

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Rudolph, Elisabeth

XtremRisk - Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten : Modellierung von Extremsturmflutszenarien im Elbeästuar. FuE-Abschlussbericht A 3955 03 70165

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105072>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2012): XtremRisk - Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten : Modellierung von Extremsturmflutszenarien im Elbeästuar. FuE-Abschlussbericht A 3955 03 70165. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

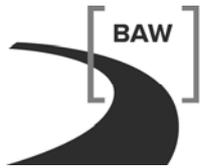


Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**XtremRisk – Extremsturmfluten an offenen
Küsten und Ästuargebieten**

**Modellierung von
Extremsturmflutszenarien im Elbeästuar**

BAW-Nr. A 3955 03 70165



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

**XtremRisK - Extremsturmfluten an offenen Küsten
und Ästuargebieten**

**Modellierung von
Extremsturmflutszenarien im Elbeästuar**

Auftraggeber: Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu)
 Universität Siegen
 Paul - Bonatz - Str. 9 - 11
 57076 Siegen

Auftrag vom: 30. Juli 2008, Az.:

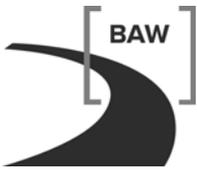
Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A3955 03 70165

Aufgestellt von: Abteilung: Wasserbau im Küstenbereich
 Referat: Ästuarsysteme II (K3)
 Bearbeiter: Dr. rer. nat. E. Rudolph

Hamburg, September 2012

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

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Veranlassung und Aufgabenstellung	1
2	Unterlagen und Daten	3
3	Sturmflutszenarien	5
3.1	HH_XR2010A und HH_XR2010A80	8
3.2	HH_XR2010B	10
3.3	HH_XR2010C und HH_XR2010C80	12
4	Das mathematische Modell des Elbeästuares	15
4.1	Modelltopographie Planerischer Ist - Zustand PIZ	15
4.2	Das numerische Verfahren UnTRIM	15
4.3	Modellgebiet	16
4.4	Gitternetz	18
4.5	Modellsteuerung	18
4.6	Sturmflut 28. Januar 1994: Vergleich Messung mit Modellergebnis	20
5	Ergebnisse der Sturmflutmodellierung	23
5.1	HH_XR2010A und HH_XR2100A80	25
5.1.1	Wasserstandsentwicklung	25
5.1.2	Durchflussentwicklung	30
5.1.3	Sturmflutscheitelwasserstand	34
5.1.4	Sensitivitätsstudie Salzgehaltsanfangsverteilung	37
5.1.5	Sensitivitätsstudie Oberwasserzufluss	39
5.2	HH_XR2010B	40
5.2.1	Wasserstandentwicklung	40
5.2.2	Durchflussentwicklung	45
5.2.3	Sturmflutscheitelwasserstand	49
5.3	HH_XR2010C und HH_XR2100C80	51
5.3.1	Wasserstandsentwicklung	51
5.3.2	Durchflussentwicklung	56
5.3.3	Sturmflutscheitelwasserstand	60
5.3.4	Bedeutung der WAsP Koeffizienten für den Sturmflutscheitelwasserstand	63
6	Zusammenfassung	67
7	Literaturverzeichnis	70



8	Anhang	74
8.1	Rauheitsverteilung	74
8.2	Salzgehaltsanfangsverteilung	75

Bildverzeichnis

Seite

- Bild 1: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven (rot) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A vorgegeben vom LSBG (2009). Zusätzlich sind die zugrunde liegenden Komponenten mittlere Tide (dunkelblau), Windstau (gelb) und Fernwelle (hellblau) eingetragen (Datum ohne Bedeutung). 9
- Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbemodell bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (grün) während der Sturmflut 3. Januar 1976 modelliert vom DWD mit MKW. 9
- Bild 3: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B vorgegeben aus dem Nordseemodell des BSH (MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 in Rot, bereitgestellt vom BSH) und dem Elbemodell der BAW (dunkelblau). 11
- Bild 4: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbemodell bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (grün) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B modelliert vom DWD (bereitgestellt vom DWD). 11
- Bild 5: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C vorgegeben aus dem Nordseemodell des BSH (MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 in Rot, bereitgestellt vom BSH) und dem Elbemodell der BAW (dunkelblau). 13
- Bild 6: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbemodell bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (grün) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C modelliert vom DWD (bereitgestellt vom DWD). 13
- Bild 7: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ) mit ausgewählten Pegelorten. 17
- Bild 8: Längsprofil der auf NN bezogenen Sohlage der Fahrrinnenachse in der Topographie des HN - Modells für den planerischen Ist - Zustand PIZ zwischen Elbe - km 748 und Elbe - km 585 (Wehr Geesthacht). 17
- Bild 9: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Cuxhaven. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet. 20
- Bild 10: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Glückstadt. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet. 21
- Bild 11: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Hamburg St. Pauli. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet. 21
- Bild 12: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bunthaus. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet. 22
- Bild 13: Lage der zur Querschnittsmittelung bzw. Querschnittsintegration der Wasserstands- und Strömungszeitreihen verwendeten Querprofile zwischen Elbe - km 640 bei Schulau und Elbe - km 605 bei Over. 24

Bild 14:	Cuxhaven: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Vorgabe des LSBG ist blau und die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.	26
Bild 15:	Brunsbüttel: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.	26
Bild 16:	Stadersand: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.	27
Bild 17:	Hamburg St. Pauli: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.	27
Bild 18:	Bunthaus: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.	28
Bild 19:	Wehr Geesthacht: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.	28
Bild 20:	Wasserstandsentwicklung an den Orten Cuxhaven(schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) während der Szenarien HH_XR2010A (durchgezogen) und HH_XR2100A80 (gestrichelt). Die vom LSBG vorgegebene Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven ist in Blau eingezeichnet.	29
Bild 21:	QP Elbe - km 725 (Cuxhaven): Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).	31
Bild 22:	QP Elbe - km 670: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).	31
Bild 23:	QP Elbe - km 632: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).	32
Bild 24:	QP Elbe - km 620N: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).	32
Bild 25:	QP Elbe - km 614S: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des	

querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).	33
Bild 26: QP Elbe - km 605: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).	33
Bild 27: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).	34
Bild 28: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010A in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	35
Bild 29: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100A80 in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	35
Bild 30: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010A im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	36
Bild 31: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100A80 im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	36
Bild 32: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (schwarz), HH_XR2010A_S25 (grau), HH_XR2100A80 (rot) und HH_XR2100A80_S25 (rosa).	38
Bild 33: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (schwarz), HH_XR2010A_Q2200 (hellblau), HH_XR2100A80 (rot) und HH_XR2100A80_Q2200 (pink).	39
Bild 34: Cuxhaven: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz). Die Wasserstandsentwicklung MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 aus dem BSH - Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.	41
Bild 35: Brunsbüttel: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).	41
Bild 36: Stadersand: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).	42
Bild 37: Hamburg St. Pauli: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).	42
Bild 38: Bunthaus: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).	43
Bild 39: Wehr Geesthacht: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).	43
Bild 40: Wasserstandsentwicklung an den Orten Cuxhaven(schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) während des Szenarios HH_XR2010B. Die	

Wasserstandsentwicklung MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 aus dem BSH - Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.	44
Bild 41: Dauer hoher Wasserstände > NN + 3,00 m im Analysezeitraum (42 Stunden) für HH_XR2010B entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht).	44
Bild 42: QP Elbe - km 725 (Cuxhaven): Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).	46
Bild 43: QP Elbe - km 670: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).	46
Bild 44: QP Elbe - km 632: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).	47
Bild 45: QP Elbe - km 620N: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).	47
Bild 46: QP Elbe - km 614S: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).	48
Bild 47: QP Elbe - km 605: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).	48
Bild 48: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für das Sturmflutszenario HH_XR2010B (blau). Zusätzlich sind die Thw 27.2. 1:31 Uhr (schwarz), 27.2. 12:48 Uhr (rot) und 28.2. 00:11 Uhr (grün) eingetragen.	49
Bild 49: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010B in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	50
Bild 50: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010B im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	50
Bild 51: Cuxhaven: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot). Die Wasserstandsentwicklung MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 aus dem BSH Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.	52
Bild 52: Brunsbüttel: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	52
Bild 53: Stadersand: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	53
Bild 54: Hamburg St. Pauli: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	53

Bild 55:	Bunthaus: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	54
Bild 56:	Wehr Geesthacht: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	54
Bild 57:	Wasserstandsentwicklung an den Orten Cuxhaven(schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) während der Szenarien HH_XR2010C (gestrichelt) und HH_XR2100C80 (durchgezogen). Die Wasserstandsentwicklung der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 aus dem BSH - Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.	55
Bild 58:	QP Elbe - km 725 (Cuxhaven): Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	57
Bild 59:	QP Elbe - km 670: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	57
Bild 60:	QP Elbe - km 632: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	58
Bild 61:	QP Elbe - km 620N: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	58
Bild 62:	QP Elbe - km 614S: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	59
Bild 63:	QP Elbe - km 605: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	59
Bild 64:	Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).	60
Bild 65:	Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010C in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	61
Bild 66:	Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100C80 in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	61
Bild 67:	Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010C im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	62

Bild 68:	Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100C80 im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.	62
Bild 69:	Wind über der Elbmündung (MUSE Sturmflut 1976 EPS 45), räumliche Auflösung 7 km x 7 km. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied in der Windgeschwindigkeit von 3 m/s.	64
Bild 70:	Wind über der Elbmündung (MUSE Sturmflut 1976 EPS 45) mit WAsP Koeffizienten, räumliche Auflösung 250 m x 250 m. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied in der Windgeschwindigkeit von 3 m/s.	64
Bild 71:	Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbmodell bei Elbe - km 730 (schwarz), Elbe - km 640 (rot) und Elbe - km 624N (grün) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C mit (dünn) und ohne (dick) Berücksichtigung der WAsP Koeffizienten.	65
Bild 72:	Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010C_mitWAsP (schwarz) und HH_XR2100C80_mitWAsP (rot) sowie HH_XR2010C_ohneWAsP (grün) und HH_XR2100C80_ohneWAsP (violett).	65
Bild 73:	Wasserstandsentwicklung bei Elbe - km 724 (Cuxhaven) und Elbe - km 623N (Hamburg St. Pauli) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A, HH_XR2100A80 (rot, links), HH_XR2010B (grün, Mitte) sowie HH_XR2010C und HH_XR2100C80 (blau, rechts).	67
Bild 74:	Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang der Elbe zwischen der Elbmündung bei Cuxhaven und dem Wehr Geesthacht für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (rot, fett), HH_XR2100A80 (rot, dünn), HH_XR2010B (grün), HH_XR2010C (blau, fett), HH_XR2100C80 (blau, dünn).	68
Bild 75:	Effektive Sohlrauheit (auch ks nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN - Modell des Elbeästuares.	74
Bild 76:	Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien mit einem Salzgehalt von 30 PSU am Rand zur Nordsee.	75
Bild 77:	Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien mit einem Salzgehalt von 25 PSU am Rand zur Nordsee.	75

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1:	Sturmflutszenarien 2010 für Hamburg (entnommen aus dem Protokoll zum XtremRisk - Arbeitstreffen 30. September 2010).	5
------------	--	---

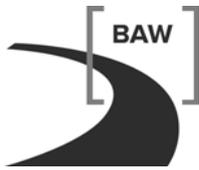
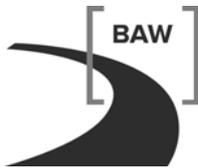


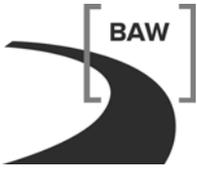
Tabelle 2: Abflüsse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe - km 536) bezogen auf den Zeitraum 1926/2007 (DGJ, 2011, Länderarbeitsgruppe, 1988 sowie pers. Mitteilungen WSA Lauenburg 2006, IKSE, 2001).	6
Tabelle 3: Simulationszeiträume und Analysezeiträume der XtremRisk - Sturmflutszenarien HH_XR2010A, HH_XR2100A80, HH_XR2010B, HH_XR2010C und HH_XR2100C80 (Datum ohne Bedeutung).	23
Tabelle 4: Sturmflutscheitelwasserstände HW an ausgewählten Orten (mit Elbe - km) entlang der Tideelbe für die XtremRisk - Sturmflutszenarien HH_XR2010A, HH_XR2100A80, HH_XR2010B, HH_XR2010C und HH_XR2100C80 sowie die während der Sturmflut 3. Januar 1976 (SF76) gemessenen Sturmflutscheitelwasserstände HW.	69

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
BAW - DH	Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Bft	Beaufortgrad, Windstärkegrade
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
DGM	Digitales Geländemodell
DHW	Dauer hoher Wasserstände
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
EPS	ensemble prediction system
FF	Stationen mit Stundenwerten Wind des DWD
fwu	Forschungsinstitut Wasser und Umwelt Universität Siegen
GF	Geschäftsfeld
h(t)	zeitliche Entwicklung des Wasserstandes
HHQ	höchster bekannter Wert des Oberwasserzuflusses (DIN 4049-3)
HHThw	höchster bekannter Wert des Tidehochwassers(DIN 4049-3)
HH_XR2010A	XtremRisk Sturmflutszenario mit Scheitwasserstand Cuxhaven NN + 6,10 m
HH_XR2100A80	XtremRisk Sturmflutszenario mit Scheitwasserstand Cuxhaven NN + 6,90 m
HH_XR2010B	XtremRisk Sturmflutszenario mit Scheitwasserstand Cuxhaven NN + 5,32 m
HH_XR2010C	XtremRisk Sturmflutszenario mit Scheitwasserstand Cuxhaven NN + 6,51 m
HH_XR2100C80	XtremRisk Sturmflutszenario mit Scheitwasserstand Cuxhaven NN + 7,31 m
HN - Modell	Hydrodynamisch – numerisches Modell
HPA	Hamburg Port Authority
HW	Höchster Wasserstand in einem Zeitraum (DIN 4049-3)
IKSE - MKOL	Internationale Kommission zum Schutz der Elbe - Mezinardni komise pro ochranu Labe
KFKI	Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen
LP	Längsprofil
LSBG	Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer
LWI	Leichtweiß - Institut der Universität Braunschweig
MKW	Massenkonsistentes Windfeld, Name des Windmodells des DWD
MThw	Mittleres Tidehochwasser
MUSE	Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten (Name eines KFKI - Projektes)
NHN	Normalhöhennull
NN	Normalnull
OPTEL	Entwicklung eines operationellen Tidemodell der Elbe (Name eines KFKI - Projektes)



PIZ	Planerischer Ist - Zustand
Q	Oberwasserzufluss
Q(t)	zeitliche Entwicklung des Durchflusses
QP	Querprofil
SF	Sturmflut
SF76	Sturmflutszenario 3. Januar 1976
SF76X	alter Name des Sturmflutszenarios HH_XR2010A
SWA	Seewetteramt Hamburg, Dienststelle des DWD in Hamburg
Thb	Tidehub (DIN 4049-3)
tHW	Eintrittszeit des HW (DIN 4049-3)
Thw	Tidehochwasser (DIN 4049-3)
Tnw	Tideniedrigwasser (DIN 4049-3)
TRIM	tidal, residual, intertidal mudflat model
TUHH	Technische Universität Hamburg Harburg
UnTRIM	Unstructured TRIM, Name des HN - Modells
v(t)	zeitliche Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeit
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSD	Wasser- und Schifffahrtsdirektion



1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Neben dem Anstieg des mittleren Meeresspiegels können auch häufigere oder verstärkte Sturmfluten zu den möglichen Folgen des Klimawandels in Küsten- und Ästuargebieten gehören. Angesichts des sehr langsamen Meeresspiegelanstiegs und der besseren Möglichkeiten zur Anpassung, sollen die Folgen extremer Sturmfluten hinsichtlich Häufigkeit, Intensität und Verweildauer für den Hochwasser- und Küstenschutz abgeschätzt werden, um mögliche Katastrophen abzuwenden. Die Dringlichkeit, den lokalen Folgen des globalen Klimawandels in Form von veränderten Sturmflutverhältnissen vorausschauend und präventiv zu begegnen, ergibt sich unmittelbar daraus, dass Küsten- und Ästuargebiete weltweit als bevorzugte Siedlungs- und Wirtschaftsräume sowie als Räume wertvollster Ökosysteme unseres Planeten darstellen und daher als vorrangig gefährdet gelten (Oumeraci, H., 2008).

Am BMBF - Verbundprojekt *XtremRisk Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten -- Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel* sind das Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig (LWI), das Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) an der Universität Siegen, der Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer (LSBG) Hamburg und die TU Hamburg Harburg beteiligt. Die BAW ist Partner im Teilprojekt 1: Extreme Sturmfluten (Risikoquellen). Eine ausführliche Beschreibung des Projektes findet man unter <http://www.xtremrisk.de/>.

Im Teilprojekt 1 wird unter heutigen Bedingungen und für Klimaänderungsszenarien untersucht, welche Extremwerte der einzelnen Sturmflutkomponenten physikalisch möglich sind und welche physikalisch sinnvollen Kombinationen zu Sturmflutverläufen führen, bei deren Auftreten die untersuchten Standorte Hamburg und Sylt vulnerabel werden, d.h. bei welchen Sturmflutverläufen katastrophale Schäden zu erwarten sind. Die bestehenden Unsicherheiten sollen dabei explizit berücksichtigt werden. Daher ist ein probabilistisches Vorgehen unverzichtbar. Die Ergebnisse aus Teilprojekt 1 (Risikoquelle) werden entsprechend als Eingaben für die Teilprojekte 2 bis 4 (Risikowege, Risikoempfänger sowie Risikoanalyse, Risikobewertung und Empfehlungen für Risikobeherrschung) aufbereitet.

Im Rahmen von XtremRisk wird vom Projektpartner LSBG mit empirischen Methoden eine extrem hohe Sturmflut synthetisch zusammengesetzt und ein Wasserstandsverlauf für den Elbmündungsbereich bei Cuxhaven (HH_XR2010A, Gönner et al., 2012) entwickelt. Außerdem werden zwei Sturmflutszenarien aus dem KFKI Projekt MUSE (Jensen, J., 2006) (MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 und 1990 EPS 20), die von BSH und DWD in der Nordsee modelliert wurden, auch für die Elbe betrachtet. Hierfür werden vom BSH Wasserstandsverläufe am seeseitigen Rand der Elbe zur Nordsee (Bork, I. und Müller - Navarra, S., 2005)

und vom DWD lokale Windfelder über der Elbe (Ganske, A. und Rosenhagen, G., 2010) bereitgestellt (Gönnert et al., 2012).

Die drei untersuchten extremen Sturmflutszenarien erreichen in Cuxhaven mit NN + 6,10 m (HH_XR2010A), NN + 5,24 m (HH_XR2010B) und NN + 6,62 m (HH_XR2010C) höhere Wasserstände als das heutige HHThw (NN + 5,10 m am 3. Januar 1976). Sturmflutszenario HH_XR2010B ist zusätzlich durch drei aufeinanderfolgende sehr hohe Hochwasser (Sturmflut - Kettentide) gekennzeichnet. Das Sturmflutszenario HH_XR2010C wird durch eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit gekennzeichnet, die die Arbeitsgruppe zur Überprüfung des Bemessungswasserstandes der Elbe 2007 für eine Bemessung im internationalen Vergleich als zu niedrig eingestuft hat (Gönnert et al., 2007).

Für diese Sturmflutszenarien wird von der BAW mit einem numerischen Modell der Wasserstandsverlauf entlang der Elbe bestimmt. Diese Sturmflutwasserstände sind die Eingangsgrößen für weitere Untersuchungen der beteiligten Projektpartner.

Durch die Vorgabe von Wasserstandsverläufen in der Elbmündung, der dazugehörigen Windentwicklung über der Elbe sowie der Vorgabe des Oberwasserzufluss in die Elbe können bei der BAW diese Sturmflutszenarien in der Elbe modelliert werden. Hierzu wird das hydrodynamische numerische Modell UnTRIM2004 (Casulli, V. und Walters, R., 2000 bzw. BAW, 2004) eingesetzt. Im Anschluss kann sowohl der zeitliche Verlauf des Wasserstandes an Orten von Interesse als auch die Analyseergebnisse wie der Sturmflutscheitelwasserstand HW ([LZKWF - BAW-Methoden-Wiki](#) (BAW, 2002a)) und Durchflusszeitreihen an ausgewählten Querschnitten an die Projektpartner weitergegeben werden.

Zur Einordnung der Ergebnisse werden ergänzend Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt. Hierfür wird der Einfluss der Salzgehaltsverteilung im Ästuar oder die Wirkung des lokalen Windes über der Elbe auf die Sturmflutscheitelwasserstände betrachtet.

Mit den Wasserstands- und Durchflusszeitreihen aus dem 3D - hydrodynamischen numerischen Elbmodell der BAW betreibt anschließend der XtremRisk - Projektpartner TUHH Ausschnittsmodelle der Elbe, um die Belastungen auf die Hochwasser- und Küstenschutz-Bauwerke zu ermitteln. Die Wasserstandsentwicklung entlang der Elbe sowie der Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe werden vom XtremRisk - Projektpartner fwu für die statistische Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Sturmflutszenarien benötigt.

2 Unterlagen und Daten

Zur Erstellung der Topographie des planerischen Ist - Zustandes PIZ der Unter- und Außenelbe werden folgende Unterlagen verwendet (siehe auch BAW, 2007):

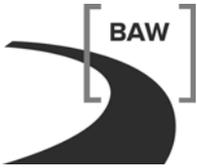
- Peildaten der Jahreshauptpeilung 2003 der WSÄ Cuxhaven, Brunsbüttel, Tönning, Hamburg und Lauenburg,
- Peildaten der Jahreshauptpeilung 2003 des BSH,
- Peildaten der Jahreshauptpeilung 2003 der HPA,
- Befliegungsdaten des Vorlandes aus den Jahren 1992, 1999 und 2001,
- Peildaten für den Bereich Elbe - km 590 bis 540 aus dem Jahr 2000 (WSA Lauenburg),
- Vorlanddaten zwischen Geesthacht und Bleckede aus der Digitalen Bundeswasserstraßenkarte DBWK 2 (1:2000) (2003),
- Landdaten für den bei Sturmflut überflutbaren Bereich des Hamburger Hafens aus dem Jahr 2003 (Amt für Strom- und Hafenbau der Wirtschaftsbehörde der Freien und Hansestadt Hamburg),
- Befliegungsdaten des Vorlandes im Bereich Borghorst - Geesthacht aus dem Jahr 2003 (Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung der Freien und Hansestadt Hamburg),
- Hafenplan Cuxhaven mit den bei Sturmflut überflutbaren Bereichen aus dem Jahr 2003 (Niedersächsisches Hafenamtsamt Cuxhaven).

Zur Steuerung des HN - Modells der Elbe während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A und HH_XR2100A80 werden folgende Daten verwendet:

- vom DWD GF Seeschiffahrt mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) modellierte Windfelder für den Untersuchungszeitraum 1. Januar bis 4. Januar 1976, bereitgestellt vom DWD,
- Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand des Elbmodells der BAW ermittelt aus den Vorgaben des LSBG für den Pegel Cuxhaven (LSBG, 2009),
- vom LSBG definierter konstanter Oberwasserzufluss von 3600 m³/s.

Zur Steuerung des HN – Modells der Elbe während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B werden folgende Daten verwendet:

- Windfelder der MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 (member 20 des ensembles zur Sturmflut 27. Februar 1990 erzeugt im Rahmen des KFKI - Projektes MUSE vom DWD mit dem ensemble prediction system (EPS) des ECMWF, Koziar, C. und Renner, V., 2005), deren räumliche Auflösung mit Hilfe von WAsP - Korrekturfaktoren (Ganske, A. und Rosenhagen, G., 2010) von 7 km x 7 km über der Elbe auf 250 m x 250 m erhöht ist, bereitgestellt vom DWD,



- Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand des Elbmodells der BAW aus der MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 (Bork, I. und Müller - Navara, S., 2005), bereitgestellt vom BSH,
- vom LSBG definierter konstanter Oberwasserzufluss von $3600 \text{ m}^3/\text{s}$.

Zur Steuerung des HN - Modells der Elbe während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C und HH_XR2100C80 werden folgende Daten verwendet:

- Windfelder der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 (member 45 des ensembles zur Sturmflut 4. Januar 1976 erzeugt im Rahmen des KFKI - Projektes MUSE vom DWD mit dem ensemble prediction system (EPS) des ECMWF, Koziar, C. und Renner, V., 2005), deren räumliche Auflösung mit Hilfe von WASP - Korrekturfaktoren (Ganske, A. und Rosenhagen, G., 2010) von $7 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ über der Elbe auf $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ erhöht ist, bereitgestellt vom DWD,
- Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand des Elbmodells der BAW aus der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 (Bork, I. und Müller - Navara, S., 2005), bereitgestellt vom BSH,
- vom LSBG definierter konstanter Oberwasserzufluss von $3600 \text{ m}^3/\text{s}$.

3 Sturmflutszenarien

Im Rahmen des BMBF Verbundprojektes XtremRisk (XR) werden für nachfolgende Untersuchungen, die sich auf den Raum Hamburg (HH) konzentrieren, drei Sturmflutszenarien (A, B, C) unterschiedlicher Charakteristik für das Jahr 2010 untersucht, die HH_XR2010A, HH_XR2010B und HH_XR2010C genannt werden. Bei einem XtremRisk - Arbeitstreffen am 30. September 2010 werden die Szenarien wie in Tabelle 1 angegeben charakterisiert. Im Rahmen des KFKI – Projektes MUSE wurde für die Sturmflutszenarien MUSE 1990 und MUSE 1976 eine Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt. Für die Szenarien mit einem Scheitelwasserstand höher als NN + 6,10 m wird eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt (Jensen, J, 2005, Gönnert et al., 2007).

Bezeichnung	Windfeld	Charakteristik	Wasserstand Cuxhaven
HH_XR2010A	1976 original	hoher Scheitel, steiler Verlauf	6,10 m NN
HH_XR2010B	MUSE 1990	Kette, bauchiger Verlauf	5,32 m NN
HH_XR2010C	MUSE 1976	wie HH_XR2010A, aber höher	6,51 m NN

Tabelle 1: Sturmflutszenarien 2010 für Hamburg (Tabelle entnommen aus dem Protokoll zum XtremRisk - Arbeitstreffen 30. September 2010).

Zusätzlich werden Sturmflutszenarien für das Jahr 2100, die einen Meeresspiegelanstieg von 80 cm in der Deutschen Bucht (siehe auch Gönnert et al., 2009) berücksichtigen, die mit HH_XR2100A80 und HH_XR2100C80 bezeichnet werden.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser extrem hohen Sturmflutszenarien wird im XtremRisk Teilprojekt 1b untersucht. Hierbei wird für den Bereich Hamburg zusätzlich die Eintrittswahrscheinlichkeit des sehr hohen Oberwasserzuflusses (3600 m³/s, siehe auch Tabelle 2) während der Sturmflutszenarien untersucht. Die Ergebnisse sind ausführlich in Wahl, T. et al. (2012) dargestellt.

Das Sturmflutszenario HH_XR2010A wird vom LSBG auf der Grundlage umfangreicher Analysen von Messergebnissen bisheriger Sturmflutereignisse entwickelt. Die Sturmflutszenarien HH_XR2010B und HH_XR2010C gehen auf Untersuchungen im KFKI - Projekt MUSE (Jensen, J., 2006) zurück. In diesem Projekt wurden vom DWD die Wettervorher-

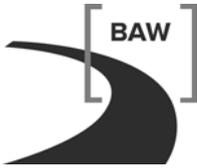
sageergebnisse aus dem Ensemble Prediction System (EPS) im zeitlichen Umfeld von tatsächlich aufgetretenen Sturmfluten untersucht, um weitere mögliche Sturmflutwetterlagen zu finden. Für diese meteorologisch möglichen Wetterentwicklungen wurde ebenfalls eine Wasserstandsvorhersage für die Nordsee und Deutsche Bucht mit dem Wasserstandsvorhersagemodell des BSH (BSH, 2001) gemacht. So wurden auf der Grundlage von realistischen Anfangswerten weitere physikalisch konsistente Wetterentwicklungen gefunden, die zu extrem hohen Sturmfluten in der Deutschen Bucht führen. Die MUSE Sturmfluten 1990 EPS 20 und 1976 EPS 45 liefern sowohl die Wind- als auch die Wasserstandsentwicklung für die in XtremRisk betrachteten Szenarien HH_XR2010B und HH_XR2010C.

Im Rahmen von XtremRisk sollen extreme Sturmfluten in der Tideelbe untersucht werden. Aus vorausgegangenen Untersuchungen (Länderarbeitsgruppe, 1988, Siefert, W., 1998, Rudolph, E., 2005) ist die Bedeutung des Abflusses für die Wasserstände entlang der Tideelbe bekannt. Für den Bereich von Hamburg St. Pauli wird eine Zunahme des Sturmflutscheitelwasserstandes um rund 10 cm pro 1000 m³/s Zunahme des Oberwasserzuflusses und für den Bereich von Bunthaus 10 cm bis 20 cm pro 1000 m³/s in Messungen und Modellrechnungen beobachtet.

MNQ (mittlerer niedrigster Abfluss)	277 m ³ /s
MQ (mittlerer Abfluss)	708 m ³ /s
MHQ (mittlerer höchster Abfluss)	1930 m ³ /s
HQ ₂₀ (IKSE, 2001)	3360 m ³ /s
HQ ₅₀ (IKSE, 2001)	3850 m ³ /s
HQ ₁₀₀ (IKSE, 2001)	4200 m ³ /s
HQ (höchster Abfluss 1926/2007, 31.3.1940)	3620 m ³ /s
HHQ (höchster bekannter Abfluss, 7.4.1895)	3840 m ³ /s
Elbehochwasser 2002: 22.8.2002	3425 m ³ /s
Elbehochwasser 2006: 10.4.2006	3600 m ³ /s
Abfluss während der Sturmflut 29.12.1974	2150 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./4.12.1999	350 m ³ /s
Abfluss der Bemessungssturmflut 2085A	2200 m ³ /s
Abfluss der XtremRisk - Sturmflutszenarien	3600 m ³ /s

Tabelle 2: Abflüsse der Elbe bei Neu Darchau (Elbe - km 536) bezogen auf den Zeitraum 1926/2007 (DGJ, 2011, Länderarbeitsgruppe, 1988 sowie pers. Mitteilungen WSA Lauenburg 2006, IKSE, 2001).

Für die in XtremRisk untersuchten Sturmflutszenarien wird ein konstanter Abfluss bei Neu Darchau (Elbe - km 536) von 3600 m³/s festgelegt. Eine Einordnung des gewählten Abflusses ermöglicht Tabelle 2. Der höchste bei Sturmflut gemessene Abfluss beträgt



2150 m³/s. Für das Zusammentreffen einer sehr hohen Sturmflut mit einem sehr hohen Abfluss wird eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt (Wahl, T. et al., 2012).

Den Sturmflutszenarien wird zum leichteren Lesen und Erläutern der Bilder ein Datum gegeben, das jedoch lediglich darstellungstechnisch benötigt wird.

3.1 HH_XR2010A und HH_XR2010A80

Für das Sturmflutszenario HH_XR2010A hat der LSBG (2009) für Cuxhaven einen Wasserstandsverlauf vorgegeben, der sich aus der mittleren Tide, einem Windstau und einer Fernwelle zusammensetzt. Die Windentwicklung und Windstauentwicklung sollen wie während der Sturmflut 3. Januar 1976 verlaufen. Bild 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der einzelnen Komponenten mittlere Tide (dunkelblau), Windstau (gelb) und Fernwelle (hellblau) sowie den Wasserstandsverlauf (rot) des Szenarios HH_XR2010A in Cuxhaven. Dieses Szenario erreicht einen Sturmflutscheitelwasserstand von NN + 6,10 m.

Für das Sturmflutszenario HH_XR2100A80 wird zusätzlich ein Meeresspiegelanstieg von 80 cm in der Deutschen Bucht angenommen.

Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A und HH_XR2100A80 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. Januar 1976 bis 4. Januar 1976 Windfelder mit einer räumlichen Auflösung von 450 m x 450 m vor. Diese Windfelder wurden vom DWD mit MKW (Schmidt, H. und Pätsch, J., 1992) berechnet.

Bild 2 zeigt die zeitliche Entwicklung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung während der Sturmflut 3. Januar 1976. Diese Windentwicklung wird auch für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A und HH_XR2100A80 angenommen.

Der Wasserstandsverlauf des Szenarios HH_XR2010A ist an den Verlauf der Sturmflut vom 3. Januar 1976 angelehnt. Am Vormittag des 3. Januar 1976 behinderte die Drehung der Windrichtung von Süd (180 Grad) auf West (270 Grad) und die gleichzeitige Zunahme der Windgeschwindigkeit auf mehr als 25 m/s (Bft 9, siehe Bild 2) das Abfließen des Wassers aus der Elbe vor der Sturmflut. Das Tideniedrigwasser T_{nw} liegt am 3. Januar 1976 deutlich über dem MT_{nw} = NN - 1,46 m (DGJ, 2008). Die anschließende Sturmflut erreichte am 3. Januar 1976 entlang der Elbe die höchsten bekannten Wasserstände HH_{Thw} (DGJ, 2008).

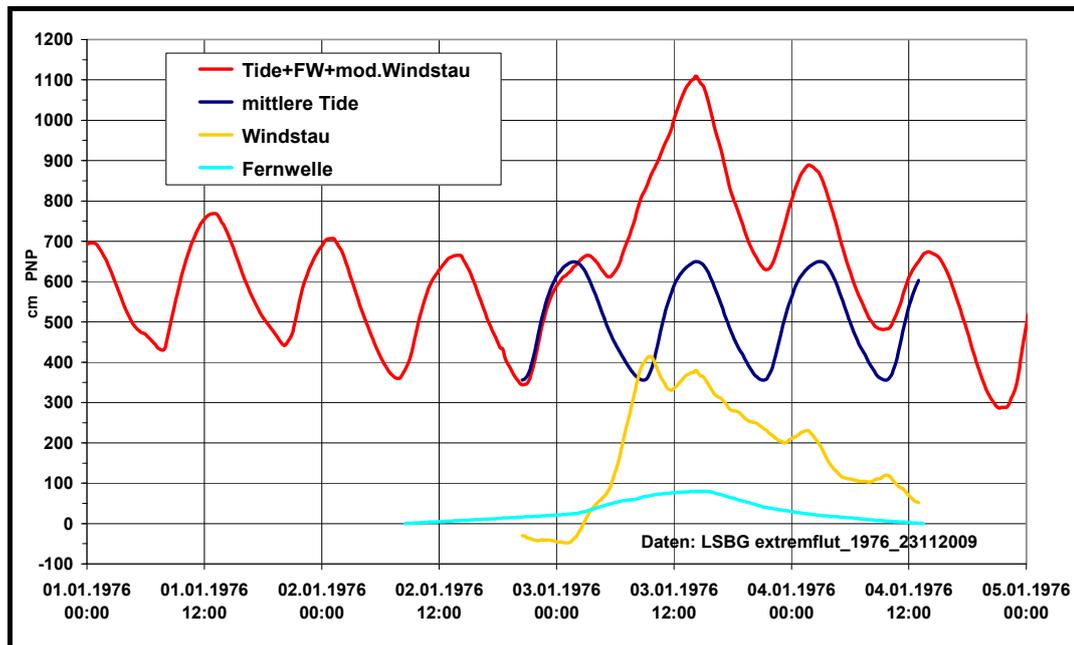


Bild 1: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven (rot) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A vorgegeben vom LSBG (2009). Zusätzlich sind die zugrunde liegenden Komponenten mittlere Tide (dunkelblau), Windstau (gelb) und Fernwelle (hellblau) eingetragen (Datum ohne Bedeutung).

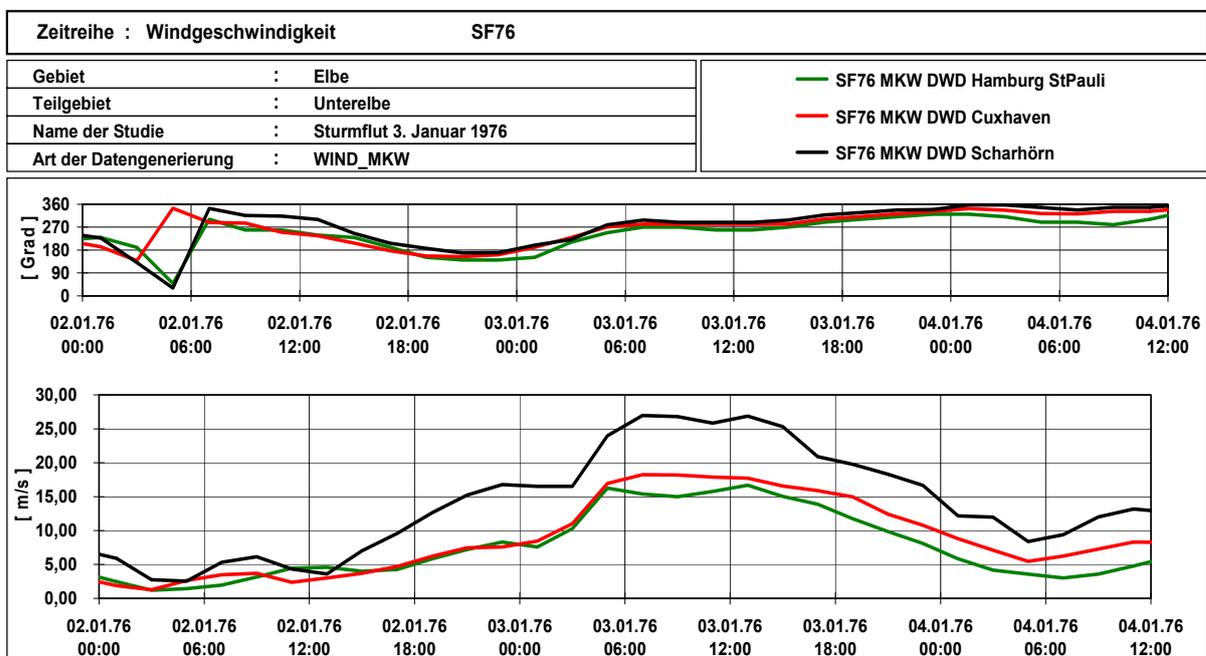


Bild 2: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbemodell bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (grün) während der Sturmflut 3. Januar 1976 modelliert vom DWD mit MKW.

3.2 HH_XR2010B

Das Sturmflutszenario HH_XR2010B verwendet das Windfeld und die Wasserstandsentwicklung der MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 (Bork, I. und Müller - Navarra, S., 2005). Die MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 ist eine Sturmflut - Kettentide. Sie erreicht in Cuxhaven innerhalb von 24 Stunden drei Tidehochwasser Thw in der Höhe von ca. NN + 5,00 m sowie innerhalb von 48 Stunden vier Tideniedrigwasser Tnw, die deutlich höher als das mittlere Tideniedrigwasser mTnw (Cuxhaven NN – 1,40 m) liegen. Im Sturmflutzeitraum sinkt der Wasserstand in Cuxhaven nicht unter NN + 2,00 m. Diese Situation wird erzeugt durch langanhaltend hohe Windgeschwindigkeit aus westlicher bis nordwestlicher Richtung über der Deutschen Bucht.

Die Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (Elbmodell) sowie während der zu Grunde liegenden MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 (Nordseemodell) ist in Bild 3 dargestellt. HH_XR2010B erreicht drei deutlich erhöhte Thw mit NN + 4,96 m, NN + 5,24 m und NN + 5,07 m. Der höchste im Sturmflutzeitraum aufgetretene Wasserstand (Sturmflutscheitelwasserstand HW) beträgt in Cuxhaven NN + 5,24 m.

Die Windentwicklung bei Scharhörn, Cuxhaven und Hamburg St. Pauli ist in Bild 4 zu sehen. Man erkennt die deutliche Zunahme der Windgeschwindigkeit bei Scharhörn in der Elbmündung von 15 m/s auf 25 m/s sowie die Drehung von Südwest (225°) auf West (270°) am 26. 2. 1990. Während des gesamten 27. 2. 1990 werden Windgeschwindigkeiten höher als 20 m/s (Bft 9, Sturm) erreicht.

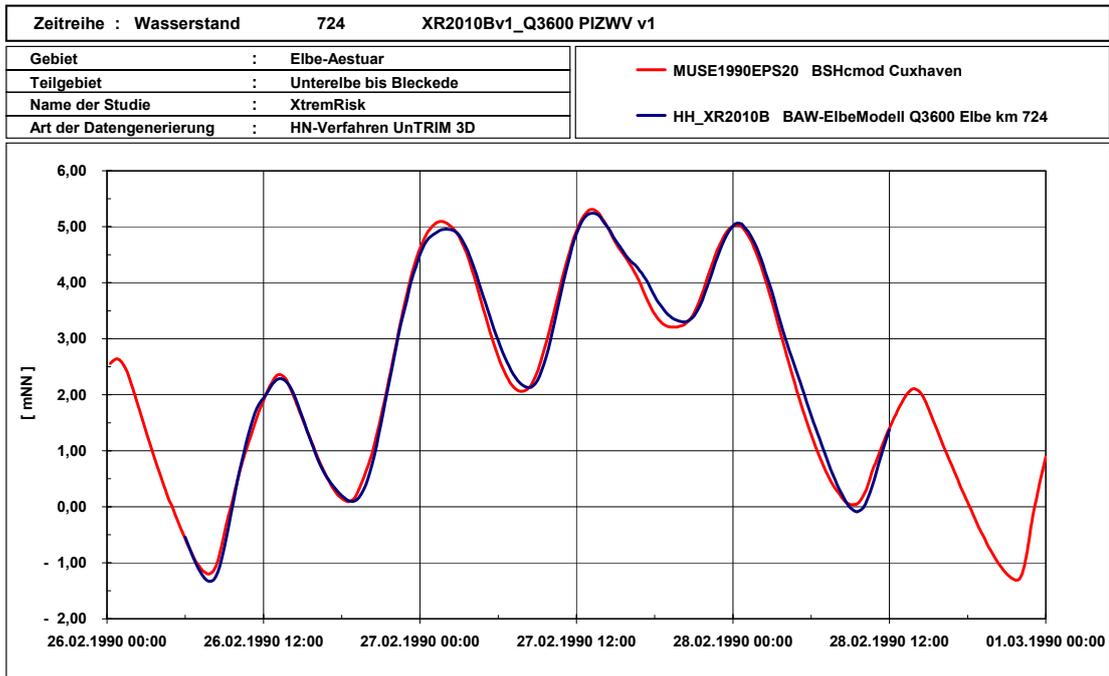


Bild 3: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B vorgegeben aus dem Nordseemodell des BSH (MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 in Rot, bereitgestellt vom BSH) und dem Elbemodell der BAW (dunkelblau).

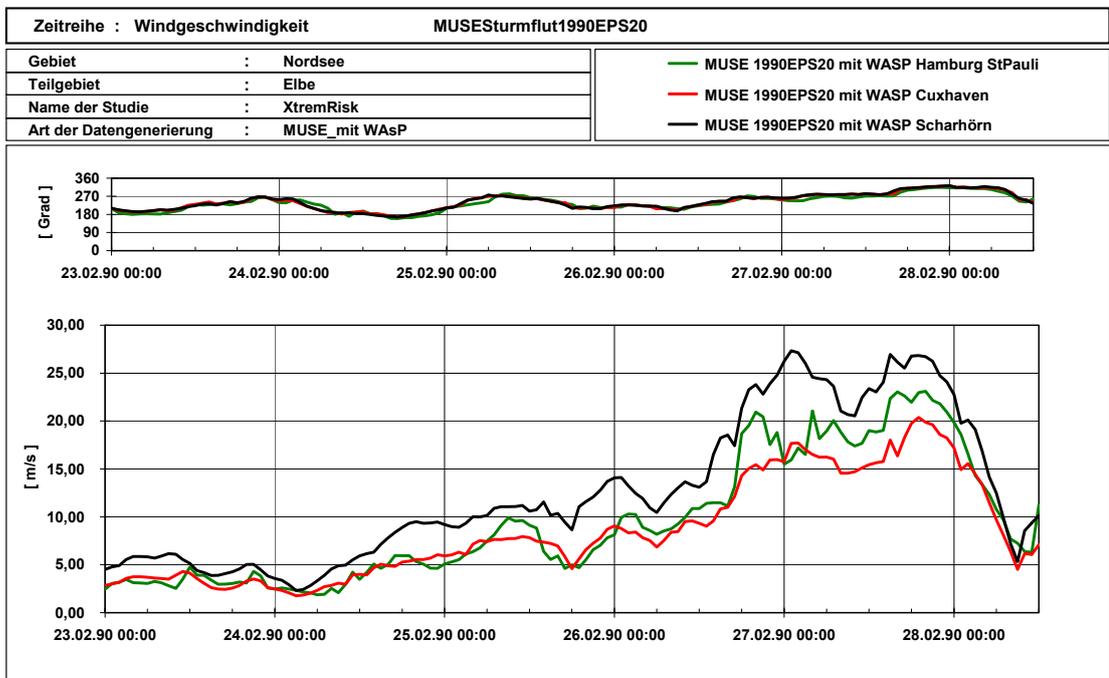


Bild 4: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbemodell bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (grün) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B modelliert vom DWD (bereitgestellt vom DWD).

3.3 HH_XR2010C und HH_XR2010C80

Das Sturmflutszenario HH_XR2010C verwendet das Windfeld und die Wasserstands-entwicklung der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 (Bork, I. und Müller - Navarra, S., 2005). Die MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 erreicht in Cuxhaven einen Sturmflutscheitelwasserstand von NN + 6,51 m. Das Sturmflutszenario HH_XR2010C wird durch eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit gekennzeichnet, die die Arbeitsgruppe zur Überprüfung des Bemessungswasserstandes der Elbe 2007 für eine Bemessung im internationalen Vergleich als zu niedrig eingestuft hat (Gönnert et al., 2007).

Die Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (Elbmodell) sowie während der zu Grunde liegenden MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 (Nord-seemodell) ist in Bild 5 dargestellt.

Für das Sturmflutszenario HH_XR2100C80 wird zusätzlich ein Meeresspiegelanstieg von 80 cm in der Deutschen Bucht angenommen.

Die Windentwicklung bei Scharhörn, Cuxhaven und Hamburg St. Pauli ist in Bild 6 zu sehen. Ein Vergleich mit der Windentwicklung während der Sturmflut 3. Januar 1976 (Bild 2) zeigt einen ähnlichen Verlauf der Windzunahme und Winddrehung. Jedoch werden bei der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 Windgeschwindigkeiten höher als 15 m/s über einen längeren Zeitraum erreicht.

Der Wasserstandsverlauf des Szenarios HH_XR2010C ähnelt ebenfalls dem Verlauf der Sturmflut vom 3. Januar 1976. Bei Szenario HH_XR2010C behindert starker Westwind (20 m/s bis 30 m/s, Bft 9 bis Bft 11) am Vormittag und Nachmittag des 3. 1. das Abfließen des Wassers aus der Elbe. Das Tideniedrigwasser am Vormittag liegt bei ca. NN + 0,5 m und das Tideniedrigwasser vor der Sturmflut bei NN + 3,40 m.

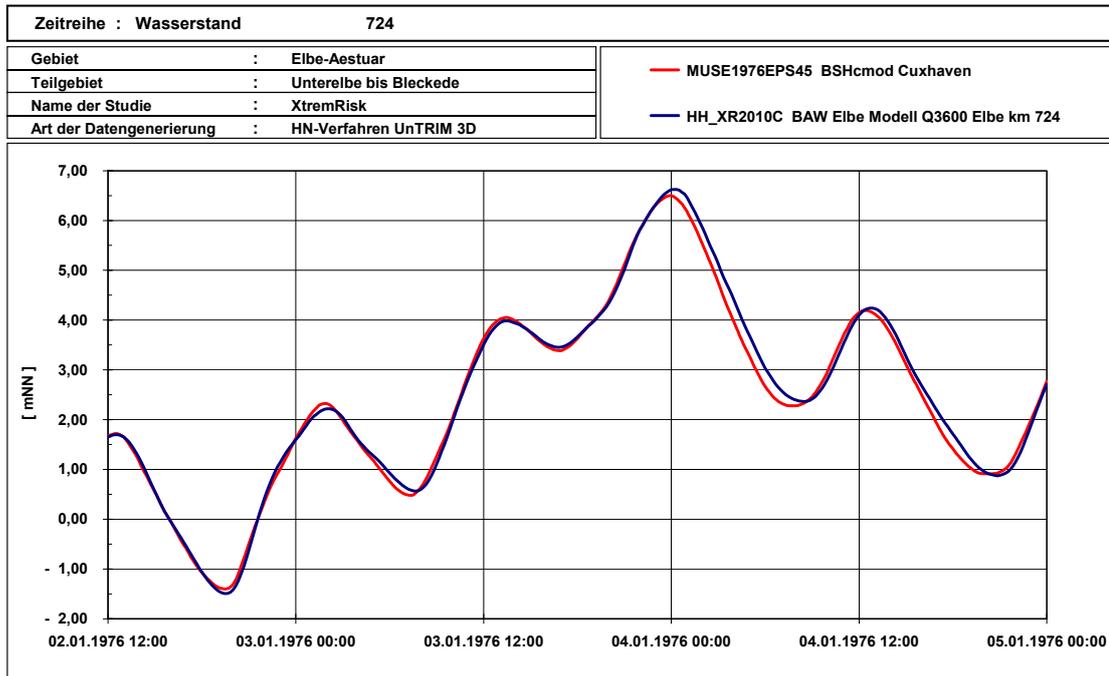


Bild 5: Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C vorgegeben aus dem Nordseemodell des BSH (MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 in Rot, bereitgestellt vom BSH) und dem Elbemodell der BAW (dunkelblau).

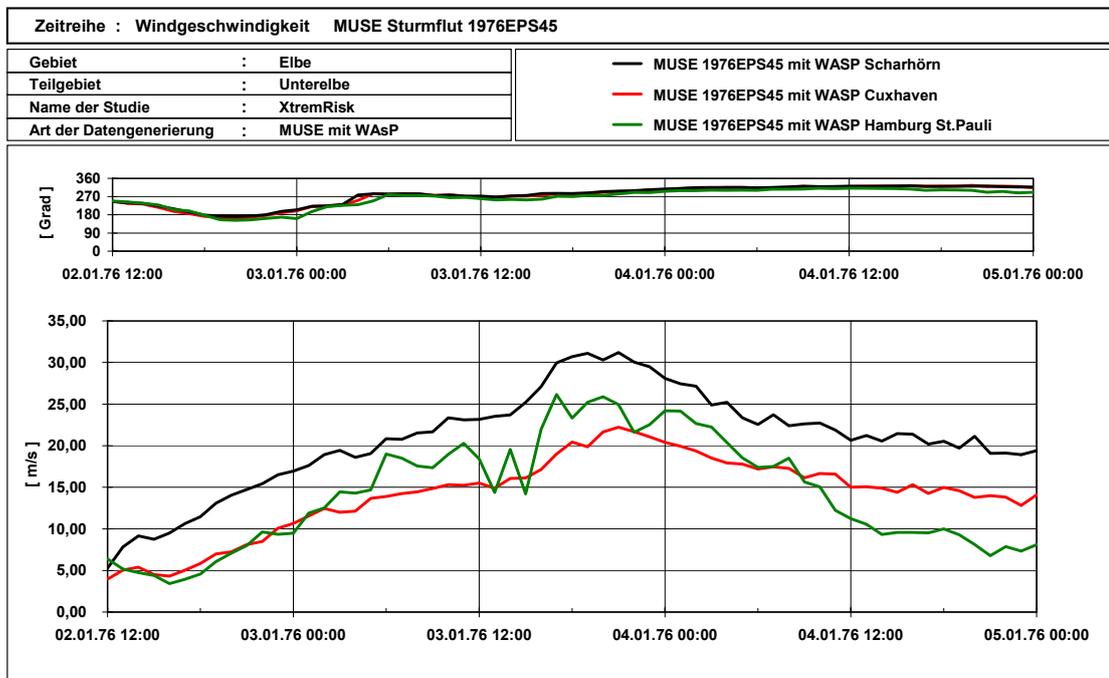
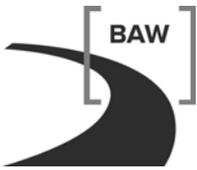


Bild 6: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbemodell bei Scharhörn (schwarz), Cuxhaven (rot) und Hamburg St. Pauli (grün) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C modelliert vom DWD (bereitgestellt vom DWD).



4 Das mathematische Modell des Elbeästuares

Die Auswahl des geeigneten Modellverfahrens, die Festlegung des zu untersuchenden Modellgebietes und die geometrische Auflösung der Topographie sind abhängig von der Aufgabenstellung und bestimmen die Prognosefähigkeit mathematischer Modelle.

4.1 Modelltopographie Planerischer Ist - Zustand PIZ

Zur Erstellung der hochaufgelösten Modelltopographie liegen Informationen über den morphologischen Zustand 2002/2003 vor. Im planerischen Ist - Zustand (PIZ, siehe auch Bild 7) werden außerdem alle baulichen Maßnahmen berücksichtigt, die 2003 bereits planfestgestellt sind. Bild 8 zeigt das Längsprofil der Sohllage entlang des Elbefahrwassers für den planerischen Ist - Zustand (PIZ) zwischen Elbe - km 755 in der Außenelbe und Elbe - km 585 bei Geesthacht.

Die derzeit geplante Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe wird nicht berücksichtigt.

4.2 Das numerische Verfahren UnTRIM

Die vom LSBG IM Rahmen von XtremRisk entworfenen Sturmflutszenarien werden mit einem numerischen Modell des Elbeästuares unter Verwendung des dreidimensionalen hydronumerischen Modellverfahrens UnTRIM (siehe Casulli, V. und Walters, R. A., 2000) untersucht. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im *Mathematical Model UnTRIM - Validation Document* (BAW, 2004). UnTRIM ist ein Finite Differenzen/ Finite Volumen Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter löst. Grundlage des Verfahrens UnTRIM sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung darstellen.

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

- Wasserspiegelauslenkung (bezüglich NN) und
- Strömungsgeschwindigkeit (tiefenaufgelöst oder tiefengemittelt).

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

- 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 τ_{Wind} beschrieben:

$$\tau_{\text{Wind}} = \rho_{\text{Luft}} C_D v_{10,\text{Wind}} |v_{10,\text{Wind}}|.$$

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

$$C_D = (0.63 + 0.066 |v_{10,\text{Wind}}|) 10^{-3}.$$

4.3 Modellgebiet

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

- Außenelbe bis Elbe - km 756,
- Unterelbe und
- Mittelelbe 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 7 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 Elbeästuars ist bis zur Deichlinie nachgebildet.

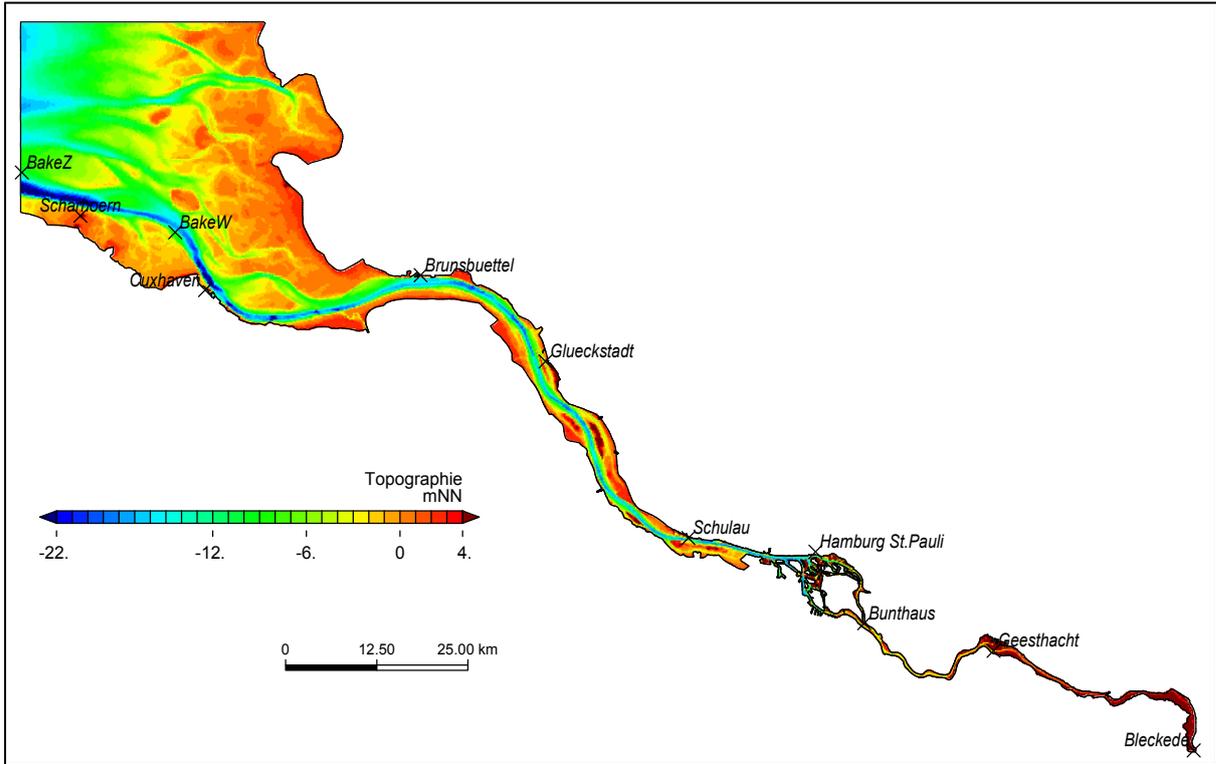


Bild 7: Topographie des numerischen Modells des Elbeästuares der BAW für Sturmflutuntersuchungen (PIZ) mit ausgewählten Pegelorten.

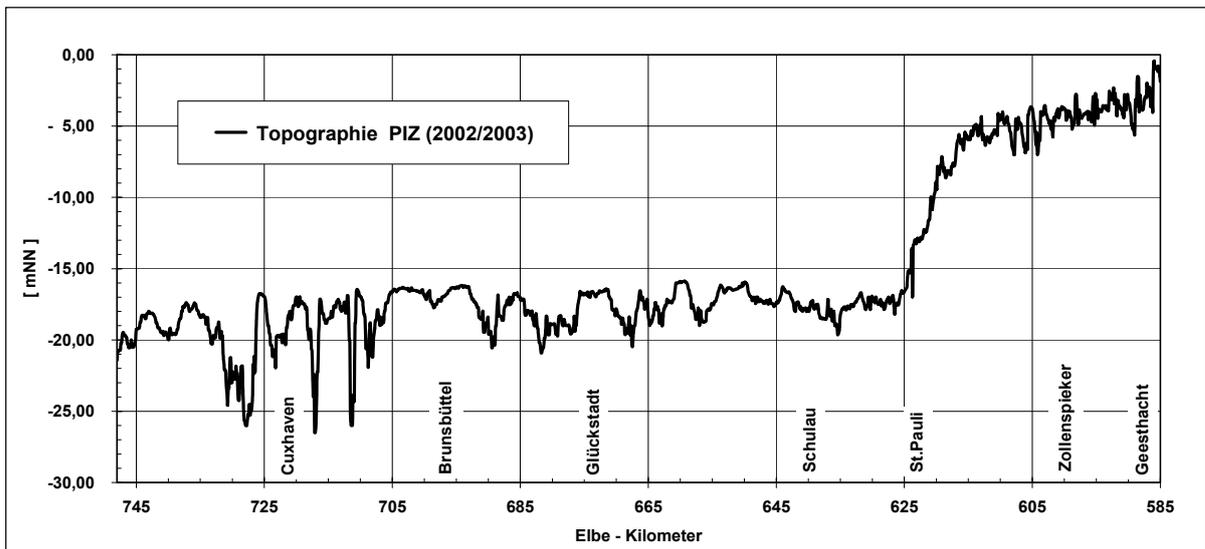


Bild 8: Längsprofil der auf NN bezogenen Sohlage der Fahrrinnenachse in der Topographie des HN - Modells für den planerischen Ist - Zustand PIZ zwischen Elbe - km 748 und Elbe - km 585 (Wehr Geesthacht).

4.4 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: 223 891

Anzahl der Polygone: 146 783

Kantenlänge: 5 m bis 820 m

Elementflächen: 47 m² bis 0,62 km².

4.5 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 Sturmflutszenarien HH_XR2010A und HH_XR2100A80 wird der Wasserstandsverlauf auf dem seeseitigen Modellrand unter Berücksichtigung von Übertragungsfunktionen so erzeugt, dass die Vorgaben des LSBG für Cuxhaven erreicht werden. Das Sturmflutszenario HH_XR2100A80 berücksichtigt einen Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht von 80 cm.

Für das Sturmflutszenarien HH_XR2010B wird der Wasserstandsverlauf auf dem seeseitigen Modellrand aus Modellergebnissen der MUSE Sturmflut 1990 EPS20 des großräumigen HN – Modells der Nordsee des BSH (Bork, I., und Müller - Navarra, S., 2005) vorgegeben

Für das Sturmflutszenarien HH_XR2010C wird der Wasserstandsverlauf auf dem seeseitigen Modellrand aus Modellergebnissen der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 des großräumigen HN – Modells der Nordsee des BSH (Bork, I., und Müller - Navarra, S., 2005) vorgegeben. Für das Sturmflutszenario HH_XR2100C80 wird zusätzlich ein Meeresspiegelanstieg von 80 cm in der Deutschen Bucht berücksichtigt.

Die verwendete Reibungsverteilung (effektive Sohlrauheit) ist im Anhang in Bild 75 dargestellt. Bild 76 ebenfalls im Anhang zeigt die Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraums für die untersuchten Sturmflutszenarien (HH_XR2010A, HH_XR2100A80, HH_XR2010B, HH_RX2010C und HH_XR2100C80).

Für die im Rahmen von XtremRisk untersuchten Sturmflutszenarien ist der Oberwasserzufluss mit $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{s}$ vom LSBG festgelegt worden. Am landseitigen offenen Modellrand bei Bleckede wird der Oberwasserzufluss im Simulationszeitraum deshalb konstant mit $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{s}$ vorgegeben. Eine Einordnung des gewählten Oberwasserzuflusses ermöglicht Tabelle 2.

Das Wehr Geesthacht ist bei den Sturmflutuntersuchungen gelegt. Die Sturmflutsperrwerke an den Nebenflüssen der Elbe werden für die Untersuchungszeiträume als geschlossen vorausgesetzt.

Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre während der Sturmflutszenarien wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe aus modellierten Windfeldern über dem gesamten Modellgebiet vorgegeben.

Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A und HH_XR2100A80 werden vom DWD mit MKW (H. Schmidt und J. Pätsch, 1992) für den Zeitraum 1. Januar bis 4. Januar 1976 modellierte Windfelder im Abstand von zwei Stunden mit einer räumlichen Auflösung von $450 \text{ m} \times 450 \text{ m}$ verwendet.

Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010B, HH_XR2010C und HH_XR2100C80 werden die Windfelder der MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 bzw. MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 verwendet. Da die räumliche Auflösung dieser Windfelder mit $7 \text{ km} \times 7 \text{ km}$ zu grob ist um z. B. die Land - Wasser - Verteilung im Elbeästuar stromauf von Brunsbüttel aufzulösen, wird die Auflösung der Windfelder unter Berücksichtigung von WAsP - Korrekturfaktoren (Ganske, A. und Rosenhagen, G., 2010) auf $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ erhöht. Der DWD erzeugte diese hochaufgelösten Windfelder und stellte sie der BAW zu Verfügung (Hennemuth, B., 2011).

In einer Sensitivitätsstudie wird die Bedeutung der gewählten Randwerte (Oberwasserzufluss, Wind über der Elbe, Salzgehalt am Rand zur Nordsee) für die Wasserstände entlang der Elbe untersucht.

4.6 Sturmflut 28. Januar 1994: Vergleich Messung mit Modellergebnis

Bild 9 bis Bild 12 zeigt einen Vergleich zwischen den mit dem HN - Modell der Elbe (topographischen Zustand PIZ, siehe Abschnitt 4.1) berechneten (schwarz) und den gemessenen Wasserstandszeitreihen (rot) für den Zeitraum 27. Januar 1994 00:00 Uhr bis 29. Januar 1994 12:00 Uhr an den Pegeln Cuxhaven Steubenhöft, Glückstadt, Hamburg St. Pauli und Bunthaus. Die Lage dieser Pegel ist in Bild 7 markiert. Man erkennt eine gute Übereinstimmung von gemessenen mit modellierten Wasserstandszeitreihen. Die modellierten Sturmflutscheitelwasserstände weichen an den gezeigten Pegeln um ± 10 cm von den gemessenen Scheitelwasserständen ab.

Die vergleichende Gegenüberstellung des gemessenen (rot) und des mit dem HN – Modell des Elbeästuares numerisch berechneten (schwarz) Wasserstandsverlaufs auf Bild 9 bis Bild 12 zeigt, dass das Systemverhalten im Tidezyklus sowohl hinsichtlich der Höhen- als auch der Phasenlage durch das Modell nachgebildet wird.

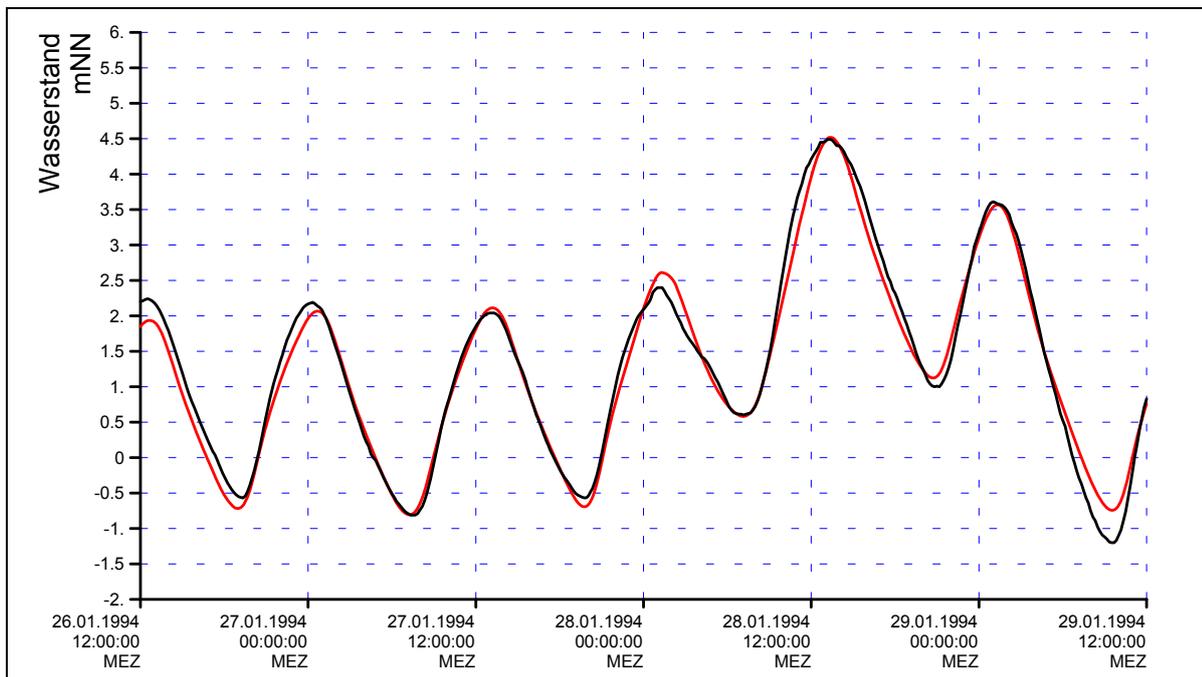


Bild 9: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Cuxhaven. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.

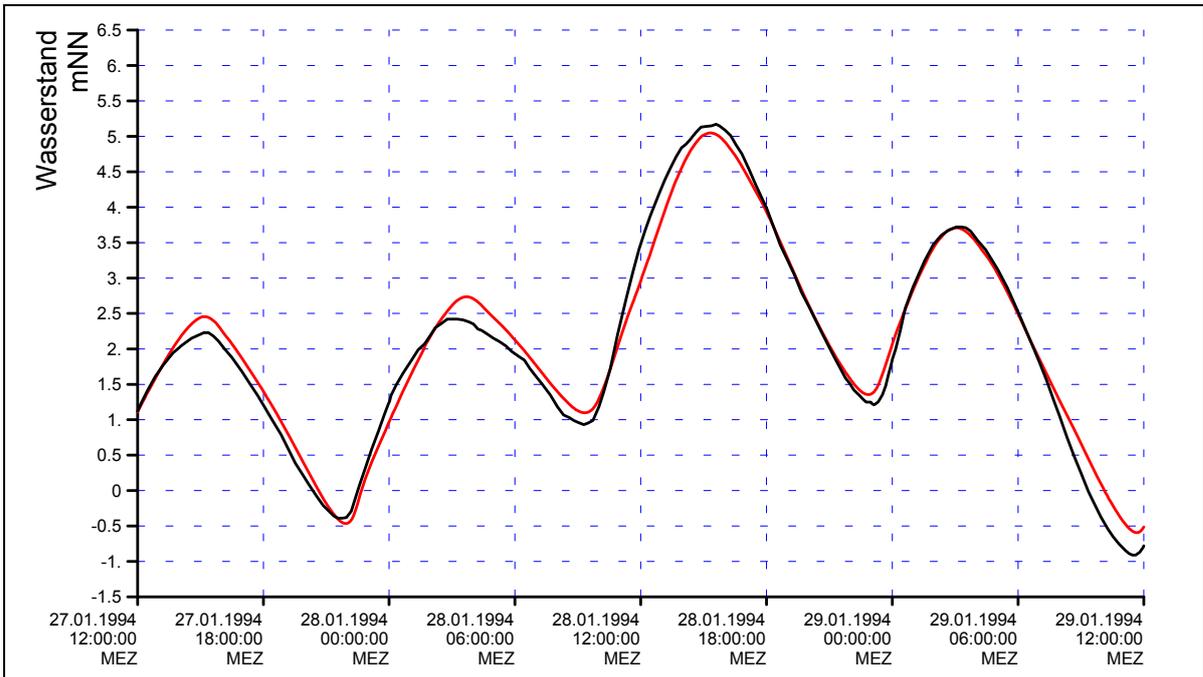


Bild 10: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Glückstadt. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.

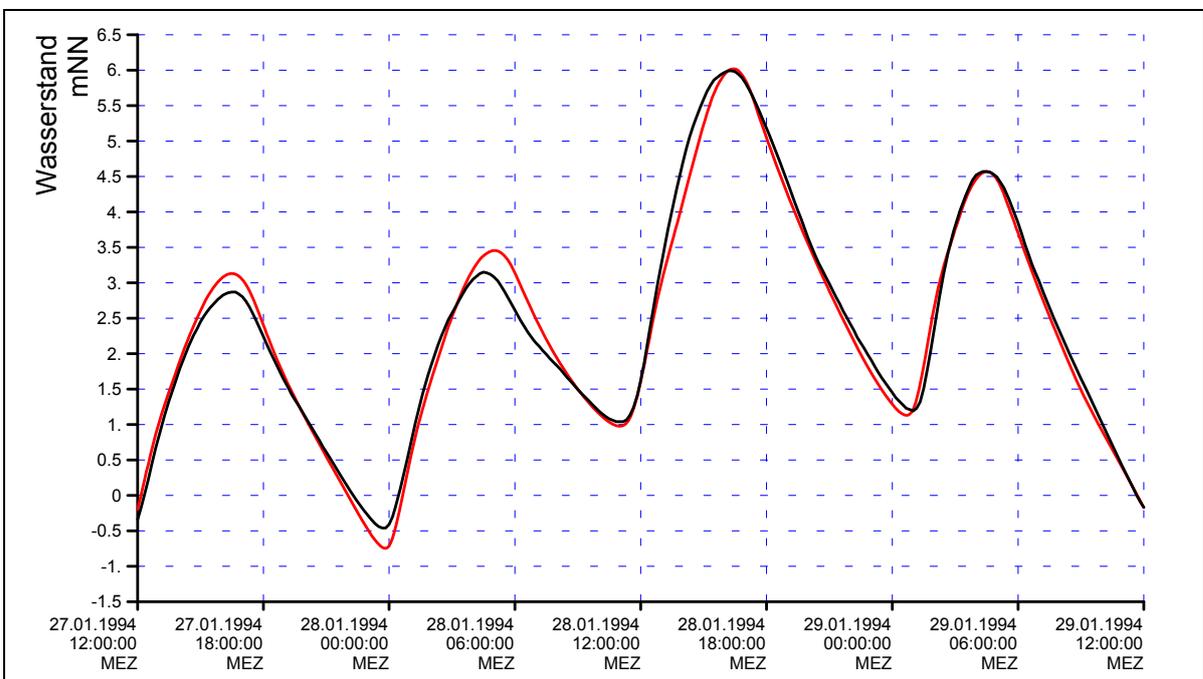


Bild 11: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Hamburg St. Pauli. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.

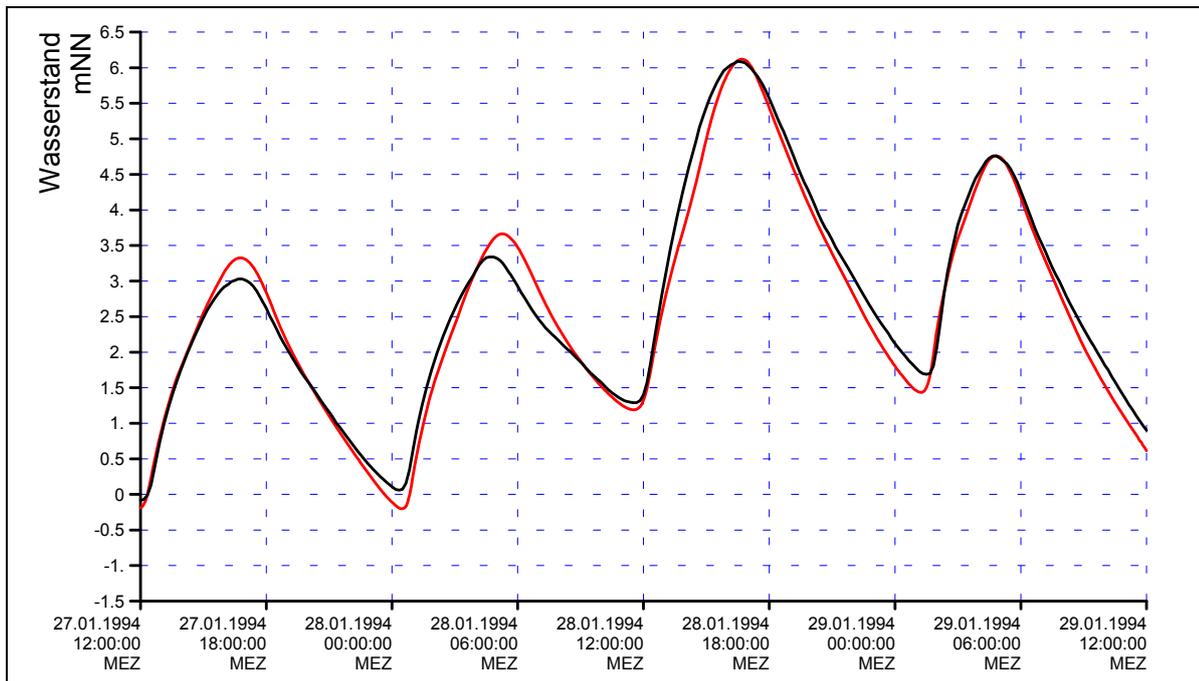


Bild 12: Wasserstandsentwicklung am 27. und 28. Januar 1994 am Pegel Bunthaus. Die Messung ist schwarz und die Modellrechnung (PIZ) rot gekennzeichnet.

5 Ergebnisse der Sturmflutmodellierung

Der Wasserstand im Elbeästuar bei Sturmflut wird durch folgende Randwerte bestimmt:

- den Wasserstandsverlauf in der Nordsee,
- den Wind über der Nordsee und dem Elbeästuar und
- den in das Elbeästuar aus der Mittel-Elbe fließenden Oberwasserzufluss.

Im Ästuar verändern Prozesse wie Reibung an der Gewässersohle oder Impulseintrag aus der Atmosphäre den Sturmflutwasserstand. Durch eine größere Wassertiefe, bedingt durch z. B. den Meeresspiegelanstieg, sind folgende Veränderungen bei Sturmflut zu erwarten:

- verringerter Effekt der Sohlreibung und somit eine Erhöhung der Hochwasserstände;
- verringerter Effekt des lokalen Windes und somit ein Absenken der Hochwasserstände.

Ein HN – Modell, wie das hier eingesetzte Verfahren UnTRIM (BAW, 2004) ist in der Lage, diese Prozesse und ihre nichtlineare Wechselwirkung zu beschreiben.

Als Ergebnis der Modellierung der Sturmflutszenarien steht für jeden durchgeführten Simulationslauf an jedem (feuchten) Gitterpunkt für jeden Ausgabetermin (Datenausgabeintervall der Modellsimulation: $\Delta t = 600$ s) u. a. der Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit zur Verfügung. Die Länge der Simulationszeiträume dieser Sturmflutszenarien wird auch durch den Zeitraum, für den Randwerte (z. B. am offenen Rand zur Nordsee) vorhanden sind, begrenzt.

Sturmflut-Szenario	Simulationszeitraum		Analysezeitraum	
	von	bis	von	bis
HH_XR2010A	1.1. 02:00	4.1. 23:00	3.1. 00:00	4.1. 00:00
HH_XR2100A80	1.1. 02:00	4.1. 23:00	3.1. 00:00	4.1. 00:00
HH_XR2010B	26.2. 00:00	28.2. 19:00	26.2. 18:00	28.2. 12:00
HH_XR2010C	2.1. 12:00	5.1. 00:00	3.1. 12:00	4.1. 12:00
HH_XR2100C80	2.1. 12:00	5.1. 00:00	3.1. 12:00	4.1. 12:00

Tabelle 3: Simulationszeiträume und Analysezeiträume der XtremRisk - Sturmflutszenarien HH_XR2010A, HH_XR2100A80, HH_XR2010B, HH_XR2010C und HH_XR2100C80 (Datum ohne Bedeutung).

Im Rahmen einer sich der Modellrechnung anschließenden Auswertung (Lang, G., 2003) wird aus den Zeitreihen des Wasserstandes für jeden Simulationslauf der Sturmflutscheitelwasserstand (höchster aufgetretener Wasserstand HW) im Analysezeitraum (siehe Tabelle 3) bestimmt. Die Analysezeiträume für die tideunabhängigen Kenngrößen des Wasserstandes sind in Tabelle 3 angegeben. Zusätzliche Informationen zu der aus den berechneten

Wasserstandszeitreihen abgeleiteten Kenngröße HW findet man im Bericht *Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes* (BAW, 2002a bzw. BAWiki unter www.baw.de).

Für das Sturmflutszenario HH_XR2010B (Sturmflut - Kettentide) wird zusätzlich der tideabhängige Kennwert des Wasserstandes Tidehochwasser Thw analysiert, um die Höhe jedes einzelnen Thw im Sturmflutzeitraum zu bestimmen. Informationen zu der aus den berechneten Wasserstandszeitreihen abgeleiteten Thw findet man im Bericht *Tidekennwerte des Wasserstandes* (BAW, 2002b bzw. BAWiki unter www.baw.de). Die Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände HW wird auf einem Längsprofil entlang des Elbefahrwassers (siehe Bild 8) und flächenhaft im Untersuchungsgebiet durchgeführt.

Zur Steuerung eines Ausschnittsmodells des Hamburger Bereichs der Elbe zwischen Finckenwerder (Elbe - km 632) und Over (Elbe - km 605) werden von der TUHH Zeitreihen des Wasserstandes und des Durchflusses benötigt. Dafür werden die 3D - Ergebnisse der numerischen Simulation über den Gewässerquerschnitt gemittelt (Wasserstand $h(t)$ und Strömung $v(t)$) bzw. integriert (Durchfluss $Q(t)$). Die Lage der verwendeten Querprofile ist in Bild 13 eingezeichnet.

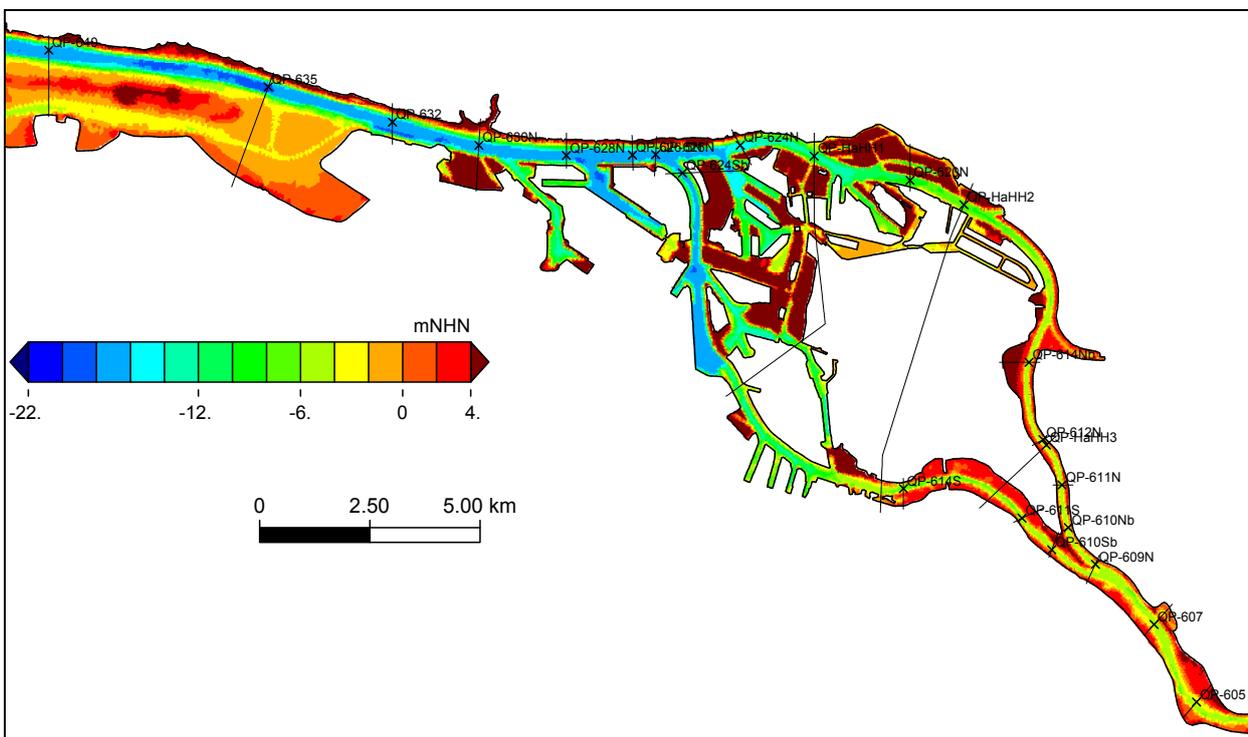


Bild 13: Lage der zur Querschnittsmittelung bzw. Querschnittsintegration der Wasserstands- und Strömungszeitreihen verwendeten Querprofile zwischen Elbe - km 640 bei Schulau und Elbe - km 605 bei Over.

5.1 HH_XR2010A und HH_XR2100A80

5.1.1 Wasserstandsentwicklung

Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (in Schwarz) und HH_XR2100A80 (in Rot) ist beispielhaft der mit dem Elbmodell der BAW modellierte Wasserstandsverlauf entlang der Elbe an den Orten Cuxhaven (Elbe - km 725, Bild 14), Brunsbüttel (Elbe - km 696, Bild 15), Stadersand (Elbe - km 655, Bild 16) Hamburg St. Pauli (Elbe - km 623 N, Bild 17), Bunthaus (Elbe - km 609 N, Bild 18) und Geesthacht (Elbe - km 585, Bild 19) dargestellt. Zum Vergleich sind die Wasserstandsmessungen der tatsächlich eingetretenen Sturmflut vom 3. Januar 1976 (SF76), die die höchsten bisher beobachteten Sturmflutwasserstände HHThw erreichte, in Grün eingezeichnet. Für Cuxhaven (Bild 14) ist außerdem der vom LSBG vorgegebene Wasserstandsverlauf in Blau eingetragen.

Der Wasserstandsverlauf der zwei Sturmflutszenarien ist mit dem Verlauf der Sturmflut SF76 vergleichbar. Die Ebbephase vor der Sturmflut ist deutlich kürzer und das Tideniedrigwasser Tnw vor der Sturmflut liegt deutlich höher als das MTnw (siehe auch Abschnitt 3.1). Während der Sturmflut SF76 herrschte ein Oberwasserzufluss von $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (siehe Tabelle 2). Der Effekt des unterschiedlichen Abflusses während der XtremRisk - Sturmflutszenarien und während der SF76 ist in den Vortiden stromauf von Hamburg deutlich zu erkennen. In Bunthaus liegen Thw (MThw: NN + 2,36 m (DGJ, 2011)) und Tnw (MTnw: NN – 1,08 m (DGJ, 2011)) bei den XtremRisk - Sturmflutszenarien deutlich höher als MThw bzw MTnw. In Geesthacht ist bei sehr hohen Abflüssen nur noch ein sehr kleiner Tidehub Thb zu finden. Dieser Einfluss des Abflusses auf die Wasserstände wird auch von z. B. der Länderarbeitsgruppe (1988) oder Rudolph, E. (2005) beschrieben. Bild 19 zeigt außerdem, dass in den Vortiden der Einfluss des Abflusses auf die Höhe des Thw den Einfluss des Meeresspiegelanstieges übertrifft, während im Sturmflutzeitraum der Einfluss des Meeresspiegelanstieges um + 80 cm deutlich zu sehen ist (siehe hierzu auch Rudolph et al., 2012).

Bild 20 zeigt den Wasserstandsverlauf an den Orten Cuxhaven (schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (durchgezogen) und HH_XR2100A80 (gestrichelt).

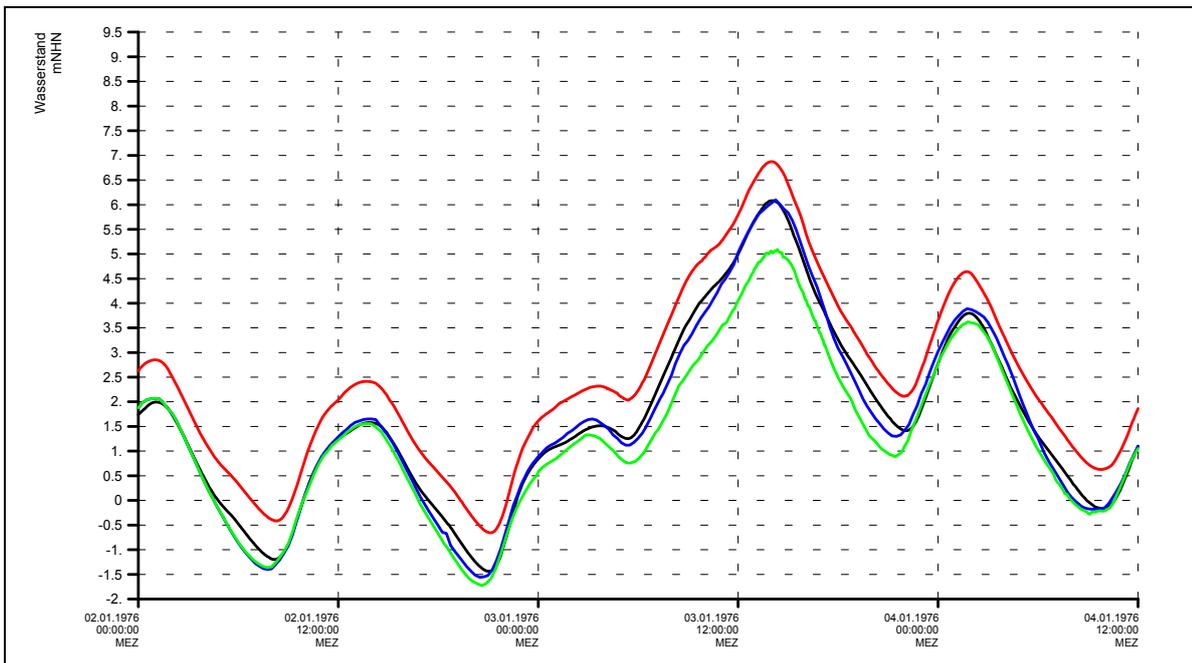


Bild 14: Cuxhaven: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Vorgabe des LSBG ist blau und die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.

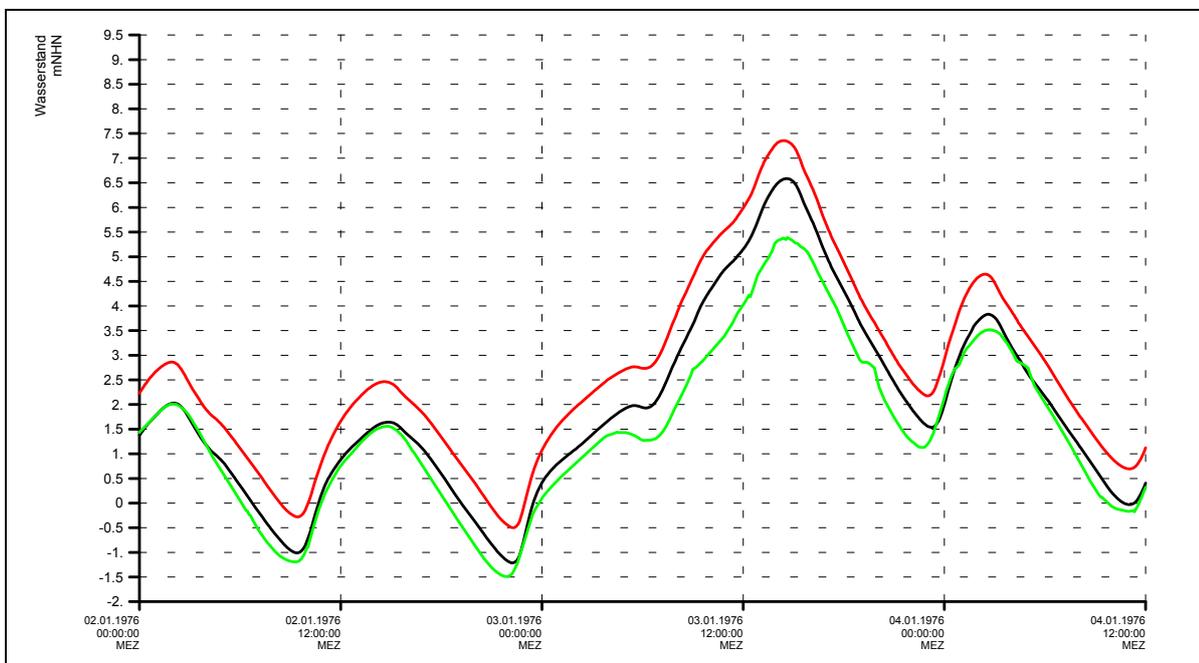


Bild 15: Brunsbüttel: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.

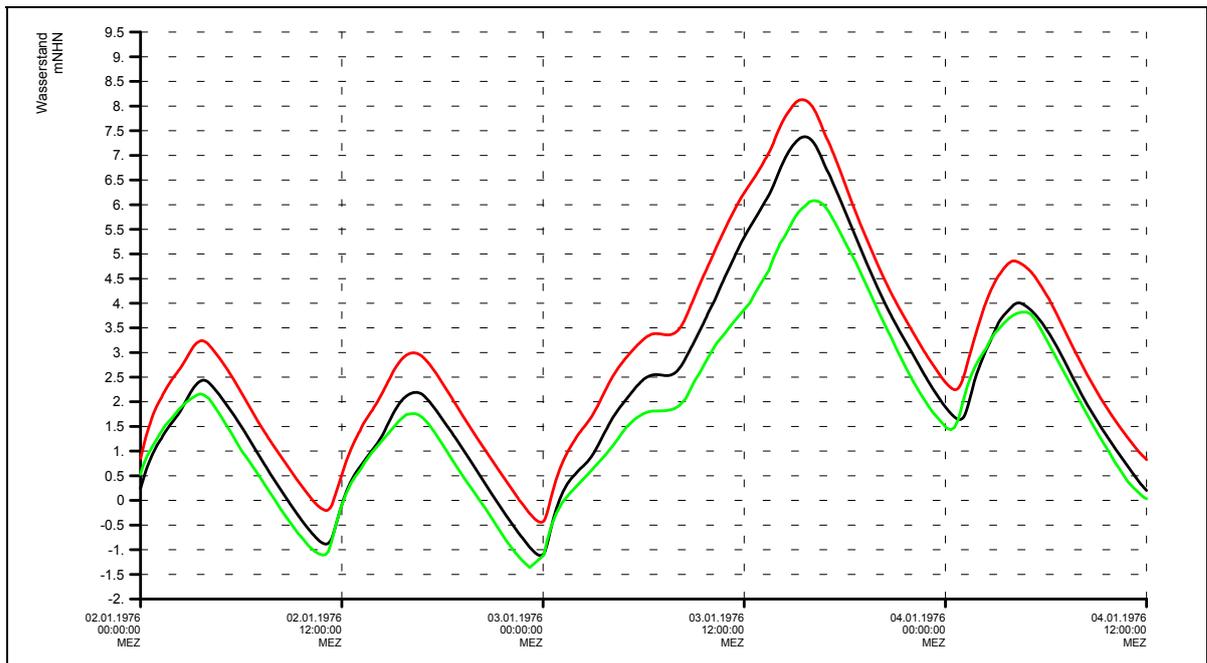


Bild 16: Stadersand: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.

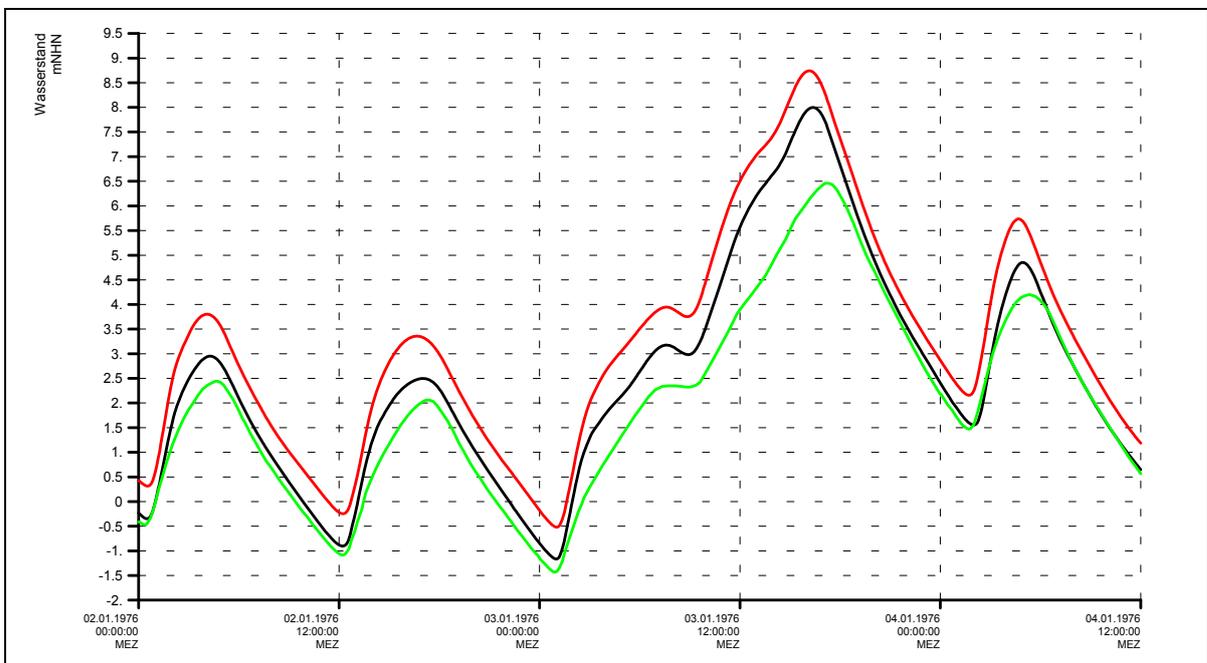


Bild 17: Hamburg St. Pauli: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.

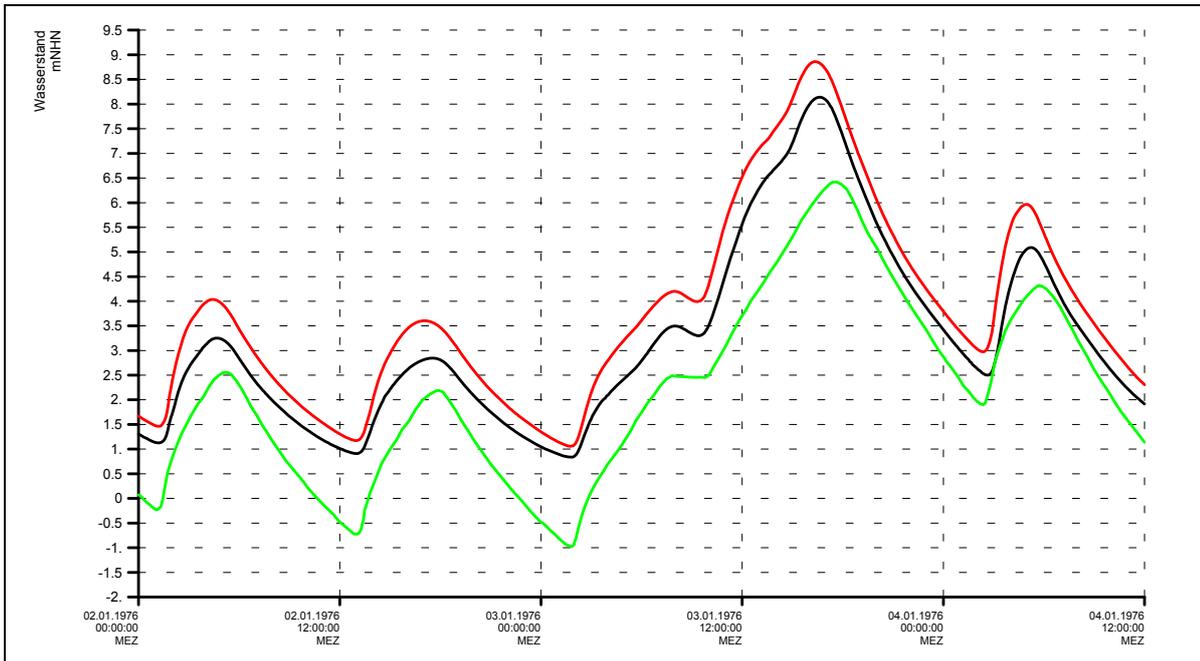


Bild 18: Bunthaus: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.

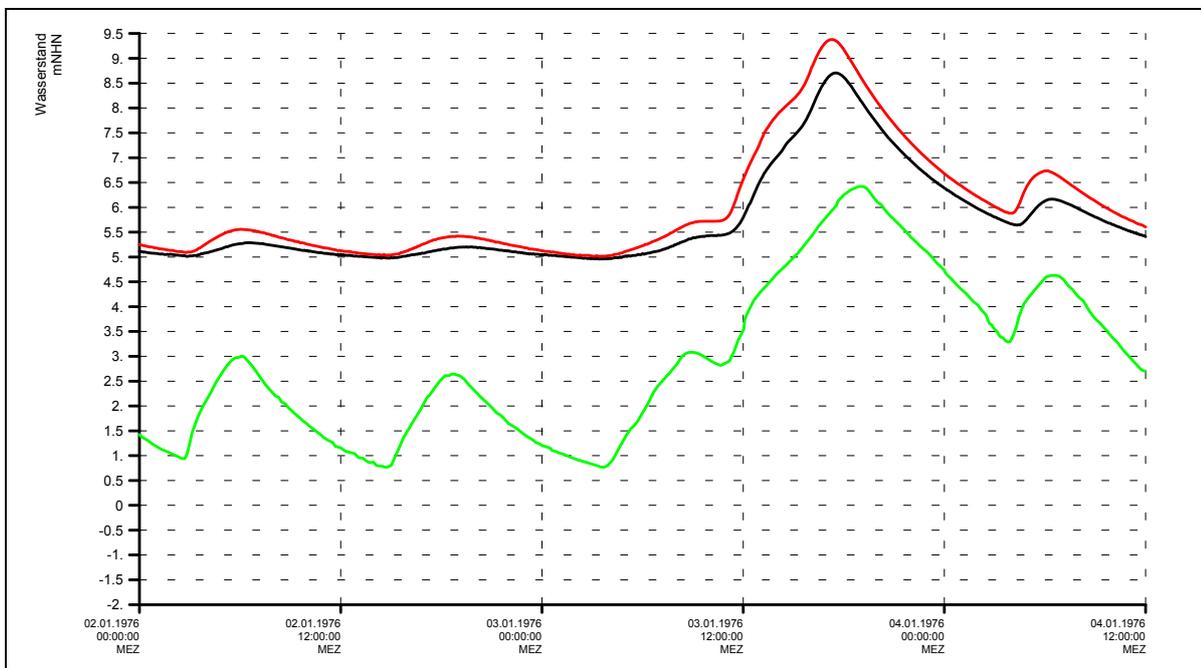


Bild 19: Wehr Geesthacht: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot). Die Wasserstandsmessung während der Sturmflut 3. Januar 1976 grün gekennzeichnet.

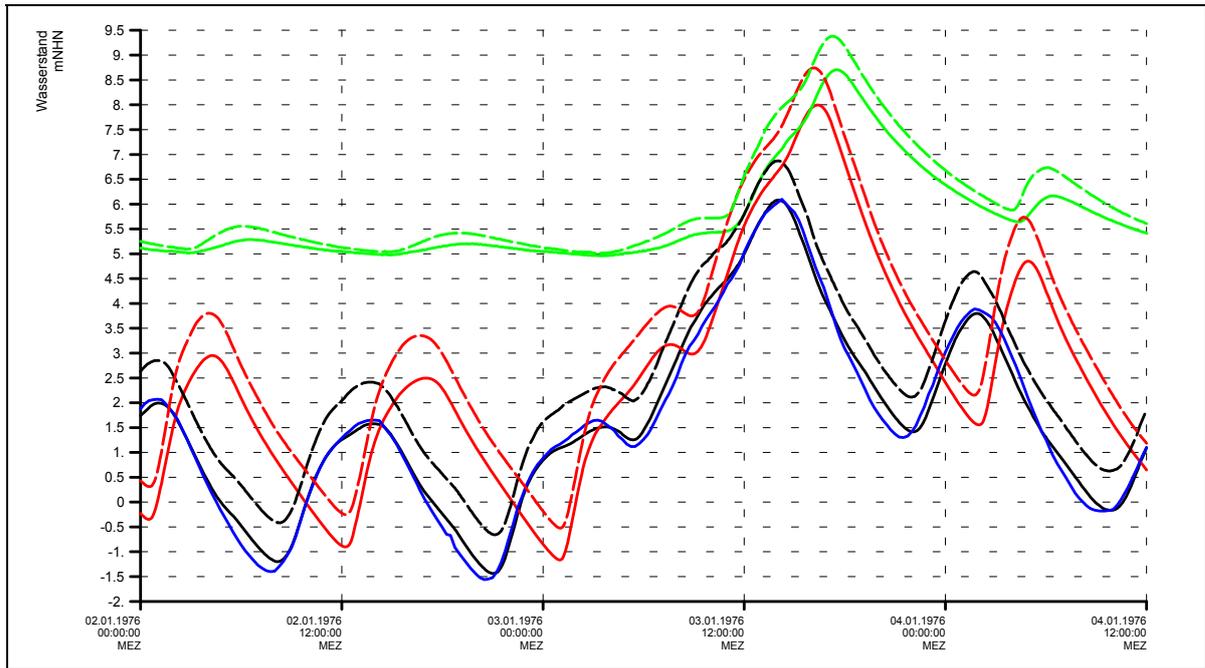


Bild 20: Wasserstandsentwicklung an den Orten Cuxhaven (schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) während der Szenarien HH_XR2010A (durchgezogen) und HH_XR2100A80 (gestrichelt). Die vom LSBG vorgegebene Wasserstandsentwicklung in Cuxhaven ist in Blau eingezeichnet.

5.1.2 Durchflussentwicklung

Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (in schwarz) und HH_XR2100A80 (in Rot) ist beispielhaft der querschnittsgemittelte Wasserstandsverlauf, die querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit und der querschnittsintegrierte Durchfluss entlang der Elbe an den Querprofilen bei Elbe - km 725 (Bild 21), bei Elbe - km 670 (Bild 22), bei Elbe - km 632 (Bild 23), durch die Norderelbe bei Elbe - km 620N (Bild 24), durch die Süderelbe bei Elbe - km 614S (Bild 25) und bei Elbe - km 605 (Bild 26) dargestellt.

Man erkennt bei Elbe - km 725 am Vormittag des 3. Januar, dass der querschnittsgemittelte Flutstrom nicht kentert sondern zwei Flutphasen aufeinander folgen. Auch die Sturmflut vom 3. Januar 1976 zeigte dieses Verhalten (siehe Flügge et al. 2000). Die Ebbe vor der Sturmflut bleibt aus.

Bereits im Bereich des Stromspaltungsgebietes bei Hamburg wird der Einfluss des hohen Oberwasserzuflusses auf die Strömungsgeschwindigkeiten der Vortiden sichtbar. Die Flutphase verkürzt sich und die Ebbephase wird länger (Rudolph, E., 2002). Bei Elbe - km 614S (Bild 25) ist keine Richtungsumkehr der querschnittsgemittelten Strömungsgeschwindigkeit bei Flut sondern lediglich ein Verlangsamen der Strömungsgeschwindigkeit zu erkennen. Für den querschnittsintegrierten Durchfluss ist ein vergleichbares Verhalten zu beobachten.

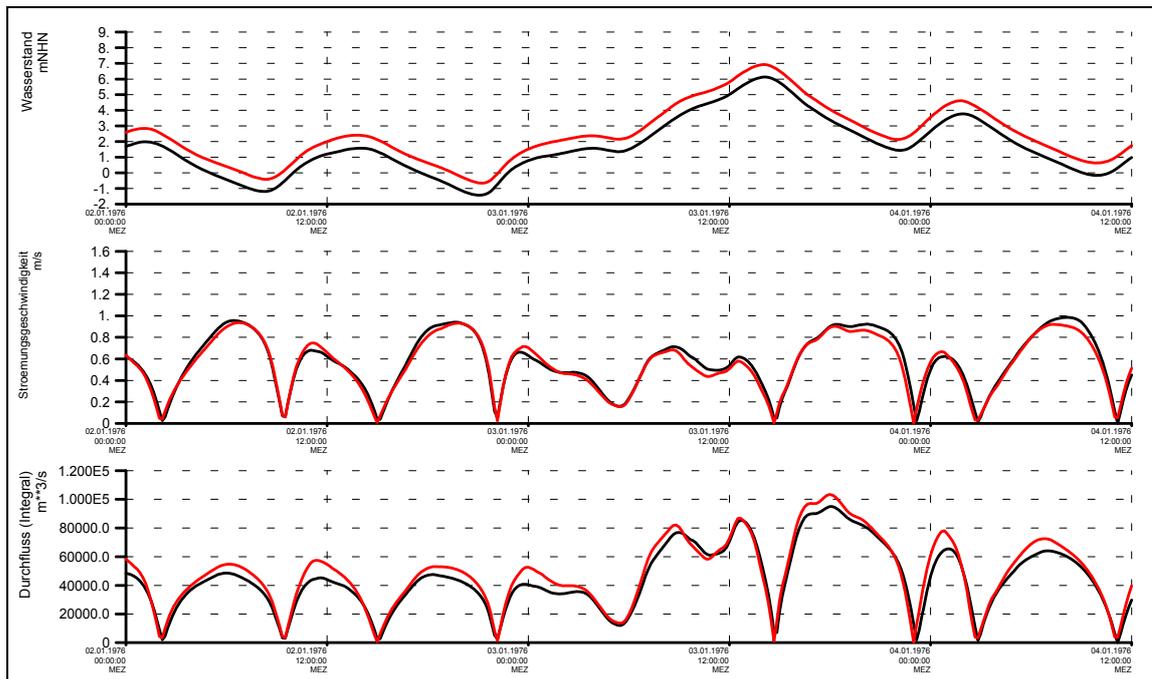


Bild 21: QP Elbe - km 725 (Cuxhaven): Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).

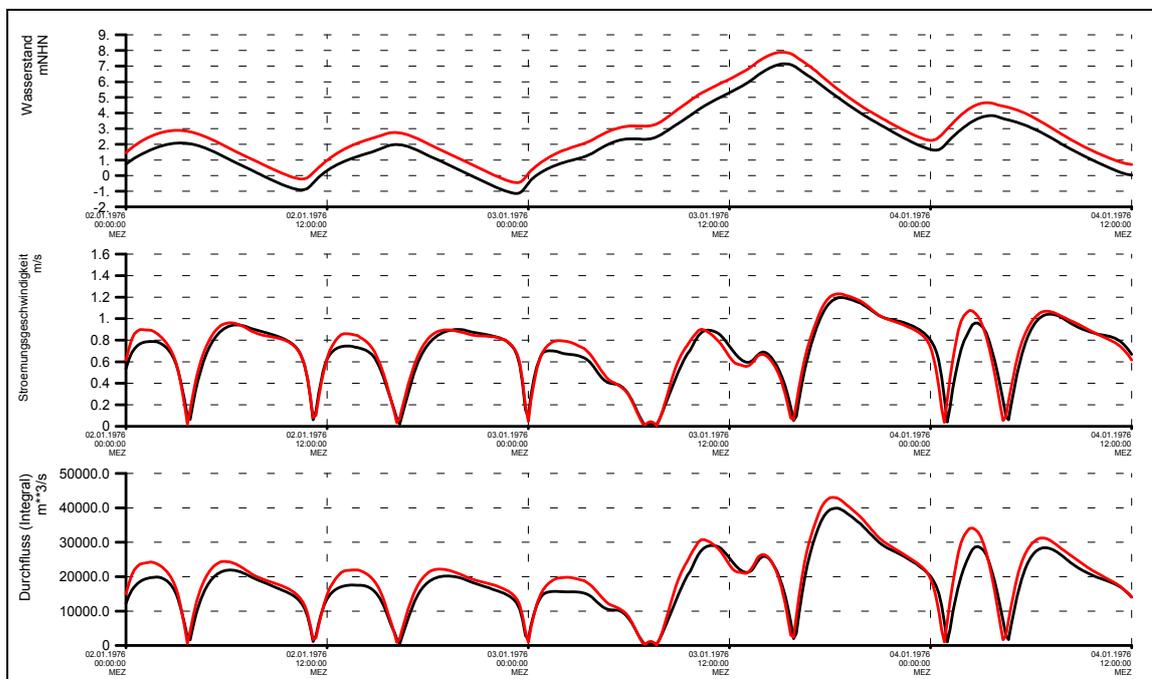


Bild 22: QP Elbe - km 670: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).

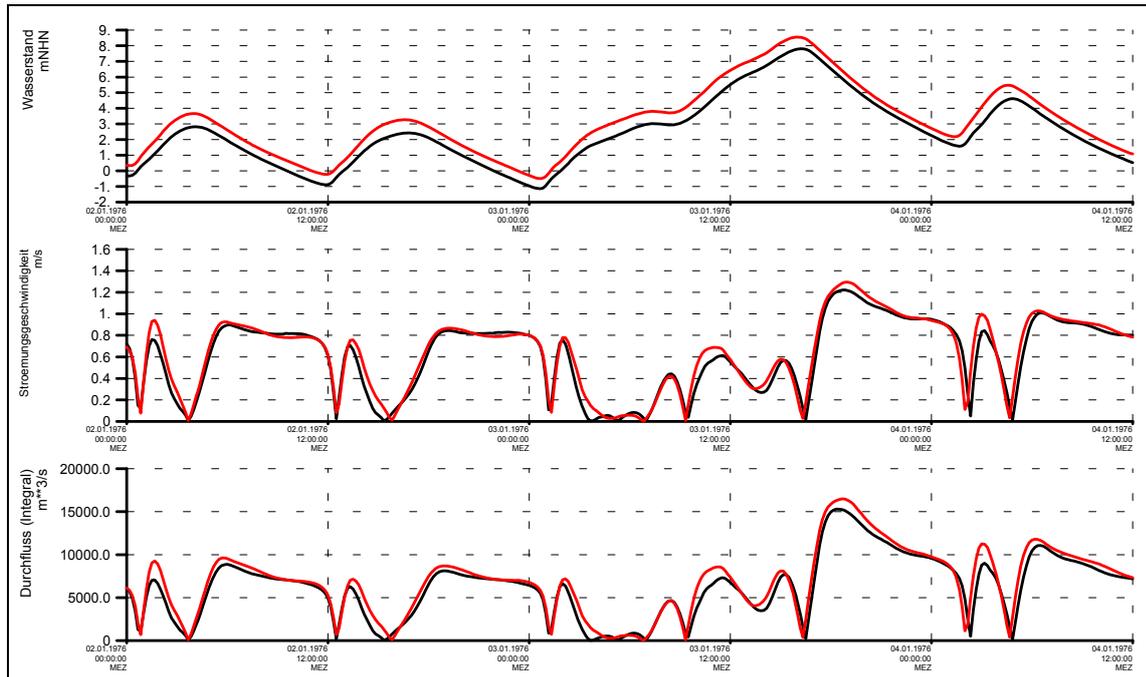


Bild 23: QP Elbe - km 632: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).

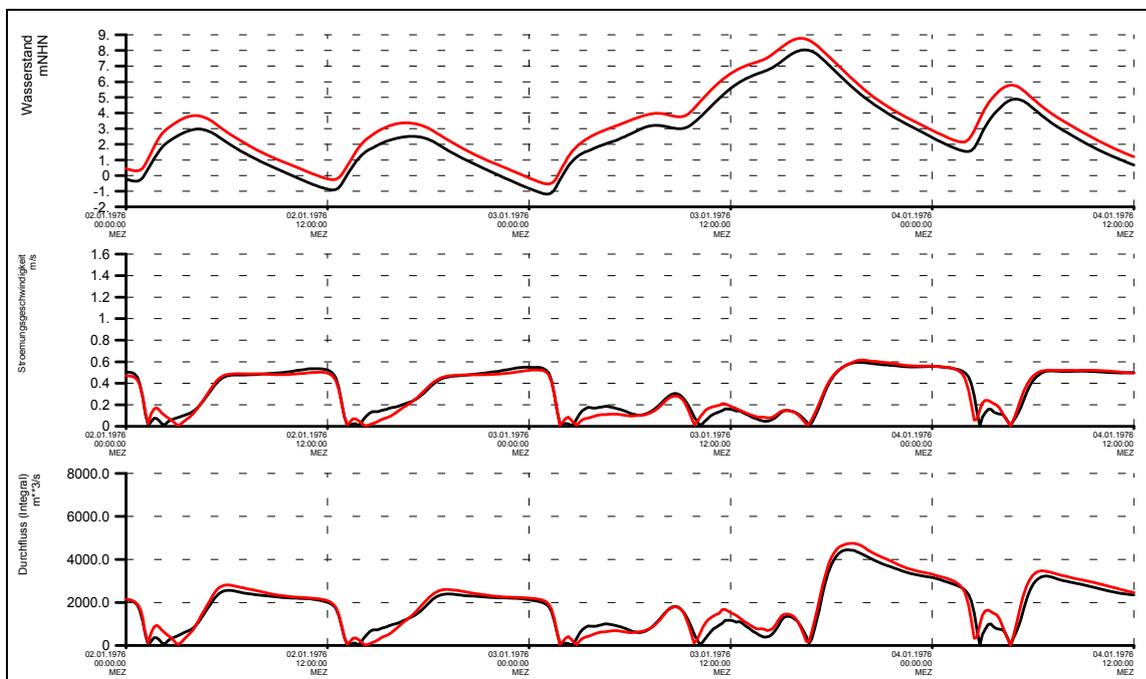


Bild 24: QP Elbe - km 620N: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).

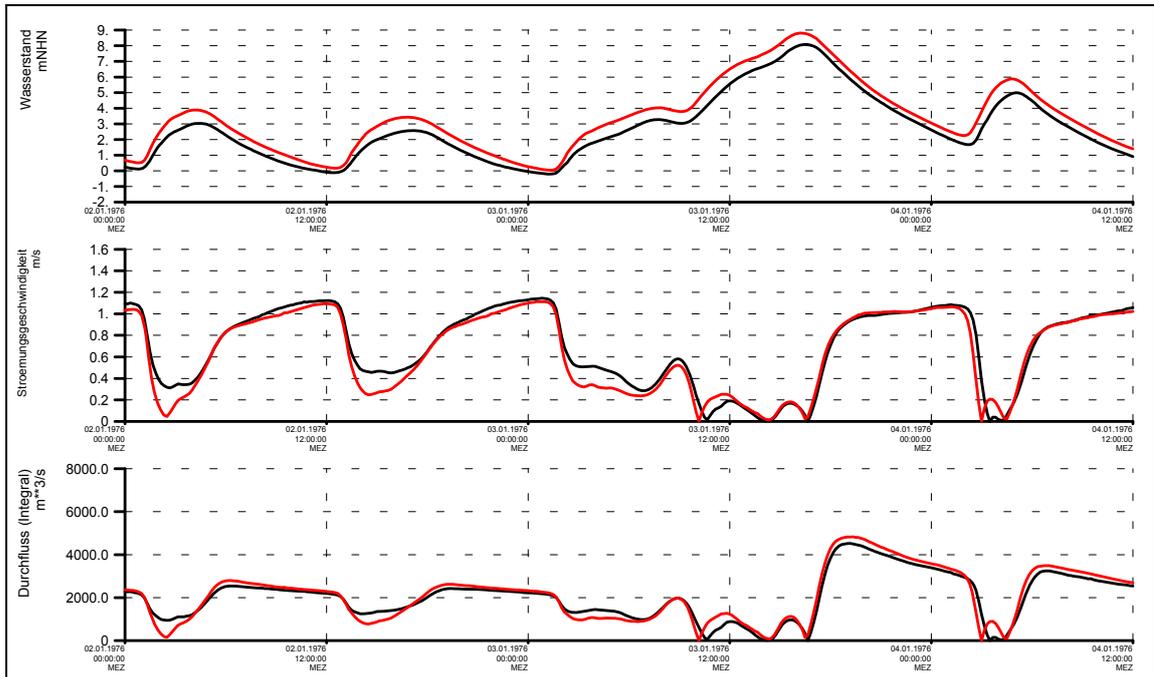


Bild 25: QP Elbe - km 614S: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).

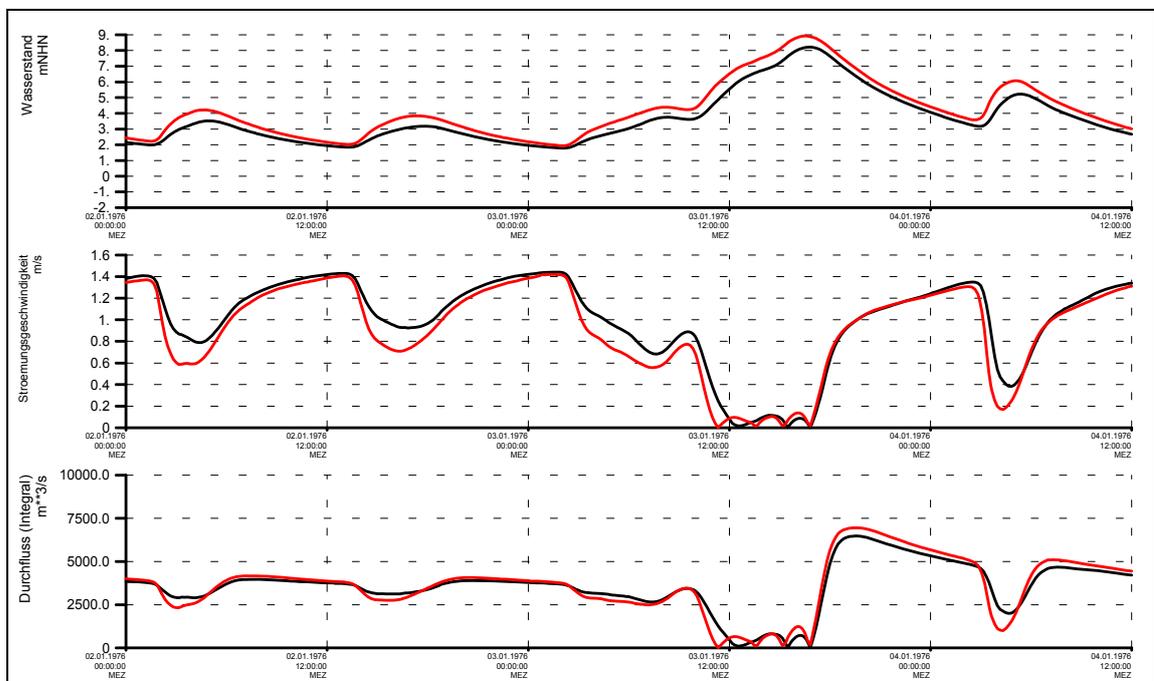


Bild 26: QP Elbe - km 605: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).

5.1.3 Sturmflutscheitelwasserstand

In einer sich der Modellrechnung anschließenden Auswertung (BAW, 2002a) wird aus den Zeitreihen des Wasserstandes der Sturmflutscheitelwasserstand HW im Analysezeitraum (Tabelle 3) bestimmt. Bild 27 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand für die Sturmflut-szenarien HH_XR2010A und HH_XR2100A80 entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Wehr Geesthacht) durch die Norderelbe.

Bild 28 zeigt die flächenhafte Verteilung des Sturmflutscheitelwasserstandes in der Elb-mündung für Szenario HH_XR2010A. Bild 29 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand in der Elbmündung für das Szenario mit einem Meeresspiegelanstieg von + 80 cm in der Deut-schen Bucht HH_XR2100A80. Für den Bereich Hamburg sind die Sturmflutscheitel-wasserstände dieser Szenarien flächenhaft in Bild 30 (HH_XR2010A) und Bild 31 (HH_XR2100A80) dargestellt.

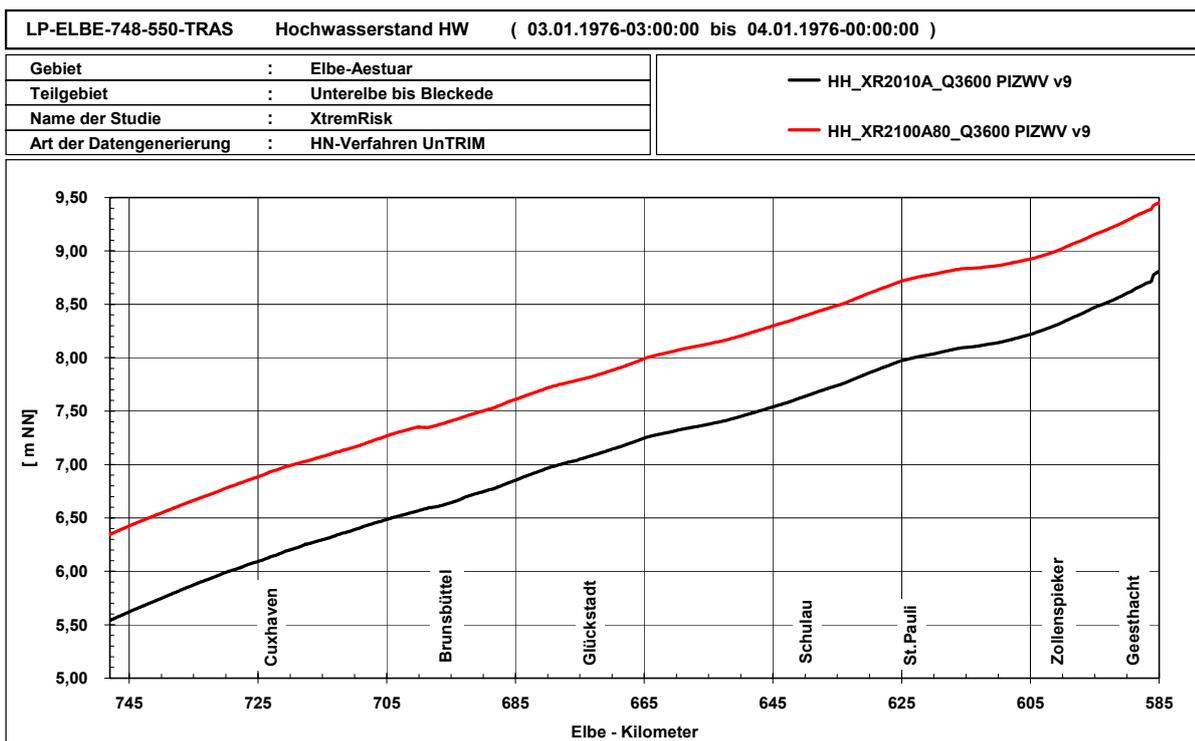


Bild 27: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (schwarz) und HH_XR2100A80 (rot).

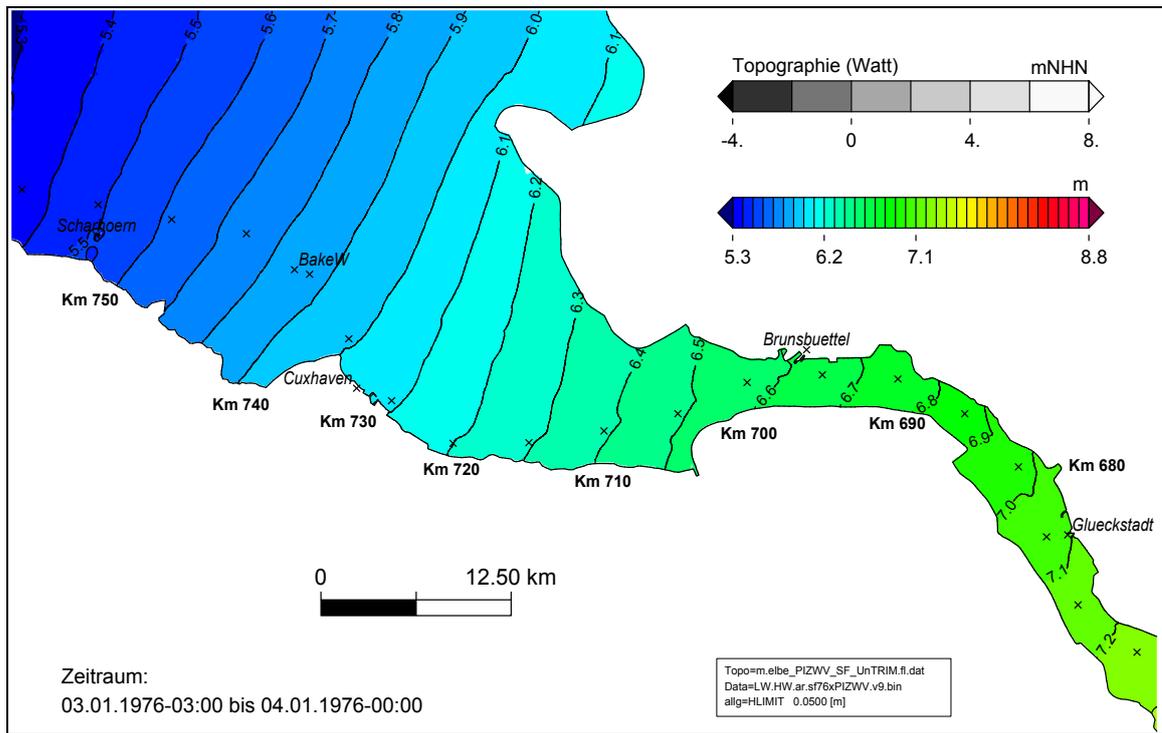


Bild 28: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010A in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

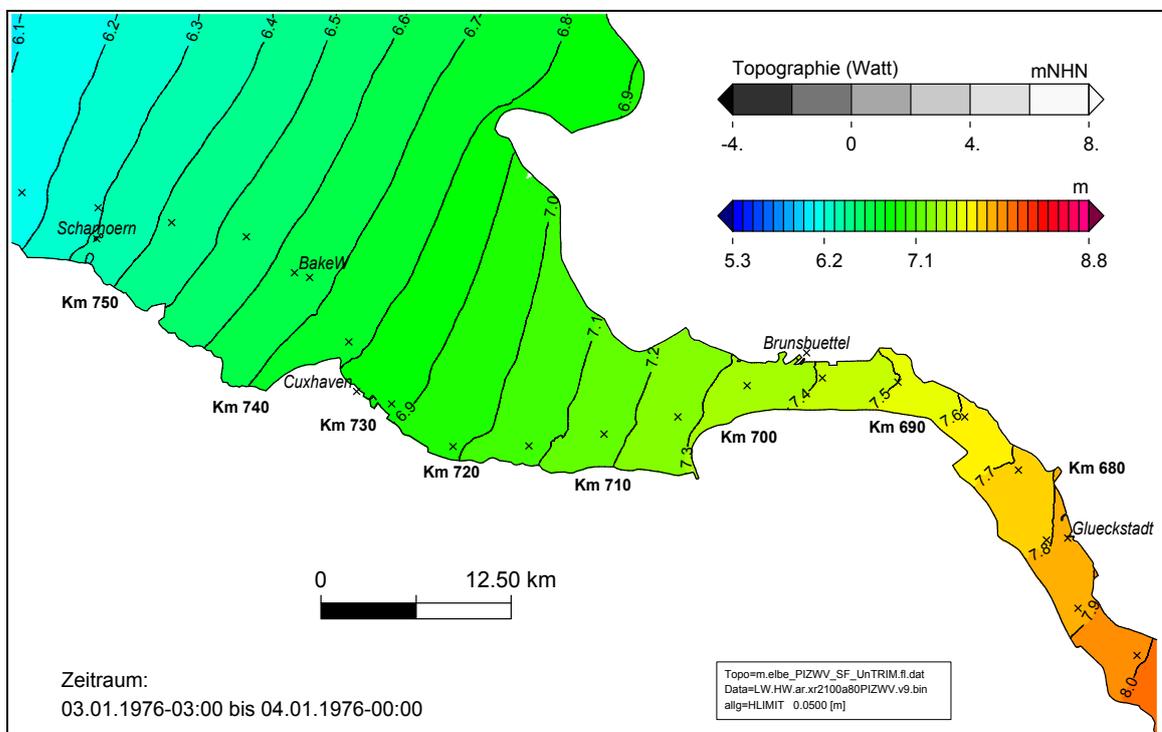


Bild 29: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100A80 in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

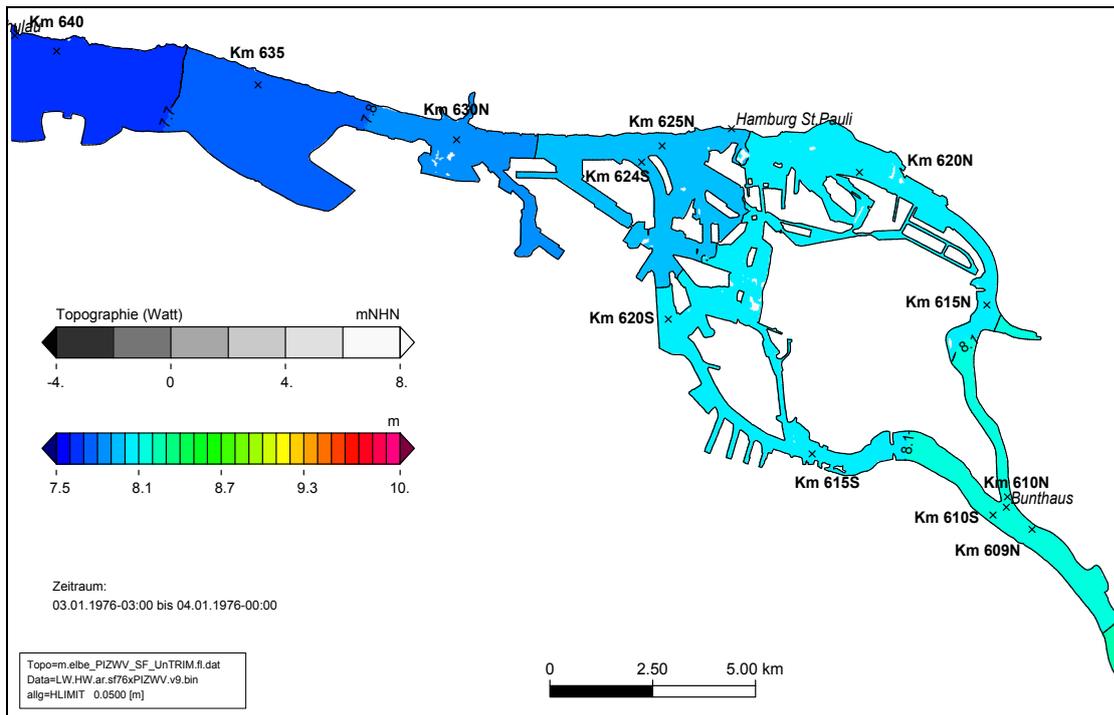


Bild 30: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010A im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

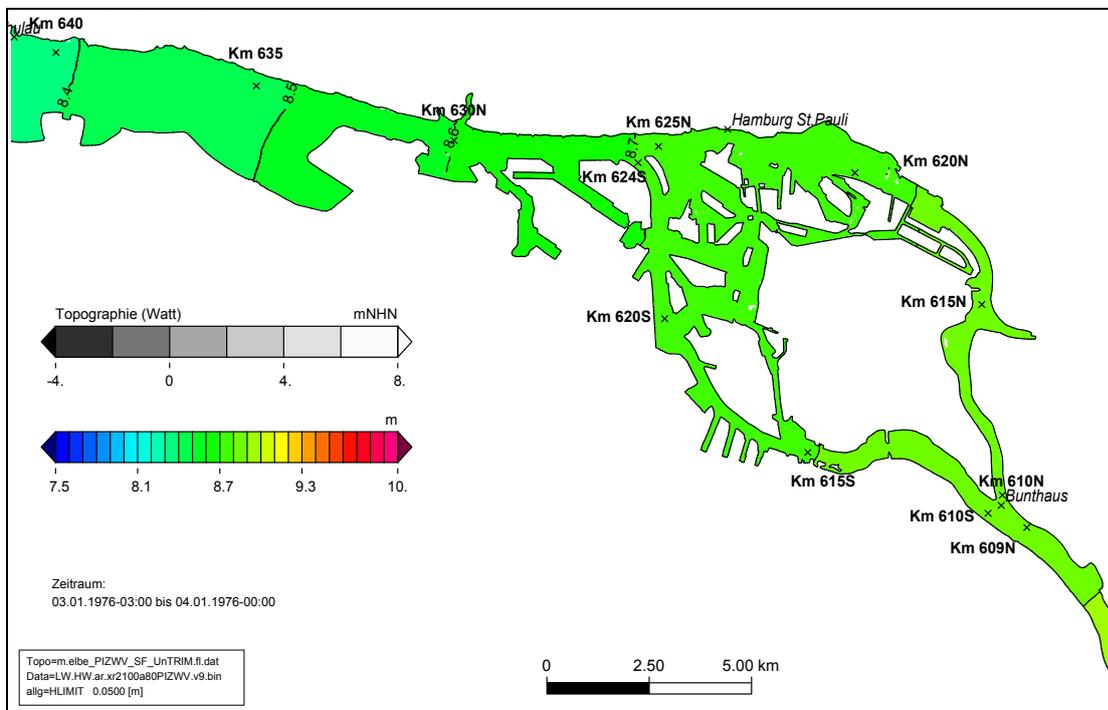


Bild 31: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100A80 im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

5.1.4 Sensitivitätsstudie Salzgehaltsanfangsverteilung

Die räumliche Verteilung des Salzgehaltes im Elbeästuar wird sowohl durch die Oberwasserzuflüsse aus der Mittelelbe als auch durch das Tidegeschehen in der Nordsee beeinflusst. Hoher Oberwasserzufluss aus der Mittelelbe führt zu niedrigen Salzgehalten entlang der Tideelbe. Hierbei ist auch die Dauer des Abflussereignisses von Bedeutung. Für die im Rahmen von XtremRisk betrachteten Sturmflutszenarien wird keine Vorgeschichte des Oberwasserzuflusses festgelegt. In Absprache mit dem LSBG wird angenommen, dass während der Sturmflutszenarien auf dem offenen Rand zur Nordsee ein Salzgehalt von 30 PSU vorliegt. Die in den Modellläufen verwendete Salzgehaltsverteilung zu Beginn der Simulationszeiträume ist in Bild 76 dargestellt.

Da der Salzgehalt die Dichte des Wassers beeinflusst, beeinflusst der Salzgehalt auch die Wasserstandsverteilung entlang der Tideelbe. Es wird deshalb beispielhaft für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A und HH_XR2100A80 untersucht, welchen Einfluss ein veränderter Salzgehalt im Elbmündungsgebiet auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Tideelbe hat. Es wird von einem Salzgehalt von 25 PSU am Modellrand ausgegangen und die in Bild 77 dargestellten Salzverteilungen zu Beginn des Simulationszeitraumes verwendet.

Bild 32 zeigt die für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A und HH_XR2100A80 sowie HH_XR2010A_S25 und HH_XR2100A80_S25 berechneten Sturmflutscheitelwasserstände. Es ergeben sich kleine Unterschiede im Sturmflutscheitelwasserstand aufgrund des gewählten Salz Szenarios stromauf von Glückstadt. In Hamburg St. Pauli z. B. liegen die Sturmflutscheitelwasserstände ca. 5 cm niedriger in den Szenarien mit niedrigerem Salzgehalt.

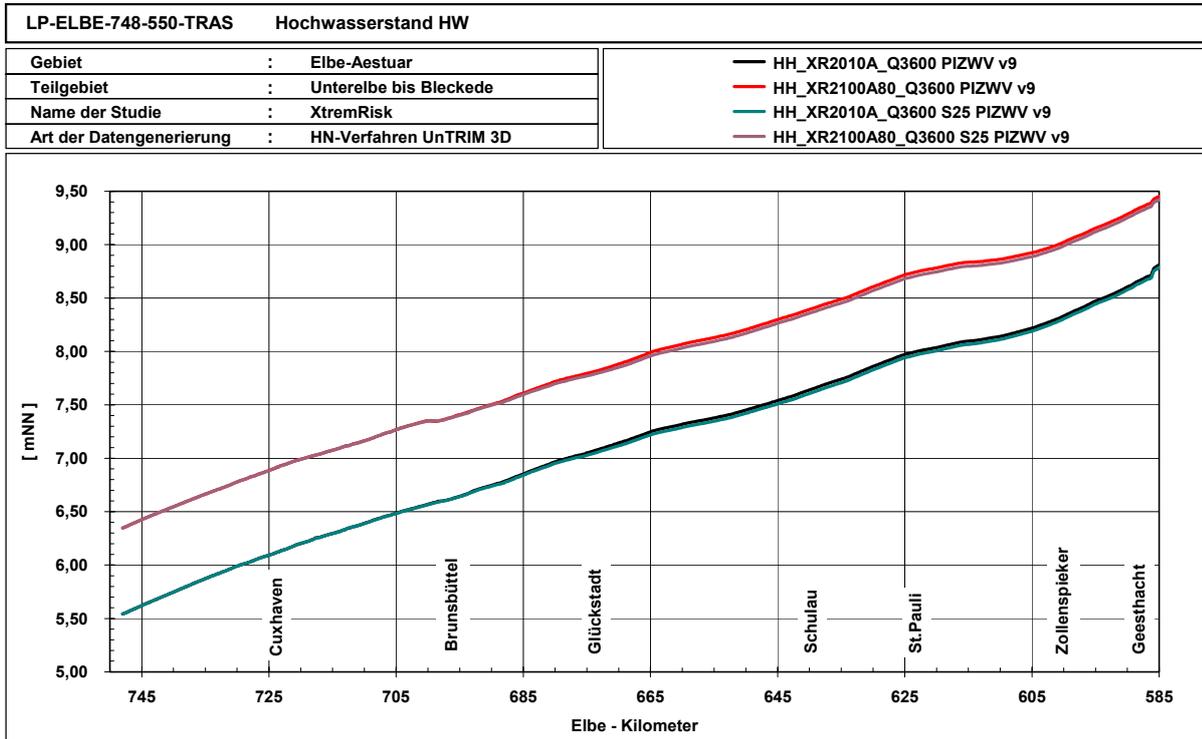


Bild 32: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (schwarz), HH_XR2010A_S25 (grau), HH_XR2100A80 (rot) und HH_XR2100A80_S25 (rosa).

5.1.5 Sensitivitätsstudie Oberwasserzufluss

Um den Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien HH_XR2010A und HH_XR2100A80 entlang der Tideelbe abzuschätzen, werden die Sturmflutszenarien zusätzlich mit einem veränderten Abfluss modelliert. Hierfür wird der Oberwasserzufluss jeweils auf 2200 m³/s, den Abfluss der Bemessungsturmflut 2085A (Siefert, W., 1998), gesenkt. Eine Einordnung der gewählten Abflüsse ermöglicht Tabelle 2.

Bild 33 zeigt die Sturmflutscheitelwasserstände für die betrachteten Sturmflutszenarien entlang des Elbefahrwassers zwischen der Elbmündung (Elbe - km 748) und Geesthacht. Im Mündungsbereich werden die Sturmflutscheitelwasserstände nur geringfügig durch den veränderten Oberwasserzufluss verändert. Im Bereich zwischen Brunsbüttel und Hamburg St. Pauli sinkt der Sturmflutscheitelwasserstand durch die Abnahme des Oberwasserzuflusses um einige Zentimeter an. Stromauf von Hamburg senkt sich der Sturmflutscheitelwasserstand bei dem hier betrachteten Abflussszenario um einige Dezimeter. Auf diesen Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Elbe weisen auch Siefert, W., 1998 oder Rudolph, E., 2005 hin.

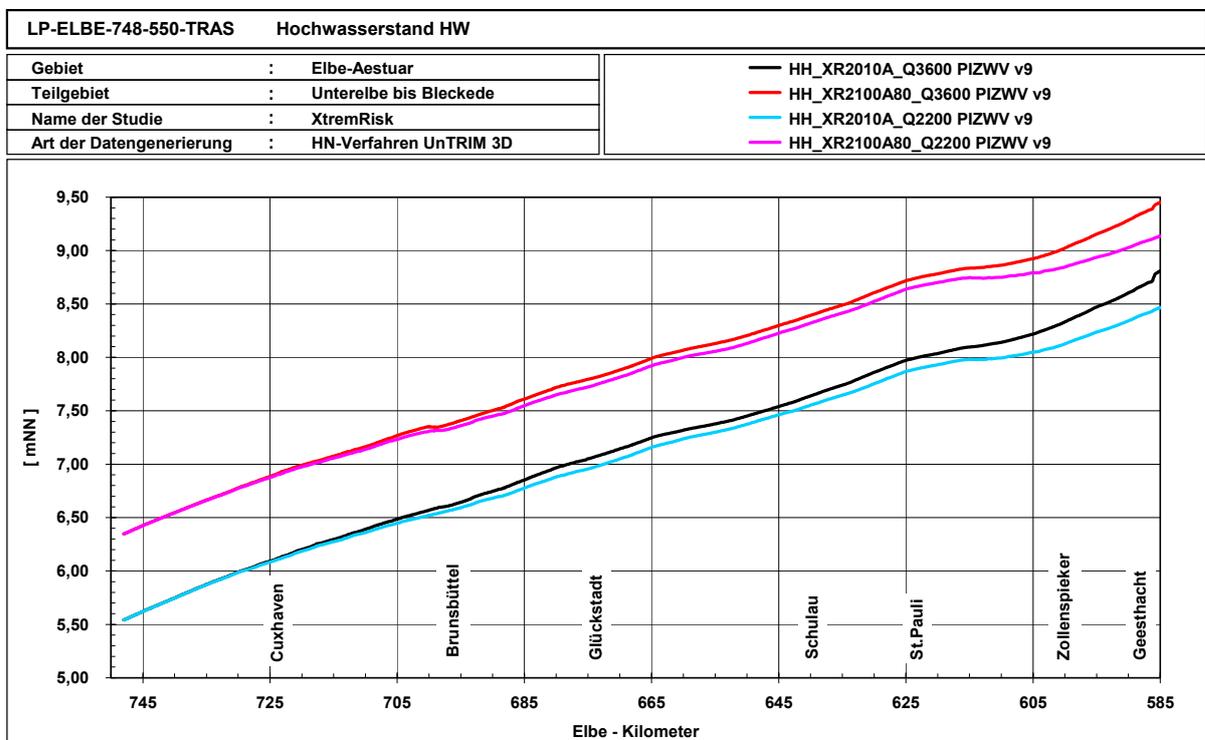


Bild 33: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (schwarz), HH_XR2010A_Q2200 (hellblau), HH_XR2100A80 (rot) und HH_XR2100A80_Q2200 (pink).

5.2 HH_XR2010B

5.2.1 Wasserstandentwicklung

Für das Sturmflutszenario HH_XR2010B ist beispielhaft der mit dem Elbmodell der BAW modellierte Wasserstandsverlauf entlang der Elbe an den Orten Cuxhaven (Elbe - km 725, Bild 34), Brunsbüttel (Elbe - km 696, Bild 35), Stadersand (Elbe - km 655, Bild 36) Hamburg St. Pauli (Elbe - km 623 N, Bild 37), Bunthaus (Elbe - km 609 N, Bild 38) und Geesthacht (Elbe - km 585, Bild 39) dargestellt. Für Cuxhaven (Bild 34) ist außerdem der vom Nordseemodell des BSH für die MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 (Bork, I. und Müller - Navarra, S., 2005) berechnete Wasserstandsverlauf eingetragen.

Bei Cuxhaven (Bild 34) werden im Analysezeitraum (Tabelle 3) drei Tidehochwasser mit einer Höhe von ca. 5,00 m erreicht. Im Bereich von Hamburg St. Pauli erreichen die drei Thw des Kettensturmflutszenarios HH_XR2010B Sturmflutscheitelwasserstände höher als NN + 6,50. Die Tideniedrigwasser Tnw liegen im Analysezeitraum stets über NN, im Sturmflutzeitraum höher als NN + 2,50 m.

Entwässerungssysteme und Siele ohne Pumpen sind auf Wasserstandsgefälle angewiesen, Hafenanlagen können bei sehr hohen Wasserständen nicht verwendet werden (Rudolph, E. et al., 2012). Betrachtet man beispielhaft im 42 - stündigen Analysezeitraum (Tabelle 3) die Dauer von Wasserständen DHW höher als NN + 3,00 m (Bild 41), so erkennt man, dass diese in Cuxhaven 25,5 Stunden und in Hamburg St. Pauli 29,5 Stunden beträgt. Weiter stromauf in Bunthaus wird der Einfluss des sehr hohen Abflusses auf die Wasserstände größer. Wasserstände höher als NN + 3,00 m werden im Analysezeitraum 34 Stunden (Bild 38) lang erreicht. Stromauf von Zollenspieker werden Wasserstände höher als NN + 3,00 m im gesamten Analysezeitraum erreicht.

Bild 40 zeigt den Wasserstandsverlauf an den Orten Cuxhaven (schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) für das Sturmflutszenario HH_XR2010B.

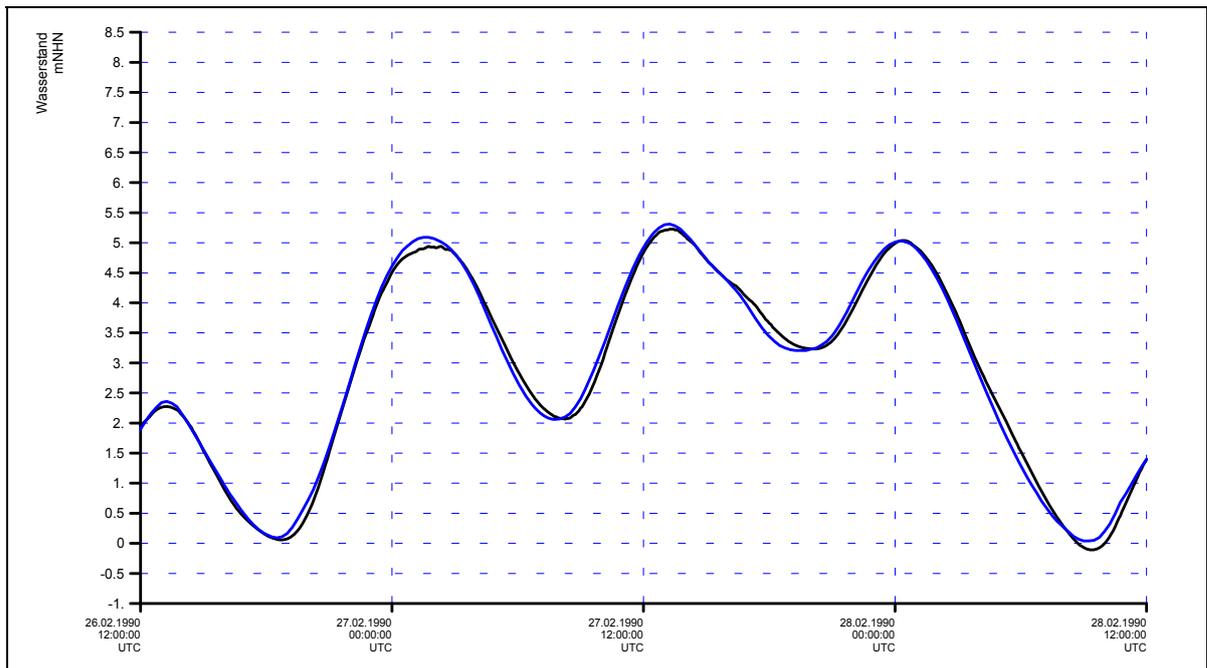


Bild 34: Cuxhaven: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz). Die Wasserstandsentwicklung MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 aus dem BSH - Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.

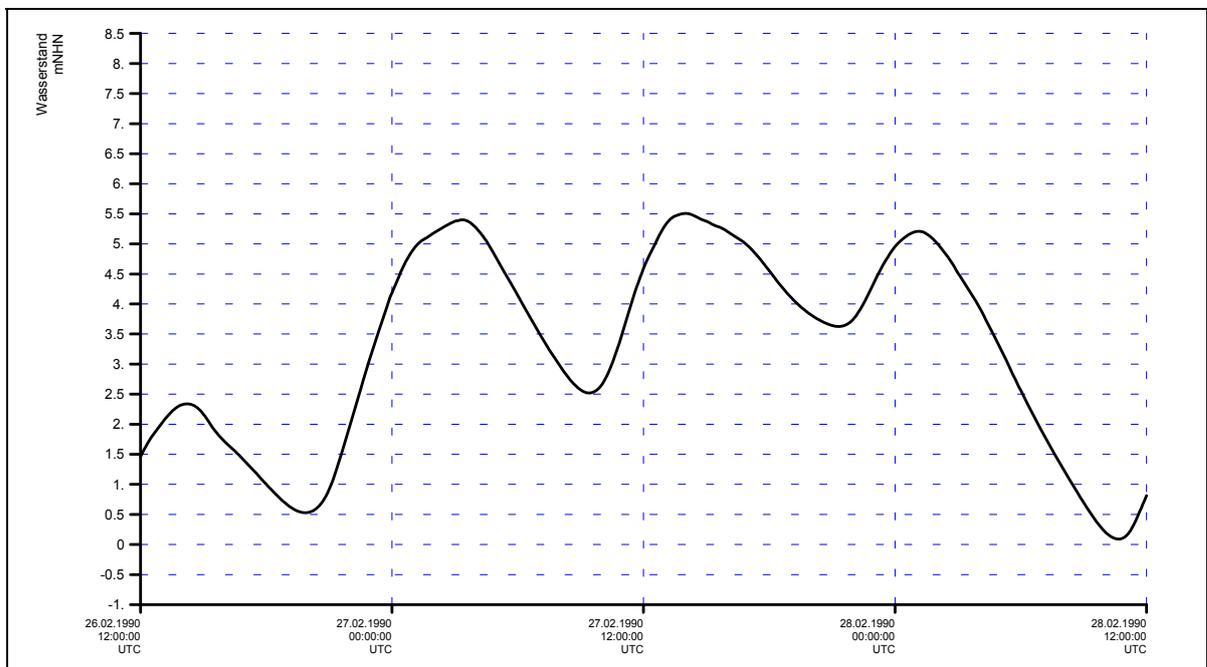


Bild 35: Brunsbüttel: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).

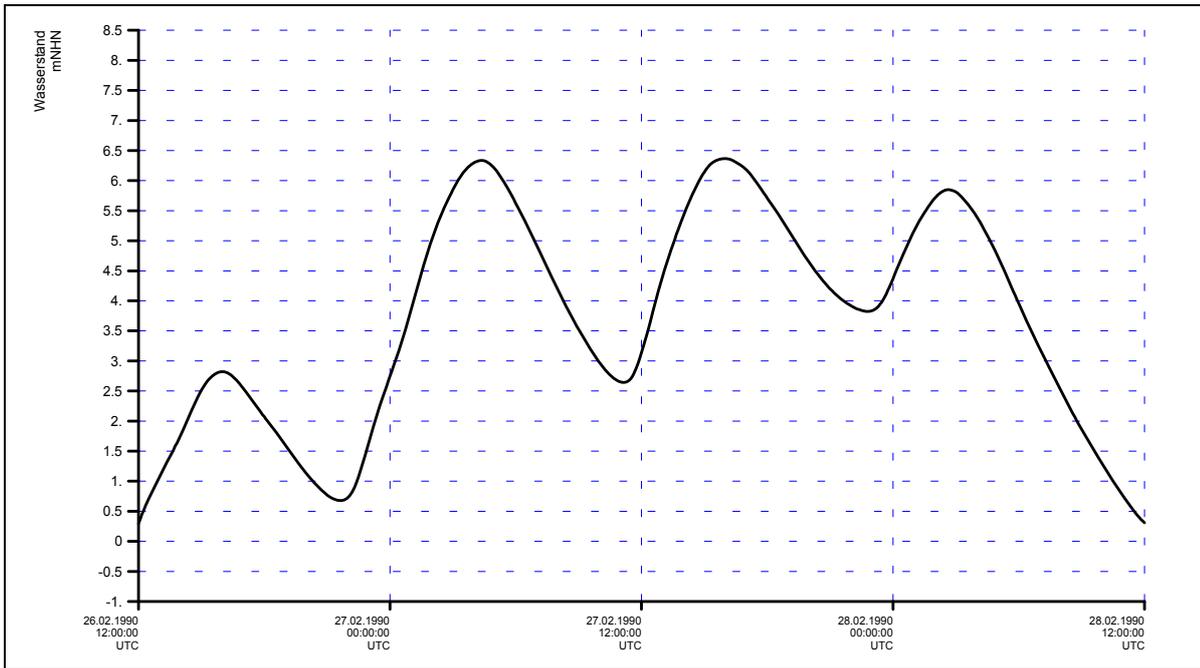


Bild 36: Stadersand: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).

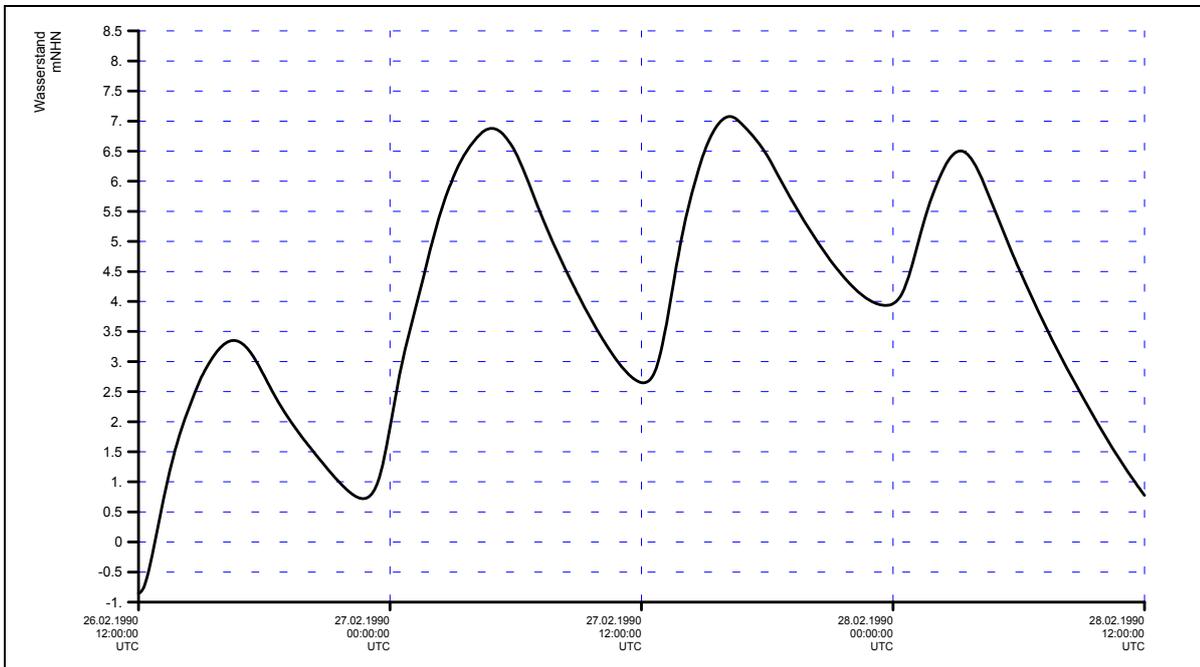


Bild 37: Hamburg St. Pauli: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).

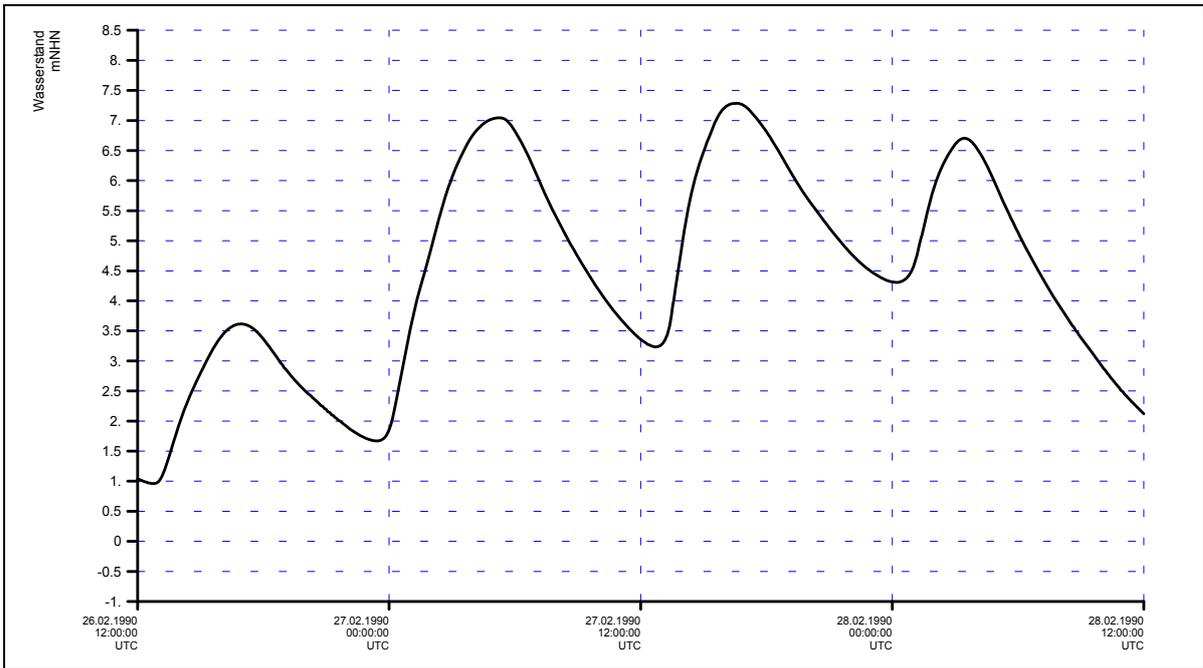


Bild 38: Bunthaus: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).

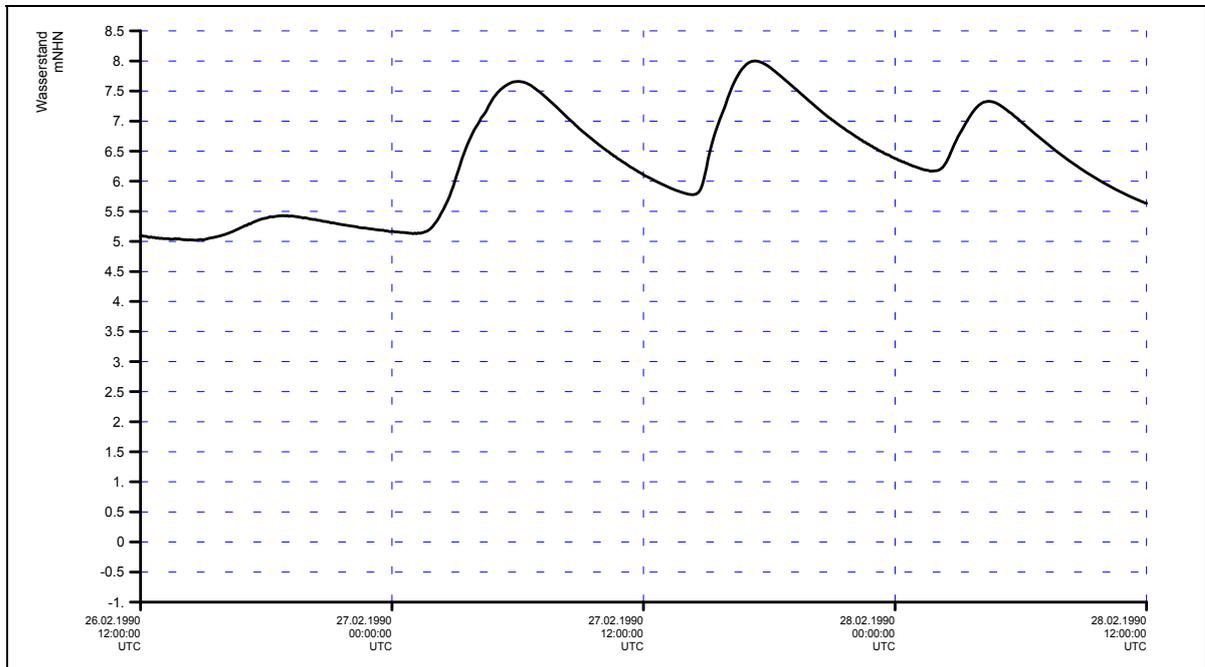


Bild 39: Wehr Geesthacht: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010B (schwarz).

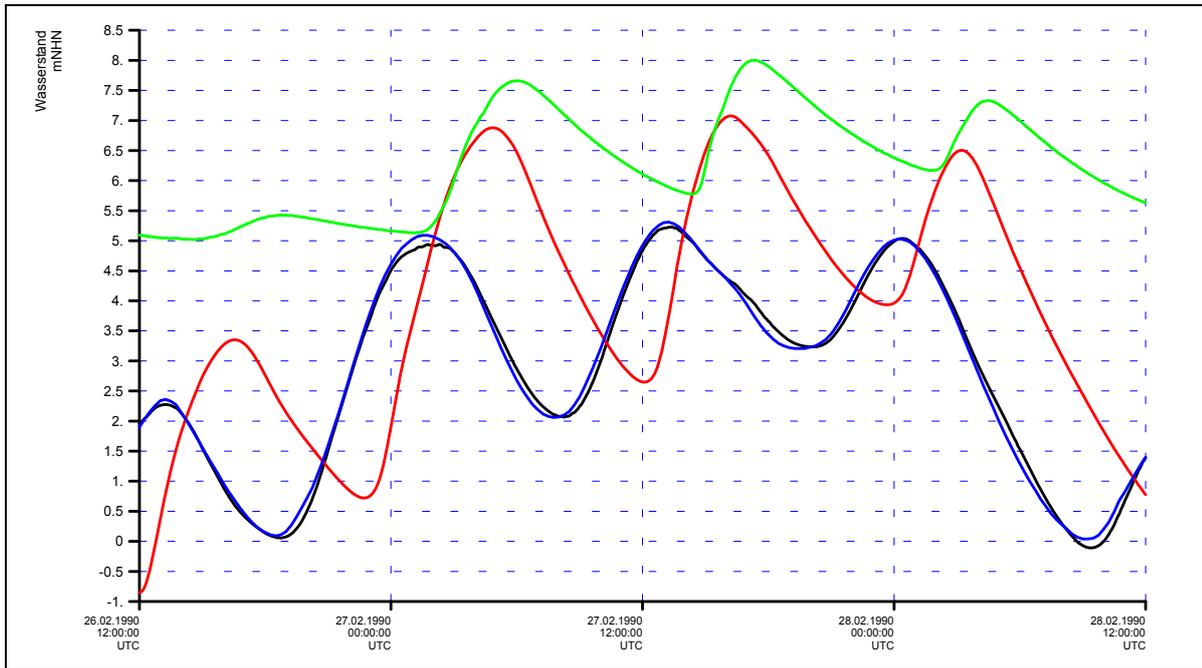


Bild 40: Wasserstandsentwicklung an den Orten Cuxhaven(schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) während des Szenarios HH_XR2010B. Die Wasserstandsentwicklung MUSE Sturmflut 1990 EPS 20 aus dem BSH - Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.

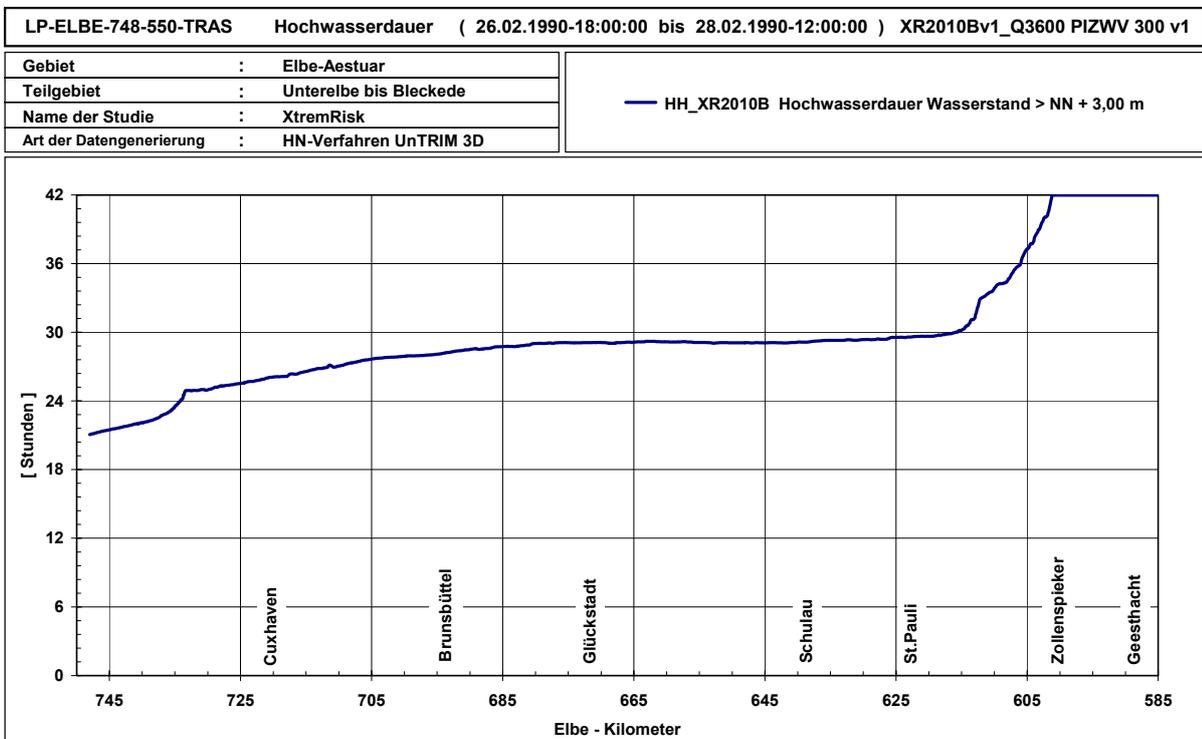


Bild 41: Dauer hoher Wasserstände > NN + 3,00 m im Analysezeitraum (42 Stunden) für HH_XR2010B entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht).

5.2.2 Durchflussentwicklung

Für das Sturmflutszenario HH_XR2010B ist beispielhaft der querschnittsgemittelte Wasserstandsverlauf, die querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit und der querschnittsintegrierte Durchfluss entlang der Elbe an den Querprofilen bei Elbe - km 725 (Bild 42), bei Elbe - km 670 (Bild 43), bei Elbe - km 632 (Bild 44), durch die Norderelbe bei Elbe - km 620N (Bild 45), durch die Süderelbe bei Elbe - km 614S (Bild 46) und bei Elbe - km 605 (Bild 47) dargestellt.

Man erkennt bei Elbe - km 725 (Bild 42), dass der Verlauf von Strömung und Durchfluss im Analysezeitraum dem Verlauf einer mittleren Tide gleicht und lediglich die Wasserstände (Thw und Tnw) deutlich erhöht sind.

Im Bereich des Stromspaltungsgebietes bei Hamburg wird der Einfluss des hohen Abflusses auf die Strömungsgeschwindigkeiten sichtbar. Die Flutphase verkürzt sich und die Ebbe-phase wird länger (Rudolph, E., 2002). Im Gegensatz zu Sturmflutszenario HH_XR2010A ist hier jedoch weiterhin die Kenterung der Strömung sowohl bei der Vortide als auch im Sturmflutzeitraum zu beobachten.

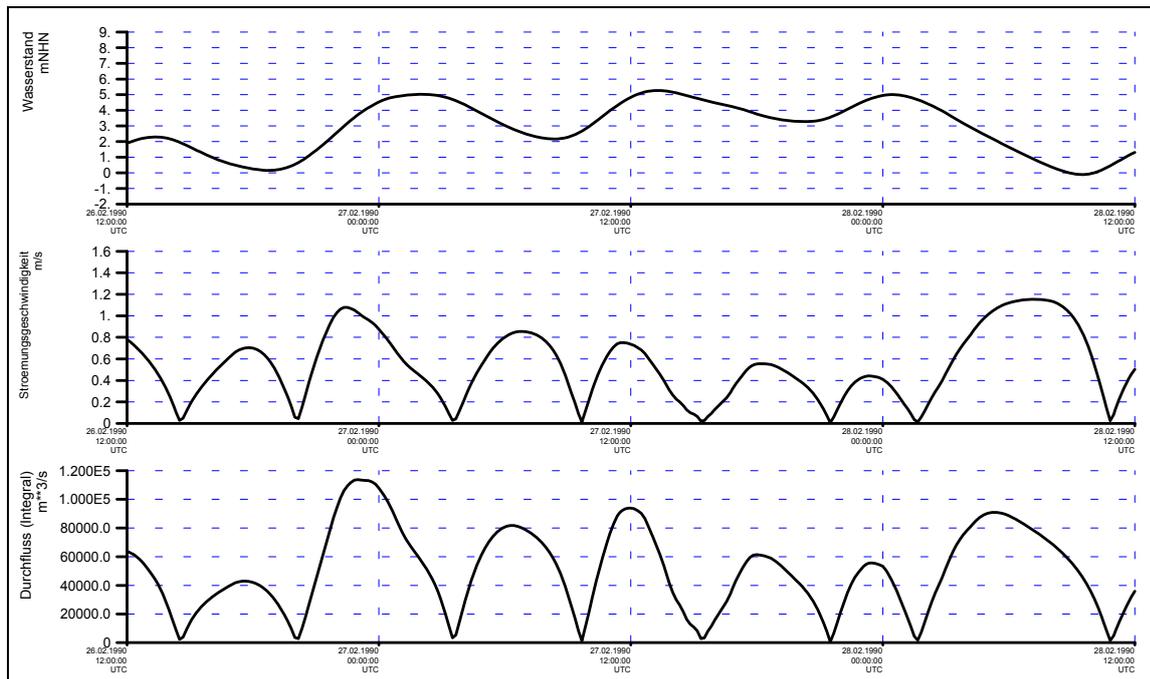


Bild 42: QP Elbe - km 725 (Cuxhaven): Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).

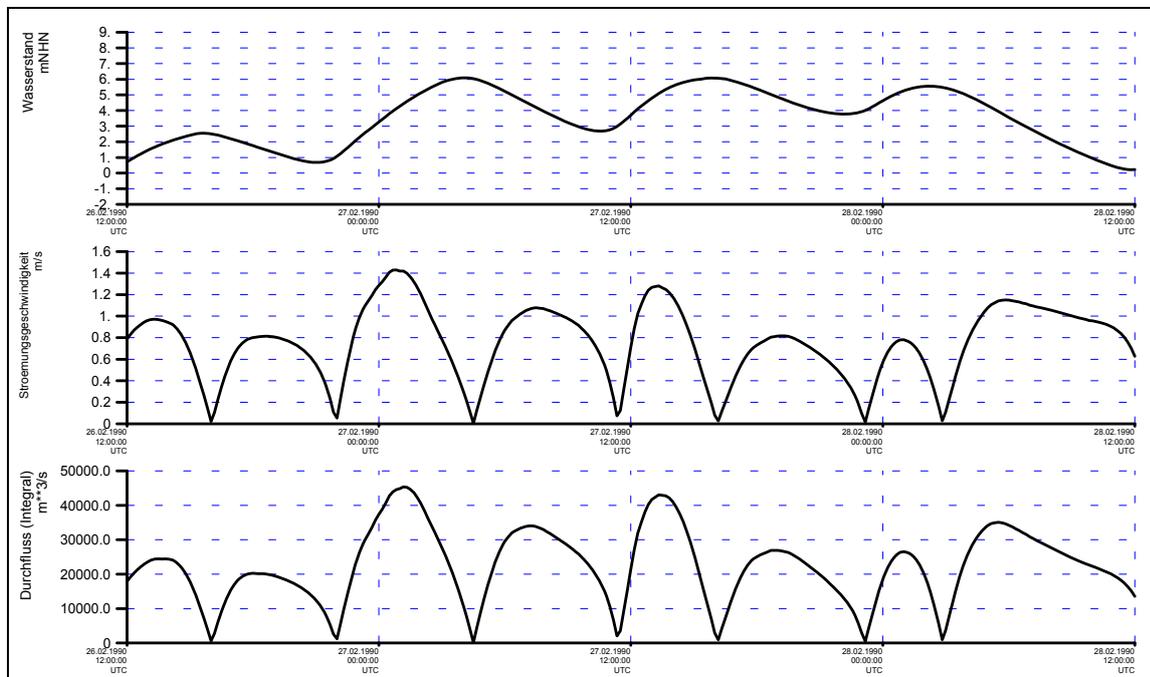


Bild 43: QP Elbe - km 670: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).

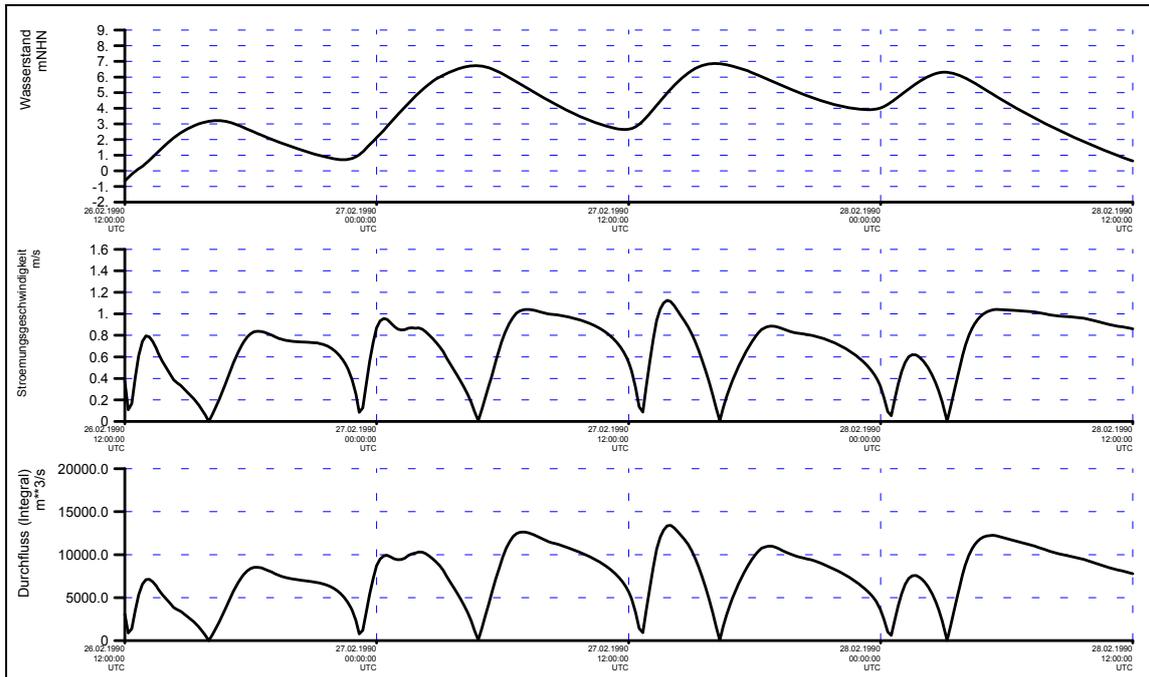


Bild 44: QP Elbe - km 632: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).

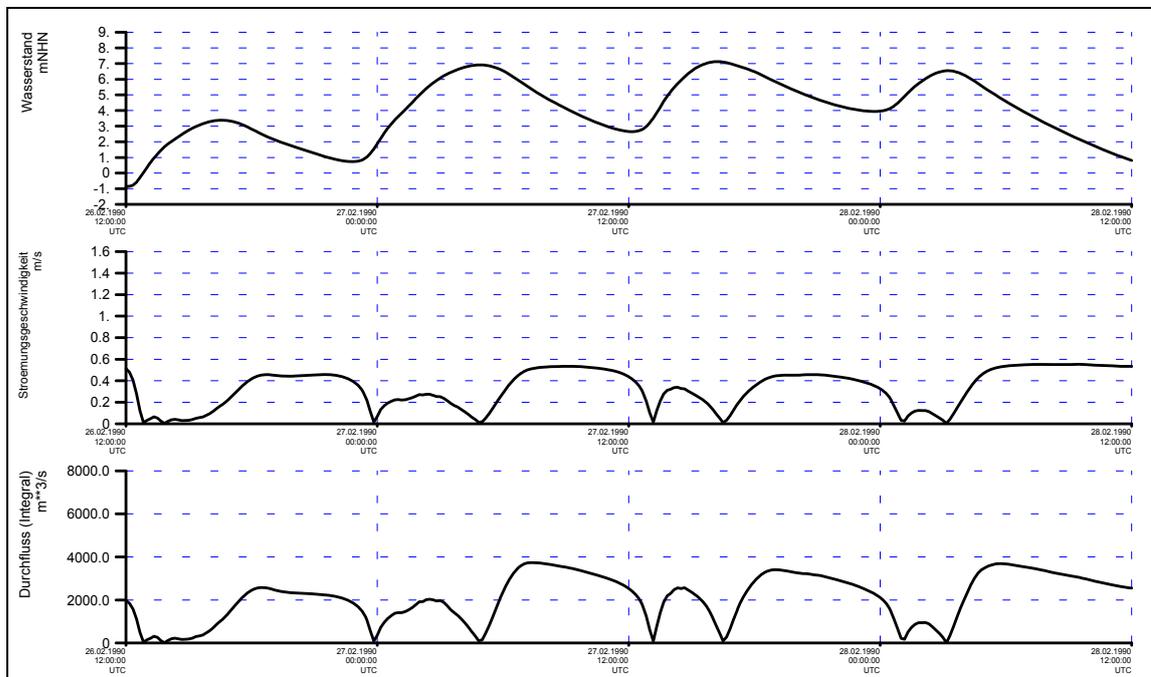


Bild 45: QP Elbe - km 620N: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).

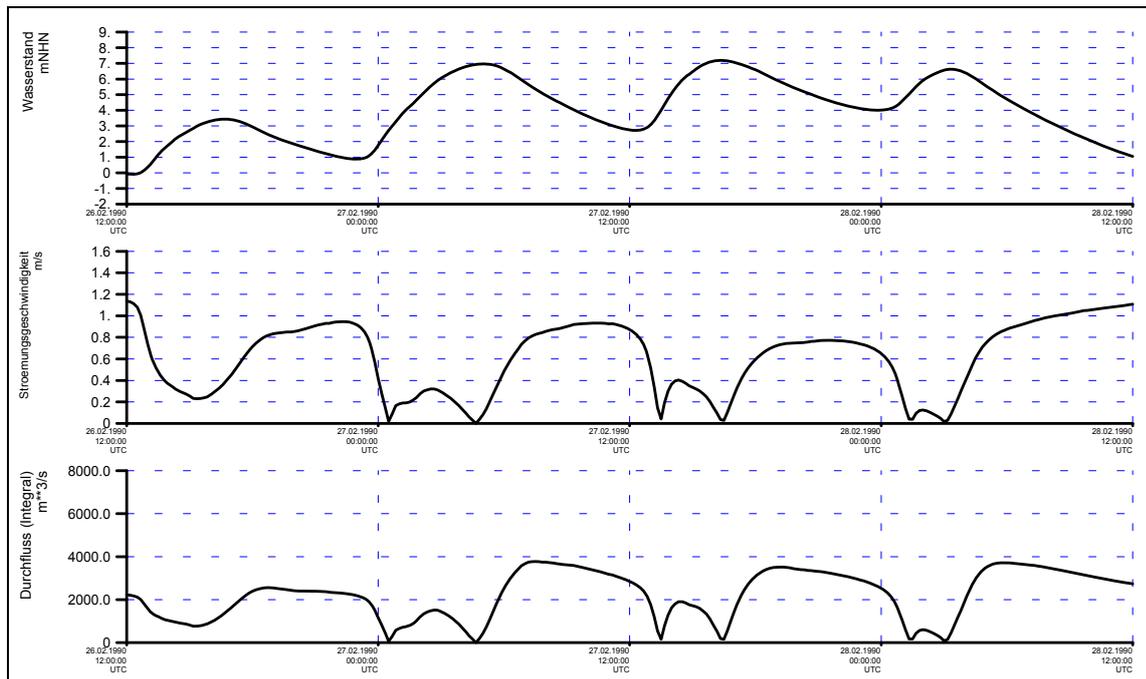


Bild 46: QP Elbe - km 614S: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).

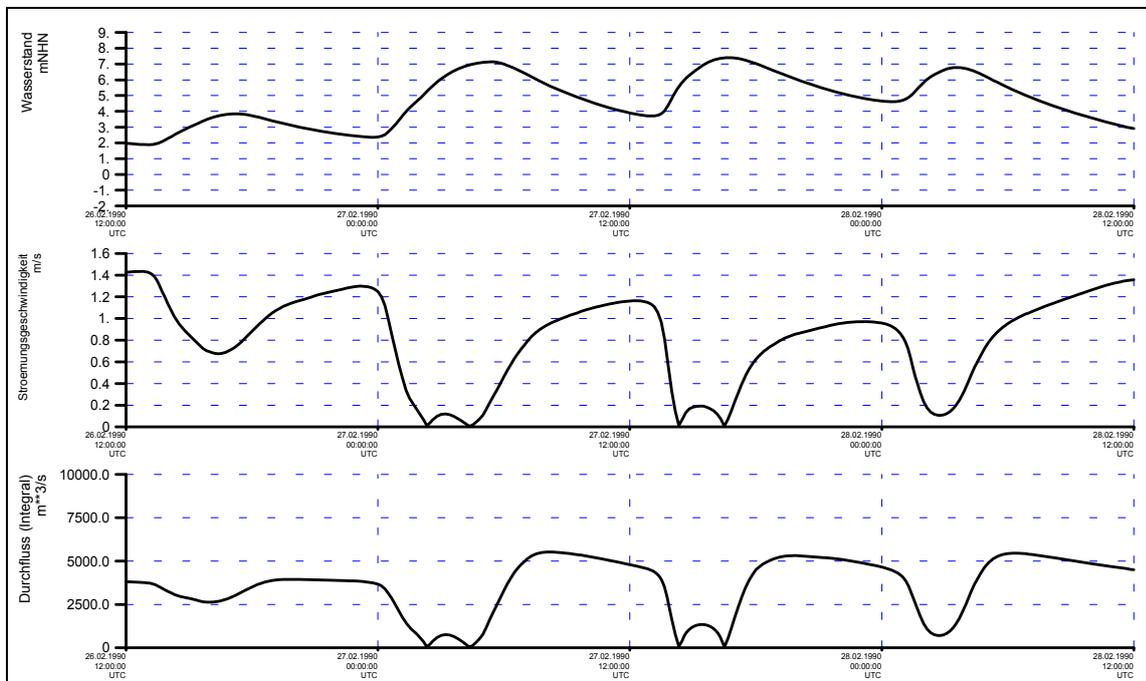


Bild 47: QP Elbe - km 605: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010B (schwarz).

5.2.3 Sturmflutscheitelwasserstand

In einer sich der Modellrechnung anschließenden Auswertung (BAW, 2002a) wird aus den Zeitreihen des Wasserstandes der Sturmflutscheitelwasserstand HW (Tabelle 3) als höchster im Analysezeitraum aufgetretener Wasserstand bestimmt. Bild 48 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand in Blau für die Sturmflutszenario HH_XR2010B entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Wehr Geesthacht) durch die Norderelbe. Zusätzlich wird für diesen Analysezeitraum eine Tidekennwertanalyse (BAW, 2002b) durchgeführt und die Höhe der drei auftretenden Tidehochwasser Thw bestimmt. Die Höhe dieser drei Thw entlang des Elbefahrwassers ist ebenfalls in Bild 48 in Schwarz, in Rot und in Grün eingetragen. Zur besseren Unterscheidung ist in der Legende die Eintrittszeit des Thw bei Elbe - km 748 angegeben. Der Vergleich der drei Tidehochwasser Thw mit dem Sturmflutscheitelwasserstand HW ermöglicht die Zuordnung, durch welches Thw der Sturmflut - Kettentiden in welchem Elbeabschnitt der Sturmflutscheitelwasserstand erzeugt wird. Überwiegend erzeugt Thw_27.2._12:48 das HW.

Bild 49 zeigt die flächenhafte Verteilung des Sturmflutscheitelwasserstandes in der Elbmündung für Szenario HH_XR2010B. Für den Bereich Hamburg sind die Sturmflutscheitelwasserstände dieses Szenarios flächenhaft in Bild 50 (HH_XR2010B) dargestellt.

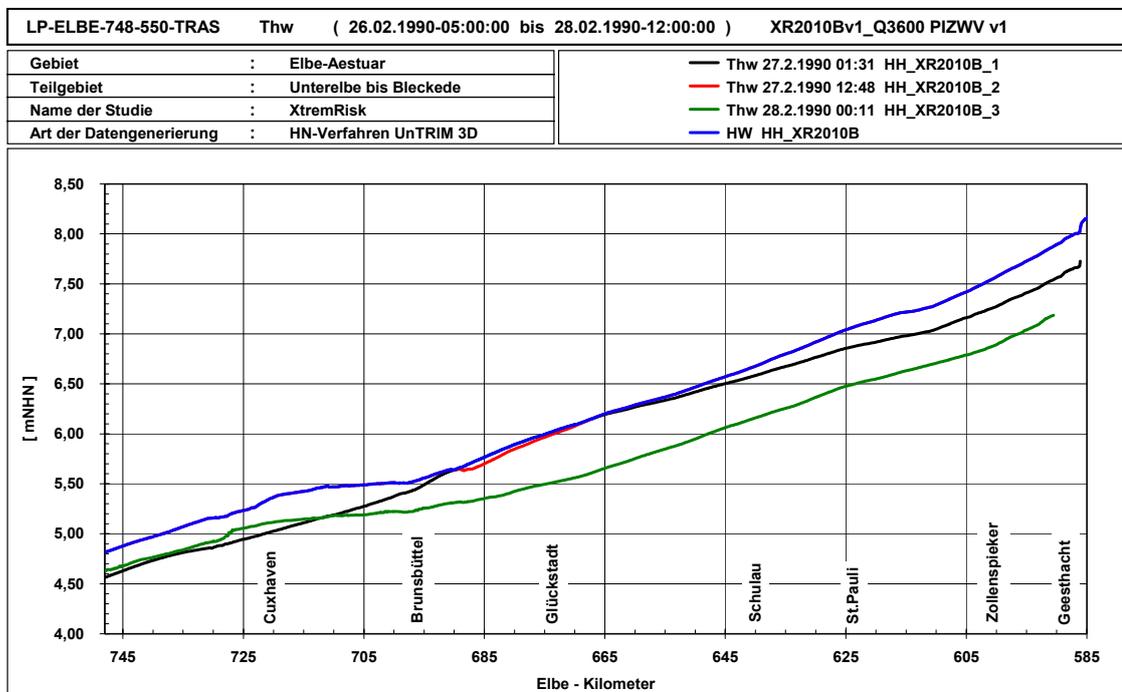


Bild 48: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für das Sturmflutszenario HH_XR2010B (blau). Zusätzlich sind die Thw mit ihrer Eintrittszeit bei Elbe - km 748 am 27.2. 1:31 Uhr (schwarz), am 27.2. 12:48 Uhr (rot) und am 28.2. 00:11 Uhr (grün) eingetragen.

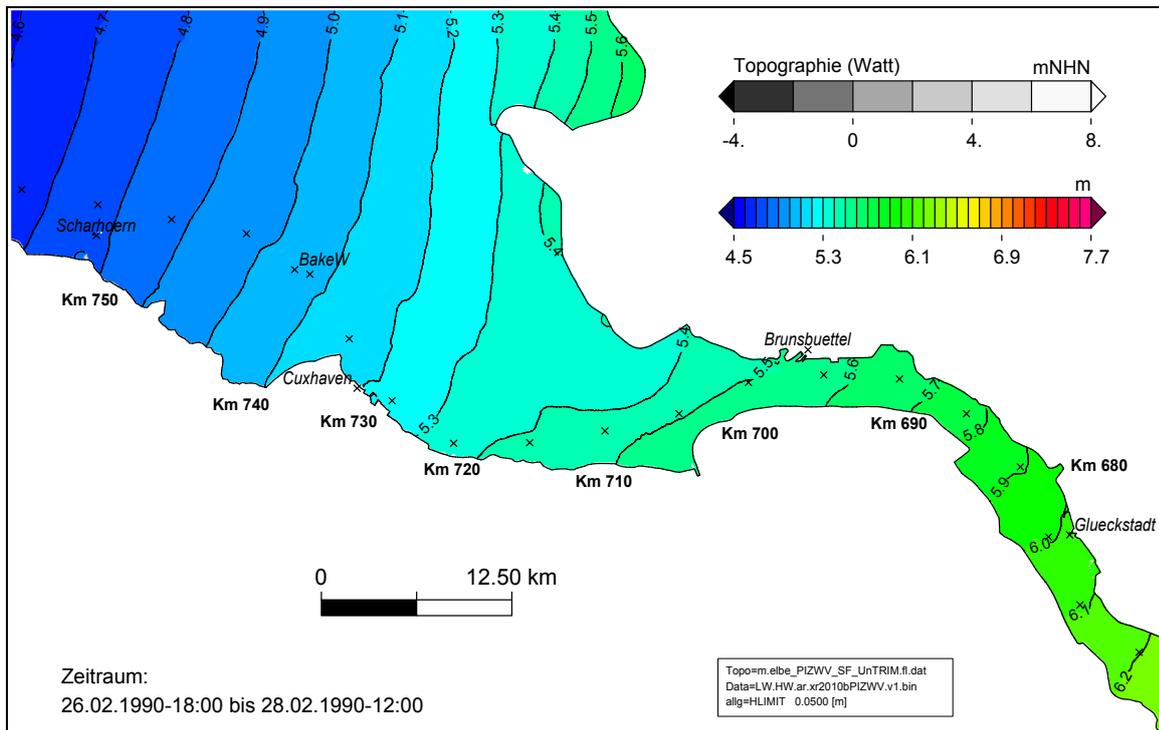


Bild 49: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010B in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

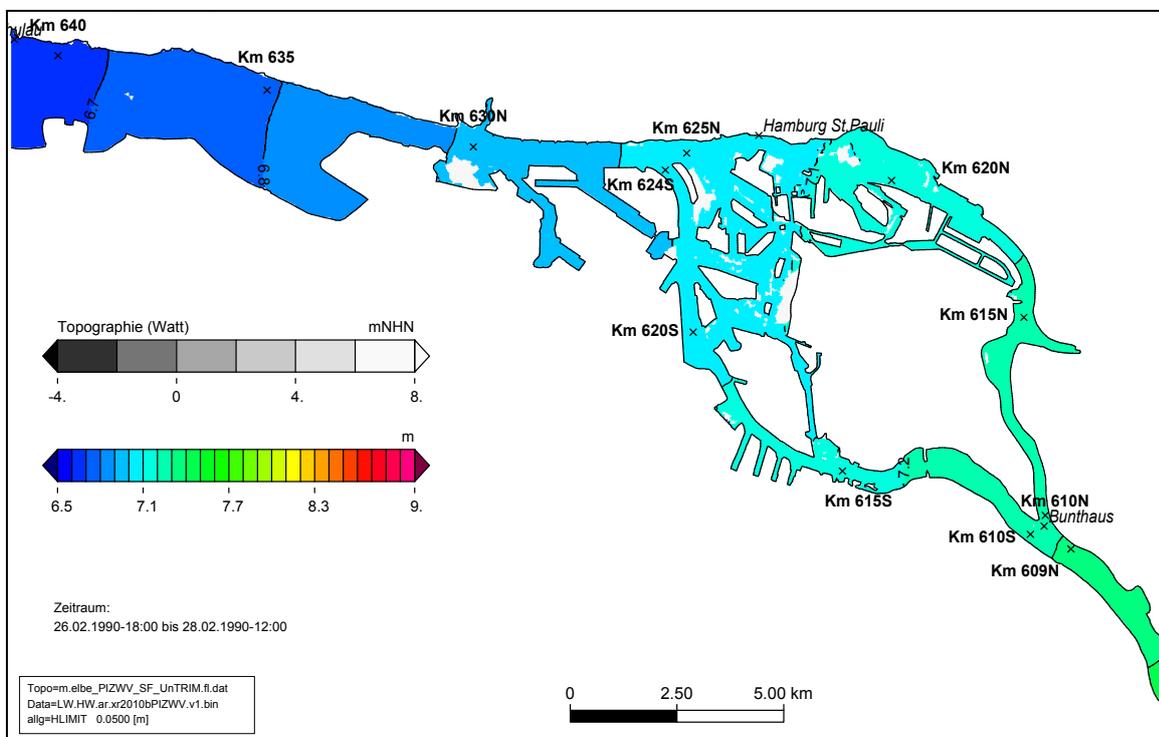


Bild 50: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010B im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

5.3 HH_XR2010C und HH_XR2100C80

5.3.1 Wasserstandsentwicklung

Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010C (in schwarz) und HH_XR2100C80 (in Rot) ist beispielhaft der mit dem Elbmodell der BAW modellierte Wasserstandsverlauf entlang der Elbe an den Orten Cuxhaven (Elbe - km 725, Bild 51), Brunsbüttel (Elbe - km 696, Bild 52), Stadersand (Elbe - km 655, Bild 53), Hamburg St. Pauli (Elbe - km 623 N, Bild 54), Bunthaus (Elbe - km 609 N, Bild 55) und Geesthacht (Elbe - km 585, Bild 56) dargestellt. Für Cuxhaven (Bild 51) ist zusätzlich der Wasserstandsverlauf der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 (Bork, I. und Müller - Navarra, S., 2005) in Blau eingetragen.

Der Wasserstandsverlauf der zwei Sturmflutszenarien ähnelt dem Verlauf der Sturmflut SF76, jedoch erreicht die Vortide am Mittag des 3. Januar bereits deutlich erhöhte Wasserstände. Die Ebbe vor der Sturmflut ist deutlich kürzer und das Tideniedrigwasser Tnw vor der Sturmflut liegt deutlich höher (bei Cuxhaven ca. NN + 3,50 m, Bild 51 in Blau bzw. Schwarz) als das MTnw (siehe auch Abschnitt 3.3).

Während der Sturmflut SF76 herrschte ein Oberwasserzufluss von 500 m³/s (siehe Tabelle 2). Der Effekt des unterschiedlichen Oberwasserzuflusses während der XtremRisk - Sturmflutszenarien und während der SF76 ist in den Vortiden stromauf von Hamburg deutlich zu erkennen. In Bunthaus liegen Thw (MThw: NN + 2,36 m (DGJ, 2011)) und Tnw (MTnw: NN – 1,08 m (DGJ, 2011)) bei den XtremRisk - Sturmflutszenarien deutlich höher. In Geesthacht ist bei sehr hohem Abfluss der Tidehub Thb stark gedämpft. Dieser Einfluss des Abflusses auf die Wasserstände wird auch von z. B. der Länderarbeitsgruppe (1988) oder Rudolph, E. (2005) beschrieben. Bild 56 zeigt außerdem, dass in den Vortiden der Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Höhe des Thw den Einfluss des Meeresspiegelanstieges übertrifft, während im Sturmflutzeitraum der Einfluss des Meeresspiegelanstieges um + 80 cm noch deutlich zu sehen ist (siehe hierzu auch Rudolph et al., 2012).

Bild 57 zeigt den Wasserstandsverlauf an den Orten Cuxhaven (schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (gestrichelt) und HH_XR2100A80 (durchgezogen).

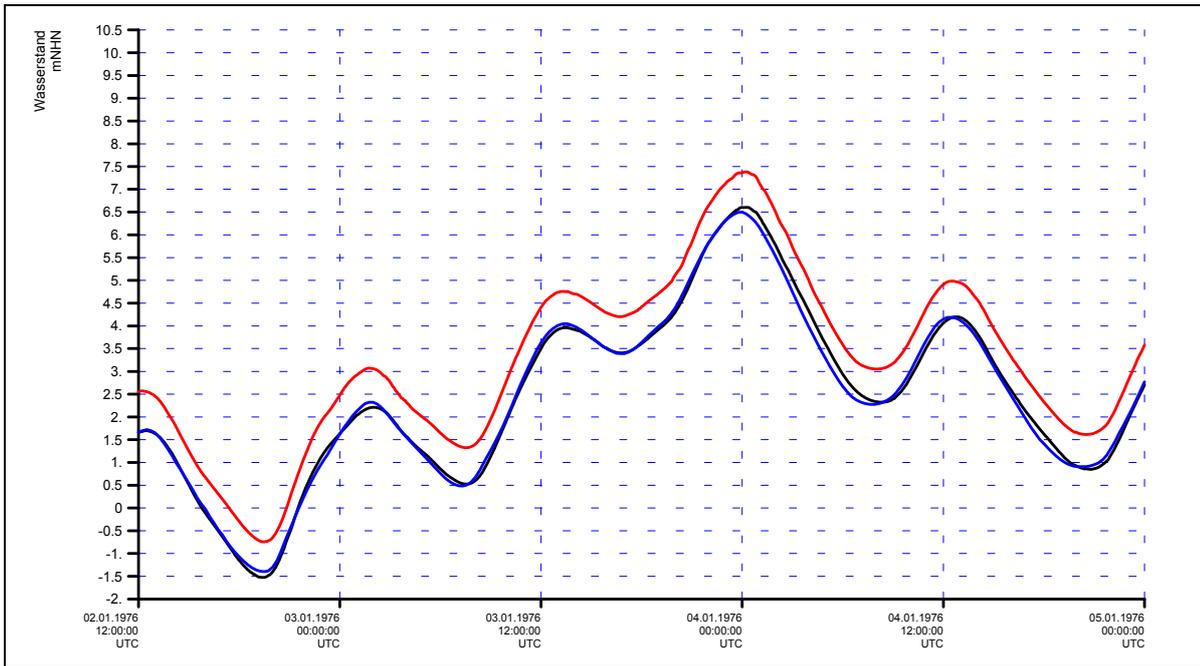


Bild 51: Cuxhaven: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot). Die Wasserstandsentwicklung MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 aus dem BSH Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.

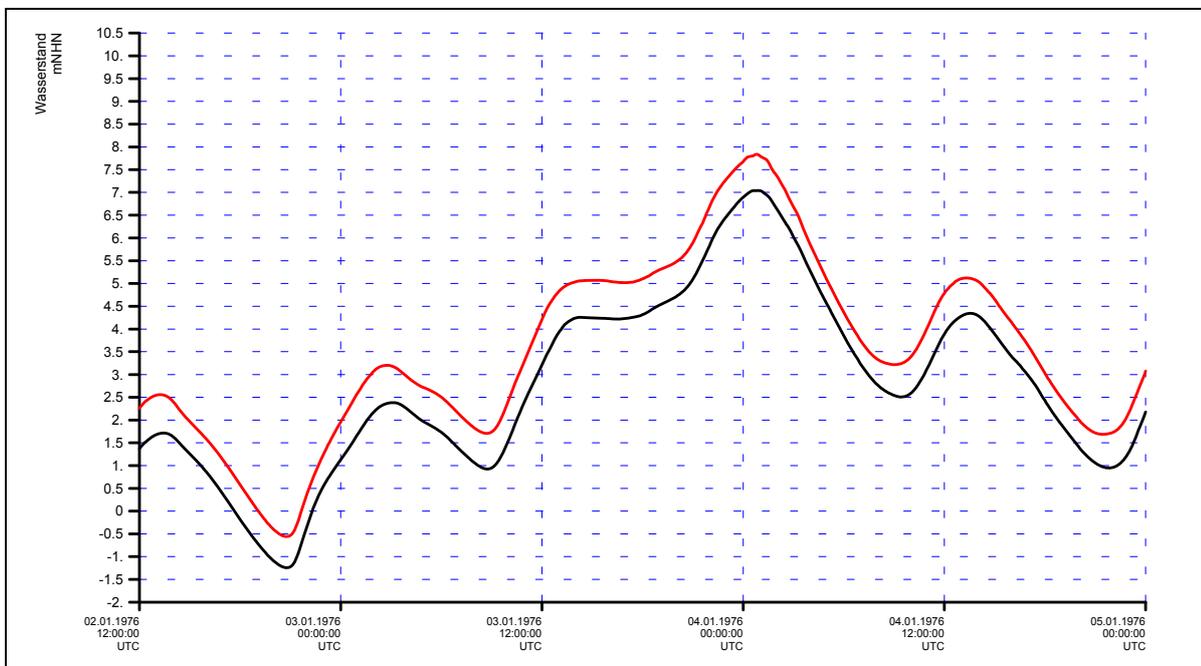


Bild 52: Brunsbüttel: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

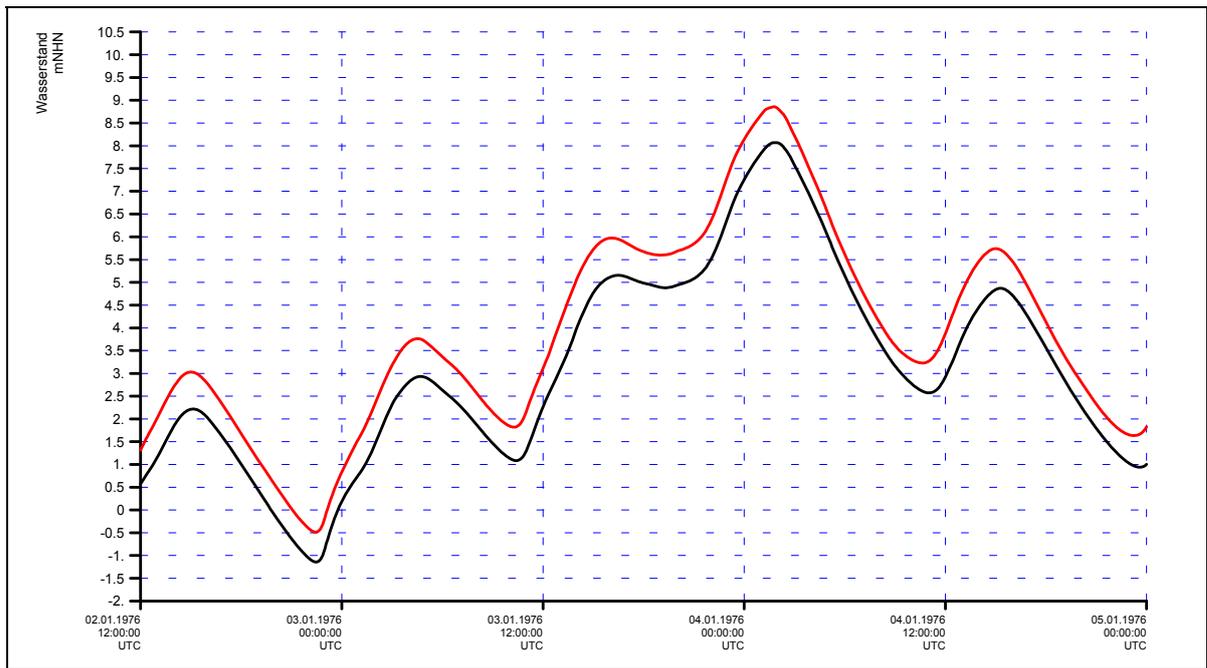


Bild 53: Stadersand: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

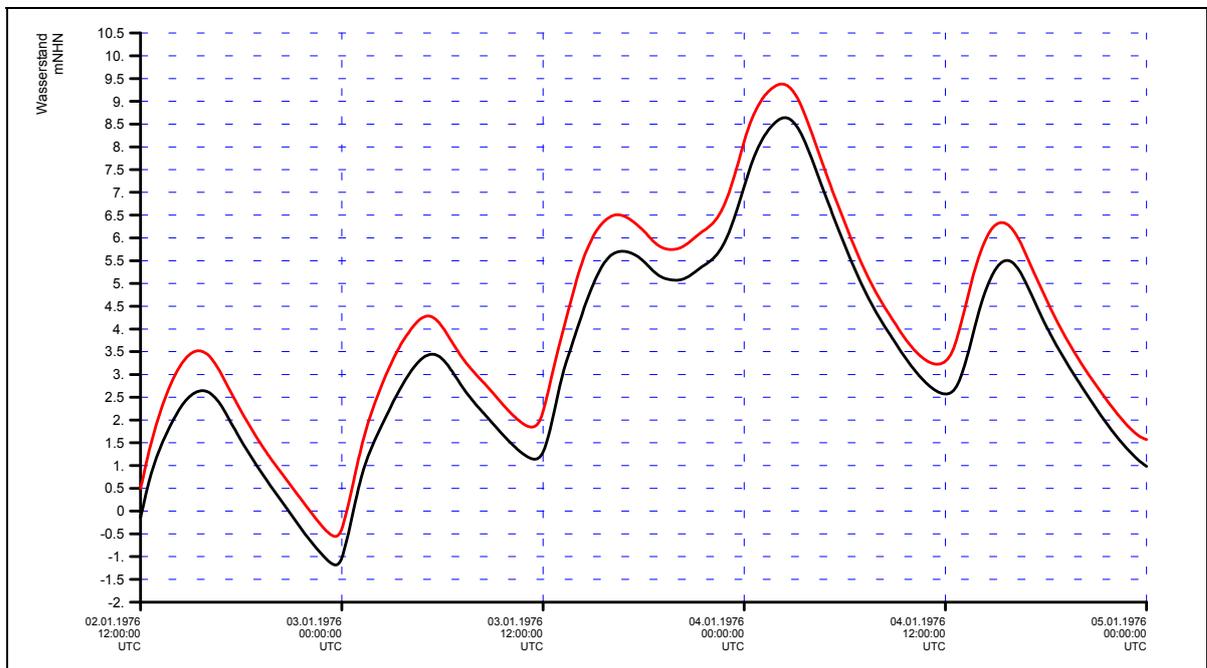


Bild 54: Hamburg St. Pauli: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

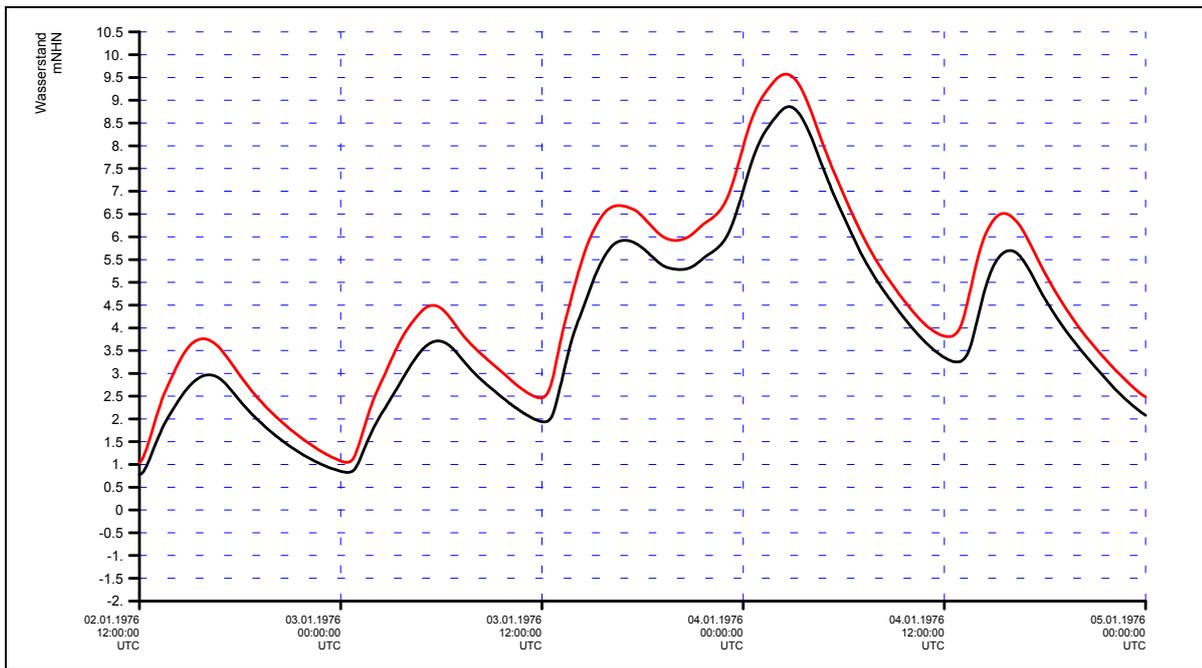


Bild 55: Bunthaus: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

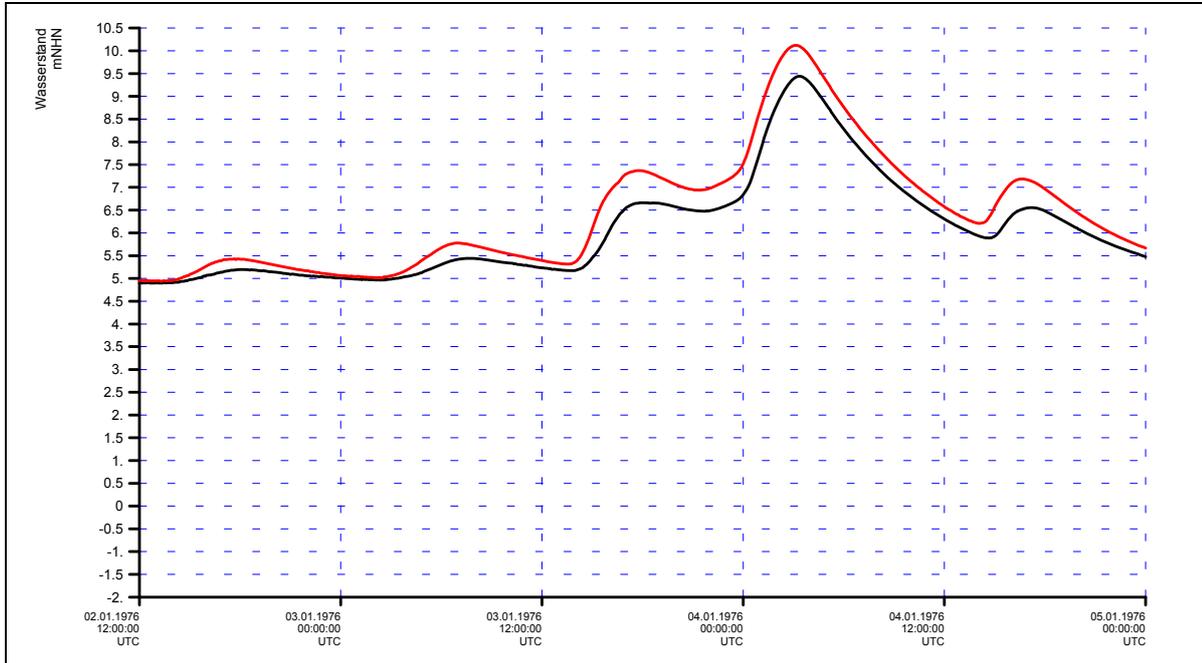


Bild 56: Wehr Geesthacht: Wasserstandsentwicklung während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

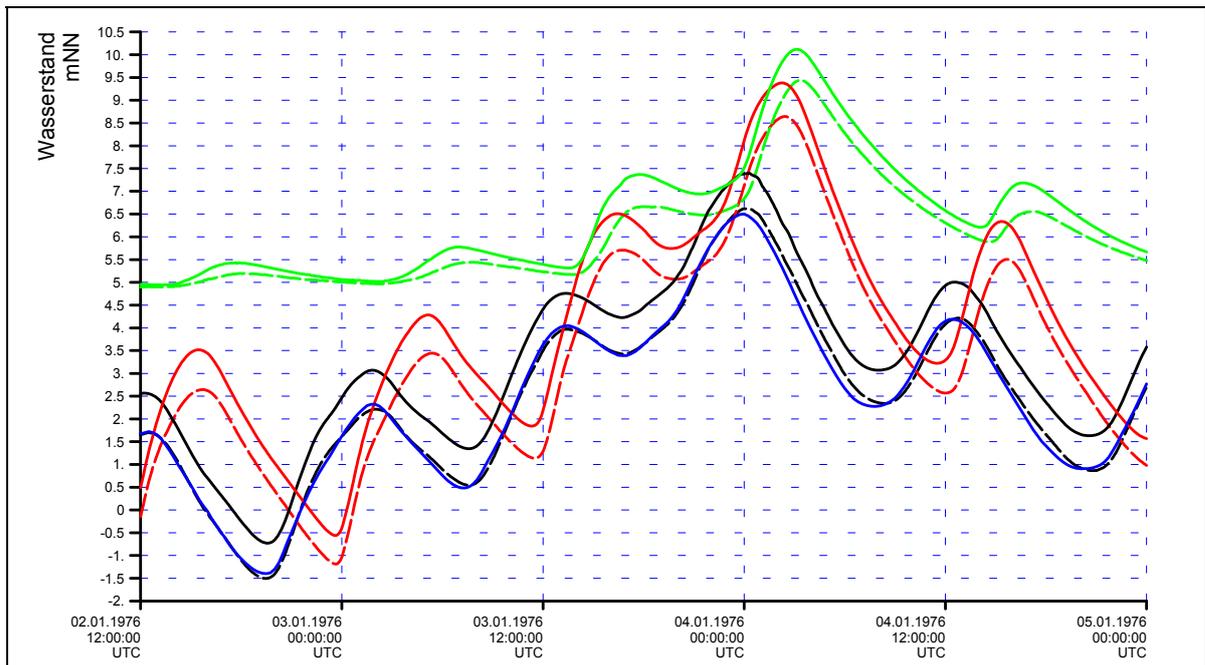


Bild 57: Wasserstandsentwicklung an den Orten Cuxhaven(schwarz), Hamburg St. Pauli (rot) und Wehr Geesthacht (grün) während der Szenarien HH_XR2010C (gestrichelt) und HH_XR2100C80 (durchgezogen). Die Wasserstandsentwicklung der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 aus dem BSH - Nordseemodell ist blau gekennzeichnet.

5.3.2 Durchflussentwicklung

Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010C (in schwarz) und HH_XR2100C80 (in Rot) ist beispielhaft der querschnittsgemittelte Wasserstandsverlauf, die querschnittsgemittelte Strömungsgeschwindigkeit und der querschnittsintegrierte Durchfluss entlang der Elbe an den Querprofilen bei Elbe - km 725 (Bild 58), bei Elbe - km 670 (Bild 59), bei Elbe - km 632 (Bild 60), durch die Norderelbe bei Elbe - km 620N (Bild 61), durch die Süderelbe bei Elbe - km 614S (Bild 62) und bei Elbe - km 605 (Bild 63) dargestellt.

Man erkennt bei Elbe - km 725 (Bild 58) am Nachmittag des 3. Januar, dass der querschnittsgemittelte Flutstrom zwar kentert, jedoch eine sehr kurze Ebbephase folgt. Während dieser Ebbephase verlässt deutlich weniger Wasser das Ästuar als in der vorangehenden Flutphase in das Ästuar eingeströmt ist.

Im Bereich des Stromspaltungsgebietes bei Hamburg wird der Einfluss des hohen Oberwasserzuflusses auf die Strömungsgeschwindigkeiten der Vortiden sichtbar. Die Flutphase verkürzt sich und die Ebbephase wird länger (Rudolph, E., 2002). Bei Elbe - km 614S (Bild 62) ist keine Richtungsumkehr der querschnittsgemittelten Strömungsgeschwindigkeit bei Flut sondern lediglich eine Abnahme der Flutstromgeschwindigkeit zu erkennen. Für den querschnittsintegrierten Durchfluss ist ein vergleichbares Verhalten zu beobachten.

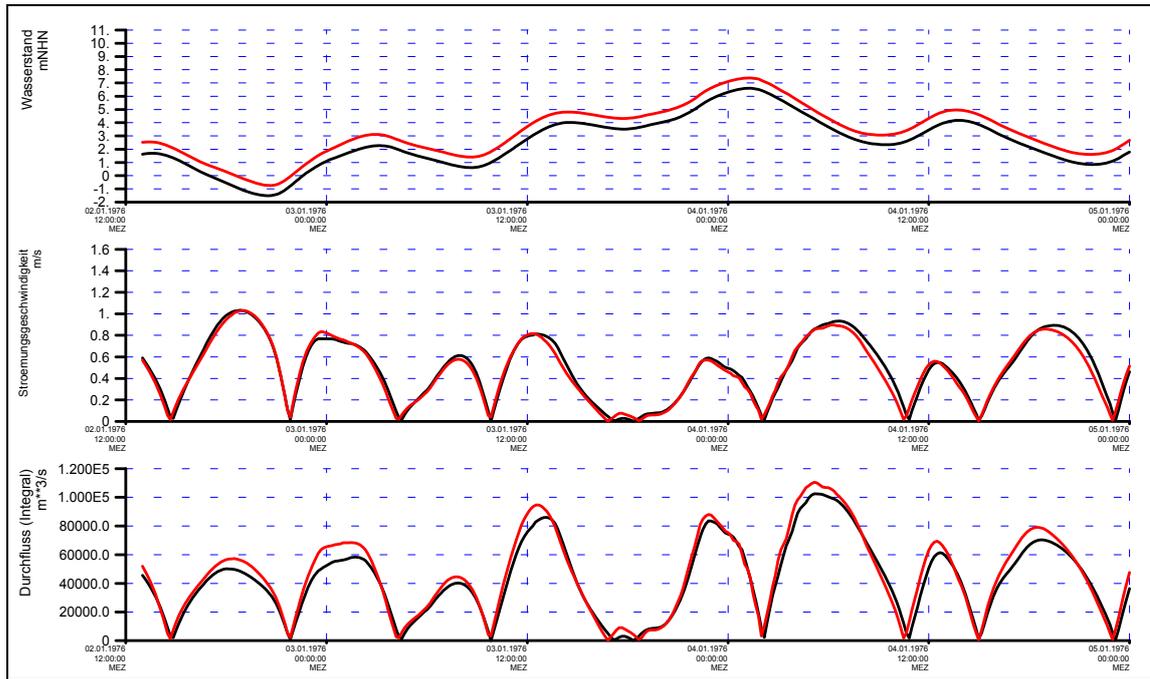


Bild 58: QP Elbe - km 725 (Cuxhaven): Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

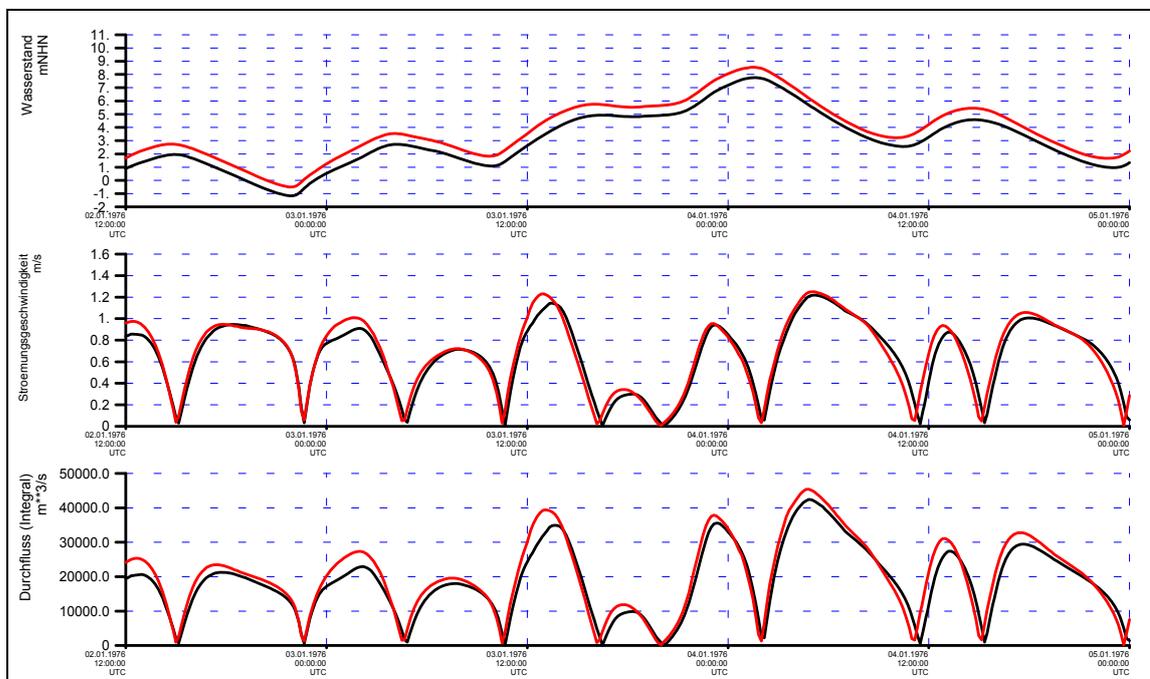


Bild 59: QP Elbe - km 670: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

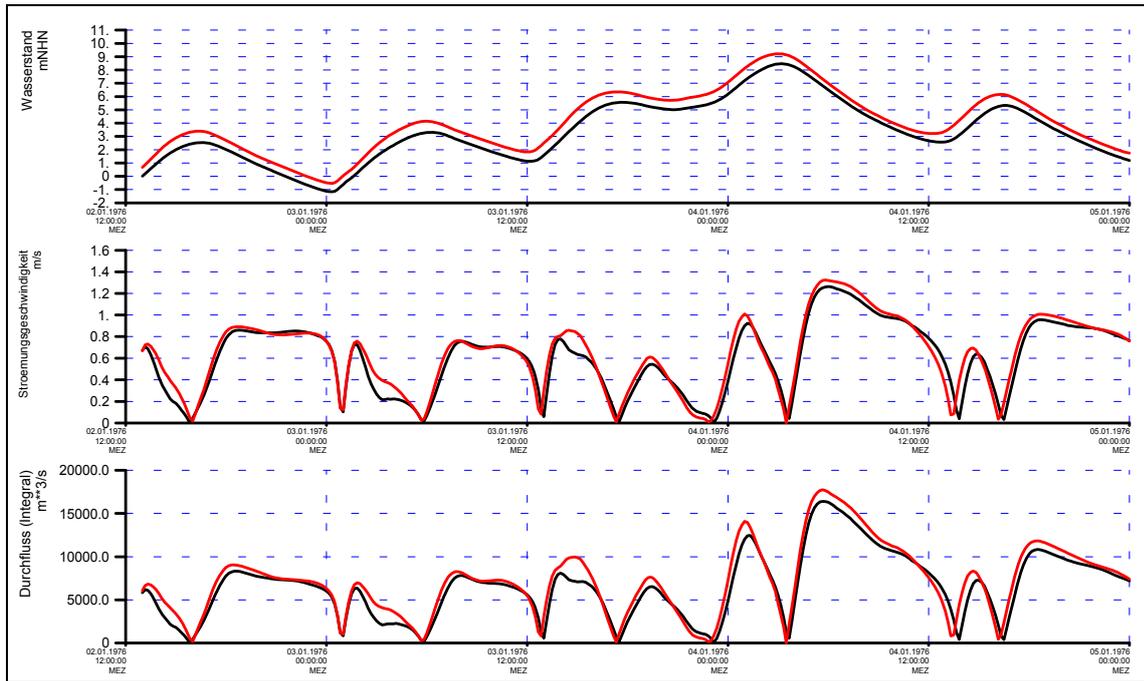


Bild 60: QP Elbe - km 632: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

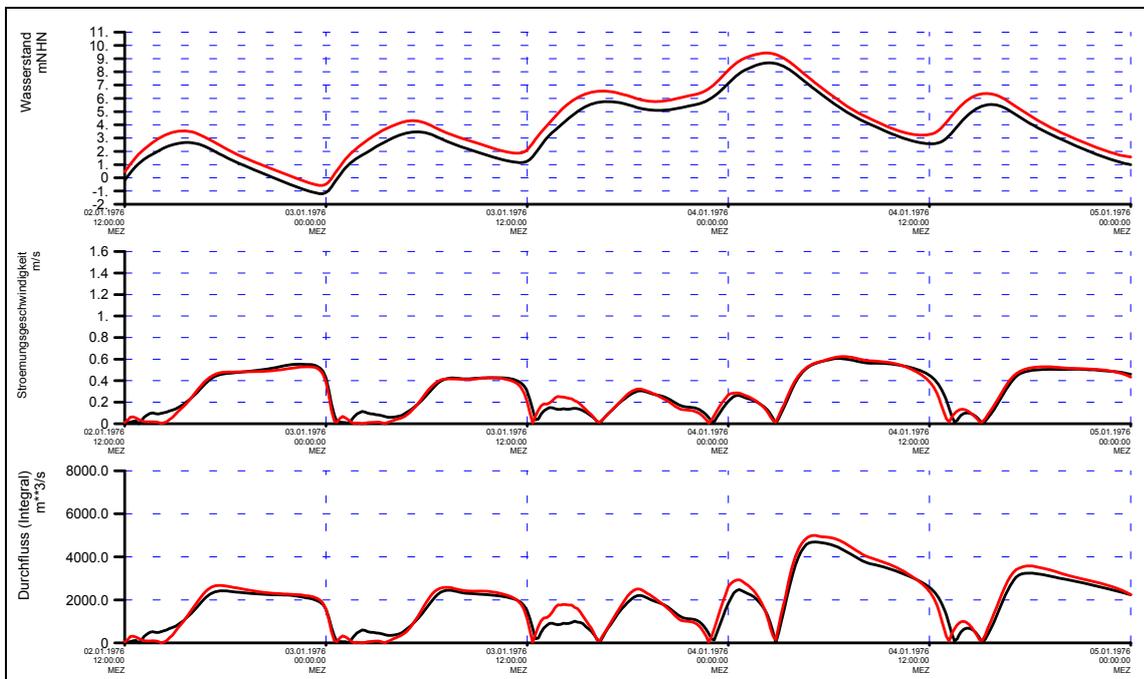


Bild 61: QP Elbe - km 620N: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

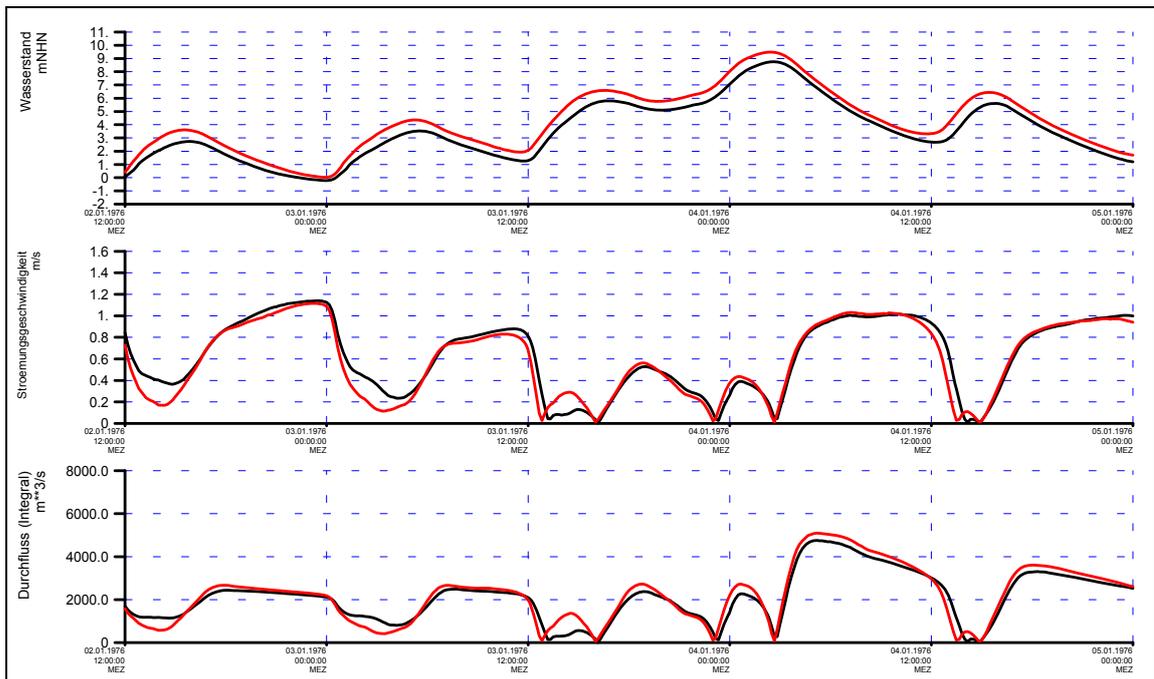


Bild 62: QP Elbe - km 614S: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

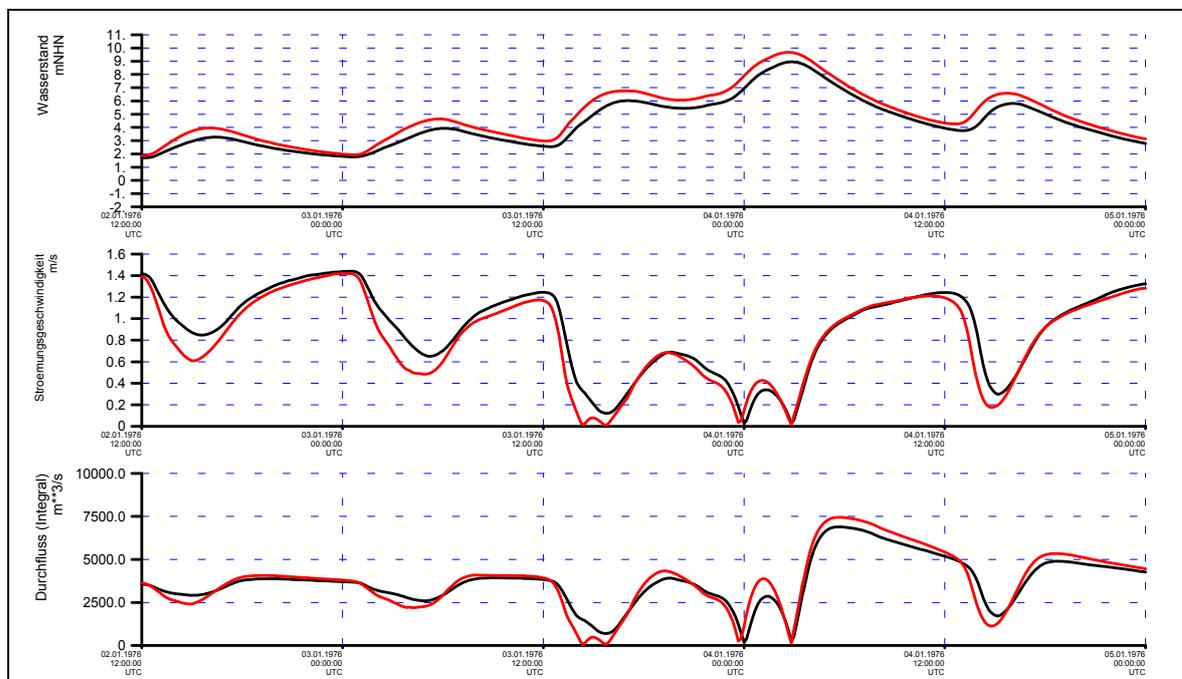


Bild 63: QP Elbe - km 605: Zeitliche Entwicklung des querschnittsgemittelten Wasserstandes (oben), der querschnittsgemittelten Strömung (Mitte) und des querschnittsintegrierten Durchflusses (unten) für HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

5.3.3 Sturmflutscheitelwasserstand

In einer sich der Modellrechnung anschließenden Auswertung (BAW, 2002a) wird aus den Zeitreihen des Wasserstandes der Sturmflutscheitelwasserstand HW im Analysezeitraum (Tabelle 3) bestimmt. Bild 64 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand für die Sturmflutszenarien HH_XR2010C und HH_XR2100C80 entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Wehr Geesthacht) durch die Norderelbe.

Bild 65 zeigt die flächenhafte Verteilung des Sturmflutscheitelwasserstandes in der Elbmündung für Szenario HH_XR2010C. Bild 66 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand in der Elbmündung für das Szenario mit einem Meeresspiegelanstieg von + 80 cm in der Deutschen Bucht HH_XR2100C80. Für den Bereich Hamburg sind die Sturmflutscheitelwasserstände dieser Szenarien flächenhaft in Bild 67 (HH_XR2010C) und Bild 68 (HH_XR2100C80) dargestellt.

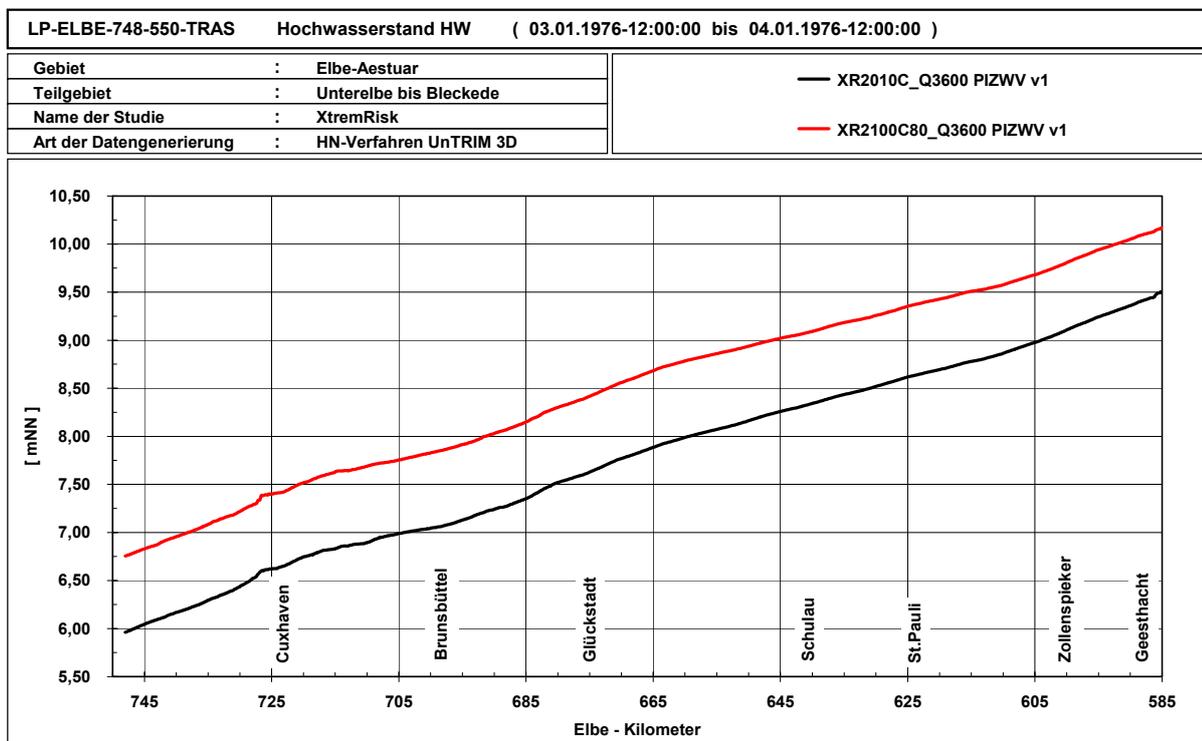


Bild 64: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010C (schwarz) und HH_XR2100C80 (rot).

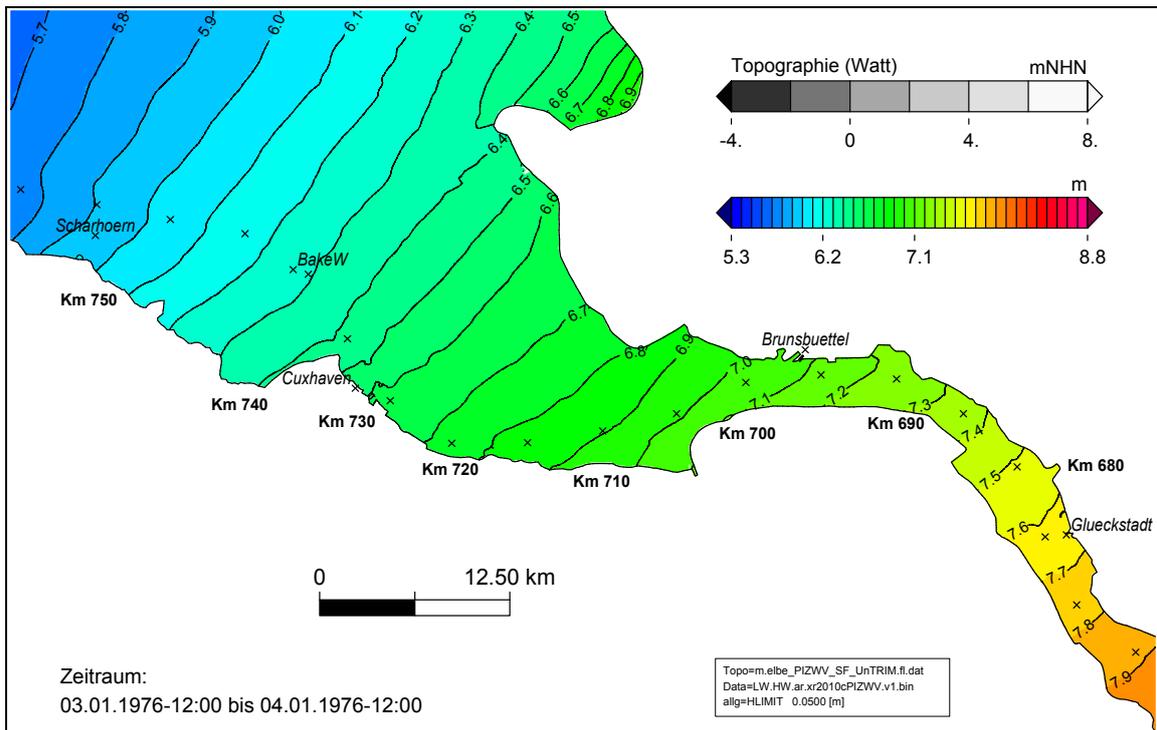


Bild 65: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010C in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

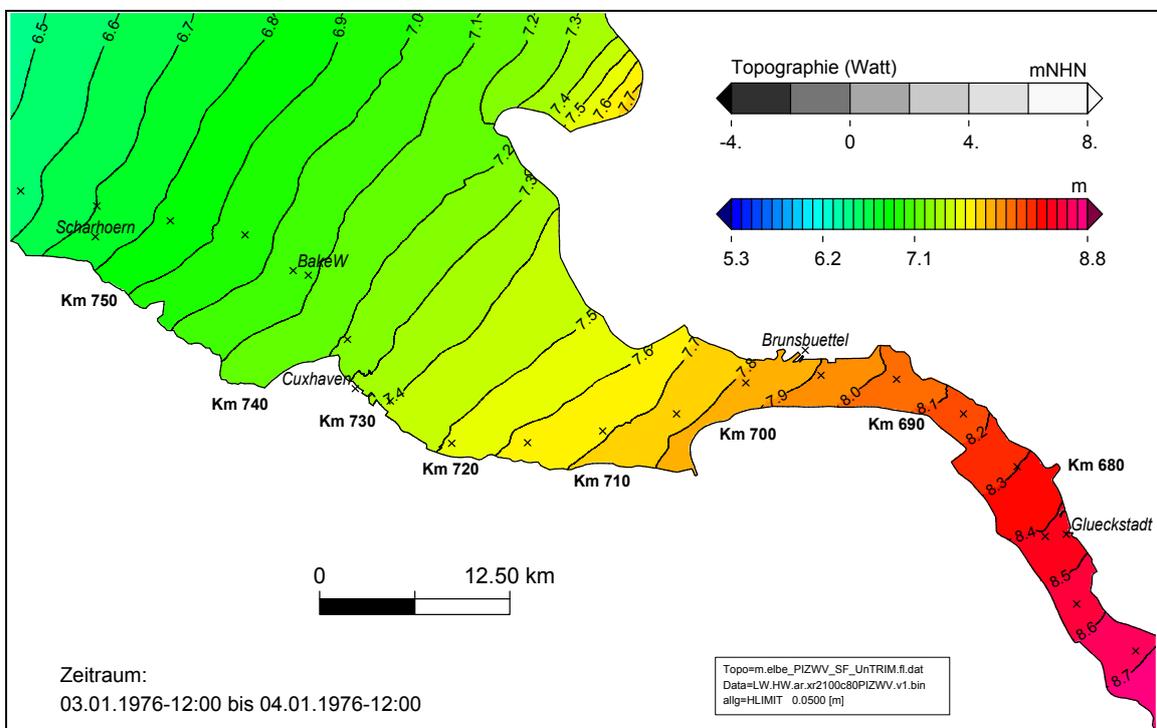


Bild 66: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100C80 in der Elbmündung. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

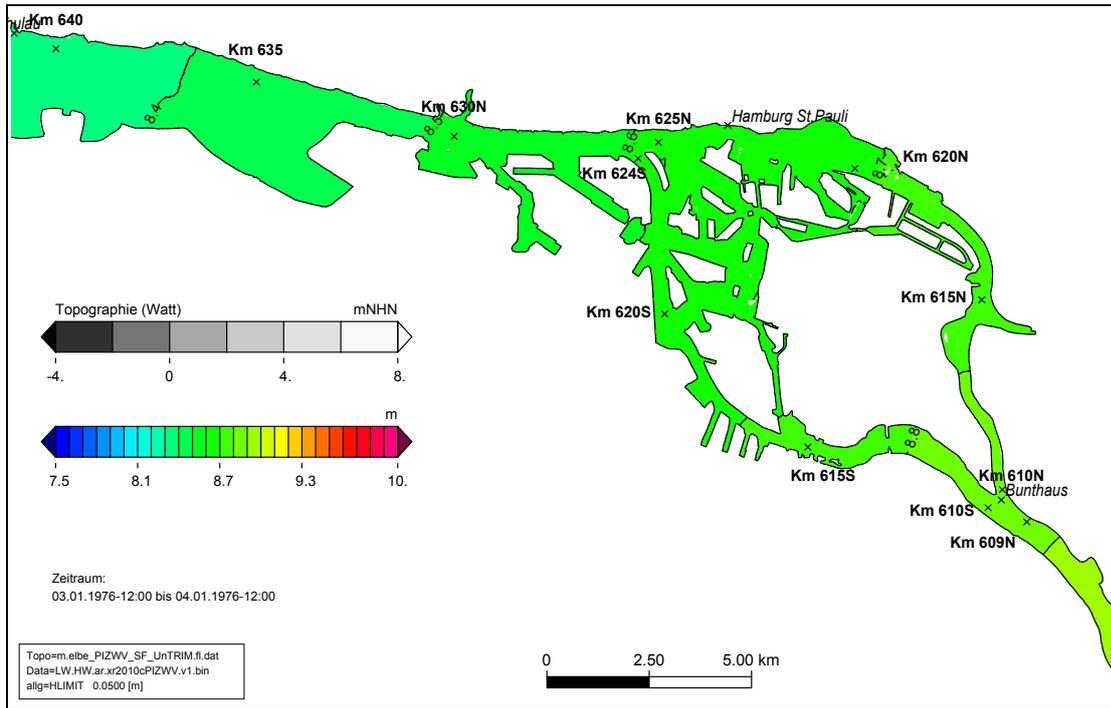


Bild 67: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2010C im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

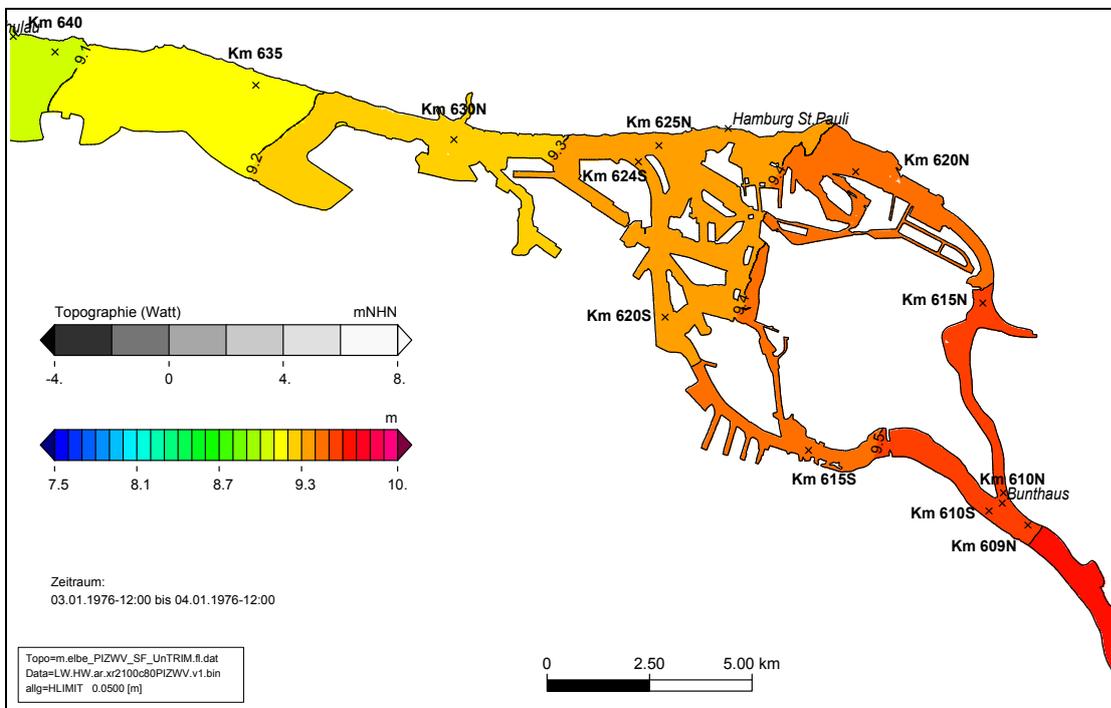


Bild 68: Sturmflutscheitelwasserstand HW für das Sturmflutszenario HH_XR2100C80 im Bereich Hamburg. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied im HW von 10 cm.

5.3.4 Bedeutung der WASP Koeffizienten für den Sturmflutscheitelwasserstand

Aufgrund seiner räumlichen Auflösung von ca. 7 km x 7 km kennt das im KFKI - Projekt MUSE für Untersuchungen in der Nordsee und im Küstenbereich eingesetzte Wettervorhersagemodell nicht die tatsächliche Land - Wasser - Verteilung im Elbeästuar. Die unterschiedliche Rauigkeit von Land und Wasser oder auch die z. B. durch Inseln erzeugten Windschatten beeinflussen jedoch kleinräumig die Windgeschwindigkeit (Stull, R. B., 1988, Rudolph, E., 1993) im Küstenbereich oder über der Elbe.

Bild 69 zeigt die Windgeschwindigkeitsverteilung über der Elbmündung der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 am 3. Januar um 20:00 Uhr. Zur Orientierung ist die Deichlinie entlang der Elbe eingezeichnet. Im Rahmen des KFKI - Projektes OPTTEL (Ganske, A. und Rosenhagen, G., 2010) wurde vom DWD eine Methode entwickelt, die ein downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tideelbe ermöglicht. Dafür werden sogenannte WASP Koeffizienten eingesetzt. Die Anwendung dieser Koeffizienten verfeinert die Windfelder über der Elbe auf eine Auflösung von 250 m x 250 m. In OPTTEL zeigte sich, dass bei Sturmflut die Wasserstände in Hamburg St. Pauli ohne Berücksichtigung der WASP Koeffizienten vom BAW - Vorhersagemodell der Elbe ca. 15 cm zu niedrig berechnet werden (Kremp, C., 2011).

Bild 70 zeigt die Windgeschwindigkeit über der Elbmündung der MUSE Sturmflut 1976 EPS 45 am 3. Januar um 20:00 Uhr bei Berücksichtigung der WASP Koeffizienten (Hennemuth, B., 2011). Hohe Windgeschwindigkeiten werden über Wasser in der gesamten Elbmündung und dem Elbeästuar erreicht.

An drei ausgewählten Orten im Fahrwasser der Elbe, Elbe - km 730, Elbe - km 640 und Elbe - km 624N, werden Windrichtung und Windgeschwindigkeit aus den flächenhaften Windfeldern entnommen und die Zeitreihen in Bild 71 dargestellt. Man erkennt, dass die Verwendung der WASP Koeffizienten zu einer Erhöhung der Windgeschwindigkeit über der Elbe führt. Die Windrichtung bleibt unverändert.

Der Einfluss der Verwendung der WASP Koeffizienten bei der Erstellung der Windfelder für die Sturmflutscheitelwasserstände der Sturmflutszenarien HH_XR2010C und HH_XR2100C80 ist in Bild 72 zu erkennen. Stromauf von Glückstadt werden unter Berücksichtigung der WASP Koeffizienten höhere Sturmflutscheitelwasserstände HW berechnet. Im Bereich von Hamburg St. Pauli unterscheiden sich die HW - Werte um 14 cm (HH_XR2010C) bzw. 13 cm (HH_XR2100C80).

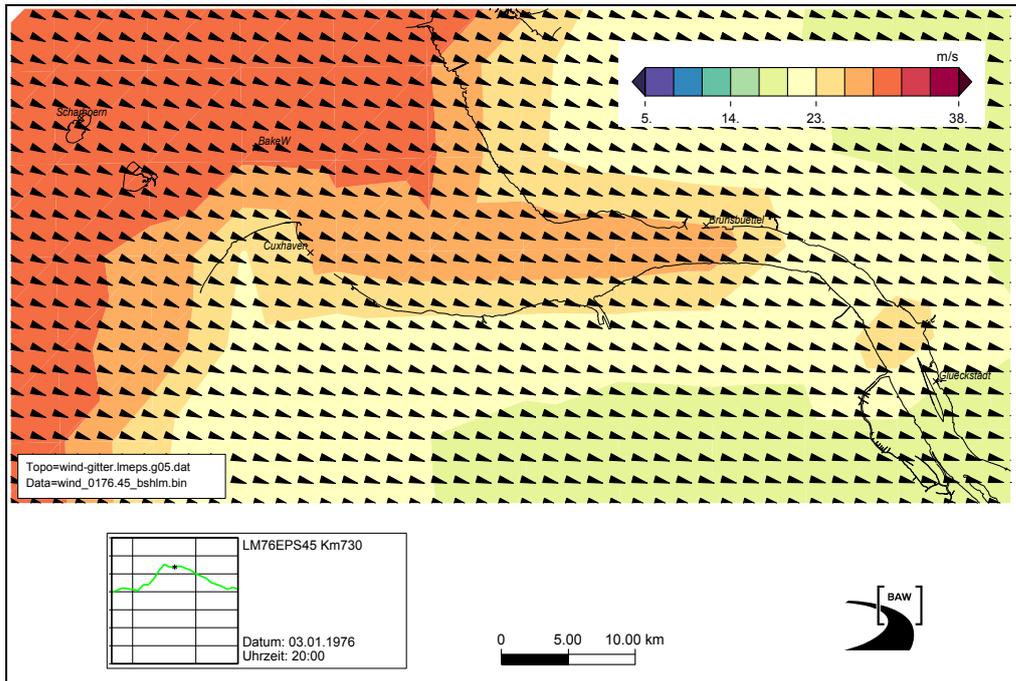


Bild 69: Wind über der Elbmündung (MUSE Sturmflut 1976 EPS 45), räumliche Auflösung 7 km x 7 km. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied in der Windgeschwindigkeit von 3 m/s.

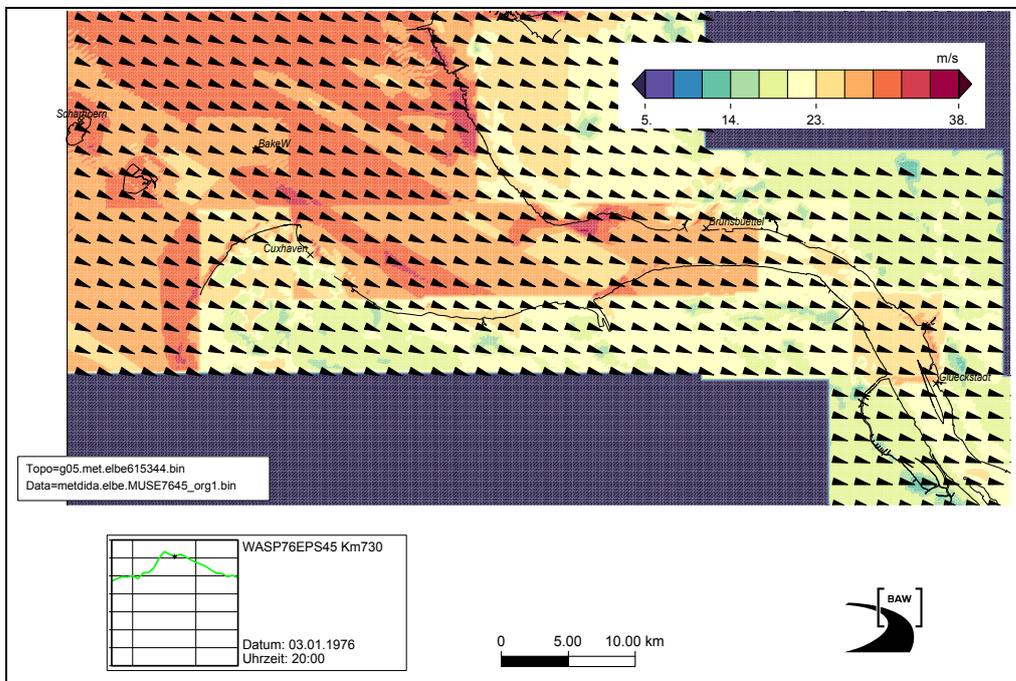


Bild 70: Wind über der Elbmündung (MUSE Sturmflut 1976 EPS 45) mit WASP Koeffizienten, räumliche Auflösung 250 m x 250 m. Eine Farbstufe entspricht einem Unterschied in der Windgeschwindigkeit von 3 m/s.

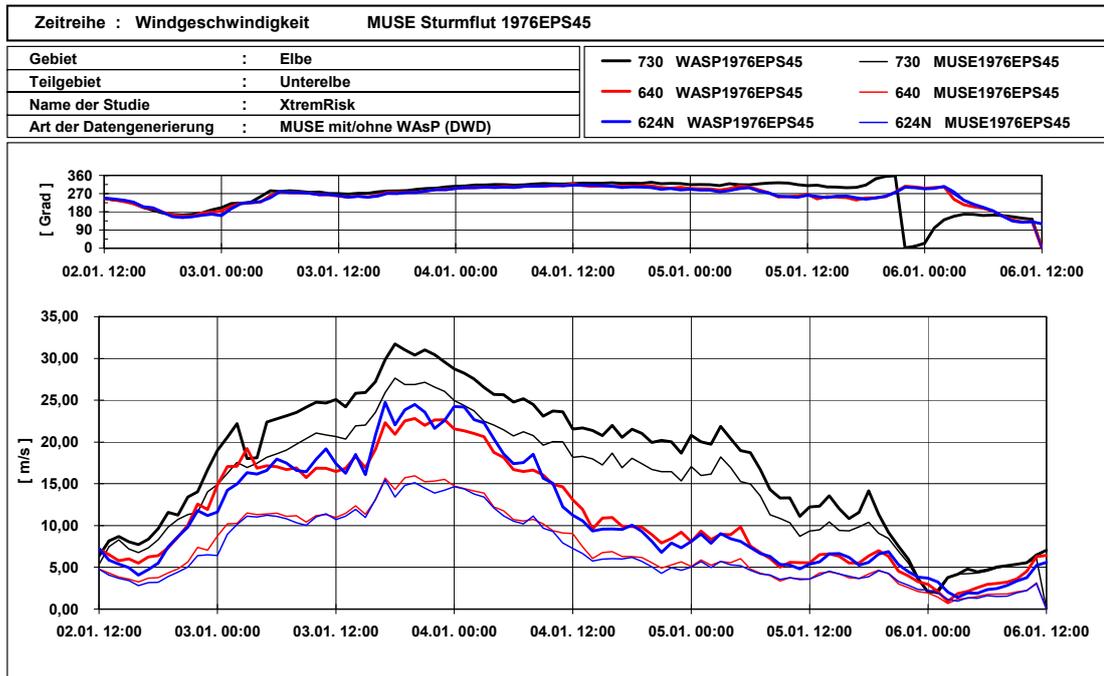


Bild 71: Zeitliche Entwicklung der Windgeschwindigkeit (unten) und der Windrichtung (oben) über dem Elbemodell bei Elbe - km 730 (schwarz), Elbe - km 640 (rot) und Elbe - km 624N (blau) während des Sturmflutszenarios HH_XR2010C mit (dünn) und ohne (dick) Berücksichtigung der WAsP Koeffizienten.

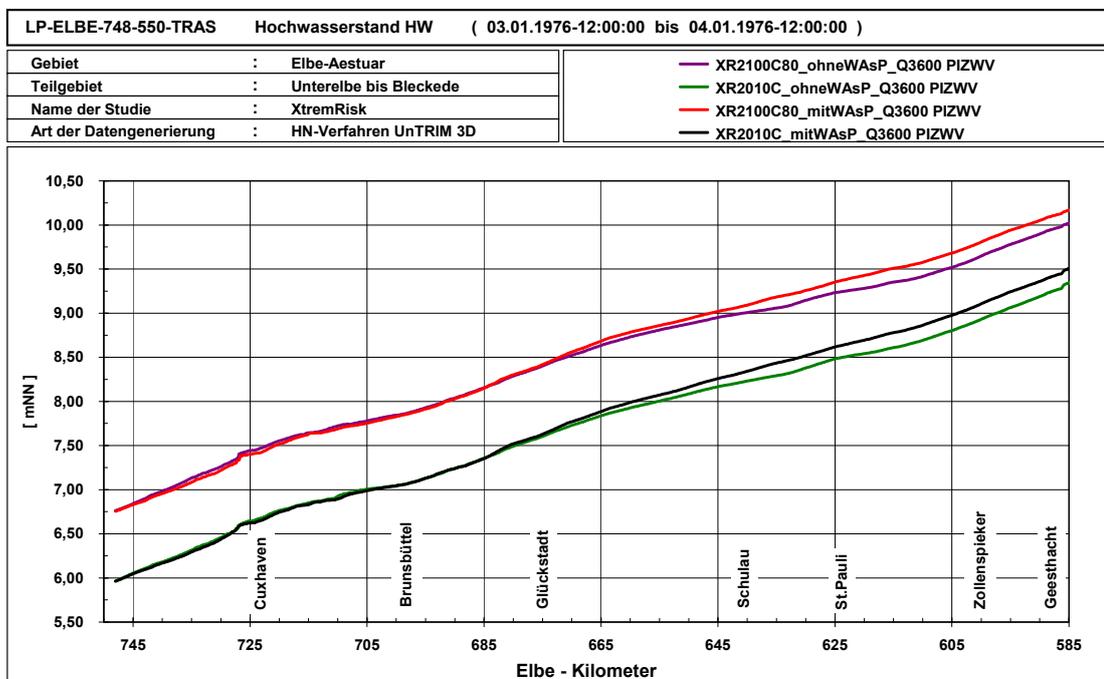
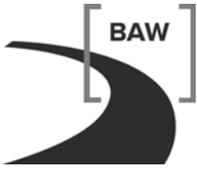


Bild 72: Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Elbefahrwassers von Elbe - km 748 (Elbmündung) bis Elbe - km 585 (Geesthacht) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010C_mitWAsP (schwarz) und HH_XR2100C80_mitWAsP (rot) sowie HH_XR2010C_ohneWAsP (grün) und HH_XR2100C80_ohneWAsP (violett).



6 Zusammenfassung

Für das BMBF - Verbundprojekt *XtremRisk Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten -- Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel* werden von der BAW - DH die Wasserstandsverläufe von extrem hohen Sturmflutszenarien in der Elbe modelliert. Hierzu wird das dreidimensionale hydrodynamische numerische Modell UnTRIM2004 (Casulli, V. und Walters, R. A., 2000 bzw. BAW, 2004) eingesetzt.

Vorgegeben sind für drei ausgewählte Sturmflutszenarien, HH_XR2010A, HH_XR2010B und HH_XR2010C der Wasserstandsverlauf in der Elbmündung, die Windentwicklung über der Elbe sowie der Abfluss. Die Sturmflutszenarien HH_XR2010A und HH_XR2010C werden zusätzlich mit einem Meeresspiegelanstieg in der Deutschen Bucht von + 80 cm modelliert (HH_XR2100A80 und HH_XR2100C80).

Für das Sturmflutszenario HH_XR2010A wird vom LSBG der Wasserstandsverlauf bei Cuxhaven (Bild 73, links rot dick) vorgegeben. Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010B (Bild 73, Mitte grün dick) und HH_XR2010C (Bild 73, rechts blau dick) stehen Wasserstandsrandwerte (BSH) und Windfelder (DWD) aus dem KFKI - Projekt MUSE (Jensen, J., 2005) zur Verfügung. Die Sturmflutszenarien HH_XR2100A80 (Bild 73, links rot dünn) und HH_XR2100C80 (Bild 73, rechts blau dünn) berücksichtigen einen Meeresspiegelanstieg von + 80 cm in der Deutschen Bucht. Der Oberwasserzufluss in das Elbeästuar wird mit $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{s}$ (zum Vergleich HHQ = $3620 \text{ m}^3/\text{s}$; DGJ, 2008) vorgegeben.

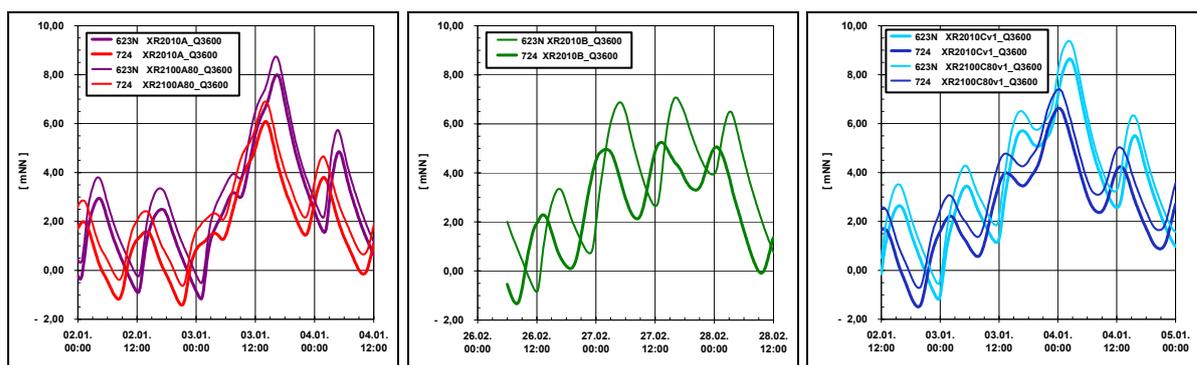


Bild 73: Wasserstandsentwicklung bei Elbe - km 724 (Cuxhaven) und Elbe - km 623N (Hamburg St. Pauli) für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A, HH_XR2100A80 (rot, links), HH_XR2010B (grün, Mitte) sowie HH_XR2010C und HH_XR2100C80 (blau, rechts).

Als Ergebnis der numerischen Modellierung erhält man u. a. den Wasserstandsverlauf im gesamten Modellgebiet, beispielhaft sind Cuxhaven und Hamburg St. Pauli (Bild 73) dargestellt. Aus der Analyse der Wasserstandszeitreihen (BAW, 2002a) erhält man den Sturmflut-

scheitelwasserstand als höchsten im Analysezeitraum aufgetretenen Wasserstand HW. Bild 74 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe für die fünf untersuchten Sturmflutszenarien. Der Meeresspiegelanstieg von + 80 cm erhöht zwischen Cuxhaven und Hamburg den Sturmflutscheitelwasserstand um + 75 cm bis + 80 cm. Stromauf von Hamburg nimmt die Bedeutung des Meeresspiegelanstieges im Vergleich zum Oberwasserabflusses (hier $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{s}$) ab (Rudolph, E. et al., 2011). Im Bereich Hamburg bis Geesthacht bewirkt der Meeresspiegelanstieg lediglich eine Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstandes um ca. 70 cm.

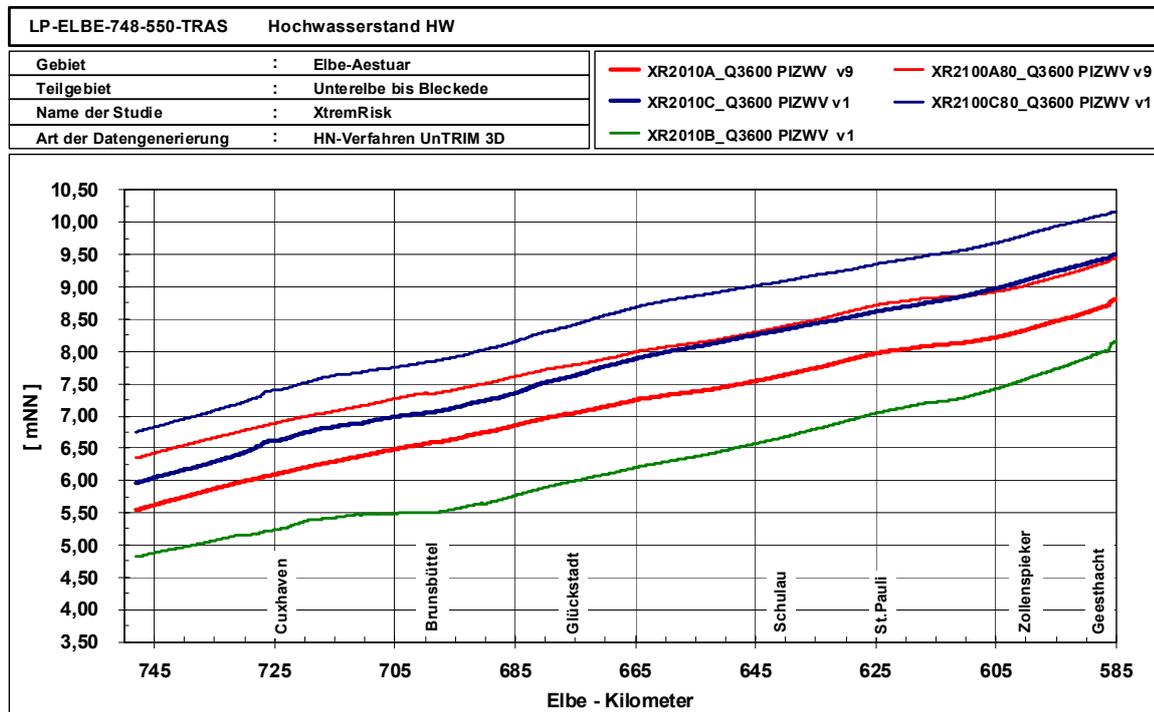


Bild 74: Sturmflutscheitelwasserstand HW entlang der Elbe zwischen der Elbmündung bei Cuxhaven und dem Wehr Geesthacht für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (rot, fett), HH_XR2100A80 (rot, dünn), HH_XR2010B (grün), HH_XR2010C (blau, fett), HH_XR2100C80 (blau, dünn).

Die Sturmflutscheitelwasserstände an Orten entlang der Tideelbe, die für das Projekt XtremRisk von besonderem Interesse sind, sind in Tabelle 4 dargestellt. Hierfür werden die analysierten Daten, die auch in Bild 74 dargestellt sind, verwendet. Sensitivitätsstudien (siehe Abschnitt 5.1.4, 5.1.5 und 5.3.4) haben gezeigt, dass die in Tabelle 4 genannten Werte aufgrund der gewählten Rand- und Anfangswerte entlang des Untersuchungsgebietes Tideelbe um $\pm 2 \text{ cm}$ bis $\pm 15 \text{ cm}$ variieren können.

	SF76 Messung (m NN)	HH_XR2010A (m NN)	HH_XR2100A80 (m NN)	HH_XR2010B (m NN)	HH_XR2010C (m NN)	HH_XR2100C80 (m NN)
Cuxhaven (724)	5,10	6,10	6,90	5,24	6,62	7,41
Brunsbüttel (696)	5,39	6,62	7,39	5,53	7,10	7,89
Krückau (670)	-	7,14	7,88	6,09	7,77	8,56
Schulau (640)	6,25	6,63	8,39	6,67	8,34	9,09
Finkenwerder (632)	-	7,80	8,55	6,86	8,48	9,22
St.Pauli (623N)	6,45	8,00	8,75	7,05	8,64	9,38
Over (605)	6,40	8,20	8,92	7,41	8,97	9,67
Geesthacht (586)	6,42	8,70	9,40	8,01	9,45	10,13
Oberwasserzufluss	500 m ³ /s	3600 m ³ /s	3600 m ³ /s	3600 m ³ /s	3600 m ³ /s	3600 m ³ /s

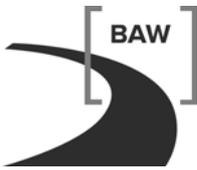
Tabelle 4: Sturmflutscheitelwasserstände HW an ausgewählten Orten (mit Elbe - km) entlang der Tideelbe für die XtremRisk - Sturmflutszenarien HH_XR2010A, HH_XR2100A80, HH_XR2010B, HH_XR2010C und HH_XR2100C80 sowie die während der Sturmflut 3. Januar 1976 (SF76) gemessenen Sturmflutscheitelwasserstände HW.

Aus den Ergebnissen der numerischen Modellierung der fünf genannten Sturmflutszenarien wurden während der Projektlaufzeit sowohl der zeitliche Verlauf des Wasserstandes an Orten von Interesse als auch die Analyseergebnisse Sturmflutscheitelwasserstand HW sowie Durchflusszeitreihen an ausgewählten Querschnitten an die Projektpartner XtremRisk TUHH und LSBG weitergegeben.

Mit den Wasserstands- und Durchflusszeitreihen aus dem 3D - hydrodynamischen numerischen Elbmodell der BAW betreibt anschließend der XtremRisk - Projektpartner TUHH Ausschnittsmodelle der Elbe. Die Wasserstandsentwicklung entlang der Elbe sowie der Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe werden vom XtremRisk - Projektpartner fwu für die statistische Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit der Sturmflutszenarien (Wahl, T., 2012) benötigt. Es zeigt sich, dass die untersuchten extrem hohen Sturmfluten eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit haben (Wahl, T., 2012).

7 Literaturverzeichnis

- BAW (2002a). Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg.
http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tideunabh%C3%A4ngige_Kennwerte_des_Wasserstands
- BAW (2002b). Tidekennwerte des Wasserstandes. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg.
http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tidekennwerte_des_Wasserstandes
- BAW (2004). Validation document – Mathematical – Model UnTRIM. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg.
http://www.baw.de/downloads/wasserbau/mathematische_verfahren/pdf/Simulationsverfahren_Kueste_validation_document-untrim-2004.pdf
- BAW (2007). Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt – Ausbaubedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen. Gutachten BAW A39955 03 10062 – H.1b. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg. Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. Unveröffentlicht.
- Bork, I. und Müller - Navarra, S. (2005). Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste (MUSE). Teilbericht C: Sturmflutsimulationen. Abschlussbericht des KFKI - Forschungsvorhabens (03KIS039).
- BSH (2001) The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod). Bericht des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie. Nr. 29. 48 S.
- Casulli, V. und Walters, R. A. (2000). An unstructured, three dimensional model based on the shallow water equations. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 32. S. 331 – 348.
- DGJ (1965). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Unteres Elbegebiet, Abflussjahr 1962. Freie und Hansestadt Hamburg – Behörde für Wirtschaft und Verkehr – Strom- und Hafenbau.
- DGJ (1997). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 1994. Freie und Hansestadt Hamburg – Wirtschaftsbehörde – Strom- und Hafenbau.



- DGJ (2001). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 1999. Freie und Hansestadt Hamburg – Wirtschaftsbehörde – Strom- und Hafenbau.
- DGJ (2008). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 2004. Freie und Hansestadt Hamburg – Hamburg Port Authority AöR.
- DGJ (2011). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 2007. Freie und Hansestadt Hamburg – Hamburg Port Authority AöR.
- Flügge, G., Heyer, H., Rudolph, E., Plüß, A., Lang, G., Schrödter, D. und Cords, A. (2000). Untersuchung regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzustände und Oberwassereinflüsse auf das Sturmflutgeschehen in Tideästuarien. Abschlussbericht des KFKI Forschungsvorhabens Sturmfluten. BMBF 03KIS311. MTK 0600. 65 Seiten.
- Ganske, A. und Rosenhagen, G. (2010) OPTEL - B Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tideelbe. Abschlussbericht. BMBF 03KIS070/ KFKI 101. 33 Seiten.
- Gönnert, G., Gerkensmeier, B., Sossidi, K. und Thumm, S. (2012). Extremsturmfluten – Teilprojekt 1a. Abschlussbericht XtremRisk 2. August 2012. Landesbetrieb Straßen Brücken und Gewässer (LSBG), Hamburg.
- Gönnert, G., Jensen, J., von Storch, H., Thumm, S., Wahl, T. und Weisse, R. (2009) Der Meeresspiegelanstieg – Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. Die Küste 76. S. 225 - 255
- Gönnert, G., Niemeyer, H., Probst, H., Buß, T., Schaller, D. und Strotmann, T. (2007). Bemessungssturmflut 2085A an der Elbe. Überprüfung nach 10 Jahren. Landesbetrieb Straßen Brücken und Gewässer (LSBG), Hamburg.
- Hennemuth, B. (2011). Extremsturmfluten und Windfelder – Erstellung der Windfelder für die XtremRisk Sturmflutszenarien. Vortrag auf dem XtremRisk Arbeitstreffen am 30. Mai 2011 beim LSBG in Hamburg.
- IKSE (2001). Bestandsaufnahme des vorhandenen Hochwasserschutzniveaus im Einzugsgebiet der Elbe. Internationale Kommission zum Schutz der Elbe IKSE MKOL. Magdeburg. 74 S.

- Jensen, J. (2005). MUSE Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste. Abschlussbericht. BMBF 03KIS039/ KFKI 078. 304 Seiten.
- Jensen, J., Mudersbach, C., Müller – Navarra, S., Bork, I., Koziar, C. und Renner, V. (2006). Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. Die Küste, 71. S. 121 bis 167.
- Koziar, C. und Renner, V. (2005). Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste (MUSE). Teilbericht B: Numerische Berechnung physikalisch konsistenter Wetterlagen mit Atmosphärenmodellen. Abschlussbericht des KFKI - Forschungsvorhabens (03KIS039).
- Kremp, C. (2011). OPTEL – C Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH - Vorhersagemodell der Nordsee. Abschlussbericht. BMBF 03KIS071/ KFKI 101. 87 Seiten.
- Länderarbeitsgruppe (1988). Bemessungswasserstände entlang der Elbe – Bericht einer Länderarbeitsgruppe. Die Küste, 47. S. 31 - 50.
- Lang, G., (2003). Analyse von HN - Modell - Ergebnissen im Tidegebiet. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. Nr. 86. S. 101 – 111.
- LSBG (2009). Extremflut 1976. Email vom 23. November 2009 von Sigrid Thumm, LSBG, an die BAW - DH mit dem Wasserstandsverlauf des Sturmflutszenarios HH_XR2010A.
- Oumeraci, H. (2008). BMBF - Forschungsverbundprojekt "Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten - Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel" (XtremRisk). Projektskizze. <https://www.tu-braunschweig.de/lwi/hyku/xtremrisk/>
- Plüß, A. (2003). Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. Die Küste, 67. S. 83-127.
- Rudolph, E. (1993). Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Ozean im Küstenbereich. Dissertation. Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg. 94 S.
- Rudolph, E. (2002). Welchen Einfluss haben sehr hohe Abflüsse der Elbe auf die Wasserstände der Tideelbe? BAW Kolloquium zu Modellierung und Analyse von Strömungs- und Transportprozessen in Ästuaren am 14. November 2002. Tagungsbände BAW - Kolloquien. <http://vzb.baw.de/publikationen.php?file=kolloquien/5/vortrag5.pdf>

- Rudolph, E. (2004). Numerische Modellierung von Sturmfluten in den Ästuaren entlang der Deutschen Bucht. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft. 54. Band. S. 211 – 216.
- Rudolph, E. (2005). Einfluss sehr hoher Abflüsse auf die Wasserstände in der Tideelbe. *promet*, 31, 2-4 S. 186 – 190.
- Rudolph, E. (2007). Sturmflutuntersuchungen für das Elbeästuar vor dem Hintergrund des beantragten Ausbaus der Seehafenzufahrt nach Hamburg. DACH 2007. Langfassung 14 MK A00011. <http://meetings.copernicus.org/dach2007/mk.html> .
- Rudolph, E. (2011). XtremRisK – Modellierung von Extremsturmfluten im Elbeästuar am Beispiel des Sturmflutszenarios HH_XR2010C. Vortrag auf dem XtremRisK Arbeitstreffen am 30. Mai 2011 beim LSBG in Hamburg.
- Rudolph, E., Schulte – Rentrop, A., Schüßler, A., Johannsen, A. (2012). Sturmfluten in den Ästuaren von Elbe, Jade - Weser und Ems – Eine Sensitivitätsstudie vor dem Hintergrund des Klimawandels. Tagungsband KIWAS Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. 2. Statuskonferenz 2011. BMVBS, Berlin. S. 135 – 138.
- Schmidt, H. und Pätsch, J. (1992). Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. *Die Küste*, 54 S. 131 – 142.
- Siefert, W. (1998). Bemessungswasserstände 2085 A entlang der Elbe – Ergebnisse einer Überprüfung durch die Länderarbeitsgruppe nach 10 Jahren (1995/1996). *Die Küste*, 60. S. 227 – 255.
- Smith, S. D. und Banke, E. G. (1975). Variation of Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed. *Quart. J. of the Roy. Met. Soc.* 101. S. 665 – 673.
- Stull, R. B., (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers. 666 S.
- Wahl; T., Mudersbach, C. Und Jensen, J. (2012). XtremRisK – Abschlussbericht Teilprojekt 1b. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen. In Vorbereitung.

8 Anhang

8.1 Rauheitsverteilung

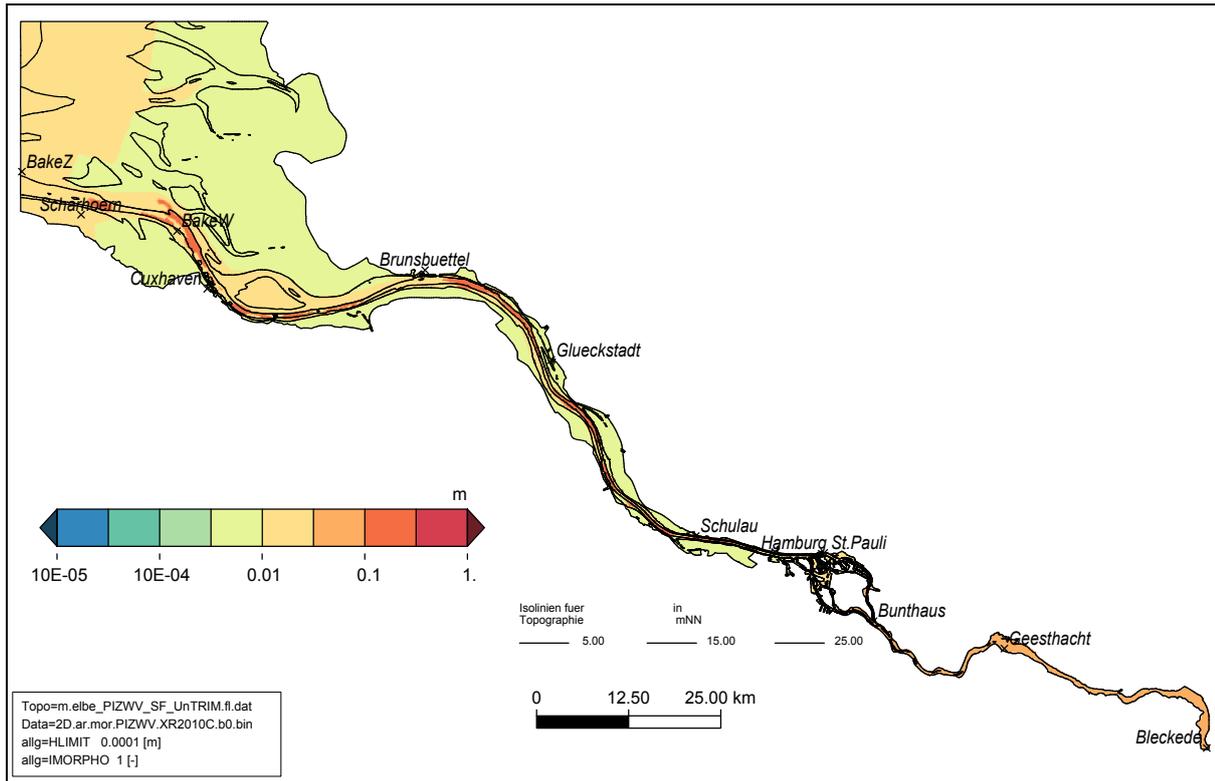


Bild 75: Effektive Sohlrauheit (auch k_s nach Nikuradse genannt) im verwendeten HN - Modell des Elbeästuares.

8.2 Salzgehaltsanfangsverteilung

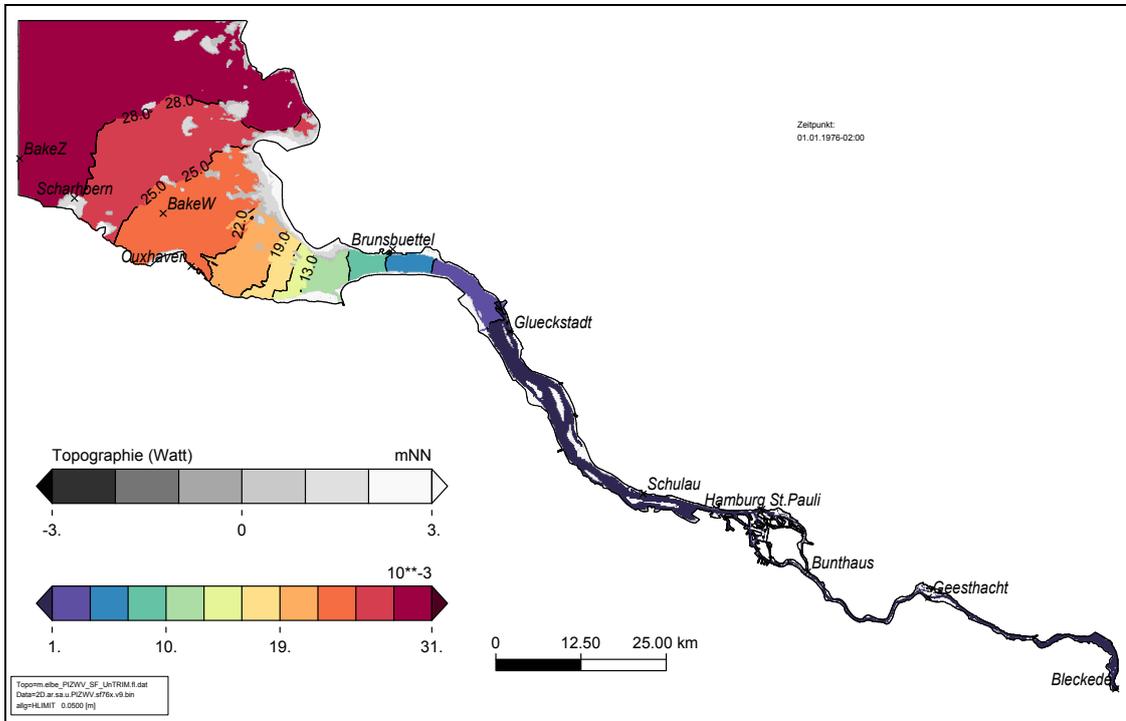


Bild 76: Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien mit einem Salzgehalt von 30 PSU am Rand zur Nordsee.

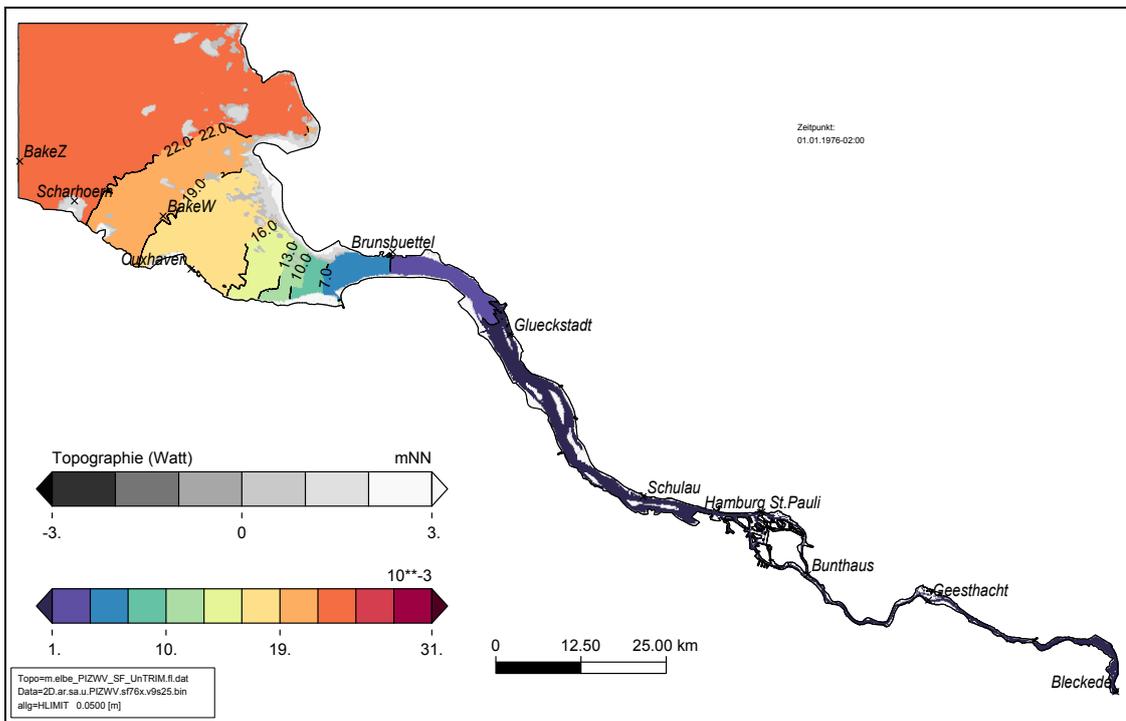


Bild 77: Salzgehaltsverteilung zu Beginn des Simulationszeitraumes für die untersuchten Sturmflutszenarien mit einem Salzgehalt von 25 PSU am Rand zur Nordsee.



Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen

Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. 0721 97 26-0 · Fax 0721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. 040 81 908-0 · Fax 040 81 908-373

Am Ehrenberg 8 · 98693 Ilmenau
Tel. 03677 669-0 · Fax 03677 669-33 33

www.baw.de