

Optimierung empirischer Sturmflutvorhersage – Modellierung hochaufgelöster Windfelder

Jana Kristandt, Benedict Brecht, Helmut Frank und Heiko Knaack

Zusammenfassung

Ziel der Untersuchung war eine Verbesserung der empirischen Sturmflutvorhersage für die Niedersächsische Küste auf Basis hochaufgelöster Windfelder über der Nordsee. Dazu wurden historische Stürme vom Deutschen Wetterdienst (DWD) mithilfe der operationellen Modellkette (GME, COSMO-EU, COSMO-DE) nachgerechnet. Die COSMO-Läufe wurden mit und ohne „Nudging“ modelliert. Die Forschungsstelle Küste des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) nutzte diese Winddaten um ihre Sturmflutvorhersage durch verschiedene empirische Ansätze und künstliche Neuronale Netzwerke zu verbessern.

Schlagwörter

Sturmfluten, Sturmflutvorhersage, künstliche neuronale Netze, empirische Modellierung, Wettervorhersagemodelle (GME, COSMO), Windmodellierung, Nordsee

Summary

Aim of this study is to improve the empirical storm surge forecast for the coast of Lower Saxony using modelled high resolution wind fields over the North Sea. The hindcast of historic storms is done by Deutscher Wetterdienst (German Weather Service, DWD) using their operational model chain (GME, COSMO-EU, COSMO-DE). COSMO runs in forecast and in nudging mode. The NLWKN-Coastal Research Station used the modelled wind fields to optimize the empirical storm surge forecast with a variety of empirical and neural network approaches.

Keywords

storm surges, storm surge forecast, artificial neural networks, empirical modelling, weather forecast models (GME, COSMO), wind simulation, North Sea

Inhalt

1	Einleitung.....	322
2	Hochauflösende Modellierung von Windfeldern.....	323
	2.1 Modellkette	323
	2.2 Nudging-Läufe	325
	2.2.1 Verfügbarkeit von Nudging-Daten	325
	2.3 Ergebnisse.....	326

2.3.1	Verifikation	327
2.3.2	Sturmzugbahnen	329
3	Empirische Sturmflutvorhersage.....	330
3.1	Vorgehensweise und Datenbasis.....	331
3.1.1	Verfügbarkeit der Daten.....	331
3.1.2	Aufbereitung der Daten.....	332
3.2	Trigonometrischer Ansatz.....	333
3.2.1	Analyse weiterer Parameter.....	333
3.3	Ansatz mit Künstlichen Neuronalen Netzen.....	335
3.4	Erster Praxistest: Sturmflut vom 6. Dezember 2013 („Xaver“).....	336
4	Schlussfolgerungen und Ausblick	337
5	Schriftenverzeichnis.....	338

1 Einleitung

Sturmfluten stellen ein schwerwiegendes Risiko für die niedrig liegenden Küstengebiete an der Nordsee dar. Ausgelöst werden sie durch Zyklone, die Nordeuropa von Westen nach Osten überqueren. Dabei können starke westliche bis nordwestliche Winde auf der Rückseite des Tiefdruckgebiets Wassermassen in die Deutsche Bucht drücken und so einen Anstieg des Wasserspiegels an den Küsten der Niederlande, Deutschlands und Dänemarks um mehrere Meter bewirken. Im Falle einer zeitlichen Überlagerung solcher meteorologischer Bedingungen mit einem astronomischen Tidehochwasser läuft eine Sturmflut auf die Küste zu, die das Risiko erheblicher Schäden und Lebensgefahr für die Küstenbewohner mit sich bringen kann (z. B. SCHMITZ 1978a; JENSEN und MÜLLER-NAVARRA 2008).

In den letzten Jahrzehnten wurden verschiedene Ansätze zur Vorhersage von Sturmfluten entwickelt. Diese umfassen empirische Ansätze mit einfachen bis komplexen Zusammenhängen (z. B. ANNUTSCH 1978; MÜLLER-NAVARRA und GIESE 1997) sowie numerische hydrodynamische Modelle (z. B. SCHMITZ 1978b; PHILIPPART und GEBRAAD 1997; DICK et al. 2001; MÜLLER-NAVARRA et al. 2003). Bedeutende Fortschritte wurden durch die enorm verbesserte Wettervorhersage auf Basis numerische Wettermodelle ermöglicht, die vom globalen Maßstab bis hin zu regionalen Modellen mit hoher Auflösung reichen. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) setzt seit Jahren eine Modellkette für die numerische Wettervorhersage ein, die laufend verbessert wird. So betrieb der DWD im Jahre 1968 zunächst das Barokline Modell (BKL) ohne Feuchte, das 1978 durch das Barokline Feuchte Modell (BKF, Maschenweite 254 km) abgelöst wurde (promet 2/3 1978). Dem folgten 1991 das Global-Modell (GM) mit einer Maschenweite von 190 km und das geographisch begrenzte EM-Modell mit 50 km Maschenweite. Diese wurden wiederum 1999 durch das GME-Modell (MAJEWSKI et al. 2002), dessen Maschenweite zu dem Zeitpunkt 60 km betrug, und das regionale LM-Modell (heute COSMO-EU) mit einer Maschenweite von 7 km ersetzt. Heute reicht die Modellkette des DWD vom Global-Modell GME (20 km Maschenweite) über das Regionalmodell für Europa COSMO-EU mit einer Maschenweite von 7 km bis hin zu dem seit 2007 betriebenen hochauflösenden Regionalmodell COSMO-DE für Deutschland mit einer Maschenweite von 2,8 km. Im

Januar 2015 wurde das neue Global-Modell ICON mit einer Maschenweite von 13 km in Betrieb genommen. Die deutschen Küstenbehörden werden durch den DWD mit den notwendigen meteorologischen Daten versorgt.

In den 1990er Jahren wurde von der Vorgängerbehörde des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) ein regionaler Sturmflutwarndienst für die Küste Niedersachsens eingerichtet. Dieser nutzt einen empirischen Ansatz auf Basis der vom DWD vorhergesagten Windgeschwindigkeiten und -richtungen in der südlichen Nordsee. Angesichts eines Mangels an hochauflösenden meteorologischen Daten während früherer Sturmflutereignisse in der Nordsee als Datengrundlage für weiterführende empirische Untersuchungen wurde vom DWD und der Forschungsstelle Küste des NLWKN im Jahr 2011 ein Projekt zur nachträglichen Vorhersage (hindcast) von 39 historischen Sturmflutereignissen an der Nordseeküste im Zeitraum 1962 bis 2011 (s. Tab. 1) begonnen: „Optimierung empirischer Sturmflutvorhersage und Modellierung hochauflösender Windfelder – OptempS-MohoWif“, welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde (Förderkennzeichen 03KIS097 und 03KIS098).

2 Hochauflösende Modellierung von Windfeldern

2.1 Modellkette

Zur Vorhersage des Auftretens von Sturmflutereignissen und deren Ausmaß werden hochauflösende Windfelder benötigt. Aus diesem Grund erzeugte der DWD Windfelder von 39 historischen Sturmflutereignissen (s. Tab. 1). Dazu verwendete er das Global-Modell GME (MAJEWSKI 2002) sowie das nicht-hydrostatische Regionalmodell COSMO (COSMO Modelldokumentation 2014), das in den zwei Versionen COSMO-EU und COSMO-DE betrieben wird. GME ist ein hydrostatisches Modell auf einem Ikosaedergitter.

Tabelle 1: Datum und Windstau [cm] der modellierten Sturmflutereignisse auf Norderney.

Nr.	Datum	Windstau	Nr.	Datum	Windstau	Nr.	Datum	Windstau
1	16.02.1962	297	14	14.02.1989	159	27	05.02.1999	220
2	30.11.1966	206	15	25.01.1990	182	28	03.12.1999	201
3	23.02.1967	228	16	26.02.1990	250	29	30.01.2000	223
4	01.03.1967	206	17	20.08.1990	117	30	28.10.2002	146
5	19.11.1973	255	18	20.12.1991	197	31	01.11.2006	255
6	06.12.1973	241	19	22.01.1993	213	32	12.01.2007	199
7	14.12.1973	235	20	09.12.1993	147	33	18.01.2007	129
8	03.01.1976	275	21	20.12.1993	192	34	18.03.2007	216
9	21.01.1976	275	22	28.01.1994	247	35	09.11.2007	255
10	31.12.1977	248	23	13.03.1994	171	36	25.11.2007	147
11	24.11.1981	237	24	01.01.1995	201	37	13.03.2008	133
12	02.02.1983	223	25	10.01.1995	228	38	12.11.2010	155
13	05.12.1988	159	26	29.10.1996	165	39	04.02.2011	133

Das GME lief für diese Simulationen mit einer Maschenweite von 30 km und mit 60 vertikalen Schichten. Im operationellen Betrieb läuft das GME mit einer Maschenweite von

20 km. In der vorliegenden Studie wird GME vier Mal am Tag (um 00, 06, 12 und 18 UTC) von Reanalysen des Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) gestartet. Für die Stürme vor 1979 werden ERA-40 Reanalysen (UPPALA et al. 2005) verwendet, für die eine dreidimensionale variationelle Datenassimilation auf einem Gitter mit einer Maschenweite von 125 km durchgeführt worden war. Für 1979 und die darauf folgenden Jahre werden Daten der ERA-Interim-Reanalyse (DEE et al. 2011) verwendet. Für ERA-Interim wird ein 12-stündiges vierdimensionales variationelles Datenassimilationsverfahren mit einem horizontalen Gitter mit einer Maschenweite von etwa 80 km benutzt. Das GME-Modell stellt Anfangs- und Randdaten für COSMO-EU bereit. Die Maschenweite beträgt 7 km, die Anzahl vertikaler Schichten 40. COSMO-EU wiederum treibt COSMO-DE (Maschenweite 2,2 km, 65 vertikale Schichten) an. Die hochreichende Konvektion kann bei dieser Maschenweite explizit aufgelöst werden (BALDAUF et al. 2011).

Somit wird in COSMO-DE eine Konvektionsparametrisierung nur für flache Konvektion benutzt. Im Vergleich zu dem beim DWD verwendeten operationellen Modell COSMO-EU ist das Modellgebiet von COSMO-EU im Süden und Osten kleiner (s. Abb. 1), da diese Regionen für Sturmflutvorhersagen an der Nordseeküste nicht von Bedeutung sind. Das Gebiet von COSMO-DE ist im Norden, Westen und Süden größer als das Gebiet des operationellen Modells COSMO-DE (s. Abb. 1). Gegenüber den operationellen Modellen ist die vertikale Auflösung von 50 auf 65 Schichten erhöht. COSMO-DE dient als Testumgebung für einen möglichen neuen operationellen Ausbau von COSMO-DE.

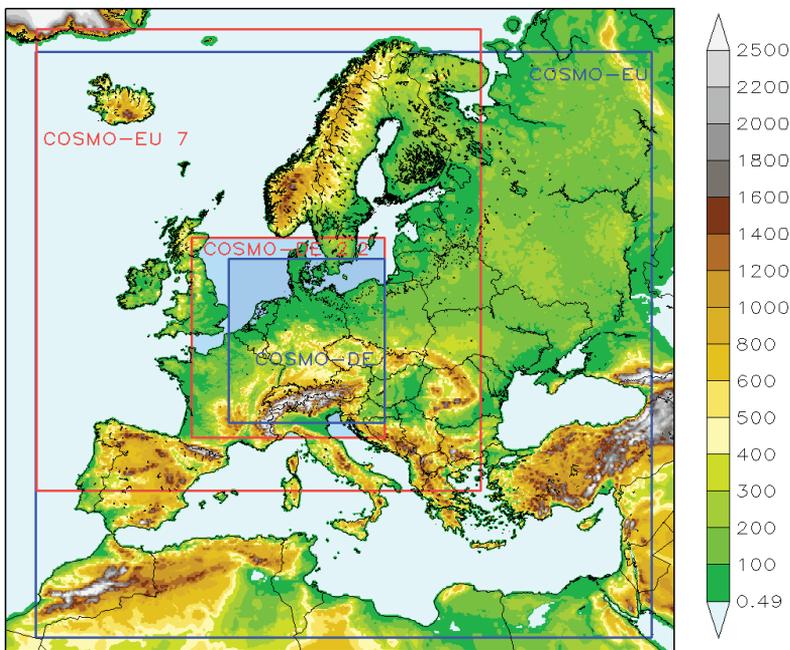


Abbildung 1: Gebiete von COSMO: Die roten Linien markieren die Gebiete von COSMO-EU mit 7 km und von COSMO-DE mit 2,2 km Maschenweite. Die blauen Linien markieren die Gebiete der operationellen Versionen COSMO-EU und COSMO-DE.

Zunächst wurden alle Stürme im reinen Vorhersagemodus simuliert. Das heißt, dass ein Sturm als Reihe von Kurzfristvorhersagen mit neuen Reanalysedaten als Anfangszustand simuliert wurde. Während der ersten Stunden einer Vorhersage müssen sich die Modelle deshalb wieder an die interpolierte Analyse anpassen. Diese Vorhersagestunden werden daher verworfen.

2.2 Nudging-Läufe

Für bestmögliche Analyseergebnisse bei hoher Auflösung wurden die Simulationen mit COSMO zusätzlich mit Hilfe der Newton-Relaxation- oder Nudging-Methode (STAUFFER et al. 1990) durchgeführt, um eine durchgehende Analyse ohne Sprünge zu erhalten. Bei dieser Methode werden die prognostischen Variablen des Modells an vorgegebene Werte innerhalb eines Zeitrahmens herangeführt (relaxiert) (SCHRAFF 1997). Im vorliegenden Fall sind die vorgegebenen Werte die Beobachtungen, was für asynoptische Beobachtungen von Vorteil ist (STAUFFER und SEAMAN 1994). Dieses Heranführen an die beobachteten Werte erfolgt über zusätzliche Terme in den Modellgleichungen. Nudging-Terme sollten in praktischen Anwendungen kleiner bleiben als der größte Term der Dynamik und in der Regel ist dies auch der Fall. Dies hängt mit dem der Methode zugrunde liegenden grundsätzlichen Konzept zusammen, dass die Modellfelder an die Beobachtungswerte herangeführt werden sollen, ohne dass es zu einer wesentlichen Störung im dynamischen Gleichgewicht des Modells kommt (SCHRAFF und HESS 2002).

Sofern verfügbar werden die folgenden Beobachtungsdaten verwendet: Radiosonden liefern Horizontalwinde, Temperatur und Feuchte sowie den Druck auf der untersten Modellfläche. Ebenso liefern Flugzeugmessungen Horizontalwinde und Temperatur in der freien Atmosphäre. Weitere Windmessungen in der Atmosphäre kommen von Windprofilern. Von Bodenstationen werden Druckmessungen, die Feuchte in 2 m über Grund und der 10 m-Wind verwendet. Die 10 m-Winddaten werden nur für Stationen unterhalb von 100 m über dem Meeresspiegel verwendet, damit ausschließlich Stationen in flachen Gebieten in die Auswahl mit aufgenommen werden. Die 2 m-Temperatur wird nicht genutzt, weil sich lokale Effekte nachteilig auf die Stabilität der planetarischen Grenzschicht auswirken könnten (STAUFFER et al. 1991). Eine ausführlichere Beschreibung der Nudging-Methode in COSMO findet sich bei SCHRAFF und HESS (2002).

2.2.1 Verfügbarkeit von Nudging-Daten

Die Datenverfügbarkeit nimmt gegenüber den älteren Stürmen bei den Stürmen jüngeren Datums zu. Für das Gebiet von COSMO-EU stehen in sechs Stunden insgesamt 2000-3000 Synop-Land- und Schiffsbeobachtungen (Verhältnis 10:1) für Ereignisse im Zeitraum 1966 bis 1976 zur Verfügung. Die Zahl dieser Beobachtungen erhöhte sich 1977 auf ca. 5000 in sechs Stunden, hauptsächlich infolge einer Erhöhung der Frequenz der Synop-Messungen (auf dreistündliche oder stündliche Messungen) sowie der erstmaligen Nutzung von Treibbojen (Drifter) und flugzeuggestützten Beobachtungen. Die Anzahl der Beobachtungen stieg danach langsam weiter und lag im Jahr 2000 bei 15.000 Messungen. Windprofiler-Daten stehen seit 2000 zur Verfügung, Radiosondenmessungen seit 1991. Seit 2006 sind über 40.000 Messungen in sechs Stunden möglich. In Abb. 2 ist die

Abdeckung durch verfügbare Synop-Land- und Schiffsdaten am 29. Oktober 2006 während des Sturms „Britta“ erkennbar.

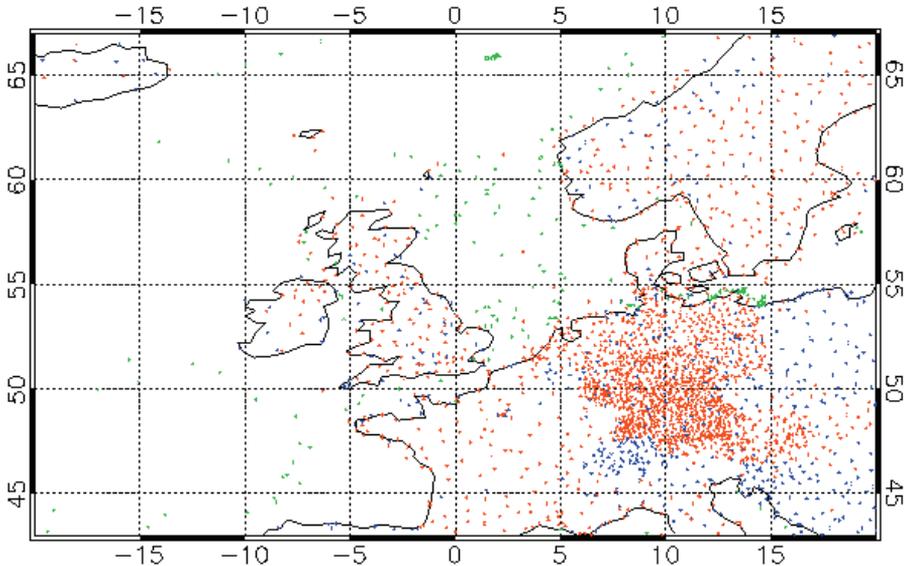


Abbildung 2: Abdeckung durch Synop-Land- und Schiffsdaten am 29. Oktober 2006. Die blauen Punkte zeigen die bemannten Landstationen, die roten Punkte die automatischen Landstationen und die grünen Punkte die Schiffe.

Der Umfang der verwendeten Daten ist geringer als der Umfang der verfügbaren Daten. Dies lässt sich erklären durch die Qualitätskontrolle, die Verfügbarkeit von Metadaten wie Stationshöhe oder Unterschiede zwischen der realen Stationshöhe und der Orographie des Modells. Etwa 40-90 % der verfügbaren Daten werden für das Nudging genutzt.

Für die Stürme im Zeitraum von 1966 bis 1976 werden nur 40-50 % der Daten vom Modell verwendet, hauptsächlich aufgrund fehlender Höhenangaben zu den Synop-Landstationen. Von den Messungen für den Zeitraum 1997 bis 2000 werden 80-90 % der Messungen akzeptiert. Dieses Verhältnis geht bei späteren Modellläufen auf 60-65 % zurück.

2.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse für den Sturm „Britta“ im Oktober 2006 dargestellt. Der Sturm entstand über Neufundland, wanderte Richtung Osten, überquerte die Shetland-Inseln und erreichte dann die Westküste Norwegens. Dort änderte „Britta“ seine Richtung und bewegte sich in südöstlicher Richtung über das Skagerrak fort. Das Wasser wurde über viele Stunden zunächst durch Nordwestwinde und später durch Winde aus Richtung Nord-Nordwest in die Deutsche Bucht gedrückt (s. Abb. 3), was zu dem hohen Wasserstand führte. Die größten Windstärken erreichte „Britta“ auf der südwestlichen Seite des Tiefdruckzentrums hinter der Kaltfront, wie es für Stürme in den mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre typisch ist.

2.3.1 Verifikation

Die COSMO-Modelldaten wurden durch Beobachtungen von bis zu 24 Synop-Stationen an oder in Nähe der Nordseeküste Dänemarks, Deutschlands und der Niederlande sowie von weiteren Stationen in der Nordsee (Plattformen, Feuerschiffe) verifiziert. Es standen jedoch nicht für alle Stürme Messdaten von allen Stationen zur Verfügung. Die Verifikation erfolgte für den reduzierten Druck (pmsl), die Windgeschwindigkeit in 10 m (v_{10m}) und die Windrichtung in 10 m (dd_{10m}) über Grund. Der mittlere Fehler (Bias) des Modells (model-obs) sowie der mittlere quadratische Fehler (RMSE) der Modellwerte gegenüber den Beobachtungswerten wurden berechnet. Im vorliegenden Beitrag werden die Ergebnisse für den Sturm „Britta“ im Oktober 2006 vorgestellt. Die Ergebnisse für die anderen Stürme sind qualitativ ähnlich. Für „Britta“ standen Beobachtungsdaten von 18 Messstationen für die Verifikation zur Verfügung.

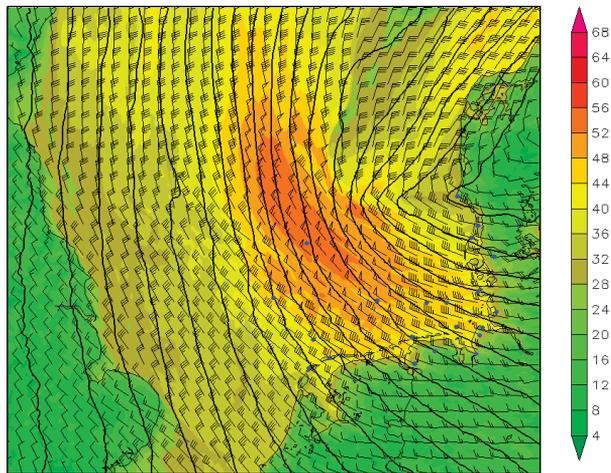


Abbildung 3: Windfeld des Sturms „Britta“ über der Nordsee am 1. November 2006 um 1 Uhr UTC drei Stunden vor Erreichen des Hochwasserstandes bei Norderney. Die Nudging-Ergebnisse von COSMO-DE sind dargestellt: Farbflächen des Windes 10 m über dem Boden in Knoten. Konturlinien zeigen pmsl in Intervallen von 2 hPa. Die blauen Punkte zeigen die Standorte der für die Verifikation genutzten Stationen.

Für die Verifikation der Daten können einerseits beide COSMO-Modelle und andererseits die Nudging-Läufe mit den reinen Prognoseläufen verglichen werden (s. Abb. 3). Es zeigt sich für COSMO-EU, dass die mittleren Fehler und die RMSE-Werte für alle drei Variablen, v_{10m} , dd_{10m} und pmsl, bei der Nudging-Analyse niedriger ausfallen als bei den Prognoseläufen. Die mittleren Fehler betragen 1,0 m/s verglichen mit 1,2 m/s, 4° verglichen mit 11° und 0,1 hPa verglichen mit 0,35 hPa (s. Abb. 4 links). Die RMSE-Werte betragen 2,1 m/s verglichen mit 2,3 m/s, 20° verglichen mit 28° und 0,6 hPa verglichen mit 0,7 hPa (s. Abb. 5 links). Für diesen Sturm werden für alle Variablen mit den Nudging-Läufen bessere Ergebnisse erzielt als mit den Prognoseläufen.

COSMO-DE zeigt ein in qualitativer Hinsicht ähnliches Verhalten beim RMSE und beim mittleren Fehler. Die RMSE der Nudging-Läufe gegenüber den normalen Prognoseläufen liegen für pmsl bei 1,9 m/s verglichen mit 2 m/s, 19° verglichen mit 25° und 0,6 hPa verglichen mit 0,7 hPa (s. Abb. 5 rechts). Die Qualität der Nudging-Läufe ist

folglich geringfügig höher als die der Läufe ohne Nudging. Die mittleren Fehler betragen 0,1 m/s verglichen mit -0,3 m/s, 2,5° verglichen mit 7° und 0,01 hPa verglichen mit 0,25 hPa (s. Abb. 4 rechts). Bei der 10 m- Windgeschwindigkeit ändert sich das Vorzeichen des mittleren Fehlers beim normalen Prognoselauf gegenüber COSMO-EU. Dennoch liefern die Nudging-Läufe bessere Ergebnisse als die Prognoseläufe.

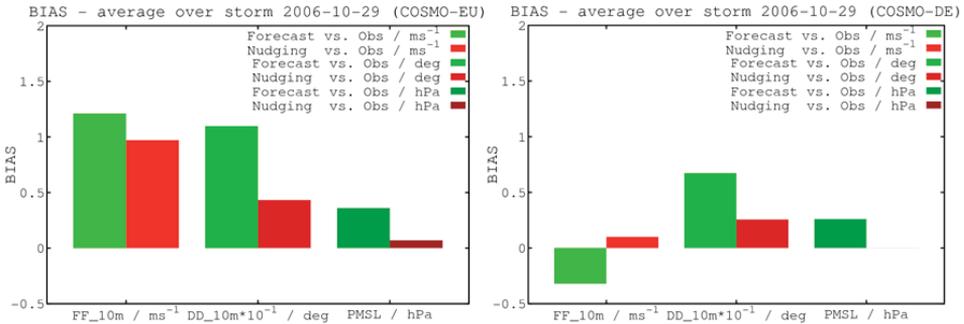


Abbildung 4: Mittlere Fehler der drei Variablen v_{10m} , dd_{10m} und $pmsl$ in COSMO-EU (links) und COSMO-DE (rechts), für die Nudging-Läufe (rot) und die Läufe ohne Nudging (grün) für Sturm „Britta“.

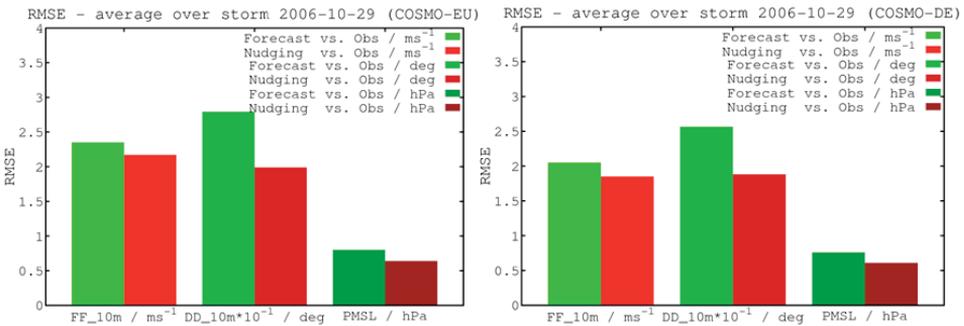


Abbildung 5: RMSE-Werte der drei Variablen v_{10m} , dd_{10m} und $pmsl$ in COSMO-EU (links) und COSMO-DE (rechts) für Sturm „Britta“ sowohl für die Nudging-Läufe (rot) als auch für Läufe ohne Nudging (grün).

Allgemein lässt sich feststellen, dass Nudging bei der Variable $pmsl$ die signifikantesten Verbesserungen erzielt. So sind die RMSE-Werte und mittleren Fehler für jede Zeitreihe der Nudging-Läufe an jeder Station besser als die der normalen Prognoseläufe. Die Prognose ohne Nudging ist bei Windgeschwindigkeit und -richtung an einigen Messstationen besser als in den Nudging-Läufen, jedoch nicht gemittelt über alle Stationen.

Ein Vergleich von COSMO-EU und COSMO-DE führt zu folgenden Ergebnissen: Die RMSE-Werte von COSMO-DE sind nur geringfügig besser als die von COSMO-EU. Zudem sind die mittleren Fehler von COSMO-DE kleiner. Die 10 m-Windgeschwindigkeit von COSMO-DE ist deutlich geringer als in COSMO-EU. Woher stammt dieser große Unterschied der mittleren Fehler bei der Windgeschwindigkeit? Eine Berechnung der mittleren Windgeschwindigkeitsdifferenz zwischen COSMO-EU und COSMO-DE ergab, dass der Hauptunterschied über flachem Land außerhalb der Alpen besteht und somit das Ergebnis unterschiedlicher Rauigkeitslänge (z_0) ist. Die

Differenzen von z_0 lassen sich auf die Verwendung unterschiedlicher Landnutzungs-klassifizierungen zurückführen. Während z_0 für COSMO-EU aus dem Datensatz GLC2000 (BARTHOLOMÉ und BELWARD 2005) abgeleitet wurde, fand bei COSMO-DE der neuere Datensatz GlobCover (ARINO et al. 2008) Anwendung. Außerhalb der Alpen ist z_0 in den aus GlobCover abgeleiteten Daten höher; dieser Datensatz liefert geringere Windstärken nahe der Oberfläche, die besser mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen. In den Alpen berücksichtigt z_0 für COSMO-EU den zusätzlichen Beitrag der orografischen Variabilität. In der vorliegenden Studie erfolgte ein Modelllauf von COSMO-EU mit z_0 abgeleitet aus GlobCover für drei Stürme („Tilo“ 2007, „Kyrill 2007 und „Britta“ 2006). Der mittlere Fehler der Windgeschwindigkeit von COSMO-EU nahm um 0,2 m/s gemittelt über alle Stationen ab - 0,1 m/s für Seestationen und 0,35 m/s für Landstationen -, was eine Verbesserung für die Stürme bedeutet. Mit GlobCover lassen sich folglich für COSMO-EU bessere Rauigkeitswerte erzielen als mit GLC2000.

2.3.2 Sturmzugbahnen

Die Zugbahnen von Stürmen liefern interessante Informationen für Studien über Sturmfluten. Aus diesem Grund wurden für die vorliegende Untersuchung Sturmzugbahnen für die Ereignisse grafisch erfasst, die zu einem Aufstau des Wassers am Pegel Norderney um mehr als 2 m führten (23 Ereignisse). Eine Zugbahn ist hier definiert als der Weg des Druckminimums im Laufe der Zeit. Die Zugbahnen der Sturmtiefs mit den acht höchsten Wasserständen bei Norderney werden in Abb. 6 dargestellt. Zu dem höchsten Wasserstand bei nahezu allen Pegeln an der deutschen Nordseeküste kam es während des schweren Sturms „Capella“ im Jahr 1976, für den Pegel Norderney war es jedoch die Sturmflut von 1962.

Nach PETERSEN und ROHDE (1991) lassen sich drei Typen von Zugbahnen der Sturmtiefs unterscheiden.

Der Skandinavien-Typ überquert den Längengrad 8° E zwischen 60° N und 65° N. Die Tiefdruckgebiete dieses Typs haben ihren Ursprung zwischen Grönland und Island und ziehen langsam in südöstliche Richtung. Trotz niedrigerer Windgeschwindigkeiten als bei den anderen beiden Sturmtief-Typen ist die Deutsche Bucht aufgrund der langen Verweilzeit mit einer großen Menge Wasser gefüllt. Ein Beispiel für ein solches Sturmtief ist die Sturmflut vom Februar 1962. Von den 23 höchsten Wasserständen waren sechs dem Skandinavien-Typ zuzurechnen.

Den Skagerrak-Typ kennzeichnen sehr hohe Wasserstände, welche meistens die gesamte Nordsee betreffen. Dieser Typ tritt am häufigsten auf und überquert den Längengrad 8° E zwischen 57° N und 60° N. Zwölf der 23 Sturmereignisse entfallen auf den Skagerrak-Typ.

Sturmtiefs des Jütland-Typs entstehen meistens an der nordamerikanischen Küste (Neufundland) und ziehen schnell in östlicher Richtung über die britischen Inseln, um den Längengrad 8° E zwischen 55° N und 57° N zu überqueren. Sie sind von kurzer Dauer, aber es handelt sich um sehr starke Stürme mit wechselnder Windrichtung zunächst aus Südwesten und später aus Nordwesten. Die Westküste Schleswig-Holsteins und das Elbeästuar sind am stärksten von diesen Stürmen betroffen. Der Sturm „Capella“ von 1976 beispielsweise ist diesem Sturmtief-Typ zuzuordnen. Von den 23 untersuchten Sturmereignissen gehörten vier der Sturmtiefs zum Jütland-Typ.

Ein Sturmtief in der Gruppe der 23 höchsten Wasserstände überquerte nicht den Längengrad 8° E, sondern verhielt sich nahezu stationär und blieb auf das nordatlantische Gebiet östlich von Island begrenzt (Februar 1967, Nr. 4 in Tab. 1).

Betrachtet man Genese und Zugbahnen der Sturmtiefs, bevor sie auf die Nordseeküste treffen, zeigt sich bei einigen Ereignissen eine Kombination der Sturmtief-Typen (GÖNNERT et al. 2001). So ist beispielsweise in Abb. 6 der Sturm vom Dezember 1977 dargestellt, der wie beim Skandinavien-Typ zwischen Island und Grönland entstand, danach jedoch in Richtung Süden zieht und 8° E entsprechend der Zugbahn des Skagerrak-Typs überquert.

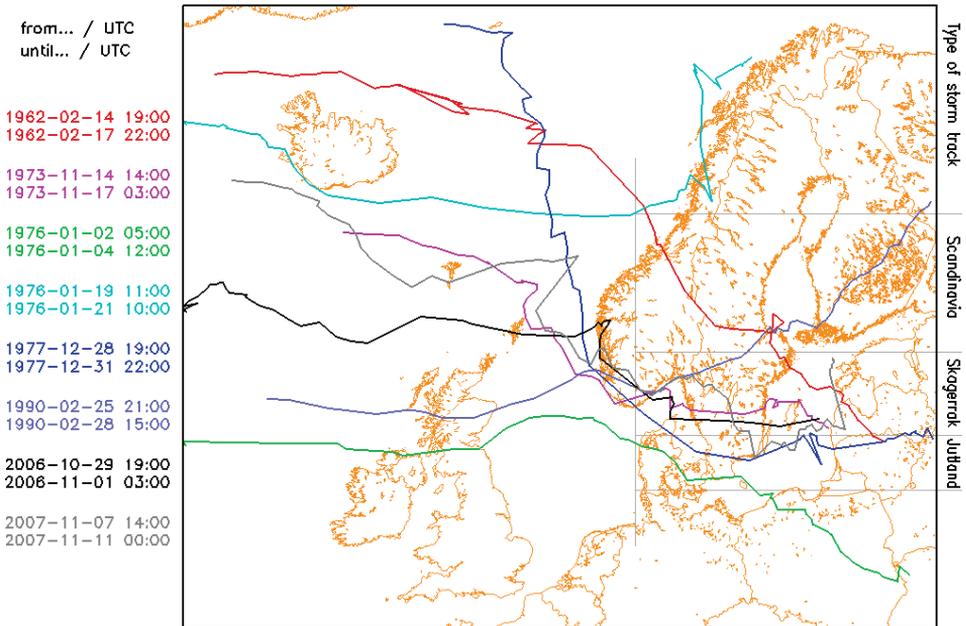


Abbildung 6: Zugbahnen der acht Sturmtiefs, die von 1962 bis 2011 zum höchsten Aufstau von Wasser am Pegel Norderney führten. Auf der rechten Seite sind die Sturmtief-Typen nach PETERSEN und ROHDE (1991) dargestellt.

3 Empirische Sturmflutvorhersage

Der Sturmflutwarndienst des NLWKN erstellt eine fünftägige Vorhersage der zu erwartenden Wasserstände bei Tidehochwasser, basierend auf den Wettervorhersagen des DWDs, für die Pegel Norderney (stellvertretend für die ostfriesischen Inseln), Emden (Ems-Ästuar), Bensersiel (ostfriesische Küste), Bremerhaven (Weser-Ästuar) und Cuxhaven (Elbeästuar). Der Warndienst wurde als interner Dienst für die Planung von Küstenschutz- und Baumaßnahmen eingeführt. Darüber hinaus stehen die Informationen der Öffentlichkeit über das Internet zur Verfügung.

Basierend auf den nachgerechneten Windfeldern wurde eine Verbesserung der Sturmflutvorhersage sowie eine Verdichtung der Ausgabepegel angestrebt (letzteres ist nicht Gegenstand dieses Berichts).

3.1 Vorgehensweise und Datenbasis

3.1.1 Verfügbarkeit der Daten

Der DWD führte nachträgliche Vorhersagen (Hindcasts) für 39 Zeitreihen von 4-11 Tagen durch. Diese enthalten insgesamt 42 Sturmfluten. Die Zeitreihen beginnen zwei bis drei Tage vor der eigentlichen Sturmflut und enden etwa einen Tag danach. Bei einer dichten Aufeinanderfolge von mehreren Sturmtiden wurden die Ereignisse in einem Datensatz zusammengefasst. Insgesamt werden mit den modellierten Winddaten 335 Tidehochwasserereignisse abgedeckt. Etwa ein Fünftel davon sind leichte Sturmtiden, 7 % schwere und weniger als 1 % sehr schwere Sturmtiden. Die meteorologischen Daten dienen als Eingangsgrößen für die Herleitung empirischer Formeln und neuronaler Netze sowie für numerische Modelle zur Durchführung unterschiedlicher Untersuchungen. Gemessene und astronomisch vorausberechnete Wasserstände an den zahlreichen Pegeln entlang der niederländischen und ostfriesischen Küste wurden als Ziel- und Validierungsdaten zusammengestellt. Aufgrund der begrenzten Zeitreihen in Verbindung mit großen Lücken in den Wasserstandsmessungen, insbesondere bei Sturmfluten, liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf den Pegeln Norderney, Cuxhaven und Emden, deren Zeitreihen weitestgehend vollständig vorliegen.

Eine Einschränkung dieser Studie besteht in der ungleichmäßigen Verteilung der Winddaten (Abb. 7). Da Sturmfluten im Vordergrund stehen, herrschen in allen modellierten Stürmen Windrichtungen zwischen West und Nordwest sowie hohe Windgeschwindigkeiten vor. Das hat zur Folge, dass die entwickelten Formeln nicht für die Vorhersage von Niedrigwassersituationen mit beispielsweise ablandigem Wind gedacht sind. Selbst „normale“ Wettersituationen mit niedrigen Windgeschwindigkeiten sind hier mit Vorsicht zu betrachten.

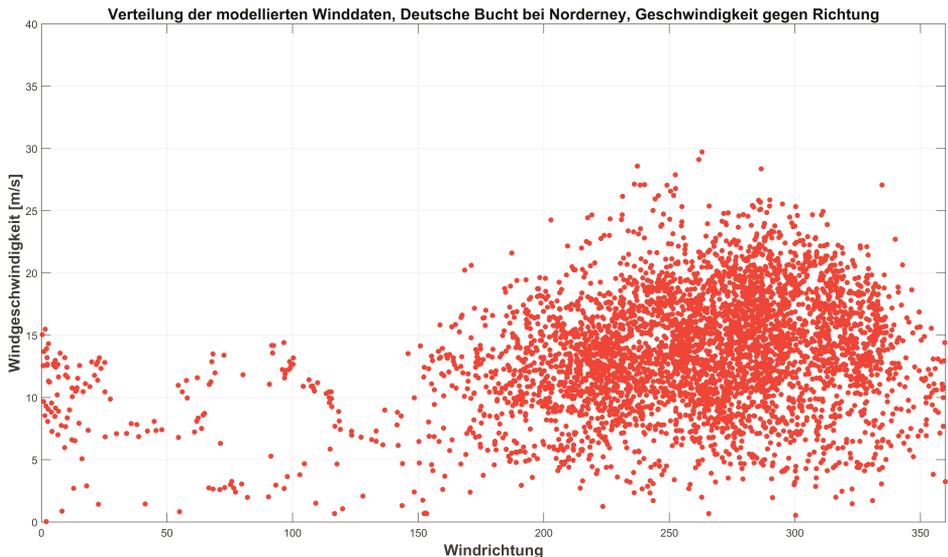


Abbildung 7: Verteilung der modellierten Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten über der Nordsee nahe Norderney.

3.1.2 Aufbereitung der Daten

Die bisher verwendeten empirischen Beziehungen zwischen dem Wind und dem Aufstau des Wassers wurden aus Windmessungen abgeleitet. Datenlücken sowie eine begrenzte räumliche Verteilung der Messstellen insbesondere über der offenen Nordsee stellten hier die wichtigsten einschränkenden Faktoren dar. Dagegen ist es bei Verwendung von räumlich und zeitlich hochaufgelösten Modelldaten erforderlich, die Zahl der für die Analyse verwendeten Winddatenpunkte zu begrenzen, um die praktische Durchführbarkeit der Berechnungen zu gewährleisten und keine Überbestimmung der mathematischen Gleichungen herbeizuführen.

Die modellierten Daten wurden auf ein Gitter mit einem Punktabstand von 1° reduziert (Abb. 8, links). Eine Analyse mit schrittweiser Regression zeigte, dass sich der dominierende Einfluss des Windes auf den Wasserstand an der niedersächsischen Küste in der Deutschen Bucht, sowie am Eingang zur Nordsee und im südwestlichen Teil vor der Küste von Norfolk lokalisieren lässt. Da nicht die exakte Position der Winddatenpunkte von Bedeutung ist, sondern die allgemeine Windsituation im jeweiligen Gebiet, wurde als räumliches Mittel ein Wert von bis zu vier Punkten (Abb. 8, links) gewählt um geringfügige lokale und kurzfristige Effekte zu eliminieren. Aus demselben Grund wird ein zeitliches Mittel von drei Stunden verwendet.

In der Deutschen Bucht wurden acht Positionen ausgewählt, an denen der Einfluss des lokalen Windes direkt vor der Küste mit berücksichtigt wird (Abb. 8, rechts). Die Winddaten an diesen Positionen werden bereits in den bisherigen verwendeten Vorhersageberechnungen genutzt.

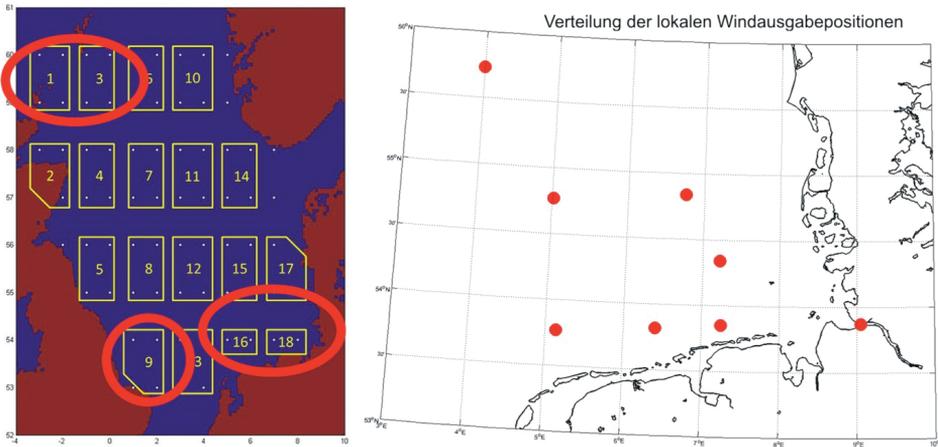


Abbildung 8: Reduzierung und Auswahl der Winddatenpunkte (links), Position der lokalen, küstennahen Datenausgabe (rechts).

Eine Analyse der Verzögerung zwischen der Einwirkung des Windes an einem Ort und dem dazu gehörenden Aufstau des Wassers an der Küste ergab eine mittlere zeitliche Verschiebung von etwa einer Stunde je 75 km. Darin zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der Gleichung für die Geschwindigkeit von Flachwasserwellen: $c = \sqrt{g * d}$, ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $d = \text{Wassertiefe}$). Bei einer Tiefe von 100 m (mittlere Tiefe der Nordsee)

ergibt sich eine Geschwindigkeit von etwa 100 km/h, bei einer Tiefe von 30 m wie in der südlichen Nordsee liegt sie bei ungefähr 60 km/h.

Die Daten der nachgerechneten Sturmfluten wurden zum Zweck der Ableitung neuer Formeln in zwei gleichmäßig verteilte aber unabhängige Gruppen aufgeteilt. Der Datensatz für die Validierung umfasst in etwa 28 % der Daten. Die restlichen Daten wurden für die Berechnung der Formeln und neuronalen Netze verwendet.

3.2 Trigonometrischer Ansatz

Auf Grundlage der Formel von ANNUTSCH (1978) wurde ein einfacher trigonometrischer Ansatz zur Entwicklung einer neuen Gleichung verwendet. Darin werden nicht nur die lokalen Windverhältnisse, sondern auch der Wind in entfernteren Teilen der Nordsee berücksichtigt:

$$Stau = a_0 + \sum_w a_{w1} * WG^2 * \sin WR + a_{w2} * WG^2 * \cos WR + a_{w3} * WG^3 * \sin WR + a_{w4} * WG^3 * \cos WR + \sum_{param} a_{param} * Wert \quad (1)$$

(mit w Anzahl zugehöriger Positionen, WG Windgeschwindigkeit, WR Windrichtung und $param$ für weitere Parameter wie beispielsweise Luftdruck (siehe unten)). Dieser Ansatz eignet sich nur für exponierte Pegel direkt an der offenen Küste. Bei in den Ästuaren gelegenen Pegeln ist ein vorgeschalteter Pegel an der offenen Küste in Nähe des Ästuars erforderlich, von dem aus der Wasserstand unter Berücksichtigung der lokalen Windverhältnisse an den Zielpiegel hochgerechnet wird. Vorliegender Beitrag befasst sich vornehmlich mit dem exponiert liegenden Pegel auf Norderney.

In einem ersten Schritt wurden die Winddaten hinsichtlich einer bestmöglichen Auswahl der Positionen, der räumlichen und zeitlichen Interpolation und zeitlichen Verzögerung (s. Abschnitt 3.1.2) untersucht. Im zweiten Schritt wurde der Einfluss weiterer Parameter wie Luftdruck, Veränderungen des Luftdrucks, astronomische Abweichung und aktueller Wasserstand im Bezug zur mittleren Tidekurve betrachtet. Fernwellen wurden mit Blick auf vorhandene Studien (z. B. GÖNNERT 2003) und den Schwierigkeiten bei der Einbeziehung in die Routinevorhersage aufgrund des engen zeitlichen Rahmens vernachlässigt.

3.2.1 Analyse weiterer Parameter

Mit der Implementierung der Differenz zwischen dem Luftdruck und dem Standardluftdruck von 1013 hPa sowie der dreistündlichen Änderung des Luftdrucks lässt sich die Vorhersagequalität erhöhen. Auf den Einfluss von Luftdruck und Druckgradient auf die Wasserstände wurde bereits von SCHMITZ (1978b) hingewiesen. In dem neuen Ansatz wurde dieser Tatsache durch Berücksichtigung der entsprechenden Werte von einem 70 Kilometer nördlich von Norderney gelegenen Punkt als Repräsentant für den Luftdruck in der deutschen Bucht Rechnung getragen.

Der Einfluss der astronomischen Abweichung von der mittleren Tide war aufgrund mangelnder Daten bei den älteren Sturmfluten schwer zu ermitteln. Mit eigenen Berechnungen der astronomischen Tiden konnte die für die Untersuchungen erforderliche Genauigkeit nicht erreicht werden. Einige Tests mit einer begrenzten Datenmenge zeigten,

dass die Hinzunahme der astronomischen Abweichungen zu einer Verbesserung der Modellqualität für „normale“ Wetterbedingungen führt, bei denen die astronomischen Abweichungen dieselbe Größenordnung wie der Windstau haben. Die allgemeine Qualität der Regression nimmt allerdings bei diesen Tests aufgrund der reduzierten Datenmenge ab. Da die Vorhersage von Sturmfluten Hauptgegenstand dieser Studie ist, wird der Einfluss astronomischer Abweichungen zunächst vernachlässigt, er ist jedoch Gegenstand weiterer Untersuchungen.

Der Tidehub an der südlichen Nordsee liegt in der Größenordnung einer schweren bis sehr schweren Sturmflut, sodass die zeitliche Lage eines meteorologischen Ereignisses zur Tidekurve (d. h. Tidehoch- oder Tideniedrigwasser) von großer Bedeutung für die Sturmflutberechnung ist (GÖNNERT 2003). Entsprechend wird mit der Einbeziehung der mittleren Tidekurve als Zeitreihe im Berechnungsansatz eine erhebliche Verbesserung der Vorhersage erreicht.

Insgesamt weist die Korrelationsrechnung zwischen den gemessenen Stauwerten und den durch den beschriebenen trigonometrischen Ansatz ermittelten Werten einen mittleren quadratischen Fehler (RMSE) von etwa 31 cm auf (Abb. 9).

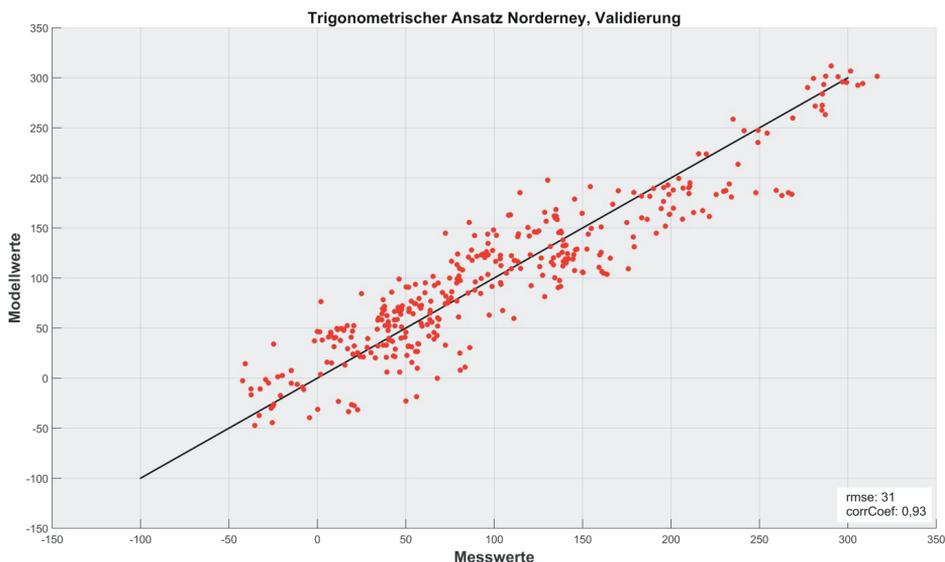


Abbildung 9: Validierung des trigonometrischen Ansatzes für Norderney, Messung (X-Achse) gegenüber Modell (Y-Achse).

Dieser Wert wirkt hoch, unter Berücksichtigung der großen Bandbreite des Windstaus (Werte zwischen -50 und +300 cm), der Vernachlässigung der astronomischen Abweichungen – insbesondere bei Ereignissen mit niedrigem Stau – und der Unsicherheiten bei den modellierten meteorologischen Daten in Verbindung mit den allgemeinen Schwierigkeiten bei der Vorhersage von Sturmereignissen sind die erzielten Ergebnisse dennoch gut. Die Formeln werden jetzt in der operationellen Vorhersage überprüft und haben während des Sturms „Xaver“ den ersten Test erfolgreich bestanden (Abschnitt 3.4).

3.3 Ansatz mit Künstlichen Neuronalen Netzen

Neben dem trigonometrischen Ansatz wurde auch die Anwendung eines künstlichen neuronalen Netzes getestet. Es wurde ein neuronales Netz gewählt, in dem nur meteorologische Parameter und die mittlere Tidekurve – entsprechend dem trigonometrischen Ansatz – verwendet wurden. Ziel war eine mindestens eintägige Vorhersage. Die zusätzliche Berücksichtigung gemessener oder modellierter Wasserstände von Pegeln, die im Tideverlauf der niedersächsischen Küste zeitlich vorgelagert sind, hätte ein wesentlich kürzeres Vorhersageintervall bedingt.

Ein Feed-Forward-Netz mit zwei Schichten und zehn Neuronen in der versteckten Schicht wurde als die am besten geeignete Struktur gewählt (Abb. 10). Die Inputschicht lässt sich beliebig erweitern; als Output ist der Stau des Wasserstands festgelegt.

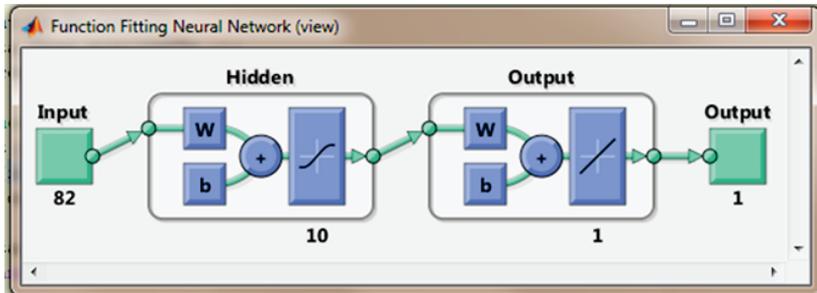


Abbildung 10: Schematische Darstellung des künstlichen neuronalen Netzes.

Für den Input wurde derselbe Datensatz wie beim trigonometrischen Ansatz verwendet. Für Norderney beträgt der mittlere quadratische Fehler 25 cm (Abb. 11), was eine Verbesserung gegenüber dem Ergebnis des trigonometrischen Ansatzes bedeutet.

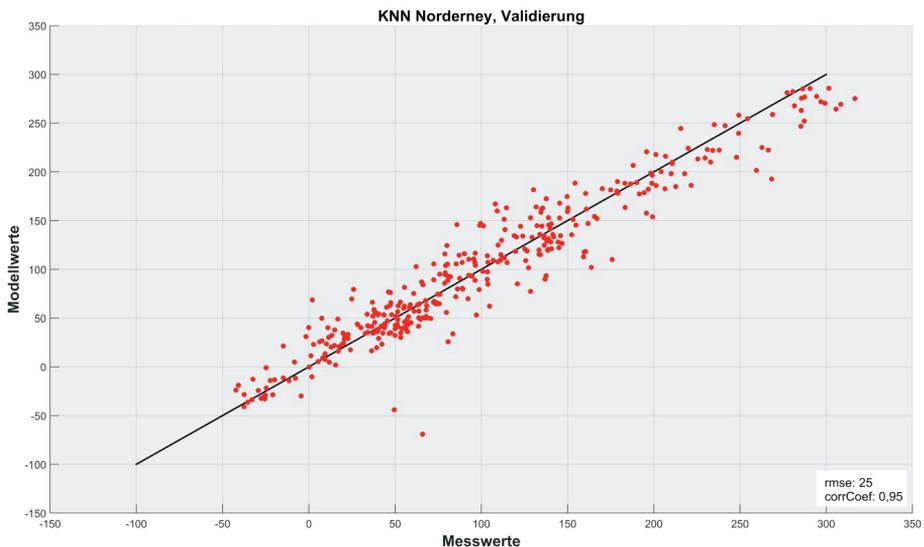


Abbildung 11: Validierung des künstlichen neuronalen Netzes für Norderney, Messung (X-Achse) gegenüber Modell (Y-Achse).

Es scheint jedoch, dass die Ergebnisse mit Vorbehalt zu betrachten sind, da es bei Hinzu-
fügen nur weniger zusätzlicher Wind-Datensätze oder anderer Parameter zu einer offen-
sichtlichen Überbestimmung des Modells kommt. Die Methode wird nun parallel zur
Vorhersagepraxis angewendet und es ist zu prüfen, ob das künstliche neuronale Netz für
den operationellen Betrieb geeignet ist. Der Praxistest während der Sturmflut Xaver ver-
lief erfolgversprechend (Abschnitt 3.4).

3.4 Erster Praxistest: Sturmflut vom 6. Dezember 2013 („Xaver“)

Die neuen Vorhersageverfahren (trigonometrischer Ansatz und künstliche neuronale
Netze) werden seit November 2013 im laufenden Betrieb neben dem alten Vorhersage-
verfahren getestet. Anfang Dezember hat das Sturmtief „Xaver“ eine Reihe von Sturm-
tiden an der niedersächsischen Nordseeküste erzeugt, wobei die Sturmflut am frühen
Morgen des 6. Dezembers eine der höchsten Sturmfluten der letzten 100 Jahre darstellt.
Der am Pegel Norderney verzeichnete Wasserstand von 2,83 m über dem mittleren Tide-
hochwasser wurde nur von dem im Februar 1962 verzeichneten Wert übertroffen.

Während dieses Sturmflutereignisses erwiesen sich die beiden neuen Ansätze als wert-
volle Instrumente für den Sturmflutwarndienst des NLWKN. In Abb. 12 sind die Vor-
hersageergebnisse vom Morgen des 5. Dezembers dargestellt. Die Vorhersage basierte auf
den numerischen Modellergebnissen des DWD für Windgeschwindigkeit und -richtung
sowie Luftdruck unter Verwendung des COSMO-EU- Modelllaufs vom 5. Dezember
00 UTC. Die Ergebnisse nach dem derzeitigen Verfahren sind in blauer Farbe aufgetra-
gen, die des trigonometrischen Ansatzes in grün, die Ergebnisse des KNN in rot und die
Messungen in schwarz.

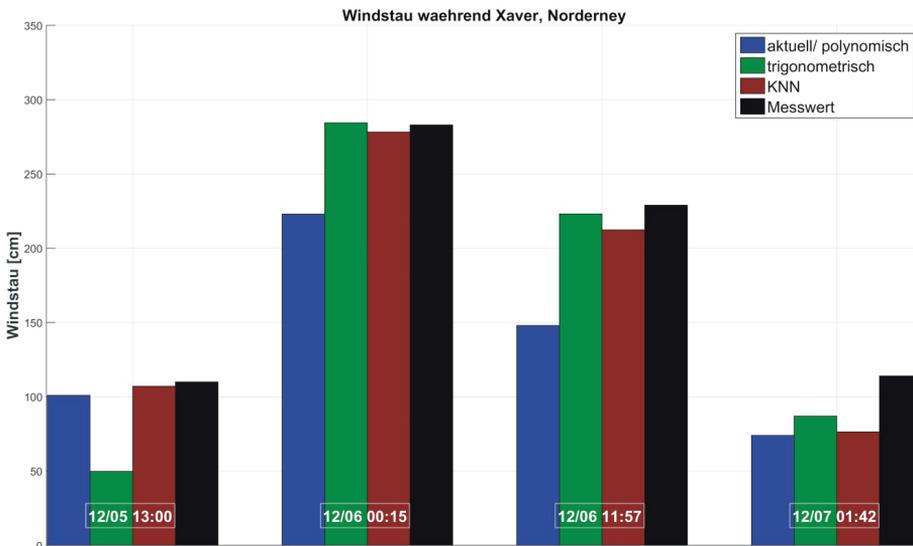


Abbildung 12: Modellierter und gemessener Stau am Pegel Norderney für den Sturm „Xaver“, 5.-7. Dezember 2013, Vergleich verschiedener Vorhersagemodelle.

Sowohl der trigonometrische Ansatz als auch der Ansatz mit einem neuronalen Netz lieferte sehr gute Vorhersageergebnisse für die beiden Hauptsturmzeiten mit einer Abweichung von weniger als 20 cm für den Pegel Norderney. Die Ergebnisse dieser neuen Verfahren zeigen gegenüber der bisherigen Methode eine deutliche Verbesserung. Die erste Sturmzeit wird außer durch den trigonometrischen Ansatz für Norderney ebenfalls sehr gut vorherberechnet. Für das Versagen des trigonometrischen Modells in diesem Fall konnte bisher kein Grund gefunden werden. Die Abweichungen zwischen Vorhersage und Messung für die letzte Sturmzeit am 7. Dezember sind höher, allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass zwischen der Windvorhersage und dem Sturmereignis mehr als 48 Stunden liegen.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Sturmfluten an der Küste Niedersachsens werden hauptsächlich durch den lokalen Wind in der Deutschen Bucht angetrieben. Für die empirische Sturmflutvorhersage ist das Weiteren der Wind im Eingangsbereich der Nordsee und in der südwestlichen Nordsee vor der Küste von Norfolk von Bedeutung.

In dem vom BMBF geförderten Projekt „OptempS-MohoWif“ (Optimierung empirischer Sturmflutvorhersage und Modellierung hochauflösender Windfelder) führte der DWD nachgerechnete Vorhersagen (hindcasts) von 39 historischen Sturmflutereignissen im Zeitraum 1962-2011 durch, um einen Datensatz mit hochauflösenden Windfeldern und anderen meteorologischen Variablen bereitzustellen. Hochauflösende meteorologische Daten für die Nordsee sind von großer Bedeutung für eine Verbesserung der empirischen Sturmflutvorhersage und zur Lösung anderer Fragen hinsichtlich Küstenentwicklung und -schutzmaßnahmen.

Für die Berechnung der Winddaten wurden zwei Versionen des Ausschnittmodells COSMO des DWD verwendet. COSMO-EU stellte die Daten bereit für die gesamte Nordsee einschließlich des Übergangsbereichs der Nordsee zum Nordatlantik und der südwestlichen Nordsee mit dem Ärmelkanal. Für die deutsche Bucht wurden von COSMO-DE zusätzliche Daten auf Grundlage eines 2,2 km-Gitters geliefert. In beiden Modellen wurden Nudging-Läufe und normale Vorhersageläufe durchgeführt, sodass ein Mini-Ensemble mit vier Ensemblemitgliedern für jedes Sturmflutereignis besteht. Damit führte der DWD Tests der horizontalen Maschenweite 2,2 km sowie der 65 vertikalen Schichten für das Modell COSMO-DE durch, welches möglicherweise den neuen operationellen Ausbau von COSMO-DE liefert. Wie erwartet fielen die Ergebnisse der Nudging-Läufe besser aus als die der normalen Vorhersagen. Bei einem Vergleich von COSMO-DE und COSMO-EU weist ersteres Modell minimal niedrigere RMSE-Werte bei Wind und reduziertem Druck auf. Die mittleren Fehler für pmsl weisen bei sehr niedrigen Werten nur marginale Unterschiede auf. Bei den Werten für den 10 m-Wind sind die Differenzen jedoch signifikant. Es wurde außerdem gezeigt, dass die Ergebnisse für den mittleren Fehler des Windgeschwindigkeitbetrags von COSMO-EU bei Verwendung von GlobeCover-Landnutzungsdaten besser waren als bei der Nutzung von GLC2000-Daten. Bei weiteren Versuchen wird eine windgeschwindigkeitsabhängige Charnock-Konstante zur Berechnung der Rauigkeitslänge der Meeresoberfläche getestet.

Die neu ermittelten empirischen Beziehungen zwischen Wind, Luftdruck und Windstau an der Küste Niedersachsens scheinen ein vielversprechender Ansatz für die

Optimierung der Sturmflutvorhersage in dieser Region zu sein. Seine Leistungsfähigkeit konnte dieser Ansatz bei einem ersten Test im Dezember 2013 während der sehr schweren Sturmflut „Xaver“ unter Beweis stellen. Andererseits zeigte der Testbetrieb im Winter 2013/2014 auch die Grenzen bei der Vorhersage weniger intensiven Windstaus auf, der durch andere Windrichtungen als West bis Nordwest hervorgerufen wird. Dies trifft besonders für den Ansatz mit künstlichen neuronalen Netzen zu, dessen Nutzbarkeit eindeutig durch den Schwerpunkt der Trainingsdaten auf Sturmfluten mit Windrichtungen in dem erwähnten Sektor eingeschränkt wird.

Das beim NLWKN implementierte neue Verfahren der Sturmflutvorhersage bedarf weiterer Tests und fortlaufender Anpassung an die zukünftig von den operationellen Wettervorhersagemodellen des DWD bereitgestellten meteorologischen Daten.

5 Schriftenverzeichnis

- ANNUTSCH, R.: Über das empirisch-statistische Sturmflutvorhersageverfahren des Deutschen Hydrographischen Instituts. *Promet*, 8 H. 4, 9-12, 1978.
- ARINO, O.; BICHERON, P.; ACHARD, F.; LATHAM, J.; WITT, R. and WEBER, J.-L.: *GlobCover the most detailed portrait of Earth*. *ESA Bulletin*, 136, 25-31, 2008.
- BALDAUF, M.; SEIFERT, A.; FÖRSTNER, J.; MAJESWKI, D.; RASCHENDORFER, M. and REINHARDT, T.: *Operational Convective-Scale Numerical Weather Prediction with the COSMO model: Description and Sensitivities*. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 3887-3905, 2011.
- BARTHOLOMÉ, E. and BELWARD, A. S.: *GLC2000: A new approach to global land cover mapping from Earth observation data*. *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 26, No. 9, 1959-1977, 2005.
- CONSORTIUM FOR SMALL-SCALE MODELLING: *COSMO model documentation*. Stand 07.01.2014: <http://www.cosmo-model.org>
- DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORGMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, I.; KÁLLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J.-J.; PARK, B.-K.; PEUBEY, C.; DE ROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.-N. and VITART, F.: *The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system*. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, Vol. 137, 553-597, 2011.
- DEUTSCHER WETTERDIENST: *Das barokline Model BKF*. *Promet* 2/3 1978, p. 48, 1978
- DICK, S.; KLEINE, E.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; KLEIN, H. and KOMO, H.: *The operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model Description and Validation*. *Ber. d. Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie*, Nr. 29, 49, 2001.
- FRANK, H. and MAJEWSKI, D.: *Hindcasts of historic storms with the DWD models GME, LMQ and LMK using ERA-40 reanalyses*. *ECMWF Newsletter*, Vol. 109, 16-21, 2006.
- GÖNNERT, G.: *Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht. Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert*. *Die Küste*, 67, 185-365, 2003.

- GÖNNERT, G.; DUBE, S. K.; MURTY, T. and SIEFERT, T.: Global Storm Surges: Theory, Observations and Applications - Preface and Contents. Die Küste, 63, Global Storm Surges, 2001.
- JENSEN, J. and MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Storm Surges on the German Coast. Die Küste, 74, 92-124, 2008.
- MAJEWSKI, D.; LIERMANN, D.; PROHL, D.; RITTER, B.; BUCHHOLD, B.; HANISCH, T.; PAUL, G.; WERGEN, W. and BAUMGARDNER, J.: The Operational Global Icosahedral-Hexagonal Gridpoint Model GME: Description and High-Resolution Tests. Mon. Wea. Rev. 130, 319-338, 2002.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and GIESE, H.: Empirische Windstauformeln für die Deutsche Bucht. Deutsche IDNDR-Reihe 7, 37-41, 1997.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; LANGE, W.; DICK, S. and SOETJE, K. C.: Über die Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage: Hydrodynamisch-numerische Modelle der Nord- und Ostsee und ein empirisch-statistisches Verfahren für die Deutsche Bucht. Promet 29, 117-124, 2003.
- PETERSEN, M. and ROHDE, H.: Sturmflut: Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe. Neumünster, 1991.
- PHILIPPART, M. E and GEBRAAD, A.: A new storm surge forecasting system. In: STEL, J. H. et al. (Ed.). Operational oceanography: the challenge for European co-operation: Proceedings of the First International Conference on EuroGOOS 7-11 October 1996, The Hague, The Netherlands. Elsevier Oceanography Series, 62, 487-495, 1997.
- SCHRAFF, C. H.: Mesoscale Data Assimilation and Prediction of Low Stratus in the Alpine Region. Meteorol. Atmos. Phys. 64, 21-50, 1997.
- SCHRAFF, C. und HESS, R.: Datenassimilation für das LM. Promet, Jahrgang 27, Nr. 3/4, 156-164, 2002.
- SCHMITZ, H. P.: Sturmfluterzeugende Vorgänge in der Nordsee. Promet 4, 2-5, 1978a
- SCHMITZ, H. P.: Vorhersageverfahren und ihre Probleme. Promet 4, 9-12, 1978b.
- STAUFFER, D. R. and SEAMAN, N. L.: Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model Part I: Experiments with synoptic scale data. Mon. Wea. Rev. 118, 1250-1277, 1990.
- STAUFFER, D. R. and SEAMAN, N. L.: Multiscale four-dimensional data assimilation. J. Appl. Meteorol. 33, 416-434, 1994.
- STAUFFER, D. R.; SEAMAN, N. L. and BINKOWSKI, F. S.: Use of Four-Dimensional Data Assimilation in a Limited-Area Mesoscale Model Part II: Effects of Data Assimilation within the Planetary Boundary Layer. Mon. Wea. Rev. 119, 734-754, 1991.
- UPPALA, S. M.; KÁLLBERG, P.; SIMMONS, A.; ANDRAE, U.; DA COSTA BECHTOLD, V.; FIORINO, M.; GIBSON, J.; HASELER, J.; HERNANDEZ, A.; KELLY, G.; LI, X.; ONOGI, K.; SAARINEN, S.; SOKKA, N.; ALLAN, R.; ANDERSSON, E.; ARPE, K.; BALMASEDA, M.; BELJAARS, A.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; CAIRES, S.; CHEVALLIER, F.; DETHOF, A.; DRAGOSAVAC, M.; FISHER, M.; FUENTES, M.; HAGEMANN, S.; HÓLM, E.; HOSKINS, B.; ISARKSEN, L.; JANNSEN, P.; JENNE, R.; MCNALLY, A.; MAHFOUF, J.-F.; MORCRETTE, J.-J.; RAYNER, N.; SAUNDERS, R.; SIMON, P.; STERL, A.; TRENTBETH, K.; UNTCH, A.; VASILJEVIC, D.; VITERBO, P. and WOOLLEN, J.: The ERA-40 re-analysis. Q. J. R. Meteorol. Soc., Vol. 131, 2961-3012, 2005.