

1 Einleitung

Dieser Bildband zur *Sensitivitätsstudie Sturmflut Elbe* stellt die Ergebnisse der in den Projekten KLIWAS und KLIMZUG-NORD durchgeführten Sturmflutuntersuchungen für die Tiefebene vor. Er ist zum einen eine Ergänzung zum Kapitel 5.7 "Sturmfluten in den Ästuaren Elbe, Jade-Weser und Ems" des KLIWAS-Abschlussberichts der Projekte 2.04/3.02 (Seiffert, R. et al., 2014). Der Abschlussbericht ist in der KLIWAS Schriftenreihe als Bericht KLIWAS-36/2014 veröffentlicht und steht auf der KLIWAS Internetseite <http://www.kliwas.de/> zur Verfügung. Zum anderen ergänzt der Bildband das im Rahmen von KLIMZUG-NORD entstandene *Kursbuch Klimaanpassung - Handlungsoptionen für die Metropolregion Hamburg* (KLIMZUG-NORD Verbund, 2014) sowie den Bericht *Wilhelmsburg im Klimawandel - Ist-Situation und zukünftige Veränderungen* (Schlünzen, K.H. and Linde, M., 2014). Diese Berichte sind über die KLIMZUG-NORD Internetseite <http://klimzug-nord.de/> erhältlich.

Im Rahmen der Projekte KLIWAS (Laufzeit: März 2009 bis Dezember 2013) und KLIMZUG-NORD (Laufzeit: April 2009 bis März 2014) werden von der BAW mithilfe dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Modelle der Ästuare von Elbe, Jade-Weser und Ems in verschiedenen Szenarien zentrale Aspekte möglicher Zukünfte untersucht. In den hier dargestellten Modellrechnungen zu Sturmfluten in der Elbe wird der Meeresspiegel, der Wind und der Abfluss variiert. Alle anderen Parameter werden nicht verändert. Dadurch lassen sich klare Wenn-Dann Aussagen formulieren und mögliche Betroffenheiten ableiten. Die Ergebnisse stellen keine Projektionen dar, sondern vermitteln prinzipiell, welche Auswirkungen z.B. ein Meeresspiegelanstieg auf die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes hat. In Kapitel 4 ("Methoden") des KLIWAS-Abschlussberichts der Projekte 2.04/3.02 wird die Vorgehensweise allgemein beschrieben. Zudem sind alle im Rahmen von KLIWAS durchgeführten Studien nach NOKIS-Standard mit Metadaten beschrieben und z. B. über <http://www.geoportal.de/> abrufbar.

2 Sensitivitätsstudie zu Sturmfluten

Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems werden nicht nur durch die Gezeitendynamik und den Windstau in der Deutschen Bucht beeinflusst, sondern auch Prozesse in den bis zu 100 km tief in die Norddeutsche Tiefebene hineinreichenden Flussmündungsgebieten prägen das Erscheinungsbild einer Sturmflut. So beeinflussen die Wasserstandsentwicklung in der Deutschen Bucht, die lokale Windwirkung über dem Ästuar, der Oberwasserzufluss sowie die Topographie des Ästuars den Sturmflutscheitelwasserstand HW (höchster im Sturmflutzeitraum aufgetretener Wasserstand) entlang des Ästuars.

Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie zu Sturmfluten in Zeiten des Klimawandels werden Szenarien untersucht, die zentrale Elemente einer möglichen Zukunft hervorheben. Als zentrale Elemente einer möglichen Zukunft werden z. B. eine Zunahme der Niederschläge im Winter (Becker, 2012) und die daraus resultierenden höheren Abflüsse (Horsten, T. et al., 2012) in der Sturmflutsaison, eine Zunahme der Windgeschwindigkeiten oder ein Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht (Heinrich, H. et al., 2012) genannt.

In einer Sensitivitätsstudie wird der Einfluss folgender Parameter auf den Sturmflutscitewasserstand entlang der Ästuarer untersucht:

- Zunahme des Oberwasserzuflusses: Sturmflutscenarien werden mit dem gemessenen Abfluss sowie mit jeweils drei erhöhten Abflüssen (2000 m³/s, 3000 m³/s und 4000 m³/s für Elbe und Weser sowie 350 m³/s, 700 m³/s und 1200 m³/s für die Ems) kombiniert. Der höchste untersuchte Wert entspricht dem heutigen HHQ (höchste bekannter Wert; siehe Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch DGJ, 2011 bzw. DGJ, 2012) des jeweiligen Ästuarer;
- Erhöhung des lokalen Windes über dem Ästuar um 5 % und 10 %;
- Meeresspiegelanstieg in der Nordsee: Sturmflutscenarien werden mit einem Meeresspiegelanstieg von 25 cm, 80 cm und 115 cm kombiniert (zur Einordnung der Werte siehe Gönnert, G. et al., 2009).

Das Ziel dieser Sensitivitätsstudie ist es, ein besseres Verständnis für die Variationsbreite der Sturmflutscitewasserstände unter heutigen und möglichen zukünftigen Randbedingungen zu erhalten. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich die Charakteristik zukünftiger Sturmfluten durch einen Klimawandel nicht grundsätzlich ändert (Seiffert, R. et al., 2014). Deswegen kann die Sensitivitätsstudie auf der Grundlage von historischen, sehr hohen Sturmfluten (Sturmflut 3. Januar 1976 (SF76) in Elbe und Jade-Weser, Sturmflut 1. November 2006 (SF06) in der Ems) durchgeführt werden.

Der Einsatz von hydrodynamisch numerischen (HN-) Modellen (hier UnTRIM siehe Casulli, V. and Walters, R.A., 2000 bzw. BAW, 2004c) ermöglicht es, den Einfluss der genannten Prozesse auf den Wasserstandsverlauf bei Sturmflut jeweils einzeln zu untersuchen.

Die Modellgebiete von Elbe, Jade-Weser und Ems umfassen den bei Sturmflut betroffenen Bereich der Ästuarer. Landseitig werden sie durch die heutige Deichlinie begrenzt. Bei Sturmflut sowie bei hohen Oberwasserzuflüssen werden die Wehre Geesthacht (Elbe), Hemelingen (Weser), Herbrum (Ems) und Bollingerfähr (Ems) gelegt und begrenzen somit nicht mehr den tidebeeinflussten Bereich der genannten Flüsse. Die Modelltopographien beschreiben den Zustand 2003 (Elbe und Jade-Weser) bzw. 2006 (Ems).

Die Wasserstandsentwicklung am offenen Rand zur Nordsee wird für den heutigen Zustand (Referenzszenario) aus gemessenen Wasserstandszeitreihen erzeugt. Der Anstieg des Meeresspiegels (slr) in der Deutschen Bucht wird durch ein Anheben der Wasserstandsrandwerte im Simulationszeitraum (siehe Tabelle 1 auf Seite 4) um 25 cm, 80 cm und 115 cm berücksichtigt.

Für die Referenzszenarien wird der während der zugrunde liegenden historischen Sturmfluten (SF76 und SF06) herrschende Abfluss vorgegeben. Für die Oberwasserzufluss-szenarien werden die angegebene erhöhten Abflüsse im gesamten Simulationszeitraum (siehe Tabelle 1 auf Seite 4) im HN-Modell berücksichtigt.

Die Windfelder für die untersuchten Sturmflutzeiträume wurden vom DWD bereit gestellt. Für die Windszenarien werden die Beträge der Windgeschwindigkeiten im Simulationszeitraum (siehe Tabelle 1 auf Seite 4) um 5 % bzw. 10 % erhöht.

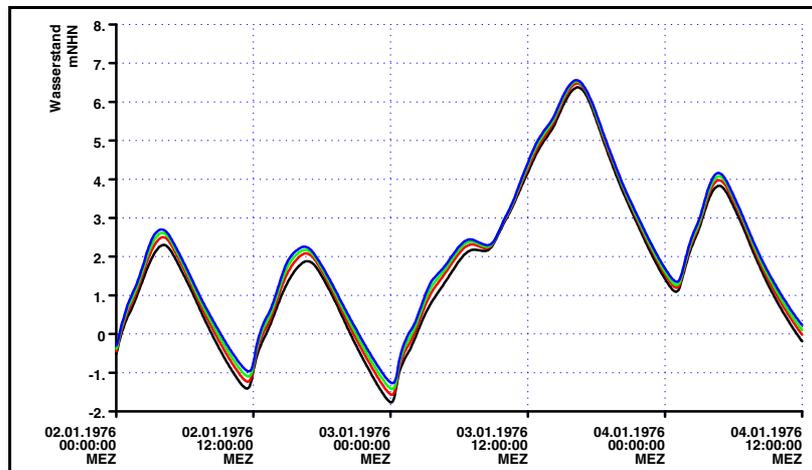


Bild 1: Zeitreihe des Wasserstandes bei Elbe - km 640 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SF76 Q500 (schwarz, as01), Q2000 (rot, v83q2), Q3000 (grün, v83q3) und Q4000 (blau, v83q4).

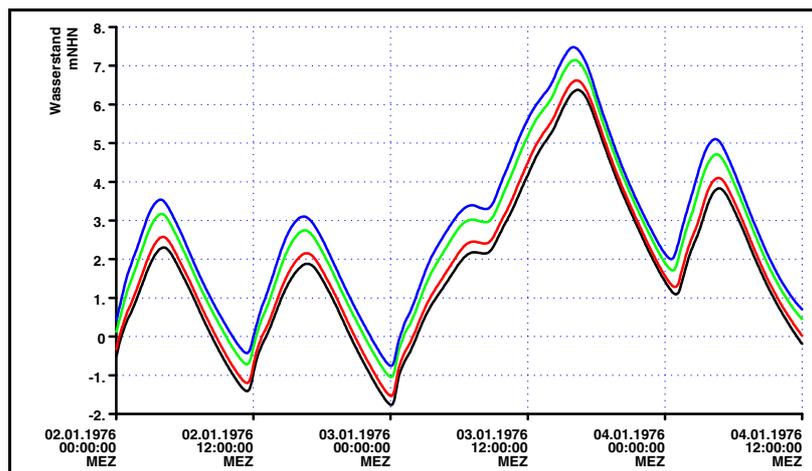


Bild 2: Zeitreihe des Wasserstandes bei Elbe - km 640 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SF76 ohne slr (schwarz, as01), slr+25 cm (rot, as02), slr+80 cm (grün, as04) und slr+115 cm (blau, as05).

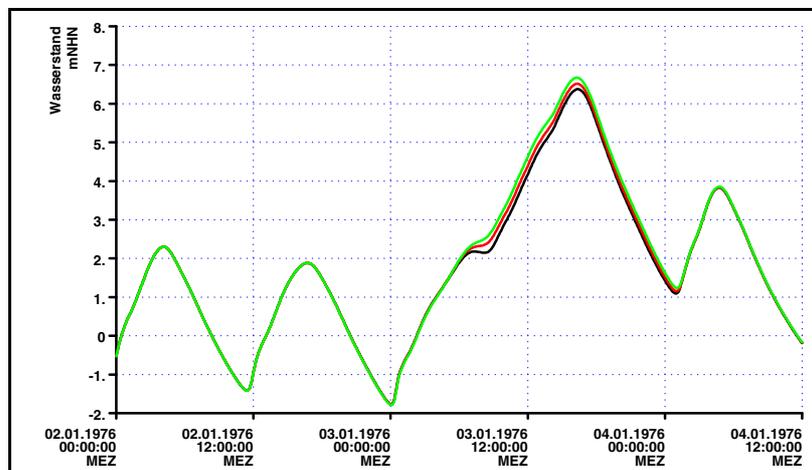


Bild 3: Zeitreihe des Wasserstandes bei Elbe - km 640 (Schulau) für die Sturmflutszenarien SF76 ohne Windveränderung (schwarz, as01), Wind+5% (rot, as17) und Wind+10% (grün, as21).

Ästuar	Szenario	Simulationszeitraum		
Elbe	SF76	1. 1. 1976 2:00 Uhr	bis	4. 1. 1976 13:00 Uhr
Jade-Weser	SF76	1. 1. 1976 1:30 Uhr	bis	4. 1. 1976 18:00 Uhr
Ems	SF06	28. 10. 2006 0:00 Uhr	bis	2. 11. 2006 13:00 Uhr

Tabelle 1: *Simulationszeiträume für die Sturmflutszenarien SF76 (Elbe und Jade-Weser) bzw. SF06 (Ems)*

Die Bilder 1 bis 3 auf der vorherigen Seite zeigen beispielhaft die Wasserstandsentwicklung bei Schulau in der Unterelbe (Elbe - km 640) für ausgewählte Oberwasserzufluss-, lokaler Wind- und Meeresspiegelanstiegsszenarien basierend auf dem Sturmflutszenario SF76. Man erkennt, dass sowohl der Abfluss Q als auch der Meeresspiegelanstieg slr die Höhe und die Eintrittszeit des Tideniedrigwassers T_{nw} und des Tidehochwassers T_{hw} am Tag vor der Sturmflut beeinflussen. Die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes HW und die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes t_{HW} sowie die Dauer hoher Wasserstände DHW werden vom Abfluss, vom lokalen Wind über der Elbe und vom Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht beeinflusst. Der Sturmflutscheitelwasserstand wird höher und tritt früher ein. Hohe Wasserstände, z.B. höher als $NHN + 3,00$ m treten länger auf.

Die Sturmflutscheitelwasserstände HW entlang der Ästuar von Elbe, Weser und Ems für das Szenario Meeresspiegelanstieg sind in Bild 4 auf Seite 8 dargestellt. Bei der Modellierung der Szenarien für die Ems wird von einem geöffneten Sturmflutsperrwerk bei Gandersum (Ems-km 32) ausgegangen. Der Einfluss eines Meeresspiegelanstieges um 25 cm, 80 cm und 115 cm auf die Sturmflutscheitelwasserstände ist bis tief in die Ästuar von Elbe, Weser und Ems hinein zu erkennen.

Erhöht sich zusätzlich im Sturmflutzeitraum der Abfluss, so verändert dies zusätzlich die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes. Beispielhaft sind in Bild 6 auf Seite 10 die Sturmflutscheitelwasserstände für einen Abfluss in Elbe und Weser von $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ bzw. in der Ems von $700 \text{ m}^3/\text{s}$ eingetragen. Im Mündungsbereich verändert ein erhöhter Abfluss die Sturmflutscheitelwasserstände um weniger als ± 1 cm. Im mittleren Bereich der Ästuar wird der Sturmflutscheitelwasserstand zusätzlich um mehrere Zentimeter und im oberen Bereich um mehrere Dezimeter erhöht. Es zeigt sich, dass bei Sturmflut die Wasserstände im Mündungsbereich durch das Geschehen in der Nordsee, d.h. Sturmflut und Meeresspiegelanstieg geprägt sind, während die Wasserstände im oberen Bereich der Ästuar durch das Geschehen im Binnenland, d.h. den Abfluss, geprägt sind.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Sensitivitätsstudie zum Sturmflutscheitelwasserstand in Tabelle 2 dargestellt. Im Mündungsbereich der Ästuar wird der Sturmflutscheitelwasserstand durch das Geschehen in der Nordsee beeinflusst. Eine Erhöhung des Meeresspiegels führt zu einer Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstandes in der gleichen Größenordnung. Eine Zunahme des Oberwasserzuflusses beeinflusst die Sturmflutscheitelwasserstände im Mündungsbereich nur geringfügig (± 1 cm). Bei einer Kombination von Meeresspiegelanstieg mit einer Zunahme des Oberwasserzuflusses dominiert der Effekt des Mee-

resspiegelanstieges. Eine Zunahme der lokalen Windgeschwindigkeit über den Ästuaren um 5 % bzw. 10 % erhöht die Sturmflutscheitelwasserstände um bis zu 30 cm. Bei einer Kombination von Meeresspiegelanstieg mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit summieren sich die Effekte von Meeresspiegelanstieg und Windgeschwindigkeitszunahme. Im oberen Bereich der Ästuar wird der Sturmflutscheitelwasserstand durch das Geschehen im Binnenland beeinflusst. Eine Zunahme des Oberwasserzuflusses kann den Sturmflutscheitelwasserstand um mehrer Dezimeter anheben. Im Binnenbereich, z.B. in der Elbe bei Bleckede, ist der Wasserstand lediglich durch den Abfluss bestimmt. Der Einfluss des Meeresspiegelanstieges nimmt z.B. stromauf des Wehres Geesthacht (Elbe-km 585) deutlich ab (siehe Bild 4 auf Seite 8 oben). Im mittleren Bereich der Ästuar wird der Sturmflutscheitelwasserstand sowohl durch das Geschehen über der Nordsee (Meeresspiegelanstieg), das Geschehen über dem Ästuar (Zunahme der lokalen Windgeschwindigkeit) als auch dem Geschehen im Binnenland (Oberwasserzufluss) beeinflusst.

Szenarien	Ästuarmündung	mittleres Ästuar	oberes Ästuar
Oberwasserzufluss Q	$\pm 1 \text{ cm}$	5 cm bis 30 cm	10 cm bis 100 cm
Meeresspiegelanstieg slr	+ slr	+ slr $\pm 10 \text{ cm}$	+ slr $\pm 10 \text{ cm}$
Kombination Q und slr	+ slr	$\leq (\text{slr} + Q)$	$\leq (\text{slr} + Q)$
Windgeschwindigkeit	bis zu 10 cm	bis zu 30 cm	bis zu 30 cm
Kombination Wind und slr	$\sim(\text{slr} + \text{Wind})$	$\sim(\text{slr} + \text{Wind})$	$\sim(\text{slr} + \text{Wind})$

Tabelle 2: Bedeutung der untersuchten Variation der Einflussgrößen bzw. ihrer Kombination für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände HW entlang der Ästuar von Elbe, Weser und Ems.

Zusätzlich zur Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes verändert sich durch den Meeresspiegelanstieg auch die Eintrittszeiten des Sturmflutscheitelwasserstandes. Bezogen auf einen Ort in der Mündung der Ästuar treten die Sturmflutscheitelwasserstände bei einem Meeresspiegelanstieg im zentralen Ästuar früher ein.

Beispielhaft sind für Hamburg (Elbe-km 623), Bremen (Weser-km 0) und Emden (Ems-km 40) die Eintrittszeiten im Referenzszenario mit heutigem Meeresspiegel bezogen auf die Elbmündung (Elbe-km 748), die Wesermündung (Weser-km 126) und die Emsmündung (Ems-km 107) in Tabelle 3 dargestellt. Erhöht sich der Meeresspiegel um 25 cm, 80 cm oder 115 cm so treten die Sturmflutscheitelwasserstände 3 Minuten bis 27 Minuten früher ein. In Elbe und Ems treten die Sturmflutscheitelwasserstände in Hamburg bzw. Emden mit zunehmendem Meeresspiegelanstieg früher ein. In der Weser ist diese systematische Veränderung nicht zu beobachten. Hier beeinflusst zusätzlich die je nach Meeresspiegelanstieg unterschiedliche Wirkung der von den Sommerdeichen gebildeten Polder die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes in Bremen. Bei einem Meeresspiegelanstieg ist bei Sturmflut mit einer Verkürzung der Vorwarnzeiten für die Bevölkerung und die Deichverteidigung sowie das Räumen von überflutungsgefährdeten Hafengebieten zu erwarten.

Durch einen Meeresspiegelanstieg verändert sich die Dauer hoher Wasserstände. Entwässerungssystem und Siele ohne Pumpen sind auf Wasserstandsgefälle zum Ästuar ange-

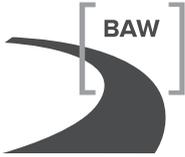
Szenario	SF76	SF76	SF06
	Hamburg (Elbe)	Bremen (Weser)	Emden (Ems)
	tHW [min]	tHW [min]	tHW [min]
SF_ref	182	239	101
	dtHW [min]	dtHW [min]	dtHW [min]
slr + 25 cm	3	19	7
slr + 80 cm	9	5	21
slr + 115 cm	13	7	27

Tabelle 3: Eintrittszeit tHW des Sturmflutscheitelwasserstandes sowie Änderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes auf Grund eines Meeresspiegelanstieges (slr).

wiesen. Auch Hafenanlagen können bei extrem hohen Wasserständen nicht genutzt werden. Schleusen und Sperrwerke werden bei Sturmflut geschlossen und bilden so Einschränkungen für den Schiffsverkehr.

In einer Sensitivitätsstudie zu Sturmfluten in Elbe, Jade-Weser und Ems werden systematische Variationen der Parameter durchgeführt, die sich durch den Klimawandel ändern können. Die Sturmflutscheitelwasserstände im Mündungsbereich der Ästuare werden durch das Geschehen in der Nordsee, d.h. die Sturmflut und der Meeresspiegelanstieg, bestimmt. Im Ästuar wird der Sturmflutscheitelwasserstand sowohl durch das Geschehen in der Nordsee, das Geschehen über dem Ästuar (lokaler Wind) als auch das Geschehen im Binnenbereich (Abfluss) geprägt. Die betrachteten Szenarien führen zu einer Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände, einer früheren Eintrittszeit der Sturmflutscheitelwasserstände sowie einer längeren Dauer hoher Wasserstände. Es ist davon auszugehen, dass die bekannten Probleme bei Sturmfluten durch den Klimawandel verstärkt werden.

Im Falle eines Meeresspiegelanstieges sollte die Wirksamkeit des Küstenschutzes entlang des gesamten Ästuars überprüft werden. Bei einer zusätzlichen Erhöhung des Abflusses bei Sturmflut sollte besonders auf die Wirksamkeit des Küstenschutzes in den oberen Bereichen der Ästuare geachtet werden. Der frühere Eintritt des Sturmflutscheitels durch einen Meeresspiegelanstieg verkürzt die Vorwarnzeit für z.B. das Räumen überflutunggefährdeter Hafengebiete. Die durch einen Meeresspiegelanstieg verursachte längere Dauer hoher Wasserstände kann z.B. zu Problemen bei der Entwässerung in die Ästuare führen. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsstudie tragen dazu bei, Betroffenheiten entlang der Ästuare zu finden und dann geeignete Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln.



2.1 Vergleich Elbe, Weser und Ems: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Ästuare bei einem Meeresspiegelanstieg

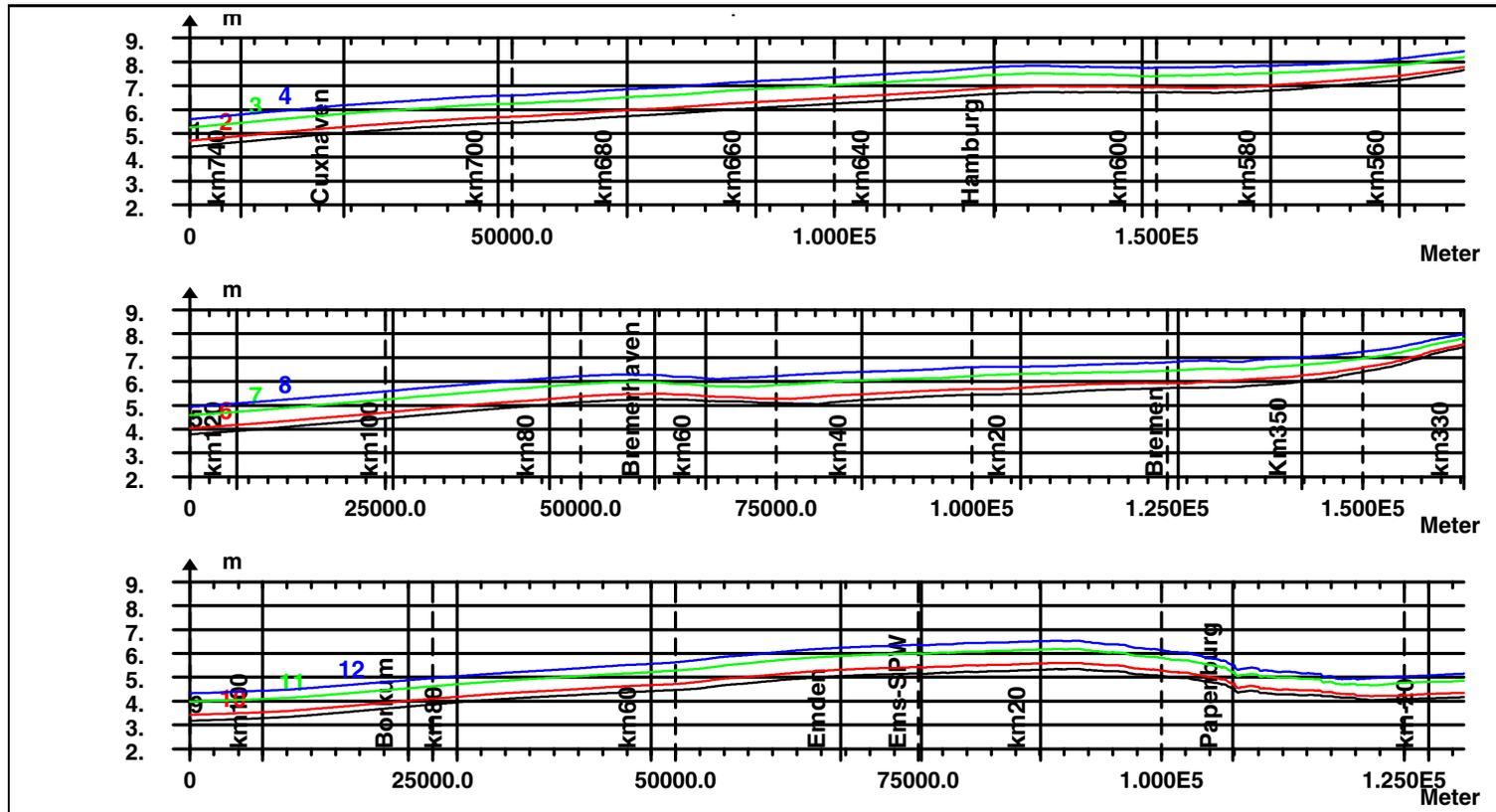


Bild 4: Vergleich Sturmflutscheitelwasserstand HW Elbe, Weser und Ems mit Meeresspiegelanstieg.

Elbe (Q500, oben): für die Sturmflutszenarien SF76 ohne slr (as01), slr+25 cm (as02), slr+80 cm (as04) und slr+115 cm (as05) entlang des Elbefahrwassers von Elbe-km 748 bis Elbe-km 550.

Weser (Q250, Mitte): für die Sturmflutszenarien SF76 ohne slr (er011), slr+25 cm (aj14), slr+80 cm (aj15) und slr+115 cm (er31) entlang des Weserfahrwassers von Weser-km 126 bis Weser-km 330.

Ems (Q32, unten): für die Sturmflutszenarien SF06 ohne slr (v10), slr+25 cm (smp25), slr+80 cm (mslp80) und slr+115 cm (mslp115) entlang des Emsfahrwassers von Ems-km 107 bis Ems-km 23.



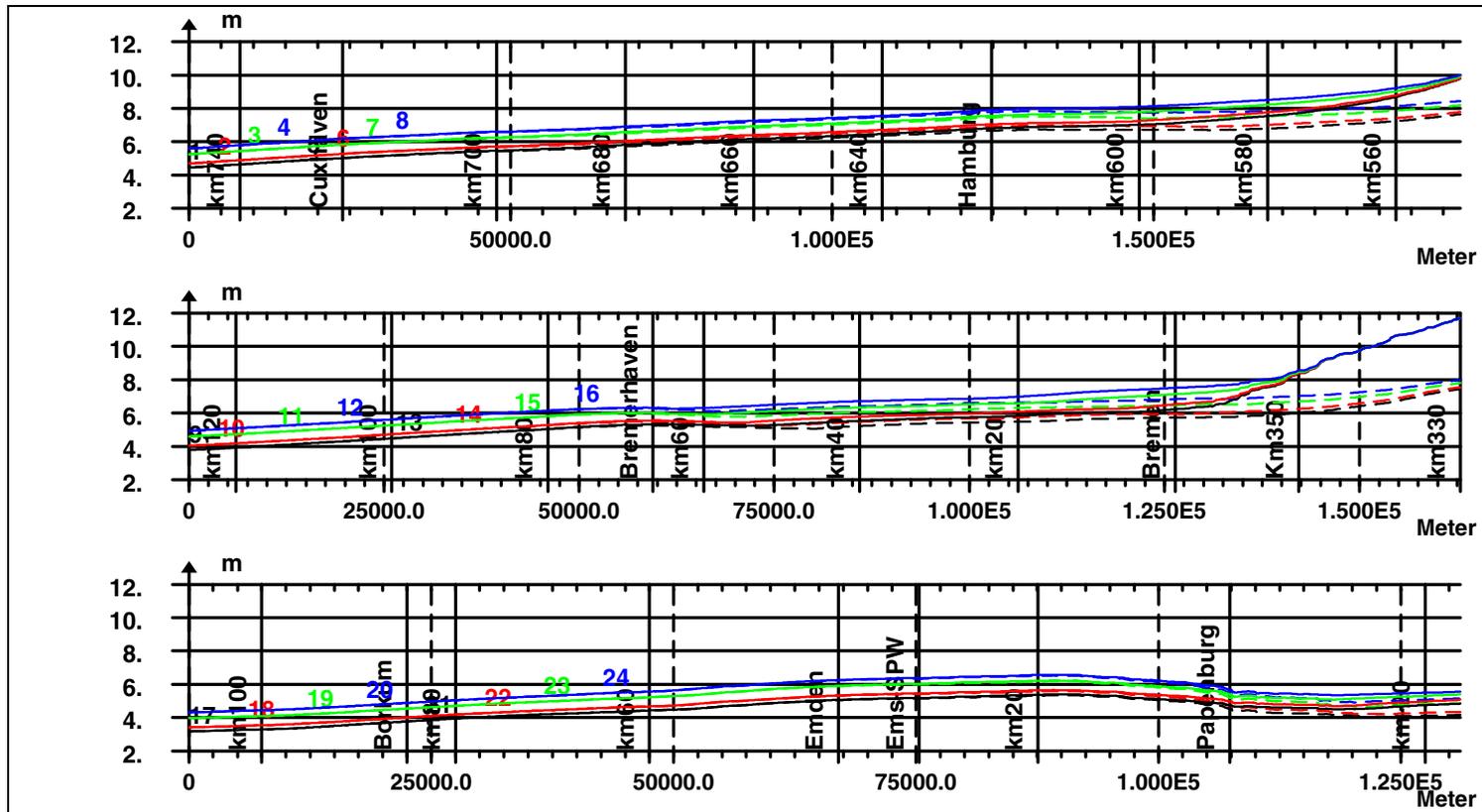


Bild 5: Vergleich Sturmflutscitelwasserstand HW Elbe, Weser und Ems mit Meeresspiegelanstieg und erhöhtem Abfluss.
 Elbe (oben): für die Sturmflutszenarien SF76 ohne slr (as01), slr+25 cm (as02), slr+80 cm (as04) und slr+115 cm (as05) (gestrichelt), Q2000 (v83q2), Q2000slr+25 cm (as25), Q2000slr+80 cm (as08) und Q2000slr+115 cm (er33) (durchgezogen) entlang des Elbefahrwassers von Elbe-km 748 bis Elbe-km 550.
 Weser (Mitte): für die Sturmflutszenarien SF76 ohne slr (er011), slr+25 cm (aj14), slr+80 cm (aj15) und slr+115 cm (er31), Q2000 (aj111a), Q2000slr+25 cm (aj20), Q2000slr+80 cm (aj21) und Q2000slr+115 cm (er33) (durchgezogen) entlang des Weserfahrwassers von Weser-km 126 bis Weser-km 330.
 Ems (unten): für die Sturmflutszenarien SF06 ohne slr (v10), slr+25 cm (smp25), slr+80 cm (mslp80) und slr+115 cm (mslp115), Q350 (q350), Q350slr+25 cm (q3sm25), Q350slr+80 cm (q3m80) und Q350slr+115 cm (q3m115) (durchgezogen) entlang des Emsfahrwassers von Ems-km 107 bis Ems-km-23.

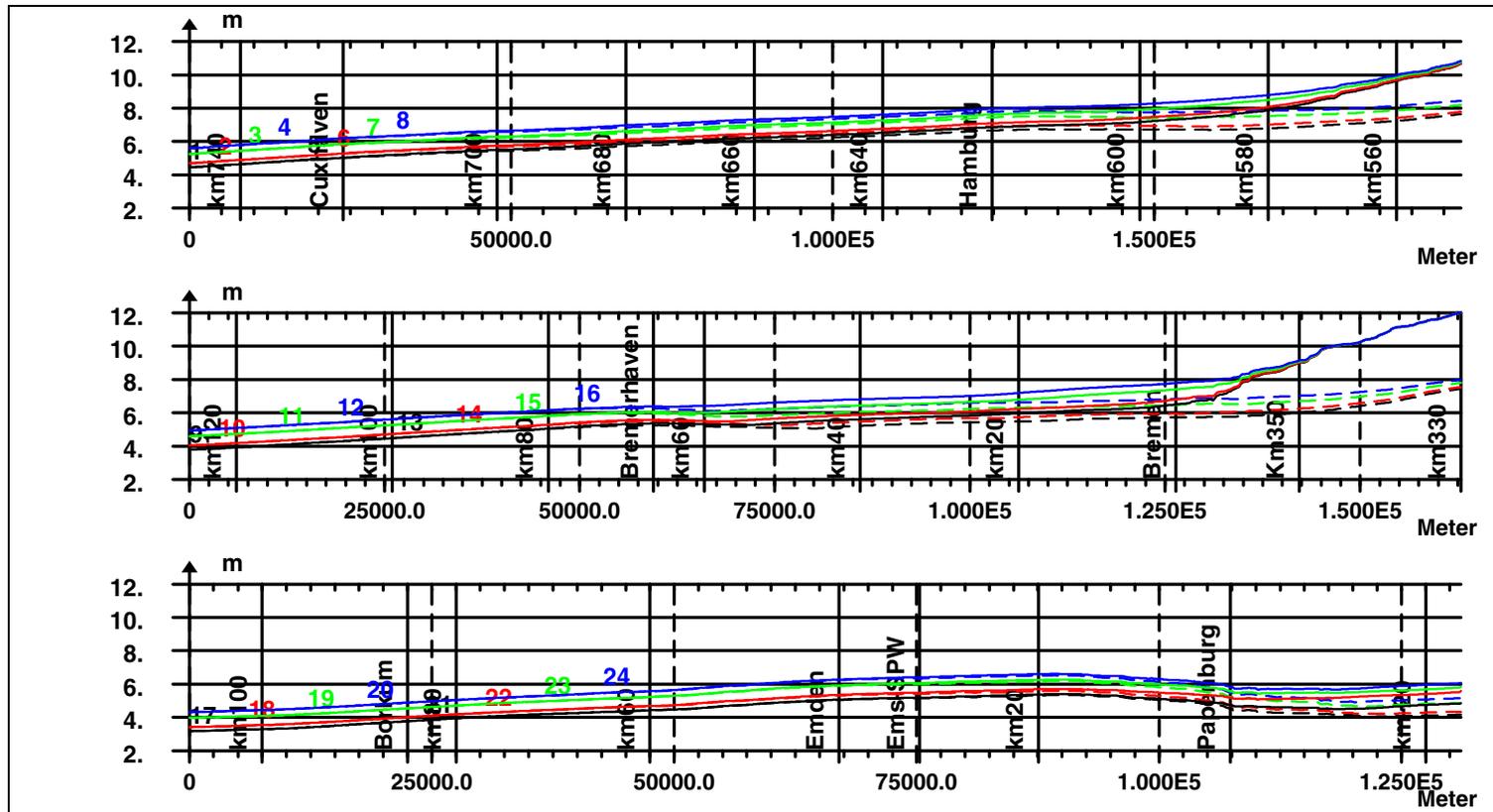


Bild 6: Vergleich Sturmflutscheitelwasserstand HW Elbe, Weser und Ems mit Meeresspiegelanstieg und erhöhtem Abfluss.

Elbe (oben): für die Sturmflutszenarien SF76 ohne slr (as01), slr+25 cm (as02), slr+80 cm (as04) und slr+115 cm (as05) (gestrichelt), Q3000 (v83q3), Q3000slr+25 cm (as26), Q3000slr+80 cm (as11) und Q3000slr+115 cm (er34) (durchgezogen) entlang des Elbefahrwassers von Elbe-km 748 bis Elbe-km 550.

Weser (Mitte): für die Sturmflutszenarien SF76 ohne slr (er011), slr+25 cm (aj14), slr+80 cm (aj15) und slr+115 cm (er31), Q3000 (aj121), Q3000slr+25 cm (aj23), Q3000slr+80 cm (aj24) und Q3000slr+115 cm (er34) (durchgezogen) entlang des Weserfahrwassers von Weser-km 126 bis Weser-km 330.

Ems (unten): für die Sturmflutszenarien SF06 ohne slr (v10), slr+25 cm (smp25), slr+80 cm (mslp80) und slr+115 cm (mslp115), Q700 (q700), Q700slr+25 cm (q7sm25), Q700slr+80 cm (q7m80) und Q700slr+115 cm (q7m115) (durchgezogen) entlang des Emsfahrwassers von Ems-km 107 bis Ems-km-23.



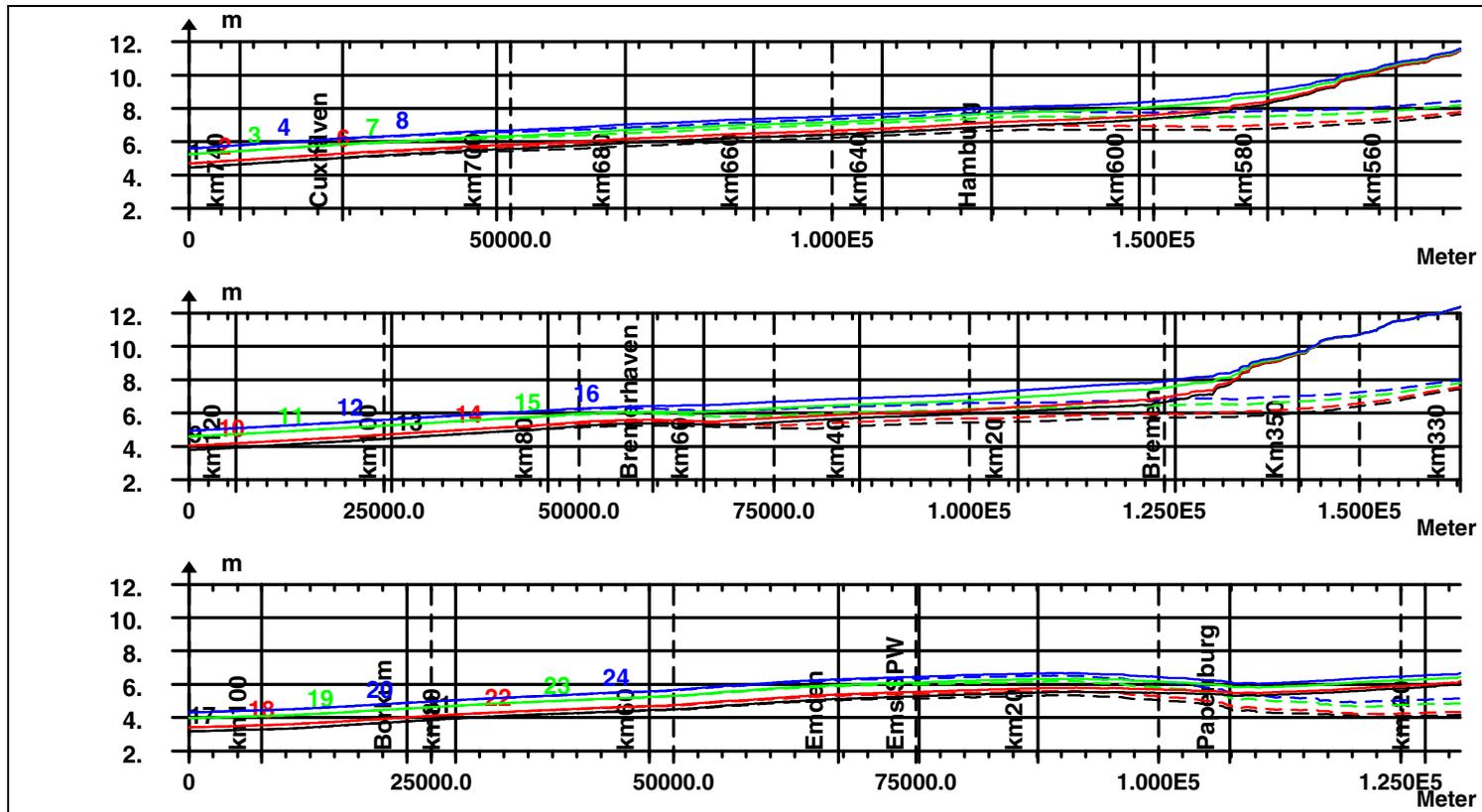


Bild 7: Vergleich Sturmflutcheitelwasserstand HW Elbe, Weser und Ems mit Meeresspiegelanstieg und erhöhtem Abfluss.
 Elbe (oben): für die Sturmflutscenarien SF76 ohne slr (as01), slr+25 cm (as02), slr+80 cm (as04) und slr+115 cm (as05) (gestrichelt), Q4000 (v83q4), Q4000slr+25 cm (as27), Q4000slr+80 cm (as14) und Q4000slr+115 cm (er35) (durchgezogen) entlang des Elbefahrwassers von Elbe-km 748 bis Elbe-km 550.
 Weser (Mitte): für die Sturmflutscenarien SF76 ohne slr (er011), slr+25 cm (aj14), slr+80 cm (aj15) und slr+115 cm (er31), Q4000 (aj131), Q4000slr+25 cm (aj26), Q4000slr+80 cm (aj27) und Q4000slr+115 cm (er35) (durchgezogen) entlang des Weserfahrwassers von Weser-km 126 bis Weser-km 330.
 Ems (unten): für die Sturmflutscenarien SF06 ohne slr (v10), slr+25 cm (smp25), slr+80 cm (mslp80) und slr+115 cm (mslp115), Q700 (q700), Q700slr+25 cm (q7sm25), Q700slr+80 cm (q7m80) und Q700slr+115 cm (q7m115) (durchgezogen) entlang des Emsfahrwassers von Ems-km 107 bis Ems-km-23.

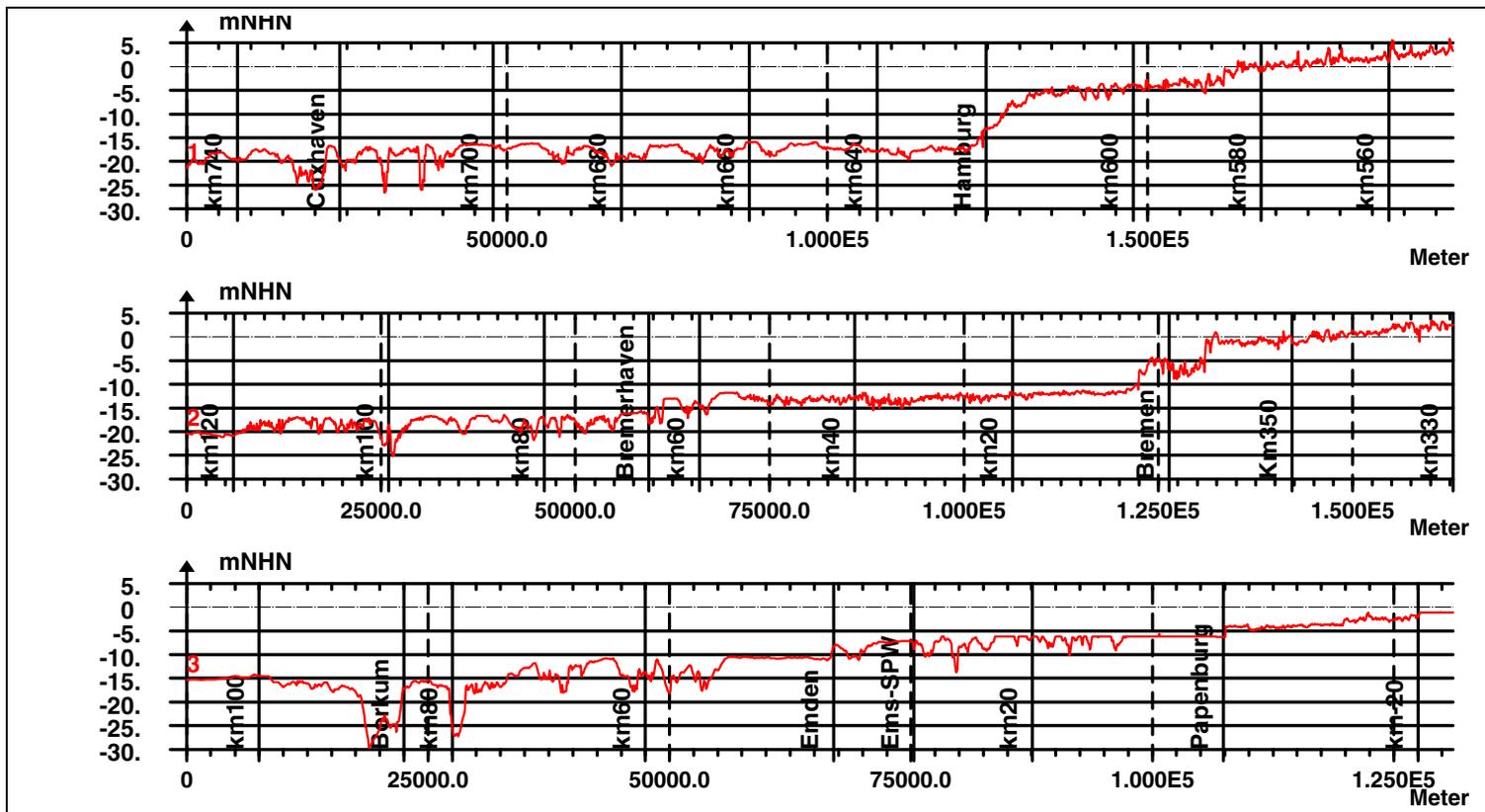


Bild 8: Topographie der HN-Modelle für das Elbe-Ästuars entlang des Elbefahrwassers von Elbe-km 748 bis Elbe-km 550 (oben), des Weser-Ästuars entlang des Weserfahrwassers von Weser-km 126 bis Weser-km 330 (Mitte) und des Ems-Ästuars entlang des Emsfahrwassers von Ems-km 107 bis Ems-km-23 (unten)



2.2 Modellierung und Analyse des Sturmflutszenarios SF76 in der Elbe

2.2.1 Das mathematische Modell des Elbe – Ästuars

Für die in diesem Bildatlas vorgestellten Untersuchungen im Rahmen von KLIWAS und KLIMZUG-NORD wird das hydronumerischen Modellverfahrens *UnTRIM* (Casulli, V. and Walters, R.A., 2000) eingesetzt. Das auf der Methode der Finiten Differenzen / Finiten Volumen basierende drei - dimensional mathematische Verfahren *UnTRIM* dient der Simulation stationärer und instationärer Strömungs- und Transportprozesse in Gewässern mit freier Wasseroberfläche. *UnTRIM* verwendet ein unstrukturiertes orthogonales Gitter. Auf der Grundlage des genannten HN – Verfahrens wird unter Berücksichtigung der Topographie des Elbe – Ästuars ein Modell der Elbe gebildet.

Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im *Mathematical Model UnTRIM – Validation Document* (BAW, 2004c). Grundlage des Verfahrens *UnTRIM* sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung darstellen.

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

- Wasserspiegelauslenkung (bezüglich NHN) und
- Strömungsgeschwindigkeit (tiefengemittelt).

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

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

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

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

$$\vec{\tau}_{Wind} = \rho_{Luft} C_D \vec{v}_{10, Wind} |\vec{v}_{10, Wind}|.$$

Hierbei bezeichnet ρ_{Luft} die Dichte der Luft und $\vec{v}_{10, Wind}$ die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über Grund. Für die vorliegenden Untersuchungen wird der Impulsaustauschkoeffizient C_D mit den von Smith und Banke (Smith, S.D. and Banke, E.G, 1975) vorgeschlagenen Koeffizienten berechnet:

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

2.2.2 Modellgebiet Elbe

Das Modellgebiet des verwendeten HN-Modells umfasst die folgenden Gebiete:

- Außenelbe bis Elbe – km 756,
- Untere Elbe und
- Mittlere Elbe bis Bleckede (Elbe – km 550).

Bei der Festlegung der Grenzen (Berandung) des Simulationsgebietes werden folgende Kriterien beachtet:

- Da bei hohem Oberwasserzufluss ($> 1100 \text{ m}^3/\text{s}$) oder Sturmflut das Wehr Geesthacht gelegt wird, reicht das Modellgebiet bis Bleckede.
- Da bei Sturmflut die Nebenflüsse der Elbe durch Sperrwerke von der Elbe getrennt sind, werden diese im Modell nicht berücksichtigt.

Ausgehend von den vorstehend ausgeführten Kriterien wurde das in Bild 9 auf der nächsten Seite dargestellte Modellgebiet gewählt. Der seeseitige Rand des Modellgebietes wird durch die gedachte Linie von Cuxhaven – Sahlenburg über Neuwerk, Scharhörn, Bake A, Bake Z bis Blauortsand und dann nach Osten zur Schleswig – Holsteinischen Küste gebildet. Landseitig endet das Modell bei Bleckede. Das Gebiet des Elbe – Ästuars ist bis zur Deichlinie nachgebildet.

Bild 10 auf Seite 16 zeigt in Rot das Längsprofil der Sohlage entlang des Elbefahrwassers für den *Ist-Zustand 2003* (PIZ2003) zwischen Elbe – km 748 in der Außenelbe und Elbe – km 550 bei Bleckede.

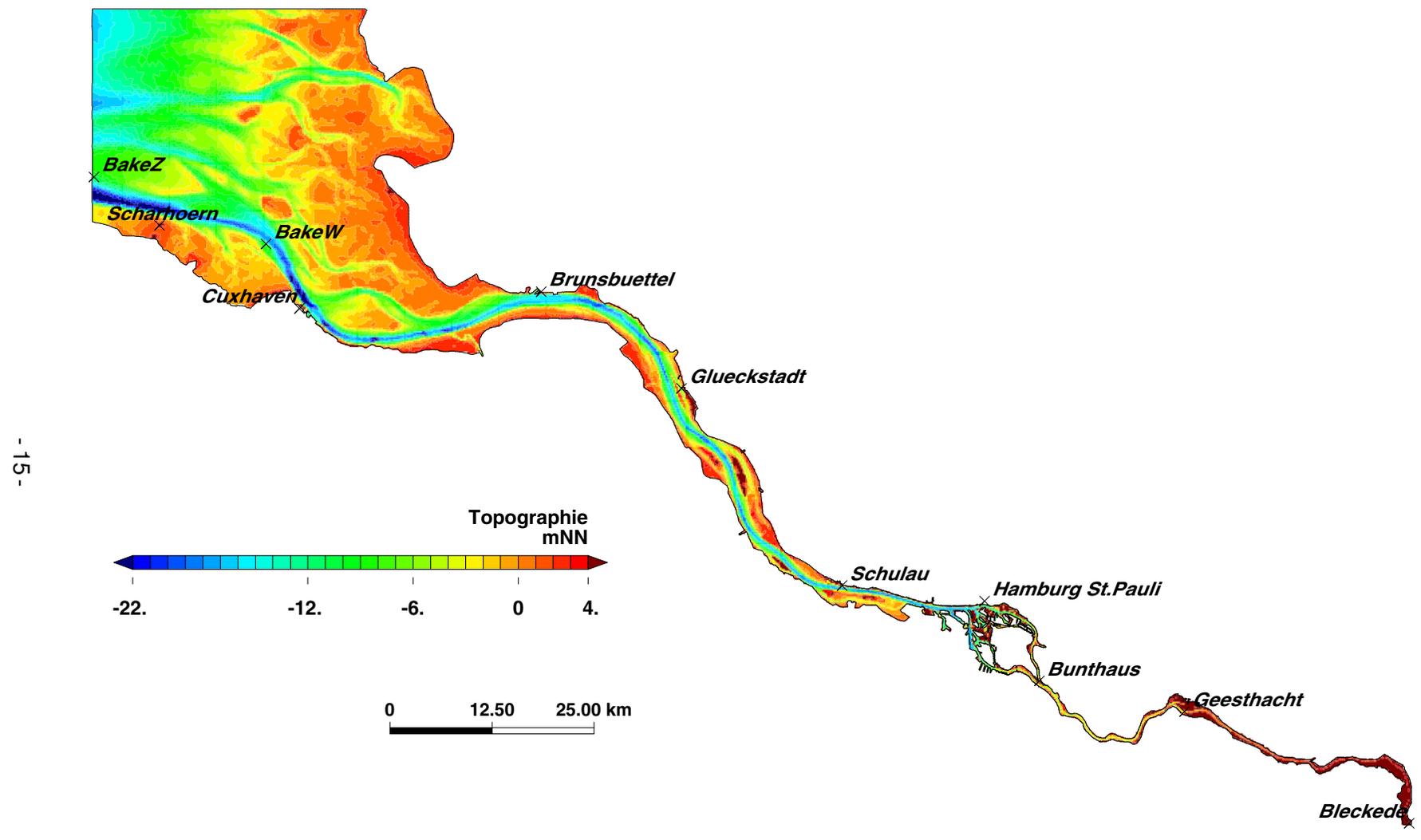


Bild 9: Topographie des HN-Modells des Elbe-Ästuars für Sturmflutuntersuchungen (Ist-Zustand PIZ2003) mit ausgewählten Pegelorten.

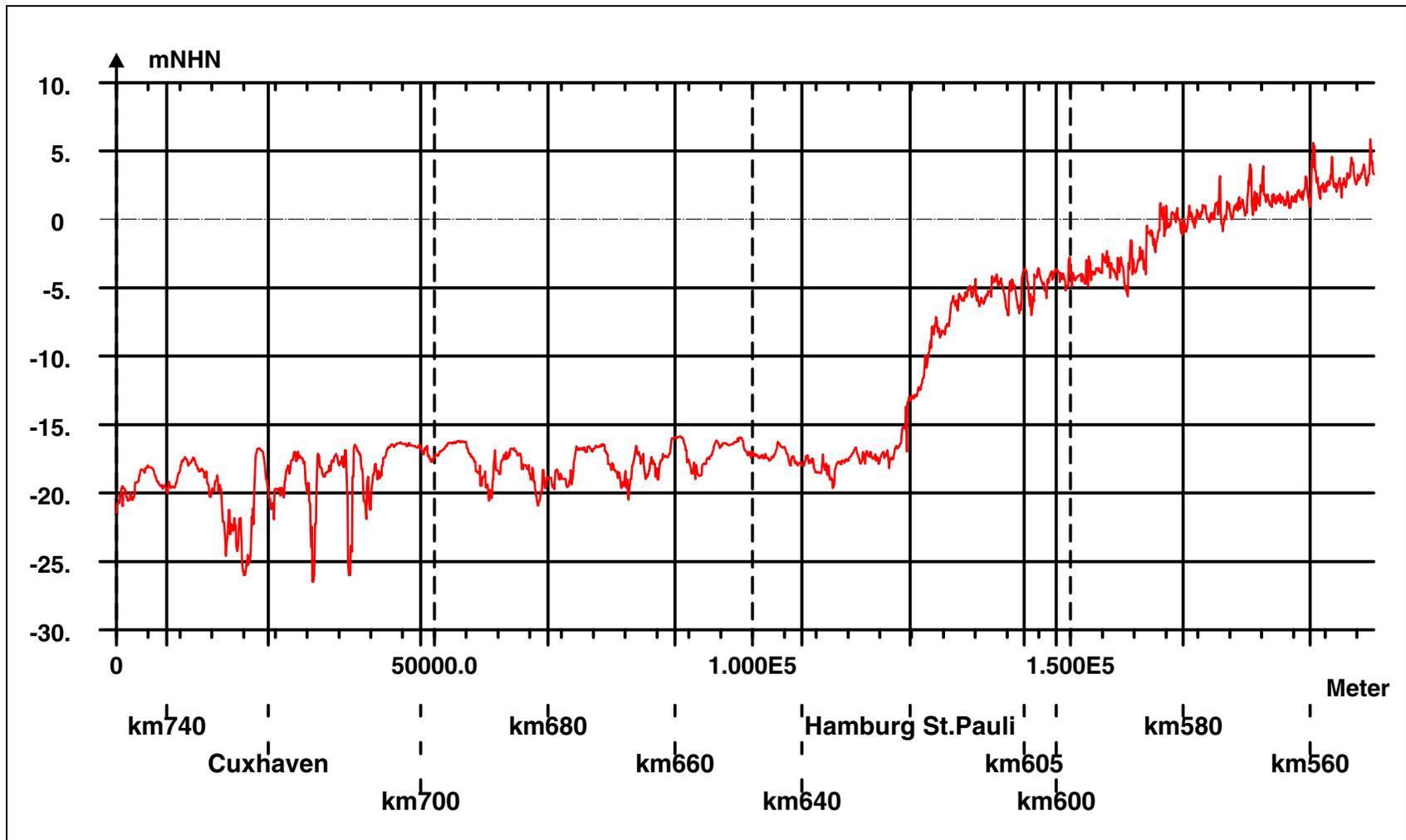


Bild 10: Längsprofil der auf NHN bezogenen Sohlage der Fahrrinnenachse der Elbe in der Topographie des HN-Modells für den Ist-Zustand 2003 (PIZ2003, rot) zwischen Elbe – km 748 und Elbe – km 550.

2.2.3 Gitternetz

Das dem HN – Modell zugrunde liegende unstrukturierte orthogonale Gitternetz ist im vorliegenden Fall aus dreieckigen Gitterelementen aufgebaut und überdeckt das Modellgebiet vollständig. Gitternetz und räumliche Diskretisierung werden wie folgt näher beschrieben:

- Anzahl der Knoten: 77083
- Anzahl der Kanten: 223891
- Anzahl der Polygone: 146783
- Kantenlänge: 5 m bis 820 m
- Elementflächen: 47 m² bis 0,62 km².

2.2.4 Modellsteuerung

Für die Steuerung des mathematischen Modells wird am offenen seeseitigen Rand der zeitliche Verlauf des Wasserstandes für jedes auf dem offenen Rand liegende Polygon vorgegeben.

Für die Sturmflut vom 3. 1. 1976 (SF76) wird aus den Pegelaufzeichnungen der Bake W (Zehnerloch) unter Berücksichtigung einer Übertragungsfunktion der Wasserstandsverlauf auf dem seeseitigen Modellrand bestimmt.

Am landseitigen offenen Modellrand bei Bleckede werden für das auf einer historischen Sturmflut beruhende Sturmflutszenario SF76 die am Pegel Neu Darchau gemessenen Abflüsse (siehe hierzu DGJ, 1976 mit einem Zeitversatz von + 7 Stunden (ermittelt aus Laufzeit der Hochwasserwelle zwischen Neu Darchau und Bleckede, pers. Mitteilung WSA Lauenburg)) vorgegeben. Eine Einordnung der gewählten Abflussszenarien bietet Tabelle 4 auf Seite 19.

Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre während des Sturmflutszenarios SF76 wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe aus modellierten hochaufgelösten lokalen Windfeldern über dem gesamten Modellgebiet vorgegeben. Im Abstand von zwei Stunden liegen für den Zeitraum 1. 1. 1976 bis 4. 1. 1976 vom DWD mit MKW (Schmidt, H. and Pätsch, J., 1992) modellierte Windfelder mit einer räumlichen Auflösung von 450 m x 450 m vor.

2.2.5 Analyse der Modellergebnisse

Im Rahmen einer sich an die Modellrechnung anschließenden Auswertung wird aus den Zeitreihen der Wasserstände für jeden Simulationslauf im gesamten Modellgebiet der

- Sturmflutscheitelwasserstand (höchster aufgetretener Wasserstand HW) im Analysezeitraum (vgl. Tabelle 5 auf Seite 19), die
- Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (tHW) bezogen auf Elbe – km 748 sowie die

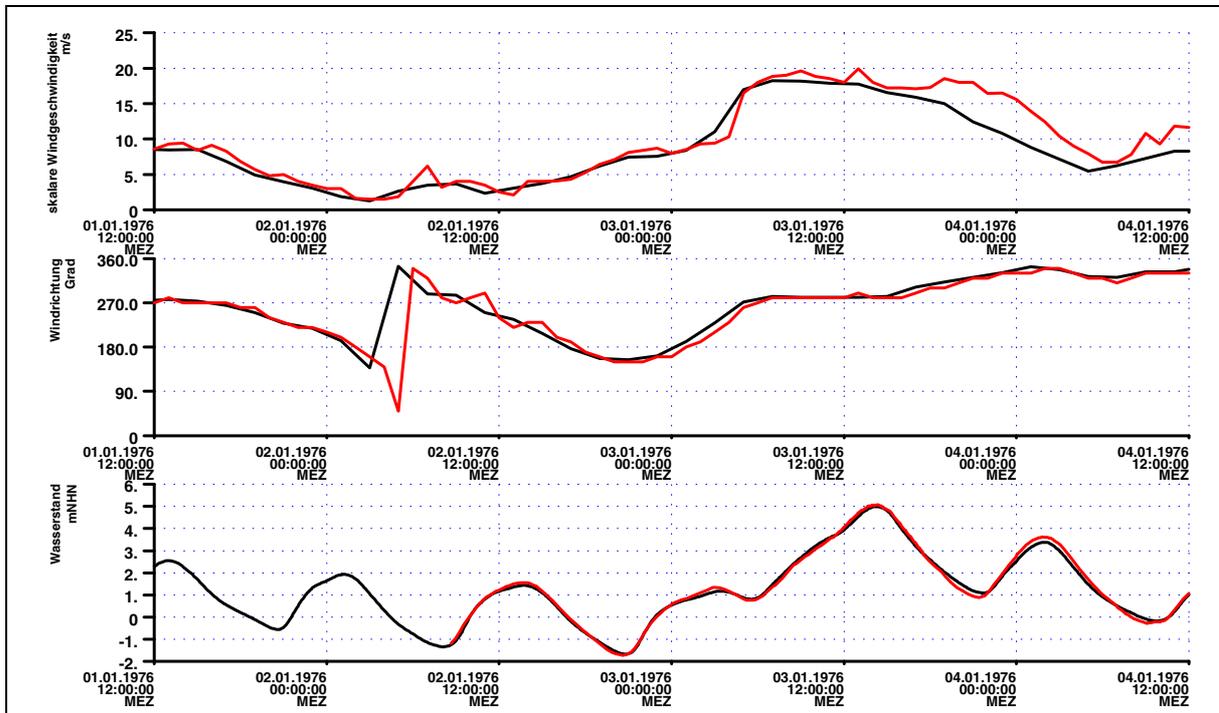


Bild 11: SF76, oben: Windgeschwindigkeit und Windrichtung vom 1. 1. bis 4. 1. 1976 bei Cuxhaven. Die Messung ist rot und die Rechnung (MKW) schwarz gekennzeichnet. unten: Wasserstandsentwicklung vom 1. 1. bis 4. 1. 1976 für den Pegel Cuxhaven. Die Messung ist rot und die Rechnung (HN-Modell der Elbe, PIZ2003) schwarz gekennzeichnet.

- Dauer von Wasserständen (DHW) höher als $\text{NHN} + 3,00 \text{ m}$ im Analysezeitraum (vgl. Tabelle 5)

berechnet. Zusätzliche Informationen zu den aus den berechneten Wasserstandszeitreihen abgeleiteten Kenngrößen HW, tHW und DHW findet man im Bericht *Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes* (BAW, 2002).

Aus den Zeitreihen der Wasserstände und der Strömungsgeschwindigkeiten werden für jeden Simulationslauf entlang der Elbe

- die mittlere und maximale Flutstromgeschwindigkeit (V_{fm} und V_{fx}),
- die mittlere und maximale Ebbestromgeschwindigkeit (V_{em} und V_{ex}),

bestimmt. Betrachtet wird lediglich ein Ereignis: die Flut vor Erreichen des Sturmflutscheitelwasserstandes bzw. die Ebbe nach dem Sturmflutscheitelwasserstand. Die Analysezeiträume sind in Tabelle 5 auf der nächsten Seite angegeben. Zusätzliche Informationen zu den abgeleiteten Kenngrößen findet man im Bericht *Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit* (BAW, 2004a und BAW, 2004b). Zur Ermittlung dieser Analysegrößen werden die Zeitreihen des Wasserstandes und der Strömungsgeschwindigkeit auf Querschnitten im Abstand von 5 km entlang der Elbe querschnittsgemittelt. Die Lage dieser Querprofile ist in Bild 12 auf Seite 20 eingezeichnet. Man erhält so die für den jeweiligen Querschnitt charakteristischen Strömungsgeschwindigkeiten.

MNQ (mittlerer niedrigster Abfluss)	277 m ³ /s
MQ (mittlerer Abfluss)	710 m ³ /s
MHQ (mittlerer höchster Abfluss)	1940 m ³ /s
HHQ (höchster bekannter Abfluss, 31. 3. 1940)	3620 m ³ /s
HQ ₁₀₀ (Neu Darchau – Geesthacht)	4000 m ³ /s
Elbehochwasser 2002: 23. 8. 2002	3420 m ³ /s
Elbehochwasser 2006: 9. 4. 2006	3600 m ³ /s
Elbehochwasser 2013: 11. 6. 2013	4060 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 3. 1. 1976	500 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 28. 1. 1994	1350 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 3. 12. 1999	350 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 1. 11. 2006	295 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 6. 12. 2013	610 m ³ /s
Abfluss während der Bemessungssturmflut	2200 m ³ /s

Tabelle 4: *Oberwasserereignisse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe – km 536) bezogen auf den Zeitraum 1926/2006 (aus: DGJ, 2011, Internationale Kommission zum Schutz der Elbe, 2001 sowie pers. Mitteilung WSA Lauenburg).*

Die gewählten Analysezeiträume für die Kennwerte des Wasserstandes und der Strömungsgeschwindigkeit sind in Tabelle 5 angegeben.

Sturmflut	physikalische Größe	von	bis
SF76	Wasserstand (HW, tHW, DHW)	03.01.1976 04:00	03.01.1976 22:00
	Strömung (Vfm, Vfx, Vem, Vex)	03.01.1976 04:30	04.01.1976 00:00

Tabelle 5: *Analysezeiträume der Sturmflutszenarien Elbe für die unterschiedlichen physikalischen Größen. Die tideunabhängigen Kennwerte des Wasserstandes (BAW, 2002) werden für den jeweiligen Tag der Sturmflut analysiert. Die Tidekennwerte der Strömung werden (BAW, 2004a) für die Flut vor dem Sturmflutscheitelwasserstand und die Ebbe nach dem Sturmflutscheitelwasserstand bestimmt.*

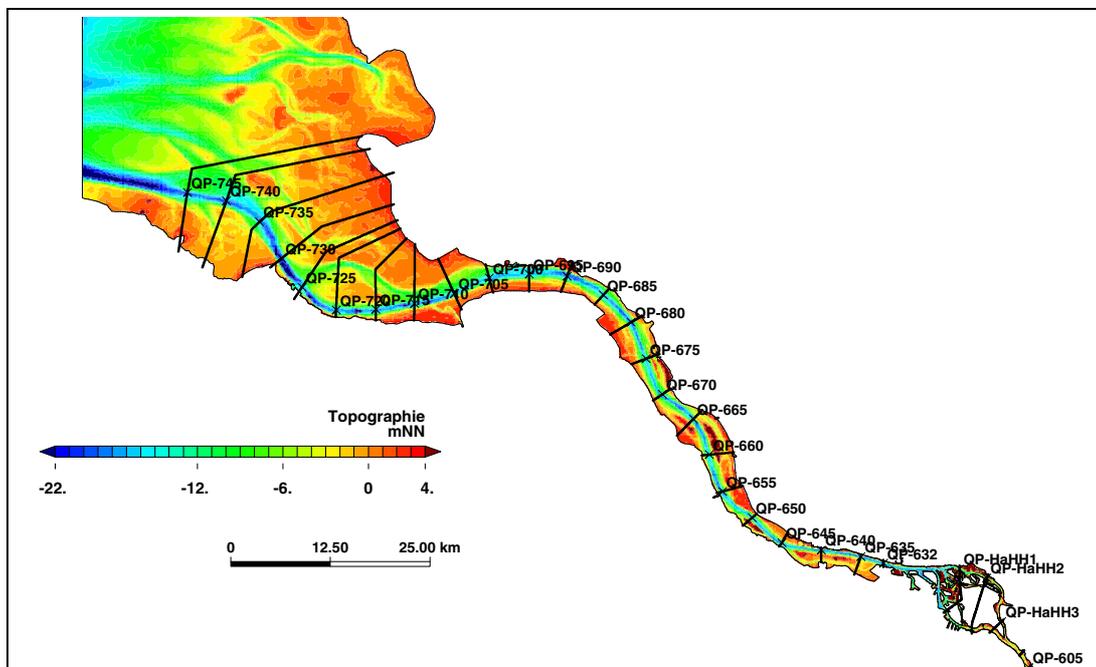


Bild 12: Topographie des HN-Modells des Elbe-Ästuares zwischen der Elbmündung und Elbe–km 605 (Over) mit der Lage der zur Querschnittsmittelung bzw. -integration der Wasserstands- und Strömungszeitreihen verwendeten Querprofile.