



**BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU**

Karlsruhe · Hamburg · Ilmenau

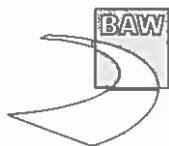


**Endbericht**

**zur**

**Durchführung einer  
wasserbaulichen Systemanalyse der  
Sturmflut „5. Allerheiligenflut“  
vom 1.11.2006**

**BAW-Nr. A3955 03 10161**





## Zusammenfassung

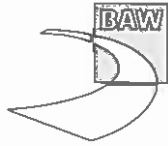
Die 5. Allerheiligenflut am 1. November 2006 führte in der Ems zu sehr hohen Sturmflut-scheitelwasserständen, an einigen Pegeln wurden die hohen Wasserstände der Sturmflut vom 13. März 1906 erreicht oder sogar überschritten.

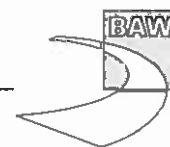
Das am 6. September 2002 in Betrieb genommene Emssperrwerk bei Gandersum dient dem Sturmflutschutz der Ems stromauf von Gandersum. Es kehrt Sturmfluten mit Wasserständen höher als NN + 3,70 m. Am 1. November 2006 wurde das Emssperrwerk bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m um 4:50 Uhr geschlossen und nach der Sturmflut um 9:05 Uhr wieder geöffnet.

Der beobachtete Wasserstandsverlauf während dieser Sturmflut warf die Frage nach dem Einfluß des Schließens des Sturmflutsperrwerkes auf die Sturmflutscheitelwasserstände auf.

In dem vorliegenden Bericht wird das Schließen des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum während der Sturmflut vom 1. November 2006 mit Hilfe eines hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modells der Ems untersucht. Die 5. Allerheiligenflut wird sowohl mit offenem Sturmflutsperrwerk als auch mit gesteuertem Sturmflutsperrwerk modelliert und die Sturmflutkenngrößen Sturmflutscheitelwasserstand HW und Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes tHW bestimmt. Der Einfluss des Schließens des Sturmflutsperrwerkes ergibt sich aus der Differenz der Sturmflutkenngrößen für geschlossenes und offenes Sturmflutsperrwerk.

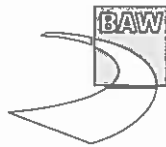
Die Ergebnisse der wasserbaulichen Systemanalyse zeigen, dass der Sturmflutscheitelwasserstand in Emden (Pegel Emden Neue Seeschleuse sowie Ems – km 40) am 1. November 2006 auf Grund des Schließens des Sturmflutsperrwerkes ca. 25 cm höher auflief und ca. 10 Minuten früher eintrat.





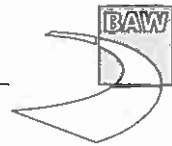
## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Veranlassung und Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Unterlagen und Daten</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Untersuchungskonzept</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>5. Allerheiligenflut am 1. November 2006</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Das mathematische Modell des Emsästuars</b>	<b>11</b>
5.1	Das numerische Verfahren UnTRIM2D . . . . .	11
5.1.1	Modellgebiet . . . . .	12
5.1.2	Gitternetz . . . . .	13
5.2	Das numerische Verfahren TRIM-2D . . . . .	16
5.2.1	Modellgebiet . . . . .	17
5.2.2	Gitternetz . . . . .	17
5.3	Modellsteuerung . . . . .	20
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Analyse 5. Allerheiligenflut</b>	<b>23</b>
6.1	Übersicht der Untersuchungsvarianten . . . . .	23
6.2	Vergleich Messungen mit Modellergebnissen . . . . .	24
6.3	Wasserstandsentwicklung am 1. November 2006 . . . . .	28
6.4	Einfluß des geschlossenen Sturmflutsperrwerkes . . . . .	32
6.5	Kenngrößen der Sturmflut 1. November 2006 . . . . .	35
6.5.1	Sturmflutscheitelwasserstand . . . . .	35
6.5.2	Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>47</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>49</b>



## Bildverzeichnis

1	Wind- und Wasserstandsentwicklung SF06: Borkum und Norderney . . . . .	8
2	Topographie des HN-Modells der Ems UTR . . . . .	14
3	Ausschnitt der Topographie des HN-Modells der Ems UTR . . . . .	15
4	Topographie des HN-Modells der Ems TR2 . . . . .	18
5	Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum im HN-Modell der Ems TR2 . . . . .	19
6	Wasserstandsentwicklung Randwertmodell SF06: Hubertgat . . . . .	21
7	Wasserstandsentwicklung Randwertmodell SF06: Borkum . . . . .	21
8	SF06 Nordsee: Windfeld 1. 11. 2006 04:00 h (LME) . . . . .	22
9	SF06 Deutsche Bucht: Windfeld 1. 11. 2006 04:00 h (LME) . . . . .	22
10	Wasserstandsentwicklung SF06: Borkum . . . . .	25
11	Wasserstandsentwicklung SF06: Knock . . . . .	25
12	Wasserstandsentwicklung SF06: Delfzijl . . . . .	26
13	Wasserstandsentwicklung SF06: Emden . . . . .	26
14	Wasserstandsentwicklung SF06: Pogum . . . . .	27
15	Wasserstandsentwicklung SF06: Gandersum . . . . .	27
16	Wasserstandsentwicklung SF06offen, SF06zu350: Borkum . . . . .	29
17	Wasserstandsentwicklung SF06offen, SF06zu350: Knock . . . . .	29
18	Wasserstandsentwicklung SF06offen, SF06zu350: Delfzijl . . . . .	30
19	Wasserstandsentwicklung SF06offen, SF06zu350: Emden . . . . .	30
20	Wasserstandsentwicklung SF06offen, SF06zu350: Pogum . . . . .	31
21	Wasserstandsentwicklung SF06offen, SF06zu350: Gandersum . . . . .	31
22	Wasserstandsentwicklung am Emssperrwerk Gandersum SF06 . . . . .	33
23	Wasserstandsentwicklung am Pegel Pogum SF06 . . . . .	34
24	Sturmflutscheitelwasserstand HW SF06offen (Fläche, UTR) . . . . .	36
25	Sturmflutscheitelwasserstand HW SF06zu350 (Fläche, UTR) . . . . .	37
26	Änderung Sturmflutscheitelwasserstand dHW SF06zu350 (Fläche, UTR) . . . . .	37
27	Sturmflutscheitelwasserstand HW SF06zuKEbbe (Fläche, UTR) . . . . .	38
28	Änderung Sturmflutscheitelwasserstand dHW SF06zuKEbbe (Fläche, UTR) . . . . .	38
29	Sturmflutscheitelwasserstand HW SF06zuimmer (Fläche, UTR) . . . . .	39
30	Änderung Sturmflutscheitelwasserstand dHW SF06zuimmer (Fläche, UTR) . . . . .	39
31	Topographie in Fahrrinnenmitte (Ems-LP, gesamt) . . . . .	41
32	Sturmflutscheitelwasserstand HW SF06 (Ems-LP, gesamt) . . . . .	41
33	Sturmflutscheitelwasserstand HW SF06 (Ems-LP) . . . . .	42
34	Änderung Sturmflutscheitelwasserstand dHW SF06 (Ems-LP) . . . . .	42
35	Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW SF06 (Ems-LP) . . . . .	43
36	Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW SF06offen (Fläche, UTR) . . . . .	44
37	Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW SF06zu350 (Fläche, UTR) . . . . .	44
38	Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW SF06zuKEbbe (Fläche, UTR) . . . . .	45
39	Eintrittszeit Sturmflutscheitelwasserstand tHW SF06zuimmer (Fläche, UTR) . . . . .	45



## Tabellenverzeichnis

1	Historische Sturmfluten an der Ems . . . . .	9
2	Übersicht Oberwasserereignisse . . . . .	9
3	Liste der Untersuchungsvarianten 5. Allerheiligenflut . . . . .	23
4	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	47



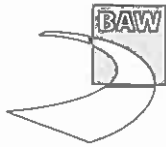
## Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
BAW - DH	Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg
Bft	Beaufort, Windstärkegrad
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
BSÖ	Binnenschifffahrtsöffnung
BWst	Bemessungswasserstand
$C_D$	Impulsaustauschkoeffizient
CSM	Coastal Shelf Model
DEK	Dortmund – Ems – Kanal
DGJ	Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch
DGM	Digitales Geländemodell
dHW	Änderung des höchster Wasserstands HW
DIN	Deutsches Institut für Normung, Deutsche Norm
dtHW	Änderung der Eintrittszeit des Hochwassers tHW
DWD	Deutscher Wetterdienst
FF	Stationen mit Stundenwerten Wind des DWD
GF	Geschäftsfeld
HHQ	höchster bekannter Wert des Oberwasserabfluß (DIN 4049-3)
HHThw	höchster bekannter Wert des Tidehochwassers (DIN 4049-3)
HN – Modell	hydrodynamisch – numerisches Modell
HSÖ	Hauptschifffahrtsöffnung
HW	höchster Wasserstand in einem Zeitraum (DIN 4049-3)
LP	Längsprofil
LP – Ems	Längsprofil entlang des Emsfahrwassers
LME	Lokalmodell des DWD, Wettervorhersagemodell
MTnw	mittleres Tideniedrigwasser (DIN 4049-3)
NAP	Normal Amsterdamsch Peil
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NN	Normalnull
NÖ	Nebenöffnung
NW	Niedrigwasser (DIN 4049-3)
OP	Pegel im Oberwasser des Wehres





Abkürzung	Vollständige Bezeichnung
PIZ	planerischer Ist – Zustand
PN	Pegelnnull
prf	Profil
RIKZ	Rijksinstituut voor Kust en Zee
SF	Sturmflut
SF1	synthetische Sturmflut, erreicht die Bemessungswasserstände in der Unterems (Niemeyer, 1997)
SF2	synthetische Sturmflut, erreicht die Niederländischen Bemessungswasserstände in der Außenems (Phillippart, M.E. et al., 1995)
SF06	Sturmflut 1. November 2006, auch 5. Allerheiligenflut
SF06offen	Schließszenario: Sperrwerk offen (s. Tabelle 1 auf Seite 9)
SF06zu350	Schließszenario: Sperrwerk geschlossen bei Wasserstand NN + 3,50 m (s. Tabelle 1)
SF06zuKEbbe	Schließszenario: Sperrwerk geschlossen bei Wasserstand bei Kenterung Ebbe (s. Tabelle 1)
SF06zuimmer	Schließszenario: Sperrwerk permanent geschlossen (s. Tabelle 1)
SF94	Sturmflut 28. Januar 1994
SKN	Seekartennull
SPW	Sperrwerk, hier Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum
SY	Synoptische Stationen des DWD
tHW	Eintrittszeit des HW (DIN 4049-3)
TRIM-2D	Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model, Name eines hydrodynamischen numerischen Modells
TR2	HN – Modell der Ems mit HN – Verfahren TRIM2D
UnTRIM	Unstructured TRIM, Name eines hydrodynamischen numerischen Modells
UTR	HN – Modell der Ems mit HN – Verfahren UnTRIM2D
UP	Pegel im Unterwasser des Wehres
WaStrG	Bundeswasserstraßengesetz
WSA	Wasser- und Schifffahrtsamt
WSD	Wasser- und Schifffahrtsdirektion
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes



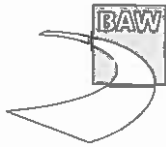


## 1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Das Land Niedersachsen, vertreten durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), betreibt seit September 2002 in der Bundeswasserstraße Ems das Emssperrwerk zurkehrung von Sturmfluten mit Wasserständen höher als NN + 3,70 m am Sperrwerk Gandersum. Durch dieses Sturmflutbauwerk wird der Küstenschutz oberhalb Gandersum - Nendorp bis in den Raum Papenburg sichergestellt.

Der NLWKN hat nach der 5. Allerheiligenflut vom 1. November 2006 der Öffentlichkeit zugesagt, die Auswirkungen dieser Sturmflut im Zusammenhang mit der Schließung des Sperrwerkes untersuchen zu lassen, weil außergewöhnlich hohe Scheitelwasserstände in der Ems unterhalb des Emssperrwerkes eintraten, die insbesondere in Ditzum und Emden beträchtlichen Schäden verursachten. Der beobachtete Wasserstandsverlauf der Sturmflut führte im Besonderen zu der Frage nach den Wirkungen auf die Wasserstandsverhältnisse, die durch das Schließen des Sperrwerkes ausgelöst werden können.

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde vom NLWKN zeitnah zur Sturmflut am 1. November 2006 zunächst mündlich beauftragt, Untersuchungen zur Auswirkung der Sperrwerksschließung auf die Wasserstände durchzuführen. Aufgrund der Ausweitung des Untersuchungsrahmens wurde zwischen NLWKN und BAW mit Datum vom 07. Juni 2007 auf Basis der im November 2006 abgestimmten Randbedingungen ein Ingenieurvertrag abgeschlossen. Die BAW wurde beauftragt, mit einem HN - Modell der Ems zunächst eine naturähnliche Modellierung der 5. Allerheiligenflut durchzuführen. Auf der Grundlage weitergeführter Modelluntersuchungen für verschiedene Schließszenarien des Emssperrwerkes war nach dem erfolgreichen Nachweis einer naturähnlichen Simulation der Einfluss der am 1. November 2006 durchgeführten Schließung im Detail zu analysieren. Im Ergebnis soll der beauftragte Bericht eine wissenschaftlich abgesicherte und fachlich belastbare Einschätzung zur Wirkung des geschlossenen Sturmflutsperrwerkes auf die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände im Emdener Fahrwasser, dem Dollartgebiet und in der Außenems liefern.





## 2 Unterlagen und Daten

Zur Erstellung der Topographie werden folgende Unterlagen verwendet:

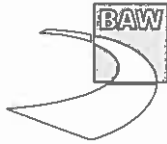
- Konsistente Digitale Bathymetrie KoDiBa 2005 des WSA Emden (smile consult, 2006) mit Grundlage Peilung 2005.
- Befliegungsdaten der Vorlandhöhen stromauf von Herbrum (Bezirksregierung Weser Ems, 2000).

Zur Steuerung des HN-Modells während der untersuchten Sturmflut 1. November 2006 werden folgende Daten verwendet:

- Wasserstandsentwicklung am seeseitigen Rand aus dem Nordseemodell der BAW (Plüß, A., 1999 bzw. Plüß, A., 2003).
- Windfelder aus dem Wettervorhersagemodell LME des DWD (Steppeler, J. et al., 2002) bereitgestellt vom BSH,
- Oberwasserabfluss Ems bei Versen bereitgestellt vom NLWKN,
- Oberwasserabfluss Leda bereitgestellt vom NLWKN,
- Kopie des Betriebsbuches des Ledasperrwerkes mit den Sperrzeiten im Oktober und November 2006 bereitgestellt vom NLWKN,
- Kopien der Wehrberichte des Wehres Bollingerfähr und des Wehres Herbrum mit den Wehrhöhen im Oktober und November 2006 bereitgestellt vom NLWKN,
- Kopie des Protokolles der Torsteuerung des Emssperrwerkes bei Gandersum am 1. November 2006 bereitgestellt vom NLWKN.

Zusätzlich lagen folgende Daten vor:

- Wasserstandsmessungen aus dem Oktober und November 2006 an den Orten Borkum Südstrand, Borkum Fischerbalje, Emshörn, Dukegat, Knock, Emden Neue Seeschleuse, Pogum, Emssperrwerk Gandersum UP, Emssperrwerk Gandersum OP, Terborg, Leerort, Ledasperrwerk OP, Weener, Papenburg, Rhede, Herbrum Hafendamm, Herbrum Wehr UP, Herbrum Wehr OP, Bollingerfähr OP, Bollingerfähr UP, Bensorsiel, Harlesiel, Harlingsiel, Leyhörn und Norderney Riffgat bereitgestellt vom NLWKN,
- Wasserstandsmessungen aus dem Oktober und November 2006 an den Orten Hubertgat, Eemshaven, Delfzijl, Nieuwe Statenzijl aus der *waterbase* des RIKZ bereitgestellt vom NLWKN,
- Salzgehaltsmessungen aus dem Oktober und November 2006 an den Orten Knock, Emden Westmole, Pogum, Gandersum, Terborg, Leer Leda, Weener und Papenburg bereitgestellt vom NLWKN,



- Strömungsmessungen im Bereich des Gatjebogens bereitgestellt vom WSA Emden,
- Messwerte der Windgeschwindigkeit und Windrichtung für Oktober und November 2006 aus dem Klimainformationssystem (Messnetz FF bzw. SY) des DWD für die Stationen Borkum, Emden und Norderney bereitgestellt vom DWD.

Das Literaturverzeichnis nennt die von der BAW erstellten Gutachten und Berichte zum Einfluss des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum auf Sturmfluten.



### 3 Untersuchungskonzept

In diesem Bericht wird die Wirkung des geschlossenen Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum auf die Sturmflutscheitelwasserstände der Ems während der 5. Allerheiligenflut vom 1. November 2006 untersucht. Dies geschieht im Vergleich zum Zustand der Ems mit offenem Sperrwerk.

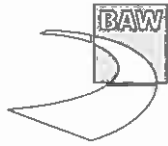
Das Untersuchungsgebiet wird so gewählt, dass der gesamte Einflussbereich des Sturmflutsperrwerkes untersucht werden kann. Es reicht von Rottum über Borkum bis Juist im Nordwesten und wird im Süden durch das Wehr Herbrum begrenzt. Bei einer gekehrten Sturmflut trennt das Sturmflutsperrwerk die Ems in zwei Teilgebiete: Die Außenems wird weiter durch das Sturmflutgeschehen in der Deutschen Bucht und der Nordsee beeinflusst. Die Wasserstände in der durch das Sturmflutsperrwerk geschützten Unterems stromauf von Gandersum sind abhängig von Oberwasserzufluss und Wind.

Für die Untersuchungen werden im Rahmen der wasserbaulichen Systemanalyse die hydrodynamischen Zustandsgrößen für den Zustand offenes Sperrwerk (SF06offen) und den Zustand geschlossenes Sperrwerk (SF06zu350) für eine gleichbleibende hydrologische Situation (hier 5. Allerheiligenflut) mit einem hochauflösenden zweidimensionalen hydrodynamisch – numerischen (HN –) Modell flächendeckend ermittelt. Die Ergebnisse sind die Grundlage für die Berechnung und die Analyse der sperrwerksbedingten Änderungen in der Höhe und der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes. Die Vorgabe der gleichen hydrologischen und meteorologischen Situation für die Berechnung beider Zustände ermöglicht die eindeutige physikalische Zuordnung von Veränderungen der Hydrodynamik auf die zu untersuchende Maßnahme.

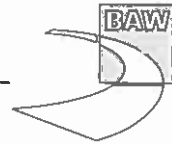
Im vorliegenden Bericht werden die Auswirkungen des geschlossenen Sturmflutsperrwerkes auf die Sturmflutscheitelwasserstände auf der Grundlage einer Systemanalyse untersucht. Hierfür werde zwei Zustände des Sturmflutsperrwerkes Ems betrachtet:

- Systemzustand PIZ mit bei Sturmflut offenem Sturmflutsperrwerk Gandersum,
- Systemzustand PIZ mit bei Sturmflut geschlossenem Sturmflutsperrwerk Gandersum.

PIZ bezeichnet den Zustand der Ems im Jahr 2005 mit einer Fahrrinne im planerischen Ist – Zustand. Da für Anfang November 2006 die Überführung eines Werftschiffes von Papenburg nach Gandersum (Norwegian Pearl, geplante Überführung für 4. November 2006, überführt am 7. November 2006) vorgesehen war, befand sich die Unterems zum Zeitpunkt der Sturmflut am 1. November 2006 bereits im planfestgestellten planerischen Ist – Zustand PIZ.







## 4 5. Allerheiligenflut am 1. November 2006

Am 1. November 2006 hat ein schwerer Nordweststurm über der Nordsee zu hohen Wasserständen in der Deutschen Bucht und besonders in der Emsmündung geführt. Die 5. Allerheiligenflut gehört zu den schwersten Sturmfluten der letzten 100 Jahre an der niedersächsischen Nordseeküste.

Eine ausführliche Beschreibung der meteorologischen Situation, die zu dieser Sturmflut führte, gibt der DWD (DWD, 2006): *Zunächst fiel in den Abendstunden des 31. Oktober die Zunahme des Windes und seine Drehung auf Nordwest nach dem Durchgang der 2. Kaltfront mit dem abendlichen Tidehochwasser zusammen. Das wirkte sich zu diesem Zeitpunkt aber kaum auf die Hochwasserstände aus, behinderte aber nachfolgend bei weiter ansteigenden Windgeschwindigkeiten das Abfließen des Wassers. In den Morgenstunden erhöhte sich der Windstau mit Durchgang der Troglinie, der mit einer sprunghaften Windzunahme und einer Winddrehung auf Nordnordwest bis Nord verbunden war, noch einmal deutlich. Er bewirkte, dass an der ostfriesischen Küste etwa eine Stunde vor Eintritt des Tidehochwassers die höchsten Pegelstände erreicht wurden.*

Bild 1 auf der nächsten Seite zeigt sowohl die gemessene Entwicklung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung an den Windmessstationen Borkum und Norderney des DWD als auch die gemessene Wasserstandsentwicklung am Pegel Borkum Fischerbalje und Norderney Riffgat während der 5. Allerheiligenflut. Man erkennt am Abend des 31. Oktober 2006 gut den vom DWD beschriebenen Einfluß des starken Windes auf die Wasserstände in der Außenems. Ab 18:00 Uhr nimmt die Windgeschwindigkeit zu und die Windrichtung dreht von West (270 °) auf Nordnordwest (315 °). Das Niedrigwasser NW gegen 24:00 Uhr ist mit NN + 1,00 m deutlich höher als das MTnw (NN - 1,30 m). Der starke Nordwestwind verhindert das Abfließen des Wassers. Im Laufe der folgenden Stunden nimmt der Wind aus nördlichen Richtungen weiter zu (20 m/s entspricht stürmischem Wind mit Bft. 8, 25 m/s entspricht schwerem Sturm mit Bft. 10) und drückt das Wasser gegen die Küste (siehe auch Bild 8 und 9 auf Seite 22). Der relativ rasch ansteigende Wasserstand erreicht auf Borkum mit NN + 3,86 m einen Wert nur 20 cm unter dem HHThw von 1906 (NN + 4,06 m, siehe auch Tabelle 1).

Das Emssperrwerk bei Gandersum dient dem Sturmflutschutz der Ems stromauf von Gandersum. Es kehrt Sturmfluten mit Wasserständen höher als NN + 3,70 m. Das Sperrwerk wird dann bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m bei Gandersum geschlossen. Am 1. November 2006 wurden vom NLWKN Wasserstände über NN + 3,70 m erwartet, die auch wie vorhergesagt eintraten. Das Sperrwerk wurde am 1. November 2006 zwischen 4:35 Uhr und 4:50 Uhr innerhalb von 25 Minuten geschlossen und bei ausgeglichenem Wasserstand zwischen 9:05 Uhr und 9:45 Uhr innerhalb von 40 Minuten wieder geöffnet (siehe auch Tabelle 3 auf Seite 23). In dem durch das Sturmflutsperrwerk geschützten Bereich der Ems zwischen Gandersum und Herbrum wurden am 1. November 2006 lediglich Wasserstände kleiner als NN + 3,50 m beobachtet.

Anfang November 2006 lag der Oberwasserzufluß in die Ems bei ca. 32 m<sup>3</sup>/s. Aufgrund dieser geringen Werte stieg der Wasserstand stromauf des Sturmflutsperrwerkes nur sehr langsam an. Zur Einordnung der Oberwassermenge sei auf Tabelle 2 verwiesen.

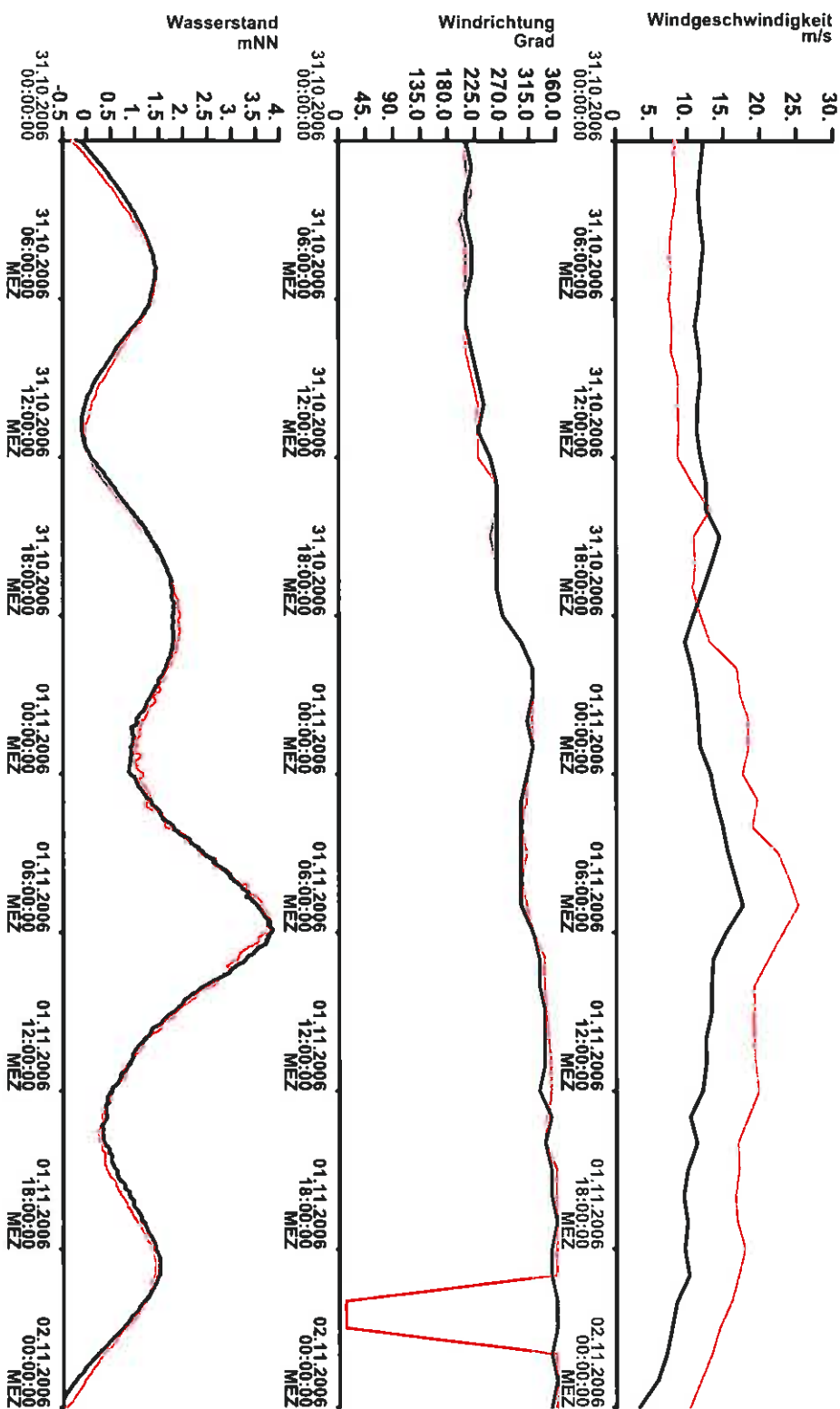
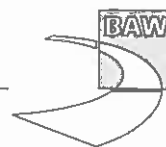


Bild 1: Messung der Windgeschwindigkeit (oben) und Windrichtung (Mitte) vom 31. Oktober bis zum 2. November 2006 auf Borkum (FF 01083, schwarz) und Norderney (FF 01055, rot). Messung des Wasserstands (unten) vom 31. Oktober bis zum 2. November 2006 am Pegel Borkum Fischerhalje (schwarz) und Norderney Riffgat (rot).

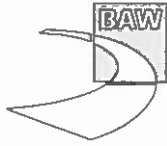


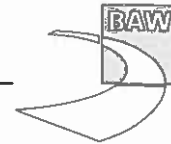
Sturmflut	Pogum [mNN]	Emden [mNN]	Knock [mNN]	Delfzijl [mNAP]	Borkum [mNN]
13. 03. 1906	5,24	5,18	–	4,51	4,06
16. /17. 02. 1962	4,92	4,76	4,47	4,46	3,80
03. /04. 01. 1976	4,50	4,30	4,08	4,35	3,24
21. 01. 1976	4,49	4,38	4,08	4,08	3,42
28. 01. 1994	4,77	4,62	4,39	4,25	3,44
01. 11. 2006	5,32	(5,17)	5,01	4,83	3,86
SF1	6,31	6,12	–	–	–
BWst(2007)	6,31	6,12	–	(5,95)	–

Tabelle 1: *Historische Sturmfluten an der Ems. Die HHThw sind kursiv geschrieben. Sie stammen für Pogum, Emden und Borkum von 1906 und für Delfzijl von 1901 mit NAP + 4,53 m. Erst am 1. November 2006 wurde in Pogum und Delfzijl ein neues HHThw erreicht. Die Messung Emden am 1. November 2006 mußten auf Grund eines Geräteausfalles vom WSA Emden ergänzt werden. Bei der Interpretation der bis zu 100 Jahre alten Messungen ist zu beachten, dass die historischen Wasserstände nicht mit dem jeweils beobachteten säkularen Meeresspiegelanstieg auf heutiges Niveau gebracht wurden, z. B. mit 25 cm/100 Jahre für Emden. (Quellen: NLWKN, WSA Emden, DGJ, 2006, NLWKN, 2007, Rijkswaterstaat, 2006, Phillippart, M.E. et al., 1995 und Niemeyer, 1997).*

MNQ (mittlerer niedrigster Abfluss)	16 m <sup>3</sup> /s
MQ (mittlerer Abfluss)	81 m <sup>3</sup> /s
MHQ (mittlerer höchster Abfluss)	378 m <sup>3</sup> /s
HHQ (höchster bekannter Abfluss, 12. 2. 1946)	1200 m <sup>3</sup> /s
Abfluss während der Sturmflut 3. 1. 1976	114 m <sup>3</sup> /s
Abfluss während der Sturmflut 28. 1. 1994	346 m <sup>3</sup> /s
Abfluss während der Sturmflut 1. 11. 2006	32 m <sup>3</sup> /s
Abfluss während der Bemessungssturmflut (SF1)	700 m <sup>3</sup> /s

Tabelle 2: *Oberwasserereignisse der Ems bei Versen - Wehrdurchstich (DEK – km 235) bezogen auf den Zeitraum 1941/2003 (aus: DGJ, 2006). Der Oberwasserzufluß Herbrum ergibt sich durch Multiplikation mit 1.1 aus dem Wert für Versen.*





## 5 Das mathematische Modell des Emsästuars

Die Auswahl des geeigneten Modellverfahrens, das Festlegen des zu untersuchenden Modellgebietes und die geometrische Auflösung der Topographie sind abhängig von der Aufgabenstellung und bestimmen Prognose- bzw. Diagnosefähigkeit mathematischer Modelle.

Während der 5. Allerheiligenflut am 1. November 2006 wurden in der Ems an unterschiedlichen Orten Wasserstands- und Strömungsmessungen durchgeführt (siehe Abschnitt 2). Die räumliche Verteilung dieser Messorte (siehe Bild 2 auf Seite 14) reicht jedoch nicht aus, um ein umfassendes Bild der Wasserstands- und Strömungssituation während der Sturmflut im gesamten Emsästuar zu erhalten.

Statt einer Interpolation der Messwerte durchzuführen, wird ein hydronumerisches (HN-) Modell eingesetzt, das aus vorgegebenen Rand- und Anfangswerten flächendeckend Wasserstand und Strömung in der Ems berechnen kann. Für die hier vorliegenden Untersuchungen werden zwei unterschiedliche hydronumerische Modellverfahren, *UnTRIM2D* (Casulli, V. und Walters, R.A., 2000) und *TRIM-2D* (Cheng, R.T. et al., 1993) eingesetzt.

Auf der Grundlage der beiden genannten HN-Verfahren werden unter Berücksichtigung der Topographie des Emsästuares zwei Modelle der Ems gebildet. Zur Unterscheidung der Modellergebnisse werden sie je nach verwendetem HN-Verfahren mit *UTR* bzw. *TR2* gekennzeichnet.

### 5.1 Das numerische Verfahren UnTRIM2D

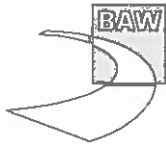
Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im *Mathematical Model UnTRIM-Validation Document* (BAW, 2004). *UnTRIM* ist ein Finite Differenzen / Finite Volumen Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf einem unstrukturierten orthogonalen Gitter löst. Grundlage des Verfahrens *UnTRIM* sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für das Wasservolumen und den Impuls der Strömung darstellen. Zur Modellierung von Sturmfluten wird die tiefenintegrierte Version von *UnTRIM2D* verwendet.

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

- Wasserspiegelauslenkung (bezogen auf NN) und
- Strömungsgeschwindigkeit (tiefengemittelt).

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

- Gezeiten,
- Oberwasserzufluss,
- Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen,
- Sohlreibung,



- Impulseintrag durch Wind,
- turbulente Diffusion des Strömungsimpulses,
- Corioliskraft sowie den
- advektiven Impulstransport.

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

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

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

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

berechnet.

### 5.1.1 Modellgebiet

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

1. Der mit einem vorgegebenen zeitlichen Wasserstandsverlauf zwangsgesteuerte offene seeseitige Rand muss hinreichend weit von den durchgeführten Maßnahmen, hier Kehrung der Sturmflut, in der Tideems entfernt sein. Zu gewährleisten ist, dass die für die Modellsteuerung erforderlichen Tideparameter am seeseitigen Rand nicht wesentlich durch die zu untersuchenden Maßnahmen beeinflusst sind.
2. Die zu untersuchenden Maßnahmen beeinflussen den gesamten Lauf der Tideems, so dass das Modellgebiet bis zur Grenze des Sturmfluteinflusses am Wehr Herbrum reichen muss.
3. Der Einfluß des Leda-Jümme-Gebietes auf die Tidedynamik des Emsästuars muss in dem Modell nachgebildet sein.

Ausgehend von den vorstehend ausgeführten Kriterien wurde das in Bild 2 auf Seite 14 dargestellte Modellgebiet gewählt. Der seeseitige Rand des Modellgebietes liegt westlich der Inselkette Rottum-Borkum-Juist-Norderney. Landseitig endet das Modell am Wehr Herbrum. Das Gebiet der Tideems ist bis zur Deichlinie nachgebildet. Bild 3 auf Seite 15 zeigt



als Ausschnitt das die Modelltopographie von Ems und Dollart zwischen Dukegat und dem Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum.

Zur Erstellung der Modelltopographie stand die Datenbasis KoDiBa (Grundlage Peilung 2005) des WSA Emden zu Verfügung (smile consult, 2006). Eine Beschreibung der Erstellung der Modelltopographie für den planerischen Ist – Zustand (PIZ) wird in Kapitel 5 des Gutachtens zu Anpassungsmaßnahmen an der Unterems zur Überführung großer Werftschiffe (BAW, 2007a) gegeben.

### 5.1.2 Gitternetz

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

- Anzahl der Knoten: 136907
- Anzahl der Kanten: 351016
- Anzahl der Polygone: 214104
- Kantenlänge: 3 m bis 1000 m
- Elementflächen: 7,5 m<sup>2</sup> bis 0,51 km<sup>2</sup>.

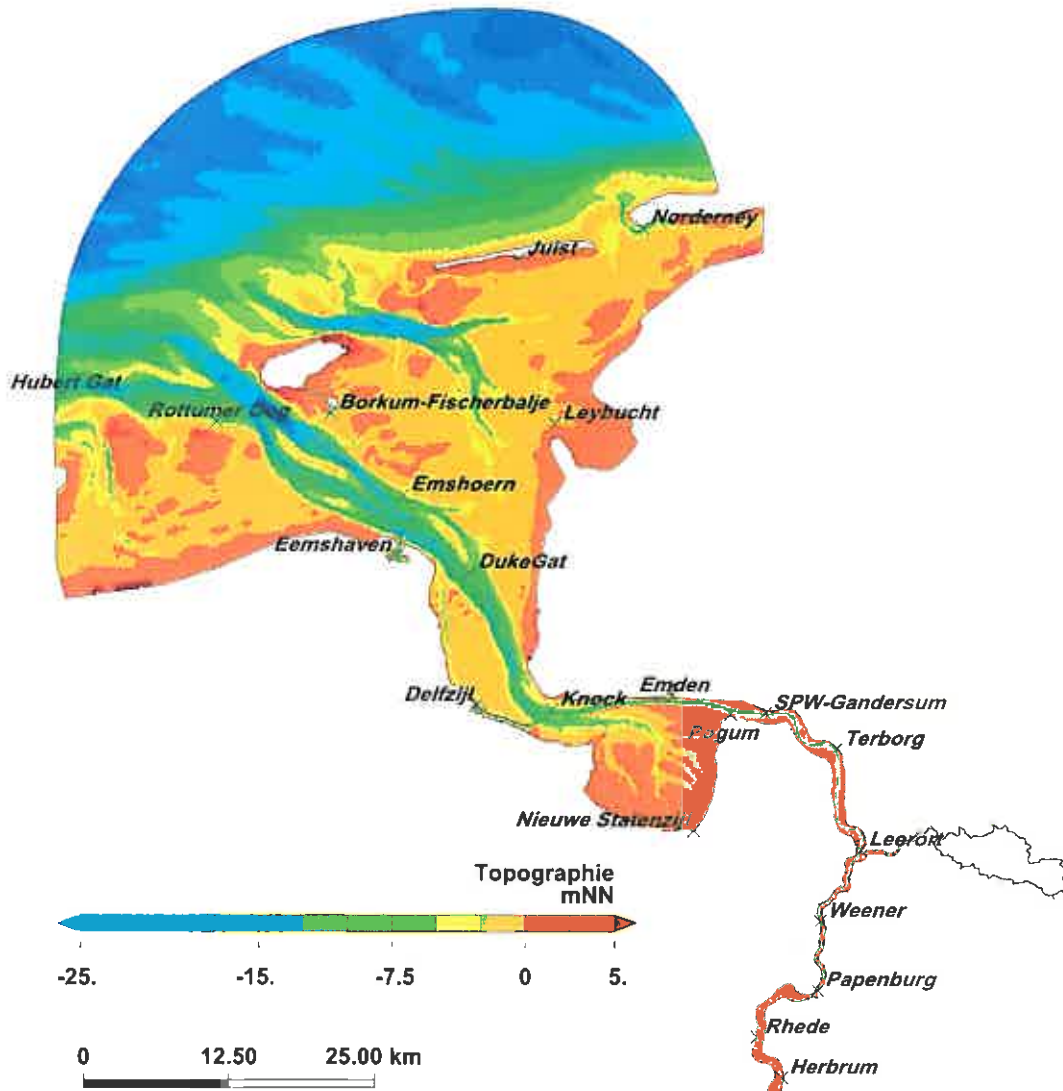


Bild 2: Topographie des HN-Modells der Ems UTR (HN – Verfahren UnTRIM2D) mit ausgewählten Pegelorten.



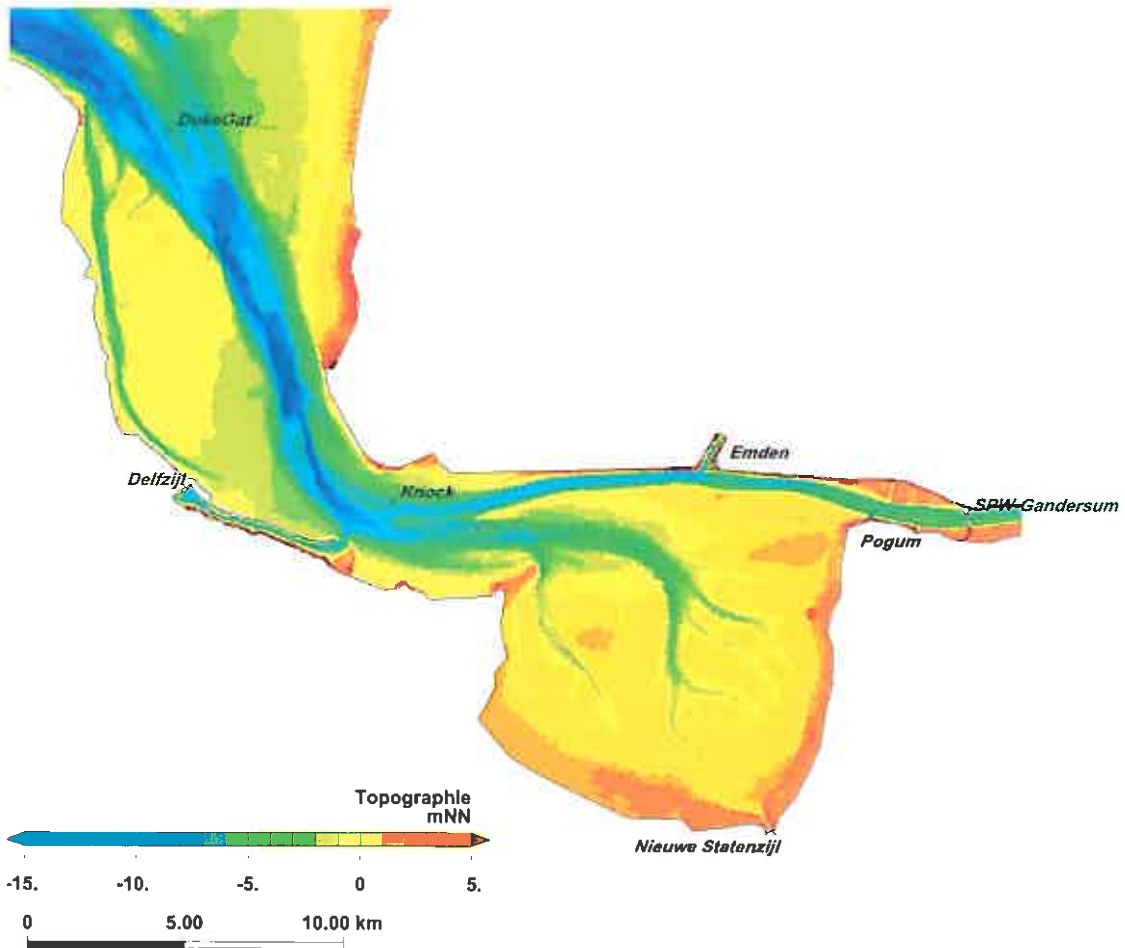
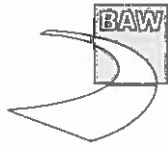


Bild 3: Ausschnitt aus der Topographie des HN-Modells der Ems UTR (HN-Verfahren UnTRIM2D) zwischen Dukegat und dem Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum mit ausgewählten Pegelorten. Die Lage der eingezeichneten Pegel entspricht der Lage der Pegel im HN-Modell der Ems UTR.



## 5.2 Das numerische Verfahren TRIM-2D

Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich im *Validierungsdokument HN-Verfahren TRIM-2D* (BAW, 1998c). Weitere grundlegende Informationen über den Kern des HN-Verfahrens *TRIM-2D* sind in mehreren Veröffentlichungen enthalten (Casulli, V., 1990, Casulli, V. und Cattani, E., 1992, Casulli, V. und Cheng, R.T., 1992, Cheng, R.T. et al., 1993). *TRIM-2D* ist ein zweidimensionales Finite Differenzen Verfahren, das die Flachwassergleichungen auf numerischem Wege löst. Grundlage des Verfahrens *TRIM-2D* sind Differentialgleichungen, die eine mathematische Formulierung der physikalischen Erhaltungssätze für die Wassermasse und den Impuls der Strömung darstellen. Mit diesem Berechnungsverfahren können flächendeckend für jeden aktiven Gitterpunkt und Zeitschritt u. a. folgende physikalischen Größen berechnet und ausgegeben werden:

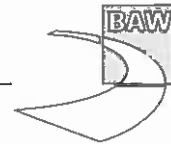
1. Wasserspiegelauslenkung (bezüglich NN) und
2. Strömungsgeschwindigkeit (tiefengemittelt).

Bei der Berechnung der aufgezählten physikalischen Größen berücksichtigt das mathematische Modell der Ems folgende, die Tidedynamik beeinflussenden Prozesse:

- Gezeiten,
- Oberwasser der Ems,
- Trockenfallen und Überfluten von Wattflächen,
- Sohlreibung,
- Impulseintrag durch Wind,
- zeitvariable Höhenlage von Sohlschwellen (Wehre und Sperrwerke),
- Corioliskraft,
- advektiven Impulstransport und
- turbulente Diffusion des Strömungsimpulses.

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 hydrodynamischen numerischen Modell berücksichtigt werden. Der Impulseintrag aus der Atmosphäre wird durch die Windschubspannung

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



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

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

berechnet. Da der Salzgehalt für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände von untergeordneter Bedeutung ist, wird auf die Simulation des Salzgehaltes bei Sturmfluten verzichtet.

## 5.2.1 Modellgebiet

Ausgehend von den in Abschnitt 5.1.1 auf Seite 12 genannten Kriterien wurde das in Bild 4 auf der nächsten Seite dargestellte Modellgebiet gewählt. Der seeseitige Rand des Modellgebietes liegt westlich der Inselkette Rottum-Borkum-Juist. Landseitig endet das Modell am Küstenkanal. Das Leda-Jümme-Gebiet ist als Ersatzsystem (im Vergleich zum natürlichen Verlauf ist das Ersatzsystem gedreht und gespiegelt) nachgebildet. Bei naturähnlicher Nachbildung des Flutraumes wird gewährleistet, dass die Phase und der zeitliche Verlauf des Wasserstandes sowie des Durchflusses am Ledasperrwerk naturähnlich sind. Das Gebiet der Tideems ist bis zur Deichlinie nachgebildet. Bild 5 auf Seite 19 zeigt als Ausschnitt das in der Modelltopographie nachgebildete Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum. Zu erkennen sind die sechs Pfeiler in der Ems sowie die sieben Schifffahrtsöffnungen.

Zur Erstellung der Modelltopographie stand die Datenbasis KoDiBa (Grundlage Peilung 2005) des WSA Emden zu Verfügung (smile consult, 2006). Eine detaillierte Beschreibung der Erstellung der Modelltopographie für den planerischen Ist-Zustand (PIZ) gibt Kapitel 5 des Gutachtens zu Anpassungsmaßnahmen an der Unterems zur Überführung großer Werftschiffe (BAW, 2007a, BAW, 2007b und BAW, 2002a).

## 5.2.2 Gitternetz

Das dem HN-Modell der Ems zugrunde liegende Gitternetz ist aus quadratischen Gitterelementen aufgebaut und überdeckt das Modellgebiet vollständig. Das Gitternetz des mathematischen Modelles der Tideems wird durch folgende Angaben näher beschrieben:

### Größe des Gitternetzes

- Anzahl der Gitterzellen in Ost-West-Richtung: 4701
- Anzahl der Gitterzellen in Nord-Süd-Richtung: 5996
- Gesamtzahl der feuchten Gitterzellen: 6 448 650

### Räumliche Diskretisierung

- Gitterweite in Ost-West-Richtung:  $\Delta x = 15$  m
- Gitterweite in Nord-Süd-Richtung:  $\Delta y = 15$  m.

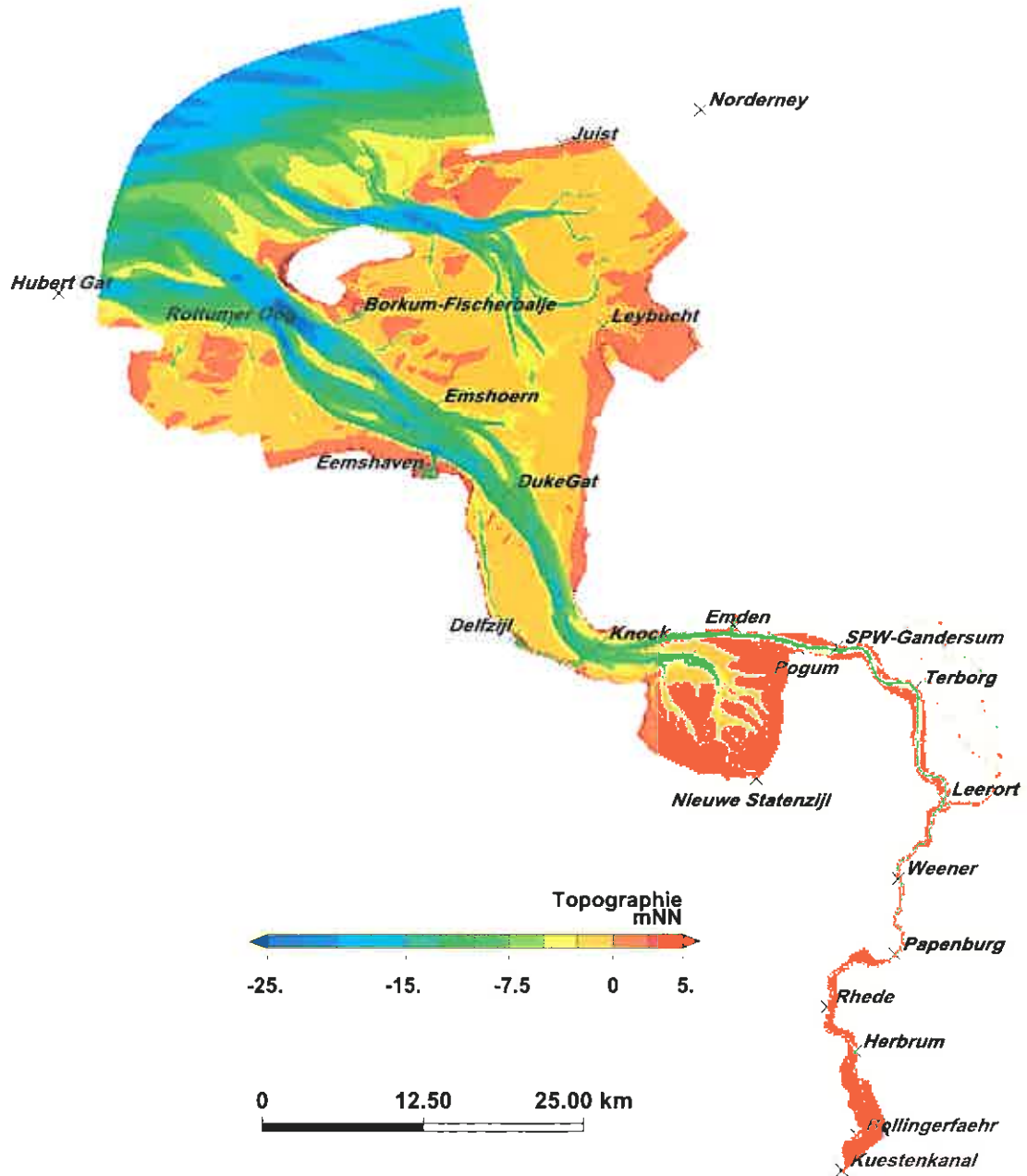


Bild 4: Topographie des HN-Modells der Ems TR2 (HN-Verfahren TRIM2D) mit ausgewählten Pegelorten. Zur Orientierung sind auch die außerhalb des Modellgebietes liegenden Pegel Hubertgat und Norderney eingezeichnet.

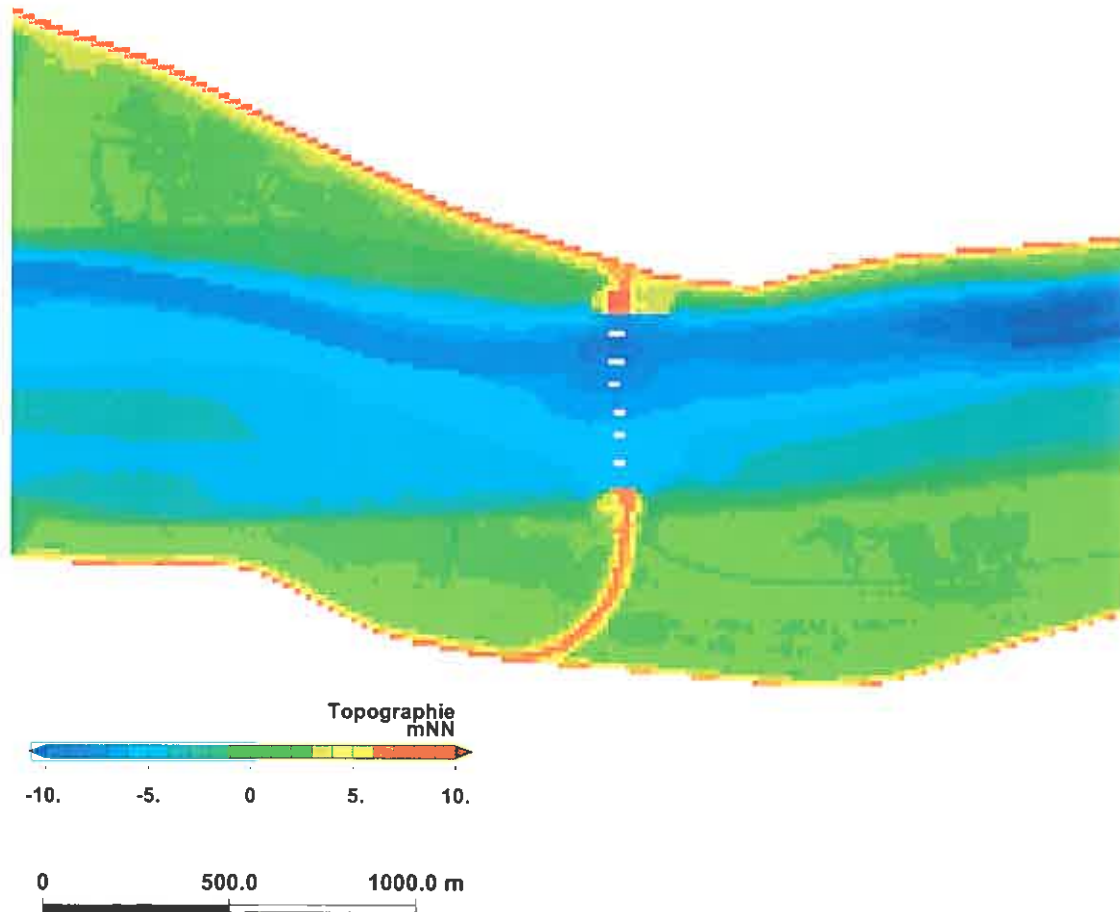


Bild 5: Ausschnitt aus der Topographie des HN-Modells der Ems TR2 (HN-Verfahren TRIM2D) mit der Lage des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum. Die sieben Durchflussöffnungen werden von Nord nach Süd wie folgt bezeichnet: Neben-, Hauptschiffahrts-, Binnenschiffahrts-, sowie vier weitere Nebenöffnung.

### 5.3 Modellsteuerung

Für die Steuerung der beiden HN – Modelle des Emsästuares (*UTR* und *TR2*) wird am offenen seeseitigen Rand der zeitliche Verlauf des Wasserstandes für jedes auf dem offenen Rand liegende Polygon vorgegeben. Für die Sturmflut vom 1. November 2006 (SF06) wird der Wasserstandsverlauf aus Modellergebnissen des großräumigen HN – Modells der Deutschen Bucht (Plüß, A., 2003) vorgegeben.

Die Bilder 6 und 7 zeigen die Wasserstandsentwicklung am Pegel Hubertgat und Borkum Fischerbalje im Nordseemodell im Vergleich zu den Messungen an diesen Orten. Die Lage dieser Pegelorte ist in Bild 2 auf Seite 14 markiert. Für den Pegel Borkum Fischerbalje wird eine sehr gute Übereinstimmung von Messung und Nordseemodellergebnis am Tag der Sturmflut gefunden. Am Pegel Hubertgat dagegen liegt die Messung des Sturmflutscheitelwasserstandes um 40 cm unter dem vom Nordseemodell berechneten Wert. Im Rahmen dieser hier vorgestellten Untersuchungen konnte nicht geklärt werden, wieso diese lediglich 25 km auseinanderliegenden Pegel so unterschiedliche Scheitelwasserstände registriert haben.

An den landseitigen offenen Modellrändern ist die Kenntnis der Zeitreihen des Oberwasserzuflusses erforderlich. Aufbauend auf den Abflussmessungen am Pegel Versen steht der Oberwasserzufluss am Wehr Herbrum zur Verfügung. Die Oberwassermenge für das Leda-Jümme-Gebietes wird aus Messungen des NLWKN Aurich vorgegeben.

Zur Berechnung des Impulseintrages aus der Atmosphäre wird die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über dem gesamten Modellgebiet aus modellierten Windfeldern des Wettervorhersagemodells LME des DWD (Steppeler, J. et al., 2002) vorgegeben. Im Abstand von einer Stunden liegen für den Simulationszeitraum 28. Oktober 2006 00:00 Uhr bis 02. November 2006 00:00 Uhr Windfelder mit einer räumlichen Auflösung von ca. 7 km x 7 km vor. Diese Windfelder werden sowohl vom Nordseemodell als auch von den HN – Modellen des Emsästuares (*UTR* und *TR2*) verwendet. Bild 8 zeigt für den 1. November 2006 04:00 Uhr beispielhaft ein mit LME modelliertes Windfeld über der Nordsee. Das gleiche Windfeld ist in Bild 9 als Ausschnitt für den Bereich der Deutschen Bucht dargestellt.

Die Steuerung des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum erfolgt über die zeitliche Vorgabe der Wehrhöhe (siehe auch Schießszenarien in Tabelle 3 auf Seite 23).

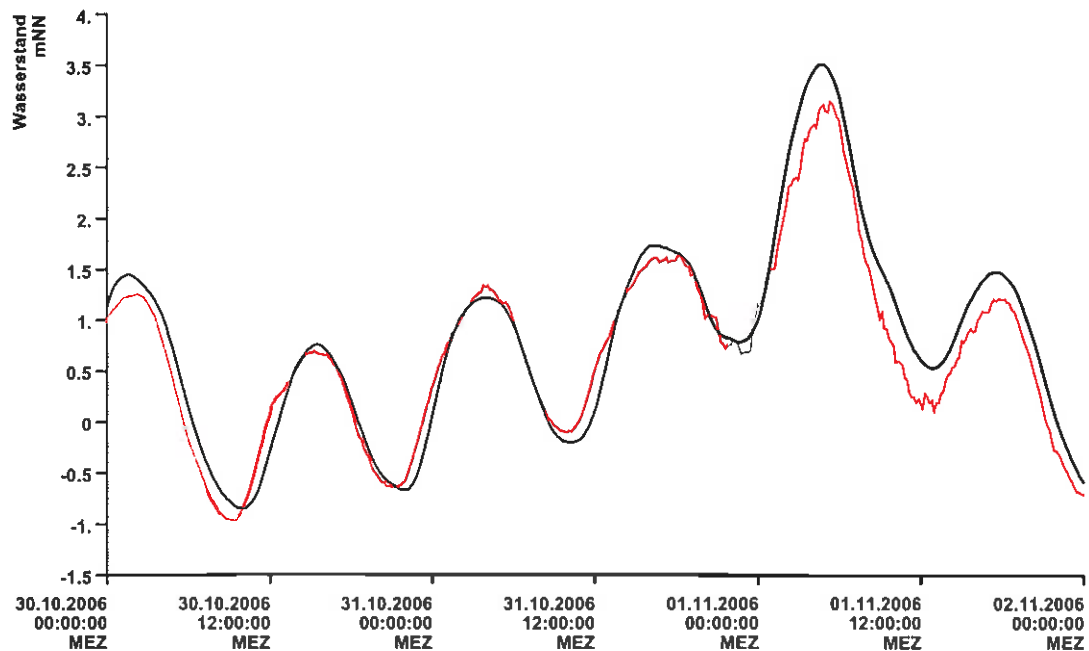


Bild 6: Wasserstandsentwicklung vom 30. Oktober bis zum 2. November 2006 am Pegel Hubertgat. Die Messung ist rot, die Modellrechnung des Nordseemodells der BAW schwarz gekennzeichnet.

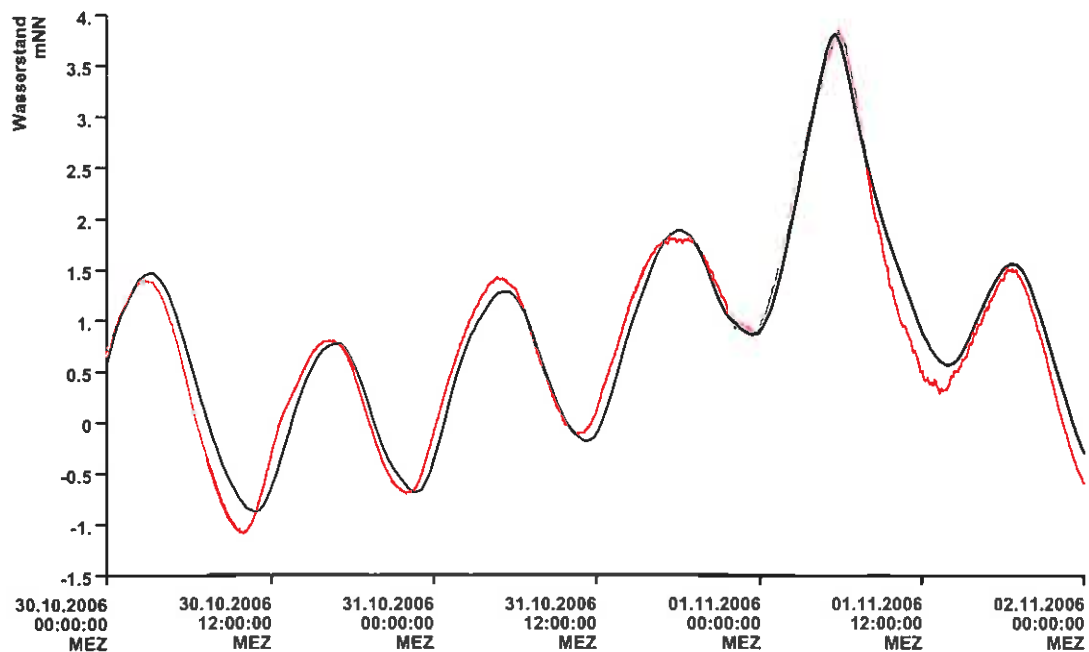


Bild 7: Wasserstandsentwicklung vom 30. Oktober bis zum 2. November 2006 am Pegel Borkum Fischerbalje. Die Messung ist rot, die Modellrechnung des Nordseemodells der BAW schwarz gekennzeichnet.

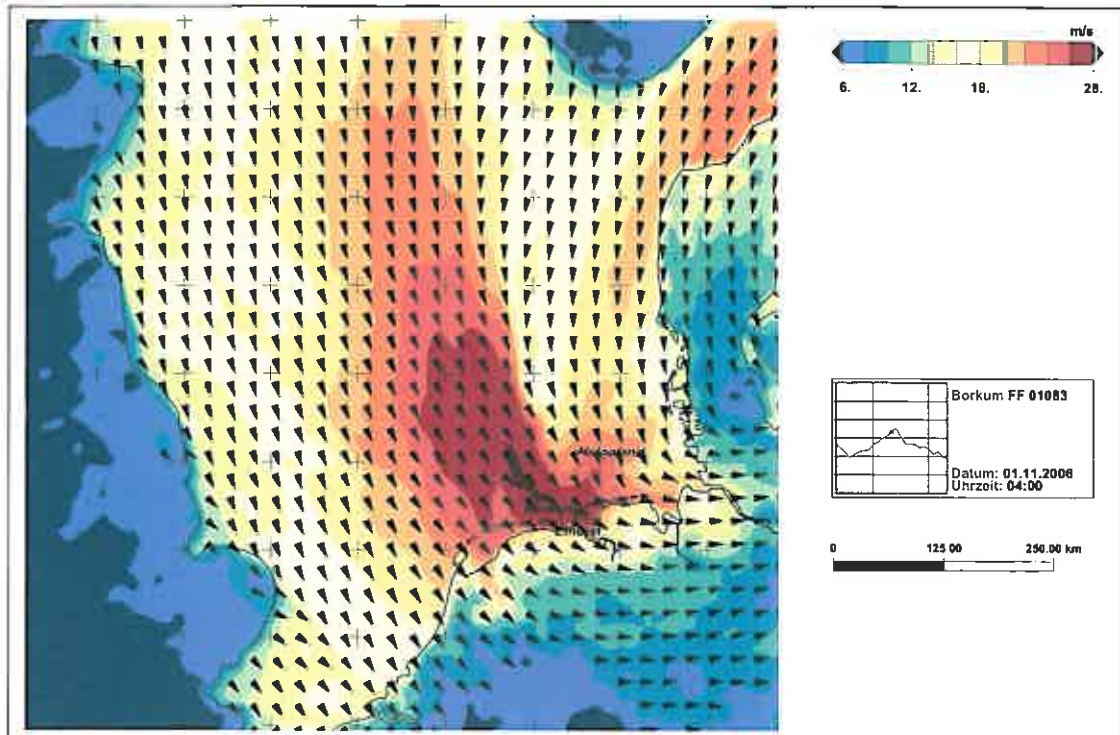


Bild 8: Sturmflut SF06: Windgeschwindigkeit 10m über Grund über der Nordsee am 1. November 2006 04:00 Uhr berechnet mit dem LME des DWD. Zur Orientierung ist die Küstenlinie eingezeichnet.

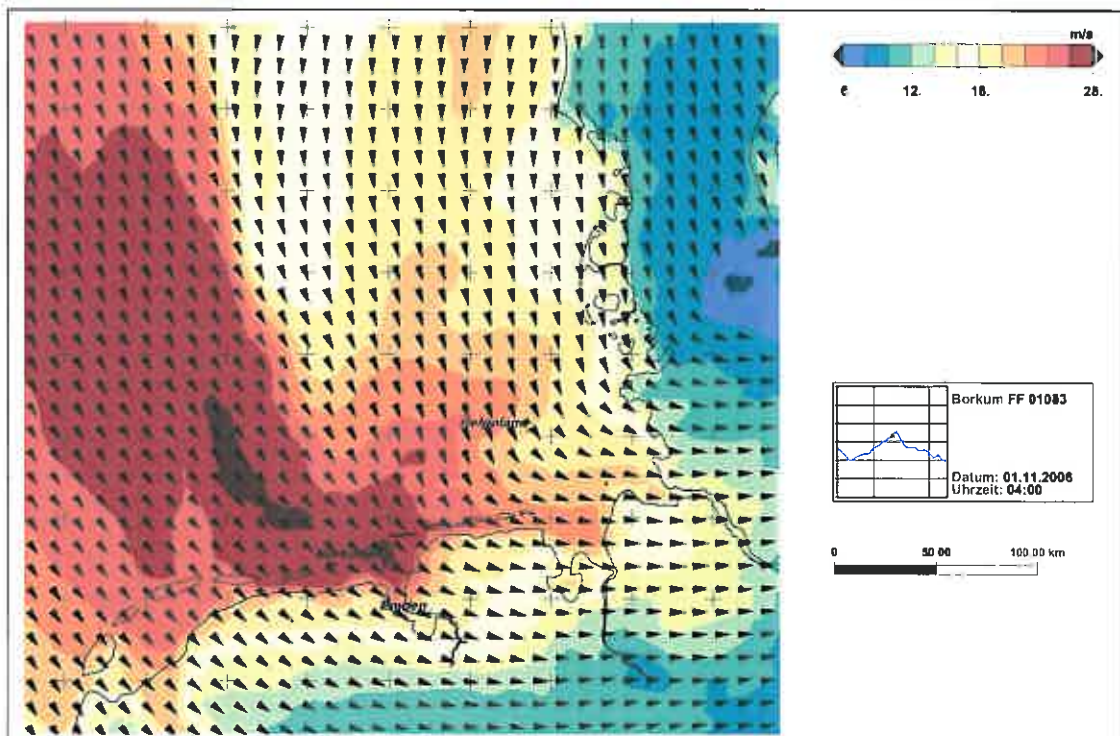


Bild 9: Sturmflut SF06: Windgeschwindigkeit 10m über Grund über der Deutschen Bucht am 1. November 2006 04:00 Uhr berechnet mit dem LME des DWD.





## 6 Ergebnisse der Analyse 5. Allerheiligenflut

Im Rahmen der vorliegenden mathematischen Systemanalyse werden bezogen auf einen Referenzzustand die Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände bei geschlossenem Sturmflutsperrwerk ermittelt und analysiert. Als Referenzzustand wird der in Kapitel 2 auf Seite 3 beschriebene Systemzustand mit ständig offenem Sturmflutsperrwerk bezeichnet. Das Sturmflutsperrwerk soll der Kehrung von Sturmfluten mit Scheitelwasserständen deutlich grösser als NN + 3,70 m dienen. Der Betriebsplan für das Emssperrwerk sieht vor, dass das Sturmflutsperrwerk bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m vor dem Sperrwerk geschlossen ist. Als Vergleichszustände werden hier die Systemzustände mit geschlossenem Sturmflutsperrwerk bezeichnet.

### 6.1 Übersicht der Untersuchungsvarianten

Die in Kapitel 4 auf Seite 7 vorgestellte 5. Allerheiligenflut vom 1. November 2006 (SF06) wird als Referenzzustand mit offenem Sperrwerk und als Vergleichszustand mit geschlossenem Sperrwerk untersucht. Tabelle 3 gibt eine Zusammenstellung der durchgeführten Simulationsläufe.

Sturmflut	Untersuchungs- variante	Oberwasser [m <sup>3</sup> /s]	Sperrwerk	Schließen	Öffnen
			Gandersum Schließszenario	1. 11. 2006	1. 11. 2006
SF06	SF06offen	32	offen	-	-
SF06	SF06zu350	32	NN + 3,50 m	4:50 h	9:10 h
SF06	SF06zuKEbbe	32	Kenterung Ebbe	1:30 h	13:20 h
SF06	SF06zuimmer	32	permanent	-	-
Natur		32	NN + 3,50 m	4:50 h	9:05 h

Tabelle 3: Untersuchungsvarianten für die 5. Allerheiligenflut SF06 sowie Schließzeitpunkte des Sturmflutsperrwerkes im HN – Modell für die 5. Allerheiligenflut SF06 am 1. November 2006 für die drei untersuchten Schließszenarien. Die Zeile Natur gibt die tatsächlichen Schließ- und Öffnungszeiten des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum am 1. November 2006 an.

Für alle Simulationsläufe wird als Simulationszeitraum der 28. Oktober 2006 00:00 Uhr bis 2. November 2006 00:00 Uhr gewählt. Als Analysezeitraum wird der Sturmflutzeitraum vom 1. November 2006 00:00 Uhr bis zum 1. November 2006 15:00 Uhr ausgewertet. Die hydrologischen und meteorologischen Randbedingungen sind für alle Schließszenarien identisch. Für die Sturmflut SF06 werden vier Simulationsläufe durchgeführt. Neben dem Referenzzustand (SF06offen) wird in drei weiteren Untersuchungsvarianten der Einfluss des Schließzeitpunktes betrachtet. Für die Untersuchungsvariante SF06zu350 wird das Sperrwerk bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m geschlossen. Für die Variante SF06zuKEbbe wird das Sperrwerk bereits bei Kenterpunkt Ebbe vor der Sturmflut geschlossen. Für die Variante SF06zuimmer ist das Sperrwerk permanent geschlossen.

## 6.2 Vergleich Messungen mit Modellergebnissen

Für die 5. Allerheiligenflut vom 1. November 2006 wird auf der Grundlage von zwei unterschiedlichen HN - Verfahren (*UnTRIM2D* und *TRIM2D*) eine Analyse der Modellergebnisse (*UTR* bzw. *TR2*) durchgeführt.

Die Bilder 10 bis 15 im folgenden Abschnitt zeigen einen Vergleich zwischen gemessenen Wasserstandszeitreihen (rot) und mit den HN - Verfahren (*UTR* in Schwarz und *TR2* in Blau) berechneten Wasserstandszeitreihen an ausgewählten Pegeln entlang der Ems. Für die Pegel Borkum Fischerbalje (Ems - km 90), Knock (Ems - km 50), Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse (Ems - km 40), Pogum (Ems - km 35) und Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum (Ems - km 32) ist die Wasserstandsentwicklung für den Zeitraum 30. Oktober 2006 00:00 Uhr bis 2. November 2006 00:00 Uhr dargestellt. Die Lage der Pegel im HN - Modell ist in Bild 2 auf Seite 14 markiert. Das Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum wird bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m geschlossen.

Beide Modelle der Ems berechnen, bei gleicher Randwertvorgabe für die Wasserstandsentwicklung in der Nordsee für diese Sturmflut vergleichbare Wasserstandszeitreihen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der gemessenen und mit den modellierten Wasserstandsentwicklungen. Die Höhe des Sturmflutscheitelwasserstandes (HW, höchster Wasserstand während der Sturmflut) sowie der Verlauf des Wasserstandes am Morgen des 1. November 2006 wird von den HN - Modellen der Ems wiedergegeben.

Unterschiede im Wasserstandsverlauf bei der Vortide am 31. Oktober 2006 treten bereits in den Ergebnissen des Nordseemodells (siehe Bild 7 auf Seite 21) auf, das die Randwerte für die Modelle des Ems - Ästuares bereitstellt. Dieses großräumige Nordseemodell (Plüß, A., 2003) wird mit Windfeldern (Gitterweite 7 km x 7 km, zeitlicher Abstand 1 Stunde) des LME des DWD (Steppeler, J. et al., 2002) angetrieben. Zeitlich und räumlich kleinskaligere Variationen des Windes, die vom LME des DWD nicht erfasst werden, können somit auch vom Nordseemodell nicht berücksichtigt werden.

Die vergleichende Gegenüberstellung des gemessenen und der mit den HN - Modellen des Emsästuares *UTR* und *TR2* numerisch berechneten zeitlichen Wasserstandsverläufen in den Bildern 10 bis 15 zeigt, dass das Systemverhalten der 5. Allerheiligenflut sowohl hinsichtlich der Höhen- als auch der Phasenlage durch das Modell nachgebildet wird.

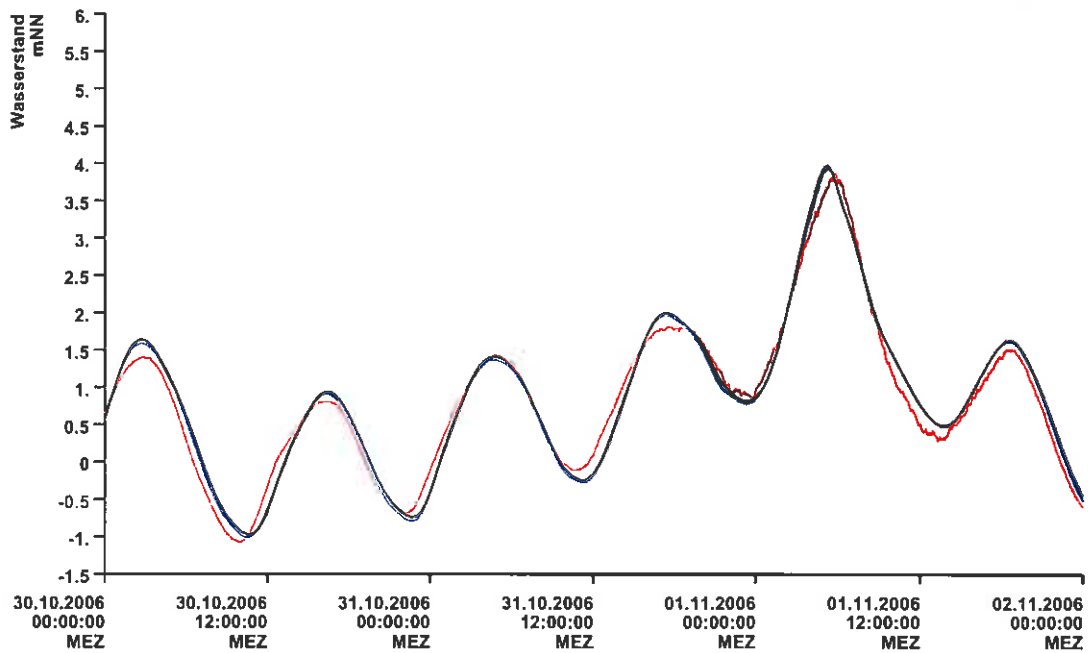


Bild 10: Wasserstandsentwicklung vom 30. Oktober bis zum 2. November 2006 am Pegel Borkum Fischerbalje. Die Messung ist rot, die Modellrechnung UTR SF06zu350 schwarz und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

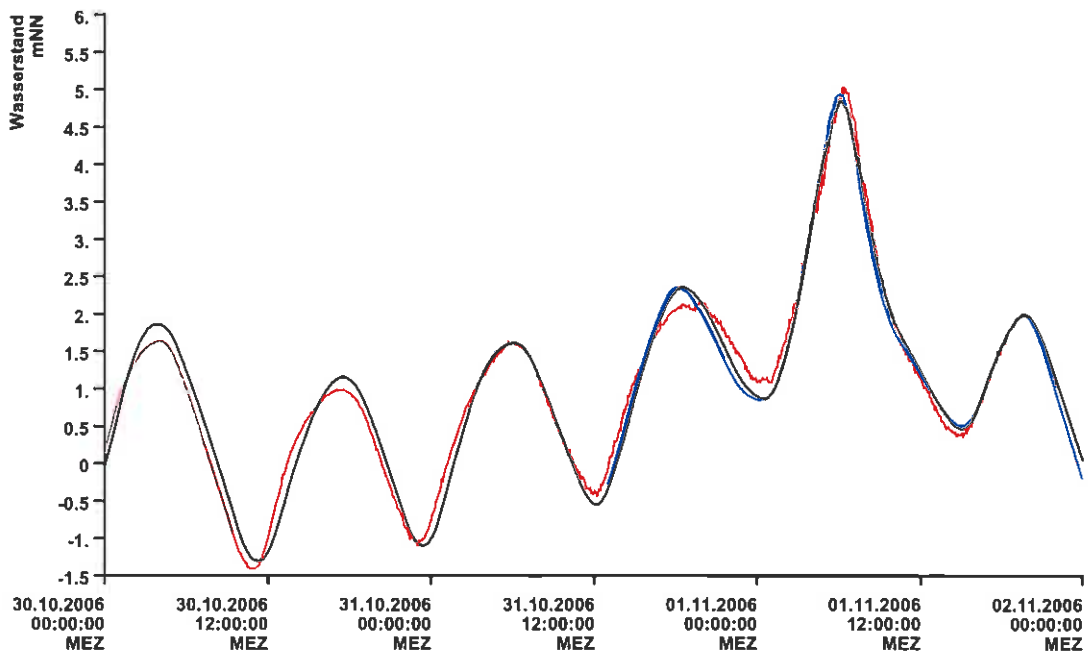


Bild 11: Wasserstandsentwicklung vom 30. Oktober bis 2. November 2006 am Pegel Knock. Die Messung ist rot, die Modellrechnung UTR SF06zu350 schwarz und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

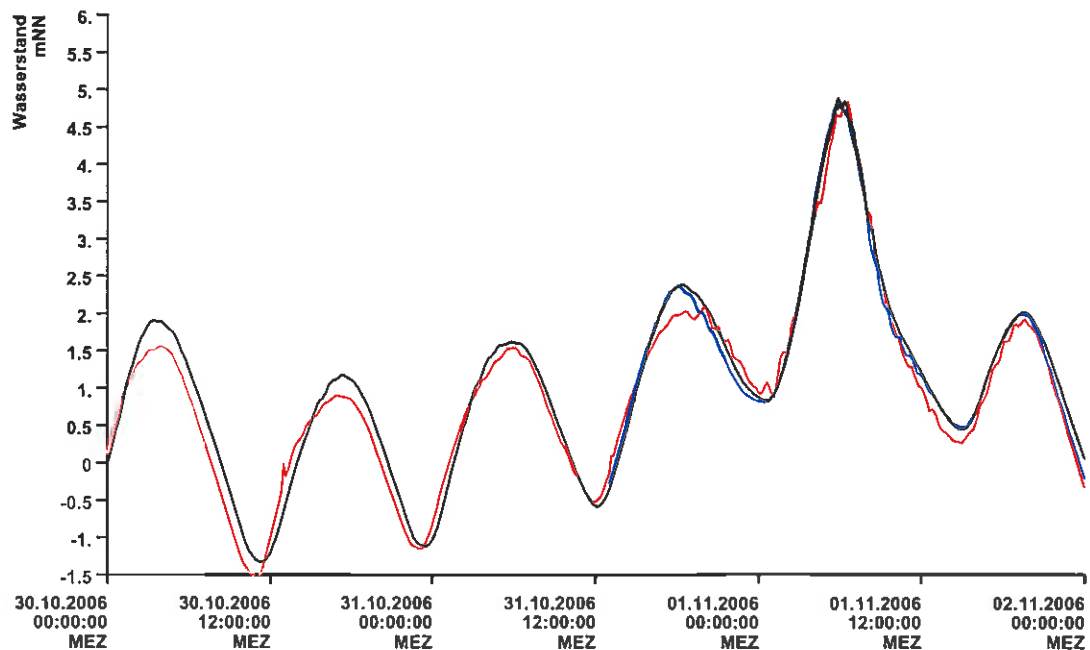
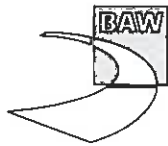


Bild 12: Wasserstandsentwicklung vom 30. Oktober bis 2. November 2006 am Pegel Delfzijl. Die Messung ist rot, die Modellrechnung UTR SF06zu350 schwarz und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

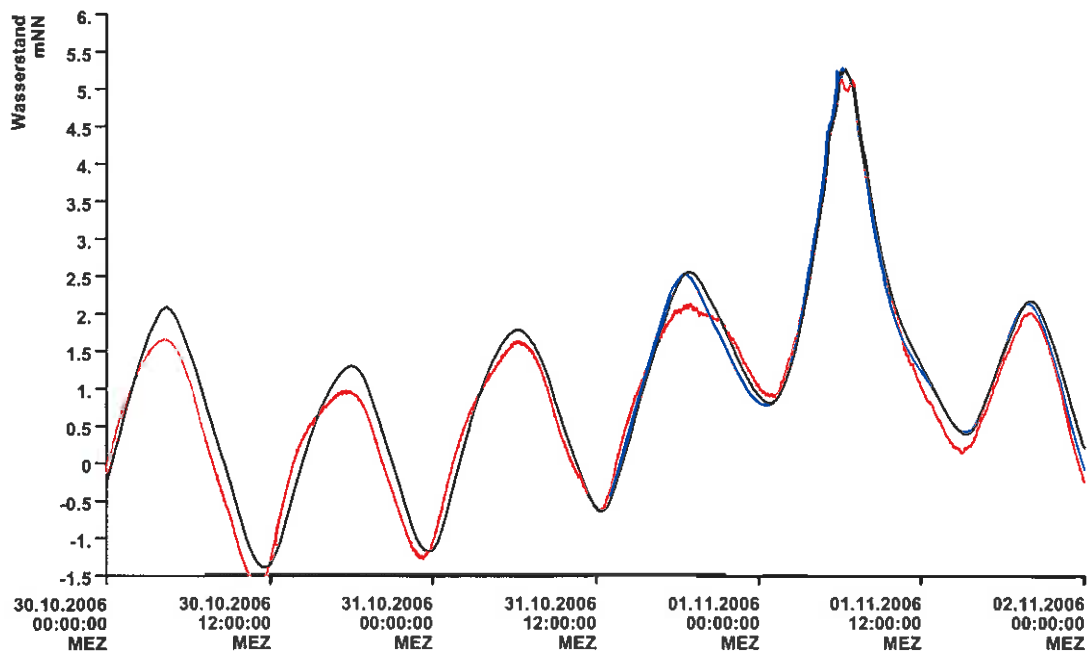


Bild 13: Wasserstandsentwicklung am 30. Oktober bis 2. November 2006 am Pegel Emden Neue Seeschleuse. Die Messung ist rot, die Modellrechnung UTR SF06zu350 schwarz und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

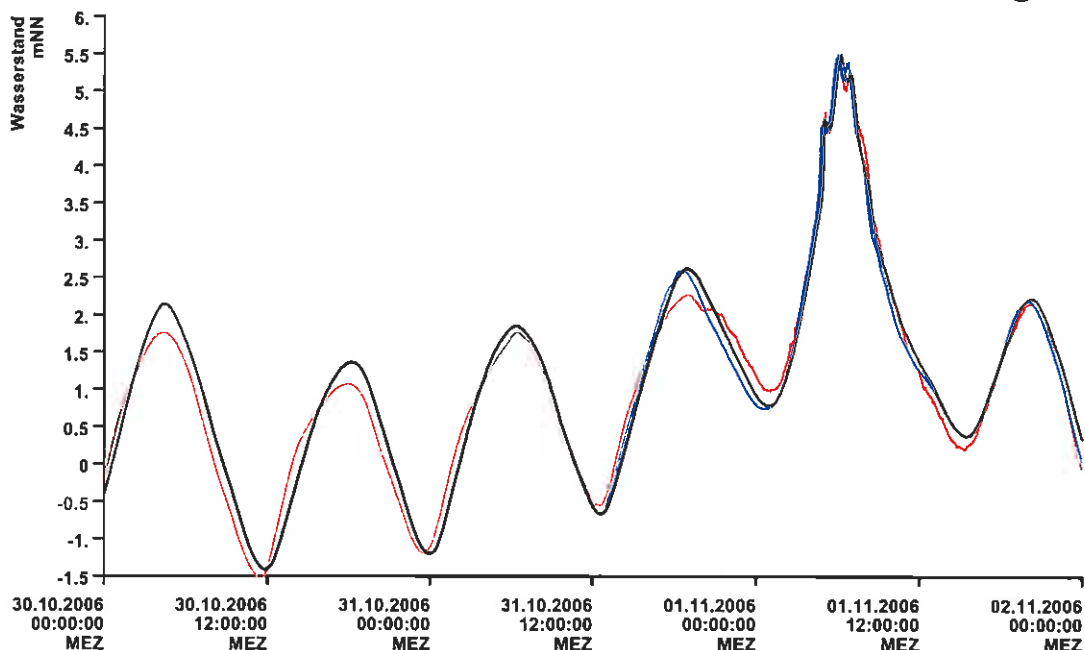
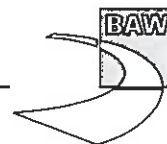


Bild 14: Wasserstandsentwicklung am 30. Oktober bis 2. November 2006 am Pegel Pogum. Die Messung ist rot, die Modellrechnung UnTRIM2D SF06zu350 schwarz und die Modellrechnung TRIM2D SF06zu350 blau gekennzeichnet.

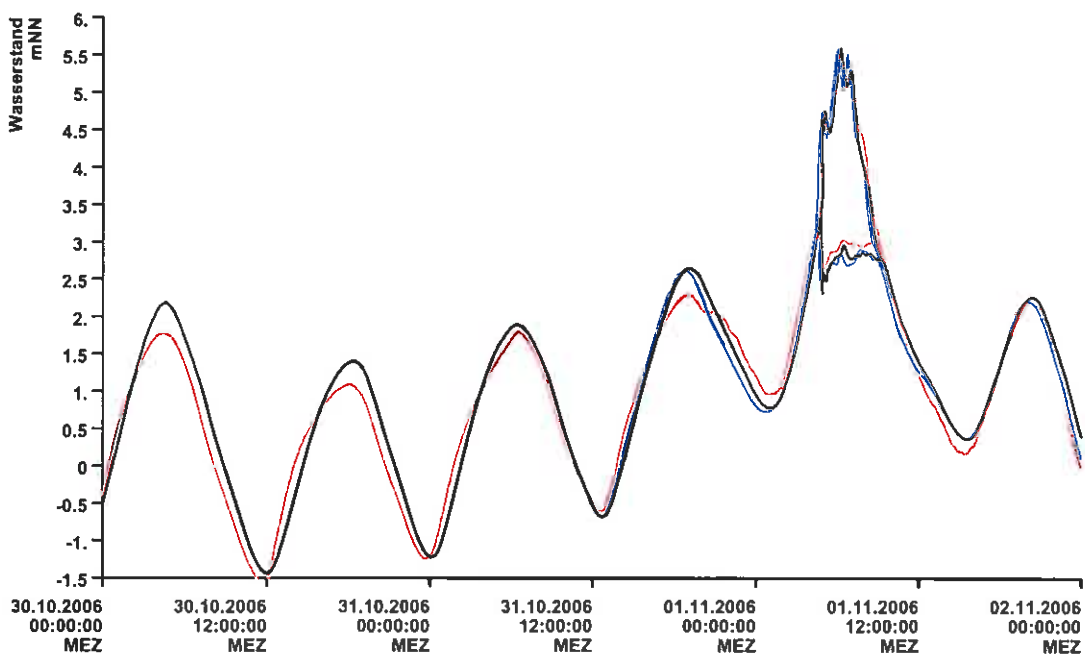


Bild 15: Wasserstandsentwicklung am 30. Oktober bis 2. November 2006 im Unter- und Oberwasser des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum. Die Messung ist rot, die Modellrechnung UTR SF06zu350 schwarz und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

### 6.3 Wasserstandsentwicklung am 1. November 2006

Um den Einfluss des geschlossenen Sturmflutsperrwerks Ems bei Gandersum auf die Wasserstandsentwicklung in der Ems zwischen Borkum und Gandersum während der 5. Allerheiligenflut zu analysieren, wird der Sturmflutzeitraum erneut modelliert, diesmal jedoch mit offenem Sturmflutsperrwerk (SF06offen).

Die Bilder 16 bis 21 im folgenden Abschnitt zeigen einen Vergleich zwischen den Wasserstandszeitreihen mit offenem Sturmflutsperrwerk (SF06offen) und mit bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m geschlossenem Sturmflutsperrwerk (SF06zu350) an ausgewählten Pegeln entlang der Ems. Zum Vergleich werden die Ergebnisse beider HN-Verfahren gezeigt.

Für die Pegel Borkum Fischerbalje, Knock, Delfzijl, Emden Neue Seeschleuse, Pogum und Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum ist die Wasserstandsentwicklung für den Sturmflutzeitraum 1. November 2006 00:00 Uhr bis 1. November 2006 14:00 Uhr dargestellt. Die Lage der Pegel im HN-Modell ist in Bild 2 auf Seite 14 markiert.

In der Außenems bei Borkum (Bild 16) ist kein Unterschied im Wasserstandsverlauf für die beiden Systemzustände des Sturmflutsperrwerkes SF06offen und SF06zu350 zu erkennen. Am Pegel Knock (Bild 17) erkennt man einen um ca. 20 cm höheren Sturmflutscheitelwasserstand für geschlossenes Sturmflutsperrwerk (SF06zu350) als bei offenem Sturmflutsperrwerk (SF06offen). Auch am Pegel Emden Neue Seeschleuse (Bild 19) liegt der Sturmflutscheitelwasserstand bei geschlossenem Sturmflutsperrwerk 25 cm höher als bei offenem Sperrwerk. Auch die Form der Tidekurve verändert sich bei geschlossenem Sturmflutsperrwerk.

Für den Pegel Sperrwerk Gandersum (Bild 21) ist sowohl die Wasserstandsentwicklung im Unterwasser als auch im Oberwasser dargestellt. Durch das Schließen des Sperrwerkes wird die Wechselwirkung zwischen Tidewelle und Oberwasserzufluss in der Ems stromauf von Gandersum aufgehoben. Hier wird der Wasserstand nur noch durch den Oberwasserzufluss beeinflusst. Dies wird in der Wasserstandsentwicklung im Oberwasser des Sturmflutsperrwerkes (Bild 21) deutlich. Zum Zeitpunkt des Schließens entsteht im Unterwasser eine Schwallwelle und im Oberwasser eine Sunkwelle. Diese werden durch das relativ plötzliche Abbremsen des Flutstromes ausgelöst. Die Amplitude dieser Sunk- und Schwallwelle ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit zum Schließzeitpunkt (Bollrich, G. et al., 1989). Diese Sunk- und Schwallwelle ist ebenfalls in den Messungen zu erkennen (Bild 15 auf der vorherigen Seite).

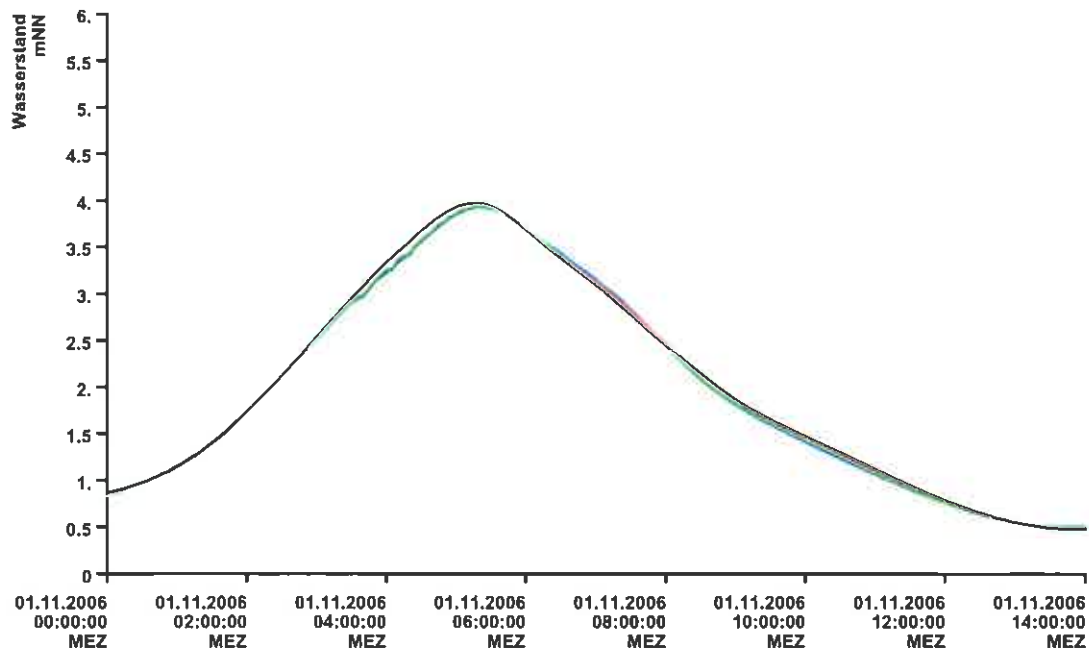


Bild 16: Wasserstandsentwicklung am Vormittag des 1. November 2006 am Pegel Borkum Fischerbalje. Die Modellrechnung UTR SF06offen ist schwarz, die Modellrechnung UTR SF06zu350 rot, die Modellrechnung TR2 SF06offen grün, und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

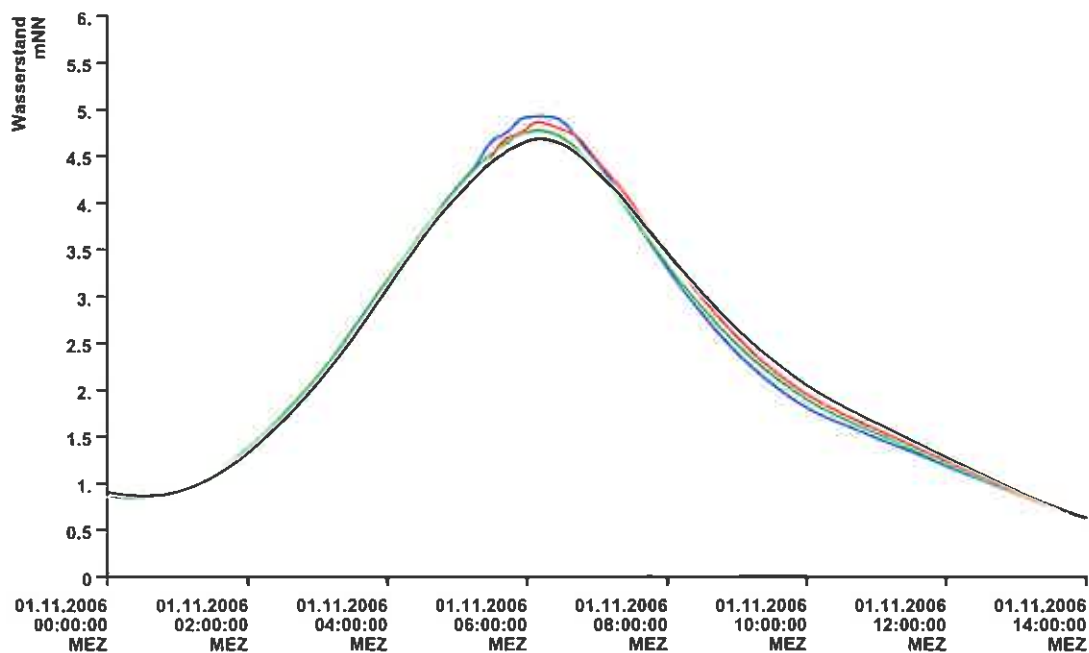


Bild 17: Wasserstandsentwicklung am Vormittag des 1. November 2006 am Pegel Knock. Die Modellrechnung UTR SF06offen ist schwarz, die Modellrechnung UTR SF06zu350 rot, die Modellrechnung TR2 SF06offen grün, und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

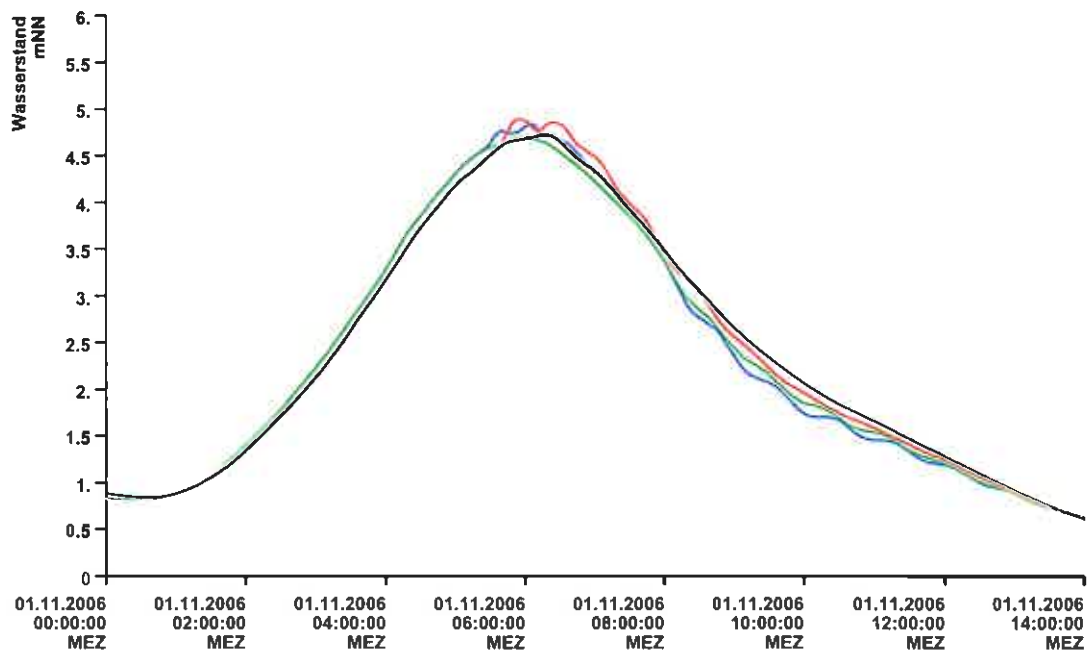


Bild 18: Wasserstandsentwicklung am Vormittag des 1. November 2006 am Pegel Delfzijl. Die Modellrechnung UTR SF06offen ist schwarz, die Modellrechnung UTR SF06zu350 rot, die Modellrechnung TR2 SF06offen grün, und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

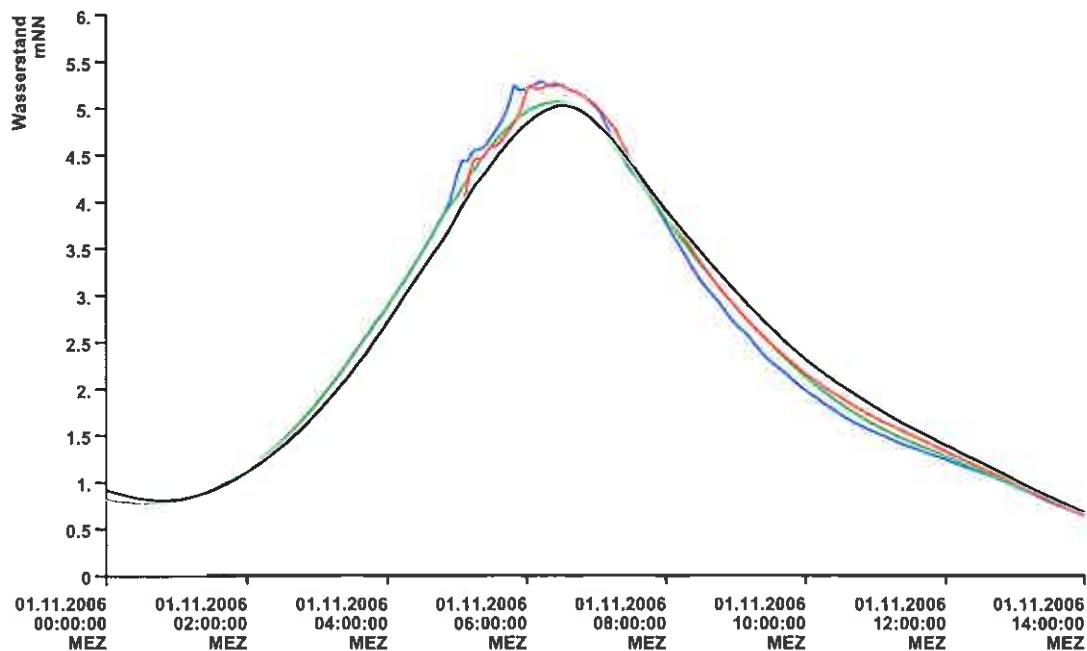


Bild 19: Wasserstandsentwicklung am Vormittag des 1. November 2006 am Pegel Emden Neue Seeschleuse. Die Modellrechnung UTR SF06offen ist schwarz, die Modellrechnung UTR SF06zu350 rot, die Modellrechnung TR2 SF06offen grün, und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.



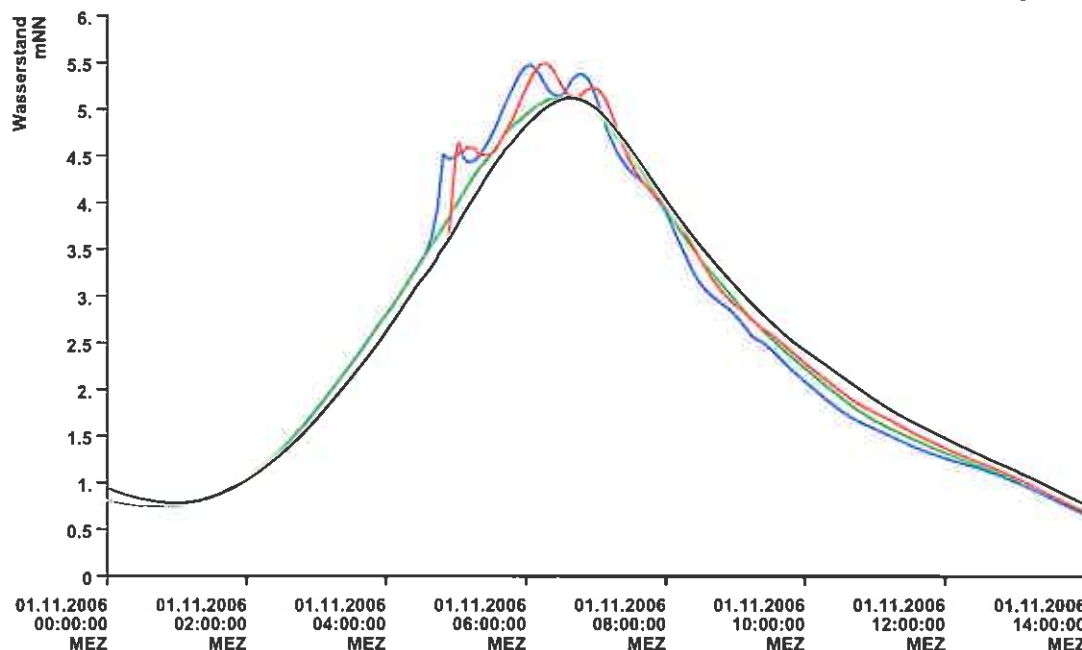
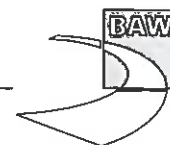


Bild 20: Wasserstandsentwicklung am Vormittag des 1. November 2006 am Pegel Pogum. Die Modellrechnung UTR SF06offen ist schwarz, die Modellrechnung UTR SF06zu350 rot, die Modellrechnung TR2 SF06offen grün, und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

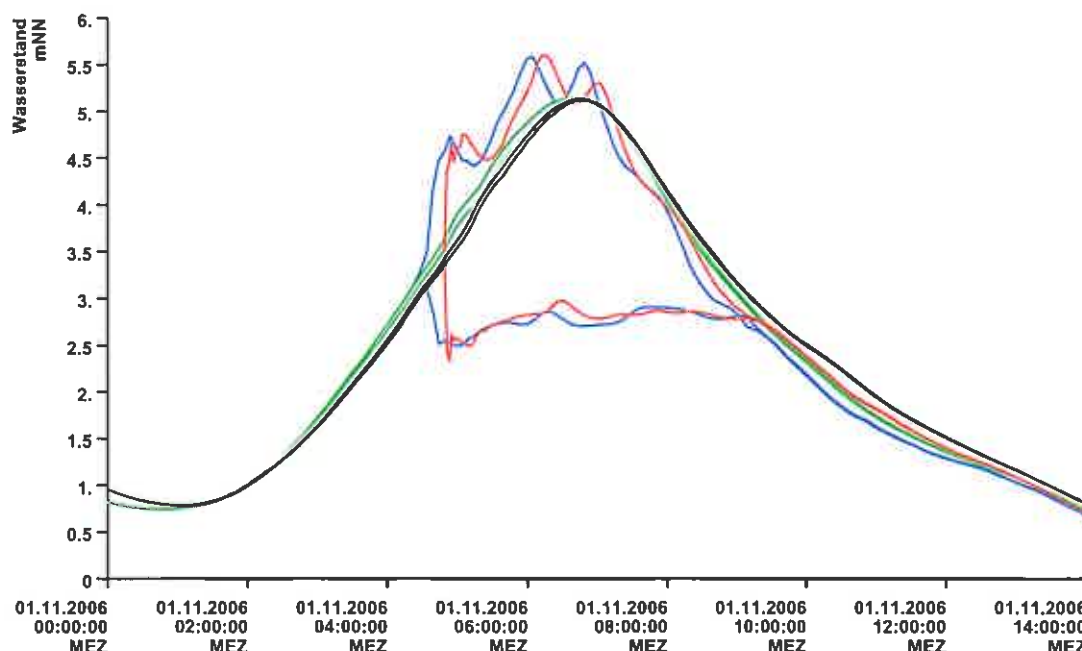


Bild 21: Wasserstandsentwicklung am Vormittag des 1. November 2006 im Unter- und Oberwasser des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum. Die Modellrechnung UTR SF06offen ist schwarz, die Modellrechnung UTR SF06zu350 rot, die Modellrechnung TR2 SF06offen grün, und die Modellrechnung TR2 SF06zu350 blau gekennzeichnet.

## 6.4 Einfluß des geschlossenen Sturmflutsperrwerkes

Das Schließen des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum teilt das Emsästuar in zwei getrennte Teilgebiete: Das Gebiet stromauf Gandersums und das Gebiet stromab Gandersums. Lediglich das Gebiet stromab des Sperrwerkes wird weiterhin durch das Tidegeschehen in der Deutschen Bucht beeinflusst. Bei geöffnetem Sperrwerk läuft die Tidewelle die Unterems entlang und wird durch Dissipation (Energieumwandlung durch z. B. Reibung in Wärme) und Reflexion z. B. am Wehr Herbrum modifiziert. Durch das geschlossene Sperrwerk wird die tidebeeinflusste Ems deutlich verkürzt und somit die Dissipation verringert. Auch die Reflexion der Tidewelle findet nun bereits am geschlossenen Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum statt. Zusätzlich kann das Schließen des Sperrwerkes je nach Strömungszustand der Ems im Bereich des Sperrwerkes eine Schwallwelle bzw. Sunkwelle auslösen. Bei Flutstrom erwartet man eine Schwallwelle stromab des Sperrwerkes und eine Sunkwelle stromauf des Sperrwerkes (Bollrich, G. et al., 1989). Durch den Sperrwerksbetrieb (Wahl des Schließzeitpunktes) kann die Amplitude der Schwallwelle beeinflusst werden.

Die Wasserstände stromab des Sturmflutsperrwerkes werden somit bei geschlossenem Sperrwerk durch zwei Prozesse massgeblich verändert:

1. die Veränderung (hier Verkürzung) der Geometrie des Emsästuars führt zu einem veränderten Dissipations- und Reflexionsverhalten des Ästuars und
2. das Abbremsen der Tidewelle bei Flutstrom am geschlossenen Sperrwerk erzeugt eine Schwallwelle.

Zur Verdeutlichung ist in Bild 22 auf der nächsten Seite die Wasserstands- und Strömungsentwicklung im Unterwasser des Emssperrwerkes für die vier Untersuchungsvarianten UTR SF06offen, UTR SF06zu350, UTR SF06zuKEbbe und UTR SF06zuimmer dargestellt. Für die Untersuchungsvarianten UTR SF06zu350 und UTR SF06zuKEbbe ist ebenfalls die Wasserstandsentwicklung im Oberwasser des Emssperrwerkes eingezeichnet.

Durch das Schließen des Sturmflutsperrwerkes bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m (rote Kurve in Bild 22) kommt es vor dem Sperrwerk zu einer plötzlichen Erhöhung des Wasserstands um ca. 1 m und stromauf des Sperrwerkes zu einem plötzlichen Absink (rot gestrichelte Kurve) des Wasserstandes um ca. 1 m. Zum Zeitpunkt des Schließwasserstandes (NN + 3,50 m) herrscht im Sperrwerksbereich Flutstrom mit Geschwindigkeiten von ca. 1,5 m/s. Das Schließen des Sperrwerkes bei fast voll entwickeltem Flutstrom löst im Unterwasser eine Schwallwelle und im Oberwasser eine Sunkwelle aus.

Wird das Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum in einer strömungsarmen Situation, wie z. B. Kenterung Ebbe um 1:30 Uhr geschlossen (UTR SF06zuKEbbe), so entsteht keine Schwall- und Sunkwelle (siehe blaue und blaugestrichelte Kurve in Bild 22).

Das Schließszenario UTR SF06zuimmer gibt einen Hinweis auf die minimale Erhöhung der Wasserstände durch das geschlossene Sperrwerk. Änderungen im Wasserstandsverlauf zwischen UTR SF06zuimmer und UTR SF06offen sind lediglich auf das veränderte Dissipations- und Reflektionsverhalten, den deutlich verkleinerten Flutraum sowie das

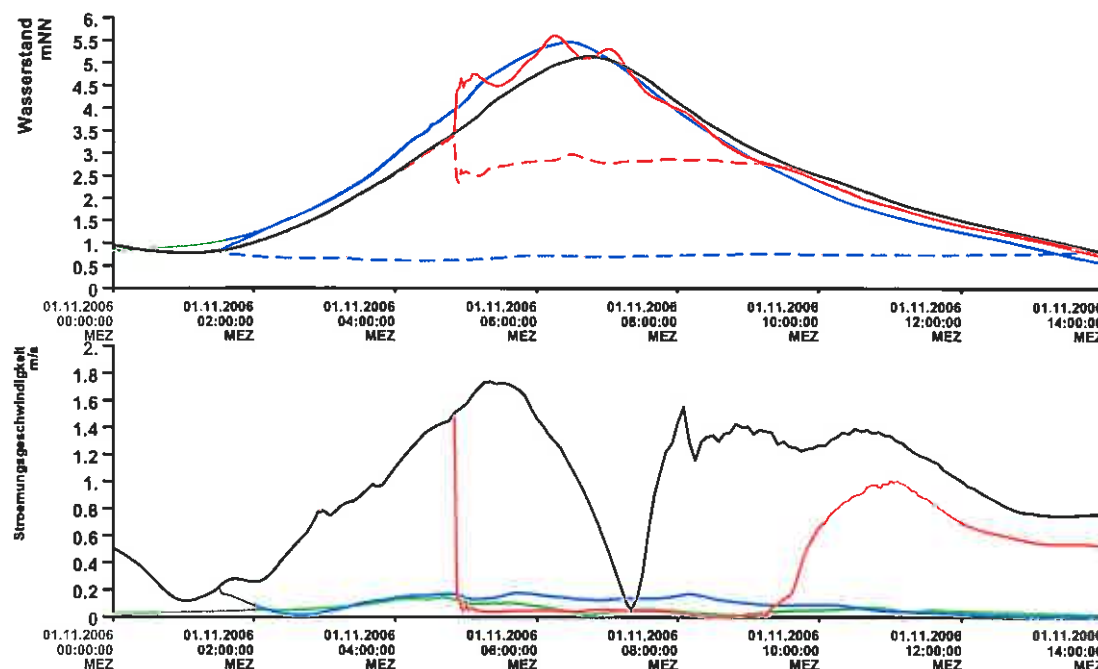
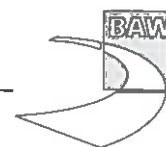


Bild 22: Wasserstandsentwicklung am Emssperrwerk in Gandersum während der Sturmflut UTR SF06offen (schwarz) sowie für die drei Untersuchungsvarianten UTR SF06zu350 (Unterwasser rot, und Oberwasser rot gestrichelt) und UTR SF06zuKEbbe (Unterwasser blau und Oberwasser blau gestrichelt) und UTR SF06zuummer (grün). Zusätzlich ist im unteren Bildteil der zeitliche Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit im Unterwasser des Sperrwerkes dargestellt.

gänzliche Fehlen des Oberwasserzuflusses, d.h. durch den Betriebsplan unbeeinflussbare Größen, zurückzuführen. Ein Vergleich mit der Schließszenarien UTR SF06zuKEbbe mit UTR SF06zuummer zeigt eine fast identische Auswirkung des geschlossenen Sperrwerkes im Wasserstandsverlauf.

Bild 23 zeigt die Wasserstandsentwicklung am Pegel Pogum, d.h. ca. 3 km unterstrom des Sturmflutsperrwerkes, für die drei Untersuchungsvarianten UTR SF06offen, UTR SF06zu350 und UTR SF06zuKEbbe. Durch das Schließen des Sperrwerkes erhöhen sich die Wasserstände.

Im unteren Teil von Bild 23 ist zusätzlich der zeitliche Verlauf der Wasserstandsdifferenz zwischen den der Untersuchungsvariante UTR SF06zu350 und UTR SF06offen sowie zwischen UTR SF06zuKEbbe und UTR SF06offen dargestellt. Wird das Sperrwerk bei Kentierung Ebbe (UTR SF06zuKEbbe) geschlossen, wird die Tidewelle verformt (blau). Der Wasserstand steigt schneller an und erreicht einen höheren Scheitelwasserstand. Durch das Schließen bei Flutstrom (UTR SF06zu350, rot) entsteht zusätzlich eine Schwallwelle, die zu einer (kurzfristigen) Wasserstandserhöhung von ca. 80 cm führt. Die Schwallwelle schreitet im Emders Fahrwasser voran und regt den ebenfalls mit Wasser (Wasserstand höher NN + 3,50 m) gefüllten Dollart zu einer Eigenschwingung an. Die Schwingungsdauer kann

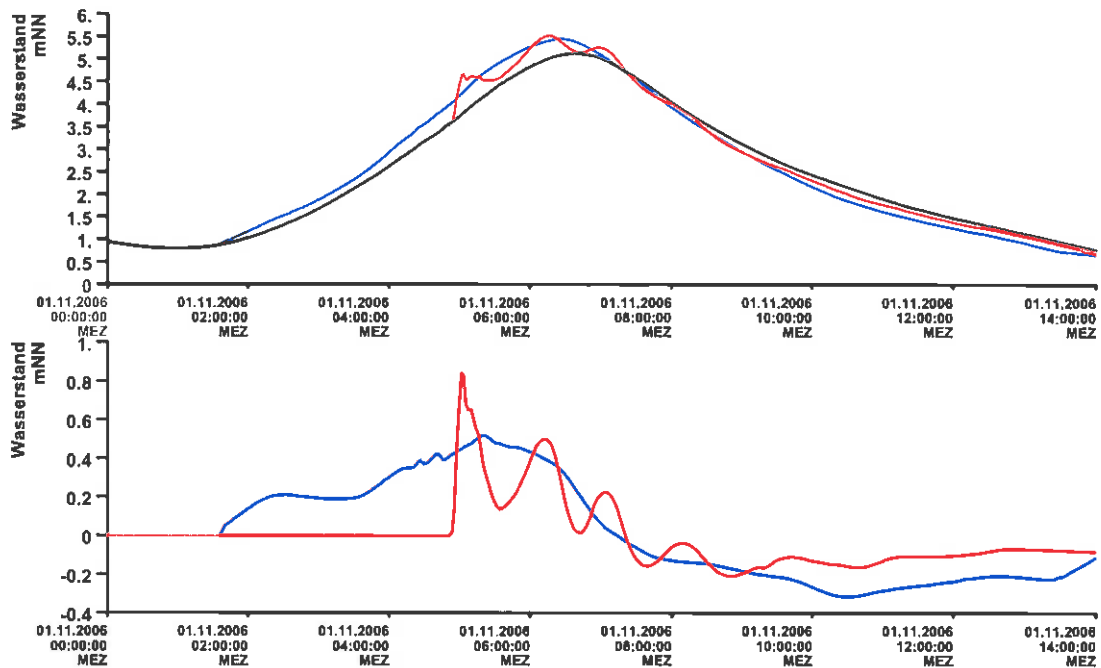


Bild 23: Wasserstandsentwicklung am Pegel Pogum während der Sturmflut 1. November 2006 für die Untersuchungsvariante UTR SF06offen (schwarz) sowie für die beiden Untersuchungsvarianten mit geschlossenem Sperrwerk UTR SF06zu350 (rot) und UTR SF06zuKEbbe (blau). Zusätzlich ist im unteren Bildteil der zeitliche Verlauf der Wasserstands Differenz zwischen der Untersuchungsvariante UTR SF06zu350 und UTR SF06offen (rot) sowie zwischen UTR SF06zuKEbbe und UTR SF06offen (blau) dargestellt.

mit der Formel nach Merian, 1828 (siehe z. B. Dietrich, G. et al., 1992) abgeschätzt werden. Für eine Wassertiefe von 3 m ergibt sich eine Schwingungsdauer (Periode) von 60 Minuten, für 4 m eine Schwingungsdauer von 52 Minuten und für 5 m eine Schwingungsdauer von 47 Minuten. Diese Werte stimmen in der Größenordnung mit der Schwingungsdauer der im unteren Teil von Bild 23 in Rot dargestellten Schwingung überein. Auch hier beobachtet man eine Verkürzung der Schwingungsdauer mit zunehmenden Wasserständen. Das Schließen des Sperrwerkes bereits bei Kenterung Ebbe um 01:30 Uhr verhindert das Entstehen einer Sunk- und Schwallwelle (siehe blaue Kurve im unteren Teil des Bildes 23).

Da der Sturmflutscheitelwasserstand HW als höchster während der Sturmflut auftretender Wasserstand definiert ist, erzeugen die beschriebenen überlagerten kurzzeitigen Wasserstandsschwankungen den höheren Sturmflutscheitelwasserstand im Unterwasser des Sturmflutsperrwerkes für die Untersuchungsvariante UTR SF06zu350 im Vergleich zu UTR SF06zuKEbbe.

Auf der beigegeführten CD befindet sich eine Animation, die den Verlauf des Wasserstandes zwischen Dukegat und Gandersum (siehe auch Bild 3 auf Seite 15) im Zeitraum 01. November 2006 09:00 Uhr und 01. November 2006 10:00 Uhr für die vier betrachteten Untersuchungsvarianten (siehe Tabelle 3 auf Seite 23) zeigt.



## 6.5 Kenngrößen der Sturmflut 1. November 2006

Als Ergebnis der Modellierung der Sturmflut SF06 steht für jeden durchgeführten Simulationslauf, d.h. für jedes Schließsszenario, an jedem (feuchten) Gitterpunkt für jeden Ausgabetermin (Datenausgabeintervall der Modellsimulation:  $\Delta t = 120$  s) der Wasserstand sowie die tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeit zur Verfügung.

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

- Sturmflutscheitelwasserstand (höchster aufgetretener Wasserstand HW) im Analysezeitraum sowie die
- Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes (tHW) bezogen auf Ems – km 96

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

### 6.5.1 Sturmflutscheitelwasserstand

Der Sturmflutscheitelwasserstand für die vier genannten Untersuchungsvarianten (siehe auch Tabelle 3 auf Seite 23) wird im folgenden Abschnitt für den in Bild 3 auf Seite 15 dargestellten Ausschnitt zwischen Dukegat (Ems – km 65) und Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum (Ems – km 32) flächenhaft dargestellt.

Bild 24 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand HW am 1. November 2006 bei geöffnetem Sperrwerk (UTR-SF06offen) als Referenzzustand.

Wird das Sturmflutsperrwerk bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m geschlossen (UTR-SF06zu350), so ergeben sich die in Bild 25 dargestellten Scheitelwasserstände. Durch das Schließen des Sperrwerkes bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m ergeben sich die in Bild 26 dargestellten Erhöhungen des Sturmflutscheitelwasserstandes im Vergleich zum Referenzzustand. Die größten Zunahmen im Scheitelwasserstand HW ergeben sich mit 30 cm bis 50 cm zwischen Pogum und dem Emssperrwerk. Im Dollart erhöht sich der Sturmflutscheitelwasserstand um 20 cm bis 35 cm. Am Pegel Emden Neue Seeschleuse und im Bereich von Ems – km 40 erhöht sich der Scheitelwasserstand um 25 cm. Stromab von Emden nimmt die Wasserstandserhöhung ab. Im Bereich von Dukegat ist keine Veränderung des Sturmflutscheitelwasserstandes auf Grund des Schließens des Sperrwerkes zu beobachten.

Durch das Schließen des Sperrwerkes bei Kenterung Ebbe (UTR-SF06zuKEbbe), ergeben sich die in Bild 27 dargestellten Sturmflutscheitelwasserstände. Daraus ergeben sich durch den Vergleich mit UTR-SF06offen die in Bild 28 dargestellten Erhöhungen des Sturmflutscheitelwasserstandes aufgrund des geschlossenen Sperrwerkes. Die größten Zunahmen im Scheitelwasserstand HW ergeben sich mit 30 cm bis 35 cm zwischen Pogum und dem Emssperrwerk. Im Dollart erhöht sich der Sturmflutscheitelwasserstand um 25 cm bis 30 cm. Am Pegel Emden Neue Seeschleuse und im Bereich von Ems – km 40 erhöht sich der Scheitelwasserstand um weniger als 30 cm. Stromab von Emden nimmt die Wasserstandserhöhung ab.

Stromab von Dukegat in der Außenems ist keine Veränderung des Sturmflutscheitelwasserstandes auf Grund des Schließens des Sperrwerkes zu beobachten.

Bleibt das Sturmflutsperrwerk im Simulationszeitraum (siehe Kapitel 5 auf Seite 11) permanent geschlossen (UTR-SF06zuimmer), so ergeben sich die in Bild 29 dargestellten Sturmflutscheitelwasserstände HW. Daraus ergeben sich durch den Vergleich mit UTR-SF06offen die in Bild 30 dargestellten Erhöhungen des Sturmflutscheitelwasserstandes aufgrund des geschlossenen Sperrwerkes. Die größten Zunahmen im Scheitelwasserstand HW ergeben sich mit 30 cm bis 35 cm zwischen Pogum und dem Emssperrwerk. Im Dollart erhöht sich der Sturmflutscheitelwasserstand um 25 cm bis 30 cm. Am Pegel Emden Neue Seeschleuse und im Bereich von Ems – km 40 erhöht sich der Scheitelwasserstand um weniger als 30 cm. Stromab von Emden nimmt die Wasserstandserhöhung ab. Stromab von Dukegat in der Außenems ist keine Veränderung des Sturmflutscheitelwasserstandes auf Grund des geschlossenen Sperrwerkes zu beobachten.

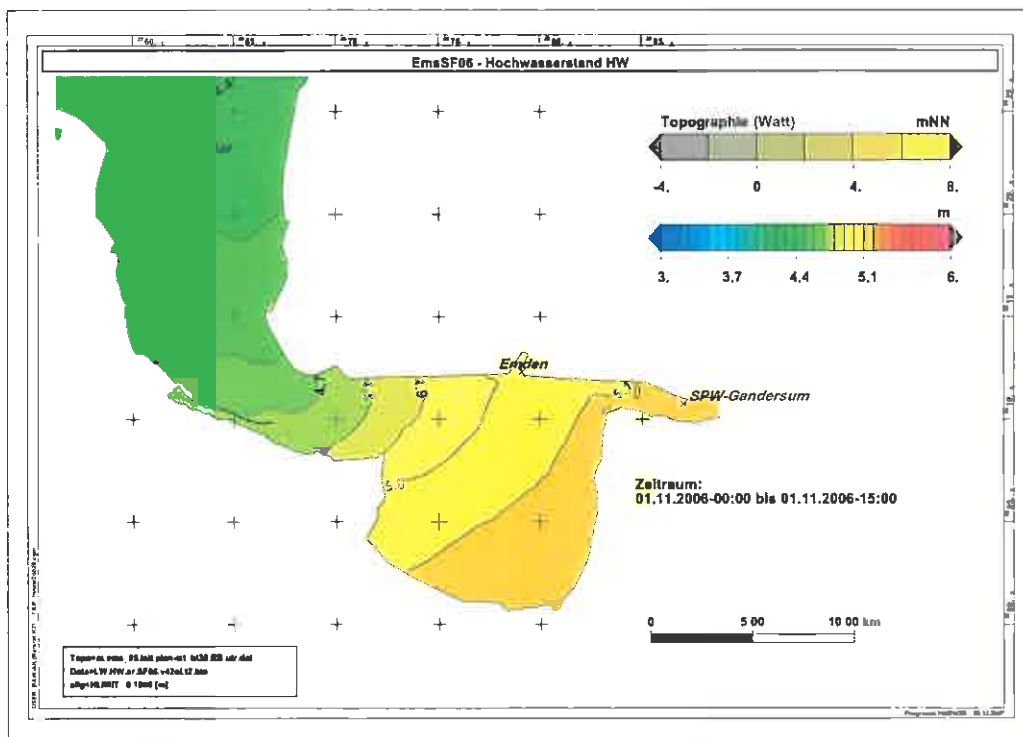


Bild 24: Sturmflutscheitelwasserstand SF06 zwischen Dukegat und dem Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum bei dauerhaft offenem Sperrwerk (UTR-SF06offen: Referenzzustand). Eine Farbstufe entspricht 10 cm.

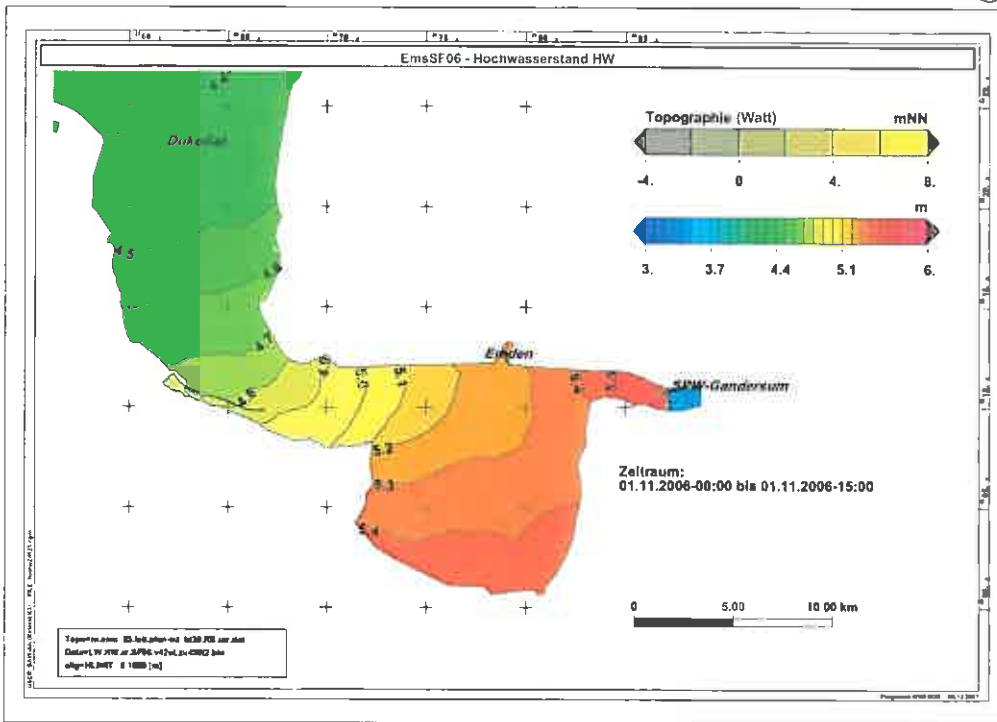


Bild 25: Sturmflutscheitelwasserstand SF06 zwischen Dukegat und Gandersum: Schließen des Sturmflutsperrwerkes bei NN + 3,50 m (UTR-SF06zu350). Eine Farbstufe entspricht 10 cm.

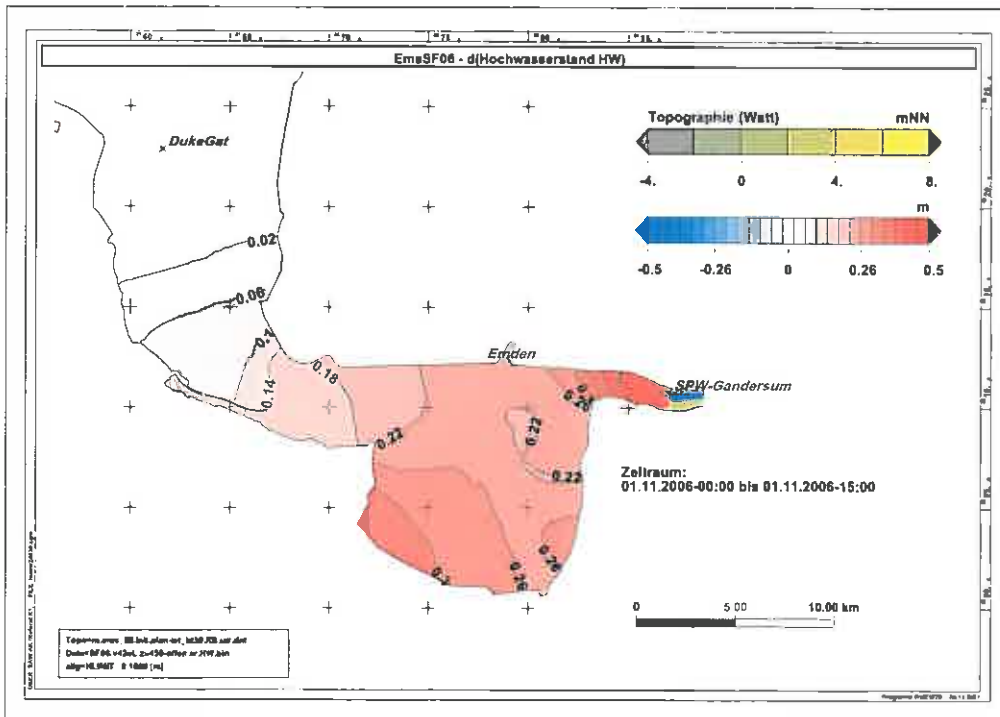


Bild 26: Änderung des Sturmflutscheitelwasserstand SF06 zwischen Dukegat und Gandersum durch Schließen des Sturmflutsperrwerkes bei NN + 3,50 m (UTR-SF06zu350 – UTR-SF06offen). Eine Farbstufe entspricht 4 cm.

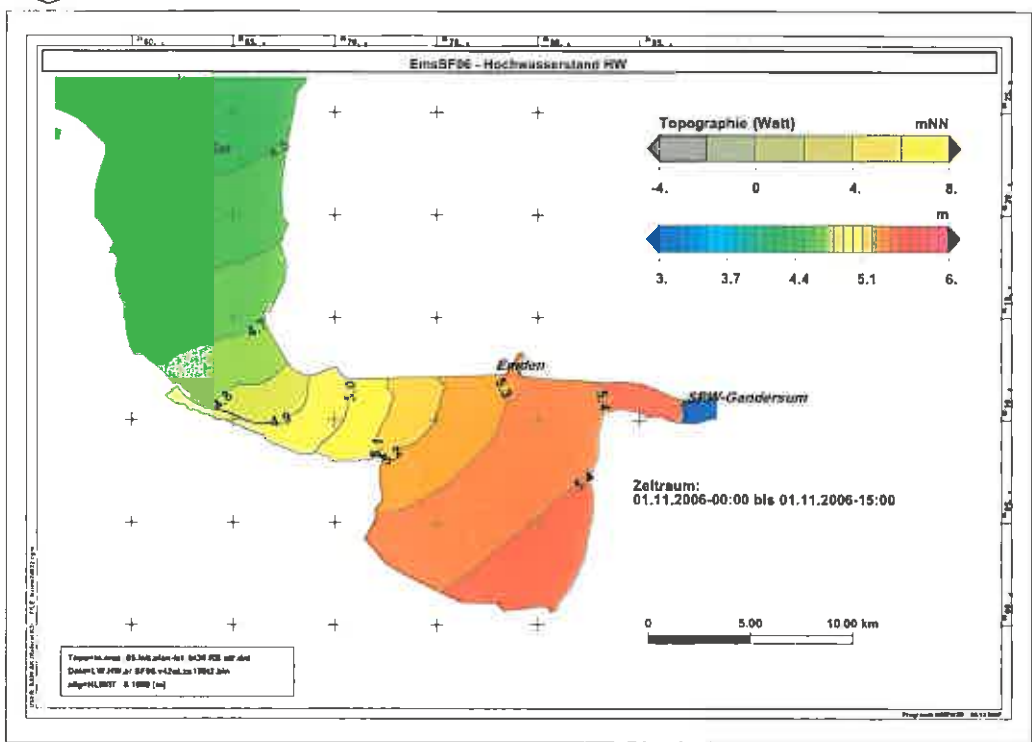


Bild 27: Sturmflutschwelle Wasserstand SF06 zwischen Dukegat und dem Sturmflutsperrwerk Gandersum bei Schließen des Sperrwerkes bei Kenterung Ebbe (UTR-SF06zuKEbbe). Eine Farbstufe entspricht 10 cm.

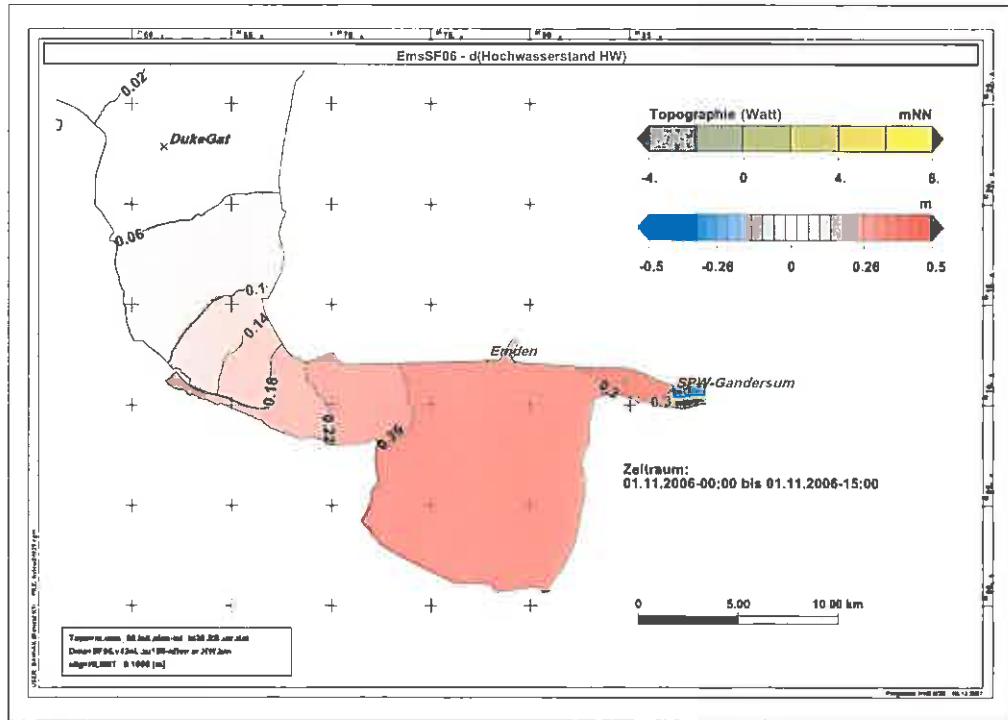


Bild 28: Änderung des Sturmflutschwelle Wasserstand SF06 zwischen Dukegat und Gandersum durch Schließen des Sturmflutsperrwerkes bei Kenterung Ebbe (UTR-SF06zuKEbbe – UTR-SF06offen). Eine Farbstufe entspricht 4 cm.



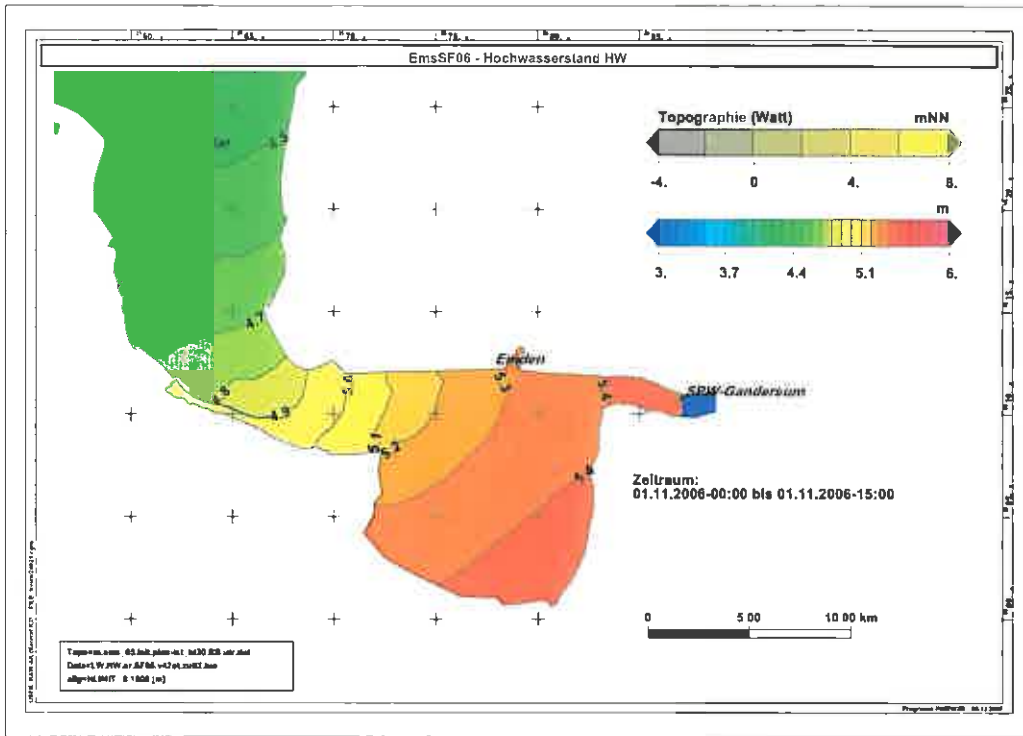


Bild 29: Sturmflutscheitelwasserstand SF06 zwischen Dukegat und dem Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum für permanent geschlossenes Sperrwerk (UTR-SF06zimmer). Eine Farbstufe entspricht 10 cm.

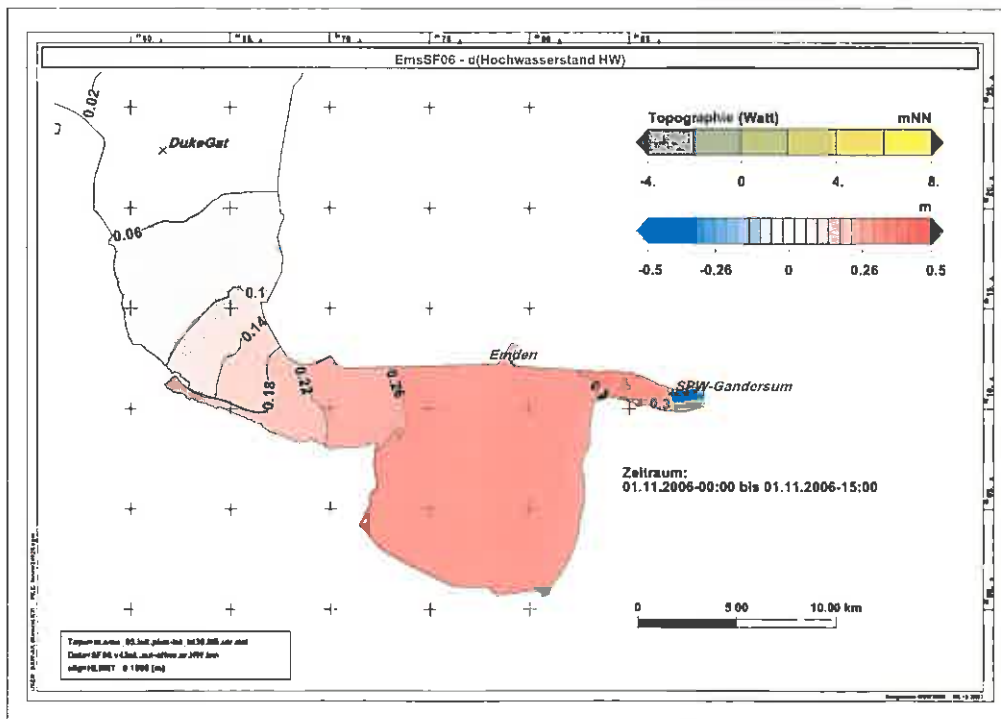
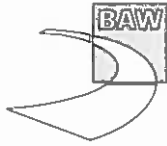


Bild 30: Änderung des Sturmflutscheitelwasserstand SF06 zwischen Dukegat und Gandersum durch ein permanent geschlossenes Sperrwerk (UTR-SF06zimmer – UTR-SF06offen). Eine Farbstufe entspricht 4 cm.



Der Sturmflutscheitelwasserstand HW für die vier genannten Untersuchungsvarianten (siehe auch Tabelle 3 auf Seite 23) wird im folgenden Abschnitt zusammenfassend auf einem Längsprofil entlang der Fahrrinnenmitte zwischen Ems – km 10 (Herbrum) und Ems – km 110 (Hubertgat) dargestellt. Bild 31 zeigt das Längsprofil der Sohlage entlang des Emsfahrwassers zwischen Ems – km 10 in der Unterems und Ems – km 110 in der Außenems. Zur Orientierung ist zusätzlich die Lage von Orten entlang der Ems eingezeichnet. Da für Anfang November 2006 die Überführung eines Werftschiffes von Papenburg nach Gandersum (Norwegian Pearl, geplante Überführung für 4. November 2006, überführt am 7. November 2006) vorgesehen war, befand sich die Unterems zwischen Papenburg (Ems – km 0) und Gandersum (Ems – km 32) zum Zeitpunkt der Sturmflut am 1. November 2006 im planfestgestellten planerischen Ist – Zustand PIZ (siehe Kapitel 5.1.1 auf Seite 12).

Die mit dem HN – Verfahren UnTRIM berechneten Sturmflutscheitelwasserstände HW der 5. Allerheiligenflut für die vier genannten Schließ Szenarien sind in Bild 32 dargestellt. Durch das Schließen des Sperrwerkes bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m (UTR-SF06zu350, rot) bleiben die Scheitelwasserstände in dem durch das Sturmflutsperrwerk geschützten Bereich stromauf von Gandersum deutlich niedriger als mit offenem Sperrwerk (UTR-SF06offen, schwarz). Wird das Sperrwerk bereits bei Kenterung Ebbe (UTR-SF06zuKEbbe, blau) geschlossen, so liegen die Sturmflutscheitelwasserstände in diesem Bereich unter NN + 1,50 m. Für permanent geschlossenes Sturmflutsperrwerk (UTR-SF06zuimmer, grün) ist kein Scheitelwasserstand für den durch das Sperrwerk geschützten Bereich eingezeichnet.

Bild 33 zeigt als Ausschnitt aus Bild 32 die Sturmflutscheitelwasserstände vor dem Sturmflutsperrwerk zwischen Gandersum und der Außenems bei Hubertgat. Bild 34 zeigt im gleichen Ausschnitt die Änderungen des Sturmflutscheitelwasserstandes dHW auf Grund des Schließens des Sperrwerkes für die genannten Schließ Szenarien. Zwischen Gandersum und Pogum werden die höchsten Wasserstandsänderungen dHW von weniger als 50 cm durch Schließen bei NN + 3,50 m (UTR-SF06zu350, rot) erzeugt. Wird das Sperrwerk zu einem strömungsarmen Zeitpunkt geschlossen (UTR-SF06zuKEbbe, blau), so erhöhen sich die Scheitelwasserstände in diesem Bereich um weniger als 35 cm.

Diese höheren Änderungen für UTR-SF06zu350 im Vergleich zu UTR-SF06zuKEbbe sind, wie in Abschnitt 6.4 auf Seite 32 beschrieben, auf die beim Schließen entstehende Schwallwelle zurückzuführen. Zwischen Emden und Knock findet man für UTR-SF06zu350 eine Erhöhung des Scheitelwasserstandes um 20 cm bis 25 cm und für UTR-SF06zuKEbbe um 20 cm bis 30 cm auf Grund des Schließens des Sperrwerkes. Zwischen Knock und Dukegat nimmt die Erhöhung des Scheitelwasserstandes weiter ab. In der Außenems sind keine Erhöhungen der Sturmflutscheitelwasserstände auf Grund des Schließens des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum zu beobachten.

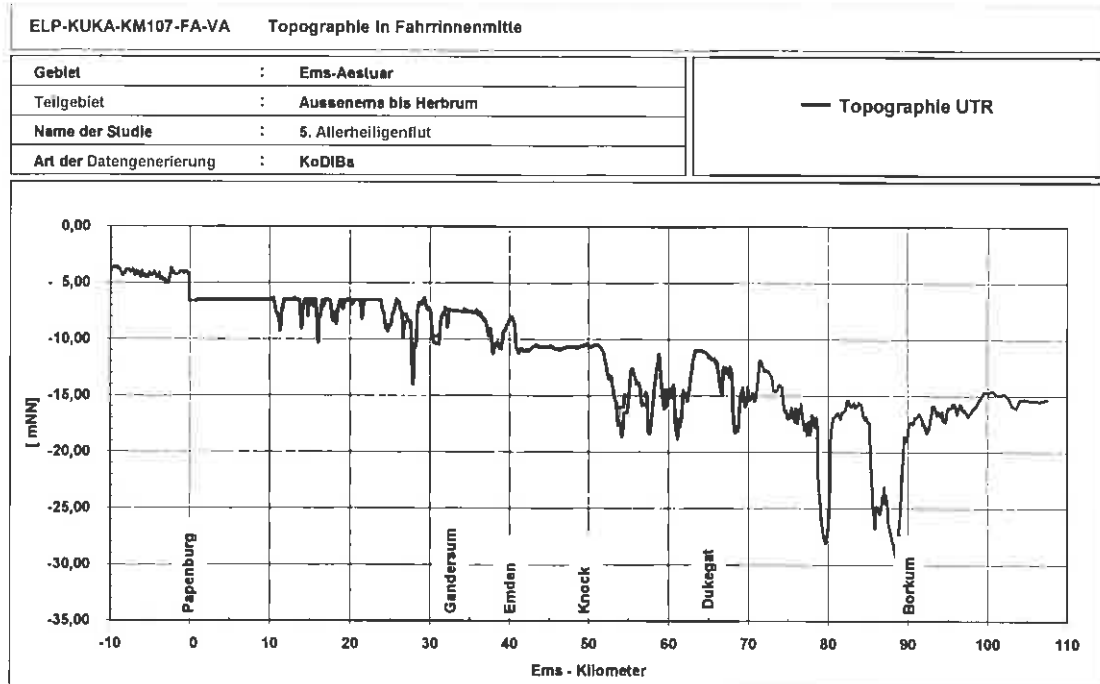
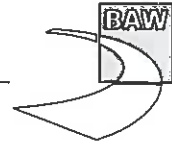


Bild 31: Längsprofil der auf NN bezogenen Sohlage der Fahrrinnenachse in der Topographie des HN - Modells der Ems UTR für den planerischen Ist - Zustand zwischen Ems - km -10 (3 km stromab des Wehres Herbrum und Ems - km 110 (Außenems bei Hubertgat).

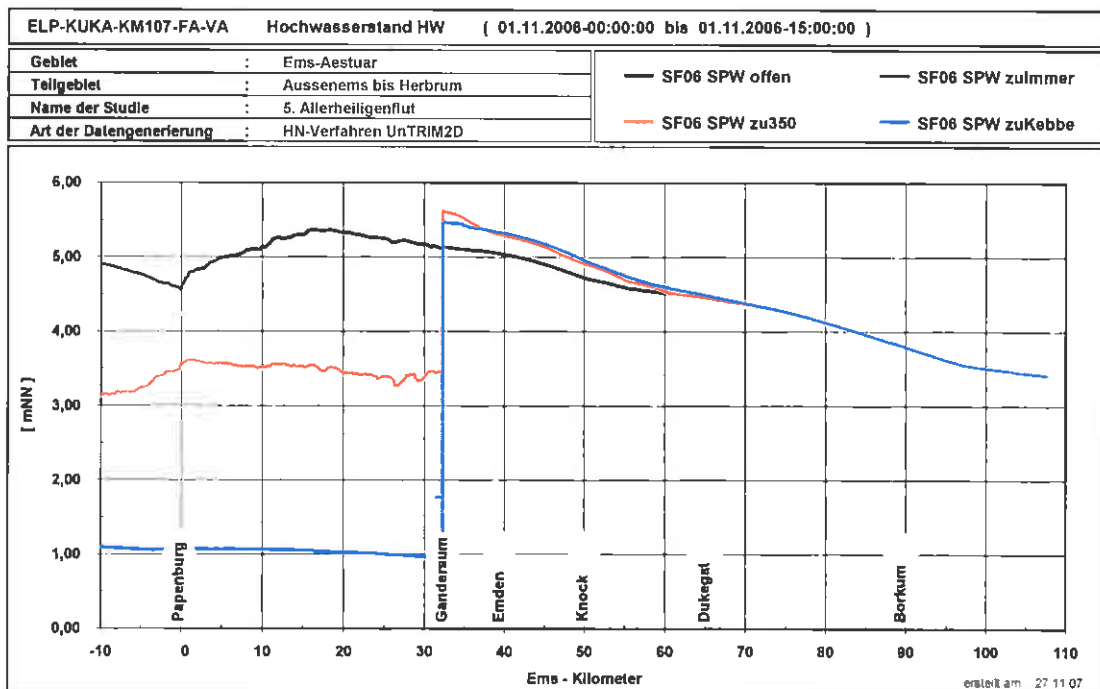


Bild 32: Sturmflutschitelwasserstand HW für die Sturmflut SF06 entlang eines Längsprofils in der Ems von Herbrum bis Hubertgat.

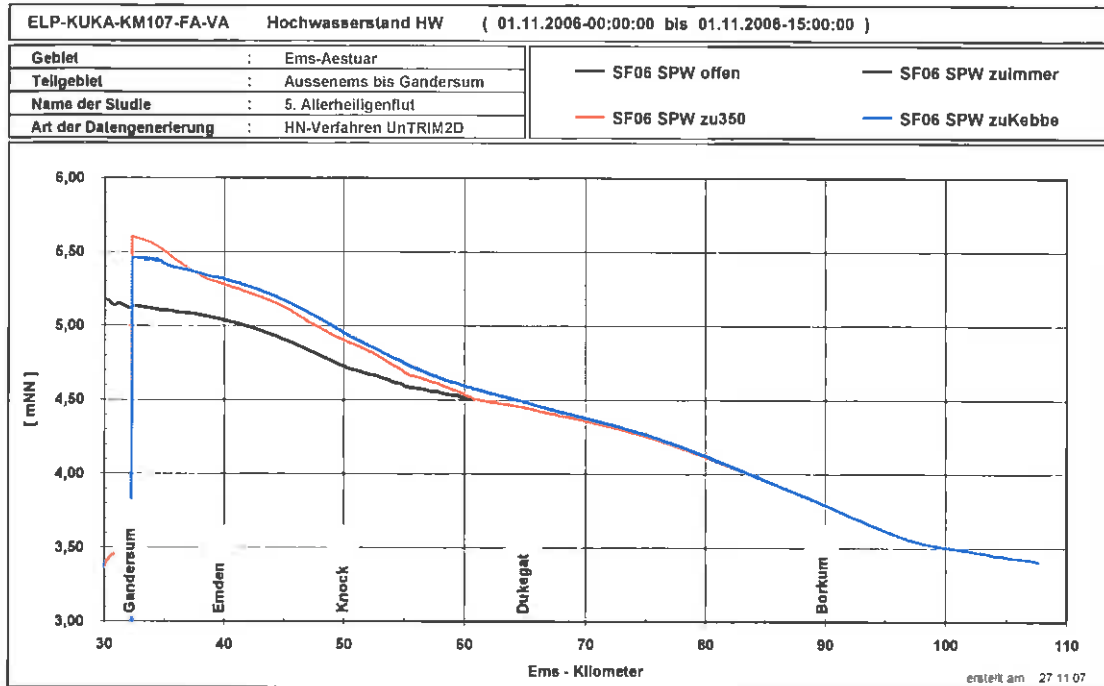


Bild 33: Sturmflutscheitelwasserstand HW für die Sturmflut SF06 entlang eines Längsprofils in der Ems von Gandersum bis Hubertgat. Ausschnitt aus Bild 32

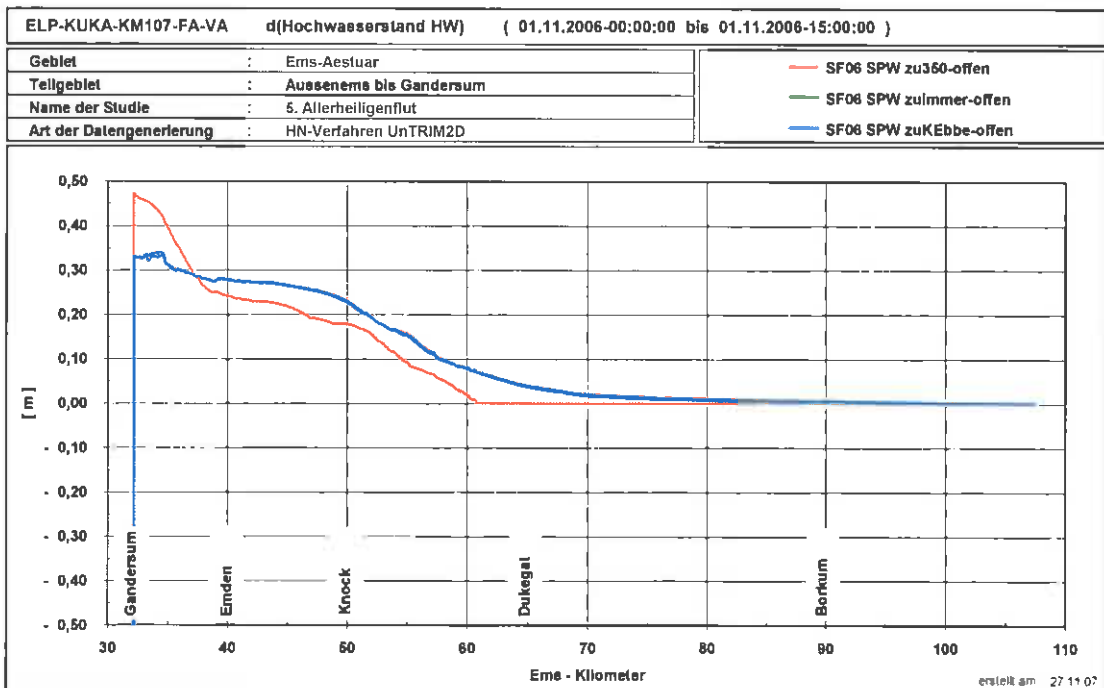
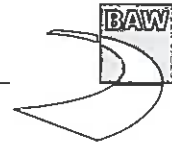


Bild 34: Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes dHW für die Sturmflut SF06 entlang eines Längsprofils in der Ems von Gandersum bis Hubertgat.



## 6.5.2 Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes

Die mit dem HN-Verfahren UnTRIM berechneten Eintrittszeiten des Sturmflutscheitelwasserstandes t<sub>HW</sub> der 5. Allerheiligenflut bezogen auf Ems-km 96 für die vier genannten Schließenszenarien sind in Bild 35 entlang der Fahrrinnenmitte zwischen Gandersum und der Außenems dargestellt. Im Bereich der Außenems von Ems-km 110 bis Dukegat ist keine Veränderung der Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes auf Grund des Schließens des Sturmflutsperrwerkes zu beobachten. Die aus den Wasserstandszeitreihen UTR-SF06zu350 in den Bildern 17 bis 21 bekannte Schwingung im Wasserstand, führt zu den sprunghaften Änderungen in der Eintrittszeit des Scheitelwasserstandes für das Schließenszenario UTR-SF06zu350. Für die Sturmflut 1. November 2006 mit geöffnetem Sperrwerk (schwarz) tritt der Sturmflutscheitelwasserstand bei Ems-km 40 ca. 95 Minuten später als bei Ems-km 96 auf. Durch das Schließen des Sperrwerkes bei NN + 3,50 m (rot) tritt der Scheitelwasserstand bei Ems-km 40 bereits nach 85 Minuten auf.

Die Bilder 36 bis 39 zeigen zur Ergänzung flächenhaft im Gebiet zwischen Dukegat und Gandersum die Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes für die vier in Tabelle 3 auf Seite 23 genannten Schließenszenarien.

Die bereits erläuterte Überlagerung der Sturmfluttidewelle mit der durch das Schließen des Emssperrwerkes bei Flutstrom (UTR-SF06zu350) entstehenden Schwallwelle bewirkt im südlichen Dollart ein bis zu 10 Minuten späteres Eintreten des Sturmflutscheitelwasserstandes. Im Bereich des Emders Fahrwassers tritt der Sturmflutscheitelwasserstand bis zu 10 Minuten früher ein (siehe auch Bild 37 im Vergleich zu Bild 36).

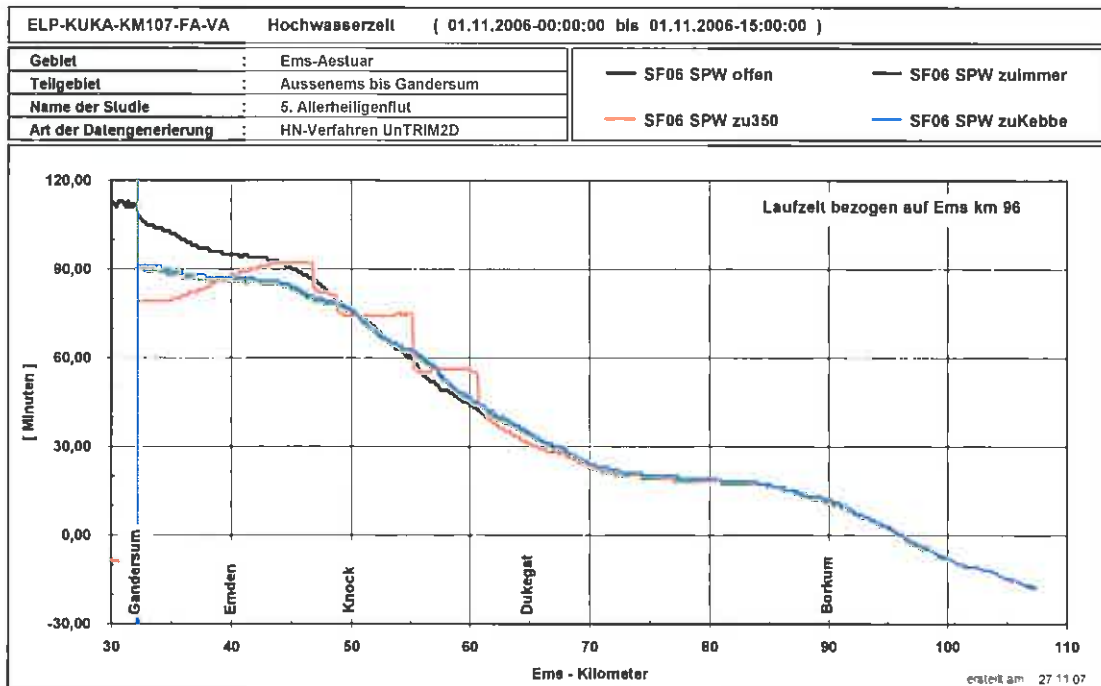


Bild 35: Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand t<sub>HW</sub> bezogen auf Ems - km 96 für die Sturmflut SF06 entlang eines Längsprofils in der Ems von Gandersum bis Hubertgat.

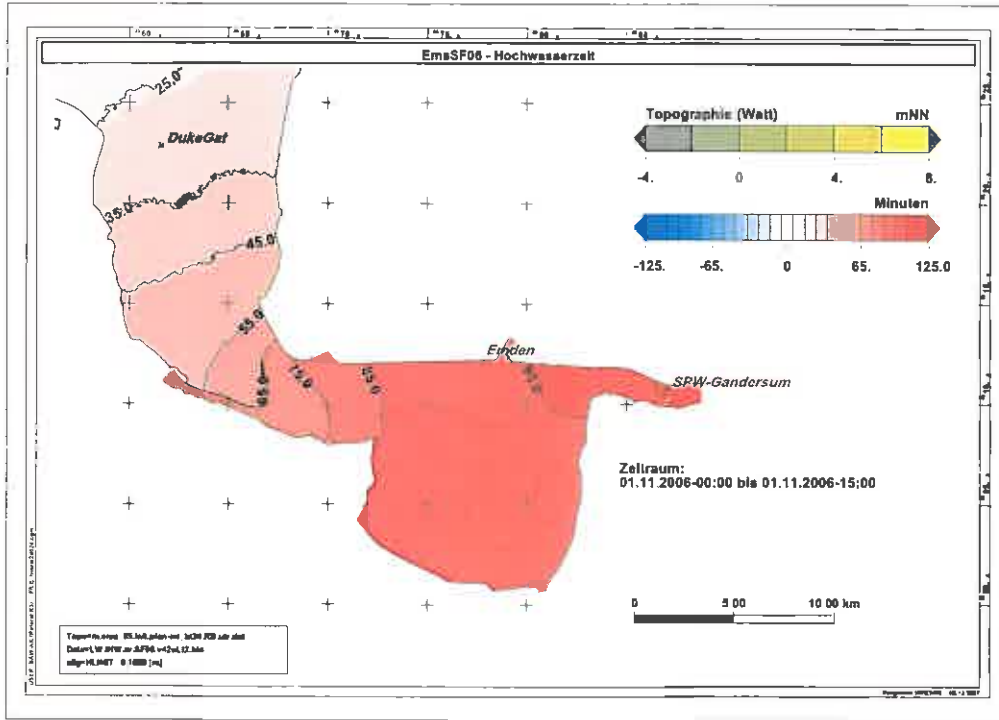


Bild 36: Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand SF06 bezogen auf Ems – km 96. zwischen Dukegat und Gandersum: Offenes Sturmflutsperrwerkes (UTR-SF06offen). Eine Farbstufe entspricht 10 Minuten.

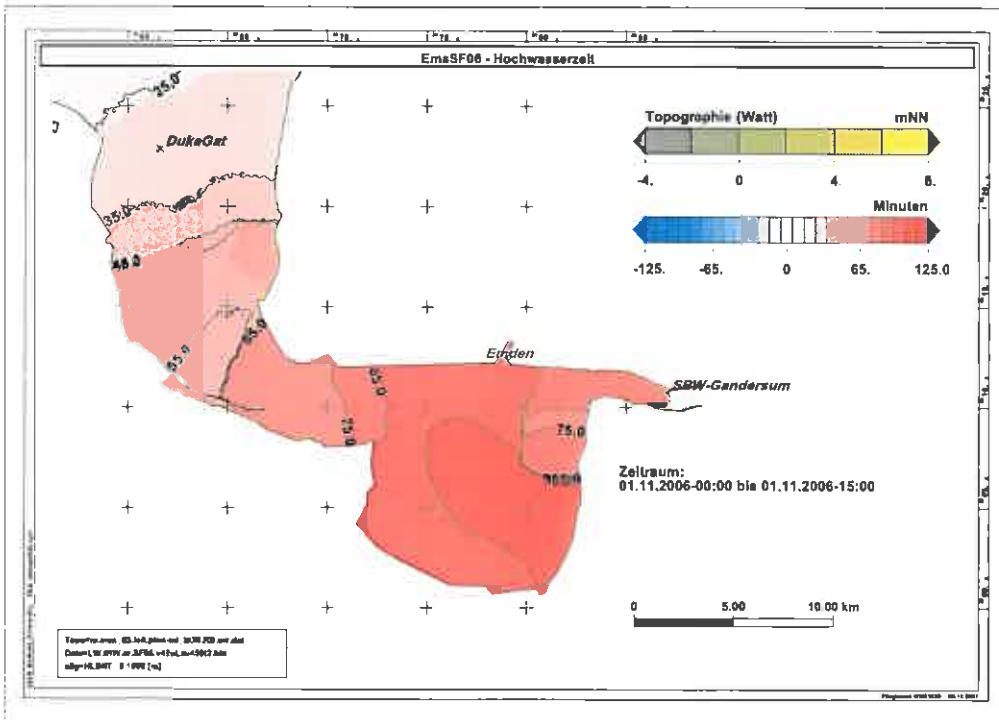


Bild 37: Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand SF06 bezogen auf Ems – km 96. zwischen Dukegat und Gandersum: Schließen des Sturmflutsperrwerkes bei NN + 3,50 m (UTR-SF06zu350). Eine Farbstufe entspricht 10 Minuten.

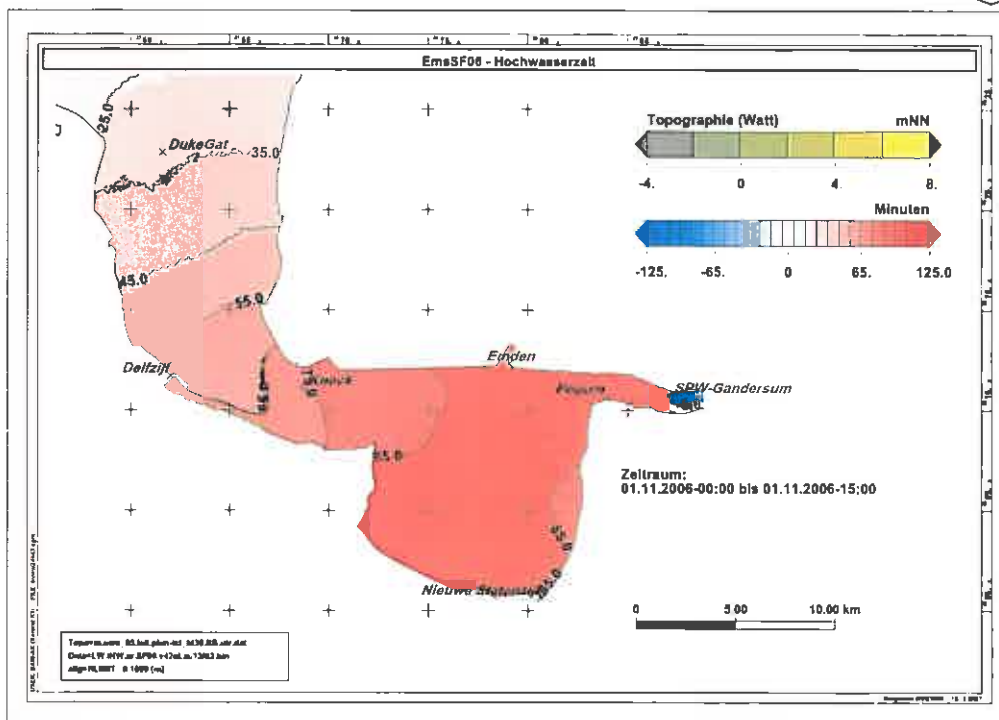


Bild 38: Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand SF06 bezogen auf Ems – km 96 zwischen Dukegat und Gandersum: Schließen des Sperrwerkes bei Kenterung Ebbe (UTR-SF06zuKebbe). Eine Farbstufe entspricht 10 Minuten.

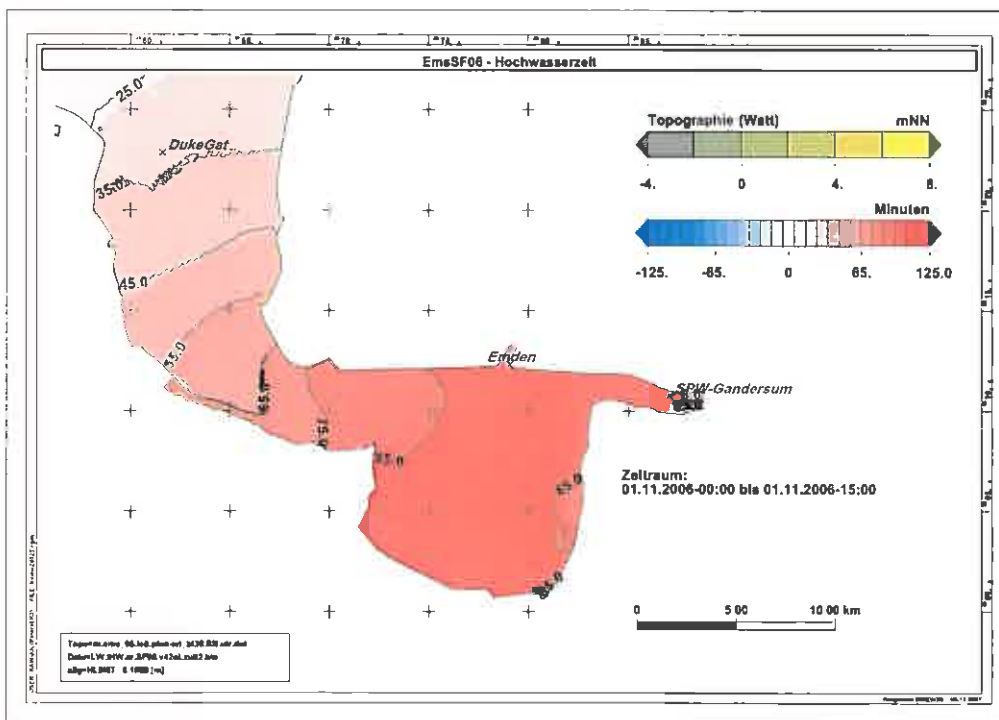


Bild 39: Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstand SF06 bezogen auf Ems – km 96: permanent geschlossenes Sperrwerk (UTR-SF06zuimmer) bezogen auf Ems – km 96. Eine Farbstufe entspricht 10 Minuten.







## 7 Schlussbetrachtung

Die durch das Schließen des Sturmflutsperrwerkes Ems bei Gandersum bedingten Änderungen der Sturmflutkenngößen am 1. November 2006 (5. Allerheiligenflut) werden auf der Grundlage von numerischen Simulationen mit zwei hochauflösenden HN-Modellen der Ems (UTR und TR2) im Rahmen einer wasserbaulichen Systemanalyse ermittelt. Für die Untersuchung wird der Einfluß von vier Schließ Szenarien untersucht:

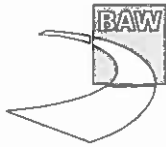
- offenes Sperrwerk als Referenzzustand: SF06offen,
- Schließen des Sperrwerkes bei einem Wasserstand von NN + 3,50 m (Betriebsplan): SF06zu350,
- Schließen des Sperrwerkes in einer strömungsarmen Tidephase (Kenterung Ebbe): SF06zuKEbbe sowie
- permanent geschlossenes Sperrwerk: SF06zuimmer.

Durch das geschlossene Sturmflutsperrwerk wird das Emsästuar bei Gandersum geteilt. Die Außenems wird durch das Sturmflutgeschehen in der Deutschen Bucht und der Nordsee beeinflusst. Die Wasserstände in der durch das geschlossenen Sturmflutsperrwerk geschützten Unterems stromauf von Gandersum sind lediglich durch den Wasserstand zum Schließzeitpunkt, den Oberwasserzufluss und den Wind beeinflusst. Das geschlossenen Sperrwerk hebt die Wechselwirkung zwischen Sturmfluttidewelle und Oberwasserzufluss der Ems auf. Das Abtrennen der Unterems durch das geschlossenen Sturmflutsperrwerk verringert bei gekehrten Sturmfluten den Flutraum und den Schwingungsraum der Ems.

Das Schließen des Sturmflutsperrwerkes führt bei den für die 5. Allerheiligenflut untersuchten Schließ Szenarien zu einer Erhöhung der Sturmflutscheitelwasserstände im Emders Fahrwasser und im Dollart, sowie zu einem deutlichen Absinken der Sturmflutscheitelwasserstände stromauf des geschlossenen Sperrwerkes. Tabelle 4 zeigt zusammenfassend die Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände bezogen auf den Referenzzustand SF06offen für die untersuchten Schließ Szenarien.

	SF06zu350 dHW [cm]	SF06zuKEbbe dHW [cm]	SF06zuimmer dHW [cm]
Ganderum bis Pogum	50 – 30	35 – 30	35 – 30
Pogum bis Knock	30 – 20	30 – 20	30 – 20
Dollart	20 – 35	25 – 30	25 – 30
Knock bis Dukegat	20 – 0	20 – 5	20 – 5
Pegel Emden Neue Seeschleuse	25	30	30
Pegel Delfzijl	15	20	20

Tabelle 4: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse: Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände in cm am 1. November 2006 im Vergleich zum Referenzzustand SF06offen (auf 5 cm gerundet).



Das Schließen des Sturmflutsperrwerkes führt zu einer Veränderung der Laufzeit des Sturmflutscheitels zwischen der Außenems (Ems – km 96) und Emden. Für die hier vorgestellten Schließszenarien der 5. Allerheiligenflut tritt im Vergleich zum Zustand mit offenem Sperrwerk der Scheitelwasserstand im Bereich Ems – km 40 und am Pegel Emden Neue Seeschleuse bis zu 10 Minuten früher ein.

Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg  
Hamburg, den 20. Dezember 2007

Im Auftrag

Bearbeiterin

gez. Winkel

gez. Rudolph

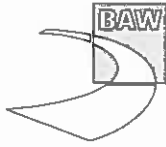
Dr. rer. nat. Norbert Winkel  
(Regierungsdirektor)

Dr. rer. nat. Elisabeth Rudolph  
(Wiss. Angestellte)



## Literaturverzeichnis

- BAW (1997). Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum – Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände in der Unter- und Außenems. Gutachten BAW 97 53 3449, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.
- BAW (1998a). Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum – Ergänzungen zum Gutachten Analyse der Sturmflutscheitelwasserstände in der Unter- und Außenems. Bericht BAW 97 53 3449b, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.
- BAW (1998b). Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum – Veränderung der Niedrigwasserdauer im Dollartgebiet nach gekehrten Sturmfluten. Bericht BAW 97 53 3451b, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.
- BAW (1998c). Validierungsdokument – HN-Verfahren TRIM-2D. Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/trim2d/trim2d1.pdf>.
- BAW (2001). Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum – Sturmflutscheitelwasserstände in der Unterems. Gutachterliche Stellungnahme BAW 97 53 3449, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.
- BAW (2002a). Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum – Sturmflutscheitelwasserstände in der Unter- und Außenems – Reanalyse. Interner Bericht BAW 97 53 3449, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.
- BAW (2002b). Sturmflutsperrwerk Ems bei Gandersum – Sturmflutscheitelwasserstände in der Unterems. Ergänzungen zur Gutachterlichen Stellungnahme BAW 97 53 3449, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.
- BAW (2002c). Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstands. Technischer Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/kenn/lzkw/lzkw-de.html>.
- BAW (2004). Validation document – Mathematical-Model UnTRIM. Bericht, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/PDF/vd-untrim-2004.pdf>.
- BAW (2007a). Anpassungsmaßnahmen an der Unterems zur Überführung großer Werftschiffe – Gutachten zur Untersuchung der Auswirkung einer bereichsweisen Anpassung der Unterems und des Dortmund - Ems - Kanals. Gutachten BAW A3955 03 10095,



Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

BAW (2007b). Testat zur Hochwasserneutralität der erwogenen Vertiefung der Außenems bis Emden. Testat BAW A3955 03 10084, Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg. unveröffentlicht.

Bollrich, G., Diersch, H.-J., Ludewig, D., Lindner, E., Kraatz, W., Kranawettreiser, J., Hörnig, G., Richter, H., Glaszik, G., Wagner, H., Martin, H., und Kummer, V. (1989). *Technische Hydromechanik 2*. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

Casulli, V. (1990). Semi Implicit Finite Difference Methods for the Two Dimensional Shallow Water Equations. *Journal of Computational Physics*, 86:56–74.

Casulli, V. und Cattani, E. (1992). Stability, Accuracy and Efficiency of a Semi Implicit Method for Three-Dimensional Shallow Water Flow. *Computers Math. Applic.*, 27(4):99–112.

Casulli, V. und Cheng, R.T. (1992). Semi-Implicit Finite Difference Methods for Three-Dimensional Shallow Water Flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 15:629–648.

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*, 32:331–348.

Cheng, R.T., Casulli, V., und Gartner, J.W. (1993). Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 36:235–280.

DGJ (2006). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Weser- und Emsgebiet – 2003. Bericht, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.

Dietrich, G., Kalle, K., Krauss, W., und Siedler, G. (1992). *Allgemeine Meereskunde*. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart.

DWD (2006). Orkan Britta am 31.10. und 01.11.2006 und seine Auswirkungen, Autorin: C.Lefebvre. *Berichte zu besonderen Ereignissen – Stürme*, pages 1–17. [http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/sturm/orkan\\_britta\\_30103006.pdf](http://www.dwd.de/de/FundE/Klima/KLIS/prod/spezial/sturm/orkan_britta_30103006.pdf).

Niemeyer, H. D. (1997). Überprüfung der Bestickhöhen von Deichstrecken an der Unterems. *Arbeiten aus der Forschungsstelle Küste - Dienstbericht der Forschungsstelle Küste Norderney 5/97*, 13:1–23.

NLWKN (2007). Generalplan Küstenschutz Niedersachsen / Bremen – Festland. Bericht, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Am Sportplatz 23, 26506 Norden.



- Phillipart, M.E., Dillingh, D., und Pwa, S.T. (1995). De basispeilen langs de Nederlandse kust - De ruimtelijke verdeling en overschrijdingslijnen. *rapport RIKZ-95.008*, pages 1-116.
- Plüß, A. (1999). Nordseemodell der BAW-AK. *Supercomputing News der BAW*, 8-4:22-30. <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Publikationen/scn/sc4-99a/sc4-99a2.pdf>.
- Plüß, A. (2003). Das Nordseemodell der BAW zur Simulation der Tide in der Deutschen Bucht. *Die Küste*, 67:83-127.
- Rijkswaterstaat (2006). Verslag van de stormvloed van 31 oktober en 1 november 2006 (SR84) - Allerheiligenvloed 2006. Bericht, Ministerie van Verkeer en Waterstaat - Rijkswaterstaat, Postbus 20907, NL - 2500 EX's-Gravenhage. <http://www.svsd.nl>.
- smile consult (2006). Erstellung einer konsistenten digitalen Bathymetrie (KoDiBa) des Emsästuares sowie des Dollarts. Abschlussbericht, smile consult GmbH, Vahrenwalder Str. 7, 30165 Hannover.
- Smith, S.D. und Banke, E.G (1975). Variation of the Sea Surface Drag Coefficient with Wind Speed. *Quart. J. of the Roy. Met. Soc.*, 101:665-673.
- Steppeler, J., Doms, G., und Adrian, G. (2002). Das Lokal-Modell LM. *promet*, 27,3-4:123-129. [http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/promet\\_archiv.htm](http://www.dmg-ev.de/gesellschaft/publikationen/promet_archiv.htm).