Vorhersage extremer Sturmfluten mit Hilfe hydrodynamischer Modellierung und künstlicher neuronaler Netze

Mohamed Tayel † und Hocine Oumeraci

Zusammenfassung

Bei Küsten mit flachen Schelfgebieten wie die Nordsee, stellen extreme Sturmflut-Wasserstände aus Windstau und Gezeiten, Windwellen und deren Wechselwirkungen in der Regel die Hauptquelle von Hochwasserrisiken im Küstenbereich. Der relative Beitrag dieser Wechselwirkungen zwischen den Sturmflut-Komponenten zum resultierenden Extremwasserstand ist immer noch weitestgehend unbekannt – trotz der mittlerweile routinemäßigen Kopplung der Komponenten aus Windstau und Gezeiten in den derzeitigen operationellen hydrodynamischen numerischen Modellen (HNM). Aufgrund der hochkomplexen und stochastischen Natur der gesamten Sturmflut, wird die Implementierung einer weitgehend physikalisch-basierten Kopplung aller Sturmflut-Komponenten in die operationellen HNM wahrscheinlich noch Jahrzehnte Forschung benötigen. Mittlerweile wird eher ein pragmatischer datenbasierter hybrider Ansatz benötigt, um die nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen allen Komponenten der resultierenden extremen Sturmflut-Wasserstände zu ermitteln. Solch ein pragmatischer Ansatz wird hier vorgeschlagen, der auf zwei Arten von KNN-Modellen (Künstliche Neuronale Netze) bezeichnet als NARX (Nichtlineare AutoRegressive exogene Eingänge) basiert: (i) NARX neuronale Netzwerkmodell für extreme Sturmflutvorhersagen (Type-A), (ii) NARX neuronale Netzwerkmodell für die Korrektur der in HNM wie TELEMAC2D und TOMAWAC ermittelten nichtlinearen Effekte (Type-B). Besonders bei extremen Sturmflutereignissen, werden Methoden der Ensemble-Modellierung verwendet, um die Varianz zu reduzieren und Fehler zu minimieren. Der vorgeschlagene hybride Ansatz wurde beispielhaft für zwei Pilot-Standorte an der deutschen Nordseeküste (Cuxhaven und Sylt) implementiert. Die Ergebnisse an beiden Standorten zeigen, dass der hybride Ansatz in der Lage ist, die Beiträge der nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen allen Sturmflut-Komponenten durch Subtraktion der Ergebnisse der hydrodynamischen Modelle (lineare Überlagerung aller Sturmflut-Komponenten) von den Ergebnissen der Ensemble-Modelle zu extrahieren. Für die extremsten Sturmflutereignisse im Zeitraum 1991-2007, die in dieser Studie berücksichtigt wurden, führte der Beitrag der nichtlineare Wechselwirkungen im Vergleich mit der linearen Überlagerung von extremen Sturmflut-Komponenten in der Regel zur Reduzierung der resultierenden Wasserstände. Jedoch zeigten die Ergebnisse, dass unter bestimmten Bedingungen die nichtlinearen Wechselwirkungen auch zu höheren Sturmflut-Wasserständen als die lineare Überlagerung führen können (z. B. Sturm vom Januar 2000 bei Cuxhaven und Sylt).

Schlagwörter

Extreme Sturmfluten, Nordsee, Sturmflutkomponenten, nicht-lineare Wechselwirkungen, künstliche neuronale Netze (KNN), hydrodynamische numerische Modelle (HNM), hybride Modellierung

Summary

On coastlines with shallow shelf areas (e.g. North Sea), a combination of high tides, storm surges, wind waves and mutual interactions generally represent the major sources of coastal flood risks: The contribution of the mutual interactions between the various components still remains the most unknown, despite the now routine linking of tidal and surge components in the current operational hydrodynamic storm-tide models. In fact, a proper physically-based coupling of all constituents will probably take decades to be implemented in the current operational models due to the highly complex and stochastic nature of the entire storm-tide system. Meanwhile, rather a more pragmatic data-driven approach is required to assess the contributions of these non-linear interactions to the resulting extreme storm-tide. Such a pragmatic approach is proposed, which is based on two types of artificial neural networks (ANNs) models called NARX (Nonlinear AutoRegressive eXogenous inputs): (i) NARX neural network model to predict the extreme storm-tide (Type-A), (ii) NARX neural network model to nonlinearly correct the numerical storm-tide results from TELEMAC2D and TOMAWAC (Type-B). Ensembles methods are then used to reduce variance and minimize error, especially in extreme storm-tide events. The approach was applied for two pilot sites in the North Sea (Cuxhaven and Sylt). The results show that the ensemble models are able to extract the contributions of the nonlinear interactions between the different extreme storm-tide components at both sites by subtracting the results of the hydrodynamic models (linear superposition of storm-tide constituents) from the ensemble results. In most extreme storm-tide events considered in this study, the contribution of the nonlinear interactions resulted in the reduction of the extreme water levels when compared with the linear superposition of extreme storm-tide components. However, under certain conditions, the nonlinear interactions might result in higher storm-tides than the linear superposition (e.g. storm of January 2000 at Cuxhaven and Sylt).

Keywords

extreme storm-tide, North Sea, storm surge constituents, non-linear interactions, artificial neural network (ANN), hydrodynamic modelling, hybrid modelling

Inhalt

1		Einleitung	343
2		Entwicklung der NARX-Modelle für die Vorhersage extremer Sturmfluten	
		bei Cuxhaven und Sylt	344
	2.1	Auswahl und Vorbereitung der Eingangsparameter für die entwickelten	
		NARX-Modelle	345
	2.2	NARX-Modelle für Cuxhaven und Sylt unter Anwendung von Ensemble-	
		Methoden	

3		Bewertung des Effekts nichtlinearer Wechselwirkungen zwischen den
		Komponenten extremer Sturmfluten
	3.1	Globaler Ansatz
	3.2	Extraktion der mit dem numerischen Modell geschätzten nichtlinearen
		Wechselwirkung in den Ergebnissen für $\eta_{su-t TEL}$ (Schritte 1 bis 5 in Abb. 5)355
	3.3	Extraktion der komplementären Terme für die nichtlineare Interaktion unter
		Verwendung der vorhergesagten η_{EFN} - Ergebnisse (Schritte 6 bis 8 in Abb. 5)359
	3.4	Nichtlineare Wechselwirkung zwischen allen Sturmflutkomponenten (Schritt 9
		in Abb. 5)
4		Schlussfolgerungen
5		Danksagung
6		Schriftenverzeichnis

1 Einleitung

Es kann nicht mit Gewissheit gesagt werden, ob die Natur bisher genügend Zeit hatte, sämtliche physikalisch möglichen ungünstigsten Kombinationen aller Komponenten für die Erzeugung der extremsten Sturmflut ("perfekte Sturmflut") umzusetzen. Extreme Sturmflutereignisse sind von einer Vielzahl Faktoren abhängig, welche sich in die in Abb. 1 dargestellten drei Kategorien einteilen lassen: (a) meteorologische Faktoren mit instationären und stochastischen Eigenschaften wie beispielsweise Windgeschwindigkeit und -richtung, Charakteristika und Zugbahnen von Sturmtiefs und Oberwasserabfluss; (b) deterministische Faktoren wie astronomische Tiden und Resonanztiden, die in einem Schelfmeer wie der Nordsee großen Einfluss auf den Tidenhub haben und von Geometrie, Reibung und Rotation bestimmt werden; (c) lokale Faktoren in Flachwasserregionen, beispielsweise Veränderungen der lokalen Bathymetrie, Rauheit des Festlandsockels und Geometrie der Küstenlinie. In der Nordsee tragen die außerhalb erzeugten und sich dann im betreffenden Gebiet ausbreitenden Fernwellen auch nichtlinear zu dem daraus resultierenden extremen Sturmflutwasserstand bei.

Die größten Schwierigkeiten bei der Bestimmung der physikalisch möglichen "perfekten Sturmflut" sind im Wesentlichen auf die Tatsache zurückzuführen, dass die nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Sturmflutkomponenten nach wie vor unbekannt sind. Auch wenn Ansätze mit einer Kopplung der Gezeiten- und Windstaukomponenten in operationellen Sturmflut-Modellen mittlerweile Routine sind und in jüngster Zeit wesentliche Fortschritte bei der Erforschung der Interaktionen zwischen Atmosphäre und Meer erzielt wurden, wird es sicherlich noch Jahrzehnte dauern, bis eine geeignete, prozessbasierte Kopplung aller Komponenten in den aktuellen numerischen Modellen implementiert ist.

Das Hauptziel dieser Studie ist daher die Entwicklung eines neuen hybriden Modellierungsansatzes. Dieser wurde in Zusammenarbeit mit dem Verbundprojekt XTREM-Risk umgesetzt (OUMERACI et al. 2009), in dem umfangreiche Daten für Sylt und Cuxhaven erfasst, erzeugt und analysiert wurden (GOENNERT und GERKENSMEIER 2012) und (WAHL et al. 2012). In dem neuen Ansatz werden NARX-Modelle mit dem hydrodynamisch-numerischen Modell TELEMAC2D (HERVOUET und VAN HAREN 1994; HERVOUET 2007) und dem Seegangsmodell TOMAWAC (BENOIT 2003; BENOIT et al. 2001) kombiniert. Der Ansatz lässt sich als "operationelles" kostengünstiges Modellierungstool auf Küstengebiete und Ästuare anwenden, um (i) die Nichtlinearität der Prozesse in den in dieser Studie beispielhaft untersuchten Gebieten (Sylt und Cuxhaven) in der Nordsee zu berücksichtigen und (ii) die Lücken in den Langzeitdatenreihen durch Verwendung sequenzieller Zeitreihenvorhersagen in den Untersuchungsgebieten zu schließen.



Abbildung 1: Nichtlinearer Beitrag der wichtigsten Sturmflutkomponenten zur Erzeugung extremer Wasserstände und verwendete Terminologie (in Anlehnung an OUMERACI (2009)).

2 Entwicklung der NARX-Modelle für die Vorhersage extremer Sturmfluten bei Cuxhaven und Sylt

Grundlage für die Modellentwicklung sind die im regionalen Klimamodell (englisch: Regional Climate Model, RCM) SN-REMO erzeugten stündlichen meteorologischen Antriebe im Zeitraum von 1970 bis 2007 (VON STORCH et al. 2000) sowie die Wasserstandsmessungen von 1997 bis 2007 für Cuxhaven und von 1999 bis 2007 für Sylt. Unter Verwendung dieser Daten wurden zwei Arten von KNN-Modellen mit der Bezeichnung NARX (Nicht-lineare AutoRegressive exogene Eingänge) entwickelt: (i) NARX neuronales Netzmodell für die Vorhersage extremer Sturmfluten (Typ A) und (ii) NARX neuronales Netzmodell für die nichtlineare Korrektur der numerischen Sturmflutergebnisse aus TELEMAC2D (Typ B).

Der Aufbau jedes NARX-Modelltyps erfolgt in zwei Phasen (s. Tab. 1), da die Zahl der modifizierbaren neuronalen Architekturparameter (z. B. Anzahl der versteckten Schichten und der versteckten Neuronen in jeder Schicht) sehr groß ist. Die erste Phase

befasst sich mit der Bestimmung der optimalen Anzahl von Intervallen zwischen den Zeitreihen der Eingangsgrößen, die als Input berücksichtigt werden, aber auch mit den optimalen Parametern für die Architektur und den besten Trainingsalgorithmen unter Verwendung von STATISTICA Automated Neural Networks (SANN). In der zweiten Phase wird der endgültige NARX-Modelltyp mit der Matlab Neural Networks Toolbox für die weitere Konfiguration der strukturellen Parameter und Modifikationen auf Basis der von SANN gelieferten optimalen Struktur entwickelt.

Die Anwendung von Ensemble-Verfahren bietet besonders bei extremen Sturmflutereignissen die Möglichkeit, die Varianz erheblich zu reduzieren und Fehler zu minimieren. Bei der Ensemble-Vorhersagemethode werden die Ergebnisse der besten NARX-Modelle gemittelt. Mehrere unterschiedliche "Ensemble Fitting Neural Network-Modelle" (EFN-Modelle) werden entwickelt und getestet, wobei unterschiedliche Architekturparameter für jedes Ensemble verwendet werden.

Die beiden NARX-Modelltypen und ihre Ensemble-Vorhersageergebnisse werden schließlich anhand von beobachteten Wasserstandsdaten in Bezug auf den Korrelationskoeffizienten (r), die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und die Standardabweichung (σ) validiert, um die Modelle mit der besten Vorhersageleistung für die Wasserstände im Zeitraum von 1991 bis 2007 an den beiden Standorten zu bestimmen (TAYEL und OUMERACI 2014; TAYEL 2015).

2.1 Auswahl und Vorbereitung der Eingangsparameter für die entwickelten NARX-Modelle

Für extreme Wasserstände an der offenen Küste sind die folgenden sechs Komponenten relevant: Windstau infolge von Windschubspannung an der Wasseroberfläche; Brandungsstau (Wave Setup) infolge von durch Wind erzeugten Wellen, die einen Impuls auf die Wassersäule übertragen; Tiefdruck aufgrund der Abnahme des atmosphärischen Drucks im räumlichen Bereich des Sturmsystems; ein durch die Corioliskraft erzeugte Abnahme bzw. Zunahme des Brandungsstau aufgrund der Einflüsse der Erdrotation auf die windgetriebene Brandungsströmung an der Küste; Seiche infolge der durch das sich bewegende Windsystem ausgelösten Resonanzeffekte sowie eine astronomische Gezeitenkomponente.

In der Lernphase erfassen die ANN-Modelle die nicht-linearen Zusammenhänge zwischen Komponenten von Extremwasserständen unter Verwendung einer moderaten Zeitspanne (circa fünf Jahre) der bei Cuxhaven und Sylt beobachteten Wasserstände. Für den Lernprozess und die Validierung der Modelle sollte die Untermenge an gemessenen Wasserstandsdaten von Cuxhaven und Sylt so gewählt werden, dass Lücken beziehungsweise fehlerhafte Messdaten in nennenswertem Umfang vermieden werden. Dieses Kriterium wird für Cuxhaven bei den Daten von 1998 bis 2007 und für Sylt von 2000 bis 2007 erfüllt. Die für jedes Jahr der oben genannten Perioden ausgewählten und mit einem Zeitintervall von 10 Minuten bis 1 Stunde aufgezeichneten Beobachtungsdaten werden zeitlich interpoliert, um die Synchronisation mit den verfügbaren stündlichen meteorologischen Daten zu ermöglichen (TAYEL und OUMERACI 2012).

Die Eingangs- und Ausgangsdaten der beiden entwickelten NARX-Modelle für Cuxhaven und Sylt sind der Tab. 2 zu entnehmen. Die spezifischen Eingangsdaten (Input Deck) für die beiden NARX-Modelltypen umfassen die Vorhersagen der astronomischen Gezeiten, die im numerischen Seegangsmodell TOMAWAC erzeugte signifikante Die Küste, 86 (2018), 341-367

Wellenhöhe, die beiden Windgeschwindigkeitskomponenten in Richtung Ost-West (U-Komponente oder zonale Komponente) sowie Süd-Nord (W-Komponente oder meridionale Komponente), die von der Messstation Wick übermittelten Fernwellensignale und zusätzlich zum Oberwasserabfluss der Elbe (nur im Fall von Cuxhaven) den Meeresspiegeldruck für Cuxhaven und Sylt.

2.2 NARX-Modelle für Cuxhaven und Sylt unter Anwendung von Ensemble-Methoden

Das Input Deck für die in Abb. 2 dargestellten Ensemble Fitting Neural Network-Modelle (EFN-Modelle) besteht im Wesentlichen aus vier unterschiedlichen Sturmflut-Vorhersageergebnissen der besten drei NARX Typ-A-Modelle und des besten NARX Typ-B-Modells. Das Input Deck enthält des Weiteren die zeitverzögerten meteorologischen Antriebe (Meeresspiegeldruck, zonale und meridionale Windgeschwindigkeitskomponenten) für Cuxhaven bzw. Sylt. Die EFN-Modelle liefern als Ergebnis den Unterschied zwischen der beobachteten Sturmflut (η_{OB}) und der mit NARX Typ B vorhergesagten Sturmflut (η_B) bei Cuxhaven oder Sylt. Durch das Training der entwickelten EFN-Netze lernen die entwickelten EFN-Modelle folglich mehr Terme für nicht-lineare Wechselwirkungen, "falls möglich" ohne Auswirkungen auf die Vorhersageperformanz bei langen Zeitreihen, die aus den Ergebnissen der NARX-Modelle (sowohl Typ A als auch Typ B) gewonnen wurden.

Tabelle 1: Entwicklungsphasen 1 und 2 der NARX-Modelle Typ A und Typ B für Cuxhaven und Sylt.

Phase I: Verwendung von SANN für die Ermittlung der					
• optimalen Intervalle (time lags) der Zeitreihen der Eingangsparameter					
• optimale Architekturparameter der entwickelten KNN für die Zeitreihen					
\checkmark					
Bestimmung der für die Nordsee relevanten Komponenten extremer Sturmfluten gemäß dem					
zugrunde liegenden physikalischen Prozess (z. B. Wind, Druck und Fernwellen).					
\checkmark					
• Bestimmung des Lern-Datensatzes für Cuxhaven (1998-2007) und Sylt (2000-2007) unter					
Vermeidung von Datenlücken oder fehlerhaften Daten.					
• Bestimmung der Eingabeparameter (z. B. Druck, Wind und Tide) und Ausgangsparameter					
(beobachteter Wasserstand) der KNN.					
• Auswahl 3 unabhängiger Datenreihen: eine Trainingsreihe, eine Validierungsreihe und eine					
Testreihe aus dem Lern-Datensatz im Verhältnis von jeweils 70 %, 15 % bzw. 15 %.					
\downarrow					
Entwicklung der zwei KNN-Modelltypen unter Verwendung verschiedener Architekturparameter:					
1. Verwendung zeitlich verzögerter Eingangsparameter (Lag von bis zu 24 Stunden) zur Erzie-					
lung besserer Vorhersagen in einem dynamischen System (Abhängigkeit von der Dauer der					
effektiven meteorologischen Antriebe)					
2. Verwendung von SANN Zeitreihen des Regression-Typs, wodurch sich die Zahl der vorheri-					
gen Lags bei den Zeitreihen der Eingangsparameter von 1 auf 24 ändert					
3. Anderung der Anzahl der Neuronen in der versteckten Schicht von 1 auf 10 Neuronen.					
4. Anderung der Art der Aktivierungsfunktion in der versteckten Schicht und der Ausgabe-					
schicht					

- SANN verwendet automatisch verschiedene Trainings- oder Lernalgorithmen für das Trainieren von KNN-Modellen wie Back Propagation, konjugiertes Gradienten-Verfahren, Quasi-Newton-Verfahren und Levenberg-Marquardt-Verfahren.
- Nach einem Training der beiden Modelltypen f
 ür Cuxhaven und Sylt mit jeweils 25 Versuchen wurden von jedem Test die 5 neuronalen Netze mit der besten Performanz, d. h. dem h
 öchsten Bestimmtheitsma
 ß (r) und dem niedrigsten Summe der quadratischen Abweichungen (SSE) beibehalten

 \downarrow führt zu \downarrow

Bestimmung der optimalen Architekturparameter der KNN, die sich mithilfe der Matlab Neural Toolbox weiter verfeinern lassen:

- Vorwärtsgerichtete MLP-*Netze* mit 3 *Schichten* (eine versteckte Schicht) sind für die Modellierung extremer Sturmfluten bei Cuxhaven und Sylt geeignet, um die Wahrscheinlichkeit eines Overfit zu verringern.
- Die Ausgabeschicht hat nur ein Neuron mit linearer Aktivierungsfunktion.
- Für die Neuronen in der versteckten Schicht wurde als Aktivierungsfunktion entweder eine tangentiale Sigmoid-Funktion (transig) oder eine logarithmische Sigmoid-Funktion (logsig) gewählt.
- Für Cuxhaven zeigen die Ergebnisse für beide Modelltypen bis zu einem Lag von 18 Stunden eine Zunahme des Bestimmtheitsmaß r² und eine stabile Abnahme des SSE, während für Sylt dasselbe Verhalten bis zu einem Intervall von 16 Stunden zu erkennen ist.
- Die optimale Anzahl Neuronen in der versteckten Schicht der besten gewählten MLP-Netze ändert sich für beide Untersuchungsgebiete von 3 auf 10 Neuronen, was zu einem sehr großen künstlichen neuronalen Netz mit erhöhter Overfit-Wahrscheinlichkeit führen würde.

 $\overline{\psi}\psi\psi$

Phase II: Verwendung der Matlab Neural Toolbox für

- die Bestimmung der Anzahl Knoten in der versteckten Schicht
- die Verbesserung der entwickelten SANN-Zeitreihen-Modelle, indem stattdessen das NARX-Netz in der Matlab Neural Toolbox verwendet wird

Die Anzahl versteckter Neuronen bei beiden NARX-Modelltypen wurde mittels der umfassenden Suche im Bereich [3~10] bestimmt. Diese erfolgte in 8 Versuchen für jeden NARX-Modelltyp, welche die beiden nachfolgenden Schritte der NARX-Netzentwicklung abdecken.

- bei jedem Versuch werden die identifizierten optimalen Architekturparameter von Lags=18 Stunden f
 ür Cuxhaven und Lags= 16 Stunden f
 ür Sylt verwendet. F
 ür die versteckte Schicht und die Ausgabeschicht wird jeweils eine tansig-Aktivierungsfunktion bzw. eine lineare Aktivierungsfunktion verwendet.
- 2. Das NARX-Netz aus jedem Versuch wird entwickelt und trainiert, wobei der Levenberg-Marquardt-Algorithmus verwendet wird, da sich damit die schnellste Konvergenz erzielen lässt.

<u>Ergebnis</u>: Bei beiden NARX-Modelltypen für Cuxhaven und Sylt sind gemäß dem mittleren quadratischen Fehler (MSE) 8 Neuronen die optimale Zahl in der versteckten Schicht.

 \downarrow

Verbesserung der entwickelten SANN-Zeitreihen-Modelle, indem stattdessen das NARX-Netz in der Matlab Neural Toolbox verwendet wird, mit dem die Dynamik des nichtlinearen Verhaltens von Sturmfluten erfasst wird:

- das Ergebnis ist eine Rückkopplung für die Eingabeschicht (globale Rückkopplung) und das Netz hat somit Informationen über den Systemzustand in vorangegangenen Zeitschritten;
- Berücksichtigung der Eingangsdaten beim Vorhersage-Zeitschritt t+1, sodass sich die Vorhersage verbessert.

Entwicklung der beiden NARX-Modelltypen unter Verwendung der identifizierten optimalen Architekturparameter mit 8 versteckten Neuronen in 4 Versuchen:

- 1. Jeder Versuch wird aufgrund der zufälligen Initialisierung von Gewichtungen sechsmal mit derselben NARX-Architektur wiederholt.
- 2. Änderung der Aktivierungsfunktion in der versteckten Schicht (entweder tansig oder logsig).

3. Änderung der Aktivierungsfunktion in der Ausgabeschicht (entweder linear oder tansig). <u>Ergebnis</u>: In beiden Untersuchungsgebieten lieferte NARX Typ B die beste Leistung – allerdings unerwartet; da die Ergebnisse aus TELEMAC2D in den Eingangsdaten enthalten sind, werden bei einigen Sturmflutereignissen die Scheitel der Extremwasserstände unterschätzt oder überschätzt.

Entwicklung eines ENSEMBLE-ANN-Fitting-Modells mit 3 Schichten und einem Neuron in der versteckten Schicht.

- <u>Ensemble-Input</u>: die besten 3 NARX Typ A-Modelle (Änderung lediglich bei der Aktivierungsfunktion) und das beste NARX Typ B-Modell.
- <u>Ensemble-Output</u>: Unterschied zwischen beobachtetem Wasserstand und den Ergebnissen des besten NARX Typ B-Modells.
- Verwendung entweder einer logsig- oder einer transig-Aktivierungsfunktion für die Neuronen in der versteckten Schicht und der Ausgabeschicht.

Tabelle 2: Eingangs- und Ausgangsdaten für die NARX-Modelle Typ A und Typ B für Cuxhaven und Sylt.

D 1 11	Cuxhaven	Sylt
Beschreibung	(Typ A und Typ B)	(Typ A und Typ B)
Eingangs- daten	 Zeitreihen der U-Komponente des Windes. Zeitreihen der V-Komponente des Windes. Zeitreihen des Druckes auf den- Meeresspiegel. Zeitreihen der Wasserstands- beobachtungen. Zeitreihen des Oberwasserabflus- ses der Elbe. Zeitreihen externer Fernwellen, Messstation Wick. Zeitreihen der Vorhersage astronomischer Gezeiten. Zeitreihen der Ergebnisse von TOMAWAC zur signifikanten Wellenhöhe (Hs) Zeitreihen der Ergebnisse von TELEMAC2D zur Sturmflut (nur für Typ B). 	 Zeitreihen der U-Komponente des Windes. Zeitreihen der V-Komponente des Windes. Zeitreihen des Druckes auf den Meeresspiegel. Zeitreihen der Wasserstands- beobachtungen. Zeitreihen externer Fernwellen, Messstation Wick. Zeitreihen der Vorhersage astronomischer Gezeiten. Zeitreihen der Ergebnisse von TOMAWAC zur signifikanten Wellenhöhe (Hs) Zeitreihen der Ergebnisse von TELEMAC2D zur Sturmflut (nur für Typ B).
Ausgangs- daten	Zeitreihen der stündlichen Vorhersa- gen extremer Wasserstände	Zeitreihen der stündlichen Vorhersa- gen extremer Wasserstände
Trainings- zeitraum	1998 bis 2005	2000 bis 2005
Vorhersage- zeitraum	1991 bis 2007	1991 bis 2007

Optimale Architekturparameter (Abb. 2) sind: jeweils ein Neuron in der versteckten Schicht und in der Ausgabeschicht mit den Zeitabständen der meteorologischen Eingangsdaten $d_u = 18$ Stunden für Cuxhaven und $d_u = 16$ Stunden für Sylt. Für die versteckte Schicht und die Ausgabeschicht wird lediglich die Art der Aktivierungsfunktion geändert. In der versteckten Schicht sind die Transferfunktionen tansig oder logsig möglich, in der Ausgabeschicht sind die tansig-, logsig- sowie die linearen Funktionen am besten geeignet. Die Entwicklung der EFN-Modelle wurde in sechs Versuchen implementiert; dabei wurde der in Matlab eingebaute Levenberg-Marquardt-Algorithmus angewendet. Bei jedem Versuch wird entweder für die versteckte Schicht oder für die Ausgabeschicht die Art der Aktivierungsfunktion geändert.

Auf Basis der Wasserstandsbeobachtungen bei Sturmfluten zwischen 1998 und 2007 in Cuxhaven und zwischen 2002 und 2007 bei Sylt wurden die Vorhersageergebnisse des EFN-Modells (η_{EFN}) im Hinblick auf den Korrelationskoeffizienten (r), RMSE und σ "validiert". Die Ergebnisse offenbaren, dass in der versteckten Schicht die logsig-Aktivierungsfunktion und in der Ausgabeschicht die transig-Aktivierungsfunktion die besten Ergebnisse für Cuxhaven und Sylt liefert (niedrigste RMSE und höchste Korrelation). Für die EFN-Modelle in Cuxhaven liegt der niedrigste RMSE-Wert bei 0,148 m mit einer Korrelation von 0,99. Das beste EFN-Modell für Sylt weist eine RMSE von 0,124 m und eine Korrelation von 0,98 auf.



Abbildung 2: Eingangs- und Ausgangsgrößen des Ensemble Fitting Network (EFN) für Cuxhaven und Sylt mit jeweils einem Neuron in der versteckten Schicht und in der Ausgabeschicht.

Die Validierungsergebnisse für die beste (η_{EFN}) liegen für beide Standorte Cuxhaven und Sylt nahe bei den Werten der besten NARX Typ-B-Ergebnisse. Die aus den Ergebnissen der NARX Typ-B-Modelle gewonnene langfristige Vorhersageperformanz wird also, wie in Abb. 3 dargestellt, innerhalb von (η_{EFN}) eerbt. Bei den Stürmen im Januar 2000 auf Sylt und im Dezember 1999 in Cuxhaven (Abb. 3) entsprechen die Höhe und der Zeitpunkt des Auftretens des höchsten Scheitels von (η_{EFN}) in etwa dem tatsächlich gemessenen Wasserstand (η_{OB}) .

Der Vergleich der Wasserstandsmessdaten (η_{OB}) der numerischen Wasserstandsvorhersage ($\eta_{su-tTEL}$) sowie der Ensemble-Ergebnisse (η_{EFN}) lässt sich durch sinnvolle Anwendung des Taylordiagramms wie in Abb. 4 gezeigt (TAYLOR 2001) grafisch zusammengefasst darstellen. Für den Vergleich werden die η_{OB} Daten des Zeitraums von 1998 bis 2007 für Cuxhaven und von 2000 bis 2007 für Sylt verwendet. Die Position jedes Labels auf dem Taylordiagramm wird durch die Werte des Korrelationskoeffizienten (r) der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE) und der Standardabweichung (σ) bestimmt. Diese statistischen Parameter werden in den Taylordiagrammen normalisiert, indem sowohl die RMSE als auch die Standardabweichung σ der verglichenen Ergebnisse durch die Standardabweichung der Beobachtungsdaten ($\sigma_{observed}$) dividiert wird. Wichtigster Aspekt beim Ansatz auf Basis eines Taylordiagramms (TAYLOR 2001) ist das Erkennen der Beziehung zwischen den vier relevanten statistischen Indikatoren (hier RMSE, σ_{result} , $\sigma_{observed}$ und r):

$$\left(\text{RMSE}\right)^2 = \left(\sigma_{\text{result}}\right)^2 + \left(\sigma_{\text{observed}}\right)^2 + 2^* \sigma_{\text{result}}^* \sigma_{\text{observed}}^* r \tag{1}$$

Die η_{EFN} -Ergebnisse für Cuxhaven und Sylt haben eine Korrelation von 0,99 beziehungsweise 0,98 sowie eine normalisierte RMSE von 0,13 m beziehungsweise 0,17 m. Darüber hinaus erweisen sich die EFN-Modelle während der einzelnen extremen Sturmereignisse als leistungsfähiger als die NARX Typ B-Modelle. Dies geht aus Abb. 3 hervor, in der die Messdaten zu den Stürmen im Dezember 1999 in Cuxhaven und im Januar 2000 auf Sylt dargestellt sind. Die Ensemble-Modelle η_{EFN} liefern eine korrekte Vorhersage des Eintrittszeitpunkts des höchsten Scheitels η_{OB} während des Sturms im Dezember 1999 in Cuxhaven, während das NARX Typ B-Modell hier bei der Prognose des höchsten Scheitels $\eta_{\scriptscriptstyle B}$ eine Verzögerung von einer Stunde aufweist. Der höchste vom Ensemble-Modell ausgegebene Scheitel η_{EFN} erreicht 3,84 m, womit die Vorhersagequalität besser ist als die des NARX-Modells (Typ B) mit einem Scheitelwert von nur 1,9 m. Für die Zeit des Sturms vom Dezember 1999 (Anatol) in Cuxhaven besteht jedoch immer noch ein Unterschied von 0,66 m zwischen η_{EFN} und η_{OB} , der in erster Linie auf die Überschätzung des im Klimamodell SN-REMO vorhergesagten Druckes auf den Meeresspiegel gegenüber dem tatsächlich beobachteten Druck zurückzuführen ist. So liegt der beobachtete Kerndruck von Anatol am 3. Dezember bei 953 hPa (NILSSON et al. 2005), während die Vorhersage durch SN-REMO 986 hPa erreicht. Dies führt zu einer Wasserspiegelabsenkung um einen Zentimeter je hPa Druckzunahme, sodass eine Differenz von 33 cm erreicht wird. Dieser Anstieg des Druckes auf den Meeresspiegel bewirkt darüber hinaus eine Reduzierung der vorhergesagten Windgeschwindigkeit, die niedriger ist als die beim Sturm gemessene Windgeschwindigkeit, welche bis zu 5 m/s erreicht (NILSSON et al. 2005) und zu einer weiteren Verringerung des vorhergesagten Wasserstandes führt. Dies hat eine Verlagerung der η_{FEN} Kurve nach unten zur Folge, genau an der Talsohle, die vor dem höchsten Scheitelwert zu sehen ist (s. Abb. 3 (a)). Während des Sturms im Januar 2000 bei Sylt ist der höchste Scheitel $\eta_{_{EEN}}$ genau derselbe wie der höchste Scheitel $\eta_{\rm OB}$ mit 3,02 m, wobei der vom NARX Typ B-Modell vorhergesagte höchste Scheitel $\eta_{\rm B}$ überschätzt wird.





Abbildung 1: Ergebnisse der NARX-Ensemble-Modelle und NARX-Typ B- Modelle während der Sturmflut im Dezember 1999 in Cuxhaven (a) und während der Stürme im Januar 2000 bei Sylt (b).





3 Bewertung des Effekts nichtlinearer Wechselwirkungen zwischen den Komponenten extremer Sturmfluten

Das verwendete hydrodynamische Modell "TELEMAC2D" (Version 6.2 im Parallelverarbeitungsmodus) löst die nicht konservative Form der Flachwassergleichungen, bei denen h (Tiefe) und u, v (Fließgeschwindigkeitskomponenten) als die Unbekannten geschrieben werden (HERVOUET 2007). Das Modell betrachtet die Ausbreitung langer Wellen wie Fernwellen und Tidewellen sowie die nicht lineare Wechselwirkung zwischen ihnen. Die numerische Lösung dieser Gleichungen basiert auf der Zwischenschrittmethode (englisch: fractional step method) mit zwei Schritten: (i) Advektion und (ii) Terme für Wellenausbreitung, Diffusion und Quelle (zur Repräsentation von Wind, Corioliskraft, Bodenreibung, eine Quelle oder Senke für den Impuls innerhalb des Gebiets). Zur Lösung der Advektion der Geschwindigkeiten u und v wurde die Charakteristikenmethode (englisch: method of characteristics) angewendet. Die Ausbreitungs-, Diffusions- und Quellterme werden mittels der Finite Elemente Methode gelöst, bei der eine implizite Zeitdiskretisierung die Eliminierung der Nichtlinearität in den Gleichungen ermöglicht. In diesem Fall werden die nichtlinearen Terme zeitlich linear näherungsweise bestimmt. Durch Variation in den Formeln und räumliche Diskretisierung werden die fortlaufenden Gleichungen in ein lineares diskretes System umgewandelt, das mittels einer iterativen Methode auf Basis des Verfahrens der konjugierten Gradienten (englisch: conjugate gradient method) gelöst wird (HERVOUET und VAN HAREN 1994). Diese Behandlung der nichtlinearen Terme kann entweder zu einer Unterschätzung oder einer Überschätzung der Hochwasserscheitel bei extremen Sturmfluten und zu falschen Vorhersagen ihrer Auftretenszeiten führen.

3.1 Globaler Ansatz

Die Implementierung einer verläßlichen Vorhersage auf Basis eines vollständigen Verständnisses der den nichtlinearen Wechselwirkungen zu Grunde liegenden Prozesse in den heutigen operationellen hydrodynamischen Modellen kann noch mehrere Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Aus diesem Grund wird die datengetriebene Modellierung anhand künstlicher neuronaler Netze angewendet, um die Terme für die nichtlinearen Wechselwirkungen durch Lernen von den Wasserstandsdaten zu vervollständigen. Es ist möglich, die nichtlinearen Interaktionen zwischen den verschiedenen Komponenten einer extremen Sturmflut zu extrahieren, indem das entwickelte NARX-Ensemble an ein bewährtes hydrodynamisches Modell wie "TELEMAC2D" gekoppelt wird. Dafür sind neun Schritte erforderlich, die im Folgenden zusammenfassend dargestellt sind (Abb. 5):



Abbildung 5: Extraktion der aus den nichtlinearen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Sturmflutkomponenten für Cuxhaven und Sylt resultierenden Komponente (η_L) .

- Vorgabe des Antriebs, der f
 ür die Erzeugung aller Komponenten extremer Sturmfluten f
 ür das Nordsee-Gitter in TELEMAC2D (Abb. 6) verantwortlich ist, als "Eingangsgr
 ößen" mit ihren Randbedingungen (z. B. Druck auf dem Meeresspiegel, meridionale und zonale Windgeschwindigkeitskomponenten repr
 äsentieren die Antriebsfaktoren f
 ür Sturmflutkomponenten).
- 2. Unabhängige Bewertung jeder Komponente der extremen Sturmflut η_{st-t} (gemäß Definition in Abb. 1) mit Hilfe des Nordsee-Gitters in TELEMAC2D (Abb. 6). Die Randbedingungen jeder Komponente werden so für das Modellgebiet Nordsee separat beschrieben.
- Die in Schritt zwei ermittelten Komponenten werden linear überlagert, um die "lineare" Sturmflut (η_L) für Cuxhaven oder Sylt vorherzusagen. Die nichtlineare Wechselwirkung zwischen den Komponenten findet somit keine Berücksichtigung. In den Werten der "linearen" Sturmflut ist der Effekt des Brandungsstaus (η_w) nicht enthalten, da er nahezu keinen Beitrag zu der in Cuxhaven und bei Sylt beobachteten Sturmflut leistet.
- Antrieb des Nordsee-Gitters in TELEMAC2D durch Verwendung der Randbedingungen aller Komponenten, die f
 ür die Vorhersage der Sturmflut (η_{sw-t TEL}) gleichzeitig vorgegeben werden.

- 5. Berechnung der Differenz zwischen $\eta_{_{su-t}TEL}$ wie in Schritt 4 vorhergesagt und η_L wie in Schritt 3 vorhergesagt, um die nichtlineare Interaktion zwischen den Komponenten gemäß der Annäherung in TELEMAC2D $(\eta_{_{NLT}})$ zu extrahieren.
- 6. Berechnung der Differenz zwischen den Sturmflut-Beobachtungsdaten (η_{OB}) und den mit TELEMAC2D geschätzten Sturmflutdaten $(\eta_{su-tTEL})$, die als repräsentativ für die ergänzende nichtlineare Wechselwirkung angenommen werden (η_{NLE}) : also $\eta_{NLE} = \eta_{OB} - \eta_{su-tTEL}$.
- 7. Training und Entwicklung der NARX-Ensemble-Modelle unter Verwendung von (η_{NLE}) wie in Schritt 6 berechnet; dies findet in TELEMAC2D keine Berücksichtigung.
- 8. Vorhersage der ergänzenden nichtlinearen Wechselwirkung (η_{NLE}) mit Hilfe der entwickelten NARX-Ensemble-Modelle für Cuxhaven und Sylt für den Zeitraum von 1991 bis 2007.
- Lineare Addition der durch TELEMAC2D in Schritt 5 geschätzten nichtlinearen Wechselwirkung η_{NLT} und ihres Gegenstücks (η_{NLE}) im NARX-Ensemble-Modell aus Schritt 8, für die Ermittlung der gesamten nichtlinearen Wechselwirkung (η_{NL}): η_{NL} = η_{NLT} + η_{NLE}.

3.2 Extraktion der mit dem numerischen Modell geschätzten nichtlinearen Wechselwirkung in den Ergebnissen für $\eta_{su-tTEL}$ (Schritte 1-5 in Abb. 5)

Vorgehensweise

Für die Extraktion der geschätzten nichtlinearen Wechselwirkung (η_{NLT}) , die in der mit TELEMAC2D vorhergesagten Sturmflut $(\eta_{su-t TEL})$ betrachtet wird, sollte die lineare Überlagerung der extremen Sturmflutkomponenten (η_L) von $\eta_{su-t TEL}$ abgezogen werden: $\eta_{NLT} = \eta_{su-t TEL} - \eta_L$. Der Wert für η_L besteht aus der linearen Addition der Wirkungen von Tide (η_i) , Windstau (η_{ss}) , Fernwelle (η_{es}) und Oberwasserabfluss (η_{rd}) , die mit TELEMAC2D unabhängig voneinander für das Nordseegebiet simuliert werden (Abb. 6). Der Einfluss des Brandungsstaus (η_w) auf die extreme Sturmflut ist abhängig vom jeweiligen untersuchten Gebiet (innerhalb oder außerhalb der Brandungszone). Beide betrachteten Gebiete liegen außerhalb der Brandungszone, (h > 20m) sodass der Effekt des Brandungsstaus auf η_L und $\eta_{su-t TEL}$ vernachlässigbar ist.

Für die in TELEMAC2D durchgeführten Simulationen der Sturmflut $\eta_{su-tTEL}$ werden die Randbedingungen des hydrodynamischen Modells für die Nordsee durch Verwendung aller im Zeitraum von 1991 bis 2007 erfassten Komponenten der extremen Sturmfluten vorgegeben (TAYEL und OUMERACI 2012). Diese Randbedingungen sind in Abb. 6 dargestellt. Am nördlichen Rand der offenen See (nördliche Grenze: Schottland – Norwegen) werden der Tidewasserstand an jedem Knoten und die Fernwellendaten der Messstation Wick oder Lerwick linear addiert. Am westlichen Rand (westliche Grenze: Frankreich – England) wird nur der Tidewasserstand an jedem Knoten vorgegeben. Der Einfluss des Flachwassers kann somit berücksichtigt werden, wenn die Tidewelle und die Fernwelle sich vom offenen Rand her bis zur deutschen Küste ausbreiten. An der südlichen Kante am Ufer der Ästuare wird der Oberwasserabfluss der angrenzenden Flüsse/Ästuare an jedem Flussabschnitt vorgegeben.



Abbildung 6: Randbedingungen des Nordsee-Gitters innerhalb von TELEMAC2D mit der vorgegebenen Wasserspiegelauslenkung in der offenen See und Fließgeschwindigkeit des Oberwasserabflusses aus südlicher Richtung.

In den Simulationen der Sturmflut η_L mit linearer Überlagerung der Komponenten werden die Randbedingungen für jede Sturmflutkomponente separat festgelegt, um ihren Einfluss bei Stürmen bewerten zu können. So wird beispielsweise für die Bewertung des Gezeiteneffekts nur der Tidewasserstand an jedem Knoten der nördlichen und westlichen Grenzen vorgegeben, während die meteorologischen Antriebe das Modell nur für eine Bewertung des Windstaueffekts antreiben, ohne die Randbedingungen der offenen See oder des Oberwasserabflusses vorzugeben.

Ergebnisse

Für die Stürme im Januar 2000, November 2006 und November 2007 werden die zeitlichen Variationen der vorhergesagten linearen Überlagerung η_L mit dem Beitrag jeder Komponente in Cuxhaven und auf Sylt vorhergesagt. Zu den Zeitpunkten, zu denen bei diesen drei Stürmen die extremen Wasserstände η_{OB} ($(\eta_{OB})_{max}$) beobachtet wurden, erreichen die höchsten η_L -Scheitel in Cuxhaven 3,22 m, 3,17 m und 3,31 m für den Sturm vom Januar 2000, vom November 2006 beziehungsweise vom November 2007. Sie liegen also höher als die entsprechenden Werte für Sylt (2,52 m, 1,96 m beziehungsweise 2,44 m). Der Beitrag von Windstau (η_{ss}) und Tide (η_t) ist aufgrund der geographischen Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungsgebieten auf Sylt niedriger als in Cuxhaven. Der Beitrag der Komponenten Windstau, Tide und Fernwelle zu η_L in beiden Untersuchungsgebieten ist am größten; der Einfluss von Oberwasserabflüssen und Brandungsstau ist nahezu vernachlässigbar. Der Beitrag jeder extremen Sturmflutkomponente

im Sturmereignis vom Januar 2000 in den Untersuchungsgebieten ist Abb. 7 zu entnehmen. Der Beitrag des Windstaueffekts ist am höchsten, mit Maximalwerten von 3,00 m bei Cuxhaven und 2,28 m bei Sylt. Die Tide hat zum Zeitpunkt von $(\eta_{OB})_{max}$ in beiden Gebieten einen geringeren Effekt als der Windstau; sie erreicht 1,00 m bei Cuxhaven und 0,56 m bei Sylt. Der Effekt der Fernwelle auf η_L wird steigend nur während des Sturms im Januar 2000 verzeichnet: zu den Zeiten von $(\eta_{OB})_{max}$ wirkt sich dieser bei Cuxhaven mit +0,34 m und bei Sylt mit +0,26 m aus. Anders bei den Stürmen im November 2006 und 2007 in beiden Untersuchungsgebieten: hier hat die Fernwelle zu den Zeiten von $(\eta_{OB})_{max}$ einen reduzierenden Effekt auf η_L , der im Bereich von -0,05 m bis -0,13 m liegt.

Für die Stürme im Januar 2000, November 2006 und November 2007 in den Untersuchungsgebieten stellen die Höhen der η_L -Scheitel immer eine Überschätzung der $\eta_{sn-t TEL}$ -Scheitel dar, in denen die im numerischen Modell TELEMAC2D geschätzte nichtlineare Wechselwirkung η_{NLT} enthalten ist. Zu den Zeiten von $(\eta_{OB})_{max}$ während dieser drei Stürme erreichen die vorhergesagten Wasserstände $\eta_{sn-t TEL}$ in Cuxhaven 3,04 m, 2,97 m beziehungsweise 3,19 m, was niedriger ist als die für die Stürme im Januar 2000, November 2006 und November 2007 vorhergesagten η_L von 3,22 m, 3,17 m beziehungsweise 3,31 m.

Abb. 7 zeigt die zeitlichen Variationen der vorhergesagten linearen Überlagerung η_L und der mit TELEMAC2D vorhergesagten Sturmflut $\eta_{sn-t\,TEL}$ während des Sturms im Januar 2000 in Cuxhaven und auf Sylt. Der extreme linear vorhergesagte Wasserstand η_L $((\eta_L)_{max})$ sowie die extreme vorhergesagte Sturmflut $(\eta_{sn-t\,TEL})_{max}$ erreichen bei Cuxhaven Werte von 3,37 beziehungsweise 3,24 m und bei Sylt 3,28 m beziehungsweise 3,04 m. In beiden Untersuchungsgebieten werden exakt dieselben Eintrittszeiten von $(\eta_L)_{max}$ und $(\eta_{sn-t\,TEL})_{max}$ verzeichnet. Darüber hinaus tritt $(\eta_{sn-t\,TEL})_{max}$ auf Sylt bei den Stürmen im Januar 2000 und November 2006 neun Stunden vor $(\eta_{OB})_{max}$ auf. Die während dieser Stürme bei Sylt verzeichneten höchsten Sturmflutscheitelwasserstände treten annähernd zeitgleich mit Tidehochwasser auf (s. Abb. 7 (b)). Das Auftreten der Fernwelle mit dem maximalen positiven Wert von 0,5 m (Abb. 7(b)) bei Sylt fiel darüber hinaus mit dem Zeitpunkt des Sturmflutscheitelwasserstandes während des Sturms im Januar 2000 zusammen.





Abbildung 7: Vorhersage der Sturmflut durch lineare Überlagerung η_L und Beitrag jeder Komponente der extremen Sturmflut im Sturmereignis vom Januar 2000 bei Cuxhaven (a) und Sylt (b).

3.3 Extraktion der komplementären Terme für die nichtlineare Interaktion unter Verwendung der vorhergesagten η_{EFN} - Ergebnisse (Schritte 6-8 in Abb. 5)

Vorgehensweise

Die im NARX-Ensemble vorhergesagte Sturmflut (η_{EFN}) beinhaltet die komplementären Terme (η_{NLE}) für die durch TELEMAC2D geschätzte nichtlineare Wechselwirkung (η_{NLT}). Die komplementären Terme (η_{NLE}) sind im Prinzip die lineare Überlagerung des

- (i) Unterschieds zwischen der im NARX Typ B-Modell vorhergesagten Sturmflut (η_B) und der in TELEMAC2D vorhergesagten Sturmflut (η_{ar-t}) .
- (ii) Unterschieds zwischen der im NARX- Ensemble (η_{EFN}) vorhergesagten und der im NARX Typ B-Modell vorhergesagten Sturmflut (η_B) .

Die direkte Subtraktion der vorhergesagten $\eta_{_{SH-I}TEL}$ von $\eta_{_{EFN}}$ (d. h. $\eta_{_{NLE}} = \eta_{_{EFN}} - \eta_{_{SH-I}TEL}$) liefert somit die vorhergesagte $(\eta_{_{NLE}})$. Da das entwickelte NARX-Ensemble auf Grundlage des beobachteten Wasserstands $(\eta_{_{OB}})$ trainiert wird, werden die durch $\eta_{_{EFN}}$ und $(\eta_{_{OB}})$ vorhergesagten Sturmfluten als äquivalent betrachtet (s. Schritt 7 in Abb. 5).

Ergebnisse

Die zeitlichen Variationen von η_{EFN} mit den komplementären Termen (η_{NLE}) werden für die Stürme vom Januar 2000, November 2006 und November 2007 in Cuxhaven und auf Sylt vorhergesagt. Die η_{EFN} -Scheitel, die unmittelbar vor den Eintrittszeiten von (η_{OB})_{max} in beiden Untersuchungsgebieten auftreten, werden von den vorhergesagten η_{sn-t} TEL -Scheiteln und η_L -Scheiteln immer überschätzt. Dies ist auf die starke Reduzierung der η_{EFN} -Scheitel durch η_{NLE} und η_{NLT} zurückzuführen. Während der drei Stürme im Januar 2000, November 2006 und November 2007 führt der Effekt von η_{NLE} in Cuxhaven zu einer Verringerung der direkt vor den Zeiten von (η_{OB})_{max} auftretenden η_L -Scheitel um -0,12 m, -0,36 m und -0,14 m zusätzlich zu der Verringerung von η_{NLT} um -0,34 m, -0,18 m beziehungsweise -0,34 m. Im Gegensatz dazu führt η_{NLE} zu den Zeiten von (η_{OB})_{max} in Cuxhaven und auf Sylt zu einer Überschätzung oder Unterschätzung der η_{EFN} -Scheitel, wenn diese mit den Wasserstandsscheiteln η_{sn-t} TEL und η_L gemäß den beiden folgenden Bedingungen verglichen werden:

(i) Wenn die unmittelbar vor dem Zeitpunkt extremer η_{EFN} ((η_{EFN})_{max}) auftretenden η_L - und η_{str-t TEL} Scheitel bei < 3,00 m beziehungsweise < 2,50 m sind, würden ihre folgenden Scheitel den η_{EFN}-Scheitel zum Zeitpunkt von (η_{EFN})_{max} überschätzen. Die Scheitel von η_{EFN}, η_L und η_{str-t TEL}, welche vor den Zeiten vom Scheitel (η_{EFN})_{max} auftreten, führen zu keiner signifikanten Erhöhung des Mittelwasserstandes (MW) während des Sturms. Die nachfolgenden Scheitel von η_{EFN}, η_L und η_{str-t TEL} breiteten sich daher mit einem ausgeprägten Shoaling-Effekt (Aufsteilen) aus, der zu einer Zunahme ihrer Höhen kommt. Zum Beispiel verringert η_{NLE} während der Stürme vom November 2006 (s. Abb. 8 (d)) und November 2007 auf Sylt (η_{str-t TEL})_{max} um -0,08 m beziehungsweise -0,11 m. Darüber hinaus bewirkt η_{NLT} eine Verringerung von (η_L)_{max} um -0,04 m

beziehungsweise -0,14 m, welche der Verringerung von η_{NLE} hinzugerechnet wird und diese verstärkt.

(ii) Wenn die η_L - und $\eta_{su-tTEL}$ Scheitel, die direkt vor dem Zeitpunkt von $(\eta_{EFN})_{max}$ auftreten, \geq 3,00 m beziehungsweise \geq 2,50 m sind, dann würden die nachfolgenden Scheitel den $\eta_{\scriptscriptstyle EFN}$ -Scheitel zum Zeitpunkt $\left(\eta_{\scriptscriptstyle EFN}
ight)_{
m max}$ unterschätzen. Nur die Höchstwerte von η_L und $\eta_{su-t\,TEL}$, welche vor dem Auftreten von $(\eta_{EFN})_{max}$ verzeichnet werden, führen zu einer Erhöhung von MW während des Sturms bis zu einer Grenze, ab der die nachfolgenden Scheitel sich ohne Shoaling-Effekt fortsetzen können. Die folgenden Scheitel von η_L und $\eta_{su-tTEL}$ werden sich im tieferen Wasser mit weniger ausgeprägtem Aufsteil-Effekt fortsetzen, wodurch ihre Höhen gleichzeitig verringert werden. Im Gegensatz dazu erfolgt die Ausbreitung des Scheitels von $\eta_{
m EFN}$ unter dem Einfluss eines starken Aufsteil-Effekts, der zu einem Anstieg der Höhe führt wie bei den entsprechenden Scheiteln in Bedingung (i). Bei den Stürmen im Januar 2000 (Abb. 8(a)), November 2006 (Abb. 8(c)) und November 2007 in Cuxhaven beispielsweise wird $(\eta_{_{SH-T}TEL})_{max}$ durch $\eta_{_{NLE}}$ um 0,53 m, 0,21 m beziehungsweise 0,29 m erhöht. Andererseits verringert η_{NLT} jedoch $(\eta_L)_{max}$ um -0,14 m, -0,20 m beziehungsweise-0,12 m für dieselben Stürme.

Während dieser drei Stürme verlagern sich in beiden Untersuchungsgebieten die Zeitpunkte von $(\eta_L)_{max}$ und $(\eta_{su-t\,TEL})_{max}$ um dieselbe Menge weg vom Zeitpunkt von $(\eta_{OB})_{max}$. Aus diesem Grund können nur die komplementären nichtlinearen Terme η_{NLE} als Hauptfaktor für die Verlagerung der Eintrittszeitpunkte von $(\eta_{EFN})_{max}$ betrachtet werden. Im Sturm vom November 2006 auf Sylt (s. Abb. 8(d)) liegen die Zeitpunkte des Auftretens der Scheitel von η_L und $\eta_{su-t\,TEL}$ zwei Stunden vor dem Eintreten von $(\eta_{OB})_{max}$.

3.4 Nichtlineare Wechselwirkung zwischen allen Sturmflutkomponenten (Schritt 9 in Abb. 5)

Vorgehensweise

Da die vorhergesagten Sturmfluten η_{EFN} und η_{OB} als äquivalent erachtet werden (s. Schritt 7 in Abb. 5), stellt die nichtlineare Wechselwirkung zwischen allen Sturmflutkomponenten in den Untersuchungsgebieten Cuxhaven und Sylt (η_{NL}) die Differenz zwischen der mit dem NARX-Ensemble vorhergesagten Sturmflut η_{EFN} und der linearen Sturmflut (η_L) dar: ($\eta_{NL} = \eta_{EFN} - \eta_L$). Die in Schritt 9 in Abb. 5 erhaltene (η_{NL}) kann also als gleichwertig angesehen werden mit der linearen Überlagerung der in Schritt 5 in TELEMAC2D geschätzten nichtlinearen Wechselwirkung η_{NLT} und den vom (in Schritt 7 mit den Ergebnissen von Schritt 6 trainierten) im NARX-Ensemble-Modell (EFN-Modell) vorhergesagten komplementären nichtlinearen Termen η_{NLE} : $\eta_{NL} = \eta_{NLT} + \eta_{NLE}$.

Ergebnisse

Bei den Stürmen im Januar 2000, November 2006 und November 2007 in Cuxhaven führt die Berücksichtigung der gesamten nichtlinearen Wechselwirkung η_{NL} in der vorhergesagten η_{EFN} zu einer Überschätzung des durch lineare Überlagerung (Schritt 3)

erhaltenen Ergebnisses $(\eta_L)_{max}$ um 0,39 m, 0,01 m beziehungsweise 0,17 m. Darüber hinaus verzögert sich die Ankunftszeit für $(\eta_{EFN})_{max}$ während des Sturms im November 2006 in Cuxhaven um eine Stunde (Abb. 8(c)). Der Steigerungseffekt von η_{NLE} welcher in erster Linie auf das Aufsteilen der Sturmflut-Welle zurückzuführen ist, bewirkt, dass sich $(\eta_{EFN})_{max}$ verlangsamt und ihre Höhe zunimmt. Im Falle der Stürme vom November 2006 (Abb. 8(d)) und November 2007 auf Sylt hingegen hat die Berücksichtigung von η_{NL} in der vorhergesagten η_{EFN} eine Unterschätzung von $(\eta_L)_{max}$ um -0,12 m beziehungsweise -0,25 m zur Folge, da die durch η_{NLE} bewirkte Reduzierung durch die Verringerung von η_{NLT} unterstützt wird.

Der vorgeschlagene hybride Ansatz findet in Abb. 9 Anwendung: Hier ist eine vergleichende Analyse der extremen Effekte einer nichtlinearen Wechselwirkung zwischen allen extremen Sturmflutkomponenten im Zeitraum 1991-2007 dargestellt. Die in Abb. 9 a und b für Cuxhaven und Sylt ermittelten Ergebnisse werden in den folgenden drei Analyseschritten zusammengefasst:

Schritt 1: Vorhersagen der höchsten möglichen Sturmflut im Zeitraum 1991-2007 $(\eta_{EFN})_{max}$ (Schritte 1-9 in Abb. 5), die zum Zeitpunkt t_{max} eintritt, unter Verwendung des entwickelten NARX-Ensemble-Modells. Darin eingeschlossen ist die nichtlineare Wechselwirkungskomponente η_{NL} zum Zeitpunkt t_{max} (Schritt 9, Abb. 5).

Schritt 2: Bewertung des Effekts jeder in Abb 1 dargestellten extremen Sturmflutkomponente und ihrer nichtlinearen Wechselwirkung auf $(\eta_{EFN})_{max}$ zum Zeitpunkt t_{max} mit folgender Vorgehensweise:

- 2.1. Anwendung von TELEMAC2D (Schritte 1 und 2 in Abb. 5), unabhängige Vorhersage jeder Sturmflutkomponente zum Zeitpunkt t_{max} (Eintrittszeit des im Schritt 1 vorhergesagten Sturmflutscheitels $(\eta_{EFN})_{max}$).
- 2.2. Anwendung des in Abb. 5 beschriebenen hybriden Ansatzes zur Bewertung des Effekts der nichtlinearen Wechselwirkung η_{NL} zwischen den im Teilschritt 2.1 vorhergesagten Komponenten zum Zeitpunkt t_{max} (Schritte 3-9 in Abb. 5).

Schritt 3: Bewertung der höchsten physikalischen Sturmflutgrenze im Zeitraum 1991-2007 mit folgender Vorgehensweise:

- 3.1. <u>Unabhängige</u> Bewertung jeder Sturmflutkomponente, die im gesamten Zeitraum von 1991-2007 bei Anwendung von TELEMAC2D aufgetreten ist (Schritte 1 und 2 in Abb. 5). Die Kopplung von TELEMAC2D und TOMAWAC dient ausschließlich der Vorhersage der Brandungsstaukomponente für die Jahre 2000, 2006 und 2007.
- 3.2. Anwendung des Hybridansatzes aus Abb. 5 zur Vorhersage der nichtlinearen Wechselwirkung (η_{NL}) zwischen den in Teilschritt 3.1 ermittelten Komponenten, die im gesamten Zeitraum 1991-2007 auftraten.
- 3.3. Extraktion des höchsten Scheitels jeder in Teilschritt 3.1 bewerteten Sturmflutkomponente und des höchsten Scheitels ihrer in Teilschritt 3.2 vorhergesagten nichtlinearen Wechselwirkung $((\eta_{NL})_{max})$ während des gesamten Zeitraums von 1991 bis 2007 unabhängig von ihrem Eintrittszeitpunkt. Das bedeutet, dass die extrahierten Sturmflutscheitel nicht notwendigerweise zu demselben Zeitpunkt auftreten.

3.4. Lineare Überlagerung der aus Teilschritt 3 extrahierten höchsten Sturmflutscheitel $((\eta_{dl})_{max})$, für die angenommen werden kann, dass sie die höchste physikalische Grenze einer extremen Sturmflut während des gesamten betrachteten Zeitraums darstellen, obwohl ein zeitgleiches Eintreten der Scheitel der überlagerten Sturmflutkomponenten sehr unwahrscheinlich ist.

In beiden Untersuchungsgebieten fällt für den gesamten Zeitraum von 1991 bis 2007 die lineare Überlagerung $((\eta_{all})_{max})$ immer höher aus als die höchste mögliche Sturmflut $(\eta_{EFN})_{max}$ (s. Abb. 9). Die Höchstwerte der verschiedenen Sturmflutkomponenten und nichtlinearen Wechselwirkung treten somit unabhängig von den jeweils anderen Werten zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf. In Cuxhaven sind $((\eta_{all})_{max})$ und $(\eta_{EFN})_{max}$ mit 7,21 m beziehungsweise 4,00 m höher als die entsprechenden Werte für Sylt (5,66 m und 3,02 m). Dennoch liegen die Prozentsätze von $(\eta_{NL})_{max}$ und den Maxima von Fernwellen $((\eta_{es})_{max})$ bei Cuxhaven mit 21 % beziehungsweise 9,5 % niedriger als die entsprechenden Werte für Sylt (25,80 % und 10,97 %). Die Windstau- und Gezeitenwerte sind somit für Cuxhaven höher als für Sylt, was zu größeren Wassertiefen bei Cuxhaven verbunden mit einem weniger ausgeprägten Aufsteil-Effekt führt. Zudem führt der Effekt der nichtlinearen Wechselwirkung (η_{NL}) auf $(\eta_{EFN})_{max}$ bei Cuxhaven zu einer Verringerung des Wasserstandes um 4 %. Bei Sylt zeigt sich eine gegenteilige Wirkung von η_{NL} : hier steigt der Wasserstand um 18,6 %.

Abb. 9 verdeutlicht, dass der relative Beitrag des Brandungsstaus $((\eta_w)_{max})$ in beiden Untersuchungsgebieten höchstens Werte von 1,2 % erreicht und somit vernachlässigbar ist. Der Beitrag des Höchstwertes des Oberwasserabflusses $((\eta_{rd})_{max})$ liegt zudem in beiden Untersuchungsgebieten bei maximal 1 % und hat entsprechend eine ebenso geringe Auswirkung.









Abbildung 9: Kombination der Höchstwerte der Sturmflutkomponenten aus Abb. 1 zusammen mit der zwischen ihnen bestehenden nichtlinearen Wechselwirkung (η_{NL}) und die mittels NARX-Ensemble vorhergesagte Sturmflut (η_{EFN}) im Zeitraum 1991-2007 bei Cuxhaven (a) und Sylt (b).

4 Schlussfolgerungen

Die Kombination der Vorteile künstlicher neuronaler Netze mit denen der numerischen Modellierung (TELEMAC2D und TOMAWAC) bietet, wie an den Beispielen von Cuxhaven und Sylt dargestellt ein leistungsfähiges und rechnerisch effizientes operationelles Modellsystem für die Sturmflutvorhersage. Der Ansatz eignet sich auch für die Rekonstruktion von fehlenden Daten durch Verwendung von Vorhersagen sequentieller Zeitreihen mit NARX-Ensemble-Modellen, wodurch sich die Menge der Trainingsdaten reduzieren lässt (in der Regel wird mit 5 Jahren eine sehr gute Leistungsfähigkeit erreicht). Als weiterer Vorteil des hybriden Modellsystems erweist sich seine Fähigkeit, die nichtlineare Wechselwirkung zwischen den extremen Sturmflutkomponenten zu berücksichtigen. Die Korrektur wesentlicher Fehler sowohl bei der Größenordnung als auch bei der zeitlichen Dimension der mittels numerischer Modellierung vorhergesagten Ergebnisse ist dadurch möglich. Es wurden zwei Typen von NARX-Modellen und dazugehörigem Ensemble entwickelt und anhand der Wasserstandsbeobachtungen im Zeitraum von 1999-2007 bei Cuxhaven und Sylt validiert. Dabei beträgt die niedrigste RMSE für das NARX-Ensemble-Modell von Cuxhaven 0,148 m mit einer Korrelation von 0,99. Für Sylt liegt die RMSE des NARX-Ensemble-Modells bei 0,123 m und die Korrelation beträgt 0,98.

Die Berücksichtigung der nichtlinearen Wechselwirkung in den NARX-Ensemble-Modellen kann entweder zu einer Verringerung oder zu einer Erhöhung des höchsten Wasserstandes während einer Sturmflut im Vergleich zur linearen Überlagerung extremer Sturmflutkomponenten führen. Für die Untersuchungsgebiete (Cuxhaven und Sylt) ergeben sich die beiden folgenden Situationen:

- (i). Wenn der aus der linearen Überlagerung resultierende η_L-Scheitel, der unmittelbar vor dem Zeitpunkt von (η_{EFN})_{max} gemäß NARX-Ensemble-Modell auftritt, weniger als 3 m beträgt, würde der auf ihn folgende Sturmflutscheitel den η_{EFN}-Scheitel zum Zeitpunkt von (η_{EFN})_{max} überschätzen. Die vor dem Zeitpunkt von (η_{EFN})_{max} eintretenden Scheitel von η_{EFN} und η_L führen zu keiner wesentlichen Erhöhung des Mittelwasserstands (MW) während der Sturmflut. Die nachfolgenden Scheitel von η_{EFN} und η_L werden sich daher mit einem stärker ausgeprägten Aufsteil-Effekt fortsetzen, durch den ihre Höhen gleichzeitig zunehmen.
- (ii). Wenn der η_L-Scheitel, der unmittelbar vor dem Zeitpunkt von (η_{EFN})_{max} auftritt, über 3,0 m liegt, würde der auf ihn folgende Scheitel den η_{EFN}-Scheitel zum Zeitpunkt von (η_{EFN})_{max} unterschätzen. Es ist folglich nur der vor dem Zeitpunkt von (η_{EFN})_{max} auftretende Scheitel η_L, der während des Sturms zu einer Erhöhung des MW bis zu einer Grenze führt, bei der sich der nachfolgende Scheitel mit einem weniger ausgeprägtem Aufsteil-Effekt fortsetzt.

Der höchste Scheitel jeder der mit TELEMAC2D vorhergesagten Zeitreihen der Sturmflutkomponenten und die im NARX-Ensemble-Modell vorhergesagte nichtlineare Wechselwirkung (η_{NL}) für den gesamten Zeitraum 1991-2007 in den Untersuchungsgebieten Cuxhaven und Sylt werden linear addiert ((η_{all})_{max}). Für das Ergebnis wird angenommen, dass es die höchste physikalische Grenze einer extremen Sturmflut während des gesamten betrachteten Zeitraums darstellt, obwohl ein zeitgleiches Eintreten der extremen Scheitel der überlagerten Sturmflutkomponenten sehr unwahrscheinlich ist. Der aus der linearen Überlagerung abgeleitete extreme Scheitel ((η_{all})_{max}) bei Cuxhaven erreicht 7,21 m und ist somit höher als sein Gegenpart auf Sylt (5,66 m). Die maximale Wirkung der nichtlinearen Wechselwirkung $(\eta_{NL})_{max}$ ist mit 21 % in Cuxhaven niedriger als mit ca. 26 % bei Sylt. Windstau und Tide sind bei Cuxhaven höher als bei Sylt, sodass in Cuxhaven auch ein höherer Wasserstand mit einem schwächer ausgeprägten Aufsteil-Effekt verzeichnet wird.

In der noch nicht abgeschlossenen Dissertation liegt der Fokus nun auf der Ermittlung der Worst Case-Szenarien extremer Wasserstände, die im 21. Jahrhundert angesichts des prognostizierten Klimawandels im Nordseegebiet physikalisch möglich sind. Da langfristige Wasserstandsbeobachtungen auf Sylt nicht verfügbar sind, besteht eine rechnerisch effiziente und kostenwirksame Alternative für eine Untersuchung im Küsteningenieurwesen in der Definition einer nichtlinearen Beziehung zur Vorhersage der Wasserstände auf Sylt auf Basis der verfügbaren Wasserstandsdaten von Cuxhaven.

5 Danksagung

Wir danken dem Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD) für die dem erstgenannten Autor gewährte finanzielle Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen für die Dissertation im Rahmen des Deutsch-Ägyptischen Forschungs-Langzeitstipendiums in der Bundesrepublik Deutschland (GERLS) 2009/2010. Weiterer Dank gebührt dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung des vom Co-Autor geleiteten Projekts XtremRisK (Fördernummer 03F0483A). Die Autoren danken auch Prof. Jensen vom Forschungsinstitut Wasser und Umwelt der Universität Siegen, Dr. Gönnert vom Landesbetrieb Straßen, Brücken und Gewässer, Dr. Pluß von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) sowie Dr. Weisse/Dr. Meyer vom Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG) in Hamburg für die Zurverfügungstellung ihrer Daten und ihre umfassende Unterstützung, insbesondere zu Beginn der Studie.

6 Schriftenverzeichnis

- BENOIT, M.: Logiciel TOMAWAC de modélisation des états de mer en éléments finis. Notice de la version 5.2, Rapport HP-75/02/065/A, EDF-LNHE., 2003.
- BENOIT, M.; MARCOS, F. and BECQ, F.: Development of a third generation shallowwater wave model with unstructured spatial meshing, Coast. Eng. Proc., 1(25), doi:10.9753/icce.v25, 2001.
- GOENNERT, G. and GERKENSMEIER, B.: A new method of approaching extreme storm events for design level or risk analysis, Coast. Eng. Proc., 1(33), management. 2, 2012.
- HERVOUET, J.-M.: Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method, John Wiley & Sons, 2007.
- HERVOUET, J.-M. and VAN HAREN, E.: TELEMAC-2D Principle Note. Electrité de France, Technical Report, 1994.
- NILSSON, C.; BÄRRING, L. and GOYETTE, S.: Relating Forest Damage Data to the Wind Field from High Resolution RCM Simulations: Case study of Anatol Passing Sweden in December 1999, in Geophysical Research Abstracts, vol. 7, p. 09883, 2005.
- OUMERACI, H.: Sturmfluten und Bemessungswasserstände, Verlagsskript TU Braunschweig, 2009.

- OUMERACI, H.; JENSEN, J.; GÖNNERT, G.; PASCHE, E.; KORTENHAUS, A.; NAULIN, M.; WAHL, T.; THUMM, S.; UJEYL, G. and GERSHOVICH, I.: Flood risk analysis for a megacity: The German XtremRisK project, in Proc. Conference on Road Map towards a Flood Resilient Urban Environment, p. 8, 2009.
- VON STORCH, H.; LANGENBERG, H. and FESER, F.: A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. Mon. Weather Rev., 128(10), 2000.
- TAYEL, M.: Combined Neural Network and Numerical Model for Extreme Storm Surges, PhD thesis TU-Braunschweig, Germany, 2015.
- TAYEL, M. and OUMERACI, H.: Meteorological data preparation from 1970 to 2007 and configuration of the North Sea TELEMAC2D model. Leichtweiß Inst. Hydraul. Eng. Water Resources Braunschweig. Germany, Internal report (Nr. 3), 90, 2012.
- TAYEL, M. and OUMERACI, H.: A hybrid approach using hydrodynamic modelling and artificial neural networks for extreme storm surge prediction, Submitt. J. Coast. Eng. Jpn., (XtremRisK Special Issue), 32, 2014.
- TAYLOR, K. E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, J. Geophys. Res., 106(D7), 7183-7192, doi:10.1029/2000JD900719, 2001.
- WAHL, T.; MUDERSBACH, C. and JENSEN, J.: Statistical assessment of storm surge scenarios within integrated risk analyses4results of the XtremRisK project, Compr. Flood Risk Manag. Res. Policy Pract., 22, 2012.