweiligen Ästuar (grün) und die astronomische Tide (rot) eingezeichnet. Hieraus wird deutlich, dass ohne zusätzlichen regionalen Wind über dem Ästuar die Wasserstände während des gesamten Sturmflutzeitraums mit rund 65 cm deutlich niedriger liegen als im Referenzlauf. Ein Vergleich mit der astronomischen Tide zeigt, dass im Sturmflutzeitraum nicht nur die Hoch- und Niedrigwasser, sondern auch ihre Eintrittszeiten verschoben sind.

Die flächenhafte Verteilung der aus der Berechnung analysierten maximalen (nicht zeitgleich auftretenden) Scheitelwasserstände in der Jade und im Mündungsgebiet der Weser zeigt die Abbildung 13.

Der aus nordwestlicher Richtung wehende Wind staut das Wasser z. B. im Jadebusen und im Blexer Bogen in südöstlicher Richtung an. Deutlich erkennbar ist das Abfallen der Scheitelwasserstände im Bereich der Blexer Reede zwischen Bremerhaven Alter Leuchtturm und Nordenham, da hier der Wind in etwa rechtwinkelig zur Stromachse verläuft. Dieses Absinken der Scheitelwasserstände zeigen auch die Auswertungen im Längsschnitt auf Abbildung 26 auf Seite 37.

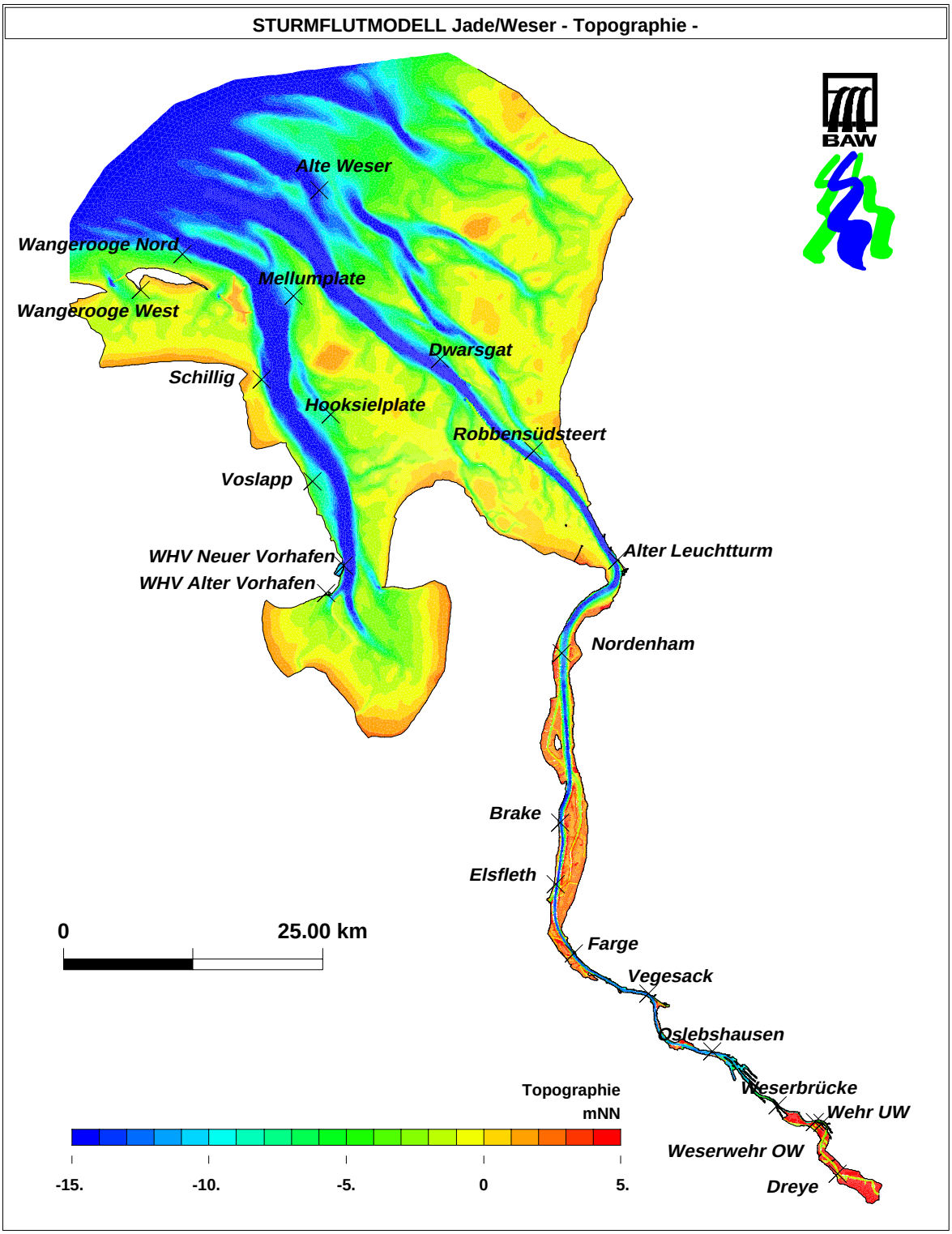


Abbildung 11: Tiefenverteilung im Sturmflutmodell der Jade / Weser

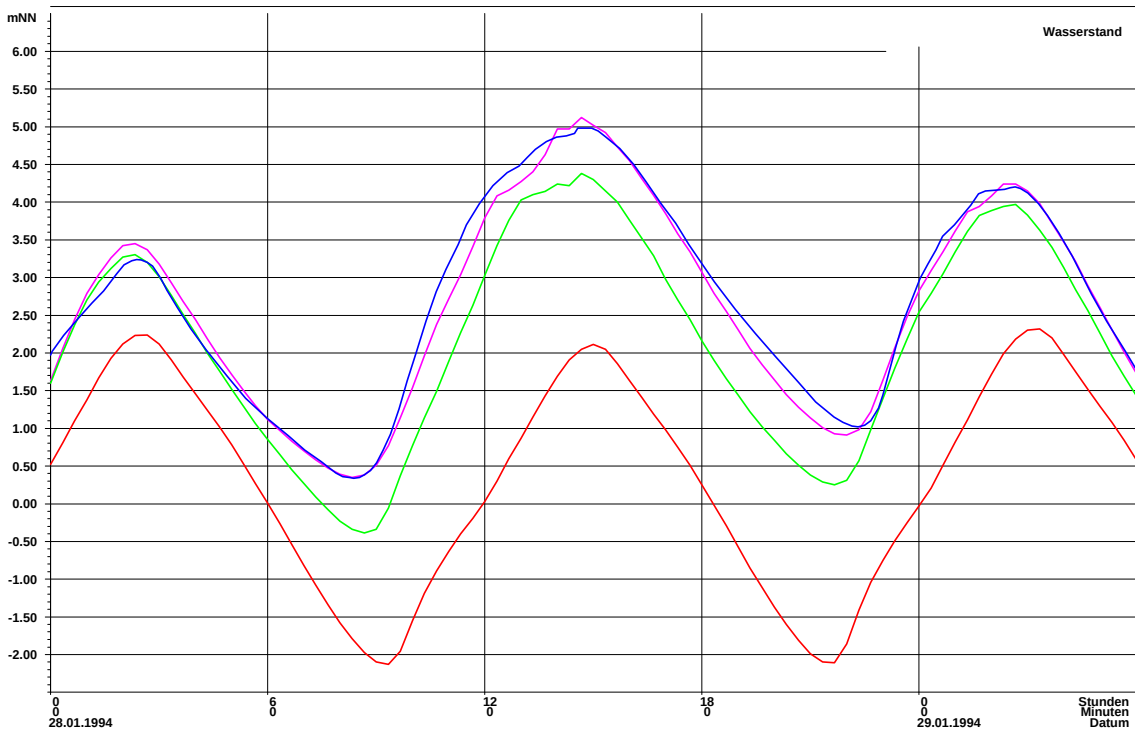


Abbildung 12: Vergleich der gemessenen Wasserstandszeitreihe mit der Sturmflutsimulation sowie die Sturmflut ohne regionalen Windeinfluss und die astronomische Tide für den Pegel Brake / Weser (Sturmflut vom 28.01.1994)

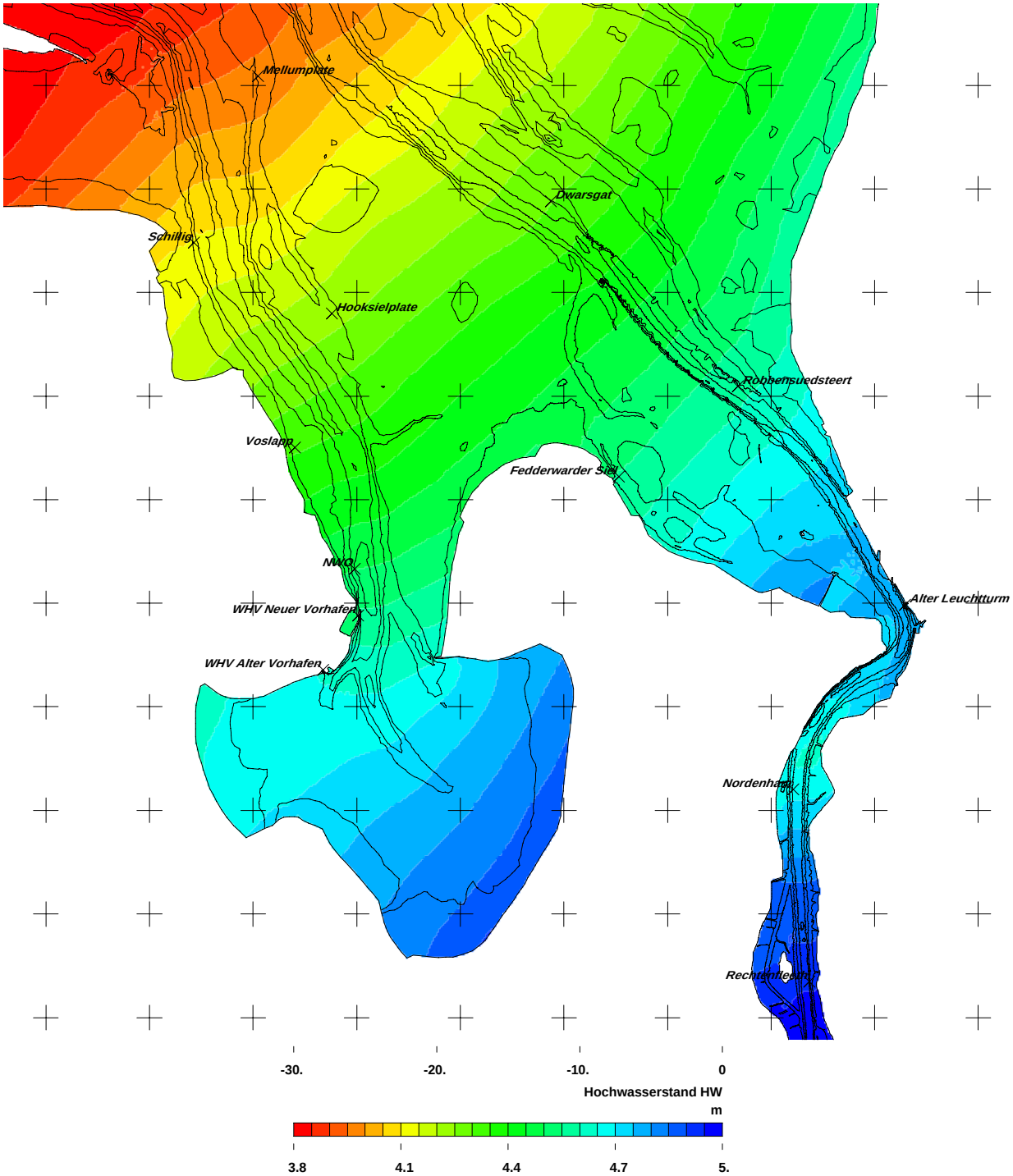


Abbildung 13: Verteilung der maximalen Sturmfluscheitelwasserstände in der Jade / Weser während der Sturmflut vom 28.01.1994

4.4 Sturmflutmodell der Elbe

In der Elbe kann der Einfluss der Tide auf die Wasserstände noch bis zu 140 km landeinwärts beobachtet werden. Bei mittleren Tide- und Oberwasserverhältnissen bildet das Wehr Geesthacht (Elbe km 586) die (künstliche) Grenze zwischen tidebeeinflusster und tideunbeeinflusster Elbe. Das Elbeästuar verengt sich von ca. 15 km Breite an der Mündung bei Cuxhaven im Westen auf ca. 300 m bei Geesthacht im Osten. Im Mündungsbereich ist die Elbe mehr als 20 m tief. Bis Hamburg hat die Fahrrinne eine Tiefe von ca. NN - 15 m, während die Seitenbereiche und Nebenelben deutlich flacher sind (siehe Abbildung 14 auf der nächsten Seite). Stromauf des Stromspaltungsgebietes in Hamburg nimmt die Tiefe dann bis Geesthacht auf ca. NN - 5 m ab.

Zur Simulation der Sturmfluten in der Elbe wurde das hydronumerische Modell TRIM-2D verwendet. Als Eingabegrößen werden die Topographie der Elbe (vgl. Abb. 14), der Oberwasserzufluss bei Bleckede (abgeleitet aus dem Oberwasserzufluss bei Neu Darchau, siehe auch Abschnitt 3.3 auf Seite 13), die Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand (abgeleitet aus den Messungen an den Pegeln Bake A und Bake Z, siehe auch Abschnitt 3.2 auf Seite 11), die Höhenlage des Wehres Geesthacht (Angaben zur Wehrstellung: WSA Lauenburg) sowie die Windgeschwindigkeit über dem Modellgebiet (vgl. auch Abschnitt 3.1 auf Seite 5) benötigt.

Bei hohem Oberwasserabfluss ($Q > 1100\ m^3/s$) und bei Sturmfluten wird das Wehr Geesthacht gelegt, so dass die Modelltopographie für Sturmflutuntersuchungen auch den Bereich oberstrom des Wehres Geesthacht (Abb. 14) als Flutraum beinhalten muss. Die Modelltopographie beschreibt den Zustand der Elbe 1992.

Das Gitternetz der Elbe für das Finite Differenzen Verfahren TRIM-2D kann zusammenfassend durch folgende Angaben beschrieben werden:

Größe des Gitternetzes:

- Anzahl der Gitterzellen Ost-West: 3232
- Anzahl der Gitterzellen Nord-Süd: 1582
- Gesamtzahl der aktiven Gitterzellen: 376000

räumliche Diskretisierung:

- Gitterweite Ost-West: $\Delta x = 50$ m
- Gitterweite Nord-Süd: $\Delta y = 50$ m

Für die Modellierung der hier vorgestellten Sturmflutuntersuchungen wurde ein Zeitschritt von $\Delta t = 30$ s verwendet.

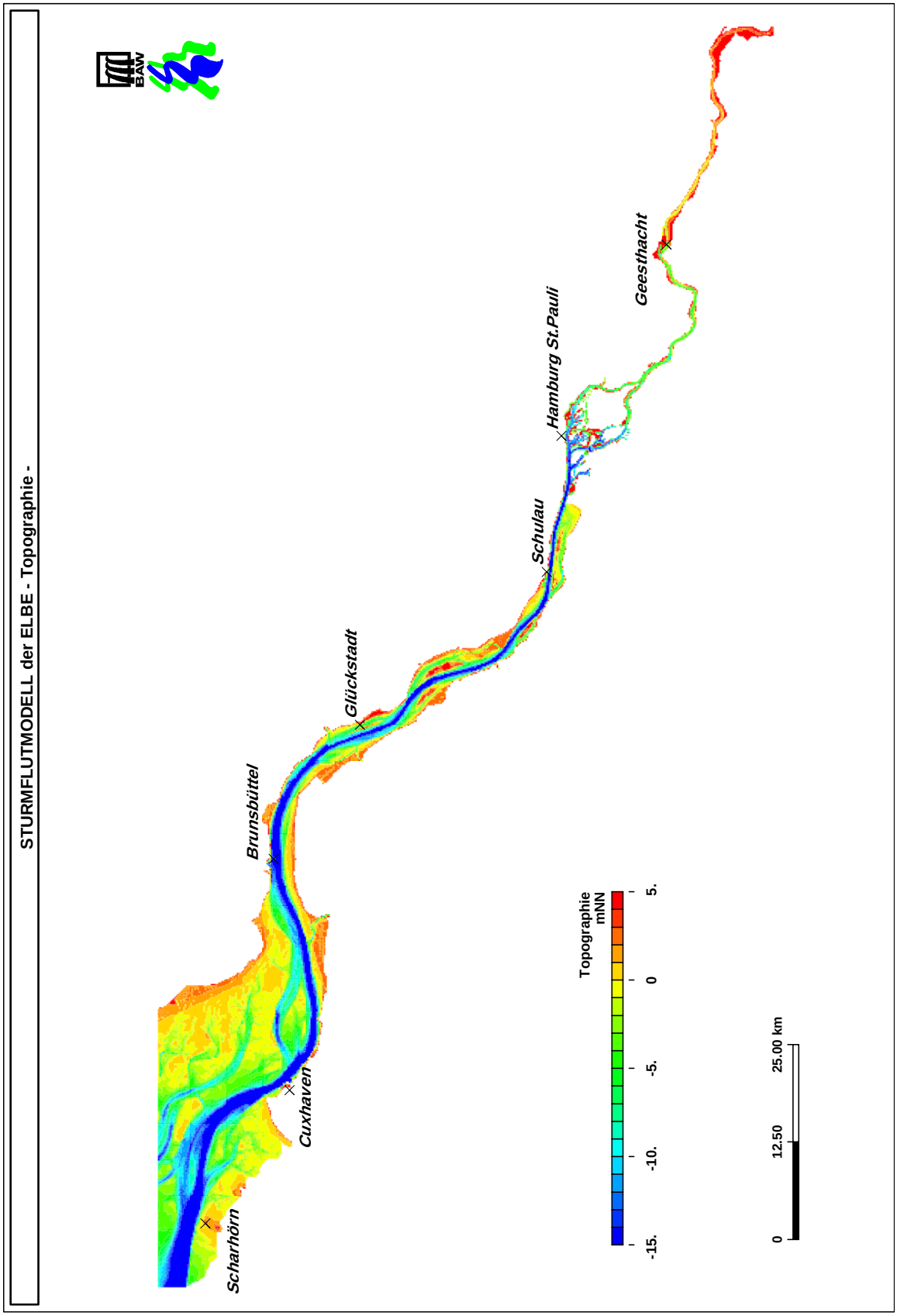


Abbildung 14: Tiefenverteilung im Sturmflutmodell der Elbe

Zur Verifikation der berechneten Sturmflutereignisse wurden die Modellergebnisse mit gemessenen Wasserständen verglichen. Beispielhaft ist hier der Wasserstandsverlauf am Pegel Schulau / Elbe (Abb. 15) während der Sturmflut vom 28.01.1994 dargestellt. Schulau (Elbe km 641) liegt ca. 80 km stromauf der Mündung der Elbe bei Cuxhaven (Elbe km 724).

Ein Vergleich zwischen den gemessenen (magenta) und den modellierten Wasserständen (blau, unter Verwendung der mit MKW berechneten lokalen Windfelder, Referenzlauf) zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl im Scheitelwasserstand (maximaler Hochwasserwert im Verlauf der Sturmflut) als auch im Tidestieg bzw. -fall.

In Abbildung 15 wird zusätzlich der Wassserstandsverlauf ohne regionalen Wind über dem Elbeästuar (grün) und die astronomische Tide (rot) gezeigt. Ohne zusätzlichen regionalen Wind über dem Ästuar liegen die Wasserstände in Schulau während des gesamten Sturmflutzeitraums bis zu 75 cm niedriger als im Referenzlauf. Ein Vergleich mit der astronomischen Tide zeigt, dass im Sturmflutzeitraum nicht nur die Hoch- und Niedrigwasser, sondern auch ihre Eintrittszeiten verschoben sind.

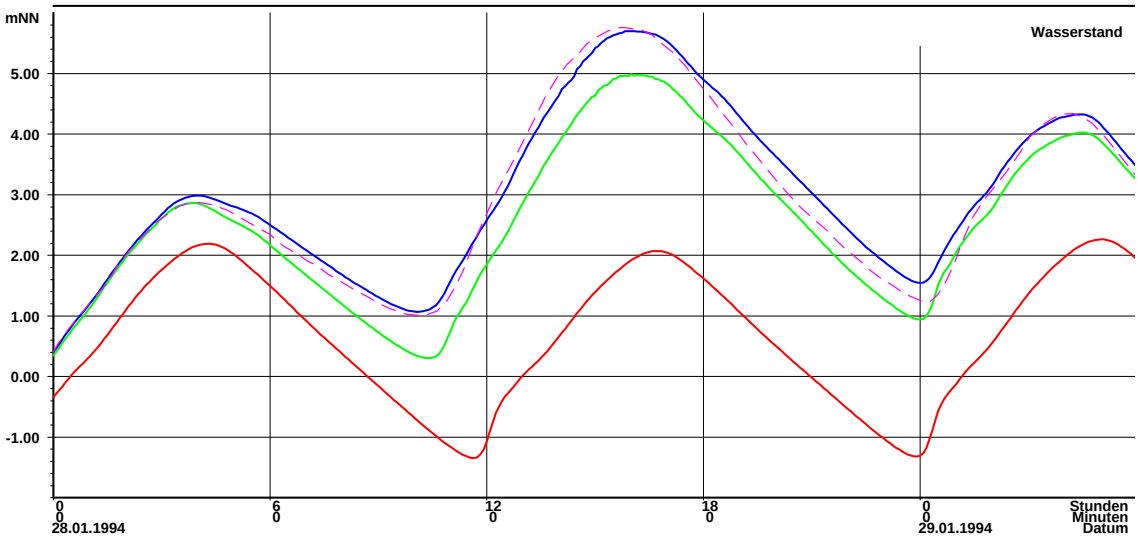


Abbildung 15: Vergleich der gemessenen Wasserstandszeitreihe mit der Sturmflutsimulation sowie die Sturmflut ohne regionalen Windeinfluss und die astronomische Tide für den Pegel Schulau / Elbe (Sturmflut vom 28.01.1994)

5 Ergebnisse der Systemvariationen

5.1 Einfluss veränderter Oberwassermengen auf die Sturmflutwasserstände in den deutschen Ästuaren

Mit Hilfe der hier durchgeführten Vergleichsrechnungen ist es möglich, für die untersuchten Ästuare Bereiche zu definieren, in denen die Sturmflutwasserstände sensitiv auf die Variation des Oberwassers reagieren.

Auf den Abbildungen 16 auf der nächsten Seite bis 21 auf Seite 32 sind die Einflüsse des Oberwassers auf den Sturmflutscheitelwasserstand in Ems, Elbe und Weser als Längsschnitt entlang der Fahrwasserachsen für die Sturmfluten vom Januar 1976 und 1994 dokumentiert.

In der **Ems** sind deutliche Veränderungen der Sturmflutscheitelwasserstände für die Sturmflut vom 28.01.1994 stromauf von Terborg/Leerort zu erkennbar (vergleiche Abbildung 16 auf der nächsten Seite). Die Sturmflutsensitivität des Oberwassers reicht bei der Sturmflut vom 3./4.01.1976 weiter seewärts bis nach Pogum bzw. zum Dollart (vergleiche Abbildung 17 auf der nächsten Seite).

In der **Elbe** werden die Sturmflutscheitelwasserstände stromauf von Hamburg St.Pauli deutlich durch das Oberwasser modifiziert. Bei extrem hohem Oberwasser ist eine Zunahme des Sturmflutscheitelwasserstandes bis Brunsbüttel (SF94) bzw. seewärts davon (SF76) zu beobachten (vergleiche Abbildung 18 auf Seite 31 und Abbildung 19 auf Seite 31).

Bei der Sturmflut vom Januar 1994 herrschten Oberwasserzuflüsse in der **Weser**, die mit einem mittleren Oberwasser von 1140 m^3/s relativ hoch waren; die Oberwassermenge in der Weser im Januar 1976 war hingegen gering (249 m^3/s). Demzufolge ist der Unterschied in den Scheitelwasserständen 1976 zur Variante mit geringem Oberwasser (MNQ = 80 m^3/s, vergleiche Tabelle 2 auf Seite 13) gering.

Der Einflussbereich des Oberwassers auf den Scheitelwasserstand reicht bei einer Sturmflut mit fülliger Windstaukurve (Januar 1994) bis zum Blexer Bogen zwischen Nordenham und Bremerhaven (vergleiche Abbildung 20 auf Seite 32). Bei steilem Sturmfluthochwasseranstieg, wie es bei der Sturmflut vom Januar 1976 der Fall war, wirkt sich Erhöhung des Oberwassers (HHQ_o) bis seewärts des Blexer Bogens bis nach Bremerhaven aus (vergleiche Abbildung 21 auf Seite 32).

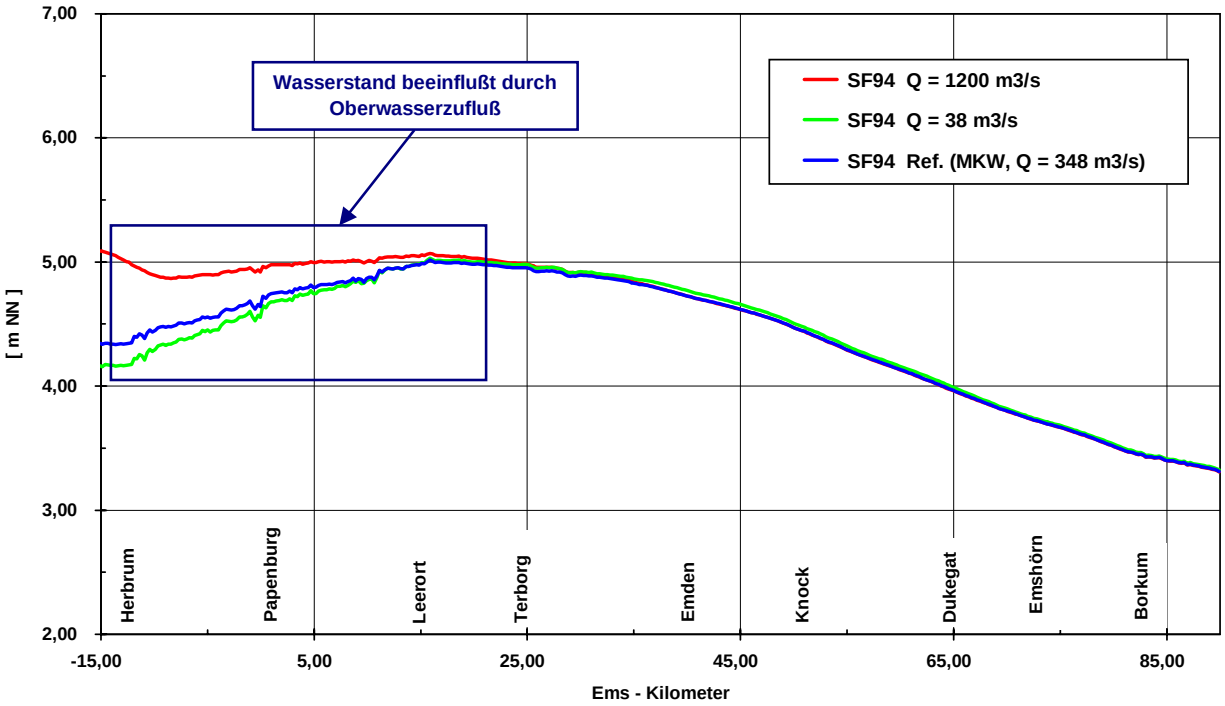


Abbildung 16: Sensitivität des Sturmflutscheitelwasserstandes durch die Variation des Oberwassers im Emsästuar: SF94

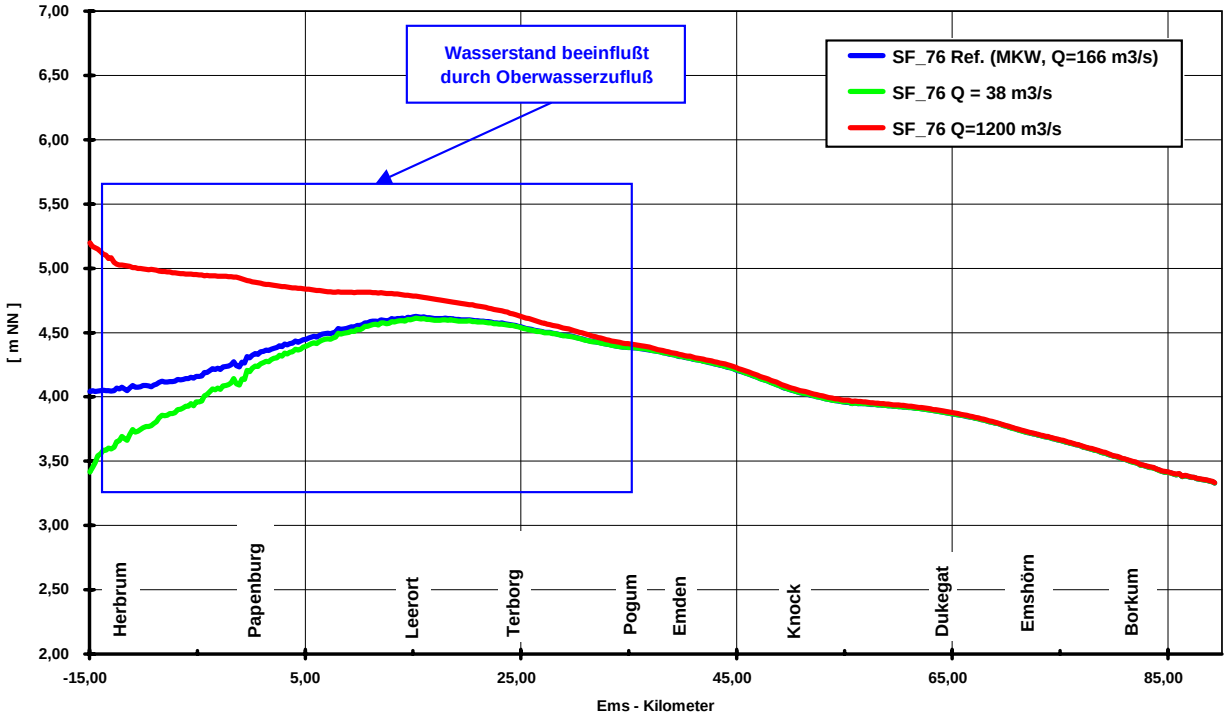


Abbildung 17: Sensitivität des Sturmflutscheitelwasserstandes durch die Variation des Oberwassers im Emsästuar: SF76

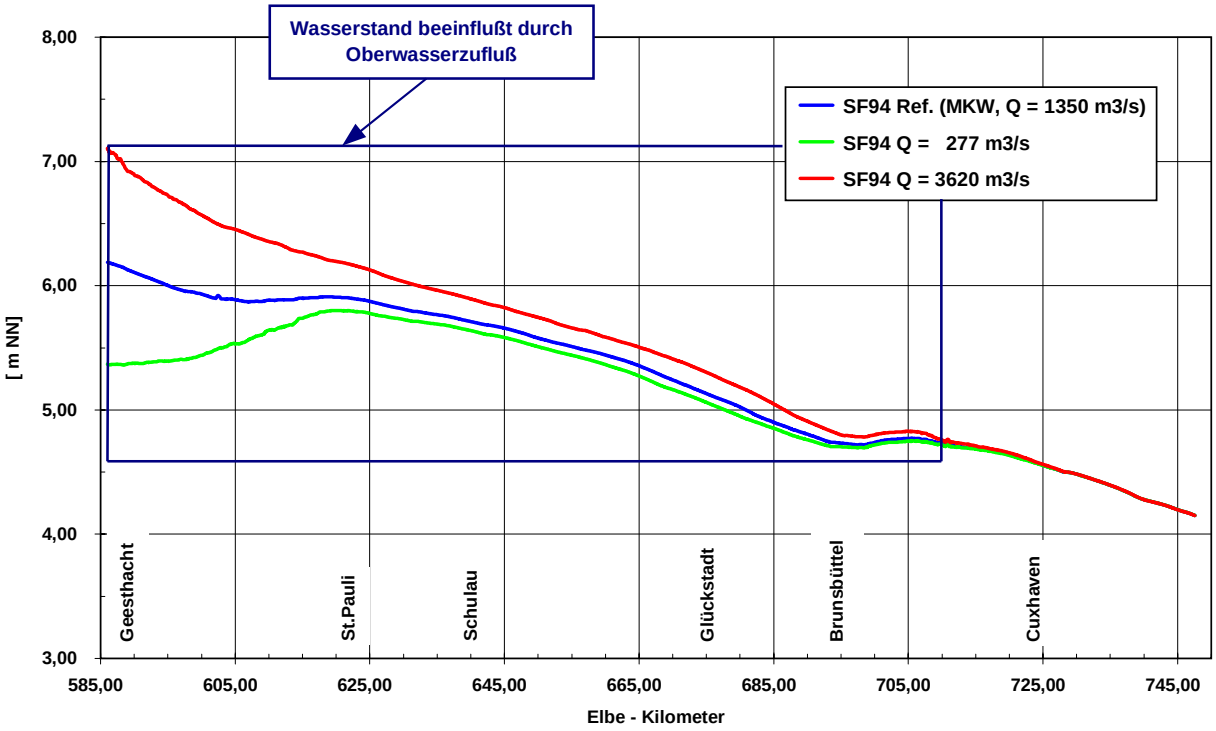


Abbildung 18: Sensitivität des Sturmflutscheitelwasserstandes durch die Variation des Oberwassers im Elbeästuar: SF94

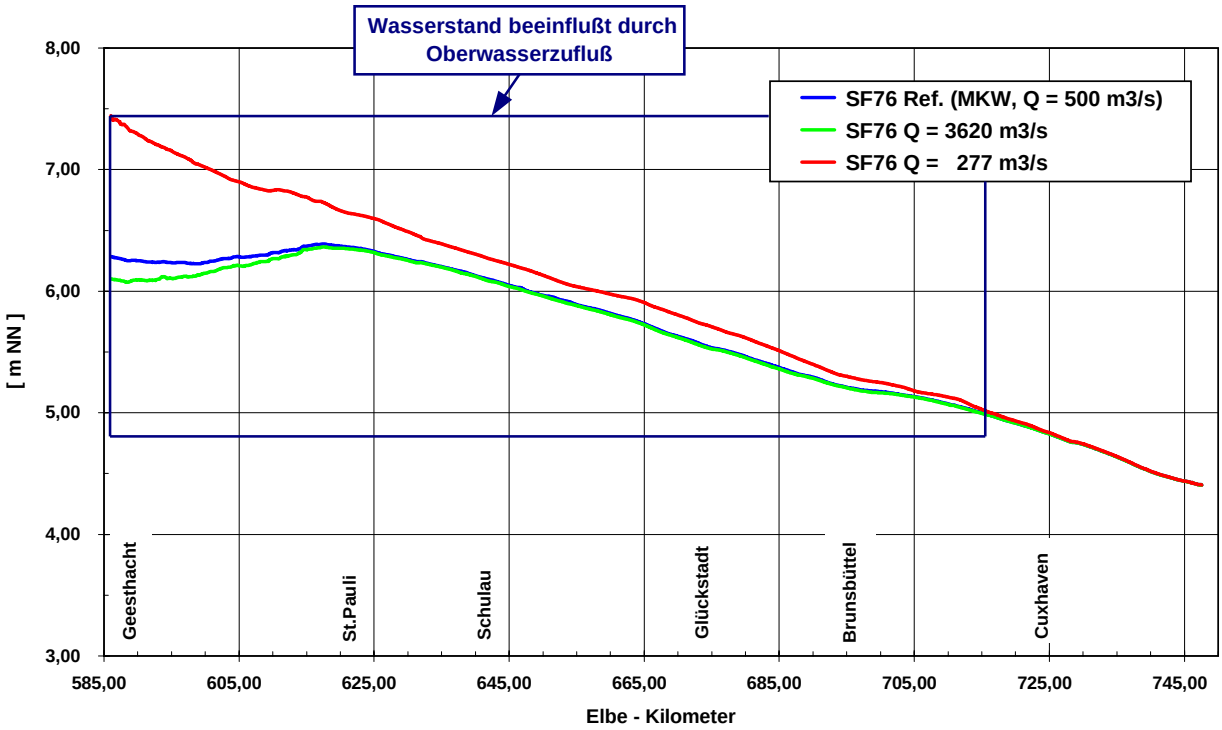


Abbildung 19: Sensitivität des Sturmflutscheitelwasserstandes durch die Variation des Oberwassers im Elbeästuar: SF76

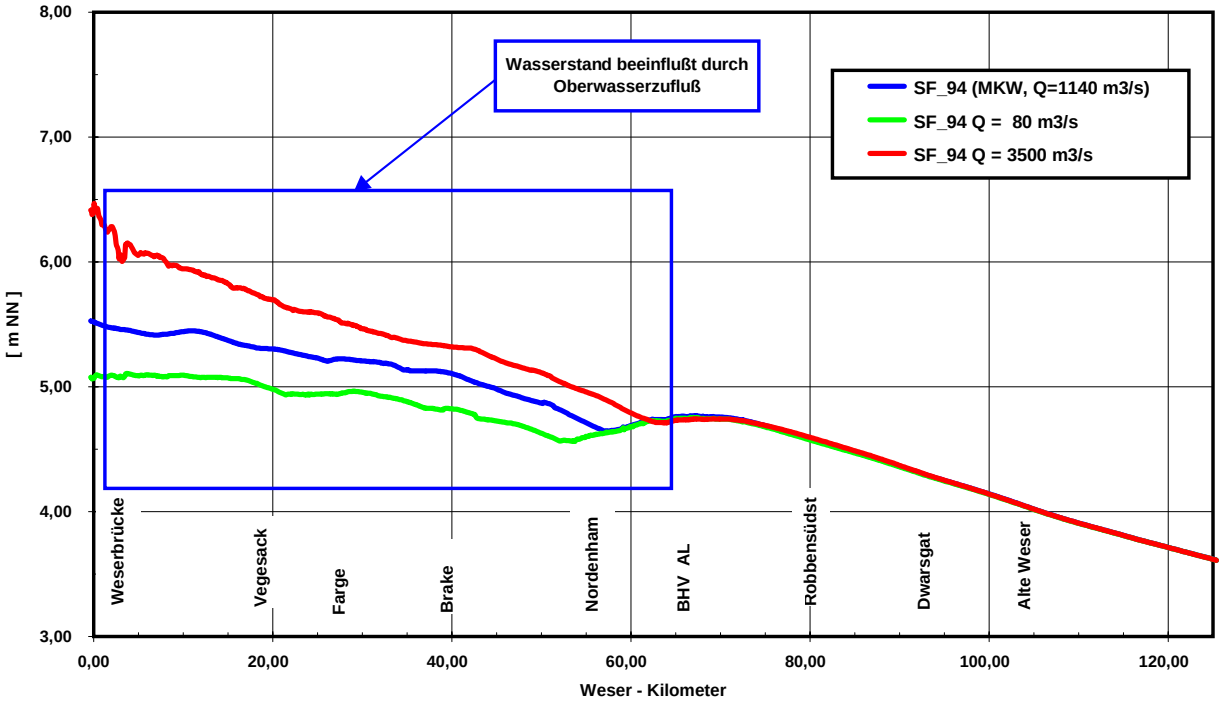


Abbildung 20: Sensitivität des Sturmflutscheitelwasserstandes durch die Variation des Oberwassers im Jade / Weserästuar: SF94

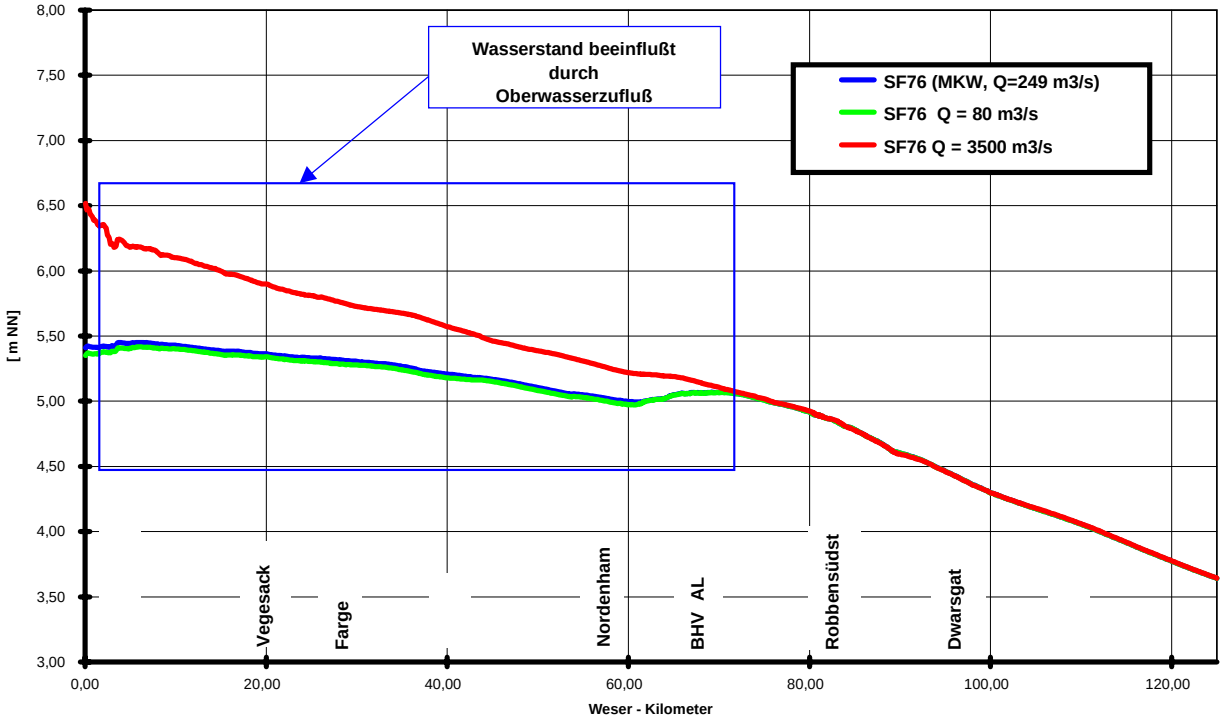


Abbildung 21: Sensitivität des Sturmflutscheitelwasserstandes durch die Variation des Oberwassers im Jade / Weserästuar: SF76

5.2 Einfluss veränderter Topographie auf die Sturmflutwasserstände in den deutschen Ästuaren

Zur systematischen Bestimmung des Einflusses einer veränderten Topographie auf die Sturmflutwasserstände werden für jedes Ästuar vier **markante** (synthetische) Topographieänderungen untersucht:

- massive Fahrrinnenvertiefungen, -erhöhungen und
- starke Flutraumveränderungen.

In der nachfolgenden Tabelle 3 werden für jedes untersuchte Ästuar die spezifischen Topographieänderungen zusammengestellt.

Nr.	**Ems**	**Jade/Weser**	**Elbe**
1	Anhebung Geiseleitwerk	Verlandung Jadebusen	Hafenbeckenverfüllung HH
2	Verlandung Dollart	Anhebung Hohewegwatt	Überflutungspolder
3	Aufhöhung des Ems-FW	Aufhöhung des Weser-FW	Aufhöhung des Elb-FW
4	Einfluss der Insel Borkum	Aufhöhung des Jade-FW	Damm auf dem Medemsand

Tabelle 3: Übersicht der berechneten Variationen der Topographieänderungen

Auf Abbildung 22 auf der nächsten Seite werden die einzelnen Topographievariationen für jedes Ästuar im Zusammenhang dargestellt.

Als ein Beispiel für die Sensitivität der Sturmflutwasserstände auf Veränderungen des Flutraumes (Sturmflut vom 28.01.1994) werden nachfolgende Ergebnisse für das Jade/Weserästuar auf Abbildung 23 auf Seite 35 und auf Abbildung 24 auf Seite 35 gezeigt. Die Auswirkungen signifikanter Topographieeingriffe werden durch die **Anhebung** des Fahrwasser von Jade und Weser um **4 Meter** berechnet.

Im relativ breiten Ästuarbereich der Jade wirken sich die starken Tiefenerhöhungen im Jadefahrwasser nur geringfügig auf die Sturmflutscheitelwasserstände aus (vergleiche Abbildung 23). Die Sturmflutscheitelwasserstände in der Weser verändern sich hierdurch ebenfalls nicht signifikant (vergleiche Abbildung 24).

Eine Erhöhung der Fahrrinne der Weser um 4 Meter in der Außenweser mit abfallendem Erhöhungsmass auf 2 Meter bis zur Weserbrücke bewirkt ein deutliches Abfallen (20 cm) der Sturmflutscheitelwasserstände in der Weser südlich von Nordenham durchgehend bis zum Weserwehr (vergleiche Abbildung 24). Für die Sturmflutwasserstände in der Jade ergeben sich erwartungsgemäss durch die Veränderung der Fahrwassertiefen in der Weser keine Änderungen (Abbildung 23).

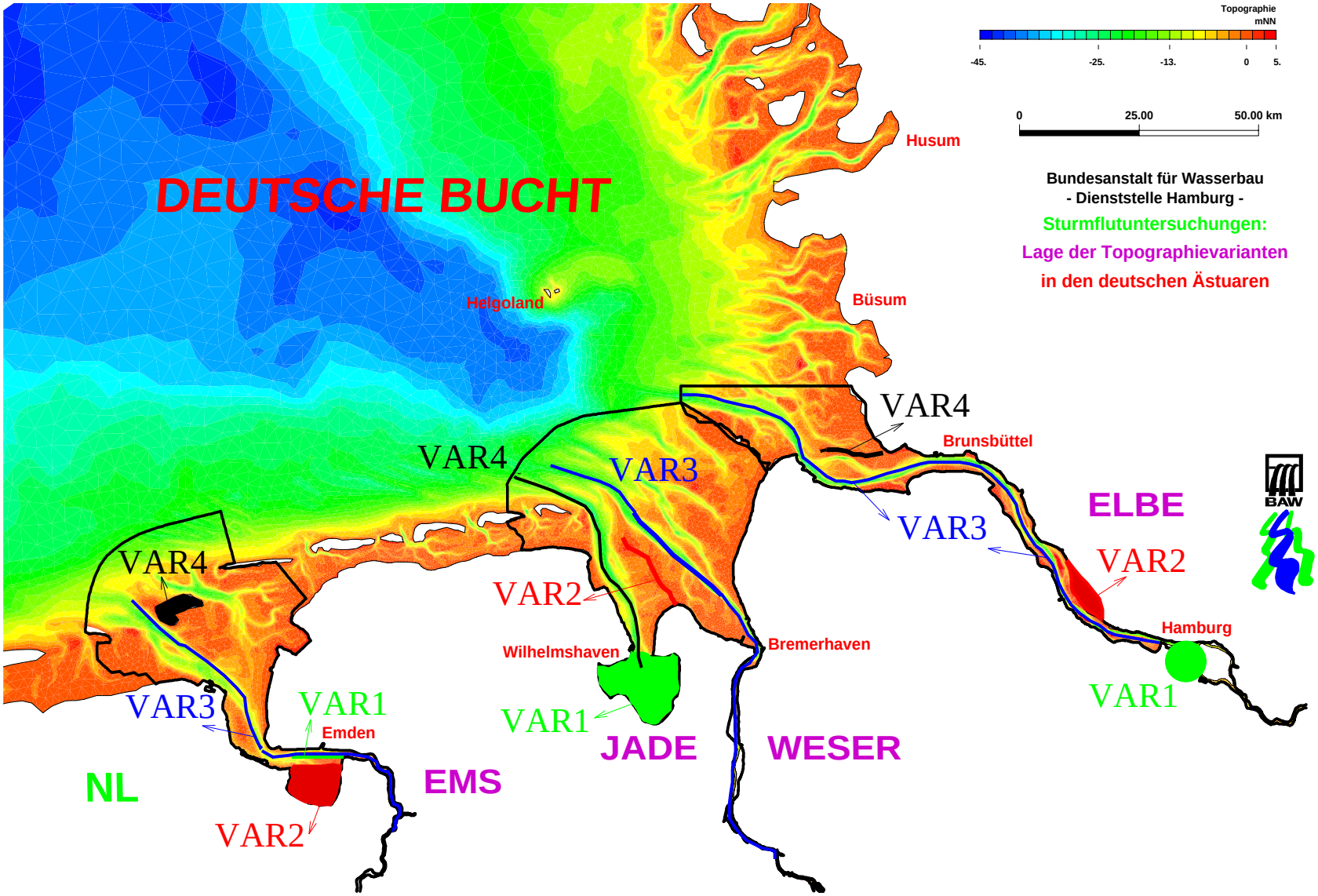


Abbildung 22: Untersuchte Topographievariationen in den Sturmflutästuarmodellmodellen Ems, Jade / Weser und ELbe

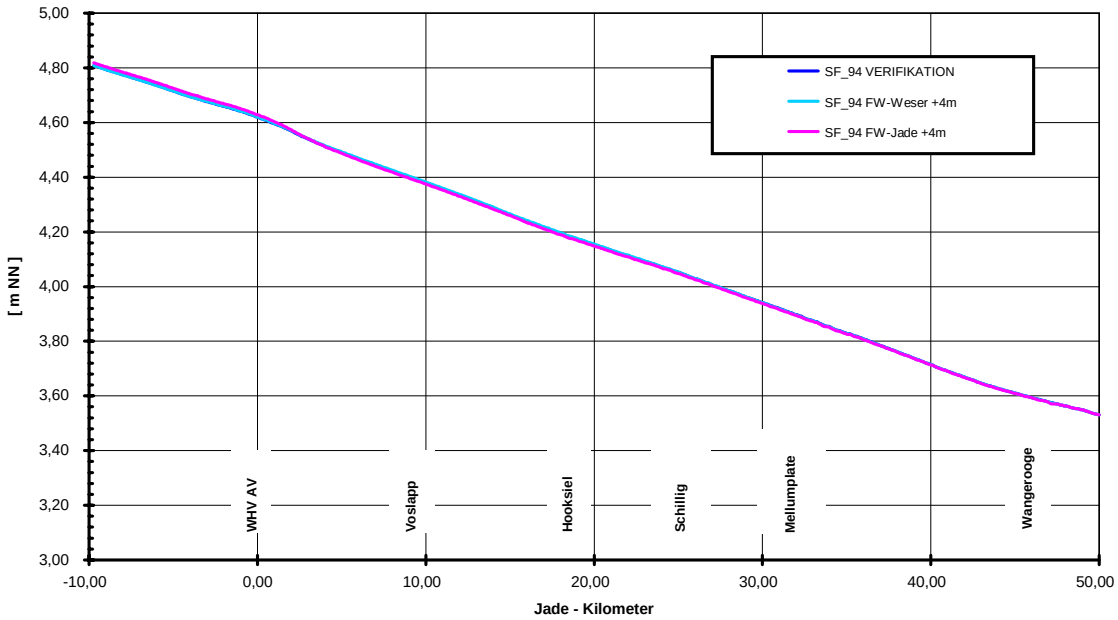


Abbildung 23: Einfluss der Modifikation der Fahrrinnentiefen im Jade / Weserästuar auf die Jade während der Sturmflut 1994

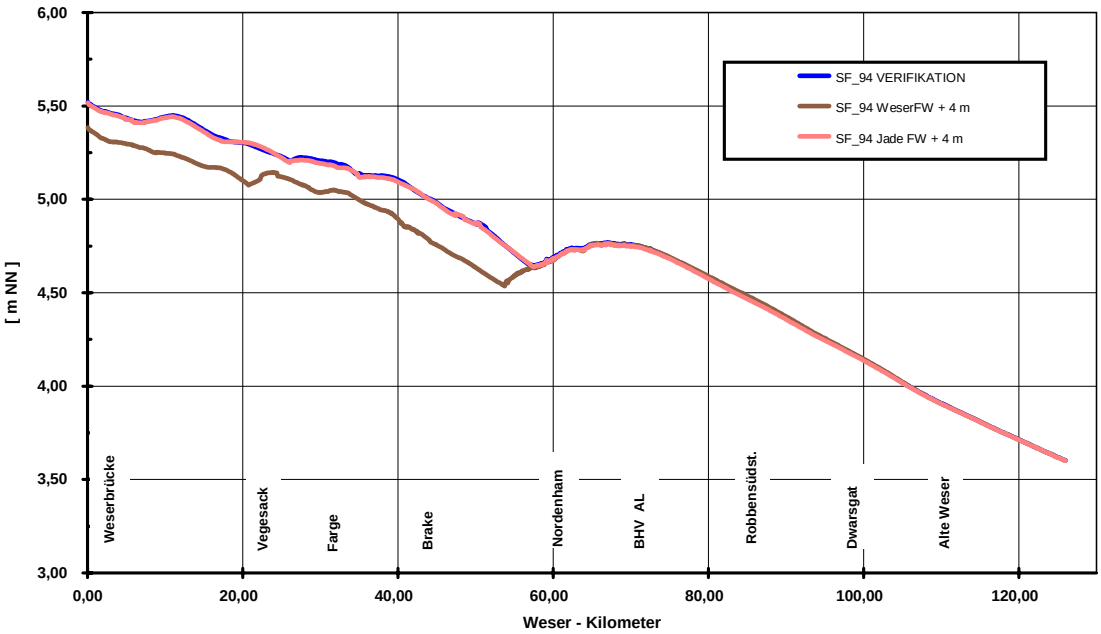


Abbildung 24: Einfluss der Modifikation der Fahrrinnentiefen im Jade / Weserästuar auf die Weser während der Sturmflut 1994

5.3 Einfluss veränderter Windverhältnisse auf die Sturmflutwasserstände der deutschen Ästuare

Das massenkonsistent, meteorologische Modell MKW benötigt als Eingabegrößen zur Berechnung von lokalen Windfeldern Messungen der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung, die zeitvariable Land-/Wasserverteilung sowie die Geländehöhe und die Oberflächenbeschaffenheit (Rauhigkeit) (siehe Schmidt, H. und Behrens, K., 1998). Die so berechneten Windfelder werden in einem zeitlichen Intervall von 2 Stunden gespeichert. Die Messgenauigkeit der Windrichtung beträgt ca. $\pm$ 10 $^\circ$ und der Windgeschwindigkeit $\pm$ 10 % (persönliche Mitteilungen H.Schmidt, DWD). Änderungen der Windgeschwindindigkeit und Windrichtung in diesen Größenordnungen stellen also keine grundsätzliche Veränderung des Windsystemes dar, und es muss keine erneute MKW-Windberechnung erfolgen.

Als erste Variation der Windverhältnisse wurde deshalb die systematische Erhöhung der MKW-Windfelder für alle untersuchten Ästuare und Sturmflutzustände um 10 % vorgesehen.

Schon die relativ geringe Winderhöhung bewirkt einen zusätzlichen maximalen Wasserstandsanstieg in der Jade um rund 7 cm (vergleiche Abbildung 25 auf der nächsten Seite); in der Weser verstärkt sich dieser Effekt bedingt durch die größere Länge des Ästuars auf rund 20 cm (vergleiche Abbildung 26 auf der nächsten Seite).

Die tatsächlichen Windgeschwindigkeiten der untersuchten Sturmfluten sind in ihrer Stärke nicht konstant. Im Verlauf einer Sturmflut kommt es zu Schwankungen der Windstärken, der Wind verringert sich teilweise für 2-4 Stunden. Die Verstetigung der größten Windgeschwindigkeiten stellt die zweite plausible Windmodifikation dar.

Allein die Verstetigung der hohen Windintensität bewirkt einen zusätzlichen maximalen Wasserstandsanstieg in der Jade um rund 10 cm (vergleiche Abbildung 25); in der Weser werden, auf Grund der gewundenen Stromführung lokal Größen von rund 10 cm erreicht (vergleiche Abbildung 26).

Der windstauwirksame Einfluss des lokalen/regionalen Windes über einem Ästuar wird auf den Abbildungen 25 und 26 für die Jade und die Weser für die Sturmflut vom 28.01.1994 dokumentiert. Der maximale Wasserstand **ohne lokalen Wind (rote Kurve)** im Vergleich zur Situation mit MKW-Wind (blaue Linie) zeigt deutlich den Anstieg der maximalen Wasserstände durch den Einfluss des lokalen/regionalen Windes und damit die Notwendigkeit der Berücksichtigung der lokalen Windfelder.

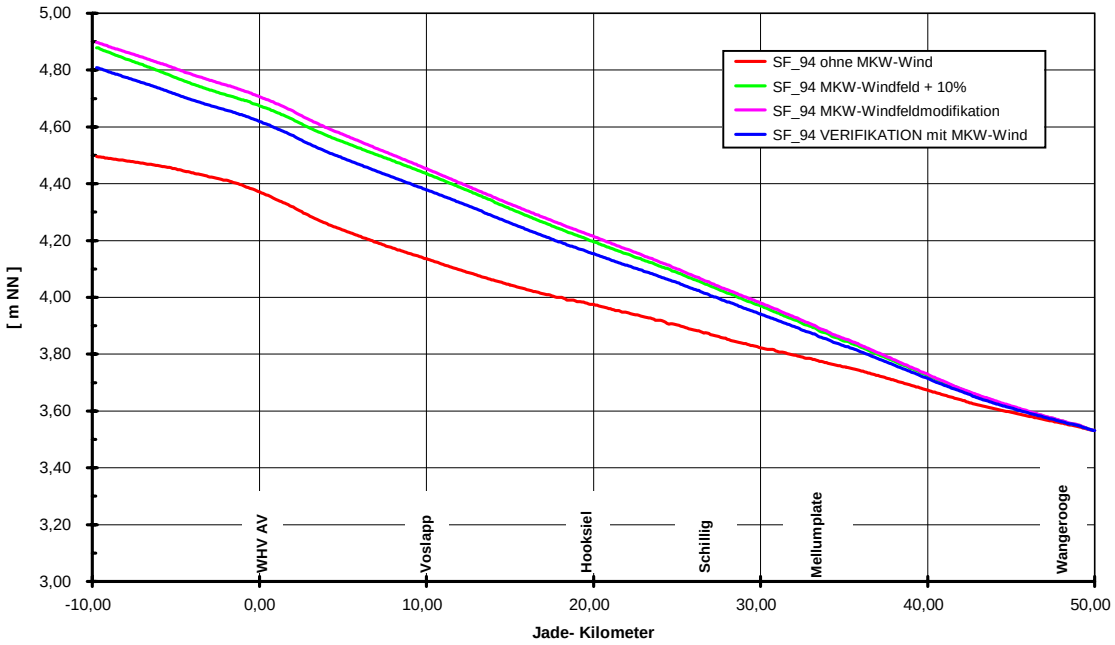


Abbildung 25: Sturmflutscheitelwasserstand am 28.1.1994: Einfluss der Modifikation der Windverhältnisse im Jadeästuar

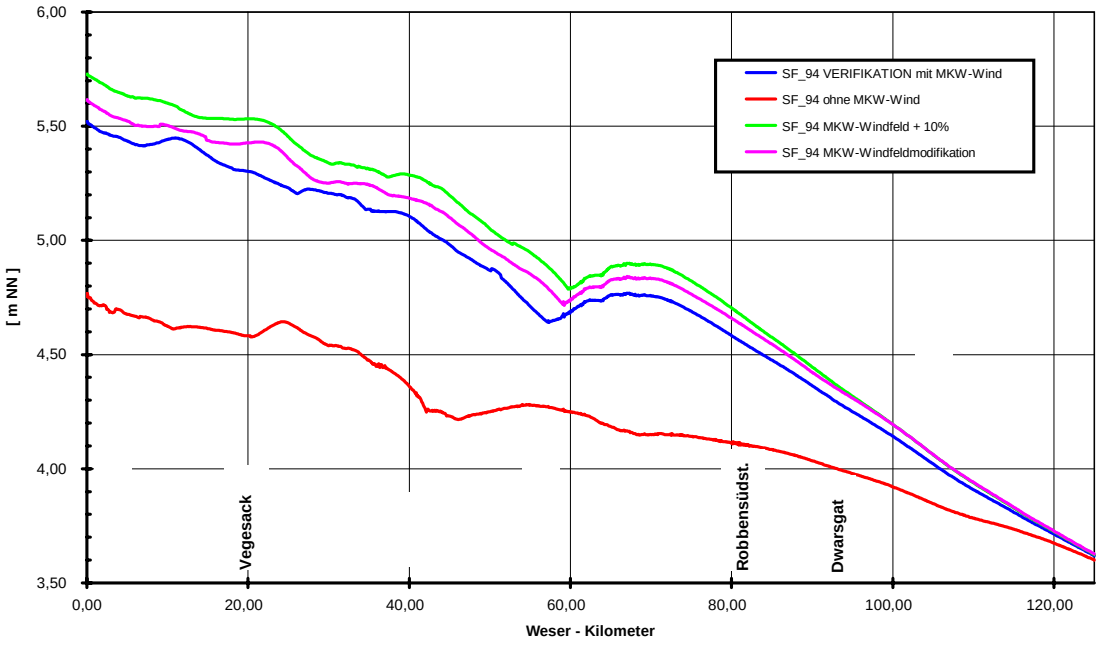


Abbildung 26: Sturmflutscheitelwasserstand am 28.1.1994: Einfluss der Modifikation der Windverhältnisse im Weserästuar

5.4 Durchflüsse und energetische Größen

Zusätzlich zu den Kenngrößen des Wasserstandes wurde für die Sturmfluten 3.1.1976 und 28.1.1994 der Durchfluss durch Querprofile im Abstand von 5 km entlang der Elbe berechnet. Zu interessierenden Zeitpunkten wurden in zwei Teilgebieten außerdem flächenhaft folgende Größen betrachtet:

- Wasserstand h in [m]
- Strömungsgeschwindigkeit v in [m / s]
- Windschubspannung $\vec{\tau}_{Wind}$ in [N / m^2]
- Bodenschubspannung $\vec{\tau}_{Boden}$ in [N / m^2]
- windinduzierte Energieänderung $P_{Wind} = \vec{\tau}_{Wind} \cdot \vec{v}$ in [W / m^2] oder [J / sm^2]
- Energiedissipation in Sohlnähe $P_{Boden} = \vec{\tau}_{Boden} \cdot \vec{v}_*$ in [W / m^2] oder [J / sm^2]
- spezifische potentielle Energie $E_{pot} = \varrho\, g\, z$ in [kJ / m^3]
- spezifische kinetische Energie $E_{pot} = \frac{1}{2}\, \varrho\, |\vec{v}|^2$ in [kJ / m^3]

sowie die tiefenintegrierten und auf einen Gleichgewichtszustand (siehe hierzu Abschnitt 5.4.2 auf Seite 45) bezogenen Größen:

- verfügbare potentielle Energiedichte in [kJ / m^2]
- verfügbare kinetische Energiedichte in [kJ / m^2]

Die Eintrittszeiten der interessierenden Ereignisse sind für beide Teilgebiete sowie beide Sturmfluten in Tabelle 4 angegeben.

	SF76: 3.1.1976						SF94: 28.1.1994					
Variante	**ST1**		**W0**		**ST0**		**ST1**		**W0**		**ST0**	
Elbe km	**725**	**640**	**725**	**640**	**725**	**640**	**725**	**640**	**725**	**640**	**725**	**640**
Niedrigwasser	**5:40**	**8:20**	**6:00**	**9:00**	**8:50**	**12:00**	**7:00**	**10:10**	**7:10**	**10:20**	**8:20**	**11:40**
Flutstrom	**8:50**	**12:40**	**12:40**	**11:10**	**11:50**	**13:50**	**10:40**	**12:20**	**10:40**	**12:20**	**11:20**	**13:30**
maximaler Wind	**7:00**	**7:00**	**7:00**	**7:00**	**7:00**	**7:00**	**15:00**	**15:00**	**15:00**	**15:00**	**15:00**	**15:00**
Scheitelwasserstand	**14:10**	**16:30**	**14:10**	**16:30**	**14:10**	**17:00**	**13:30**	**16:00**	**13:10**	**16:00**	**13:50**	**16:40**
Ebbstrom	**19:40**	**19:00**	**19:40**	**22:00**	**20:10**	**19:50**	**19:20**	**22:20**	**19:20**	**22:00**	**19:40**	**22:30**

Tabelle 4: Zeitpunkte der für die Sturmfluten SF76 und SF94 in den Teilgebieten Außenelbe (Elbe km 725) und Mühlenberger Loch (Elbe km 640) dargestellten energetischen Größen.

Mit ST1 wird die Variante bezeichnet, die gemessenes Oberwasser, gemessene Tide am Rand zur Deutschen Bucht und MKW-Windfelder als Randwerte verwendet. Um die während

der Sturmfluten aufgetretenen Werte der genannten physikalischen Größen einordnen zu können, wurden sie auch für die Varianten W0 (ohne lokalen Wind über dem Ästuar) und ST0 (astronomische Tide) ausgewertet. Der zeitliche Verlauf der genannten physikalischen Größen wurde an einem zentralen Ort im jeweiligen Teilgebiet (Elbe km 725 bzw. Elbe km 640) vergleichend dargestellt.

5.4.1 Durchflüsse

Zur Analyse der Durchflüsse der Elbe während eines Sturmflutzeitraums wurden im Abstand von 5 km Querprofile von Deich zu Deich in der Elbe an den entsprechenden Kilometrierungspunkten definiert (siehe Abb. 27). Für jeden interessierenden Zeitpunkt wurde aus den mit dem numerischen Modell TRIM-2D berechneten Daten von Wasserstand und Strömung der Durchfluss durch den Profilquerschnitt integriert.

In den Abbildungen 28 und 29 auf Seite 42 ist für die Sturmfluten vom 3.1.1976 und vom 28.1.1994 für den Zeitraum der Sturmflut der zeitliche Verlauf des Wasserstandes, des Durchflusses und des Durchflussquerschnittes auf sechs Querprofilen entlang der Elbe dargestellt.

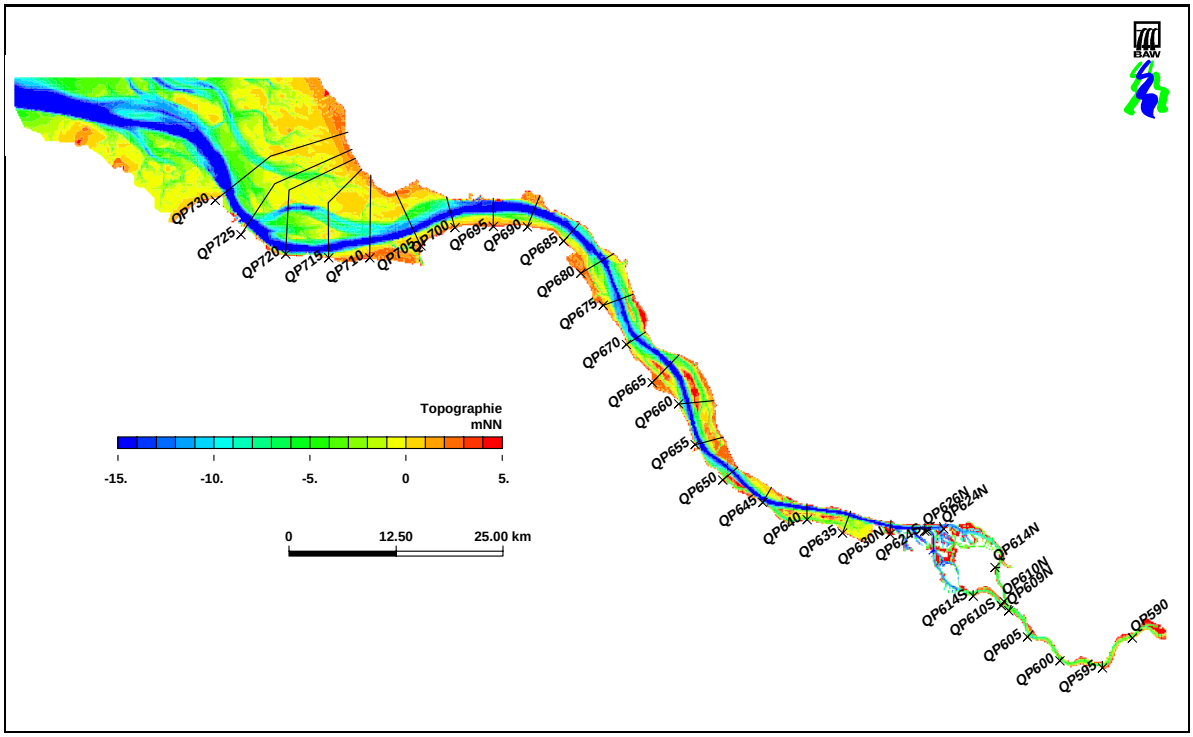


Abbildung 27: Lage der Querprofile in der Elbe.

Erwartungsgemäß findet man die höchsten Wasserstände im oberen Bereich des Ästuares,

wogegen man die größten Durchflüsse und Durchflussquerschnitte im Mündungsbereich erkennt. Am 28.1.1994 sind die stromabgerichteten Durchflüsse in der Ebbephase nach dem Vormittagshochwasser kleiner als im vergleichbaren Zeitraum am 27.1.1994 (vgl. Abb. 29 auf Seite 42). In der nachfolgenden Flutphase treten die höchsten Duchfüsse dieses Sturmflutzeitraumes auf. Sie sind ca. 40 % höher als in der Flutphase des 27.1.1994. Erst in der zweiten Hälfte des 29.1.1994 werden wieder Durchflussverhältnisse wie vor der Sturmflut erreicht.

Am 3.1.1976 folgt der Flutphase vor dem Vormittagshochwasser eine deutlich verkürzte Ebbephase (vgl. Abb. 28). In dieser Zeit ist lediglich ein Rückgang des integralen Durchflusses auf sehr kleine Werte, jedoch kein stromabgerichteter integraler Durchfluss zu beobachten. Die nachfolgende Flutphase ist deutlich verlängert und die Durchflüsse in diesem Zeitraum deutlich erhöht. Während des Ablaufens des Wassers nach dem Sturmflutscheitelwasserstand werden die größten Durchflüsse dieses Sturmflutzeitraums beobachtet. Erst in der zweiten Hälfte des 4.1.1976 werden wieder Durchflussverhältnisse wie vor der Sturmflut erreicht.

Zur Einordnung der Größenordnung der Durchflüsse während Sturmfluten sind in den Abbildungen 30 auf Seite 43 bis 33 auf Seite 44 für die Querprofile bei Elbe km 725 (Cuxhaven) und Elbe km 640 (Schulau) zusätzlich zum IST-Zustand ST1 die Durchflüsse während der astronomischen Tide ST0 dargestellt. Der Effekt des lokalen über der Elbe herrschenden Windes auf die Durchflüsse läßt sich durch den Vergleich mit der Variante W0 (ohne zusätzlichen Wind) abschätzen.

Für die Sturmflut SF94 wird im Vergleich von ST1 mit ST0 deutlich, dass sowohl im Außenelbebereich (siehe Abb. 30) als auch im Ästuar selbst (Abb. 31) in der der Sturmflut vorausgehenden Ebbephase der Durchfluss reduziert ist. Der lokale Wind (Westwind) begünstigt diese Situation zusätzlich, die Durchflüsse liegen für W0 höher als für ST1. Da verhindert wird, dass ein großer Teil des zuvor eingeströmten Tidevolumens das Ästuar verläßt, liegt das Niedrigwasser vor der Sturmflut bei Cuxhaven um ca. 2 m und bei Schulau um ca. 1,4 m höher als bei der entsprechenden astronomischen Tide. In der sich anschließenden Flutphase sind die Durchflüsse bei Elbe km 727 und 640 sowohl bei ST1 als auch bei W0 deutlich höher als bei ST0. Zusätzlich ist der Zeitraum mit hohen Durchflüssen verlängert. In dieser Phase ist kein Einfluss des lokalen Windes auf die Größe des Durchflusses zu erkennen. In der Ebbephase nach dem Sturmflutscheitel deuten hohe Durchflüsse darauf hin, dass große Teile des zusätzlichen Wassers die Elbe bereits wieder verlassen. Jedoch zeigen die Wassserstände und Durchflüsse am Morgen des 29.1.1994, dass ein Teil des Wasservolumens, das zu den erhöhten Wasserständen beigetragen hat, erst jetzt zurück in die Deutsche Bucht fließt.

Der schwache Wind am 2.1.1976 führt dazu, dass die Wasserstandsentwicklung in der Elbe mit der für diesen Zeitraum vorausberechneten astronomischen Tide übereinstimmt. Am Morgen des 3.1.1976 wird der Wind stärker und dreht auf SSW. Dies bewirkt eine deutlich

niedrigere Anstiegsgeschwindigkeit des Wasserstandes (vgl. Abb. 32 auf Seite 44). Das Vormittagshochwasser tritt deutlich später als erwartet ein. Dieser verlangsamte Tidestieg ist mit verringerten Durchflüssen entlang der Elbe verbunden (Abb. 32 und 33).

Bei der Analyse der Wasserstände und Durchflüsse während des Sturmflutzeitraumes 3.1.1976 wird die Bedeutung der Ebbephase vor der Sturmfluttide noch deutlicher als aus den Ergebnissen der Sturmflut 28.1.1994. Durch den Querschnitt bei Elbe km 725 fließt am Morgen des 3.1.1976 praktisch kein Wasser zurück in die Deutsche Bucht (siehe Abb. 32). Auch bei Elbe km 640 (Abb. 33) sind die Durchflussmengen während dieser Ebbephase sehr klein. Aus Sicht des Durchflussverhaltens fällt diese Ebbe aus. Durch ≫Ausschalten≪ des lokalen Windes (Variante W0) wird eine, jedoch deutlich verkürzte Ebbephase zugelassen. Die das Ästuar verlassenden Wassermassen senken das Niedrigwasser bei Cuxhaven um mehr als 1 m und bei Schulau um 30 cm. In der sich anschließenden Flut- und Ebbephase ist weder bei Elbe km 725 noch bei Elbe km 640 der Effekt des lokalen Windes so deutlich zu sehen. Wie schon für die Sturmflut am 28.1.1994 beschrieben, dauert es auch hier bis zum 4.1.1976 bis Wasserstand und Durchfluss den zu erwartenden ≫astronomischen≪ Werten (ST0) entsprechen.

Für beide Sturmfluten zeigt sich, dass auch der Niedrigwasserstand unmittelbar vor der Sturmflut für die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes entscheidend ist. In beiden Fällen war durch eine verkürzte Ebbephase der Wasserstand in der Elbe deutlich, d.h. mehr als 2 m, höher als während der entsprechenden astronomischen Tide.

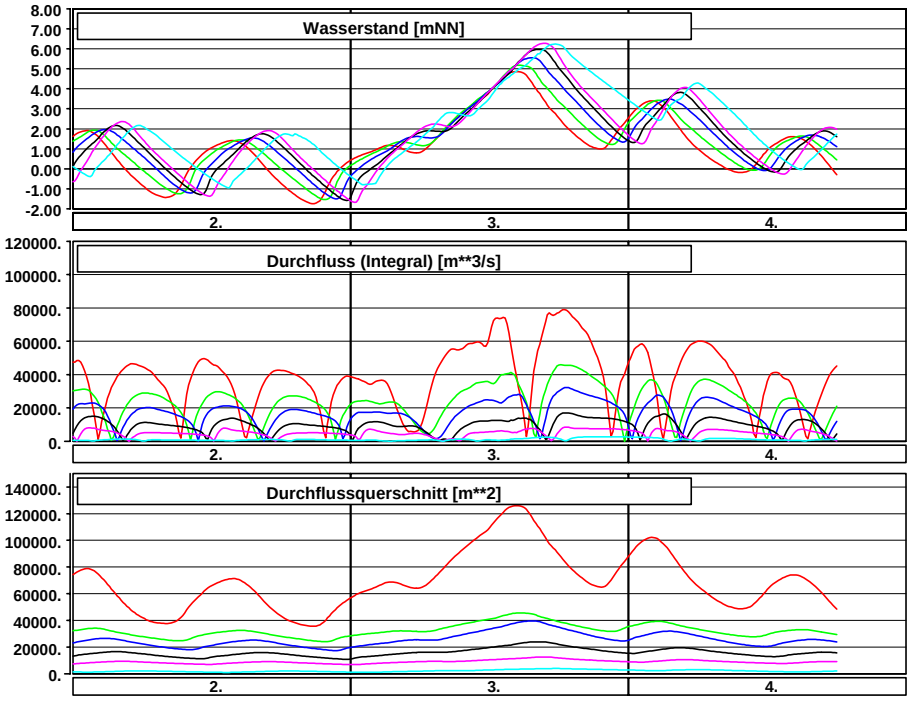


Abbildung 28: Wasserstand, Durchfluss und Durchflussquerschnitt an den Querprofilen bei Elbe km 725 (rot), 700 (grün), 675 (blau), 650 (schwarz), 630N (magenta) und 600 (cyan) für den Zeitraum 2.1.1976 bis 4.1.1976.

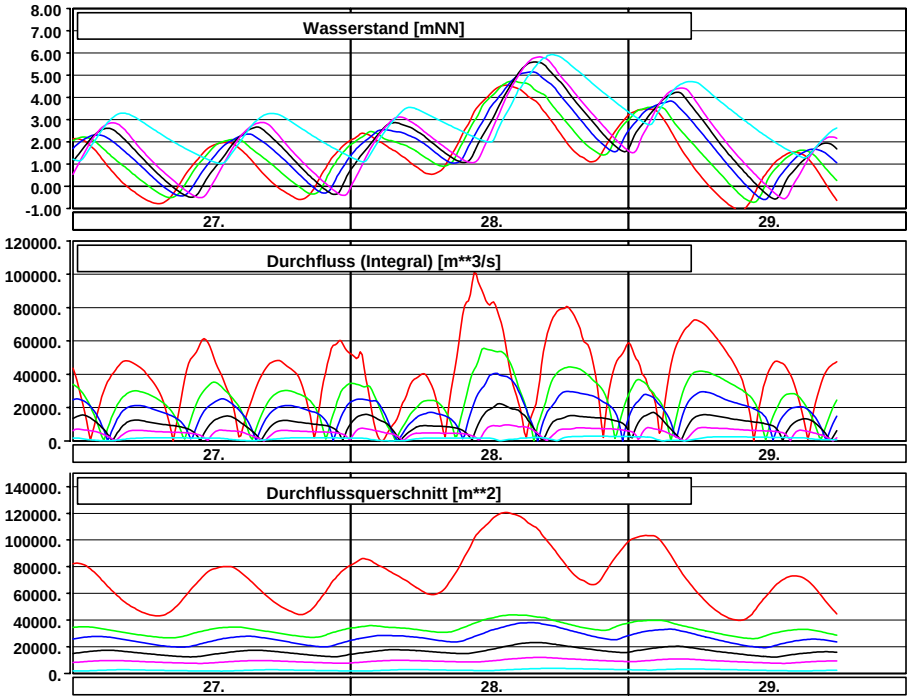


Abbildung 29: Wasserstand, Durchfluss und Durchflussquerschnitt an den Querprofilen bei Elbe km 725 (rot), 700 (grün), 675 (blau), 650 (schwarz), 630N (magenta) und 600 (cyan) für den Zeitraum 27.1.1994 bis 29.1.1994.

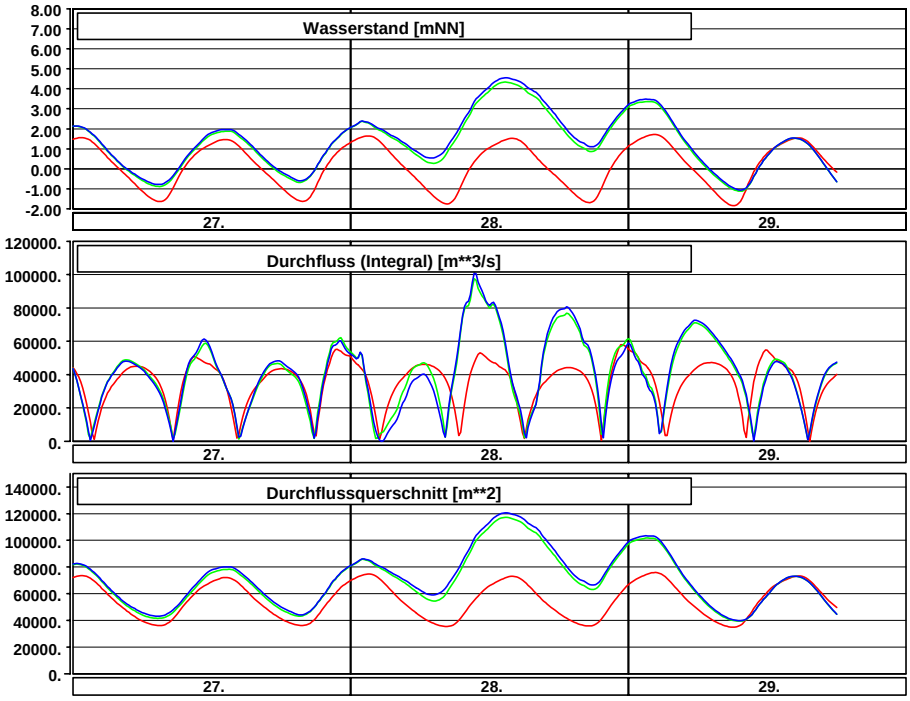


Abbildung 30: Wasserstand, Durchfluss und Durchflussquerschnitt am Querprofil bei Elbe km 725 für die Varianten ST1 (blau), ST0 (rot) und W0 (grün) für den Zeitraum 27.1.1994 bis 29.1.1994.

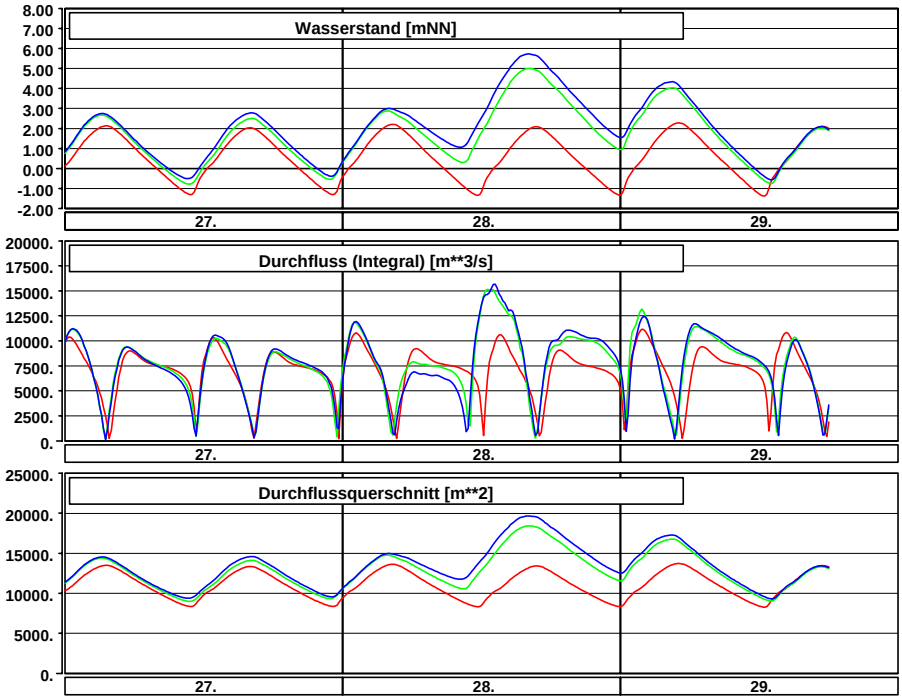


Abbildung 31: Wasserstand, Durchfluss und Durchflussquerschnitt am Querprofil bei Elbe km 640 für die Varianten ST1 (blau), ST0 (rot) und W0 (gün) für den Zeitraum 27.1.1994 bis 29.1.1994.

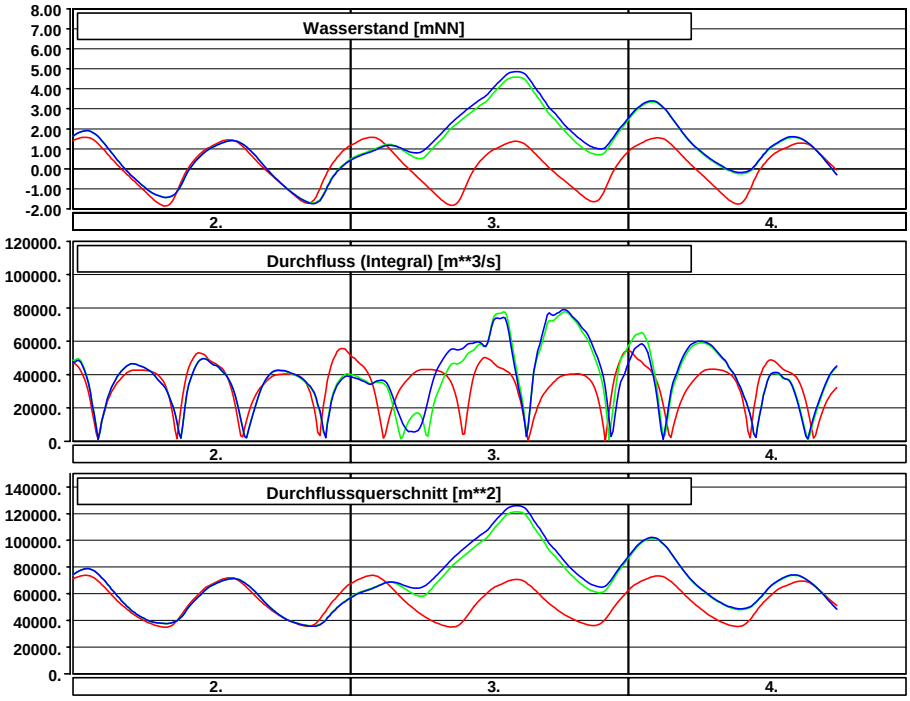


Abbildung 32: Wasserstand, Durchfluss und Durchflussquerschnitt am Querprofil bei Elbe km 725 für die Varianten ST1 (blau), ST0 (rot) und W0 (grün) für den Zeitraum 2.1.1976 bis 4.1.1976.

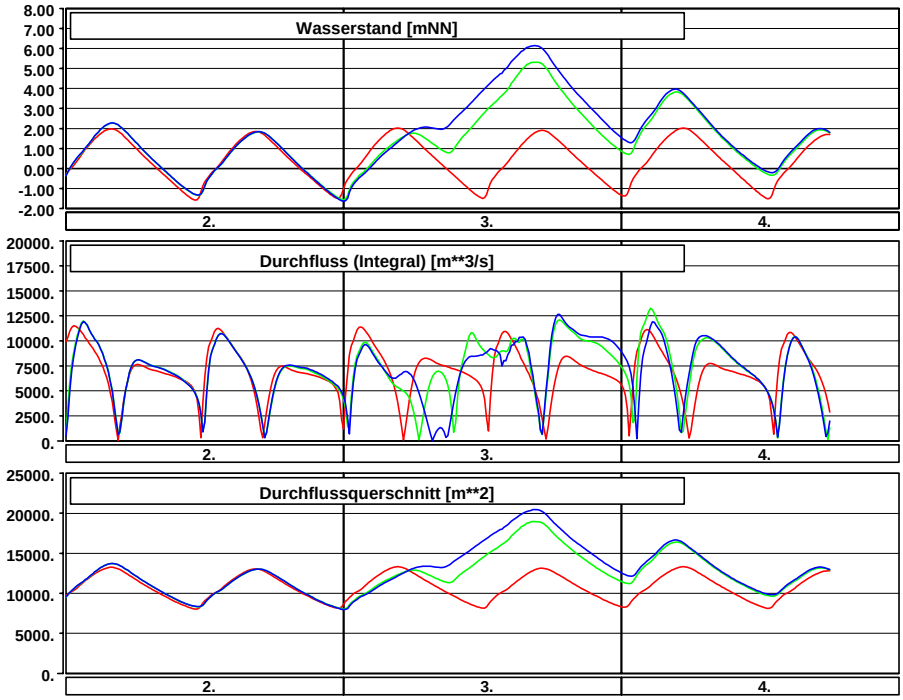


Abbildung 33: Wasserstand, Durchfluss und Durchflussquerschnitt am Querprofil bei Elbe km 640 für die Varianten ST1 (blau), ST0 (rot) und W0 (grün) für den Zeitraum 2.1.1976 bis 4.1.1976.

5.4.2 Energetische Größen

In Ergänzung zu den auf Querprofilen analysierten Durchflüssen wurde eine Auswertung der Ergebnisse des numerischen Modells bezüglich energetischer Größen erarbeitet. In einem gesonderten Dokument sind die zu Beginn von Kapitel 5.4 auf Seite 38 genannten Größen für die in Tabelle 4 genannten Ereignisse dargestellt. Auch die Abbildungen der mit MKW berechneten lokalen Windfelder sind Inhalt eines Materialienbandes. Beispielhaft sind hier die Strömungsverhältnisse im Außenelbebereich während des der Sturmflut vorausgeheden Niedrigwassers am 3.1.1976 unter Zuhilfenahme einiger energetischer Größen analysiert worden. Außerdem soll die verfügbare potentielle und kinetischen Energiedichte für die Ereignisse ≫Flutstrom≪ und ≫Ebbstrom≪ für die Varianten ST1 und W0 verglichen werden.

Abbildung 34 zeigt den zeitlichen Verlauf des mit MKW berechneten Windes sowie die mit TRIM-2D für die Varianten ST1, ST0 und W0 berechneten Wasserstände und Strömungen am 3.1.1976 bei Elbe km 725 (Fahrrinnenmitte). Wie bereits in Abschnitt 5.4.1 auf Seite 39 beschrieben, findet man die höchsten Sturmflutscheitelwasserstände für die Variante ST1. Vor Erreichen des Scheitels sind die Strömungsgeschwindigkeiten für ST1 und W0 deutlich niedriger als für ST0. Der sich entlang der Elbe aufbauende Wasserstandsgradient ist in der Flutphase für ST1 deutlich kleiner als für W0. Dies macht sich hier in den niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten bemerkbar. Nach 15:00 Uhr, d.h. bei ablaufendem Wasser nach der Sturmflut, treten jedoch bei ST1 die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten auf. Der Wind dreht am 3.1.1976 morgens bis 5:00 Uhr von Süd (180°) auf West (270°) (siehe Abb. 34 oben) und verstärkt sich in dieser Zeit von 8 m/s auf mehr als 20 m/s. Bei südlichen und westlichen Winden liegt der Kilometrierungspunkt 725 im Abschattungsbereich von Cuxhaven, so dass die Windgeschwindigkeiten im nördlichen Außenelbegebiet mit 25 m/s deutlich höher sind.

Die Abbildung 35 zeigt die Strömungsverhältnisse in der Außenelbe während des Vormittagniedrigwassers für die Varianten ST1, W0 und ST0. Die Varianten ST1 und W0 unterscheiden sich lediglich um den über dem Ästuar herrschenden Wind, die Variante ST0 jedoch auch in dem von der Nordsee vorgegebenen Tidesignal. Die eingeblendete Tideuhr zeigt zur Orientierung für die Varianten ST1 und W0 die bei Cuxhaven gemessenen und für die Variante ST0 die modellierten Wasserstände. Bei mittleren Tiden (ST0) herrscht bei Niedrigwasser Ebbstrom mit Geschwindigkeiten bis zu 1,8 m/s in der Fahrrinne. Die Wattflächen um Scharhörn, Neuwerk sowie nördlich der Medemrinne sind trockengefallen. Während der Sturmflut SF76 - ST1 sind bei Niedrigwasser keine Strömungsgeschwindigkeiten in der Fahrrinne zu beobachten. Jedoch findet man auf den überfluteten Wattflächen stromaufgerichtete Strömung. Falls man den lokalen Wind über dem Ästuar ≫abschaltet≪, entsteht in der Medemrinne und auf Medemsand und Medemgrund ein schwacher Ebbstrom mit Geschwindigkeiten $< 0{,}3$ m/s.

In den Abbildungen 36 und 37 sind für die Varianten ST1, ST0 und W0 die Zeitreihen der

Bodenschubspannung und der Windschubspannung (nur ST1) sowie die Energiedissipation am Boden und die windinduzierte Energieänderung (nur ST1) dargestellt. Im zeitlichen Verlauf der Bodenschubspannung spiegelt sich der Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit und in der Entwicklung der Windschubspannung die der Windgeschwindigkeit wieder. Während dieses Niedrigwasserereignisses (∼6:00 Uhr) sind die Energiedissipation am Boden und die windinduzierte Energieänderung am Kilometrierungspunkt 725 für die Varianten ST1 und W0 relativ klein. Auf Grund der deutlich höheren Strömungsgeschwindigkeiten während des Niedrigwassers bei astronomischer Tide (∼9:00 Uhr) sind dann sowohl die Bodenschubspannung als auch die Energiedissipation am Boden bei Elbe km 725 deutlich größer.

Die flächenhafte Darstellung der Windschubspannung (vgl. Abb. 38) zeigt, dass die größten Werte im nördlichen, nicht durch die ≫Landspitze≪ von Cuxhaven abgeschatteten Bereich, des Untersuchungsgebietes auftreten. Die windinduzierten Energieänderungen (Abb. 39) nehmen über den flachen Gebieten die größten Werte an. Negative Werte findet man teilweise in den tiefen Rinnen. Ein Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten mit und ohne lokalen Wind (ST1 und W0 in Abbildung 35 auf Seite 51) zeigt, dass in diesen Rinnen bei Niedrigwasser ohne Wind (W0) leichter Ebbstrom herrscht, der durch den starken Westwind bei ST1 zum Erliegen kommt. Über der flachen Gebieten zeigt sich der Effekt der positiven windinduzierten Energieänderung in einer stromaufgerichteten Strömung. Das durch den lokalen Windeinfluss veränderte Strömungsverhalten macht sich auch in der Bodenschubspannung (Abb. 40) bzw. in der Energiedissipation am Boden (Abb. 41) bemerkbar. Beide Größen nehmen über den flachen Gebieten zu.

In einem weiteren Schritt soll nun der Einfluss des lokalen Windes auf den Energieinhalt des Ästuars betrachtet werden. Hierbei sind die auftretenden Unterschiede von größerem Interesse als die Absolutwerte. Zuerst wird für alle Varianten für jeden Zeitschritt die Energie im Wasserkörper pro Volumen, d.h. die spezifische potentielle bzw. spezifische kinetische Energie berechnet. Durch Integration über die Tiefe erhält man die potentielle und kinetische Energiedichte, die eine bessere Vergleichbarkeit einzelner Szenarien trotz unterschiedlicher Wasserstände erlaubt. Alle Szenarien werden mit dem Gleichgewichtszustand verglichen. Als Gleichgewichtszustand bietet sich z.B. ein nur durch Oberwasser und nicht durch Wind und Tide beeinflußtes ≫Ästuar≪ an. Aus diesem Vergleich erhält man die für das jeweilige Szenario verfügbare potentielle und kinetische Energiedichte.

Beispielhaft sind für die Sturmflut 3.1.1976 für die beiden Ereignisse ≫Flutstrom≪ in Abbildung 42 und ≫Ebbstrom≪ in Abbildung 43 (vgl. auch Tabelle 4 auf Seite 38) die Unterschiede zwischen den Szenarien ST1 und W0 dargestellt. Zusätzlich wird der jeweilige Differenzwasserstand gezeigt.

Für beide Ereignisse ist die verfügbare potentielle Energiedichte für die Variante ST1 höher als für W0 (siehe Abb. 42 und Abb. 43 jeweils in der Mitte). Dies läßt sich auf die für ST1

höheren Wasserstände zurückführen. Bei Flutstrom ist die verfügbare kinetische Energiedichte in der tiefen Rinne zwischen Cuxhaven und der Ostemündung für die Variante ST1 niedriger als für die Variante W0 (siehe Abb. 42 unten). Für das Ereignis ≫Ebbstrom≪ (siehe Abb. 43 unten) ergibt sich das umgekehrte Bild. Hier ergeben sich größere Werte für die Variante ST1. Die windinduzierte Energieänderung bei ST1 über den flachen Gebieten nordöstlich der Fahrrinne macht sich nicht in einer Veränderung der verfügbaren kinetischen Energiedichte bemerkbar. An den beiden betrachteten Terminen ist vielmehr der Effekt des lokalen, über dem Ästuar herrschenden Windes deutlich besser im Unterschied der verfügbaren potentiellen Energiedichte zwischen ST1 und W0 zu sehen.

Um den zeitlichen Verlauf der verfügbaren potentiellen und kinetischen Energie darzustellen, werden die Werte entlang eines Längsprofils von Scharhörn bis zum Wehr Geesthacht im Abstand von einer Stunde beginnend eine Stunde vor Niedrigwasser für die Sturmfluten SF76 (3.1.1976 5:00 bis 17:00 Uhr in Abbildung 44 auf Seite 57) und SF94 (28.1.1994 6:00 bis 18:00 Uhr in Abbildung 45 auf Seite 57) als Unterschied zwischen den Varianten ST1 und W0 gezeigt.

Für beide Sturmfluten steigt die verfügbare potentielle Energiedichte entlang des Ästuares für ST1 stärker an als für W0. Jedoch erreichen die Werte für SF76 bereits bei Brunsbüttel um bis zu 50% höhere Werte. Schon aus der Auswertung der Sturmflutscheitelwasserstände oder auch aus den Abbildungen 31 auf Seite 43 und 33 auf Seite 44 ist bekannt, dass der Einfluss des lokalen Windes auf die Scheitelwasserstände in der Elbe bei SF76 größer war als bei SF94. Dies wird hier auch in der verfügbaren potentiellen Energie sichtbar.

Die verfügbare kinetische Energiedichte zeigt für beide Sturmfluten große Abweichungen zwischen ST1 und W0 lediglich im Außenelbebereich bis Brunsbüttel. In den Abbildungen 46 und 47 auf Seite 58 ist dieser Bereich detaillierter dargestellt und die Werte sind nur für die in Tabelle 4 auf Seite 38 genannten Termine eingetragen. Für beide Sturmfluten findet man die größte Zunahme der verfügbaren kinetischen Energiedichte für ST1 verglichen mit W0 in der Ebbephase nach Erreichen des Sturmflutscheitelwasserstandes. Die deutlichste Abnahme der verfügbaren kinetischen Energiedichte für ST1 im Vergleich mit W0 ergibt sich für die Flutphase einschließlich des Zeitpunktes des Scheitelwasserstandes. Der Abbau des durch den lokalen Wind noch erhöhten großen Wasserstandsgradienten entlang der Elbe führt in der der Sturmflut folgenden Ebbe zu zusätzlich erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten (vgl. z.B. Abb. 34 auf Seite 50) und Durchflussmengen(vgl. z.B. Abb. 32 auf Seite 44).

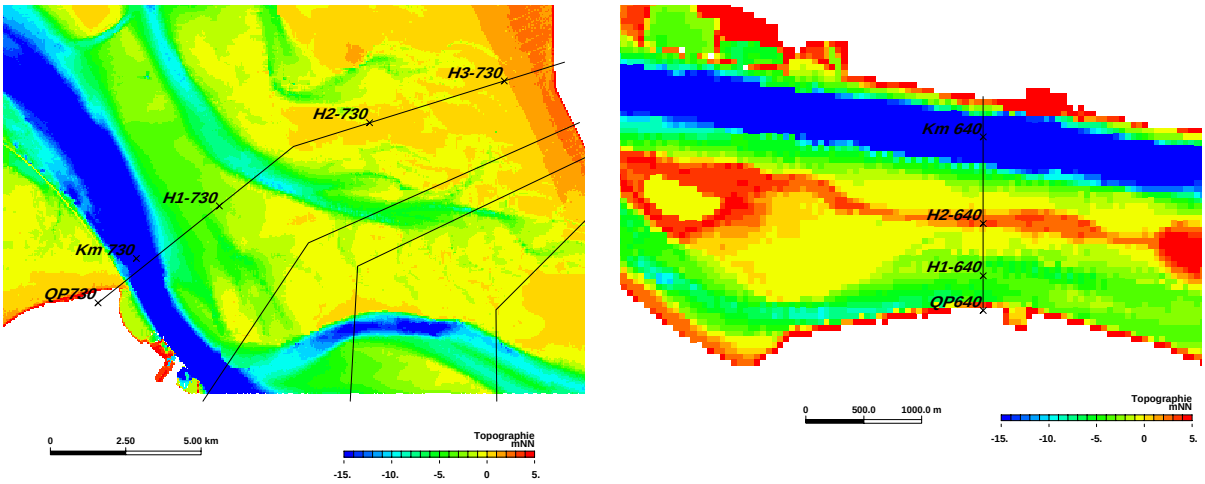
Aus den bereits vorgestellten Ergebnissen läßt sich für einzelne Punkte im Ästuar eine Energiebilanz abschätzen. Beispielhaft sei hier eine Energiebilanz für einzelne Punkte entlang des Querprofiles QP-730 und QP-640 dargestellt. Die Lage der Punkte (siehe auch Skizze in Tabelle 5) wurde so gewählt, dass es sowohl Punkte in der tiefen Fahrrinne als auch Punkte über den flachen (Watt)-Gebieten gibt.

Über einen Zeitraum von 6 Stunden am 3.1.1976 von 9:00 Uhr bis 15:00 Uhr werden die in Tabelle 5 genannten Größen am jeweiligen Ort betrachtet. Ziel dieses ersten Versuchs einer lokalen Energiebilanz an unterschiedlichen Orten im Ästuar ist es, den Einfluss des über dem Ästuar herrschenden Windes auf die Energiebilanz abschätzen zu können.

Für alle dargestellten Orte zeigt sich, dass die über 6 Stunden integrierte windinduzierte Energieänderung größer ist als die Energiedissipation in dieser Zeit. An den in flachen Gebieten der Außenelbe gelegenen Punkten H1-730 und H2-730 erhält man über den betrachteten Zeitraum die größte windinduzierte Energieänderung. In der unteren Hälfte der Tabelle 5 ist die Zunahme der verfügbaren potentiellen und kinetischen Energiedichte innerhalb des betrachteten Zeitraums für die Variante ST1 im Vergleich zu W0 dargestellt. Große Änderungen der verfügbaren potentiellen Energiedichte findet man an den Punkten entlang des Querprofils QP-640 (siehe zum Vergleich auch Abb. 44).

Die Gesamtbilanz stellt einen qualitativen Vergleich der Quellen und Senken (windinduzierte Energieänderung und Energiedissipation) mit der am Ort zusätzlich bei Variante ST1 im Vergleich zu W0 vorhandenen Energie dar. Eine positive Gesamtbilanz deutet darauf hin, dass am betrachteten Ort mehr Energie eingetragen als vorgefunden wird, eine negative Gesamtbilanz jedoch, dass am betrachteten Ort mehr Energie vorhanden ist als lokal eingetragen wird. Der Vergleich dieser Gesamtbilanzen zeigt, dass in den Flachwasserbereichen im Außenelbebereich mehr Energie eingetragen wird, als am betrachteten Ort vorhanden ist. In der tiefen Rinne vor Cuxhaven (km 730) jedoch sieht man das Gegenteil. Um die verfügbare potentielle Energiedichte um das angegebene Maß zu erhöhen, muß ein Energietransport an diesen Ort stattgefunden haben. An den weiter stromaufgelegenen Orten entlang des Querprofils QP-640 ist der Unterschied zwischen lokal durch den über dem Ästuar herrschenden Wind erzeugten Energie und der am Ort vorhandenen Energie deutlich größer. Nur ca. 20 % des Energiezuwachses können durch den lokalen Wind erklärt werden. Die übrige Energiemenge muß entlang der Elbe innerhalb der 6-stündigen Zeitspanne herantransportiert worden sein.

Eine detaillierte Energiebilanz für das ganze Ästuar bzw. Teilgebiete des Ästuars und den gesamten ca. 24-stündigen Sturmflutzeitraum ist mit erheblichen zusätzlichen Auswertungen verbunden, die in diesem Projekt nicht geleistet werden konnten.



Skizze: Lage der auf QP-730 bei Cuxhaven bzw. auf QP-640 bei Wedel betrachteten Orte.

	QP-730				QP-640		
	km 730	**H1-730**	**H2-730**	**H3-730**	**km 640**	**H1-640**	**H2-640**
Topographie [mNN]	**-21.1**	**-2,3**	**+0,1**	**+0,6**	**-17,5**	**-3,7**	**+1,9**
windinduzierte Energieänderung in 6 Stunden in [J/m^2]	**18000**	**23800**	**21800**	**10800**	**9700**	**10800**	**15000**
Energiedissipation in 6 Stunden in [J/m^2]	**13600**	**15000**	**13600**	**6500**	**3400**	**7100**	**9100**
Bilanz in [J/m^2]	**4400**	**8800**	**7200**	**4300**	**6300**	**3700**	**6000**
Zunahme der verfügbaren potentiellen Energiedichte im Vergleich zu W0 in 6 Std. in [J/m^2]	**5500**	**3500**	**4000**	**3500**	**30000**	**30000**	**30000**
Zunahme der verfügbaren kinetischen Energiedichte im Vergleich zu W0 in 6 Std. in [J/m^2]	**±0**	**-1000**	**-200**	**-300**	**±0**	**±0**	**500**
Bilanz in [J/m^2]	**5500**	**2500**	**3800**	**3200**	**30000**	**30000**	**30500**
Gesamtbilanz	**−**	**+**	**+**	**+**	**−**	**−**	**−**

Tabelle 5: Abschätzung der Energiebilanz an einzelnen Orten in der Elbe für den Zeitraum 3.1.1976 9:00 Uhr bis 15:00 Uhr. Aufgeführt sind an ausgewählten Orten die Quellen und Senken (windinduzierte Energieänderung und Energiedissipation) sowie der Zunahme der verfügbaren potentiellen und kinetischen Energiedichte für die Variante ST1 im Vergleich zur Variante W0. Zur Erläuterung siehe Text.

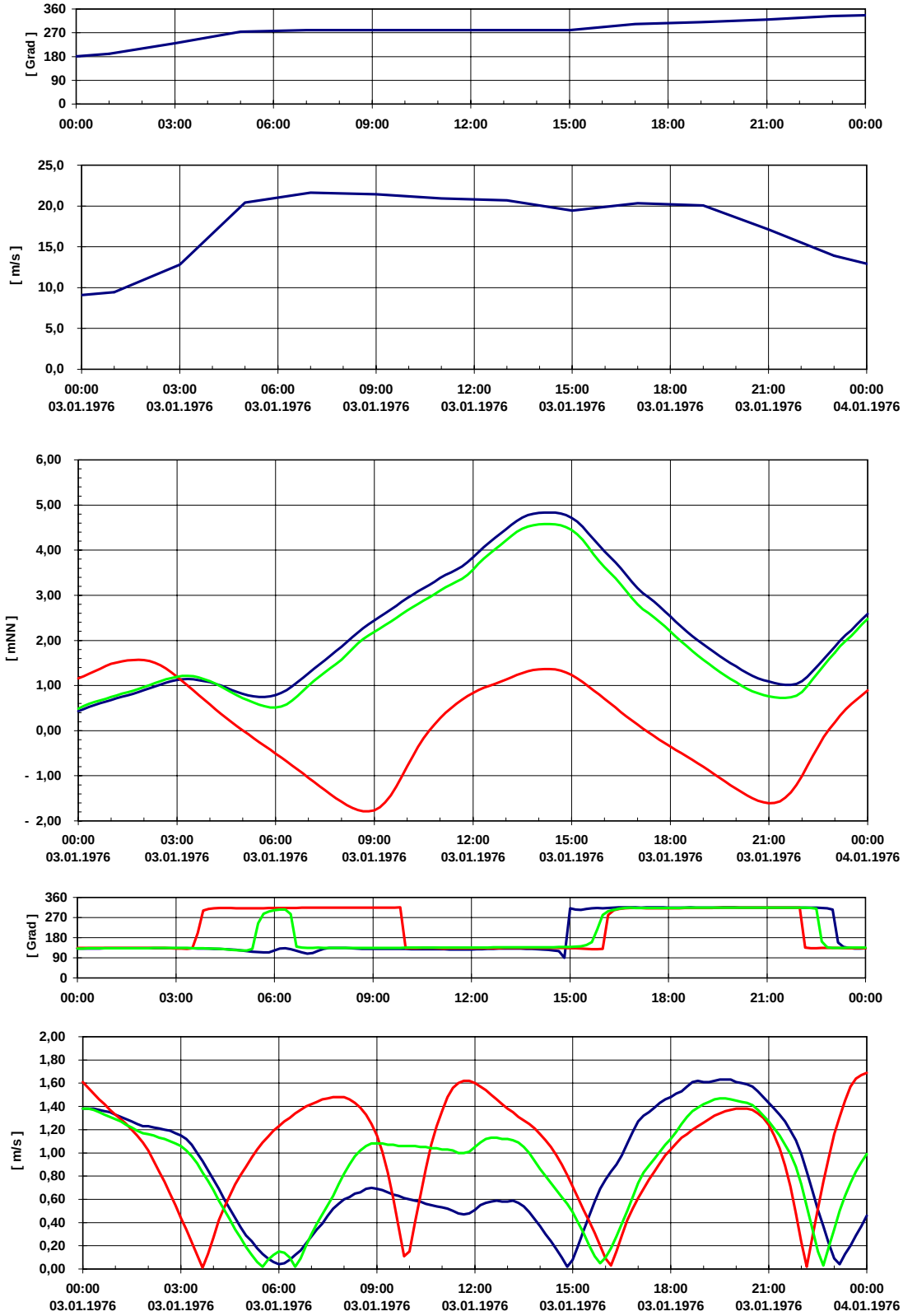


Abbildung 34: Windgeschwindigkeit (MKW), Wasserstand und Strömung (TRIM-2D) am 3.1.1976 bei Elbe km 725 für ST1 (blau), ST0 (rot) und W0 (grün).