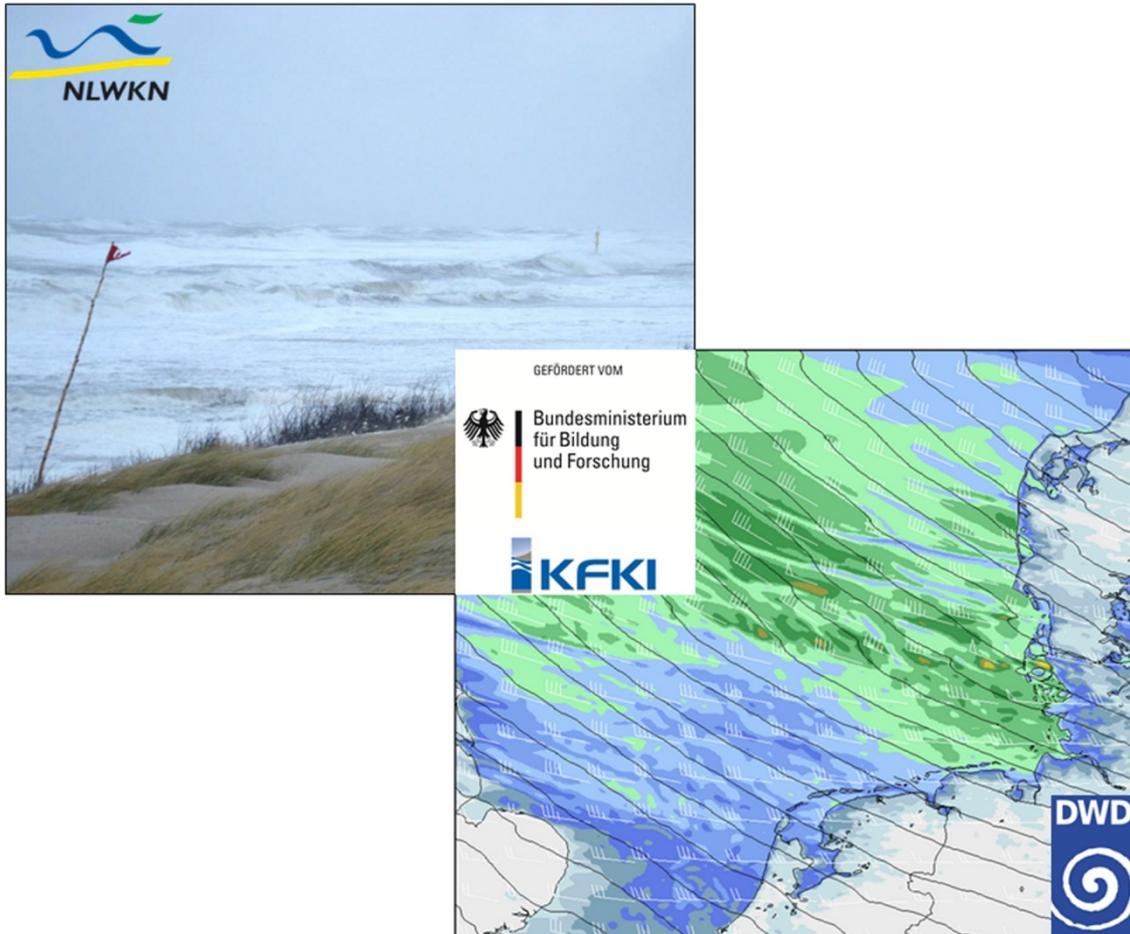




Niedersächsischer Landesbetrieb für  
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz  
-Forschungsstelle Küste-



Maximilian Streicher, Jana Kristandt & Heiko Knaack

## Optimierung Empirischer Sturmflutvorhersagen (OptempS-MohoWif A)

BMBF Förderkennzeichen 03KIS097



Niedersachsen

**NIEDERSÄCHSISCHER LANDESBETRIEB FÜR  
WASSERWIRTSCHAFT, KÜSTEN- UND NATURSCHUTZ  
Betriebsstelle Norden-Norderney  
-Forschungsstelle Küste-**

Maximilian Streicher, Jana Kristandt & Heiko Knaack

**Optimierung Empirischer Sturmflutvorhersagen  
(OptempS–MohoWif A)  
BMBF Förderkennzeichen 03KIS097**

April 2015

**Herausgeber:**

Niedersächsischer Landesbetrieb für  
Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN)  
Geschäftsbereich Gewässerbewirtschaftung und Flussgebietsmanagement

NLWKN - Forschungsstelle Küste  
An der Mühle 5, 26548 Norderney  
Tel.: 04932-916-0  
Fax: 04932-1394  
E-mail: [postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de](mailto:postfach@nlwkn-ny.niedersachsen.de)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

# Optimierung Empirischer Sturmflutvorhersagen (OptempS–MohoWif A)

Maximilian Streicher, Jana Kristandt, Heiko Knaack

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	3
1.1.	Veranlassung und Zielsetzung .....	3
1.2.	Stand der Forschung .....	4
1.2.1.	Betrachtungsgebiet.....	4
1.2.2.	Entstehung von Sturmfluten.....	5
1.2.3.	Wasserstandsvorhersage .....	8
1.2.4.	Bisheriges Verfahren zur Wasserstandsvorhersage im NLWKN.....	10
1.3.	Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD).....	12
2.	Datengrundlage .....	13
2.1.	Ausgewählte Sturmfluten.....	13
2.2.	Wasserstandsdaten .....	15
2.3.	Windmessdaten .....	16
2.4.	Software.....	17
3.	Durchführung der Untersuchungen und Ergebnisse .....	17
3.1.	Voruntersuchungen mit gemessenen Winddaten aus der südlichen Nordsee.....	18
3.2.	Beziehung zwischen Stau und modellierten meteorologischen Daten über der gesamten Nordsee .....	21
3.2.1.	Auswahl und Verdichtung der Windeingangsdaten .....	22
3.2.2.	Regressionsrechnung für die Pegel direkt an der See .....	29
3.3.	Staubehziehung für Pegel in den Ästuaren .....	32
3.3.1.	Emden .....	32
3.3.2.	Bensersiel.....	36
3.3.3.	Wilhelmshaven .....	38
3.3.4.	Bremerhaven .....	41

3.4.	Kurzfristiger Vorhersage auf Basis eingetretener Werte an Vorlaufpegeln .....	44
3.4.1.	Terschelling -> Norderney .....	45
3.4.2.	Norderney -> Wangerooge West.....	47
3.5.	Künstliche Neuronale Netze .....	49
3.5.1.	Methodik.....	49
3.5.2.	Vergleich mit Linearer Regression .....	50
3.6.	Überlagerungseffekte .....	53
3.6.1.	Vorgehensweise.....	53
3.6.2.	Analyse.....	54
4.	Praxistest: Sturmflut „Xaver“ im Dezember 2013.....	59
5.	Zusammenfassung .....	61
5.1.	Verwertung der Ergebnisse .....	62
5.2.	Ausblick.....	62
6.	Abbildungsverzeichnis.....	63
7.	Tabellenverzeichnis .....	67
8.	Literaturverzeichnis .....	68
9.	Abkürzungen .....	71
	Anhang.....	72

# 1. Einleitung

## 1.1. Veranlassung und Zielsetzung

Sturmfluten sind ein wiederkehrendes, für die Küstenbewohner bedrohliches Phänomen an der Nordseeküste und haben noch im Februar 1962 mehrere hundert Menschenleben in Hamburg gekostet (Storch & Woth 2011). Die Sturmflutvorhersage beschäftigt sich mit der Prognose von Sturmfluten und dient als Warninstrument vor erhöhtem Wasserstand um die ansässige Bevölkerung zu alarmieren, die Überflutungsgefahr für küstennahe Industrie, landwirtschaftliche Nutzflächen und Küstenschutzbaustellen abzuschätzen (Siefert 1980) und entsprechende Vorkehrungsmaßnahmen rechtzeitig einleiten zu können.

Im Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) ist vor mehr als einem Jahrzehnt ein innerbetrieblicher Sturmflutwarndienst aufgebaut worden, dessen Aufgabe es ist, für die Niedersächsische Küste regional und mit längerem Vorlauf vor Überflutungsgefahren zu warnen und einen differenzierten Abgleich mit aktuellen Pegeldata während des Anstiegs der Sturmflut bereit zu stellen. So wird der operative Küstenschutz vor Ort in die Lage versetzt, rechtzeitig entsprechende Vorkehrungen zu treffen und bei Tätigkeiten im Außendeichsgebiet des Festlands und der Inseln Personal und Gerätschaft in Sicherheit bringen zu können. Die Vorhersagen werden des Weiteren auch zur Steuerung landeseigener Sperrwerke wie an der Ems benötigt. Und auch der Katastrophenschutz des Landes sowie die für die Festlandsdeiche zuständigen Kommunen und Verbände fordern im Sturmflutfall vom NLWKN eine entsprechende Dienstleistung.



**Abbildung 1: Sturmfluten an der niedersächsischen Küste**

Wesentliche Voraussetzung für eine längerfristige, über wenige Stunden hinausgehende Wasserstandsvorhersage und Sturmflutwarnung sind verlässliche Informationen und Prognosen über das Wettergeschehen über der See - für die niedersächsische Küste über der Nordsee. Hier hat es in den letzten Jahrzehnten durch die Entwicklung numerischer meteorologischer Modelle verschiedenster Skalierungen wesentliche Fortschritte gegeben. Um die Sturmfluten der letzten Jahrzehnte im Detail auszuwerten und Lehren für die zukünftigen Vorhersagen zu ziehen, fehl-

ten jedoch bisher – auf Grund mangelnder Messdaten im Seegebiet- hochaufgelöste Informationen zu den meteorologischen Parametern während dieser Ereignisse. Diese Datenlücke durch Nachrechnungen entsprechender Sturmsituationen mittels aktueller numerischer Wettermodelle teilweise zu schließen und die erzeugten Daten für die Verbesserung empirischer Ansätze zur Wasserstandsvorhersage zu nutzen ist der Kern des vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem NLWKN gemeinsam durchgeführten Forschungsvorhabens OptempS-MohWif.

Im Rahmen des Projektes rechnet die DWD mit seiner auch im operationellen Betrieb benutzten Modellkette Globales Modell GME – COSMO-EU – COSMO-DE Wetterlagen im Zeitraum von 1962 bis 2011 nach, die zu Sturmfluten an der Deutschen Nordseeküste geführt haben und erstellte einen Datenkatalog von 39 hoch aufgelösten Sturmmodellen im genannten Zeitraum (BRECHT & FRANK 2014a,b). Diese Daten wiederum wurden vom NLWKN genutzt um empirische Ansätze zu entwickeln bzw. zu optimieren, um aus meteorologischen Daten – explizit Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftdruck über der Nordsee- den resultierenden Windstau entlang der niedersächsischen Küste genauer als bisher abzuleiten. Die mittlerweile verfügbare Informationsdichte der Eingangsdaten erforderte dabei eine neue Programmierung der Verfahren und es wurden neuere Ansätze mit künstlichen Neuronalen Netzen erprobt.

Das Projekt folgt den Zielen des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) zum Hochwasserschutz und hat thematische Überlappungen mit den früheren KFKI- Forschungsvorhaben MUSE (Bork et al. 2006) und OPTEL (Ganske & Rosenhagen 2010, Bork & Müller-Navarra 2011, Kremp 2011, Strotmann et al. 2011). Die Förderung des Forschungsvorhabens erfolgte durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in zwei Teilprojekten:

Teil A: Optimierung empirischer Sturmflutvorhersage, durchgeführt vom NLWKN (Förderkennzeichen 03KIS097), für das hiermit der Abschlussbericht vorgelegt wird

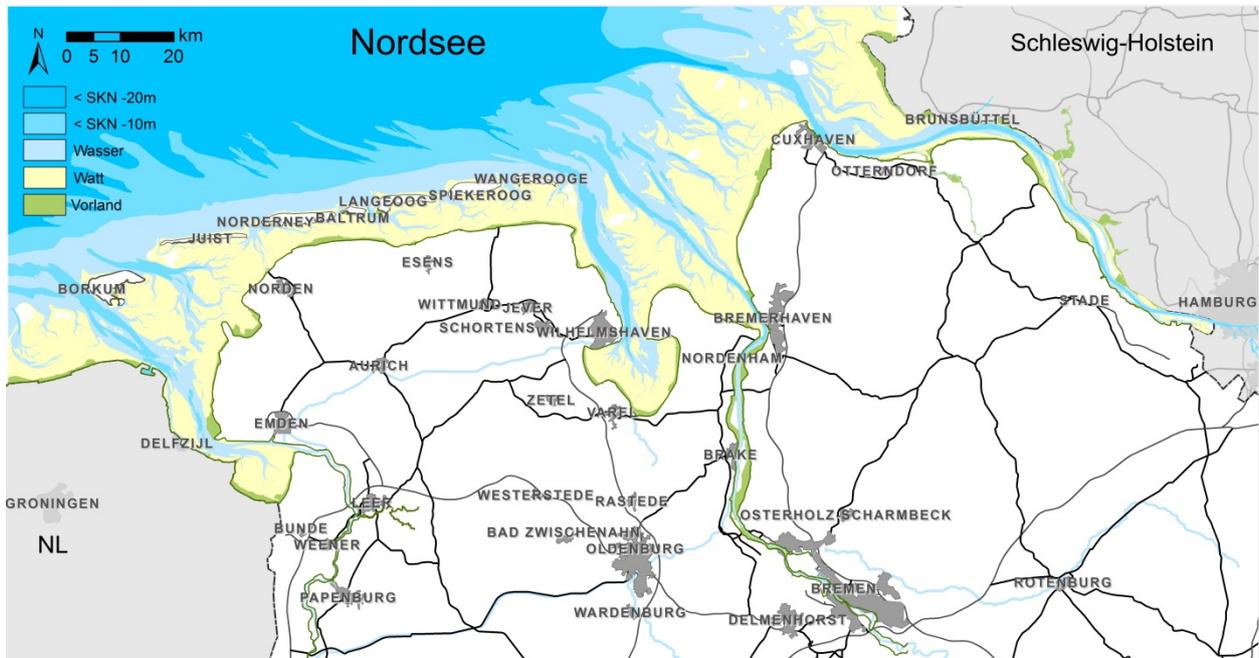
Teil B: Modellierung hochaufgelöster Windfelder, durchgeführt vom DWD (Förderkennzeichen 03KIS098), für das vom DWD ein Abschlussbericht erstellt wurde (Brecht & Frank, 2014a).

## **1.2. Stand der Forschung**

### 1.2.1. Betrachtungsgebiet

Die Untersuchungen beziehen sich auf die Niedersächsische Küste am südlichen Rand der Nordsee (Abb. 2). Die Region ist durch semidiurnale Tiden geprägt, Ebbe und Flut treten also zweimal täglich auf; der Tidenhub beträgt etwa 2,5 m. Der südliche Rand der Nordsee, ein in weiten Teilen nur wenige zehner Meter tiefes Randmeer, wird durch das Weltnaturerbe Wattenmeer charakterisiert, ein in seiner Ausdehnung und Artenvielfalt einzigartiges, im Rhythmus der Tide trockenfallendes Schlick- und Sandgebiet, das sich von den nördlichen Niederlanden über die Deutsche Bucht bis in den Süden Dänemarks zieht.

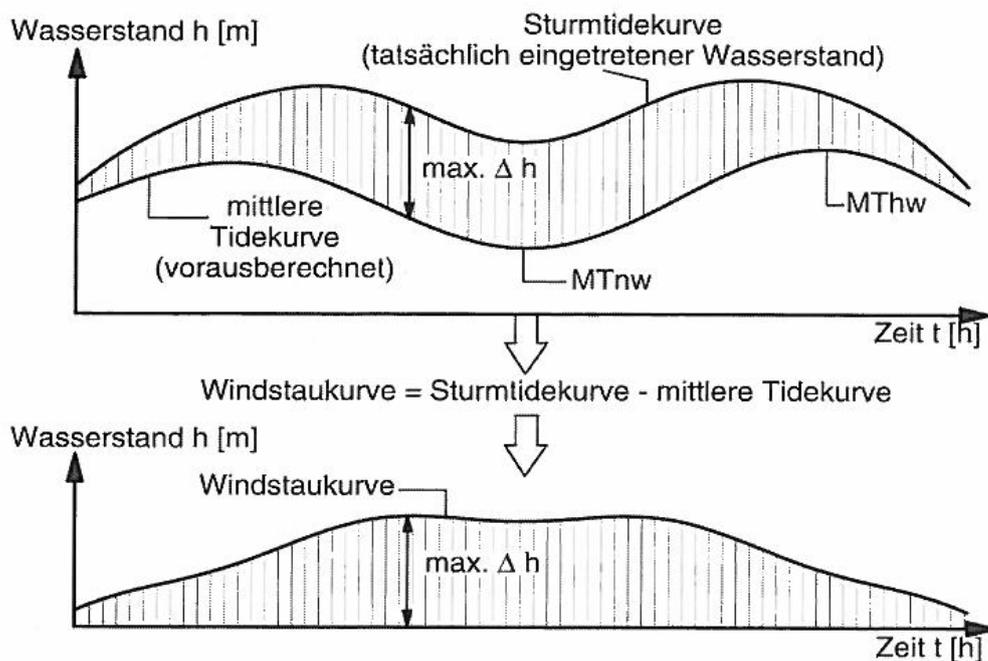
Das Wattenmeer und die Küstenregion mit den ostfriesischen Inseln sind touristisch geprägt und beliebtes Urlaubsziel während der Sommermonate. Entlang der Küste und auf den ostfriesischen Inseln gewährleisten verschiedene Küstenschutzmaßnahmen die Überflutungssicherheit. Unterhaltung und Erneuerung der Bauwerke auf den Inseln liegt im Zuständigkeitsbereich des NLWKN und für die Ausführung der Maßnahmen ist eine frühzeitige Kenntnis über den zu erwartenden Wasserstand nötig.



**Abbildung 2: Die niedersächsische Küste zwischen Ems und Elbe an der südlichen Nordsee**

### 1.2.2. Entstehung von Sturmfluten

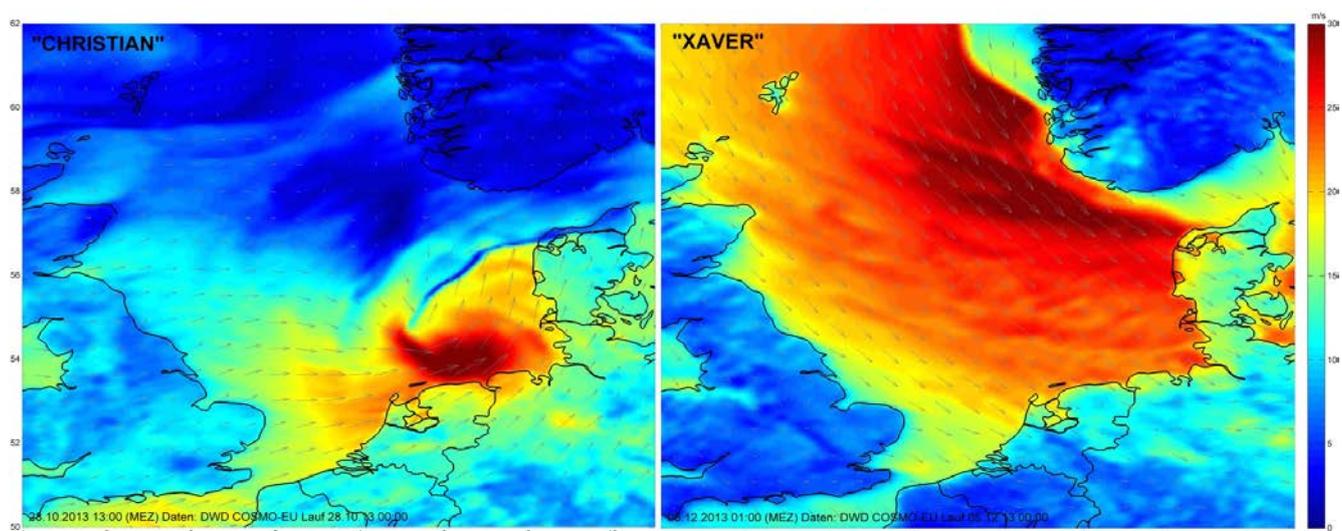
Eine Sturmflut ist charakterisiert durch einen hohen, bis zu mehrere Meter über dem Mittleren Tidehochwasser (MThw) liegenden Wasserstand an der Küste. Die Differenz des gemessenen Wasserstands und dem mittleren Wasserstand, in der Nordsee im Wesentlichen dominiert durch die astronomischen Vorgängen, wird als Windstau bezeichnet (Abbildung 3), unberücksichtigt ob dieser nur aus einem winderzeugten Anstieg des Wasserstands oder aus einer Überlagerung mit weiteren Ursachen entstanden ist (Siefert 1980). Durch die Überlagerung von verschiedenen einen Wasserstandsanstieg erzeugenden Effekten (z.B. Tide, winderzeugter Stau, Brandung, Eigenschwingung des Meeres, Fernwellen) kommt es zu hohen Sturmflutwasserständen (Schmitz 1978).



**Abbildung 3: Windstaudefinition (Oumeraci 2001)**

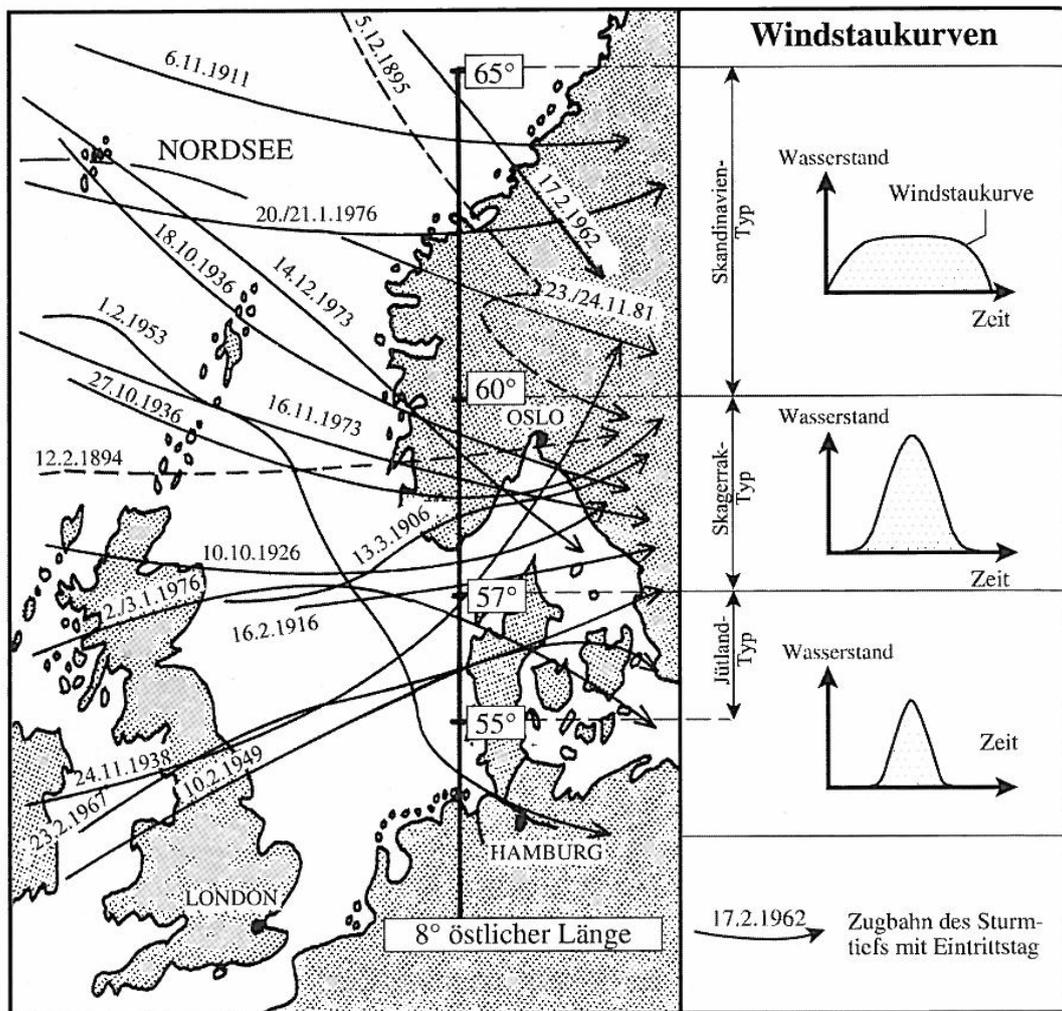
Der astronomisch bedingte Tidenzyklus bewirkt zweimal täglich eine Ebb- und eine Flutphase. Dabei ist besonders die Mondgezeit hervorzuheben, die die Hauptursache für die wechselnden Gezeiten darstellt. Hinzu kommt z.B. die Sonnengezeit, die in ihrer Wechselwirkung mit der Mondgezeit zu einer etwa 14-tägigen Abweichung führt, die als Spring- und Nippvariation bekannt ist. Die entstehende Differenz zum mittleren Tidehochwasser -die astronomische Abweichung - kann im Bereich der Niedersächsischen Küste bis zu 60 cm betragen.

Die Einwirkung von starkem Wind auf die Meeresoberfläche führt zu Zirkulationsvorgängen, bei denen die oberen Schichten in Windrichtung driften; dieser Massentransport wird durch gegenläufige Strömungen in tieferen Schichten kompensiert. An den Küsten kommt es jedoch zu einem Anstau, da die Küstenmorphologie die Drift in ihrer Bewegung hindert und die Rückströmung verzögert (Niemeyer & Kaiser 1996). Für die Deutsche Bucht sind Winde aus West bis Nordwest besonders stauwirksam (Kruhl 1978). Tiefdruckgebiete, die aus westlich bis nordwestlichen Richtungen über die Nordsee ziehen, sind meist relativ ausgedehnt und langanhaltend, wohingegen Tiefdruckgebiete aus südwestlichen Richtungen kommend häufig kleinräumiger sind und schneller wieder abziehen (Kruhl 1978). Das mit dem Tiefdruckgebiet einhergehende Windfeld kann dabei sehr lang und mit mäßig bis starken Windgeschwindigkeiten aber auch kurz und verbunden mit lokal sehr hohen Windgeschwindigkeiten sein (Abbildung 4). Da die stärker ausgeprägten Tiefdruckgebiete verbunden mit hohen Windgeschwindigkeiten eher in den Wintermonaten auftreten, ereignen sich entsprechend auch schwere Sturmflutereignisse überwiegend in diesem Zeitraum.



**Abbildung 4: Sturmflut erzeugende Windfelder: 'Christian' (28.10.2013) sehr kurz mit hohen Windgeschwindigkeiten aus südwestlicher Richtung (erzeugte nur eine leichter Sturmflut) und 'Xaver' (6.12.2013) mit langem ausgedehnten Fetch aus nordwestlicher Richtung (erzeugte eine sehr schwere Sturmflut)**

Entsprechend der Zugbahn der Tiefdruckgebiete können die mit einer Sturmflut verbundenen Sturmtiefs in Jütland-, Skagerrak- und Skandinavientyp unterschieden werden (Abbildung 5).



**Abbildung 5: Sturmfluttypen unterschieden nach den Zugbahnen der Tiefdruckgebiete (aus Oumeraci 2001 nach Prügel und Schelling in Petersen und Rhode 1991)**

Die resultierenden Wasserstandserhöhungen einer Sturmflut hängen des Weiteren vom Küstenverlauf und -ausrichtungen gegenüber dem Wind ab. So kommt es für Küstenlinien die in Zugrichtung der Tiefdruckgebiete liegen, in Buchten und Flussmündungen oder weiträumigen Flachwassergebieten verstärkt zu Sturmfluten (Siefert 1980) und es besteht eine gewisse Richtungsempfindlichkeit der einzelnen Pegel (Tomczak 1952). So erklärt sich z.B., dass die Sturmflut „Britta“ vom 01.11.2006 in der Ems besonders hohe Wasserstände erreichte, an anderen Orten aber weniger starke Erhöhungen mit sich brachte, da durch eine Trogbildung in dieser Region (Heijer et al. 2007) das Windfeld mit hohen Geschwindigkeiten genau auf die Ems-Mündung gerichtet war und das Wasser hinein drückte.

Der Windstau verhält sich proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit und beträgt in erste Abschätzung nach Siefert (1980):

$$W = k * \frac{L * U^2}{d}$$

mit:

W	= Stauhöhe	[m]	k	= Konstante	[-]
L	= Fetchlänge	[m]	U	= Windgeschwindigkeit	[m/s]
d	= Wassertiefe	[m]			

Hält sich ein Sturmtief und das damit verbundene Windfeld über längere Zeit über der Nordsee kann es zu einer Sturmtidenkette kommen, bei der sich mehrere Sturmtiden im Zuge der aufei-

einander folgenden Hochwasser aneinander reihen; in der Ebbphase dazwischen läuft dann das Wasser häufig nicht vollständig ab.

Weitere Überlagerungseffekte können durch Fernwellen entstehen, die aus dem Atlantik in die Nordsee einlaufen und zu einem langwelligen Wasserstandsanstieg führen. Das lokale Wellenklima erzeugt ebenfalls einen kurzfristigen Anstieg der Wasserlage und stellt speziell für Auf- und Überlaufeffekte an Deichen eine Gefährdung dar. Erst die zeitlich ungünstige Überlagerung einzelner Effekte führt zu schweren Sturmfluten und hohen Wasserständen. Die genaue Beschreibung der Überlagerungseffekte einzelner Komponenten, die in der Regel nicht linear erfolgt, und die Frage eines physikalisch maximal möglichen Wasserstands sind Inhalt anderer Forschungsvorhaben wie z.B. XtremRisk (Gönnert et al. 2010, Oumeraci et al. 2012).

Für die Klassifikation von Sturmfluten gibt es verschiedene Ansätze, z.B. deterministisch durch unmittelbare Festlegung von Höhenbereichen oder statistisch nach der Eintrittshäufigkeit (Niemeyer 1987). Das Häufigkeitsverfahren nach der DIN4049 unterscheidet anhand von mittleren Jährlichkeiten in leichte, schwere und sehr schwere Sturmfluten (Tabelle 1). Andere Klassifikationen verwenden die Begriffe Windflut, Sturmflut und Orkanflut.

**Tabelle 1: Sturmflutdefinition nach DIN 4049; die angegebenen Grenzwerte wurden aus dem Stau gegen MThw aus der Zeitreihe 1951 bis 2010 ermittelt**

	Mittlere jährliche Häufigkeit	Norderney [cm]	Emden [cm]	Cuxhaven [cm]
Leichte Sturmflut	10 – 0,5	93	108	109
Schwere Sturmflut	0,5 – 0,05	201	242	231
Sehr schwere Sturmflut	< 0,05	275	328	329

Regelmäßige Wasserstandsmessungen und damit auch die systematische Erfassung von Sturmflutwasserständen an der deutschen Nordseeküste erfolgen seit mehr als hundert Jahren. Die längsten Messreihen weisen die Pegel in Cuxhaven und Norderney auf, für die Daten seit etwa 1900 vorliegen, für einzelne Ereignisse liegen z.T. auch noch ältere Daten vor.

### 1.2.3. Wasserstandvorhersage

Noch Anfang des 18. Jahrhunderts wurden die Bewohner der Küstenregionen aus Mangel an Vorhersagemöglichkeiten von Sturmfluten regelmäßig überrascht, so z.B. am 25. Dezember 1717 (Storch & Woth 2011). Sturmflutereignisse führten immer wieder zu Einschnitten im Besiedlungszeitraum der Marschlandschaften (Siefert 1980). Zwar wurde Küsten- und Hochwasserschutz betrieben, allerdings war noch keine zeitlich genaue Vorhersage einer Sturmflut möglich und es blieb den erfahrenen und „wetterfühligen“ Menschen überlassen, die Gefahr einer Sturmflut zu erahnen. Auch war der Katastrophenschutz noch nicht so ausgereift wie heute, so dass im Fall einer Sturmflut nur in begrenztem Maße Rettungsmaßnahmen durchgeführt werden konnten (Müller-Navarra et al. 2003). So ist es immer wieder zu verheerenden Sturmfluten mit vielen Toten an der Küste gekommen. Erst im 18. Jahrhundert begann die Forschung sich mit dem Gebiet der Sturmflutvorhersage zu beschäftigen und Mitte des 19. Jahrhunderts brauchbare Ergebnisse zu liefern. Von Bedeutung sind z.B. die vielfältigen Arbeiten von Bernhard Hugo Lentz, die vom Kaiserlichen Marine-Observatorium zu einem ersten Sturmflutvorhersageverfah-

ren ausgebaut wurden (Siefert 1980). Nach dem 1. Weltkrieg wurde die Forschung der Sturmflutvorhersage am Deutschen Hydrographischen Institut fortgesetzt und in schnellem Fortschritt nach den in Deutschland verheerenden Sturmfluten vom 16./17.02.1962 und 03.01.1976 erweitert. Hier sei z.B. auf Tomczak (1960) und Annutsch (1978) verwiesen. Die Weiterentwicklung der atmosphärischen Modellierung und Vorhersage von Windverhältnissen über mehrere Tage im Voraus sorgte ab den 1990er Jahren für weitere deutliche Fortschritte in der Sturmflutvorhersage (Coldewey 2007). Aufbauend auf einer relativ verlässlichen Datengrundlage aus der Wettervorhersage kann heute mehrere Tage im Voraus die Gefahr einer Sturmflut abgeschätzt werden. Dabei ist es aber nach wie vor notwendig, dass die Ergebnisse der Vorhersageverfahren interpretiert und bewertet werden. Die Gefahr, dass bestimmte meteorologische Verhältnisse unbeobachtet einen überraschend hohen Stau erzeugen, ist nur noch gering und es sind Prognosen über die Höhe des zu erwarteten Staus im Bereich einiger Dezimeter möglich.

Für die Wasserstandsvorhersage werden im Wesentlichen drei Verfahren unterschieden (Schmitz 1978, Müller-Navarra et al. 2003). Die empirisch-statistischen, die physikalisch-numerischen, sowie eine Kombination dieser Verfahren. Hinzu kommt heutzutage der neuere Ansatz mit Künstlichen Neuronalen Netzen.

#### Empirisch-statistische Verfahren

Bei der empirisch-statistischen Vorhersage werden anhand gemessener Daten und mit der Methode der multiplen Regression Beziehungen zwischen dem Stau an einem Pegel und den vorherrschenden meteorologischen Verhältnissen hergestellt, so dass die Residuen minimiert werden. In ihrer grundlegenden Form besteht die Formel aus einer Summierung linearer Funktionen, in denen verschiedene Parameter eingehen. Die wesentlichen physikalischen Größen sind die Windgeschwindigkeit und -richtung, der Luftdruck, die Temperatur der Luft und des Wassers in gegeben Falls verschiedenen Gebieten über See sowie Wasserstände in vorgelagerten Bereichen (siehe Müller-Navarra & Giese 1999). Die Relevanz einzelner Größen für den Gesamtstau ist unterschiedlich (Schmitz 1978, Siefert & Lassen 1985, Müller-Navarra & Giese 1999) und je nach Zielsetzung, vorhandener Datenbasis und gewünschtem Aufwand können Parameter berücksichtigt oder weggelassen werden.

Dieses Verfahren wurde jahrelang überwiegend genutzt und eignet sich insbesondere um die lokalen Eigenheiten eines Gebietes zu berücksichtigen. Der Sturmflutwarndienst des NLWKN verwendet solche empirisch-statistische Zusammenhänge für die Vorhersage des Wasserstands an der niedersächsischen Küste. Ein Vorläufer der Regressionsformeln wurde bereits in den 50ziger Jahren entwickelt. Aus Windstautabellen für den Pegel Cuxhaven wurde abhängig von der Windrichtung und Windgeschwindigkeit ein Stau für weitere Pegel abgeleitet (Tomczak 1952). Mit der Zunahme staurelevanter Eingangsparameter erwiesen sich die Windstautabellen als Werkzeug als immer unhandlicher und es wurde auf empirisch-statistische Verfahren, wie die Multiple Regression zurückgegriffen. Da sich die empirisch-statistischen Zusammenhänge aus einer Menge an meteorologischen Daten ergeben und die Sturmflutfälle in dieser Auswahl meist unterrepräsentiert sind, nimmt die Vorhersagegenauigkeit bei extremeren Wasserständen ab (Müller-Navarra & Giese 1999). Weitere empirisch-statistische Stauvorhersagemethoden wurden z.B. anhand des Staus an vorgelagerten Pegeln für den Pegel Cuxhaven entwickelt (Christiansen & Siefert 1979).

#### Physikalisch-numerische Verfahren

Im physikalisch-numerischen Modell werden die Bewegung und Physik der Wellen-, Strömungs-, Bodenverhältnisse etc. deterministisch so exakt wie möglich beschrieben, so dass eine Simulation

der zukünftigen Wasserstandsverhältnisse auf dieser Grundlage durchgeführt werden kann. Es werden nicht nur einzelne Pegelstandorte, sondern flächendeckend das komplette Modellgebiet betrachtet und unter Berücksichtigung bestimmter Randbedingungen die Zustandsgrößen zu jedem Zeitschritt auf dem numerischen Gitter berechnet. Dabei hängt die Genauigkeit der Ergebnisse neben der Modellgenauigkeit auch immer von der Güte der meteorologischen Eingangsdaten ab. Erste physikalisch-numerische Modelle für die Deutsche Bucht wurden von Hansen (1966) entwickelt. Physikalisch-numerische Modelle zur Wasserstandsvorhersage werden z.B. beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie für die dortige Wasserstandsvorhersage eingesetzt (Dick et al. 1993, Müller-Navarra et al. 2003) oder auch in den Niederlanden (Philippart & Gebraad, 1997).

#### Kombination empirisch-statistischer und physikalisch-numerischer Verfahren

Für die Vorhersage kann auch eine Kombination mehrere Verfahren und deren jeweiligen Stärken genutzt. Ein Beispiel für ein kombiniertes Verfahren stellen z.B. die „Model Output Statistics“ (MOS) des BSH dar (Müller-Navarra & Knüpffer 2010).

#### Künstliche Neuronale Netze

Als weiteres relativ junges Vorhersageverfahren werden Ansätze mit Künstlichen Neuronalen Netzen eingesetzt (aus dem englischen heraus auch als ANN bezeichnet) (z.B. Röske 1997, Kim et al. 2014). Beruhend auf einer Menge an Trainingsdaten „erlernen“ diese KNN ein bestimmtes Verhalten, das dann -in durch den Trainingsdatensatz bestimmten Grenzen- für eine Vorhersage genutzt werden kann. Wichtig bei diesen Verfahren ist, dass dafür eine Widerspiegelung der den Vorgängen zugrunde liegenden Physik nicht zwingend notwendig ist und verschiedenen Eingabeparameter „frei“ miteinander kombiniert werden können.

Alle genannten Verfahren benötigen für längerfristige Vorhersagen über einen Zeitraum von wenigen Stunden hinaus als Eingabeparameter meteorologische Prognosen. Daher hängt die Optimierung der Wasserstandsvorhersage sehr stark von der Qualität und einer Optimierung der meteorologischen Vorhersageverfahren ab. Da es sich bei Sturmfluten um Extremereignisse handelt, müssen die Ergebnisse, egal aus welchem Verfahren, immer kritisch betrachtet und unter Berücksichtigung der aktueller Randbedingungen interpretiert werden.

#### 1.2.4. Bisheriges Verfahren zur Wasserstandsvorhersage im NLWKN

Die Forschungsstelle Küste des NLWKN betreibt seit ihrer Gründung in den 1930er Jahren des letzten Jahrhunderts Untersuchungen zu den Wasserständen und Sturmfluten entlang der niedersächsischen Küste. Der betrachtete Bereich beinhaltet das Emsästuar und den Dollart, die ostfriesischen Inseln und die Festlandküste Niedersachsens bis zur Elbmündung. Seit der Integration in den NLWKN gehört auch der Sturmflutwarndienst Küste zu dieser Einrichtung. Seit über einem Jahrzehnt wird durch den Sturmflutwarndienst die Sturmflutvorhersage erfolgreich für das Land Niedersachsen durchgeführt und Erfahrungen in der Prognose von Wasserständen gesammelt.

Unter Berücksichtigung der lokalen Besonderheiten wird der erwartete Wasserstand für verschiedene Orte entlang der niedersächsischen Küste prognostiziert. Eine vorsorgliche Warnung mit längerer Vorlaufzeit ist nötig um die entsprechenden Abteilungen und Verbände rechtzeitig informieren zu können. Es geht insbesondere um eine optimale Arbeits- und Geräteplanung für

den Küsten- und Inselschutz, Anordnung von Dienstbereitschaften im Sturmflutfall, Steuerung der Sperrwerke und die Vorlandbewirtschaftung. Zusätzlich stehen die Ergebnisse im Internet der Öffentlichkeit zur Verfügung.

Die derzeitige Sturmflutvorhersage des NLWKN erfolgt im Wesentlichen in drei Phasen die zeitlich anhand der verwendeten Eingangsdaten unterschieden werden (Coldewey 2007).

#### Fünftägige Abschätzung

Mit einem Zeitfenster von bis zu fünf Tagen wird der an der Küste zu erwartende Stau berechnet. Die Berechnung basiert auf einem empirischen Verfahren und verwendet als Eingangsdaten die vom DWD aufbereiteten Windprognosen aus dem GME Modell. Dessen Rechenläufe beginnen jeweils um 0 und 12 Uhr UTC und die Daten stehen etwa 6 Stunden später mittels des Informationssystem KÜSTE des DWD–Seewetteramts (SEEWIS) zur Verfügung. In einer Tabellenkalkulation werden die vom DWD zur Verfügung gestellten meteorologischen Vorhersagen eingelesen und anschließend über empirisch ermittelte Übertragungsfunktionen der Stau für ausgewählte Küstenpegel berechnet. Durch Überlagerung mit der mittleren Tidekurve werden die Tidehochwasserscheitel bestimmt. Mit relativ großen Vorlauf können so erste Anzeichen einer Sturmflut abgeschätzt und betriebsinterne Warnungen ausgesprochen werden.

#### Zweitägige Vorhersage

Die zweite Phase beginnt zwei Tage vor Eintritt des Ereignisses. Zu diesem Zeitpunkt stehen aktualisierte und meist genauere Berechnungen der meteorologischen Daten vom DWD zur Verfügung. Die Daten stammen aus den COSMO-EU und COSMO-DE Modellen. Darauf basierend kann eine erneute, verbesserte Stauberechnung für die Pegelstandorte erfolgen. Hier werden die gleichen statistischen Ansätze verwendet wie schon in der ersten Phase. Bestätigt sich mit der genaueren Vorhersage die Gefahr einer Sturmflut werden die Dienststellen des NLWKN, Landkreise, Deichachten und Inselkommunen über die Gefährdungslage informiert.

#### Sturmflutfall

Die dritte Phase beginnt wenige Stunden vor einer Sturmflut und es kann anhand von im Tideverlauf vorgelagerten Pegeln, im Wesentlichen Terschelling und Huibertgat vor der niederländischen Küste, an denen das Hochwasser schon eingetreten ist, auf Basis statistischer Ansätze der zu erwartende Stau an den niedersächsischen Vorhersageorten hochgerechnet werden. Die Vorlaufzeit beträgt in etwa drei Stunden für Terschelling und eine Stunde für Huibertgat bezogen auf den Pegel Norderney.

Die berechneten Wasserstände werden mit den Vorhersagen anderer Institutionen wie dem Rijkswaterstaat und dem Königlich Niederländischen Meteorologischen Instituut (KNMI) in den Niederlanden sowie dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg verglichen und bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse etwaige Abweichungen berücksichtigt.

Die derzeitigen Zielpegel Norderney, Emden, Bengersiel, Cuxhaven und Bremerhaven sind Referenzpunkte für die Bereiche der Ostfriesischen Inseln und Küste, das Ems-Dollart-Ästuar, der Elbe- und der Wesermündung. Zukünftig soll noch Wilhelmshaven für den Bereich des Jadebusens mit aufgenommen werden. Diese Stauvorhersagen werden werktäglich einmal vorgenommen, bei einem sich ankündigenden Sturmereignis können diese Berechnungen entsprechend der Verfügbarkeit von Windmodellierungen des DWD bis zu viermal täglich aktualisiert werden.

In der täglichen Routinevorhersage wird aus den meteorologischen Daten der Stau an den Pegeln Norderney und Cuxhaven direkt berechnet, während für die Orte Emden, Bengersiel, Bremerhaven und Wilhelmshaven über einen „Stützpegel“ (Norderney, Cuxhaven, Wangerooge oder Leuchtturm Alte Weser) mittels entsprechende Regressionsgleichungen der Stau „indirekt“ bestimmt wird. Das aktuelle Verfahren existiert in Form von Excel-Tabellen und hat sich im Laufe der Jahre entwickelt. Der aktuelle empirische Ansatz verwendet Polynome bis 3. Ordnung und ist nach Windrichtung und Windstärke in Klassen unterteilt.

### **1.3. Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD)**

Der DWD betreibt seit Jahren operationelle Modellketten zur Atmosphärenmodellierung, die auf nationaler Ebene und im europäischen Verbund ständig verbessert werden. Gegenwärtig besteht die operationelle Kette aus dem Globalmodell GME (wurde im Januar 2015 durch ICON abgelöst), einem Regionalmodell für Europa COSMO-EU und einem noch feiner aufgelösten Regionalmodell für Deutschland COSMO-DE. Windprognosen aus diesen Modellrechnungen bilden die Basis für die Wasserstandsvorhersagen des NLWKN.

Im Rahmen des Projektes wurde mittels dieser Modellkette ein Katalog von 39 zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Nachrechnungen von Sturmzyklonen erstellt, die in den Jahren 1962 bis 2011 zu Sturmfluten an der deutschen Nordseeküste geführt haben. Die numerischen Simulationen sollten bestmöglich die zeitliche Entwicklung des bodennahen Windfeldes und die Zugbahnen und Intensität der Sturmzyklonen bereitstellen.

Die Nachrechnungen der Sturmflutwetterlagen für dieses Projekt wurden mit z.T. leicht modifizierten Versionen der oben genannten Modellen durchgeführt: Die Auflösung des GME betrug 30 km mit 60 vertikalen Schichten, das Modellgebiet des COSMO-EU wurde etwas verändert bei gleichbleibender Auflösung von 7 km und 40 Schichten und das Modellgebiet des COSMO-DE Modells wurde über die Nordsee verschoben und die räumliche Auflösung von 2,8 auf 2,2 km verfeinert bei 65 vertikalen Schichten (Abb. 6). Als Anfangsdaten für das GME-Modell dienten die Re-Analysen des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersagen (EZMW) ERA-40 (1962 bis 1978) und für Sturmereignisse ab 1979 die höher auflösenden ERA-INTERIM Datensätze. Zusätzlich wurden die Modellläufe mit den beiden COSMO-Modellen mit einem Nudging-Modus durchgeführt, d.h. dass die im Archiv des DWD vorhandenen Beobachtungsdaten in die Rechnungen mit einbezogen wurden. Für weitere Informationen zu den Modellierungen des DWD sei auf den Abschlussbericht des Teilprojektes verwiesen (Brecht & Frank 2014a).

Aus allen Modellläufen wurden der Horizontalwind in 10 m Höhe (u-, und v-Komponente) und der auf Meereshöhe reduzierte Luftdruck (PMSL) ausgelesen und im GRIB2-Format dem NLWKN für seine Untersuchungen zur Verfügung gestellt.

# Domains COSMO-EU and COSMO-DE

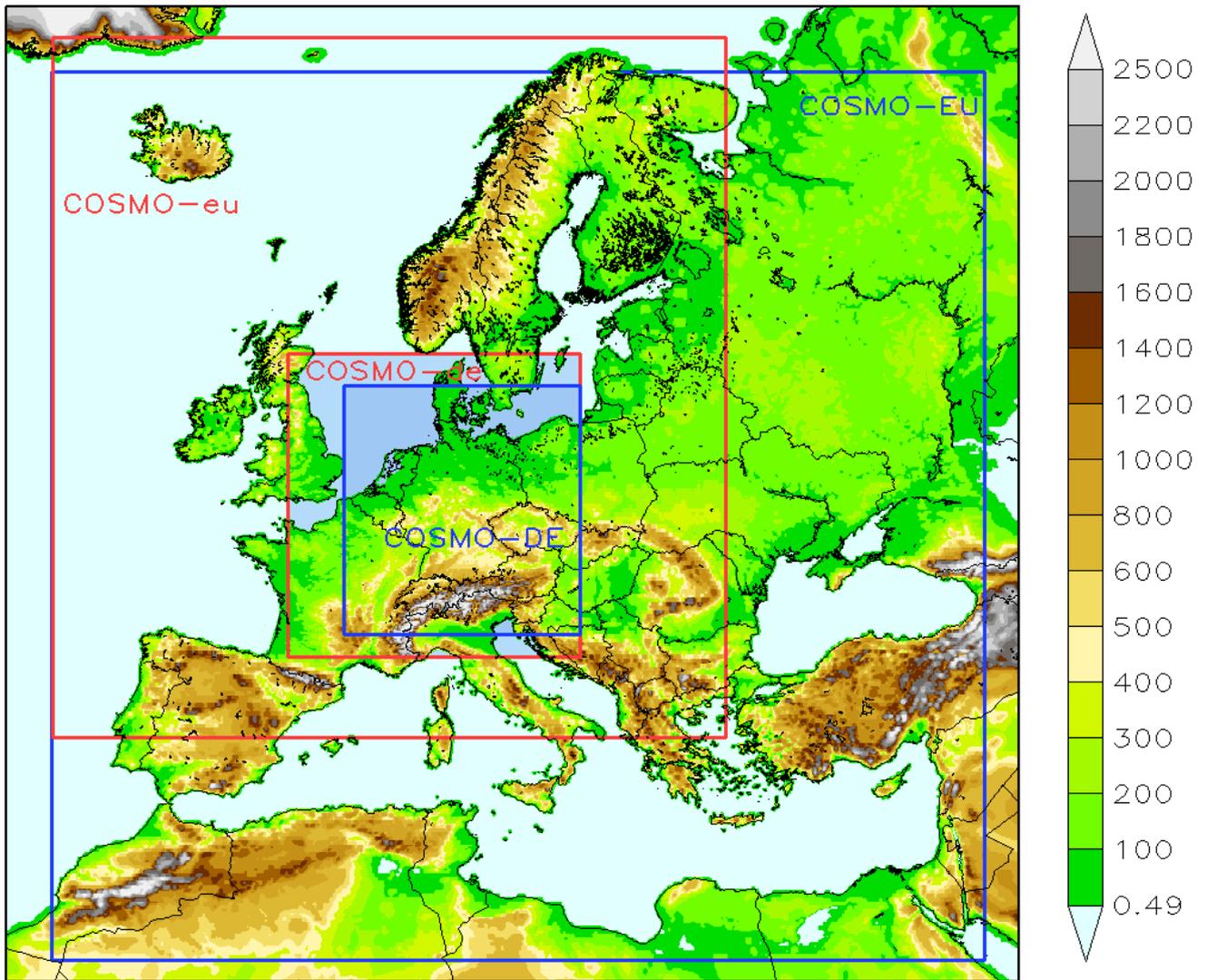


Abbildung 6: Modellgebiet von COSMO: Die roten Umrandungen zeigen die Gebiete der im Projekt verwendeten Modelle, die blauen Umrandungen stellen die Gebiete der operationellen Versionen dar (Brecht & Frank, 2014a).

## 2. Datengrundlage

### 2.1. Ausgewählte Sturmfluten

Für das Projekt wurden 42 Sturmtiden zwischen 1962 und 2011 ausgewählt, die vom DWD nachgerechnet und dann für die statistischen Untersuchungen herangezogen wurden. Nachrechnungen von Sturmfluten älter als 1962, z.B. der sehr schweren von 1906, waren nicht möglich, da für die meteorologischen Modellierungen keine ausreichenden Daten, insbesondere Anfangs-Randbedingungen, zur Verfügung standen. Es wurden im Wesentlichen Sturmtiden mit einem Stau größer zwei Meter am Pegel Norderney ausgewählt, sowie einige zwar niedrigere aber jüngerer Ereignisse und eine Sommersturmflut. Um auch das Geschehen vor der eigentlichen Sturmtide mit zu erfassen, wurde jeweils ein Zeitraum von etwa 2-3 Tage vor und ein Tag nach dem Ereignis modelliert. Da einige der ausgewählten Sturmtiden dicht hintereinander auftraten, wurden diese zusammenhängend berücksichtigt, so dass letztendlich 39 Zeiträume vom DWD mit der Modellkette nachgerechnet wurden (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Ausgewählte Sturmfluten**

	Start (UTC)	Eintritt max. Wasserstand Norderney (UTC)	Ende (UTC)	Stau Norderney über MThw [cm]
1	14.02.1962	16.02.1962 20:10	17.02.1962	297
2	28.11.1966	30.11.1966 23:47	01.12.1966	206
3	21.02.1967	23.02.1967 21:10	24.02.1967	228
4	26.02.1967	01.03.1967 01:03	01.03.1967	206
5	10.11.1973	19.11.1973 17:03	20.11.1973	255
6	04.12.1973	06.12.1973 19:04	07.12.1973	241
7	11.12.1973	14.12.1973 00:03	14.12.1973	235
8	01.01.1976	03.01.1976 11:59	04.01.1976	275
9	18.01.1976	21.01.1976 00:40	22.01.1976	275
10	28.12.1977	31.12.1977 00:16	31.12.1977	248
11	21.11.1981	24.11.1981 08:10	25.11.1981	237
12	30.01.1983	02.02.1983 01:06	02.02.1983	223
13	02.12.1988	05.12.1988 06:48	05.12.1988	159
14	11.02.1989	14.12.1989 14:46	15.02.1989	159
15	23.01.1990	25.01.1990 23:22	27.01.1990	182
16	24.02.1990	26.02.1990 23:24	28.02.1990	250
17	18.08.1990	20.08.1990 22:33	21.08.1990	117
18	17.12.1991	20.12.1991 09:00	21.12.1991	197
19	20.01.1993	22.01.1993 22:34	23.01.1993	213
20	07.12.1993	09.12.1993 17:32	10.12.1993	147
21	17.12.1993	20.12.1993 00:57	20.12.1993	192
22	25.01.1994	28.01.1994 10:34	31.01.1994	247
23	11.03.1994	13.03.1994 22:08	14.03.1994	171
24	30.12.1994	01.01.1995 22:29	02.01.1995	201
25	07.01.1995	10.01.1995 04:56	11.01.1995	228
26	27.10.1996	29.10.1996 23:18	30.10.1996	165
27	02.02.1999	05.02.1999 02:23	06.02.1999	220
28	30.11.1999	03.12.1999 18:00	04.12.1999	201
29	27.01.2000	30.01.2000 03:54	30.01.2000	223
30	25.10.2002	28.10.2002 02:05	28.10.2002	146
31	29.10.2006	01.11.2006 04:27	01.11.2006	255
32	09.01.2007	12.01.2007 02:27	12.01.2007	199
33	16.01.2007	18.01.2007 20:13	19.01.2007	129
34	16.03.2007	18.03.2007 21:33	20.03.2007	216
35	07.11.2007	09.11.2007 09:45	10.11.2007	255
36	23.11.2007	25.11.2007 10:05	26.1..2007	147
37	10.03.2008	13.03.2008 01:30	13.03.2008	133
38	09.11.2010	12.11.2010 13:48	13.11.2010	155
39	02.02.2011	04.02.2011 23:17	05.02.2011	133

## 2.2. Wasserstandsdaten

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Wasserstandsdaten von verschiedenen Pegeln entlang der niedersächsischen Küste verwendet: Pegel Borkum Fischerbalje, Emden, Norderney Riffgat (z.T. auch noch Position Hafen), Bensersiel, Wangerooge West, Alte Weser, Wilhelmshaven alter Vorhafen, Bremerhaven (Doppelschleuse und neuer Leuchtturm) und Cuxhaven Steubenhöft (Abb. 7). Betreiber der Pegel, mit einer Ausnahme, ist die Wasserschifffahrtsverwaltung des Bundes, die die Daten der Forschungsstelle regelmäßig zur Verfügung stellt. Der Pegel Bensersiel wird von der NLKWN-Betriebsstelle Aurich unterhalten.

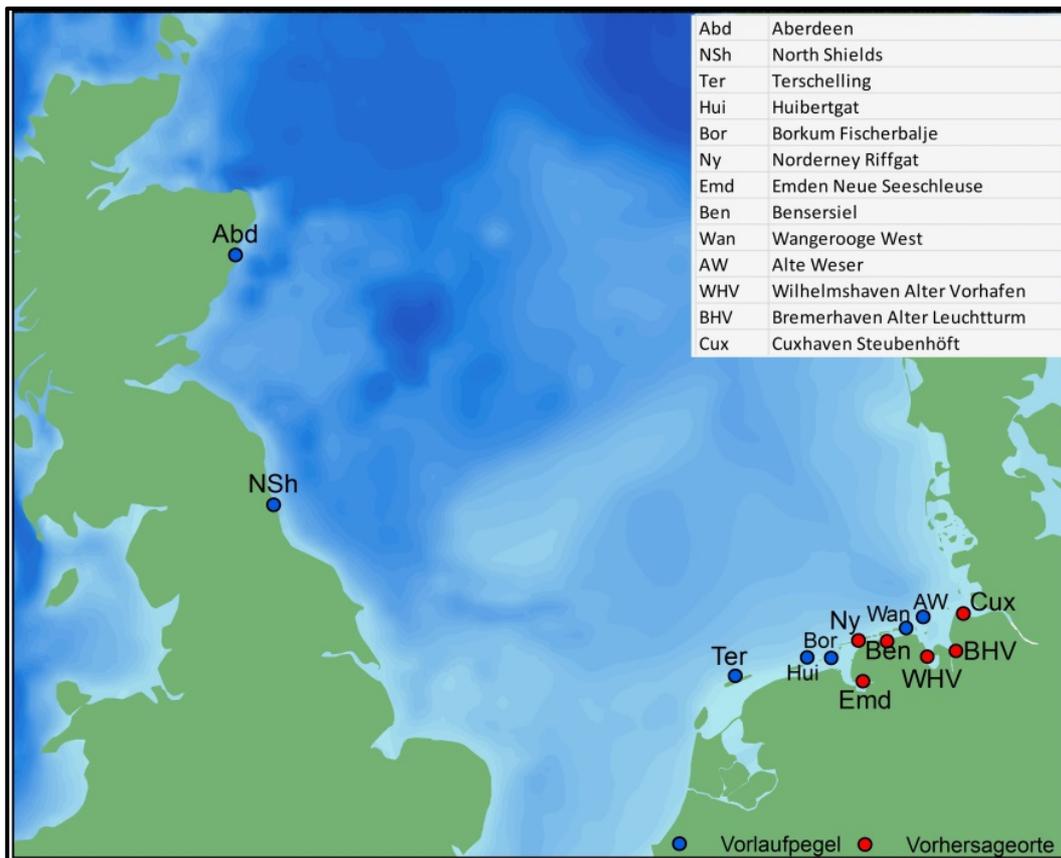


Abbildung 7: Lage der verwendeten Wasserstandspegel

Die Daten der Pegelmessungen für die 39 ausgewählten Sturmflutzeiträume lagen zu einem großen Teil bereits digital vor. Für einige ältere Ereignisse mussten jedoch noch analoge Pegelbögen digitalisiert werden. Es wurde versucht, die Messdaten während der Sturmtiden und zwei bis drei vor- und nachlaufende Tiden als Zeitreihen von 5 bzw. 10 min-Werten verfügbar zu haben, dies war aber nicht für alle Pegel und Ereignisse möglich. Vollständige Datenreihen stehen aber für die Niedrig- und Hochwasserscheitelwerte zur Verfügung. Für die Auswertung sind des Weiteren noch Angaben zu den mittleren Wasserständen und mittlere Tidekurven sowie zu den astronomischen Vorausberechnungen notwendig. Für die meisten Pegel ist seitens des Pegelbetreibers eine aktuelle mittlere Tidekurve vorhanden. Diese wurde unter Verwendung der jeweiligen 5-jährigen-Mittelwerte der Scheitelwerte und den astronomischen Eintrittszeiten für die einzelnen Ereignisse aufgespannt, so dass die Staukurven gegen die mittlere Tide für die Ereignisse bestimmt werden konnten. Die verwendeten astronomischen Eintrittszeiten und -höhen stammen vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie. Die Werte liegen zumeist ab dem Jahr 1989 in digitaler Form vor, für die Jahre davor muss auf die Gezeitentafeln zurückgegriffen werden.

Die Wasserstandsdaten der betrachteten niederländischen Pegel Terschelling-Nordzee und Hui- bertgat stammen vom Rijkswaterstaat (Servicedesk Data Rijkswaterstaat Centrale Informa- tievoorziening). Weiterhin standen auch Wasserstandmessungen in Aberdeen vom National Oceanography Centre, Liverpool bezogen über das British Oceanographic Data Centre (BODC) zur Verfügung.

Es konnten mit vor- und nachlaufenden Tiden insgesamt 335 Tidehochwasser in den 39 nachge- rechneten Sturmflutwetterlagen untersucht werden. Eine Aufteilung der Sturmtiden nach der Höhe des Staus zum Tidehochwasser bezogen auf Norderney ist in Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 3: Übersicht über den Informationsgehalt der 39 Sturmflutzeiträume**

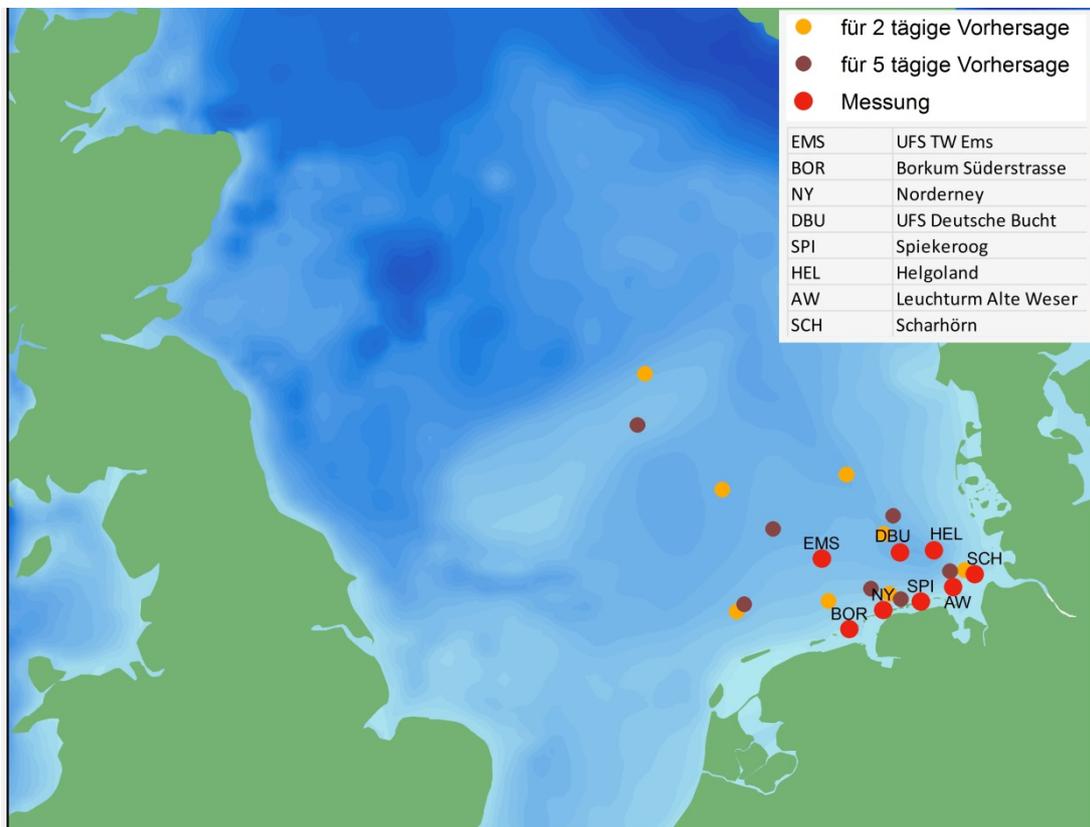
	Windmodell	Vorhandene Wasser- standsganglinien	Scheitelwerte
<b>Sturmflutzeiträume</b>	39	39	39
<b>Sturmtiden</b>	-	42	42
<b>Anzahl Thw</b>	335	158	335
<b>Thw mit Stau &gt; 1m</b>	-	75	80
<b>Thw mit Stau &gt; 1.5m</b>	-	48	49
<b>Thw mit Stau &gt; 2m</b>	-	26	29
<b>Thw mit Stau &gt; 2.5m</b>	-	6	7
<b>Zeitschritte (dt = 1h)</b>	4287	2880	-

### 2.3. Windmessdaten

Neben den vom DWD modellierten Winddaten wurden für eine Reihe von Untersuchungen auch gemessene Windgeschwindigkeiten und –richtungen von verschiedenen Positionen verwendet (Tabelle 4). Die Daten stammen ebenfalls vom DWD, mit Ausnahme der Station Scharhörn, die von der Hamburg Port Authority betrieben wird.

**Tabelle 4: Anzahl Messwerte, die an den Windmessstationen vorliegen**

	10 Minutenmittel	Synoptische Mittel	Stundenmittel
<b>Alte Weser</b>	-	265981	-
<b>Borkum</b>	418122	-	167375
<b>Deutsche Bucht</b>	-	200278	71569
<b>Helgoland</b>	776496	56416	464448
<b>Norderney</b>	933144	66204	376848
<b>Scharhoern</b>	-	-	144735
<b>Spiekeroog</b>	719340	18264	118704
<b>TW Ems</b>	-	161983	-



**Abbildung 8: Lage der Windmessstationen und bisher benutzte Windausgabepunkte des SEEWIS-Systems in der Deutschen Bucht**

## 2.4. Software

Die für das derzeitige Vorhersageberechnungsverfahren genutzte Software Excel ist am Rande ihrer Leistungsfähigkeit. Zwangsläufig erfordert die Berücksichtigung von mehr Eingangsdaten einen aufwändigeren Algorithmus und die Einführung einer leistungsfähigeren Software. Mit der Softwareumgebung Matlab liegen bei vielfältigen und anspruchsvollen Aufgaben in der Forschungsstelle Küste und bei anderen Institutionen gute Erfahrungen vor. Es wird die Matlabversion R2013b und die Statistic Toolbox und ANN Toolbox verwendet.

## 3. Durchführung der Untersuchungen und Ergebnisse

Ein wesentliches Ziel der Untersuchungen war es, die Regressionsbeziehungen zwischen meteorologischen Daten und Wasserstands- bzw. Stauwerten an den Vorhersagestationen neu zu ermitteln und zu optimieren. In einem ersten Schritt wurde – da zu Beginn des Projektes die Daten aus den Modellierungen des DWD noch nicht vorlagen – die Beziehung zwischen dem gemessenen Stau und gemessenen Winddaten über der Nordsee für die Pegel Norderney, Wangerooge West, Alte Weser und Cuxhaven untersucht (Abschnitt 3.1) um einige grundlegende Fragestellungen z.B. hinsichtlich der Verwendung eines trigonometrischen Ansatzes anstelle von Windrichtungsklassen zu klären. Nach Erhalt der numerisch modellierten meteorologischen Daten wurden dann die aufwändigeren multiplen Regressionsberechnungen ebenfalls für die genannten Pegel (Abschnitt 3.2) erstellt. Für die Pegel im geschützteren Ästuarbereich wurden in einem dritten Schritt Berechnungsansätze für den Stau unter zur Hilfenahme von Stützpegeln ermittelt. Aufgrund von Buchteneffekten kann der Stau in den Ästuaren nicht ausschließlich aus den meteorologischen Daten über der Nordsee hergeleitet werden (Abschnitt 3.3).

Um die kurzfristige Vorhersage für die niedersächsischen Standorte aus den Pegelbeobachtungen der „Vorlaufpegel“ entlang der Niederländischen Küste zu verbessern wurden Regressionsberechnungen zwischen den Pegeln Terschelling und Norderney durchgeführt. Des Weiteren wurde auch die unmittelbare Beziehung der Wasserstände zwischen Norderney und Wangerooze West untersucht (Abschnitt 3.4).

Als ein weiterer ergänzender Ansatz wurde untersucht, ob mit Hilfe Künstlichen Neuronalen Netzen ebenfalls ein Berechnung des Staus an den Pegelstandorten aus den meteorologischen Daten über der Nordsee möglich ist und gegeben Falls für die Vorhersage genutzt werden kann (Abschnitt 3.5).

Eine weitere Fragestellung, der im Rahmen des Projektes nachgegangen wurde, betraf die Überlagerung zwischen astronomischer Tide und winderzeugtem Stau (Abschnitt 3.6). Mittels hydrodynamisch numerischen Modellierungen wurde versucht zu ermitteln, in welcher Größenordnung der Anteil der astronomischen Erhöhung am Gesamtstau liegen kann.

### **3.1. Voruntersuchungen mit gemessenen Winddaten aus der südlichen Nordsee**

Die Stauberechnung des Sturmflutwarndienstes des NLWKN beruht bisher auf einen Satz empirischer Formeln mit polynomen Gliedern, aufgeteilt in Windrichtungsklassen von jeweils 10°. An den Grenzen dieser Windrichtungsklassen kann es dabei zu Sprüngen kommen, darüber hinaus sind relative viele Formeln zu handhaben. Der Vorteil eines trigonometrischen Ansatzes beruht in der impliziten Berücksichtigung der Windrichtung durch Verwendung von trigonometrischen Gliedern. Dadurch muss nicht für jede Windrichtungsklasse eine eigene Formel erstellt werden, Sprünge im Randbereich werden vermieden und das Verfahren ist übersichtlicher für den Anwender. Analog zu dem bisherigen Verfahren wurde aus Winddaten aus verschiedenen Bereichen der Deutschen Bucht einen „Mittelwind“ bestimmt und aus diesem Mittelwind mithilfe von linearen Regressionen die Beziehung zum Stau für jeden Pegel ermittelt.

Windmessstationen im Einflussgebiet der niedersächsischen Nordseeküste, für die dem NLWKN Daten vorlagen, sind Borkum, Norderney, Spiekeroog, Leuchtturm Alte Weser, Scharhör, Helgoland, FS Deutsche Bucht und FS Ems (Abb. 8). Die Daten erstrecken sich über den Zeitraum von 1985 bis 2010. Helgoland verfügt über eine lange Serie an Messwerten startend in den 50er Jahren. Aufgrund zahlreicher Verlegungen, Abschattungen etc. des Windmessers sind die Werte dieser Station jedoch mit Vorsicht zu betrachten (mündl. Mitteilung DWD Seewetteramt) und werden hier nicht weiter berücksichtigt. Die Lage der Station Alte Weser ist insbesondere bei Betrachtungen der Pegel Bremerhaven und Cuxhaven ideal, gleichwohl muss beachtet werden, dass die Windmessung auf dem Leuchtturm Alte Weser im Dezember 2011 eingestellt wurde und somit steht diese Windmessposition für Rechnungen mit neueren Daten nicht mehr zur Verfügung.

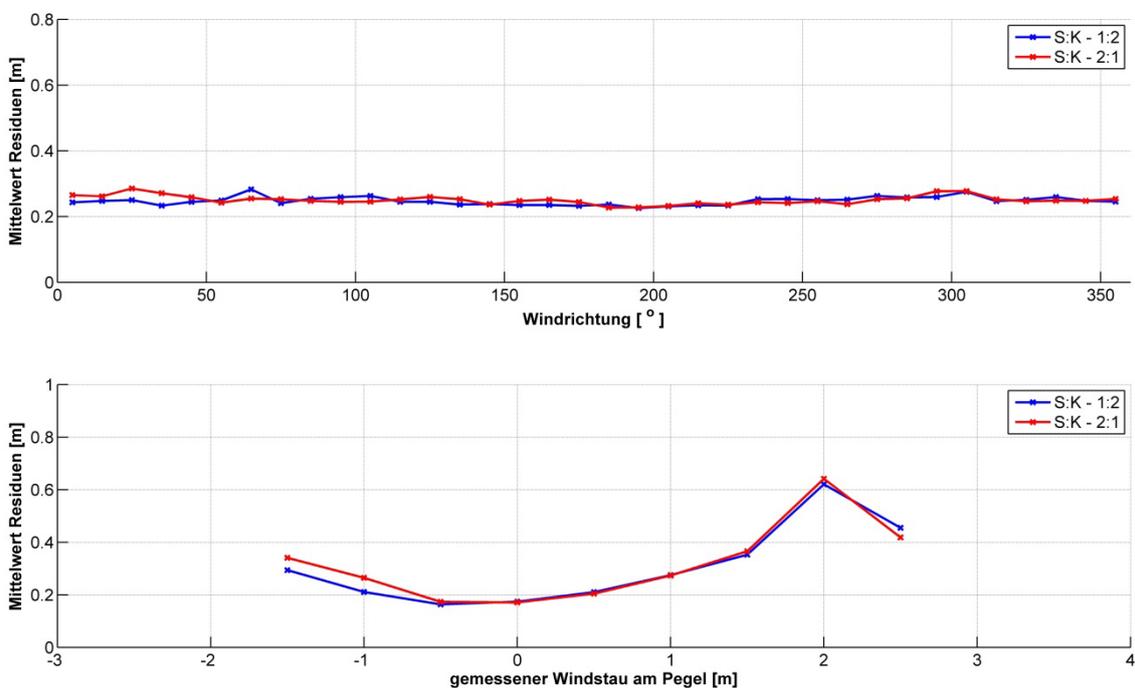
Der Gesamtdatensatz aus Wind und Wasserstandsdaten wurden per Zufallsprinzip in einen Trainings-, und einen Validierungsdatensatz aufgeteilt. Dabei wurden 80 % der Daten dem Trainingsdatensatz und 20 % dem Validierungsdatensatz zugeordnet. Je nach Zielpegel wurde nur eine Auswahl der Windmessstationen berücksichtigt. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf den Zielpegel Norderney, die Trends gelten aber analog auch für andere Stationen.

## Mittelung (zeitlich und räumlich)

Es wurden verschiedene Methoden getestet, einen signifikanten „Mittelwind“ zu finden. Zum einen wurde untersucht, ob eine Verwendung von Stundenmitteln oder von 3-Stunden-Mittelwerten zu besseren Ergebnissen führt. Bei 3-Stunden-Mittelwerten wird der Stundenmittelwert der entsprechenden Stunde mit dem Mittelwert der Stunde davor und danach gemittelt. Dies soll gröbere Ausreißer und kurzfristige Peaks in der Windmessung ausgleichen.

Für eine räumliche Mittelung wird zum einen ein „küstenfernerer“ Wind gebildet, in den alle verfügbaren Werte der Stationen FS Ems und Deutsche Bucht einfließen, bei Ausfall einer Station wird nur der Wert der anderen Station berücksichtigt. Zum anderen wird ein „küstennaher“ Wind gebildet. Dieser wird analog aus den Stationen Norderney und Spiekeroog berechnet. Alte Weser wurde in verschiedenen Tests dazu genommen, da diese Messstation räumlich dicht bei den Pegeln Cuxhaven und Alte Weser lokalisiert ist. Anschließend wurde wiederum küstenfernen und küstennahen Windmessungen gemittelt und dabei unterschiedliche Wichtungen der beiden Eingangswerte getestet. Mit diesem gemittelten Wind wurden dann Regressionsrechnungen zum Stau an den Pegeln durchgeführt.

Für die Gesamtdatenmenge über alle Stauwerte führte ein Verhältnis von 1:1 zwischen „küstennahem“ und „küstenfernen“ Wind zu einem optimalen Ergebnis. In einer differenzierteren Betrachtung wurde untersucht ob in gewissen Staubereichen eine weitere Verbesserung erreicht werden kann, wenn eine stärkere Wichtung der küstenfernen Windmessungen vorgenommen wird.



**Abbildung 9: Vergleich der Regressionsberechnungen für den Pegel Norderney bei unterschiedlicher Mittelung von küstenfernem („S“) und küstennahem („K“) Wind**

Es zeigte sich, dass sich bei unterschiedlichen Wichtungen kaum Unterschiede in den Residuen ergeben (Abb. 9). Lediglich im Bereich von Nord- bis Nordostwind, sowie negativem Windstau von etwa -1 m ergibt die Verwendung von einem Verhältnis von 1:2 („küstenferner“ Wind : „küstennaher“ Wind) eine etwas besseren Standardabweichungen. Dies zeigt, wie nicht anders

zu erwarten, dass bei negativem Windstau (der häufig bei Nord- bis Ostwind auftritt), der Wind über Land den stärkeren Einfluss hat. Generell zeigt diese Betrachtung, dass die Unterscheidung und Wichtung zwischen diesen Windmessregionen, wenn auch in „küstenferneren“ und „küstennahen“ Wind unterschieden, gesamt betrachtet aber relativ nahe zur Küste liegend, keinen wesentlichen Einfluss auf die Bestimmung des Windstaus an den Pegeln hat.

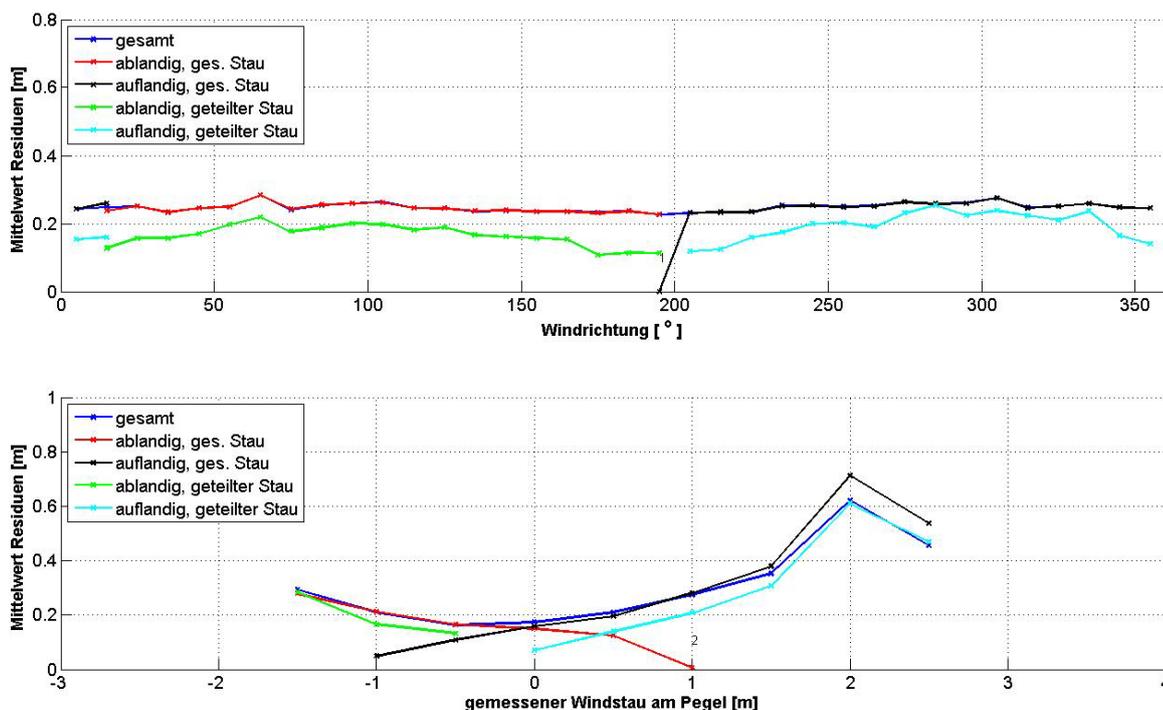
### Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Um den Einfluss von Windrichtung und Windgeschwindigkeit auf die Güte der Regressionsrechnung zu bestimmen wurde die Gesamtdatenmenge in unterschiedliche Kategorien aufgeteilt. Eine Unterscheidung war die zwischen ablandigem und auflandigem Wind. Es zeigte sich für alle vier Pegel (Norderney, Wangerooge West, Alte Weser und Cuxhaven), dass Wind zwischen 15° bis 200° zu negativem Windstau führt. Dieser wurde daher grob als ablandig definiert. Wind zwischen 200° bis 15° dagegen führt überwiegend zu positivem Windstau, und wird als auflandiger Wind definiert. Darüber hinaus wurden zwei weitere Datenmengen untersucht, in denen ein Stau zwischen -0,25 cm bis 0,25 cm ausgespart wurde. Dieser Bereich entspricht vereinfacht im Wesentlichen der astronomischen Abweichung und wurde daher aus der Untersuchung herausgenommen.

Es werden also insgesamt 5 Datensätze verglichen:

- a. gesamte Datenmenge als Vergleich
- b. ablandiger Wind, ohne Einschränkung des Windstaus
- c. auflandiger Wind, ohne Einschränkung des Windstaus
- d. ablandiger Wind, Windstau < -25cm
- e. auflandiger Wind, Windstau >25cm

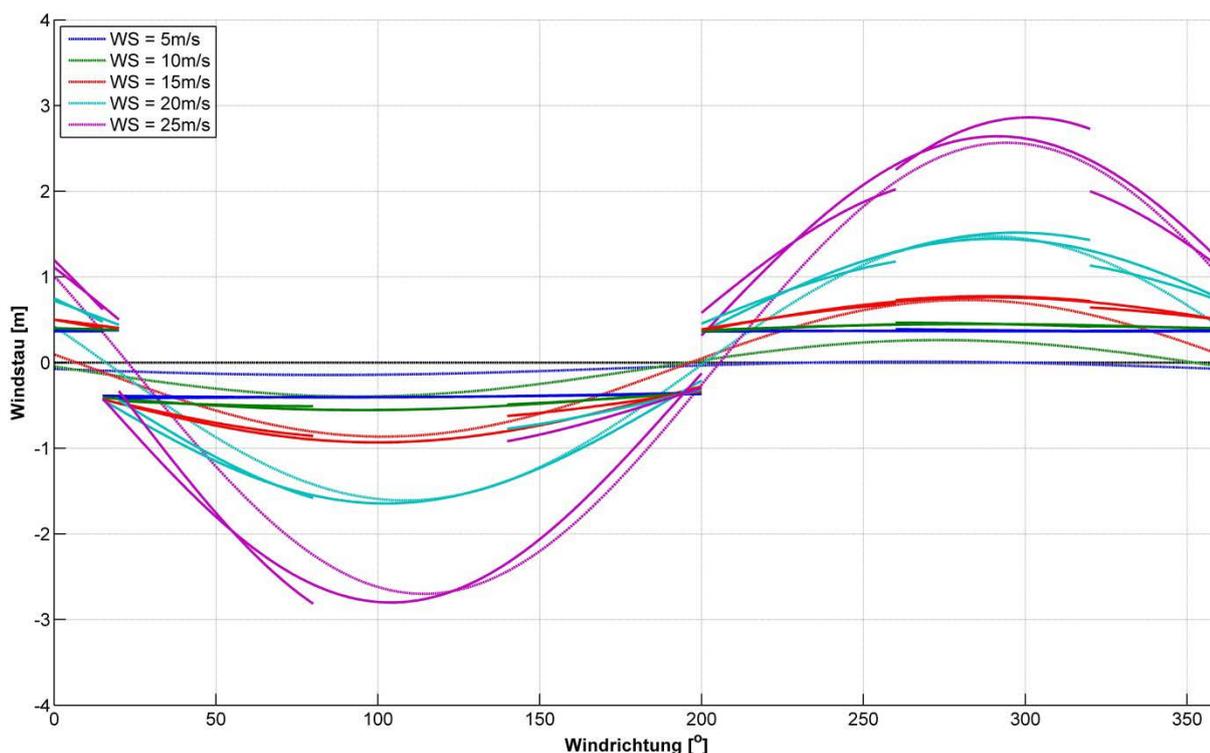
Exemplarisch sind in Abbildung 10 die Residuen zwischen berechnetem und gemessenem Stau für den Pegel Norderney sortiert nach Windrichtung bzw. Stauhöhe dargestellt.



**Abbildung 10: Vergleich der Regressionsberechnungen für den Pegel Norderney bei unterschiedlicher Gruppierung der Windrichtung und der Stauwerte, sortiert nach Windrichtung (oben) und Windstauhöhe (unten)**

Es wird deutlich, dass nur die Aufteilung in auf- und ablandigen Wind zu keiner wesentlichen Reduzierung der Residuen führt. Diese wird jedoch durch den Ausschluss der Daten mit sehr geringen Stauwerten, also dem Bereich zwischen -25 und +25cm, erreicht.

In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde der Wind nicht in ab- und auflandig unterteilt, sondern analog zu den bisher in der Vorhersage verwendeten Polynomansätzen in 6 Windklassen  $\alpha 60^\circ$ . Die Betrachtung der Residuen ergab jedoch keine signifikante Verbesserung im Vergleich zu der Einteilung nur in auf- und ablandigen Wind. Die Betrachtung theoretischer Staukurven auf Basis der für die Windrichtungsklassen ermittelten Regressionsgleichungen verdeutlicht das Problem der Sprünge an den Klassengrenzen (Abb. 11).



**Abbildung 11: Theoretische Windstaukurven für Norderney bei Aufteilung der Windmessungen in  $60^\circ$ -Windrichtungsklassen und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (WS)**

### 3.2. Beziehung zwischen Stau und modellierten meteorologischen Daten über der gesamten Nordsee

Auf Grundlage der vom DWD vorgenommenen Nachrechnungen vergangener Sturmfluten sollten empirische Übertragungsfunktionen für die Stauberechnung an den Pegeln Norderney, Alte Weser, Wangerooge West und Cuxhaven für die Vorhersage entwickelt werden. Dazu wurden Regressionsberechnungen zwischen den numerisch modellierten Winddaten (Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftdruck) und dem Stau an den Pegeln Norderney, Alte Weser, Wangerooge West und Cuxhaven durchgeführt. Die Regressionsrechnungen wurden zum einen nur für die Scheitelwerte der Wasserstandsmessungen (Tidehochwasser und -Niedrigwasser) und zum anderen, sofern verfügbar, für die komplette Ganglinie während der 42 Sturmtiden erstellt.

Als methodischer Ansatz wurde eine multiple lineare Regression zwischen den meteorologischen Daten und dem gemessenen Stau am jeweiligen Pegel angewendet, in Anlehnung an Annutsch (1978).

$$Stau = a_1 + a_2 * p + a_3 * dp + a_4 * WG^2 * \cos(WR) + a_5 * WG^2 * \sin(WR) + a_6 * WG^3 * \cos(WR) + a_7 * WG^3 * \sin(WR)$$

mit:

$a_i$	= Koeffizienten	[-]	$dp$	= Dreistündige Änderung des Luftdrucks	[hPa]
Stau	= berechneter Stau	[m]	WG	= Windgeschwindigkeit	[m/s]
$p$	= Luftdruck	[hPa]	WR	= Windrichtung	[°]

Im Fall der Regressionsberechnung für die Ganglinien kommt noch ein Term für die Mittlere Tidekurve als Eingangsparameter hinzu.

### 3.2.1. Auswahl und Verdichtung der Windeingangsdaten

Die hochauflösenden numerischen Wettermodelle des DWD erzeugen eine so große Menge an möglichen Eingangsdaten, dass für den gewählten relativ einfachen, empirischen Ansatz eine Reduktion und Verdichtung der eingehenden Winddaten notwendig wird. Hierzu wurden verschiedene Aspekte untersucht, z.B. aus welchen Bereichen über der Nordsee der Wind einen großen bzw. kleinen Einfluss auf den Stau an der Küste hat und welche verschiedenen räumlichen und zeitlichen Mittelbildungen des Windes zu einem optimierten Ergebnis führen. Es wurden weitere Tests zur Bestimmung des zeitlichen Versatzes zwischen Wind und Stau durchgeführt, sowie untersucht, ob Exklusion oder Wichtung einzelner Stauhöhenbereiche zu einer Verbesserung der Stauvorhersage führen. Und auch der Einfluss des Luftdrucks wurde betrachtet.

#### Aufteilung Winddaten

Die Winddaten wurden in zwei Datensätze aufgeteilt. Dabei diente einer der Berechnung der Regressionsgleichung (Trainingsdatensatz) und ein zweiter der Überprüfung (Validierungsdatensatz). Die verschiedenen 39 Sturmnachrechnungen werden jeweils als Ganzes dem einen oder anderen Datensatz zugeordnet. Es wurden durch Zufallsverteilung ca. 100 Aufteilungsmöglichkeiten erstellt. Für jede Aufteilung wurden 75% aller Daten zur Regressionsrechnung und 25% zur Validierung des so entstandenen Modells verwendet. Von den 100 Verteilungen wurde dann für alle weiteren Analysen eine ausgewählt, bei der in den Teildatensätzen (Trainingsdatensatz – Validierungsdatensatz) die Höheverteilung der zu den Ereignissen gehörenden Stauwerte ähnlich war. Dadurch sollte vermieden werden, dass durch einen unglücklichen Zufall sich z.B. alle sehr schweren Sturmfluten im Validierungsdatensatz befinden und im Trainingsdatensatz überwiegend die leichten.

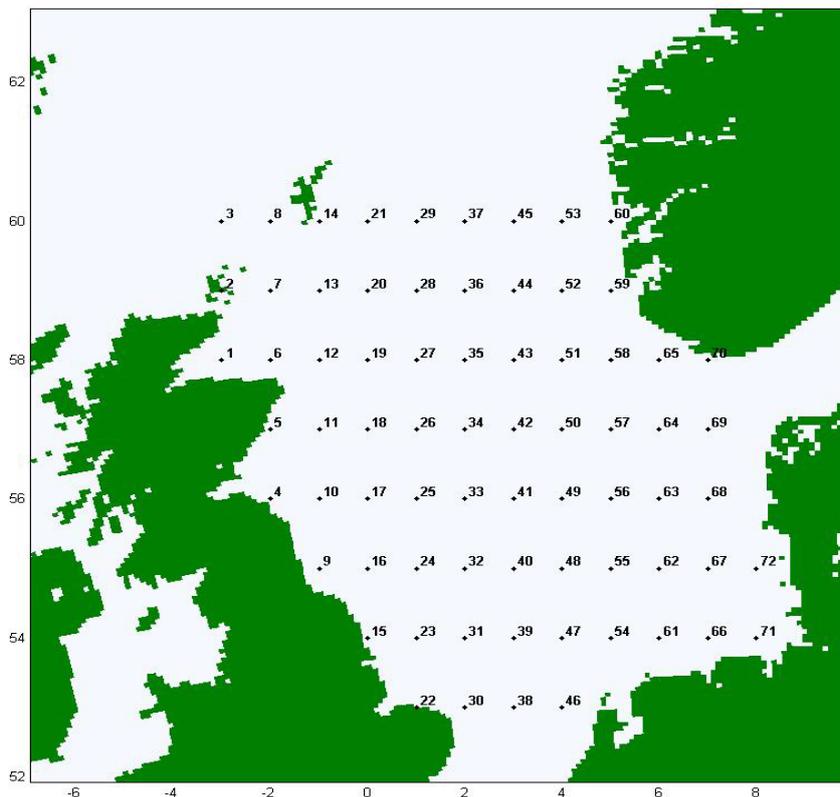
#### Auswahl Windausgabepunkte (auf numerischem Gitter)

Derzeit werden für die empirischen Wasserstandvorhersagen des NLWKN nur Windprognosen an einigen ausgewählten Punkten im Bereich der Deutschen Bucht bis etwa 55,7°N berücksichtigt (Abb. 8). Aber auch Sturmereignisse im Bereich der nördlichen Nordsee, die im Vorfeld der deutschen Küste nur relativ geringe Windgeschwindigkeiten aufweisen, können zu deutlich erhöhten Wasserständen an der Küste führen, wie z. B. einige Stürme im Sommer/Herbst 2007 zeigten. Solche Ereignisse erfordern eine Ausweitung des empirischen Verfahrens auf in die nördliche Nordsee positionierte Winddaten.

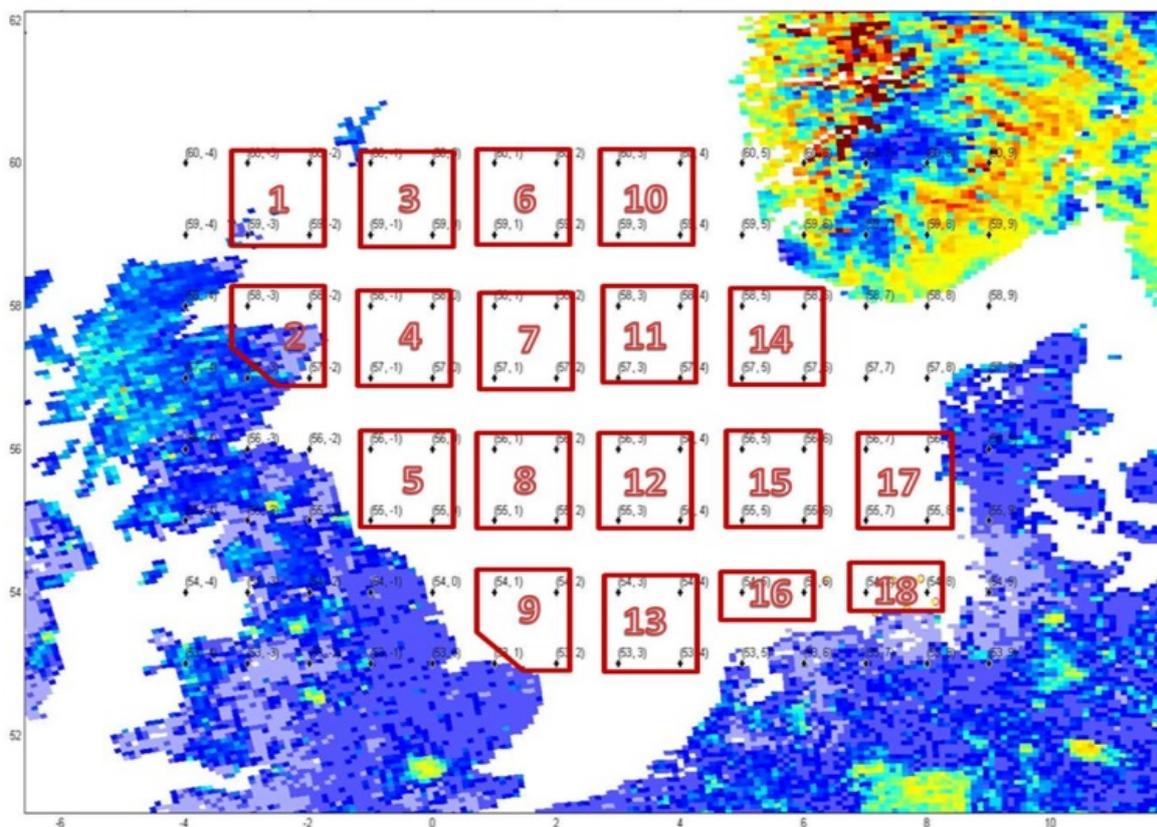
Die Daten des COSMO-EU-Modells decken die gesamte Nordsee ab, somit konnte diese erstmals als Gesamtes untersucht werden. Es wurden die eigentlich deutlich höher aufgelöst vorliegenden Wind- und Luftdruckdaten mit einem Gitterabstand von 1 Grad ausgelesen (Abb. 13), Punkte über Land wurden dabei nicht berücksichtigt. Weiterhin wurde der Wind an den 8 Positionen in der Deutschen Bucht, die die aktuelle Vorhersage benutzt (siehe Abb. 8), mit einbezogen. An

jedem dieser Punkte liegen die Daten für alle Sturmtiden als Zeitreihe vor, insgesamt 4287 Zeitschritte.

Da für jeden Windpunkt 4 Variablen –Windgeschwindigkeit zum Quadrat und Kubik, jeweils mit dem Sinus und Cosinus der Windrichtung verknüpft - in die Rechnung eingehen, ist die Regression aus allen diesen allerdings schon reduzierten Windpunkten sehr zweitaufwendig, die außerdem zur Überbestimmung des Systems neigt. Daher werden jeweils 2 bis 4 Windpunkte zu einem Gebiet zusammengefasst (Abb. 13), dies führt auch zur Eliminierung kleinräumiger „Ausreißer“ einzelner Werte. Der jeweilige Windwert wird durch Mittelwertbildung der umgebenden Ausgabepunkte bestimmt. Es ergeben sich insgesamt 18 gemittelte Gebiete.



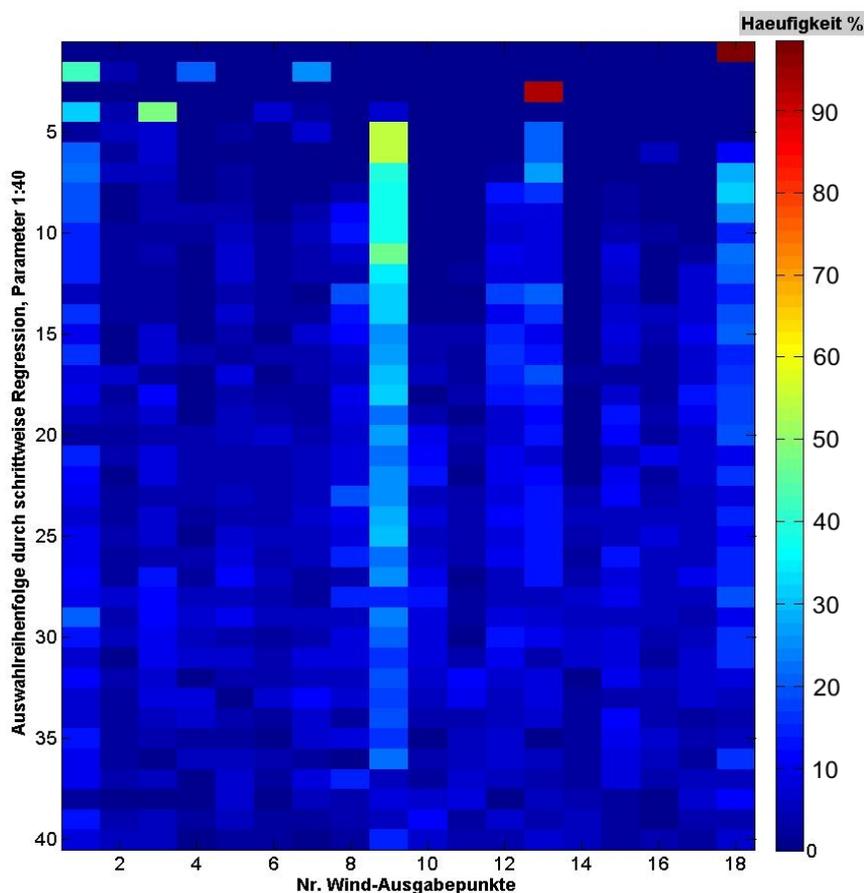
**Abbildung 12: Ausgewählte Windpunkte über der Nordsee, extrahiert aus den DWD- Windfeldern der COSMO-EU Modellierung (1 Grad Gitter)**



**Abbildung 13: 18 Windvorhersagegebiete für die ein Mittelwind der eingeschlossenen Ausgabepunkte gebildet wird**

Mithilfe der Matlab-Statistik-Toolbox wurden lineare Regressionen mit den 39 Sturmnachrechnungen als Input Parameter gerechnet. Allen liegt der genannte trigonometrische Grundansatz nach Annusch (1978) zu Grunde. Es wurden sowohl eine normale lineare Regression durchgeführt als auch eine stufenweise Regression (stepwisefit), bei der das Modell schrittweise den jeweils wichtigsten Koeffizienten auswählt, bzw. weniger wichtige auch wieder aus der Regression heraus nimmt. Darüber hinaus untersucht dieses Verfahren auch den Einsatz von miteinander multiplizierten Variablen. Im Allgemeinen sind die Ergebnisse der stepwisefit-Rechnungen etwas besser.

Beim stepwisefit- Modell wird der Wind in jedem der 18 gemittelten Gebiete in die lineare Regression einbezogen und dann die mit dem größten Einfluss auf den Stau am Zielpegel ausgewählt. Dieses Verfahren wurde wiederholt für verschiedene Verteilungen der Winddaten auf Trainings- und Validierungsdaten angewendet, so dass sich aus der Reihenfolge und Häufigkeit der Auswahl die Relevanz der einzelnen Gebiete für die Stauberechnungen ermitteln lässt. In Abbildung 14 sind die Windgebiete (siehe Abb. 13) gegen die Auswahlreihenfolge und farblich codiert die Häufigkeit der Auswahl dargestellt. In allen Läufen wird zunächst Gebiet 18 als das Gebiet mit dem größten Einfluss gewählt. Gebiet 18 deckt räumlich die Deutschen Bucht ab, der lokale Windeffekt ist also der dominierende bei der Stauberechnung an der niedersächsischen Küste und wurde bei dem bisherigen Vorhersageverfahren ausschließlich berücksichtigt. Als zweites wichtiges Gebiet wird fast immer eins in der nördlichen Nordsee gewählt, zumeist Gebiet 1, 4 oder 7. Danach ist fast immer Gebiet 13 ausgesucht worden, welches vor der holländischen Küste und dem Kanal liegt. An vierter Stelle ist wieder ein Gebiet im Norden gewählt, zumeist Gebiet 3 oder 1.



**Abbildung 14: Häufigkeit und Reihenfolge mit der die 18 Windgebiete während einer Stepwisefit- Regression gewählt wurden**

Weiterhin fällt auf, das Gebiet 9 vor der Küste Norfolks sehr häufig in den Rechnungen auftaucht, gefolgt von den Punkten 1, 13 und 18. Die nordöstlichen Gebiete (10, 11, 14) spielen nur eine untergeordnete Rolle. Betrachtet man die räumliche Lage der Gebiete, verwundert die Auswahl nicht. Gebiet 9 und die ebenfalls recht häufig in den stepwisefit-Regressionen verwendeten Gebiete bilden quasi den Beginn der Windwirklänge auf die Deutsche Bucht, der der natürlichen Wasserbewegung in Form der Tidewelle folgt. Entsprechend verstärken sich die beiden Effekte Tide und Windstau, ohne dass Kräfte gegenwirken. Daher kann selbst eine kleine Änderung des Windes in diesem Bereich zu einer signifikanten Änderung des Staus in der Deutschen Bucht führen.

Die Punkte 1 und 3, die ebenfalls recht häufig vorkommen, geben den Wind am Eingang der Nordsee wieder. Sie bestimmen damit die generelle „Füllung“ der Nordsee. Dabei ist vor allem die Region zwischen Nordschottland und den Shetland Inseln von Bedeutung, während der „offene“ Eingang der Nordsee (Gebiet 6) kaum gewählt wird. Auch die geringe Bedeutung der Bereiche 11 und 14 ist erklärbar, da sie geschützt vor der norwegischen Küste liegen und damit keine Auswirkung auf den Windstau in der Deutschen Bucht haben.

Vereinfacht lässt sich die Häufigkeit und Reihenfolge der Gebiete in der Auswahl des stepwisefit-Verfahren so interpretieren, dass der Bereich 9 vor Norfolk zwar sehr häufig für die „Verfeinerung“ der Werte herangezogen wird, die Haupteinwirkung für den Windstau jedoch aus den Bereichen 18 („lokaler Windstau“), 1 und 3 („Fernwirkung“) und 13 („vorgelagerter Windstau“) getroffen wird. Für die Optimierung der empirischen Sturmflutvorhersage ist es somit sinnvoll, die lokalen Effekte in der Deutschen Bucht genauer zu betrachten, weiterhin das Gebiet der Nord(west)lichen Nordsee mit einzubeziehen und den Wind zwischen Südostengland und Westholland zu berücksichtigen.

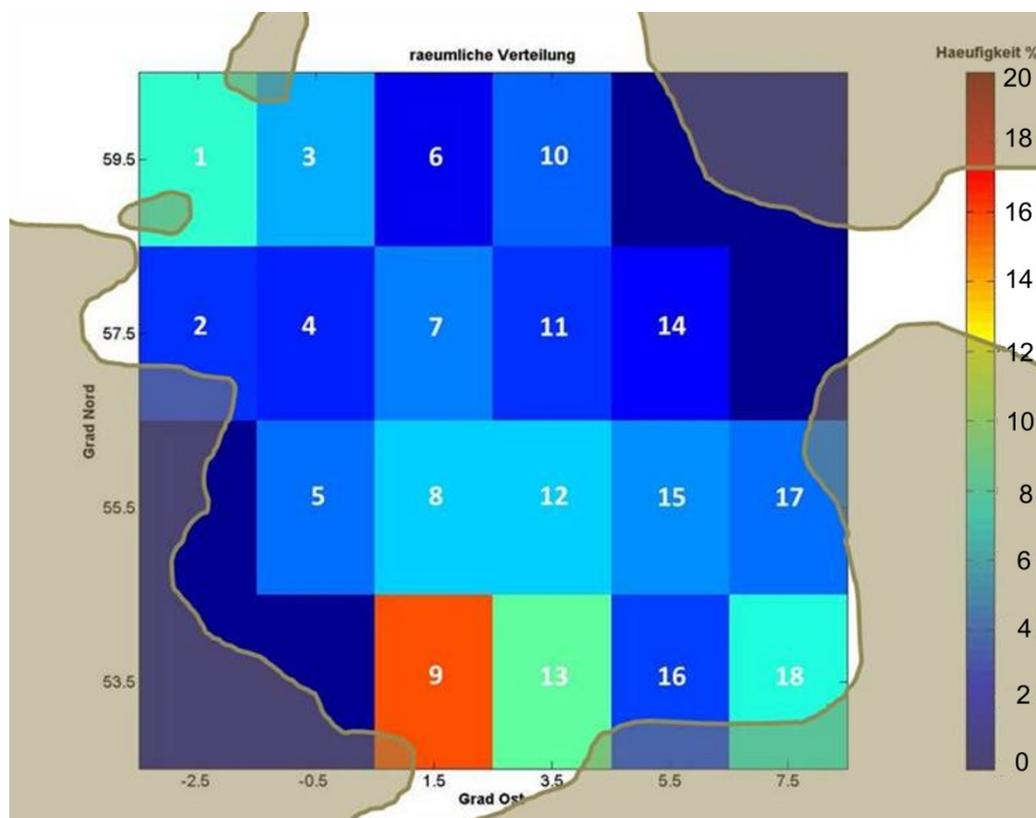
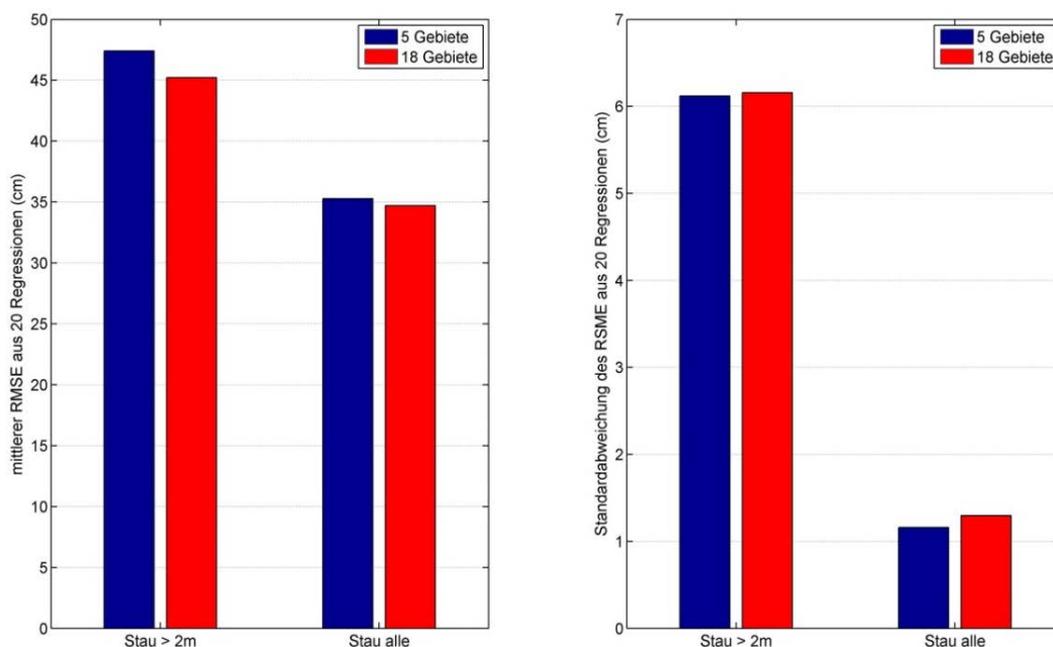


Abbildung 15: Häufigkeit mit der die 18 Windgebiete während der Stepwisefit-Regression verwendet wurden

Da obige Versuche nahelegten, dass die Berechnungen des Staus auch mit reduzierter Eingabegibietsanzahl erfolgreich ausgeführt werden kann, wurden vergleichsweise ein Ansatz mit allen 18 Gebieten und einer mit nur 5 Windbereichen betrieben (Bereiche 1, 3, 9, 13, 18) und die Unterschiede der Ergebnisse betrachtet. Insgesamt wurden mit 20 Trainings- und Validierungsdatensätze gerechnet. Für die Auswertung wurde der mittlere RMSE der 20 Durchgänge und die Standardabweichung des mittleren Fehlers betrachtet, dabei wurden zusätzlich die Datensätze mit Stauwerten über 2 m gesondert ausgewiesen (Abb. 15).



**Abbildung 16: Vergleich der Streuung der Staurechnungen für Norderney aus 20 Regressionen (StepwiseFit) unter Berücksichtigung von 5 oder 18 Windeingabe-Gebieten über der Nordsee**

Dabei zeigte sich, dass der Unterschied der Ergebnisse zwischen 5 und 18-Windeingabe-Gebieten relativ gering ist, der mittlere Fehler mit 5 Windbereichen ist geringfügig höher, die Standardabweichung hingegen eher etwas niedriger. Bei der Betrachtung der Sturmflutfälle ergeben sich etwas größere Unterschiede, dies kann durch die wenigen Daten in diesem Bereich begründet werden. Je nach Verteilung der Daten auf Trainings- und Validierungssatz kann es dadurch zu deutlich unterschiedlichen Regressionen kommen. Erwartungsgemäß waren die Zahlen für die hier nicht dargestellten Trainingsdaten besser als die Validierungsdatensätze, die Werte für alle Wasserstände besser als nur die der Sturmtiden. Daraus folgt, dass die Verwendung von 5 Gebieten nur zu einer sehr geringen Informationseinbuße führt, das Verfahren jedoch durch die Reduzierung erheblich vereinfacht wird. Daher wurden für das weitere Vorgehen in der Vorhersage die Gebiete 18 (bereits durch die bisher verwendeten acht Windpunkte berücksichtigt) 13, 1, 3 und 9 verwendet.

## Zeitlicher Versatz zwischen Wind und Stau

Die Auslenkung des Wasserstandes als Reaktion auf den Wind erfolgt nicht zeitlich unmittelbar. Der Wind muss eine gewisse Zeit auf die Wasseroberfläche einwirken, um eine entsprechende Wasserstandserhöhung zu erzeugen. Weiterhin vergeht eine gewisse Zeitspanne, bevor der Einfluss des Windes auf die Wassermassen in einem entfernteren Gebiet einen beobachteten Zielpegel erreicht. Somit ergibt sich ein zeitlicher Versatz zwischen dem gemessenen Wind und dem erzeugten Stau am Zielpegel. Im Allgemeinen kann man vom Wind induzierte großräumige Wasserstandsänderungen als langwellige Phänomene betrachten und deren Fortschrittsgeschwindigkeit ist im Wesentlichen von der Wassertiefe abhängig:

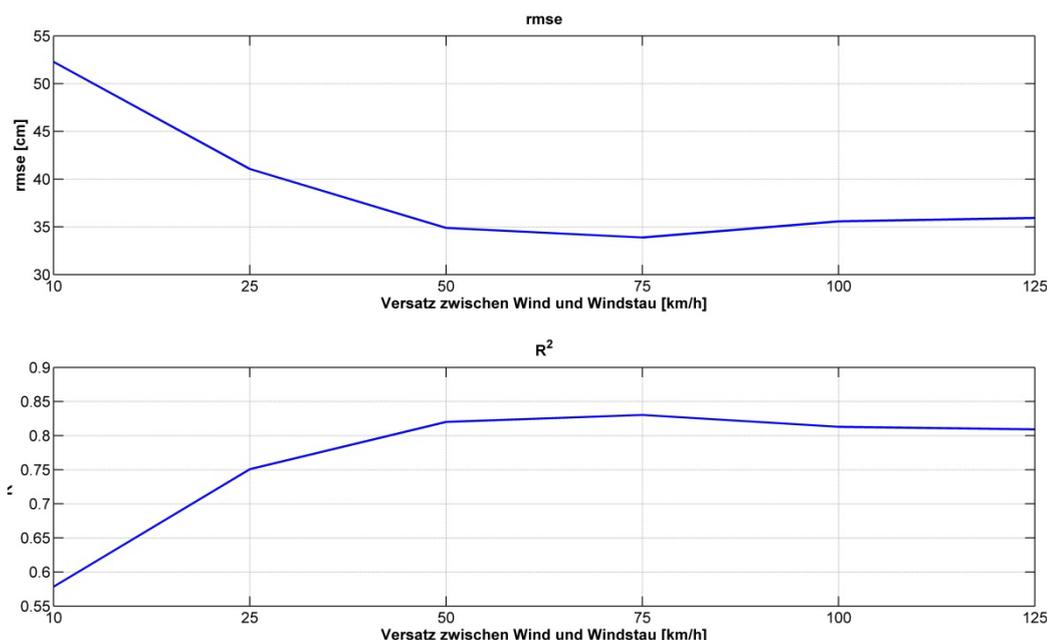
$$c = \sqrt{(g * d)}$$

mit:

- c = Wellengeschwindigkeit [m/s]
- g = Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]
- d = Wassertiefe [m]

Bei einer mittleren Tiefe der nördlichen Nordsee von etwa 100 Metern hieße das eine Geschwindigkeit von gut 30m/s, also etwa 100km/h, bei einer Tiefe von 35m, wie sie in der südlichen Nordsee vorherrscht beträgt die Geschwindigkeit knapp 20 m/s, etwa 70 km/h.

Die für die Regressionsrechnungen verwendeten oben beschriebenen Gebiete 1, 3, 9, 13 und 18 haben sehr unterschiedliche Entfernungen zur niedersächsischen Küste. Dies bedeutet, dass der zeitgleich modellierte Wind in einem entfernteren Gebiet später eine Stauwirkung an der niedersächsischen Küste erzeugt als ein vergleichsweise nahes Gebiet. Daher muss ein zeitlicher Versatz in die Stauberechnung implementiert werden, um die unterschiedlichen Entfernungen zum Zielpegel zu berücksichtigen. Zur Vereinfachung der Rechnung wird ein linearer Term gesucht, bei dem sich der Versatz aus der räumlichen Differenz zwischen Windgebiet und Pegel ergibt. Dazu wurde der direkte Abstand zwischen dem Zielpegel (Norderney) und dem jeweiligen Windgebiet bestimmt und je nach vorgegebenen Versatz dann der Zeitvektor des Windbereiches vordatiert, sodass er nicht mehr den Auftritt des Windes an dem jeweiligen Punkt angibt, sondern den geschätzten Eintritt der Windwirkung am Zielpegel. Um die optimale Rate des Zeitversatzes zu be-



**Abbildung 17 RMSE (oben) und Bestimmtheitsmaß (unten) für die Regressionsergebnisse bei variiertem zeitlichem Versatz zwischen Wind und Stau**

stimmen, wurden unterschiedliche Zeitdifferenzen zwischen Wind und Stau angesetzt und RMSE und Bestimmtheitsmaß verglichen (Abb. 17). Es ergibt sich eine optimale Versatzrate im Bereich von 1 Stunde Verzug je 75 km Abstand. Dieser Wert wird unter dem Aspekt der Einfachheit für alle Rechnungen verwendet. Die Größe dieser zeitlichen Versatzrate deckt sich grob mit der oben erläuterten Theorie für Flachwasserwellen.

In diesem Zusammenhang wurden auch, wie weiter oben für die Voruntersuchungen mit Windmesswerten beschrieben, Tests zur zeitlichen Mittelungen der Winddaten durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass durch eine zeitliche Mittelung über 3 Stunden die Stauergebnisse stabilisiert werden und weniger sprunghafte Veränderungen aufweisen, da durch die Mittelungen kurzfristige und streng lokale Effekte eliminiert werden, die in der Natur von ihrer zeitlichen Dauer nicht ausreichen, um einen Effekt auf die träge Masse Wasser zu haben.

### Luftdruck

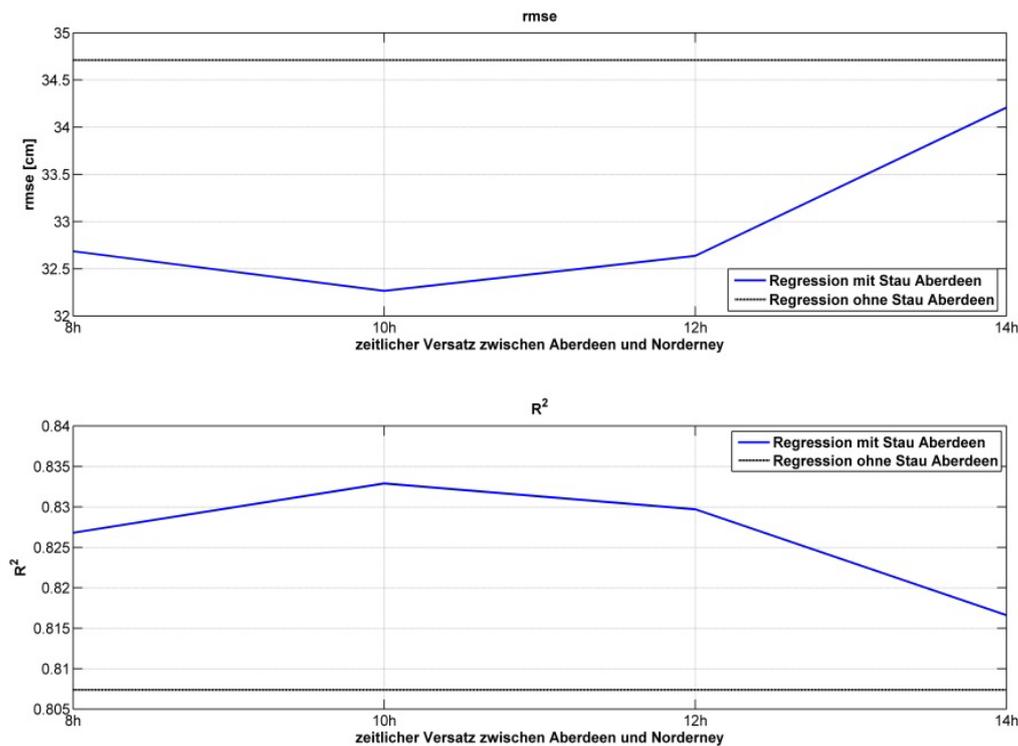
Neben Windgeschwindigkeit und Windrichtung hat auch der Luftdruck einen Einfluss auf den gemessenen Stau (z.B. Schmitz 1978). Zum einen wirkt der Luftdruck direkt auf die Wassersäule ein und führt so, je nachdem ob der aktuelle Luftdruck über oder unter dem mittleren Luftdruck liegt, zu einer Senkung oder einer Hebung der Wasserfläche. Als grobe Faustformel gilt, dass ein Luftdruckunterschied von 1hPa zum Standarddruck von 1013hPa zu einer Änderung von 1 cm Wasserstand führt. Zum anderen hat auch die zeitliche Änderung des Luftdrucks einen Einfluss auf den Wasserstand. Daher wurde in den Regressionsberechnungen der Luftdruck an einer Position in der Deutschen Bucht ca. 70 km nördlich von Norderney direkt als Wert sowie als Gradient über drei Stunden in die Regressionsformel integriert.

Generell führt die Berücksichtigung des Luftdrucks in den Regressionsformeln zu einer Verbesserung der Ergebnisse. Der Einfluss des Luftdrucks wie hier schematisiert, ist jedoch deutlich niedriger als erwartet. Nach der Faustregel wären Änderungen im Bereich von ca. 20 bis 30 cm zu erwarten, tatsächlich lag in diesen Untersuchungen der Einfluss auf den Wasserstand bei nur wenigen Zentimetern. Eine Erklärung hierfür könnte wieder in der relativ homogenen Verteilung der Daten liegen. Da überwiegend Sturmflutsituationen untersucht werden, also Wetterereignisse, die bei niedrigem Luftdruck stattfinden, wurde nicht über die gesamte mögliche Bandbreite an Luftdrücken analysiert werden. Zum anderen ist der Luftdruck nicht unabhängig von Windrichtung und -geschwindigkeit, und somit der Einfluss des Luftdrucks also implizit schon in den Windtermen mit erfasst.

### Ferneinwirkungen aus dem NO-Atlantik

Der erzeugte Stau während einiger Sturmfluten kann einen Anteil enthalten, der nicht durch den Wind in der Nordsee zu erklären ist, sondern aus Wasserstandsänderungen im Übergangsbereich der Nordsee zum Nordatlantik resultiert. Diese Ferneinwirkungen folgen häufig dem Weg der Tiden, laufen also im Nordwesten in die Nordsee ein, folgen der schottischen und englischen Küste nach Süden, wo sie dann entlang der niederländischen Küste und dann der deutschen Küste verlaufen (z.B. Gönnert 2003). Als potenzielle Anzeiger für solche Einwirkungen aus dem Übergangsbereich zum Atlantik können beobachtete Wasserstandsänderungen britischen Nordsee-Pegel verwendet werden. Da bei Sturmflutvorhersagen ein möglichst großer Vorlauf wichtig ist, wurde der Stau am weit entfernt liegenden Pegel Aberdeen verwendet, zumal für diesen Pegel eine lange Messreihe an Wasserstandsdaten zur Verfügung steht.

Wie beim Wind ist auch bei der Berücksichtigung des Staus am Pegel Aberdeen für die Staube-  
 rechnung an der niedersächsischen Küste ein zeitlicher Versatz zu berücksichtigen. Eine zeitliche  
 Differenz von 10 bis 12 Stunden zwischen dem Stau in Aberdeen und dem in Norderney ergab  
 das beste Resultat (Abb. 18). Dies deckt sich in etwa mit den Ergebnissen von Gönner (2003).  
 Die Hinzunahme des Staus in Aberdeen in die Regressionsrechnungen führte bei dem verwen-  
 deten Datensatz zu einer Verbesserung der Ergebnisse von etwa 2% und zeigt im Mittel somit ei-  
 nen relativ geringen Einfluss. Die Problematik der Ferneinwirkung lässt sich daraus folgend nicht  
 über solch eine mittelnde Betrachtung fassen, sondern erfordert eine Betrachtung der Einzeler-  
 eignisse. In der operationellen Praxis der Sturmflutvorhersage ist das dann jedoch schwierig an-  
 wendbar.



**Abbildung 18: Einfluss des zeitlichen Versatzes zwischen dem Stau in Aberdeen und dem Stau in Norderney auf die Regressionsberechnung**

### 3.2.2. Regressionsrechnung für die Pegel direkt an der See

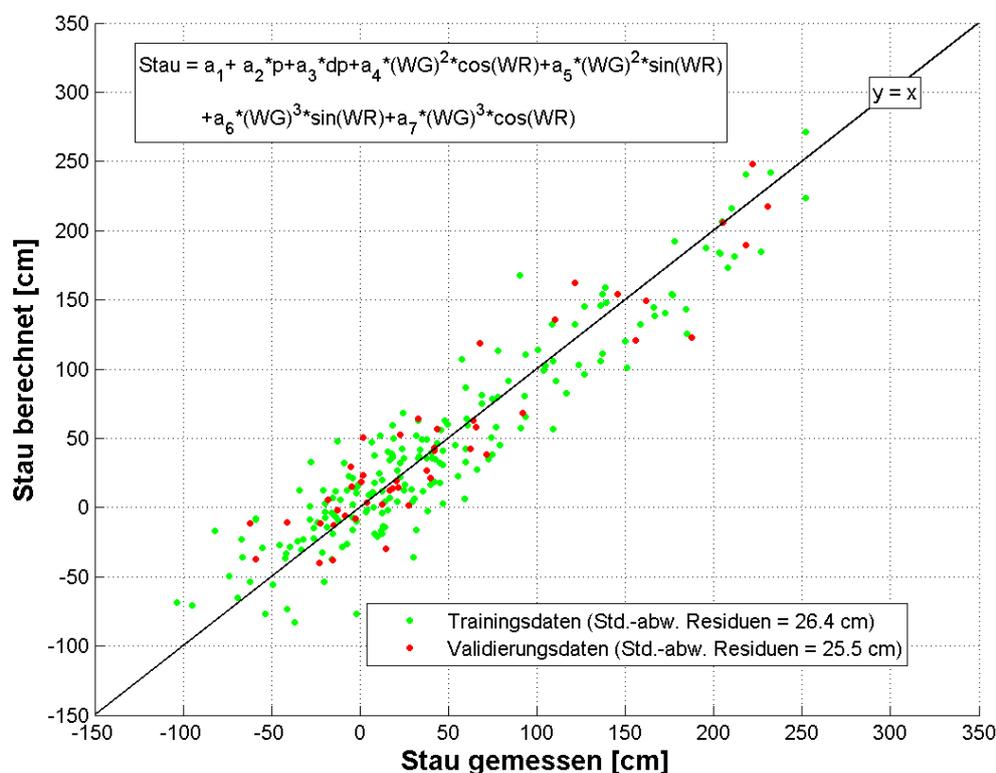
Anhand der vorab beschriebenen Auswahl an Eingangsdaten wurden lineare Regressionsbeziehung zwischen den meteorologischen Daten über der Nordsee und dem Stau an den Pegeln Norderney, Cuxhaven, Wangerooge West und Leuchtturm Alte Weser ermittelt. Die beiden letztgenannten Stationen werden in der Vorhersage des NLWKN nicht direkt verwendet sondern nur als „Stützstelle“ für die Vorhersagen in Bremerhaven und Wilhelmshaven. Die Regressionsberechnungen wurden jeweils getrennt zum einen nur für die Scheitelwerte (Hochwasser und Niedrigwasser) und zum anderen für die komplette Ganglinie berechnet, für Wangerooge West nur für die die Scheitelwerte, da für eine Betrachtung der Ganglinie an diesem Pegel nicht genügend Daten vorlagen. Exemplarisch werden die Ergebnisse für den Pegel Norderney dargestellt, für die anderen sind die Ergebnisse ähnlich, die Grafiken sind im Anhang zu finden.

Die Regressionsberechnungen für die Hochwasserscheitelwerte (Abb. 19) zeigen ein etwas besseres Ergebnis als die Berechnungen für die gesamte Ganglinie (Abb. 21). Bei letzterer wird die Beziehung Meteorologie – Stau durch weitere Faktoren wie Gradienten des Wasserstandes, veränderliche Wassertiefe stärker beeinflusst, so dass die Streubreite der Werte etwas zunimmt. Der

mittlere absolute Betrag der Residuen (als RMSE ausgedrückt) liegt in einer Größenordnung von ca. 30 cm. Insbesondere bei den Hochwasserscheitelwerten sind die Abweichungen im eigentlich interessierenden Bereich der höheren Stauwerte relativ gering (Abb. 19). Für die spätere Anwendung im operationellen Sturmflutwarndienst wird daher sowohl eine Berechnung auf Basis der Ganglinie vorgenommen um den Verlauf einer Sturmflut abschätzen zu können zum anderen wird der Ansatz nur für die Scheitelwerte übernommen. Die Betrachtung der Niedrigwasserscheitelwerte (Abb. 20) ist zwar für die Sturmflutvorhersage unbedeutend aber Vorhersagen zur Höhe des Niedrigwassers werden bei anderen Fragestellungen, z.B. bei der Planung von Schiffsüberführungen über die Ems benötigt.

**Tabelle 5: Ergebnisse der Regressionsrechnungen zwischen gemessenem Stau und meteorologische Daten für den Validierungsdatensatz**

Startpegel		RSME [cm] Validierungsdatensatz
Norderney	HW	25,3
	NW	36,6
	Ganglinie	29,0
Alte Weser	HW	25,2
	NW	37,0
	Ganglinie	28,1
Cuxhaven	HW	31,1
	NW	34,2
	Ganglinie	29,6
Wangerooge West	HW	26,2
	NW	34,9



**Abbildung 19: Gemessener gegen berechneter Stau für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Norderney**

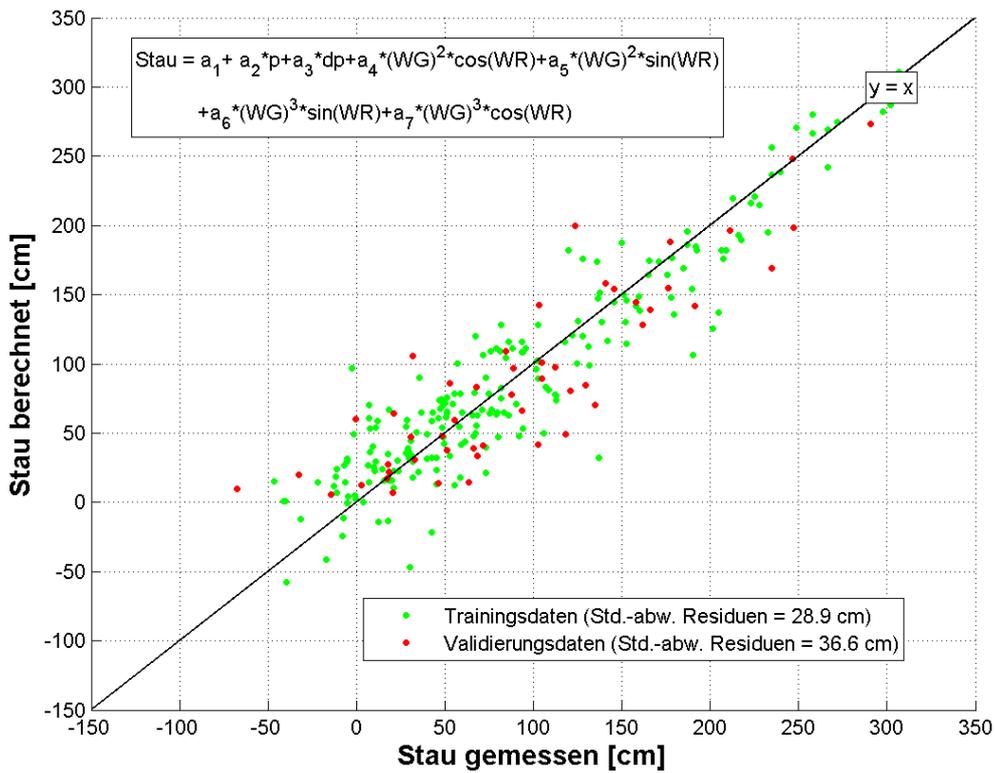


Abbildung 20: Gemessener gegen berechneter Stau für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Norderney

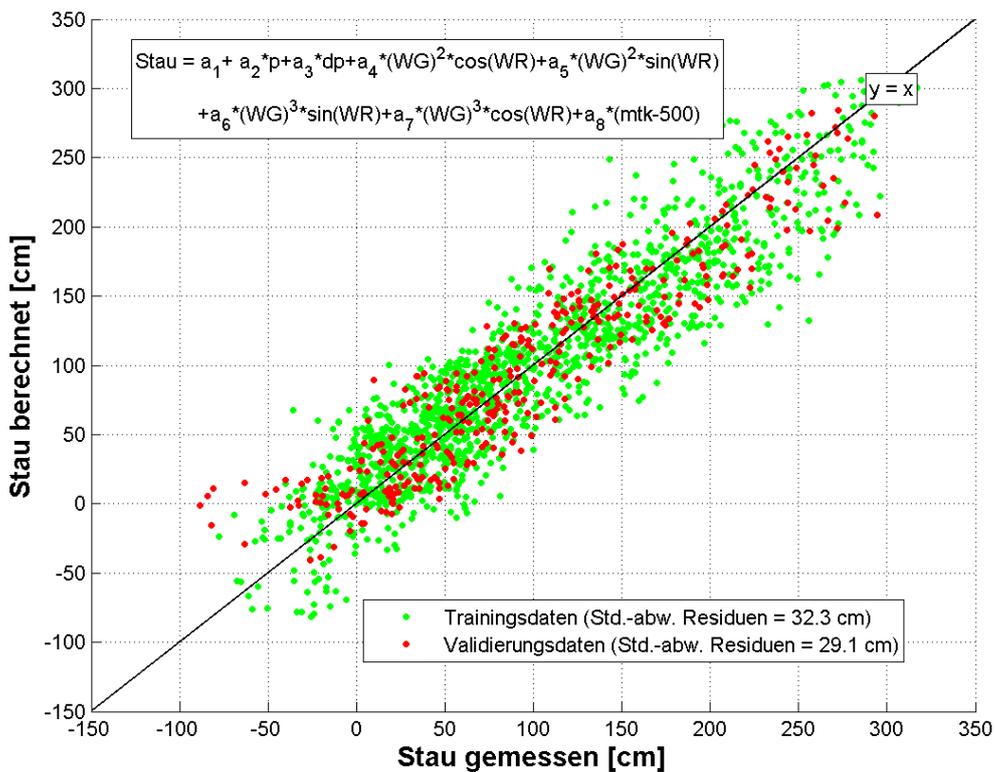


Abbildung 21: Gemessener gegen berechneter Stau für gesamte Ganglinie am Pegel Norderney

### 3.3. Staubeziehung für Pegel in den Ästuaren

Der Stau an Pegeln, die weniger exponiert liegen als die in Abschnitt 3.2 präsentierten, kann nicht direkt aus den Winddaten über der Nordsee abgeleitet werden. Buchteneffekte und lokale Windverhältnisse verändern den Stauverlauf dieser Pegel individuell. Daher wird eine Hochrechnung des Staus an einem vorgelagerten Pegel unter Berücksichtigung lokaler Winddaten angewendet:

$$\text{Stau}_{\text{start}} + \text{Wind} \rightarrow \text{Stau}_{\text{ziel}}$$

Explizit wird die Stauvorhersage an den Pegeln Bensorsiel (nicht in einem Ästuar aber abgeschirmt liegend), Bremerhaven und Emden optimiert und das Vorhersagenetz um den Pegel Wilhelmshaven verdichtet. Für die weitere Analyse werden die Begriffe Startpegel (vorgelagerter Pegel) und Zielpegel (Ästuarpegel) verwendet.

Der Vergleich des gemessenen Staus an beiden Pegeln liefert einen ersten Hinweis darauf, wie gut die Korrelation zwischen den Pegeln grundsätzlich ist. Um die Beziehung zu verfeinern, werden die lokalen Windverhältnisse im Bereich des Startpegels (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) über einen linearen Regressionsansatz berücksichtigt. Die Regressionsbeziehung wird für den Zeitpunkt der Scheitelwerte (Hochwasser und Niedrigwasser) und im Fall Norderney-Emden auch für die Ganglinie erstellt.

Die bereits oben genannte Regressionsgleichung in Anlehnung an Annutsch (1978) wird dabei um zwei Terme für den Stau am Vorlaufpegel und dessen Quadrat erweitert:

$$\text{Stau}_{\text{ziel}} = a_1 + a_2 * \text{Stau}_{\text{start}} + a_3 * \text{Stau}_{\text{start}}^2 + a_4 * \text{WG} * \sin(\text{WR}) + a_5 * \text{WG} * \cos(\text{WR}) + a_6 * \text{WG}^2 * \sin(\text{WR}) + a_7 * \text{WG}^2 * \cos(\text{WR})$$

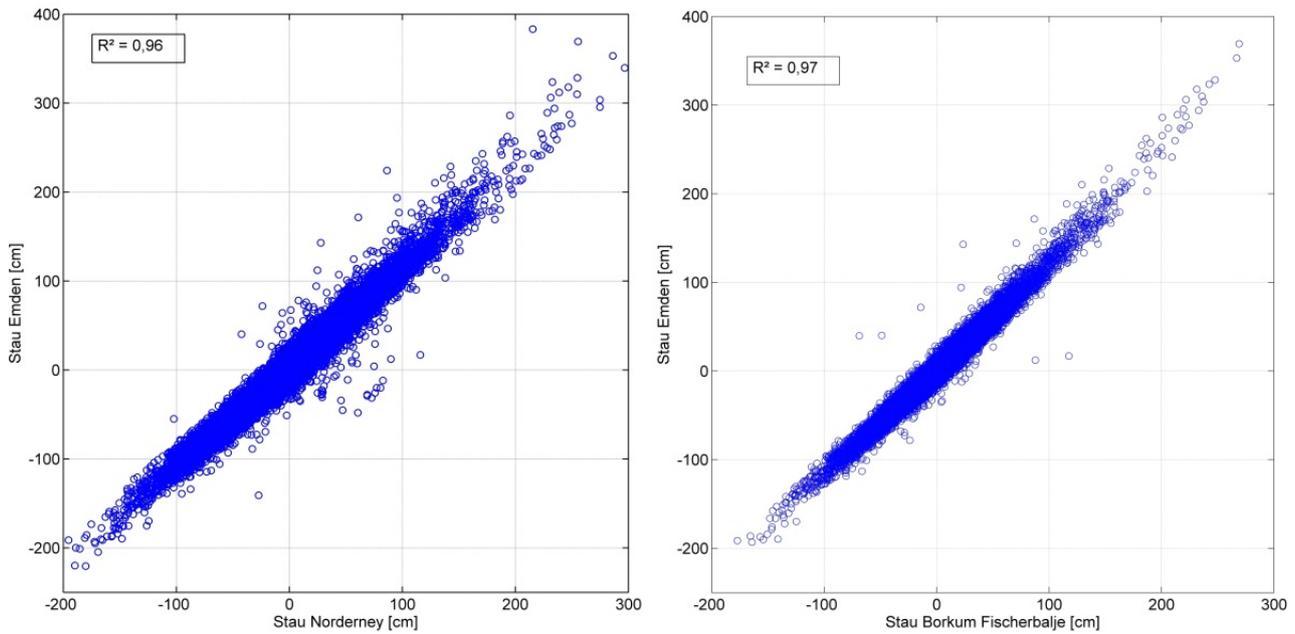
Mit:

$a_i$	= Koeffizienten	[-]	WG	= Windgeschwindigkeit	[m/s]
$\text{Stau}_{\text{start/Ziel}}$	= Stau am Startpegel oder Zielpegel	[m]	WR	= Windrichtung	[°]

Als Eingangsdatensätze konnten für diese Untersuchung nicht nur die Daten aus den 39 modellierten Sturmflutzeiträumen genutzt werden, sondern ergänzend auch Ereignisse außerhalb dieser Zeiträume, für die aber lokal gemessene Winddaten vorlagen, da bei diesem Ansatz nicht das komplette Windfeld über der Nordsee benötigt wurde.

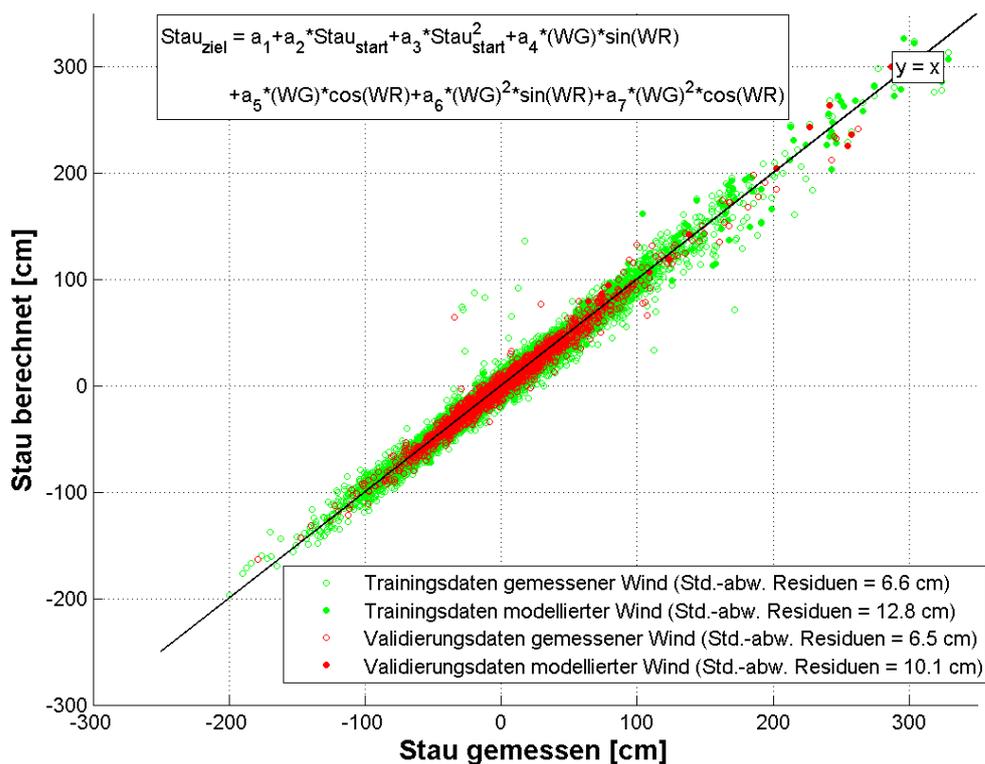
#### 3.3.1. Emden

Für die Stauvorhersage für Emden kommen als Startpegel aufgrund der räumlichen Lage die Pegel Borkum und Norderney in Betracht. Von beiden Startpegeln wurde vergleichsweise eine Regression nach Emden ohne Berücksichtigung des Windes berechnet (Abb. 22). Der statistische Zusammenhang zwischen dem Stau in Emden und auf Norderney bzw. Borkum ist relativ stramm mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2=0,96$  bzw.  $0,97$ . Dass Norderney eine leicht bessere Korrelation zu Emden aufweist, überrascht, da Borkum und Emden beide zu einem Tidesystem, dem der Ems, gehören während Norderney in einem anderen Tidebecken liegt.



**Abbildung 22: Gemessener Stau Norderney (links) und Borkum (rechts) gegen gemessenen Stau Emden für Hochwasserscheitelwerte**

Borkum / Norderney → Emden: Regression der Hochwasserscheitel

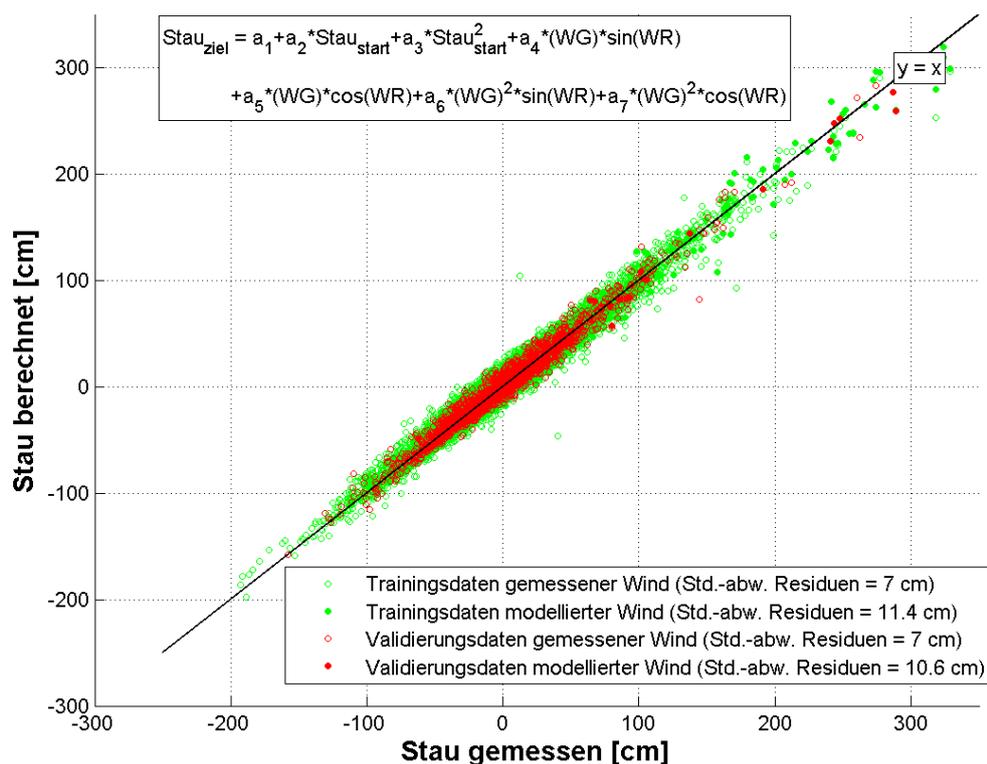


**Abbildung 23: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Norderney**

Die Regression der Hochwasserscheitelwerte mit Startpegel Norderney und unter Verwendung der gemessenen Winddaten, ergibt eine Standardabweichung der Residuen für den Trainingsdatensatz von 6,6 cm und für den Validierungsdatensatz von 6,5 cm und somit eine relativ geringe Streuung (Abb. 23). Für die Regression mit den numerisch modellierten Winddaten für die 39 Zeiträume liegt die Standardabweichung bei 12,8 cm für den Trainingsdatensatz und

10,1 cm für den Validierungsdatensatz, d.h. die Berechnungen mit dem gemessenen Wind liefern eine geringere Streuung der Daten. Dies hängt unter anderem damit zusammen, dass für den gemessenen Wind wesentlich mehr Datensätze zur Verfügung stehen, insbesondere in dem Bereich mit geringen Stauhöhen, in dem der Wind eine geringere Rolle spielt und der Zusammenhang im Wesentlichen durch die Astronomie dominiert wird.

Die gleichen Berechnungen mit dem Startpegel Borkum und ebenfalls unter Verwendung der Windmessungen auf Norderney (der Windmesser auf Borkum ist auf Grund seiner Lage und der resultierenden starken Beeinflussungen durch Bebauung etc. weniger für solche Untersuchungen geeignet) zeigen ähnliche Ergebnisse mit etwas höheren Standardabweichungen der Residuen (Abb. 24).



**Abbildung 24: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Borkum Fischerbalje**

Die zusätzliche Verwendung lokaler Windverhältnisse am Startpegel führt zu einer Verbesserung der Regressionsergebnisse. Auf Grund der etwas geringeren Streuung wird für die Vorhersage der Vorlaufpegel Norderney, obwohl nicht an der Ems liegend, weiterverwendet.

Borkum / Norderney → Emden: Regression der Niedrigwasserscheitel

Analog zu den Hochwasserscheiteln wurden auch für die Niedrigwasser entsprechende Regressionsberechnungen mit den Startpegeln Norderney und Borkum durchgeführt (Abb. 25 und 26). Wiederum ist die Streuung bei Verwendung der Datensätze mit gemessenem Wind deutlich kleiner als in den Datensätzen aus den nachgerechneten 39 Stürmen. Die Ergebnisse für die Vorlaufpegel Norderney und Borkum sind nahezu identisch.

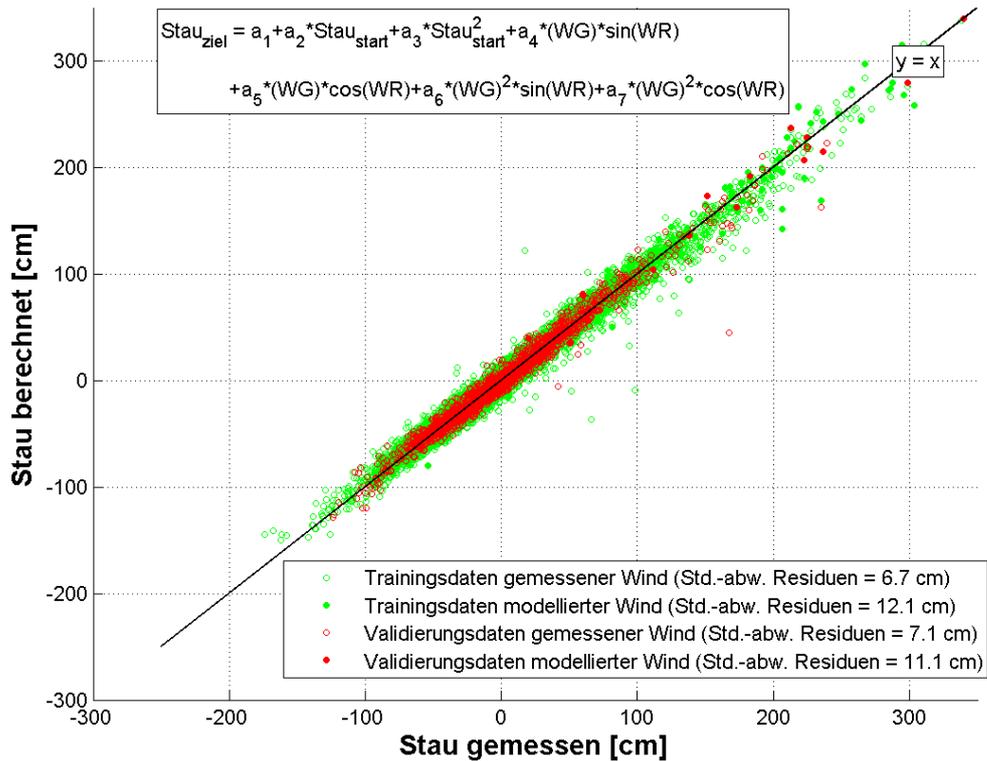


Abbildung 25: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Norderney

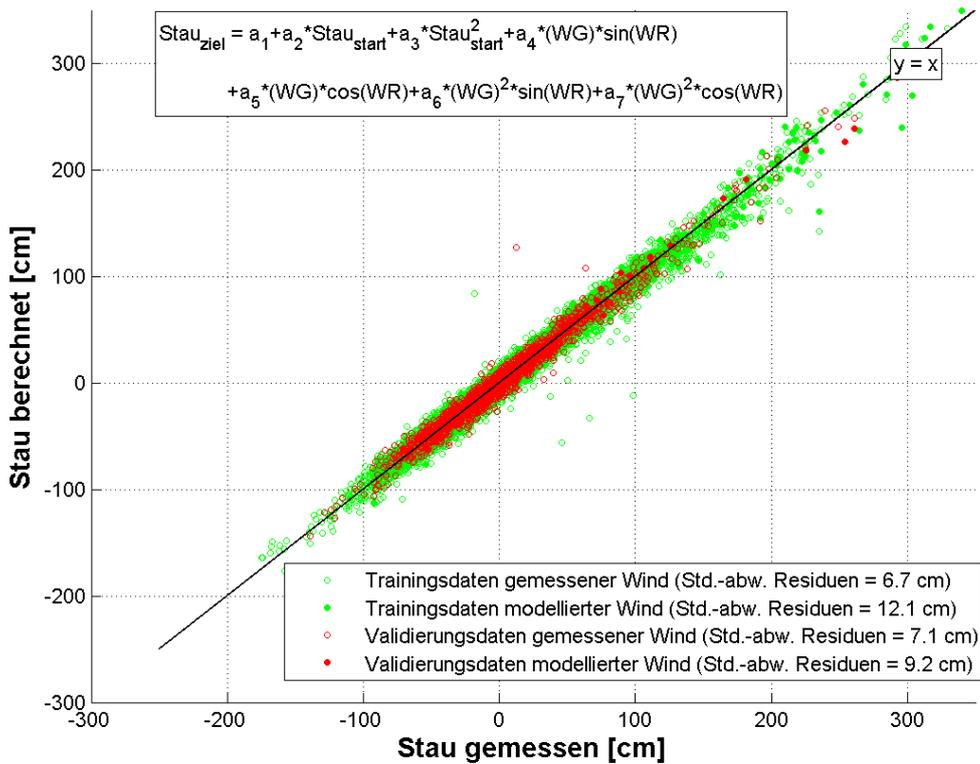


Abbildung 26: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Borkum Fischerbalje

### Norderney → Emden: Regression der Ganglinie

Wie oben beschrieben wurden ebenfalls Regressionsberechnungen für die einzelnen Stundenwerte der Ganglinie durchgeführt, für die aus den Nachrechnungen des DWD auch Winddaten vorlagen (Abb. 27). Die Daten zeigen eine relativ hohe Streuung mit einer Standardabweichung der Residuen von über 30 cm. Auffällig ist ein „schlierenartiger“ Verlauf der Werte über die Tiden, die die hohen Abweichungen abbilden. Für die Betrachtung der Entwicklung während einer Sturmflut ist die ermittelte Regressionsbeziehung nützlich, für die eigentliche Sturmflutvorhersage zum Tidehochwasser ist aber die oben dargestellte Beziehung zum Tidescheitel deutlich aussagekräftiger.

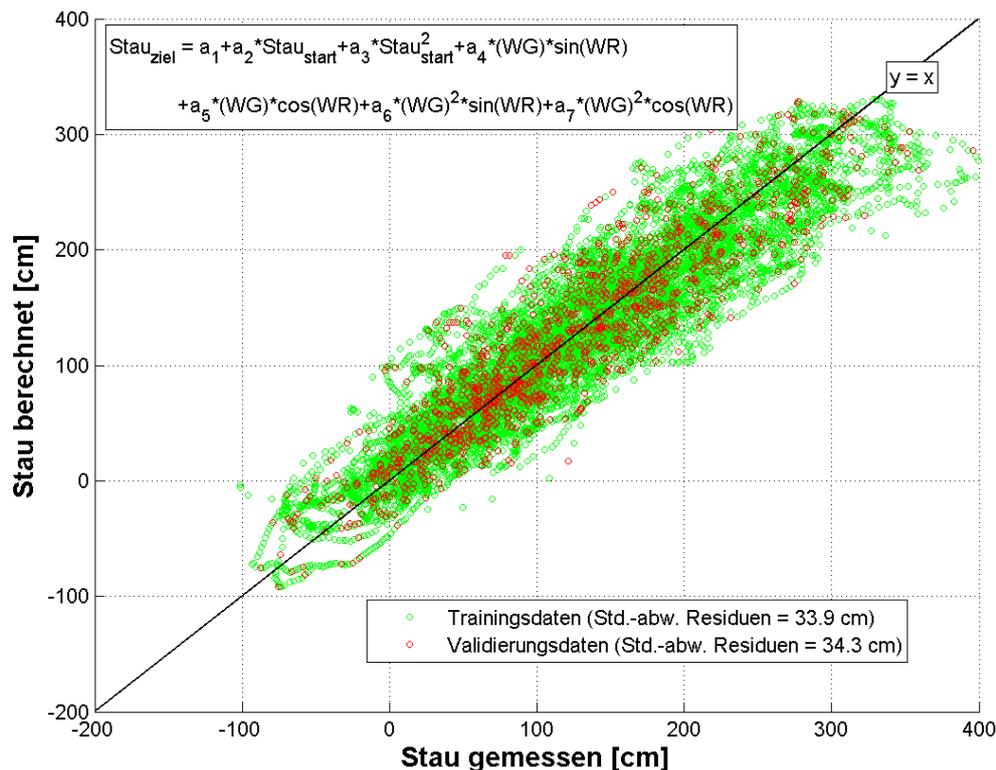


Abbildung 27: Regressionsberechnung für Emden mit Startpegel Norderney für die Ganglinie

#### 3.3.2. Bensorsiel

Für den Pegel Bensorsiel, nicht in einem Ästuar aber an der Ostfriesischen Festlandsküste hinter den Inseln liegend, wurde als Vorlaufpegel die Station Norderney gewählt. Bereits die direkte Korrelation der Stauwerte an diesen beiden Pegeln zeigt eine gute Übereinstimmung und eine relativ geringe Streuung (Abb. 28). Durch die Mitberücksichtigung des Windes kann die Abhängigkeit noch etwas besser dargestellt werden und die Streuung weiter eingengt werden (Abb. 29). Die gleiche Berechnung wurde für die Niedrigwasserscheitel durchgeführt, die Streuung ist geringfügig größer als bei den Hochwasserscheiteln (Abb. 30).

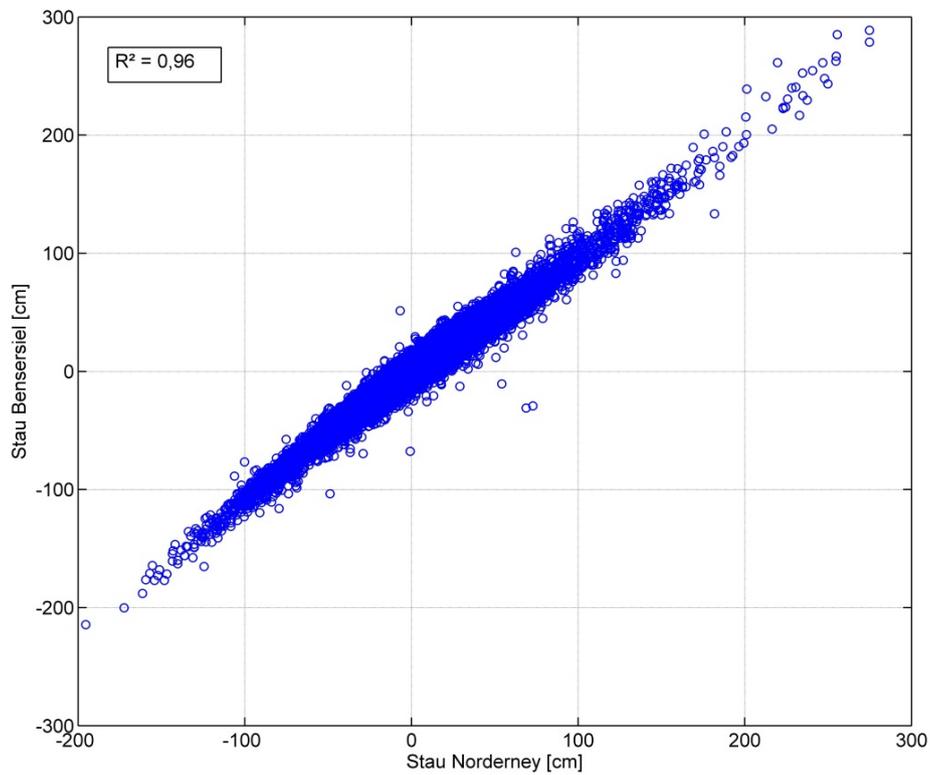


Abbildung 28: Gemessener Stau Norderney gegen gemessenen Stau Bensenziel für Hochwasserscheitelwerte

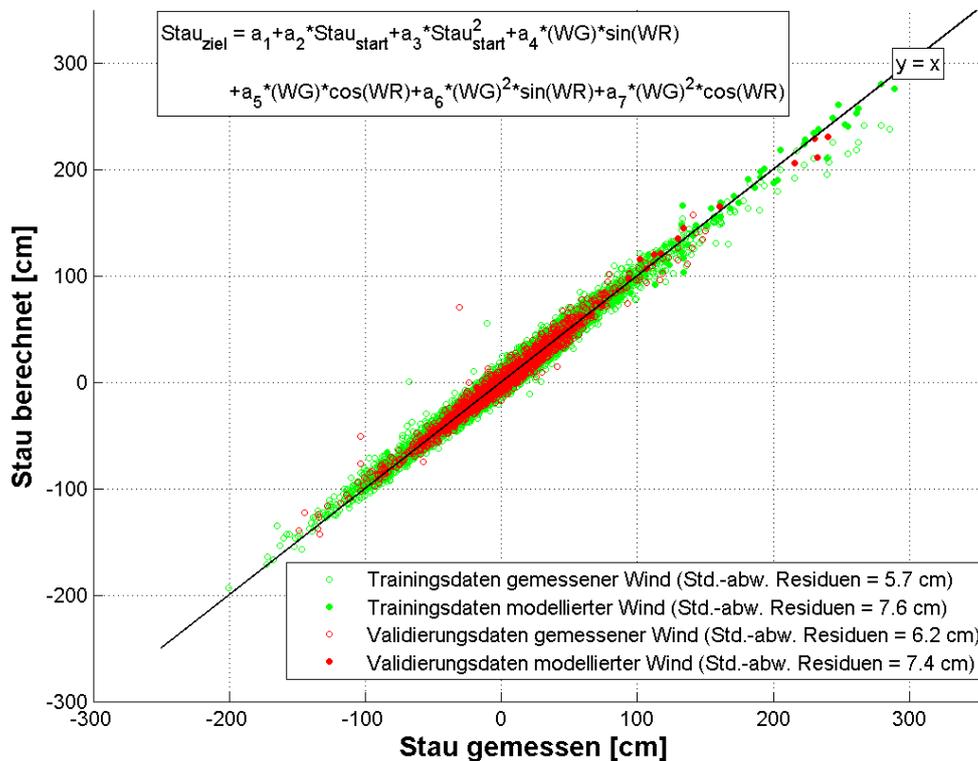
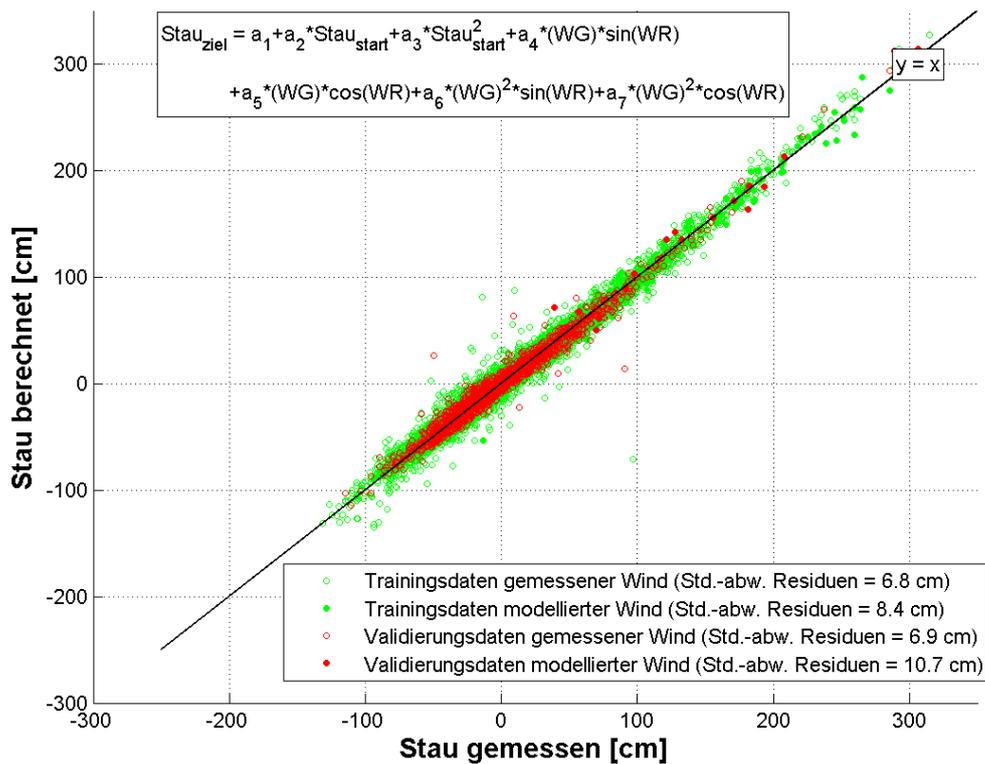


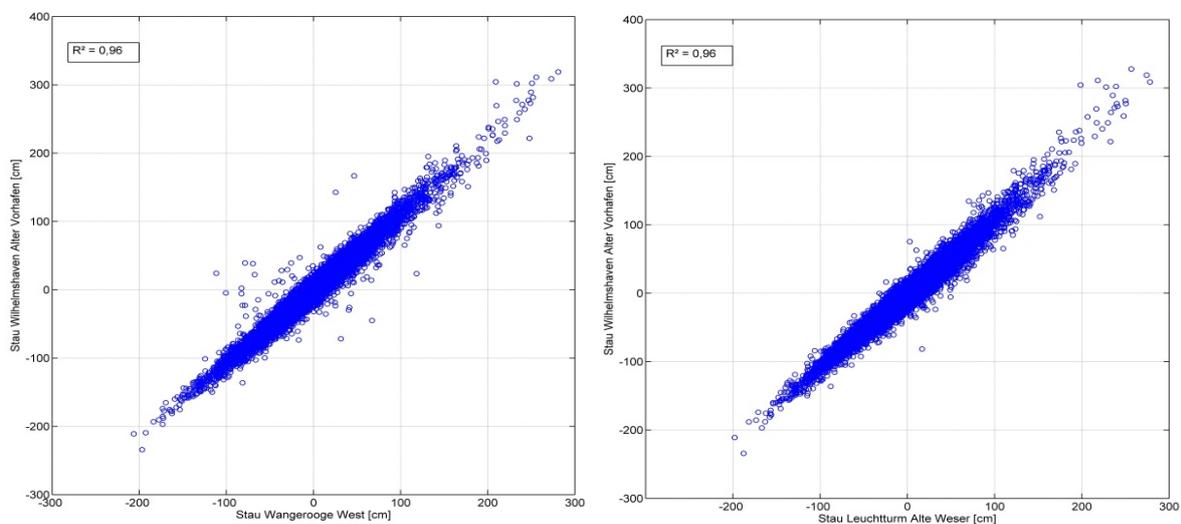
Abbildung 29: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bensenziel für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel ist Norderney)



**Abbildung 30: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bensenziel für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel ist Norderney)**

### 3.3.3. Wilhelmshaven

Für den Zielpegel Wilhelmshaven stehen als Vorlaufpegel die Stationen Wangerooge West und Leuchtturm Alte Weser zu Verfügung, wobei diese beiden Pegel nicht unmittelbar zum Tidegebiet der Jade gehören sondern der eine zur Harle und der andere zur Weser. Dennoch korrelieren die Stauwerte von beiden Pegeln gut mit den Stauwerten am Pegel Wilhelmshaven Alter Vorhafen (Abb. 31).



**Abbildung 31: Gemessener Stau Wangerooge West (links) und Leuchtturm Alte Weser (rechts) gegen gemessenen Stau Wilhelmshaven Alter Vorhafen für Hochwasserscheitelwerte**

### Wangerooge West / Alte Weser → Wilhelmshaven: Regression der Hochwasserscheitel

Für eine weitere Optimierung der Stauberechnung in Wilhelmshaven wurden die Windmessdaten, die auf dem Leuchtturm Alte Weser erfasst wurden, sowie die entsprechenden Werte aus der DWD Nachrechnung der 39 Sturmsituationen in die Regressionsrechnung mit einbezogen und für beide möglichen Startpegel wiederum für die Hoch- und Niedrigwasserscheitel getrennt angewendet (Abb. 32 bis 35).

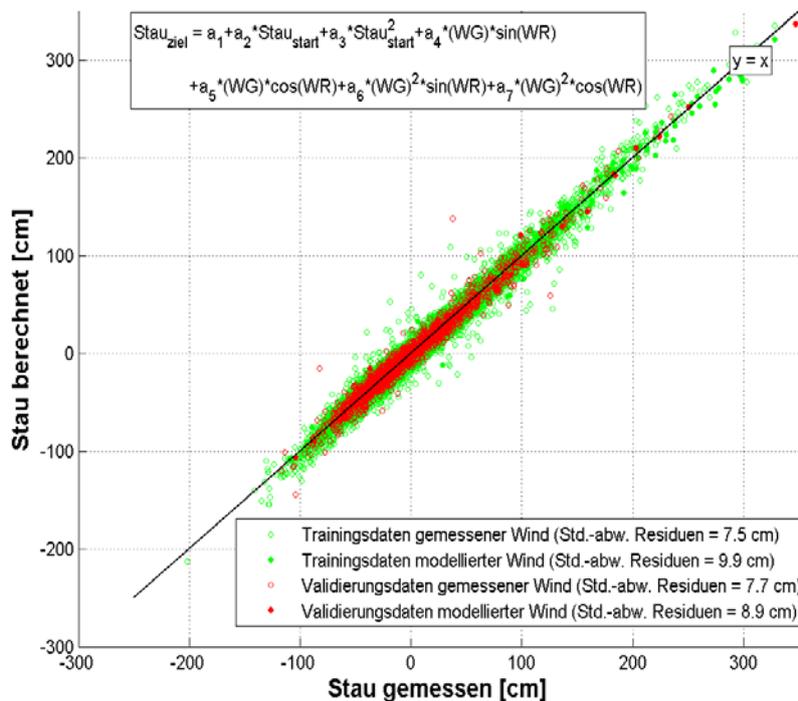


Abbildung 32: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel ist Wangerooge West)

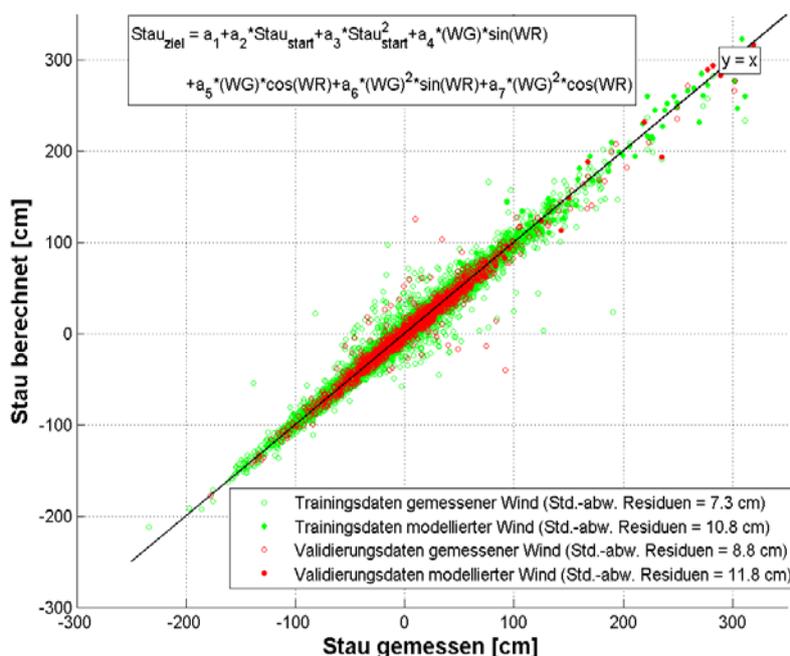


Abbildung 33: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel ist Leuchtturm Alte Weser)

Die Regressionsrechnungen für die Hochwasserscheitel ergeben für beide Startpegel sehr ähnliche Ergebnisse. Aufgrund der etwas geringeren Standardabweichung der Residuen mit dem Startpegel Wangerooge West wird für die Vorhersage des Staus in Wilhelmshaven zukünftig dieser Pegel verwendet.

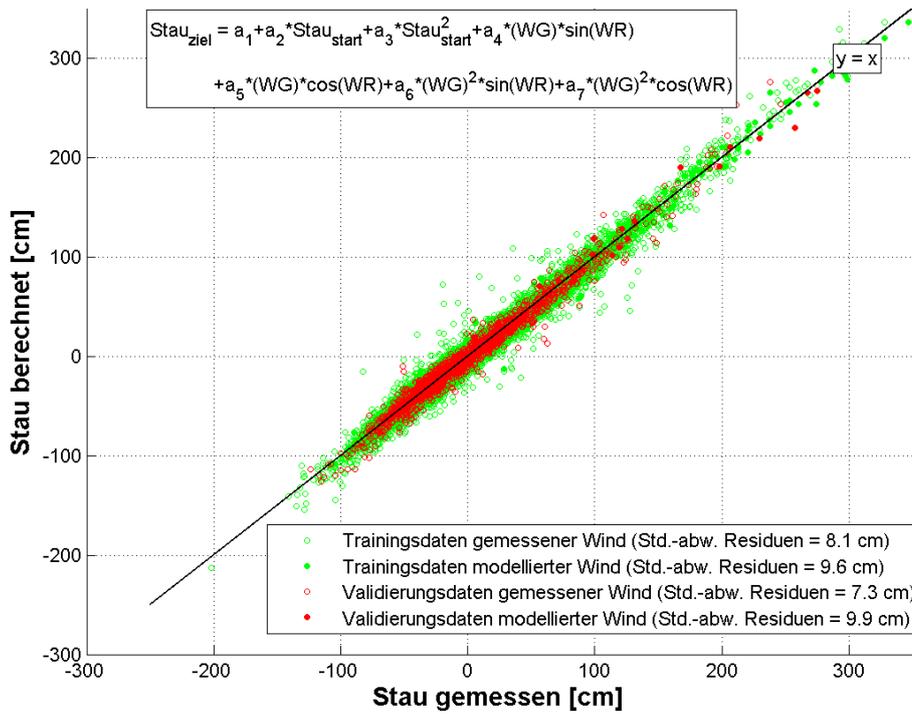


Abbildung 34: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Wangerooge West)

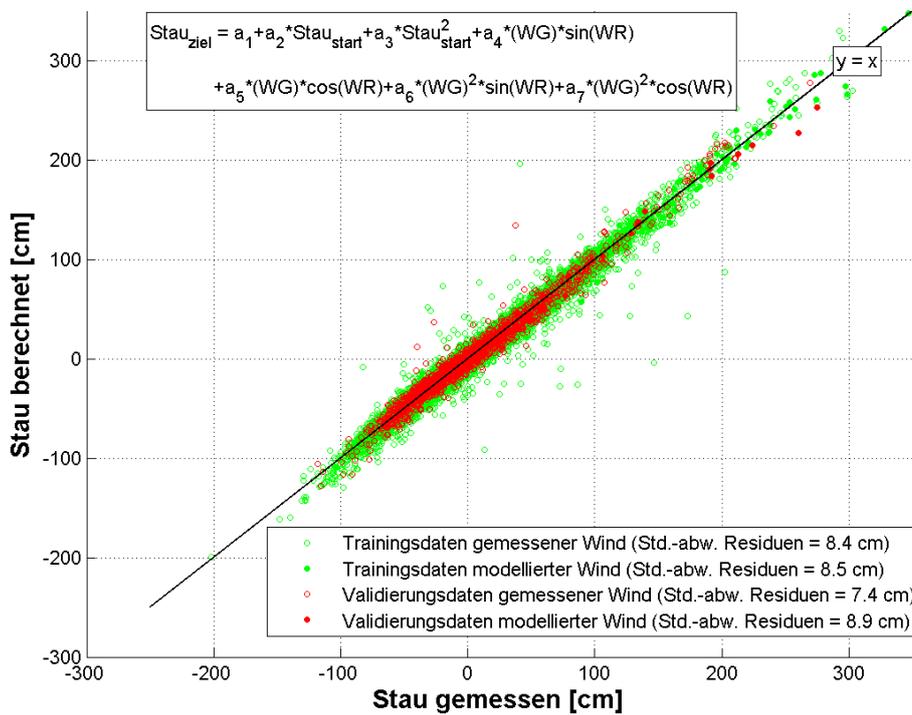
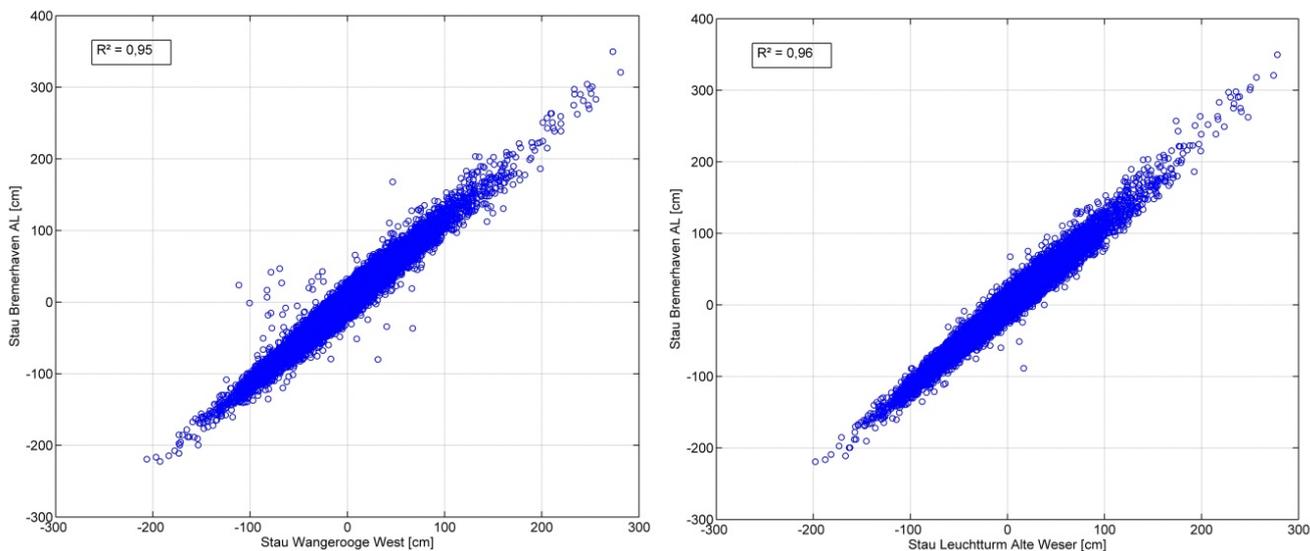


Abbildung 35: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Leuchtturm Alte Weser)

### 3.3.4. Bremerhaven

Für den Zielpegel Bremerhaven bietet sich von der räumlichen Lage der Pegel Leuchtturm Alte Weser als Startpegel an. Es wurde aber wie bei Wilhelmshaven zusätzlich auch die Beziehung zu dem Pegel Wangerooge West mit untersucht und die Korrelation der Stauwerte zwischen Wangerooge West und Bremerhaven ohne Berücksichtigung von Wind ist kaum schlechter als die zwischen Leuchtturm Alte Weser und Bremerhaven (Abb. 36).



**Abbildung 36: Gemessener Stau Wangerooge West (links) und Alte Weser (rechts) gegen gemessenen Stau Bremerhaven für Hochwasserscheitelwerte**

Zur Optimierung der Beziehung wurde wiederum für die Scheitelwerte der Wind an der Station Leuchtturm Alte Weser sowohl aus Messungen als auch aus den DWD Nachrechnungen in die Regressionsberechnung mit einbezogen. Bei den Hochwasserscheiteln (Abb. 37 + 38) liefert der Vorlaufpegel Leuchtturm Alte Weser -wenn auch nur geringfügig- bessere Ergebnisse und wird zukünftig für die Vorhersage genutzt. Bei den Niedrigwasserscheiteln sind die Unterschiede ebenfalls gering (Abb. 39 + 40).

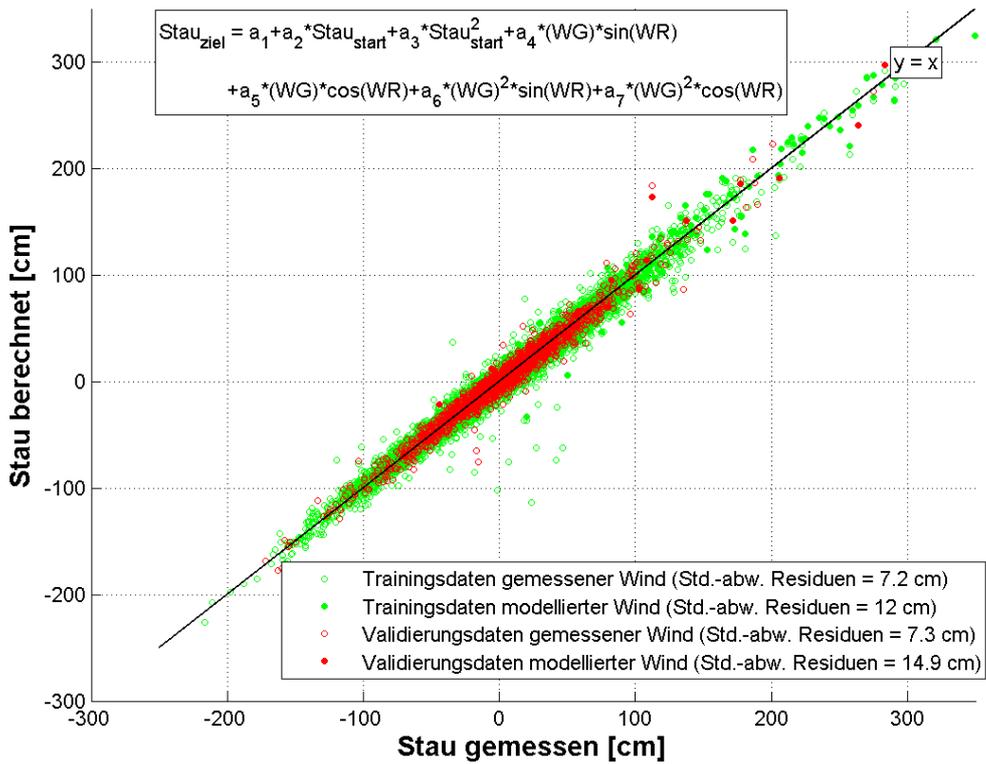


Abbildung 37: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel Wangerooge West)

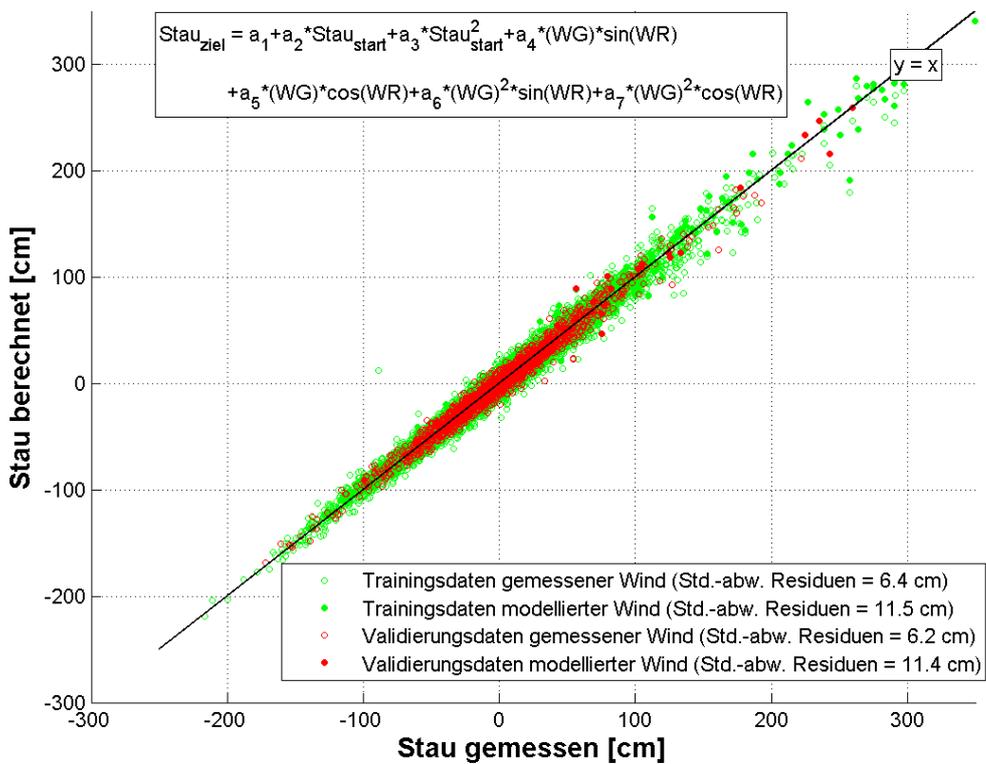


Abbildung 38: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel Leuchtturm Alte Weser)

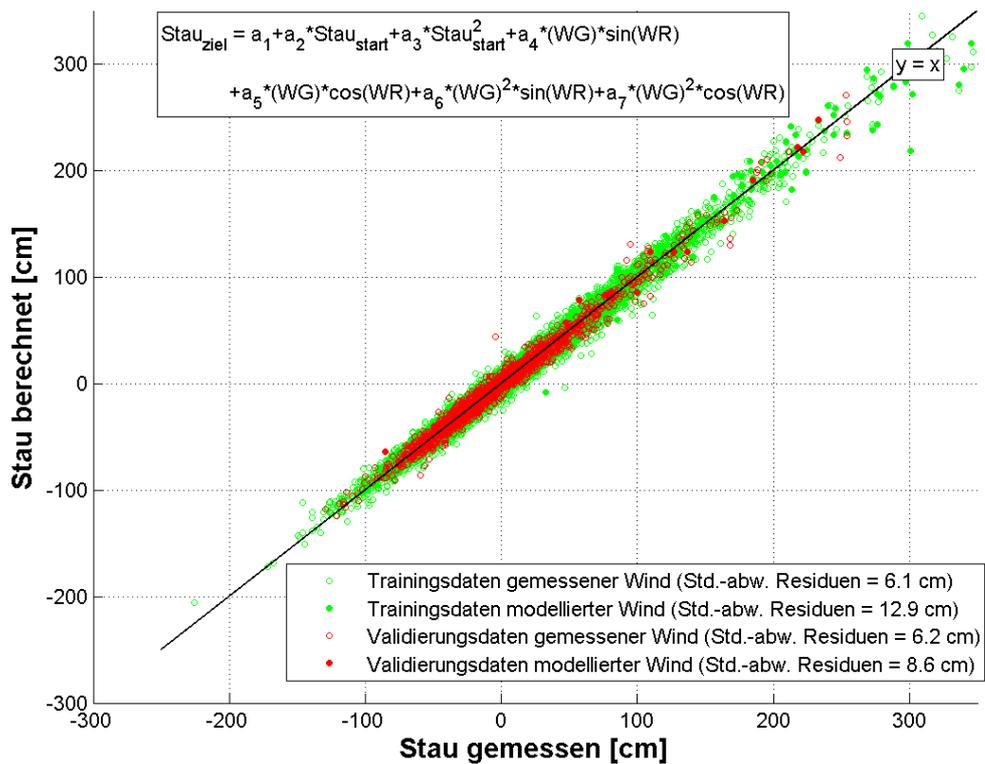


Abbildung 39: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Wangerooge West)

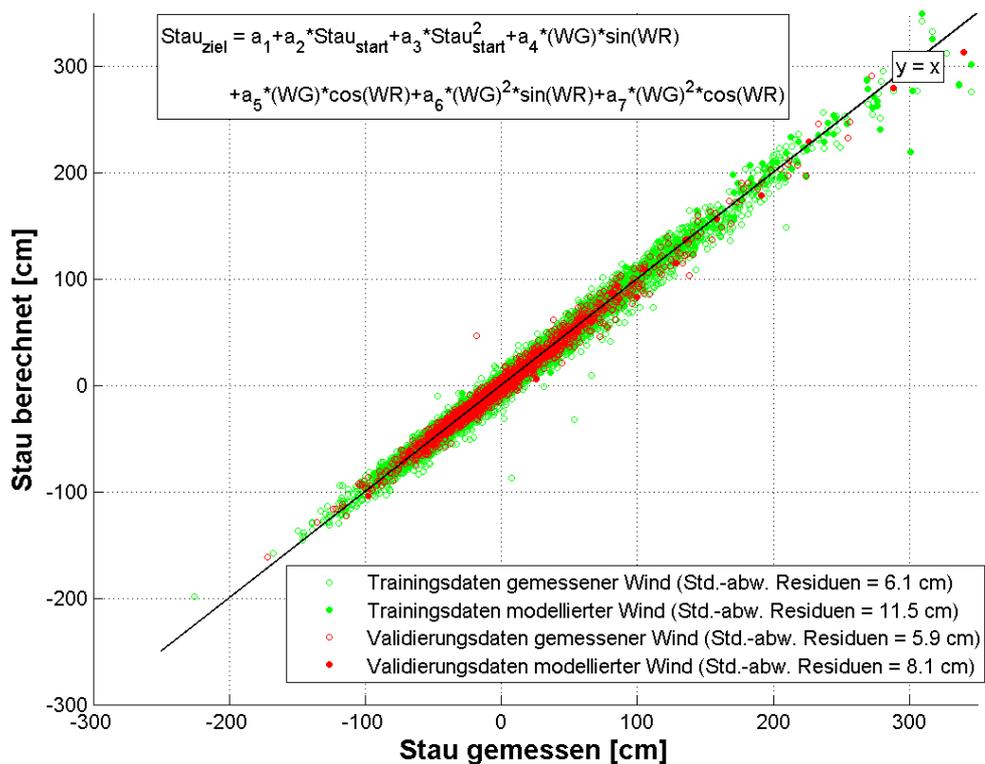


Abbildung 40: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Leuchtturm Alte Weser)

### 3.4. Kurzfristiger Vorhersage auf Basis eingetretener Werte an Vorlaufpegeln

Während einer Sturmflut kann die Wasserstandsvorhersage wenige Stunden vor Eintritt des Ereignisses an der niedersächsischen Küste noch einmal aktualisiert werden, in dem der eingetretene Stau an einem vorgelagerten Pegel vor der Niederländischen Küste hochgerechnet wird, bewährt haben sich die Pegel Terschelling und Huibertgat, die gegenüber dem Standort Norderney eine Vorlaufzeit von etwa drei bzw. einer Stunde haben.

Der Berechnungsansatz ist der gleiche wie das oben beschriebenen Verfahren bei den Vorlaufpegeln für die Pegel in den Ästuaren, in dem in die Regressionsrechnung der Stau am Vorlaufpegel und der örtliche Wind Berücksichtigung findet:

$$Stau_{Ziel} = a_1 + a_2 * Stau_{Vorl} + a_3 * Stau_{Vorl}^2 + a_4 * WG * \sin(WR) + a_5 * WG * \cos(WR) + a_6 * WG^2 * \sin(WR) + a_7 * WG^2 * \cos(WR)$$

mit

$a_i$	= Koeffizienten	[-]	WG	= Windgeschwindigkeit	[m/s]
$Stau_{Vorl/Ziel}$	= Stau am Vorlauf oder Zielpiegel	[m]	WR	= Windrichtung	[°]



Abbildung 41: Verlauf der Tidewelle in der Nordsee

### 3.4.1. Terschelling -> Norderney

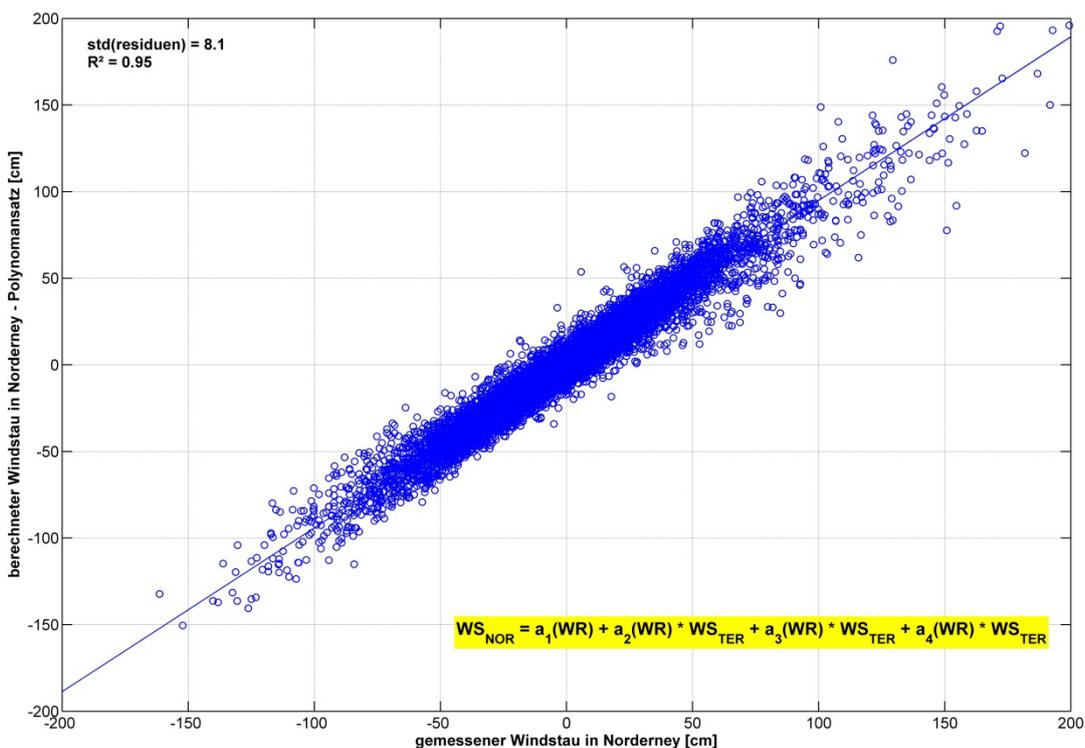
Es wurde die Beziehung der gemessenen Wasserstände zwischen dem Vorlaufpegel Terschelling Nordsee und dem Zielpiegel Norderney bestimmt. Die Datengrundlage bildeten gemessene Scheitelwerte (Hoch- und Niedrigwasser) zwischen den Jahren 1989 und 2010. Als Windmessdaten (Windgeschwindigkeit und Windrichtung) wurden die vom Standort Norderney verwendet. Diese liegen im obigen Zeitraum zum Großteil als synoptische Messwerte vor. Datenlücken werden, soweit vorhanden mit Stundenmittelwerten ergänzt. Insgesamt gibt es knapp 12000 Tiden, für die alle erforderlichen Messwerte vorliegen.

Als bester Zeitbereich für den Wind wurde ein Mittel aus den Stunden 2 bis 4 vor dem auf volle Stunde gerundeten Hochwasserscheitelwert ermittelt. Zeitbereiche, in denen die Standardabweichung der zu mittelnden Windrichtung größer als 30 Grad war, wurden aus der Berechnung ausgenommen.

Es wurden drei unterschiedliche Ansätze für die Stauermittlung aus dem Vorlaufpegel untersucht:

- ein Polynomansatz mit Windrichtungsklassen, wie er bisher in der Vorhersage verwendet wurde
- ein trigonometrischer Ansatz
- Ansatz 2 erweitert um folgende Summanden, jeweils mit den Potenzen 1 und 2:
  - o Stau zu Niedrigwasser in Terschelling
  - o Stau zu Niedrigwasser in Norderney
  - o Anstiegsrate des Hochwassers in Terschelling

Die Standardabweichung der Residuen liegt bei 8,1 cm für den Polynomansatz (Abb. 42), 7 cm für den trigonometrischen Grundansatz (Abb. 43) und 6,7 cm für den erweiterten trigonometrischen Ansatz (Abb. 44). Die Streuung ist somit für alle drei Ansätze relativ gering.



**Abbildung 42: Gemessener gegen den aus Terschelling hochgerechneten Stau in Norderney. Es wird der Polynomansatz für verschiedene Windklassen verwendet.**

Beim trigonometrischen Ansatz, bei dem die Windgeschwindigkeit und Windrichtung berücksichtigt werden, verringert sich die Standardabweichung um etwa einen Zentimeter. Durch die Hinzunahme von weiteren Parametern verringert sich die Streuung nur noch wenig. Man kann also davon ausgehen, dass für eine allgemeine Betrachtung aller Fälle die Parameter Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Stau in Terschelling den Haupteinfluss auf den Stau in Norderney haben.

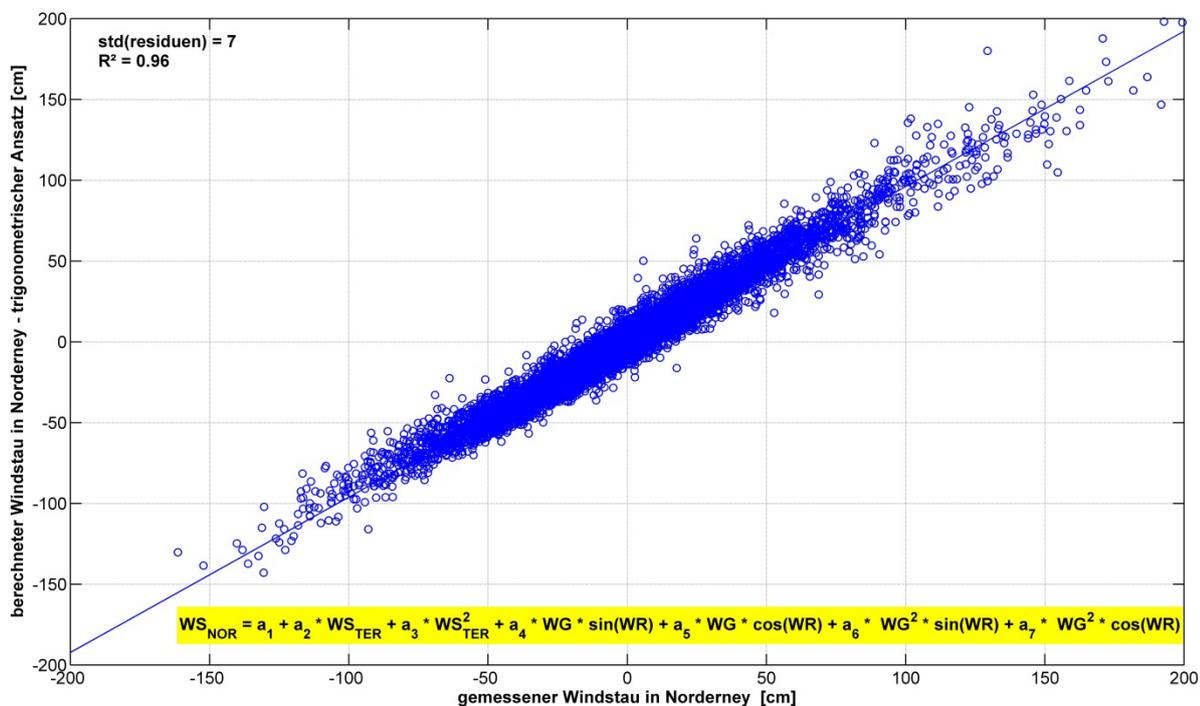


Abbildung 43: Gemessener gegen den aus Terschelling hochgerechneten Stau in Norderney. Es wird der trigonometrischer Ansatz verwendet

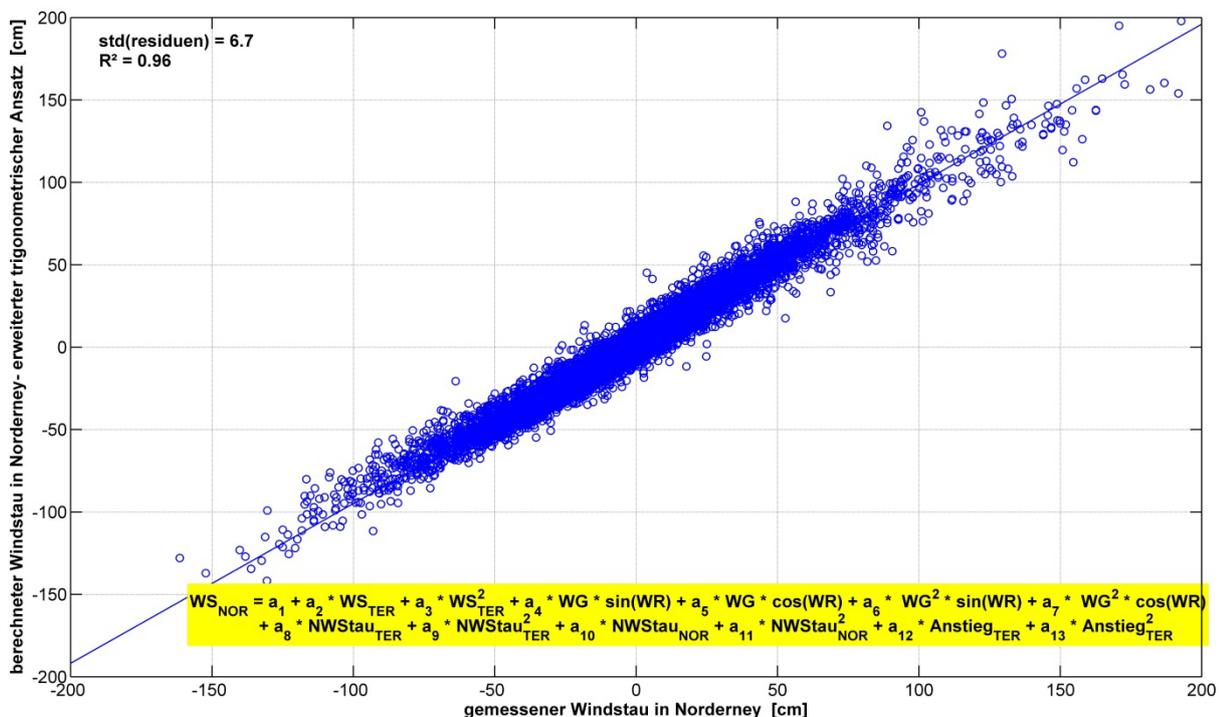
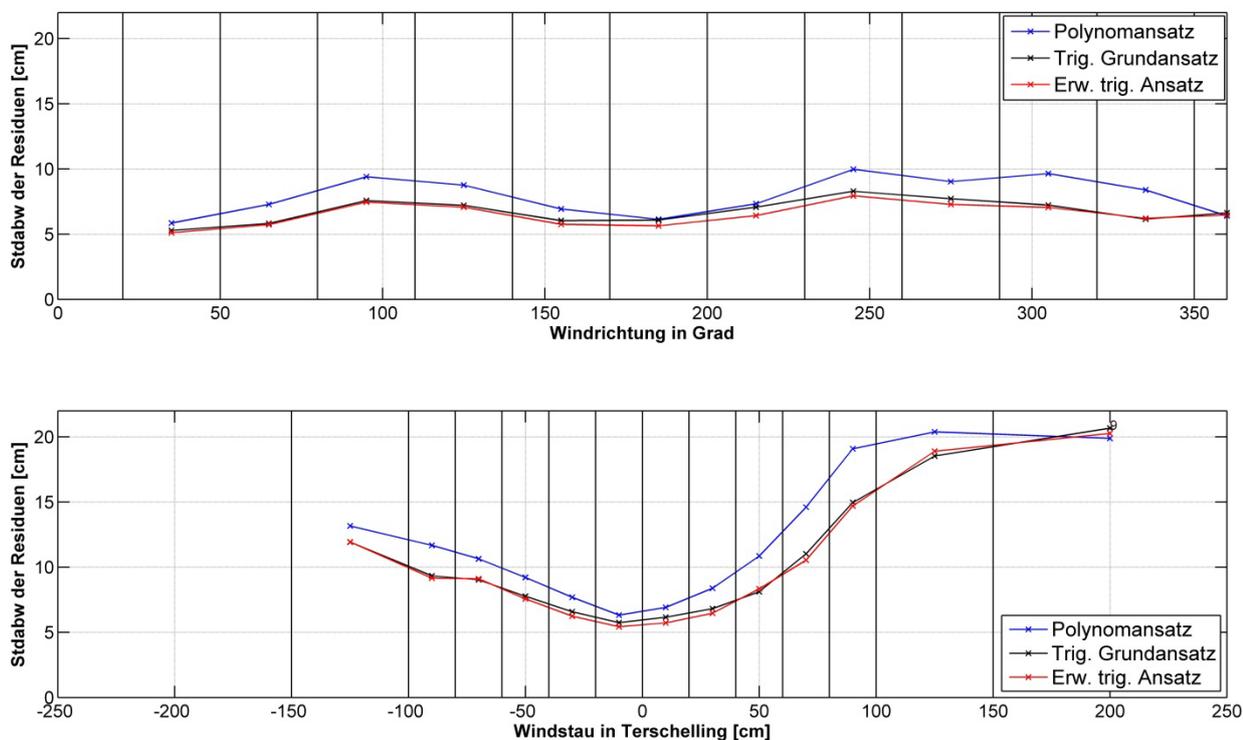


Abbildung 44: Gemessener den aus Terschelling hochgerechneten Stau in Norderney. Es wird der erweiterte trigonometrische Ansatz verwendet

Die Streuung zwischen den beiden Pegeln Terschelling und Norderney ist über die verschiedenen Windrichtungen relativ einheitlich verteilt (Abb. 45 oben), bezogen auf den Stau fällt sie bei höheren Stauwerten größer aus (Abb. 45 unten). Gerade in diesem Wertebereich, der für den Sturmflutwarndienst am interessantesten ist, ist durch die Verwendung der trigonometrischen Ansätze eine deutliche Reduktion der Abweichungen erreichbar.



**Abbildung 45: Standardabweichung der Residuen aufgeteilt nach Windrichtung in Norderney (oben) und Stauhöhe in Terschelling (unten)**

### 3.4.2. Norderney -> Wangerooge West

Es sollte ebenfalls der Stauzusammenhang zwischen dem Vorhersagepegel Norderney und der weiter östlich gelegenen Insel Wangerooge untersucht werden, um auch im Eingangsbereich der Jade und Weser die Möglichkeit zu schaffen im Sturmflutfall noch mit kurzer Vorlaufzeit die Vorhersage zu präzisieren.

Für Stauhöhen zwischen etwa -1 m und +1.5 m sind die Werte an den Pegeln Norderney und Wangerooge West sehr ähnlich. Betrachtet man aber die extremeren Stauwerte, so ist eine nicht-lineare Tendenz erkennbar. Im negativen Staubereich liegt der gemessene Stau in Norderney deutlich über dem von Wangerooge. Im hohen positiven Staubereich lässt sich keine Tendenz erkennen (Abb. 46). Zur weiteren Berechnung wurden Ausreißer mit einer Staudifferenz von mehr als 50 cm zwischen den Pegel Norderney und Wangerooge West ausgeschlossen, da diese vermutlich auf Messfehler zurück zu führen sind.

Eine detaillierte Betrachtung zeigte, dass bei geringen Windgeschwindigkeiten und ebenso bei Windrichtungen zwischen Nord und Nordost der Windstau auf Wangerooge leicht unter dem Windstau auf Norderney liegt. Auch bei Windrichtungen von Süd bis Westnordwest und höheren Windgeschwindigkeiten kommt es deutlich häufiger zu erhöhten Wasserständen auf Norderney als auf Wangerooge. Allerdings gibt es in diesem Bereich auch Fälle, in denen der Stau auf Wangerooge über dem von Norderney liegt. Bei nordwestlichen Windrichtungen mit hohen

Windgeschwindigkeiten über 15 m/s wiederum zeigt Wangerooge leicht höhere Stauwerte. Da dies der Hauptsturmrichtung im Bereich der Deutschen Bucht entspricht, kann hiermit der subjektive Eindruck von erhöhten Windstauwerten auf Wangerooge erklärt werden. Dem entsprechend führt eine Berücksichtigung des Windes in der Regressionsberechnung zu einer Verringerung der Streuung (Abb. 47).

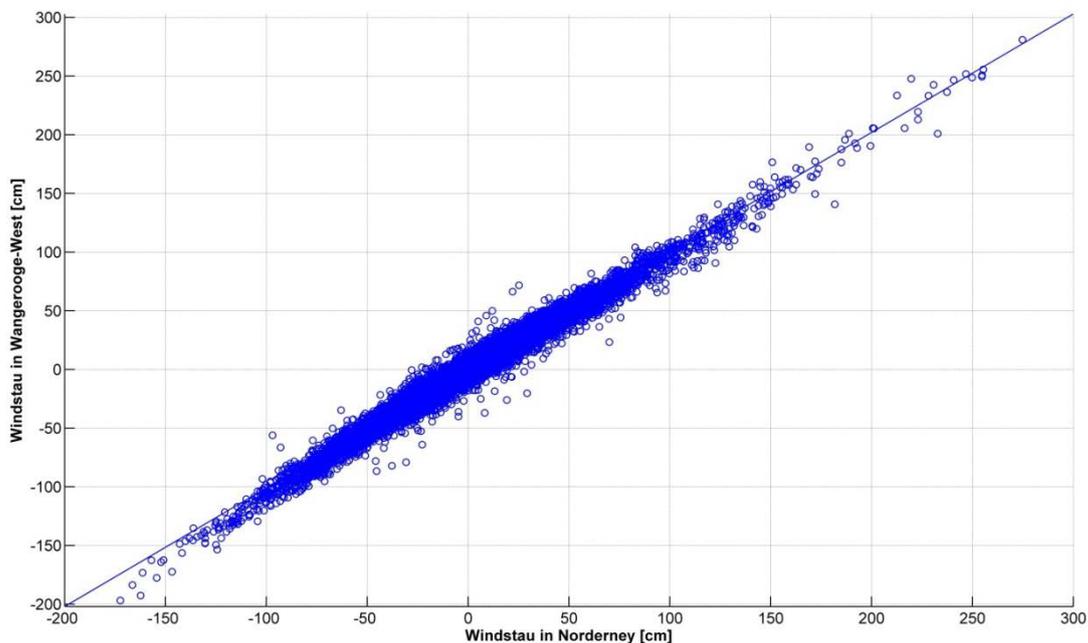


Abbildung 46: Gemessener Stau in Norderney und Wangerooge West

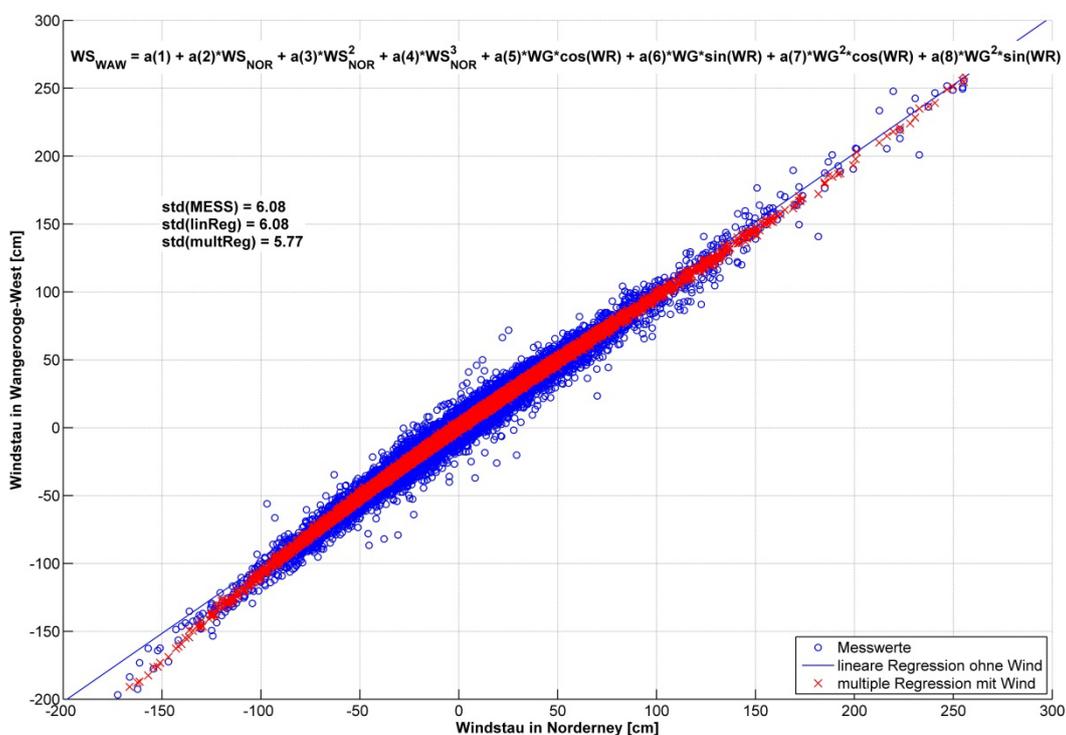


Abbildung 47: Beziehung zwischen dem Stau am Pegel Norderney und Wangerooge West - Vergleich der Messwerte und Berechnungen

### 3.5. Künstliche Neuronale Netze

#### 3.5.1. Methodik

Die Forschung der Künstlichen Neuronalen Netze beschäftigt sich mit der Möglichkeit von intelligenten Computersystemen, die ein Verhalten vergleichbar dem menschlichen Gehirn zeigen. Dabei geht es vor allem darum, die Informationsverarbeitung des menschlichen Gehirns auf Neuronenbasis nach zu ahmen. Das menschliche Gehirn ist in der Lage Probleme zu lösen, für die es bisher keine exakte Anleitung besitzt, indem es schon bekannte Lösungsstrategien generalisiert und das Prinzip hinter dem Problem erkennt. Es ist in der Lage zu Lernen, d.h. neue Neuronen zu bilden und alte Neuronen zu löschen. Das Gehirn wichtet bestimmte Problemfaktoren stärker als andere und ist in der Lage diese Wichtung anzupassen (Kriesel 2005). Die Informationsverarbeitung im Computer soll so strukturiert werden, dass sich ähnliche Eigenschaften wie für das menschliche Gehirn ergeben. Dadurch entsteht Möglichkeit die Lösungswege immer den aktuellen Rahmenbedingungen anzupassen, bekannte Lösungswege wieder zu erkennen, zu klassifizieren, fehlerhafte Ergebnisse zu sondieren und aufbauend auf dem Gelernten und einer erneuten Dateneingabe Vorhersagen zu treffen (Huang et al. 2003).

Das künstliche Neuronale Netz wird zuerst mit Eingangsdaten und bekannten Lösungen dahingehend trainiert, dass es anhand des Eingangsdatensatzes nichtlineare Funktionen entwickelt um die bestmögliche Lösung zu ermitteln (Lee 2006). Das sogenannte Überwachte Lernen funktioniert genau nach diesem Prinzip, sich durch das Training mit Problemen vertraut zu machen. Dadurch, dass die Ergebnisse mit der korrekten Lösung verglichen werden, können die Wichtungsfaktoren und Funktionen angepasst werden. Davon ausgehend ist das System nun in der Lage weitere Datensätze derselben Klasse ebenfalls einer plausiblen Lösung zuzuführen. Ein wesentlicher Vorteil der KNN ist, dass die hinter den Vorgängen stehende Physik nicht explizit bekannt sein und abgebildet werden muss.

Für die Untersuchungen mit künstlichen Neuronalen Netzen zur Stauvorhersage hier wurde ein drei Schichtenmodell verwendet. In der ersten Schicht werden die Eingabeparameter definiert, in der zweiten Schicht findet die nicht sichtbare Verarbeitung statt, dort werden unabhängige und beliebig viele neuronentartige Rechenpunkte angestoßen und Lösungen sowie Wichtungsfaktoren berechnet. Die Ergebnisse werden dann der Ausgabeschicht zugeführt. Es sollte untersucht werden, ob solch ein Verfahren für die Sturmflutvorhersage adaptiert werden kann und sich mit den aus dem Projekt zur Verfügung stehenden meteorologischen Eingangsdaten aus Abschnitt 3.2.1 ein künstliches Neuronales Netz erzeugen lässt und ob dieses zumindest eine absichernde Ergänzung hinsichtlich der Stauvorhersage darstellen kann. Ein ähnlicher Ansatz wurde auch vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie untersucht (Röske 1997, Müller-Navarra et al. 2003).

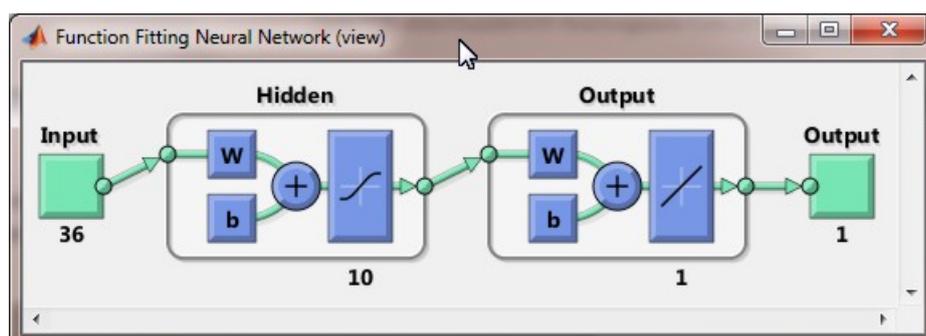


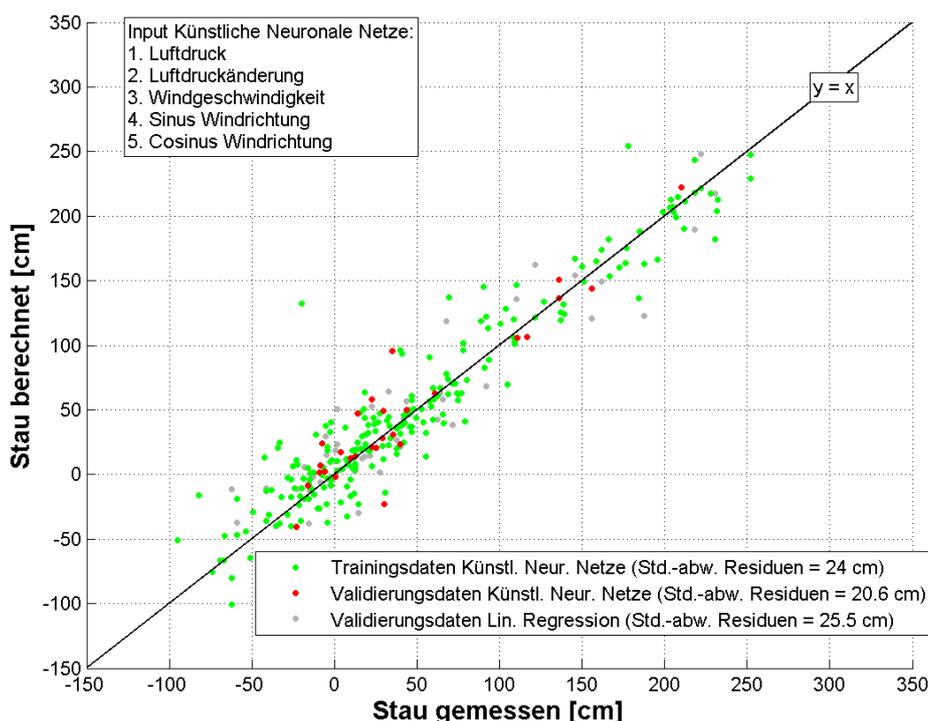
Abbildung 48: Ablaufschema Künstliche Neuronale Netze

Unter Verwendung der entsprechenden Matlab Toolbox (Neuronal Network) wurde ein Feed-Forward-Netz mit einer Inputschicht, einer verdeckten Bearbeitungsschicht (mit 10 Neuronen), einer Ausgabeschicht (mit einem Neuron) und dem Output verwendet (Abb. 48). Feed-Forward-Netz bedeutet, dass in der Bearbeitungsschicht kein Neuron übersprungen, sondern von einer in die nächste Schicht die Ergebnisse weiter gegeben werden.

Als Input stehen wie schon bei der linearen Regression aus den Modellrechnungen des DWD die meteorologischen Daten Luftdruck, Luftdruckänderung, Windgeschwindigkeit, sowie Sinus und Cosinus der Windrichtung zur Verfügung. Bei der Berechnung über die Ganglinie kommt noch die Information über die Mittlere Tidekurve als Inputparameter hinzu. Die Berechnungen wurden für die Pegel Norderney, Wangerooge West, Alte Weser und Cuxhaven durchgeführt.

### 3.5.2. Vergleich mit linearer Regression

Im Nachfolgenden werden lediglich die Ergebnisse für Norderney erläutert, die Ergebnisse der anderen Pegel sind in Tabelle 6 zusammen gefasst und die Grafiken im Anhang abgebildet. Wie auch bei der linearen Regression wird in der Untersuchung unterschieden in die Scheitelwerte (Hoch- und Niedrigwasser) und in die Ganglinie über mehrere Tiden. Bei den Hochwasserscheitelwerten beträgt der RMSE zwischen gemessenem und berechneten Stau für den Validierungsdatensatz 20,9 cm. Die Streuung der Ergebnisse bei Verwendung dieser Methode ist etwas geringer als die der mittels multipler linearer Regression ermittelten Daten (Abb. 49).



**Abbildung 49: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Norderney (zum Vergleich sind die Ergebnisse der linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt)**

Gleiches gilt für die Niedrigwasserscheitelwerte (Abb. 50), auch hier liefern die neuronalen Netze in der Validierung mit einem RSME von 32,9 cm besseren Ergebnisse als die multiple Regression mit 36,6 cm. Bei der Betrachtung über die Ganglinie, sind die Unterschiede zwischen den beiden Verfahren sehr gering (Abb. 51) und die Streuung ist etwas geringer als bei den Niedrigwasserscheiteln jedoch höher als bei den Stauwerten zum Tidehochwasser.

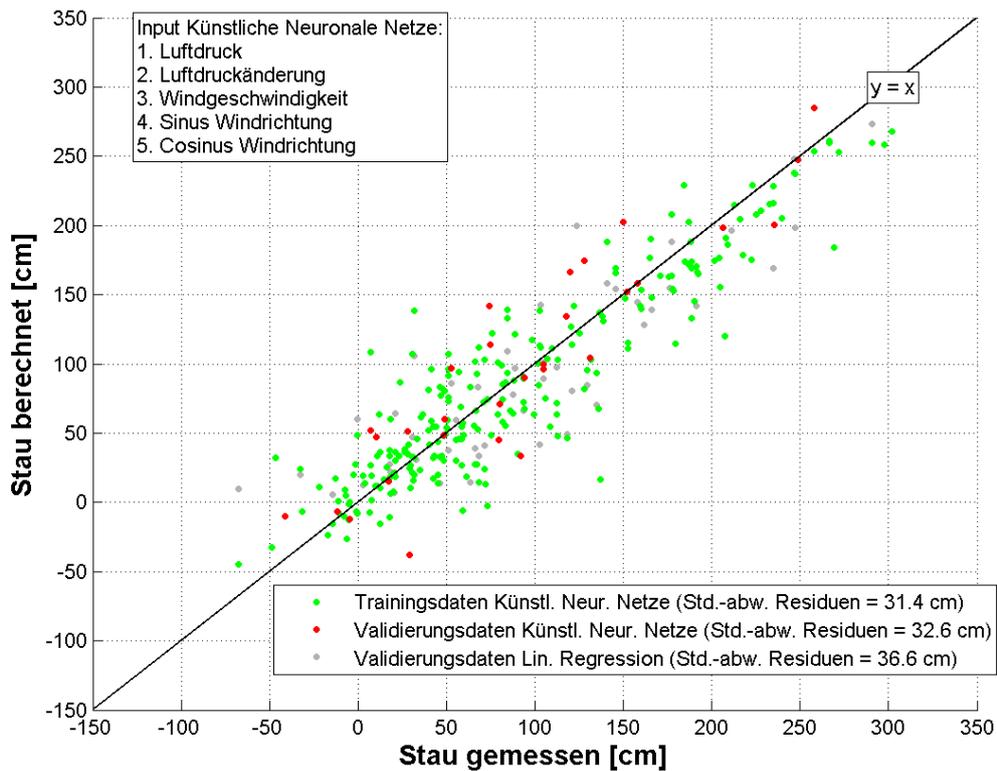


Abbildung 50: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Norderney (zum Vergleich sind die Ergebnisse der linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

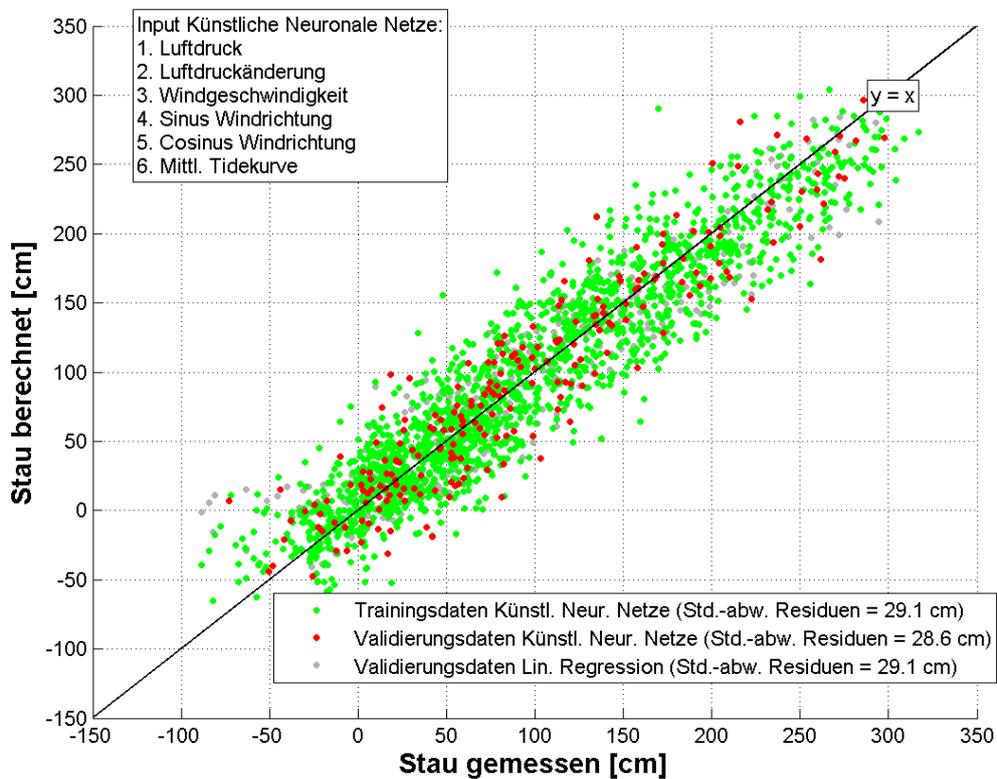


Abbildung 51: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Ganglinie am Pegel Norderney (zum Vergleich sind die Ergebnisse der linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

Insgesamt zeigen sich beim Vergleich zwischen KNN und multipler Regression je nach Pegel leicht unterschiedliche Ergebnisse (Tabelle 6). Für Norderney (Hochwasser, Niedrigwasser, Ganglinie), Alte Weser (Hochwasser), Cuxhaven (Ganglinie) und Wangerooge West (Hochwasser) besitzen die Ergebnisse der Künstlichen Neuronalen Netze die kleineren Residuen und eine geringere Streuung des berechneten Staus. Für Alte Weser (Niedrigwasser, Ganglinie), Cuxhaven (Hochwasser, Niedrigwasser) und Wangerooge West (Niedrigwasser) sind die Ergebnisse umgekehrt und die multiple lineare Regression liefert die größere Vorhersagegenauigkeit im Vergleich zu den Künstlichen Neuronalen Netzen.

**Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Stauberechnung mit Künstlichen Neuronalen Netzen und multipler Regression - RSME der Residuen der Validierungsdatensätze**

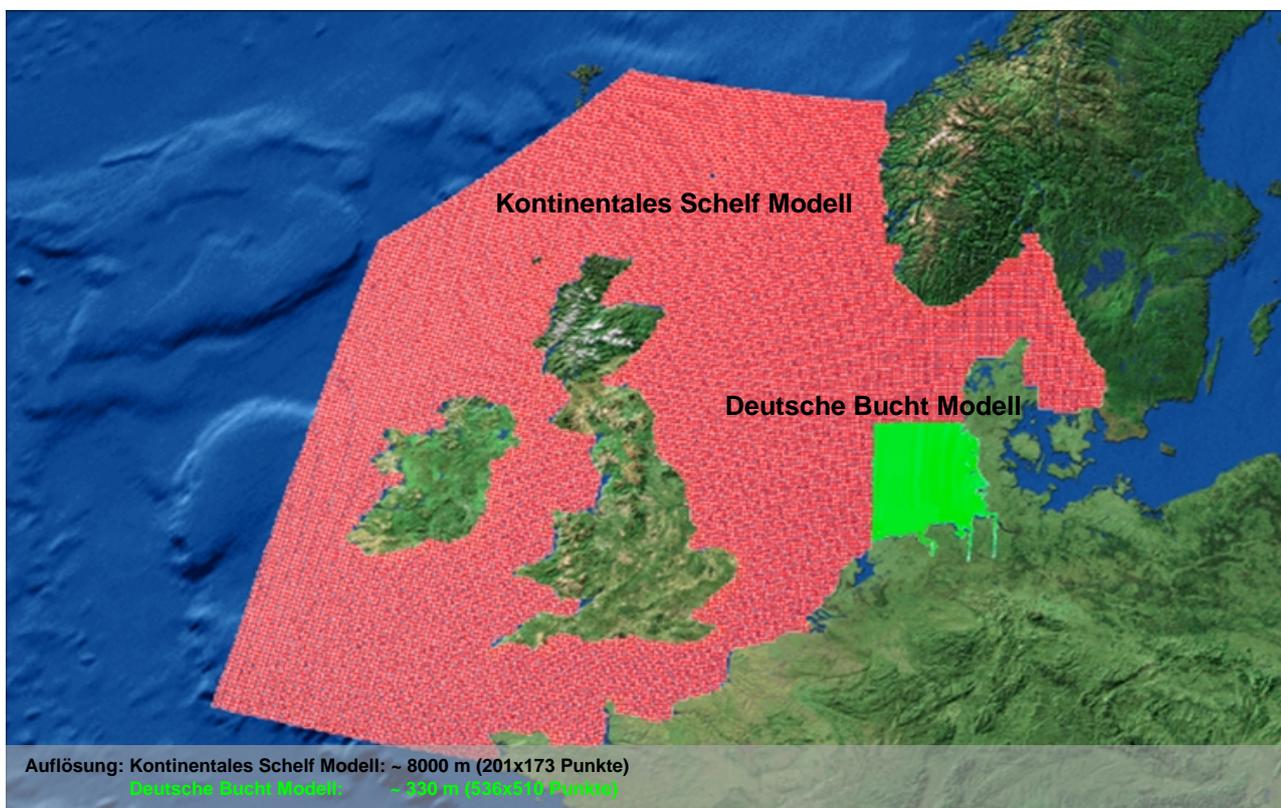
Startpegel		multiple Regression [cm]	KNN [cm]
Norderney	HW	25,3	20,9
	NW	36,6	32,9
	Ganglinie	29,0	28,5
Alte Weser	HW	25,2	23,0
	NW	37,0	42,6
	Ganglinie	28,1	23,4
Cuxhaven	HW	31,2	41,8
	NW	34,2	37,8
	Ganglinie	29,6	26,4
Wangerooge West	HW	26,2	20,6
	NW	34,9	39,9

In der Vorhersagepraxis werden die beiden Methoden nun parallel angewendet und dabei hat sich gezeigt, dass die Künstlichen Neuronalen Netze dazu neigen, für die trainierten Fälle (Windrichtung aus Nordwest und hohe Windgeschwindigkeiten) gute Ergebnisse liefern, für alle anderen meteorologischen Gegebenheiten aber unrealistische, unbrauchbare Stauwerte berechnen. Dieses Verhalten von Künstlichen Neuronalen Netzen, nur innerhalb der durch den Trainingsdatensatz gesetzten Grenzen sinnvolle Ergebnisse zu liefern, ist bekannt (vgl. z.B. Kriesel 2006).

### 3.6. Überlagerungseffekte

#### 3.6.1. Vorgehensweise

Eine Vielzahl von Komponenten (Tide, Fernwelle, Wind, Buchteneffekte, Meeresspiegelanstieg etc.) führen zu hohen Wasserständen im Sturmflutfall, deren Überlagerung nicht linear ist. Untersuchungen zur Überlagerung von Stau und der Tidephase ergaben, dass sich ab einer kritischen Windgeschwindigkeit von 19- 20 m/s (Stundenmittel) der tideerzeugte Wasserstand gegenüber dem winderzeugten Wasserstand reduziert (Bremer et al. 2009). Ausgehend von der Beobachtung, dass der gemessene Stau zu Niedrigwasser größer ist als zu Hochwasser (Anutsch 1978) stellt sich die Frage ob auch der Stau zu Springtide kleiner ausfällt als bei Nipptide. Die Untersuchung der Überlagerung von Stau und astronomischer Abweichung ist für eine ganze Reihe von Fragestellungen im Küstenbereich von Interesse und wurde in verschiedenen Projekten betrachtet z.B. Keers (1968), MUSE (Jensen et al. 2006), XtremRisk (Gönnert & Triebner 2010), Bruss et al. 2010).



**Abbildung 52: Gekoppelte Modelle Kontinentales Schelf Modell und Deutsche Bucht Modell**

Ziel der Untersuchung im Rahmen dieses Projektes war es, die Überlagerung von winderzeugtem Stau und astronomischer Abweichung (Nipp-, Springvariation) genauer zu beschreiben, um evtl. nicht lineare Effekte bei der Vorhersage berücksichtigen zu können. Dazu wurden ausgewählte Sturmfluten wiederholt numerisch modelliert und die Winddaten dabei zeitlich in Schritten über einen Nipp-Spring-Zyklus verschoben. Diese Modellierungen erfolgten unter der Modellumgebung Delft3D (Version 4.00.02), das verwendete Modul Delft3D-Flow ist ein multidimensionales hydrodynamisches Simulationsprogramm, das instationäre Strömungs- und Transportvorgänge verursacht durch Tide und meteorologische Einwirkungen auf Basis eines versetzten, orthogonal gekrümmten Gitters berechnet. Das Programm löst die dreidimensionalen Flachwassergleichungen und die Kontinuitätsgleichungen mit einem impliziten Finite-Differenzen-Verfahren. Das Programm geht zurück auf eine Entwicklung von LEENDERTSE (1967); nähere Erläuterungen zu dem Programm sind in DELTARES (2011) zu finden. Für die Untersuchungen hier wurden die

Modelle im zwei-dimensional-horizontalen Modus betrieben, somit handelt es sich bei den modellierten Strömungen um tiefengemittelte Werte.

Für die Modellierungen wurden die an der Forschungsstelle etablierten und bewährten Modelle Kontinentales Schelf Modell (CSM) mit einer räumlichen Auflösung von ca. 8 km in der südlichen Nordsee und das genesteten Deutsche Bucht Modell mit einer Auflösung von etwa 330 m im Bereich der ostfrischen Inseln verwendet (Abb. 52). Das CSM bildet an den Rändern mittels harmonischer Konstanten die Tidebewegung im Nordatlantik ab, die dann in die Nordsee propagiert und überlagert mit den Wind- und Luftdruck induzierten Wasserstandsänderungen als Wasserstandszeitreihen an das Deutsche Bucht Modell übergeben wird. Als meteorologischer Eingabewerte (Luftdruck und Wind) wurden die Daten aus dem Cosmo- EU Modell mit Nudging benutzt.

### 3.6.2. Analyse

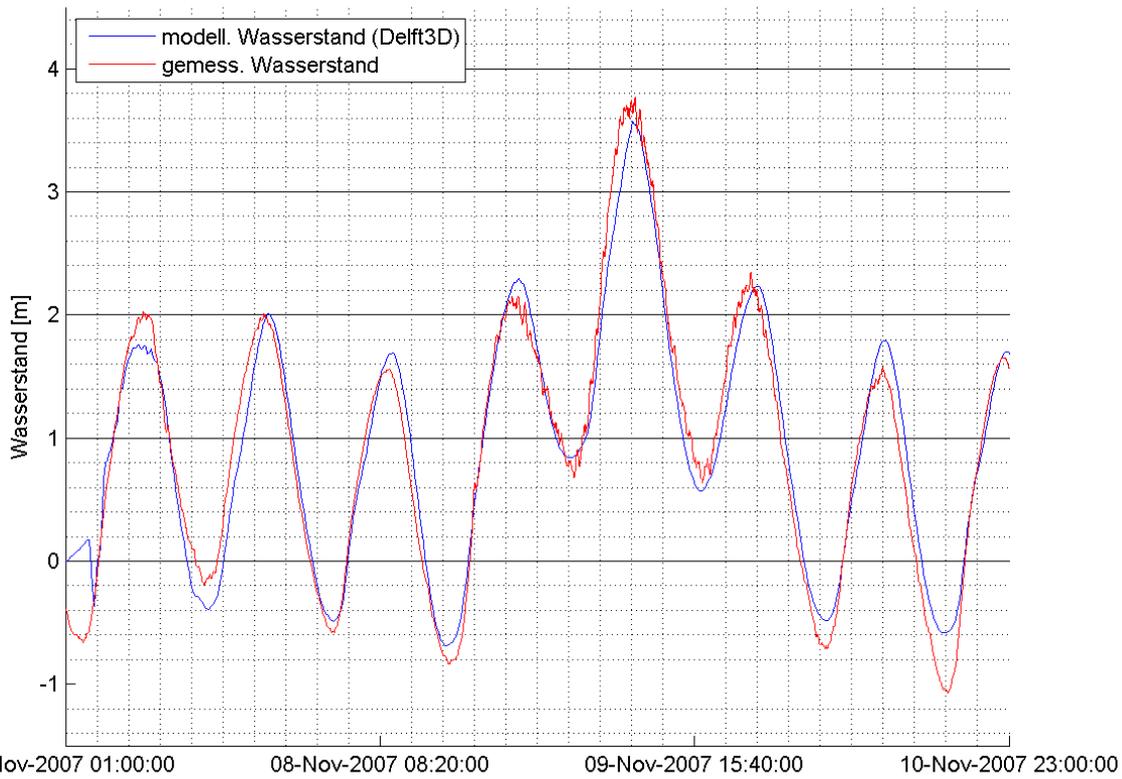
Um repräsentative Windfelder für die weitere Analyse auswählen zu können, wurde für jedes der 39 Windfelder ein Video des gesamten Windgeschwindigkeitsverlaufs und eine Grafik der lokalen Windgeschwindigkeitsentwicklung im Bereich Norderney erzeugt. Für die Auswahl der zu untersuchenden Windfelder wurden zeitlich und räumlich möglichst lange und einheitliche Fetch, eine Spannbreite an max. erzeugten Wasserständen am Pegel Norderney und Windrichtungen aus West bis Nordnordwest bevorzugt (Tabelle 7).

**Tabelle 7: Ausgewählte sturmfluterzeugende Windfelder für die Untersuchung der Überlagerungseffekte**

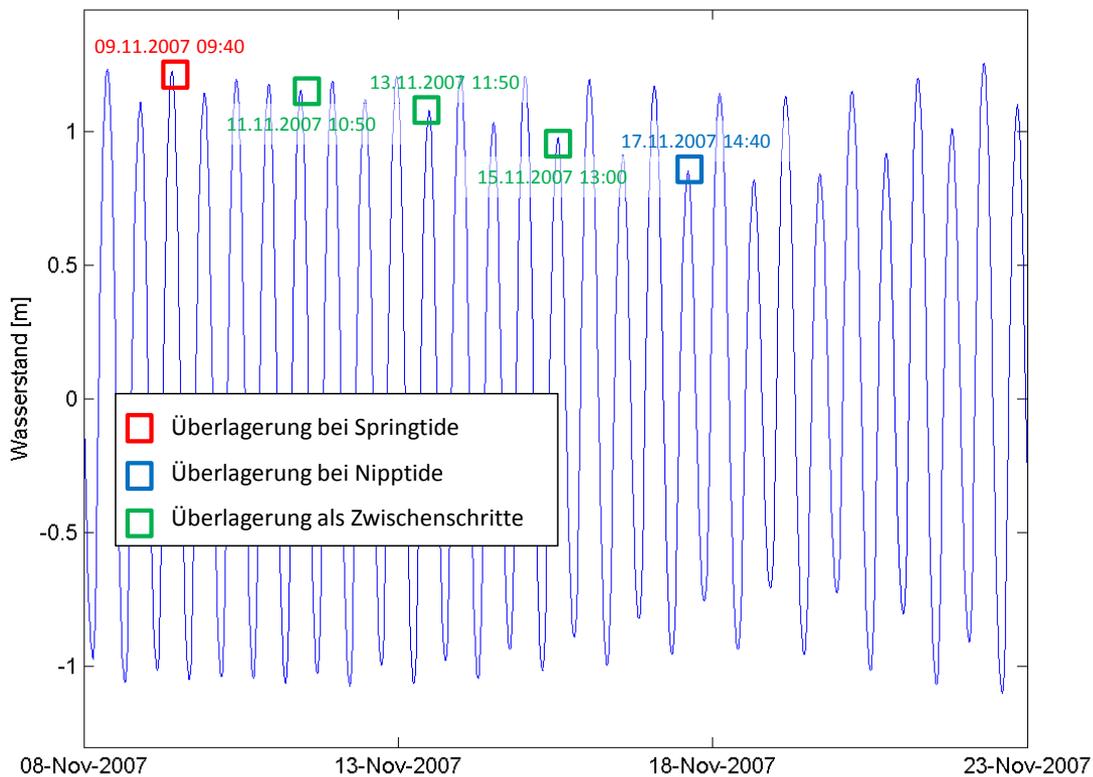
Sturmflut	DWD- Winddaten	Max. Stau gegen MThw (Norderney) [cm]	Windrichtung (Norderney)
31.12.1977	28.12.1977 – 31.12.1977	248	NNW
09.12.1993	07.12.1993 – 11.12.1993	147	W
28.01.1994	25.01.1994 – 31.01.1994	247	NNW
01.01.1995	30.12.1994 – 03.01.1995	201	NNW
09.11.2007 (Thilo)	07.11.2007 – 11.11.2007	255	NNW

Die Ergebnisse der Nachrechnung aus dem Deutsche Bucht Modell wurden für die anschließende Analyse genutzt. Beispielhaft zeigt Abbildung 53 einen Vergleich der Wasserstände aus der Modellierung und die tatsächlich gemessenen Wasserstände am Pegel Norderney Riffgat für die Sturmflut vom 09.11.2007 mit einer relativ gute Übereinstimmung der Daten.

Die tatsächliche Sturmflut vom 09.11.2007 hat sich zeitlich in der Nähe eines astronomischen Springtide-Hochwassers ereignet (Abb. 54, rote Markierung). In einem weiteren Durchlauf werden nun die Winddaten zeitlich so verschoben, dass sie mit dem ca. 7 Tage späteren Nipptide-Hochwasser am 17.11.2007 zusammenfallen. Zwischen dem Spring- und Nipptide-Hochwasser werden Tidehochwasser für weitere Überlagerungen so ausgewählt, dass ein schrittweiser Übergang von Spring- zu Nipptide gegeben ist (Abb. 54). Es wird also das gleichbleibende Windfeld zeitlich verschoben und zwar immer um die Zeitdifferenz der entsprechenden astronomischen Tidehochwasserscheitel (siehe als Beispiel Tab. 8) und mit nachfolgenden Tidehochwassern überlagert, so dass sich die astronomische Abweichung schrittweise reduziert. Zusätzlich werden dann die genesteten Modelle ohne meteorologische Daten über den Zeitraum betrieben um die jeweiligen rein astronomischen Wasserstände aus dem Modell zu erhalten.



**Abbildung 53: Vergleich der gemessenen und berechneten Wasserstände am Pegel Norderney Riffgat für die Sturmflut vom 09.11.2007**

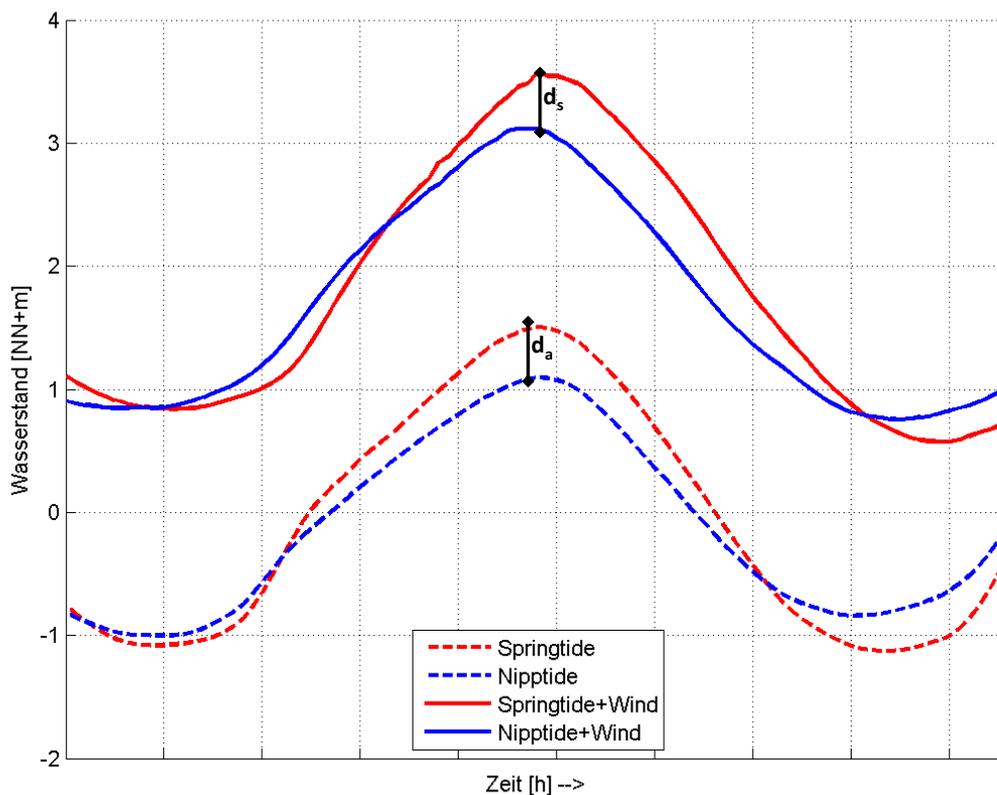


**Abbildung 54: Astronomischer Tidenverlauf am Pegel Norderney Riffgat vom 08.11. bis 23.11.2007, sowie Hochwasser die für die Überlagerung mit dem Windfeld genutzt werden**

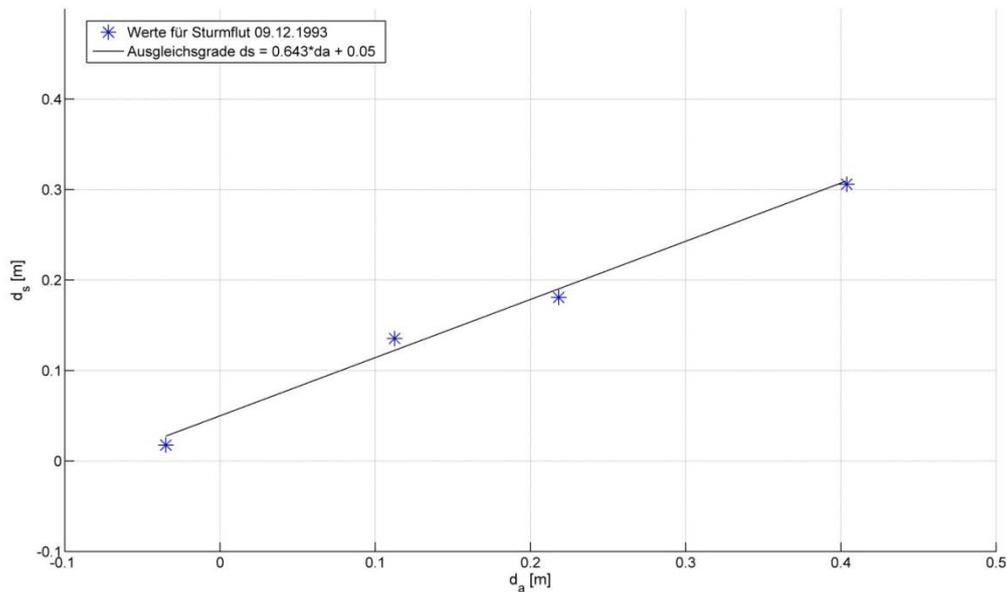
**Tabelle 8: Beispiel für den Zeitlichen Abstand zwischen den Hochwassern, die zur Überlagerung mit dem Wind genutzt werden - Sturmflut „Tilo“**

Sturmflut-hochwasser	1.Verschiebung (Differenz)	2.Verschiebung (Differenz)	3.Verschiebung (Differenz)	4.Verschiebung (Differenz)
09.11.2007, 09:30	11.11.2007, 11:10 (49.7 Stunden)	13.11.2007, 12:20 (98.8 Stunden)	15.11.2007, 12:20 (148 Stunden)	17.11.2007, 15:00 (197.5 Stunden)

Betrachtet wird für die Analyse das Verhältnis der jeweiligen Differenzen zwischen den Scheitelwerten mit meteorologischem Einfluss ( $d_s$ ) und den Differenzen zwischen den nur auf der Astronomie beruhenden Scheitelwerten ( $d_a$ ). Dabei beziehen sich diese Differenzen immer auf das Springtidehochwasser (Abb. 55; für eine bessere Vergleichbarkeit sind die Wasserstandsverläufe in der Abbildung so übereinander geschoben, dass die lokalen Maxima direkt übereinander liegen). Da die Verschiebung zwischen Spring und Nipptide über mehrere Schritte durchgeführt wurde, wurden mehrere Verhältnisse zwischen der Gesamt-Staudifferenz und der Differenz der astronomischen Scheitel ermittelt, für die eine Ausgleichsgrade bestimmt werden kann (Abb. 56).

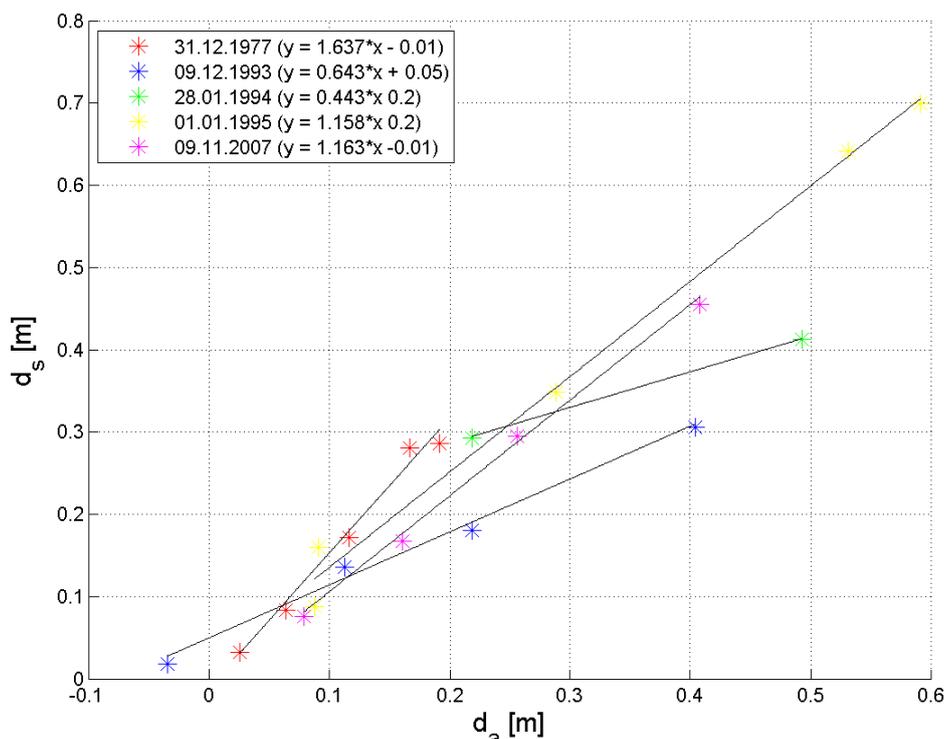


**Abbildung 55: Wasserstandsverläufe der astronomischen Tidekurve bei Spring- und Nipptide sowie deren Überlagerung mit dem Windstau**



**Abbildung 56: Darstellung des Verhältnisses  $d_a$  (Differenzen astronomischer Wasserstand) zu  $d_s$  (Differenzen Wasserstand aus Astronomie und Wind) für den Pegel Norderney Riffgat auf Basis der Sturmflut Dezember 1993**

In dem dargestellten Beispiel sind die Differenzen des Gesamtwasserstandes jeweils kleiner als der Anstieg der Astronomie - entsprechend der allgemeinen Erwartung, dass mit einem höheren Wasserstand der Gesamtstau geringer wird und es keine lineare Addition von astronomischen Abweichung und dem Windstau gibt. Betrachtet man das Verhältnis von  $d_a$  zu  $d_s$  für weitere Sturmfluten (Abb. 57) so ergibt sich ein sehr uneinheitliches Bild. Für einiger Sturmfluten – die vom 09.11.2007, 01.01.1995 und 31.12.1977 - ist der Anstieg des Gesamtwasserstands  $d_s$  am Pegel Norderney wider Erwarten größer (16%, 16% und 64%) im Vergleich zum Anstieg des astronomischen Wasserstands  $d_a$ . Während der Sturmfluten vom 09.12.1993 und 28.01.1994 hingegen ist der Anstieg des Gesamtwasserstandes  $d_s$  am Pegel Norderney um 36% bzw. 56% wie erwartet geringer als der Anstieg der Astronomie  $d_a$ .



**Abbildung 57: Darstellung des Verhältnisses  $d_a$  zu  $d_s$  für die Sturmfluten vom 31.12.1977, 09.12.1993, 28.01.1994, 01.01.1995 und 09.11.2007 für den Pegel Norderney Riffgat**

Die Fälle in denen die Änderung des Gesamtwasserstands  $d_s$  größer ist als die Änderung der Astronomie  $d_a$  entbehren einer direkten Erklärung, da lediglich der Wasserstand infolge Astronomie variiert wird und weiterhin identische Winddaten für die Überlagerungen verwendet werden. Daher sollte der Gesamtwasserstandsanstieg nicht höher als ein astronomischer Wasserstandsanstieg ausfallen.

Es können mehrere mögliche Ursachen für die insgesamt un schlüssigen Ergebnisse vermutet werden: Die zeitliche und räumliche Inhomogenität der Windfelder und die damit einhergehende unterschiedlichen veränderten Wasserstände bereits vor der eigentlichen Sturmflut („Vorfüllung der Nordsee“) beeinflussen auch die Wasserstände zum Sturmflutscheitel. Eine weitere mögliche Fehlerquelle besteht in Ungenauigkeiten bei der zeitlichen Zuordnung von Windfeld und Tidescheitel, zu der es bei der Verschiebung der Windfelder über die Tidekurve gekommen sein kann. Des Weiteren zeigen die modellierte astronomische Tidekurven zwischen Nipp- und Springtide in ihrer Form Unterschiede insbesondere im ansteigenden Ast, die in Überlagerung mit dem Windfeld zu veränderten Staukurven und zu einer Überdeckung der erwarteten Effekte geführt haben könnte. Auch eine Beeinflussung durch die Modelltechnik ist denkbar, da in dem 2D-Modell die mit einer erhöhten Vorfüllung veränderten Rückströmeffekte über die Bodenrauigkeiten gesteuert werden und eventuell in Kombination mit der relativ groben Auflösung nicht exakt genug wieder gegeben werden.

Es wurden eine Reihe von Test durchgeführt, um den möglichen Ursachen nach zugehen. So wurde das Windfeld zeitlich in kleinen Schritten um das Tidehochwasser herum verschoben um die Sensitivität auf etwaige Fehler bei der Zeitzuordnung zu den Tidescheiteln abschätzen zu können. Die Unterschiede waren jedoch nur gering. Um grundsätzliche Probleme aus der Modelltechnik heraus auszuschließen, wurde das Deutsche Bucht Modell schematisch mit konstantem Wasserständen von NN+1 m, NN+1.5 m, NN+2 m betrieben und mit einem Windfeld überlagert. An den Auswertepunkten Norderney und Cuxhaven war die Differenz der Gesamtwasserstände (Anfangswasserstand + winderzeugter Wasserstand) zwischen diesen Tests wie erwartet etwas geringer als die vorgegeben Schrittweite von 50 cm. Somit stellt das Modell den erwarteten Überlagerungsvorgang tendenziell korrekt dar.

Letztendlich ist davon auszugehen, dass das Zusammenwirken verschiedener Ursachen zu den uneinheitlichen Ergebnissen dieses Analyseansatzes geführt hat. Die ursprünglich geplante Untersuchung weiterer Überlagerungseffekte zwischen Stau und Fernwelle, Stau und Tide oder Stau und evtl. Seebären macht in dieser Form angesichts der oben beschriebenen Probleme jedoch keinen Sinn und wurde daher nicht weiter verfolgt.

#### 4. Praxistest: Sturmflut „Xaver“ im Dezember 2013

Die neuen Vorhersageverfahren (trigonometrischer Ansatz und Künstliche Neuronale Netze) werden im laufenden Betrieb des NLWKN neben dem alten Vorhersageverfahren getestet. Anfang Dezember 2013 hat das Sturmtief „Xaver“ eine Reihe von Sturmzeiten an der niedersächsischen Nordseeküste erzeugt, wobei die Sturmzeit am frühen Morgen des 6. Dezembers eine der höchsten Sturmfluten der letzten Jahrzehnte darstellt. Der absolute Wasserstand entsprach am Pegel Norderney Riffgat mit PN+906cm dem von 1962, der Stau gegen das mittlere Tidehochwasser fiel –auf Grund des mittlerweile erfolgten MThw-Anstiegs- etwas geringer als 1962 aus.

In Abbildung 58 sind die Vorhersagewerte vom Morgen des 5. Dezembers, also etwa 15 Stunden vor dem Eintritt des Hauptsturmflutscheitels, für den Pegel Norderney dargestellt. Die Vorhersage basierte auf den numerischen Modellergebnissen des DWD für Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Luftdruck unter Verwendung des COSMO-EU-Modelllaufs vom 5. Dezember 00:00 Uhr.

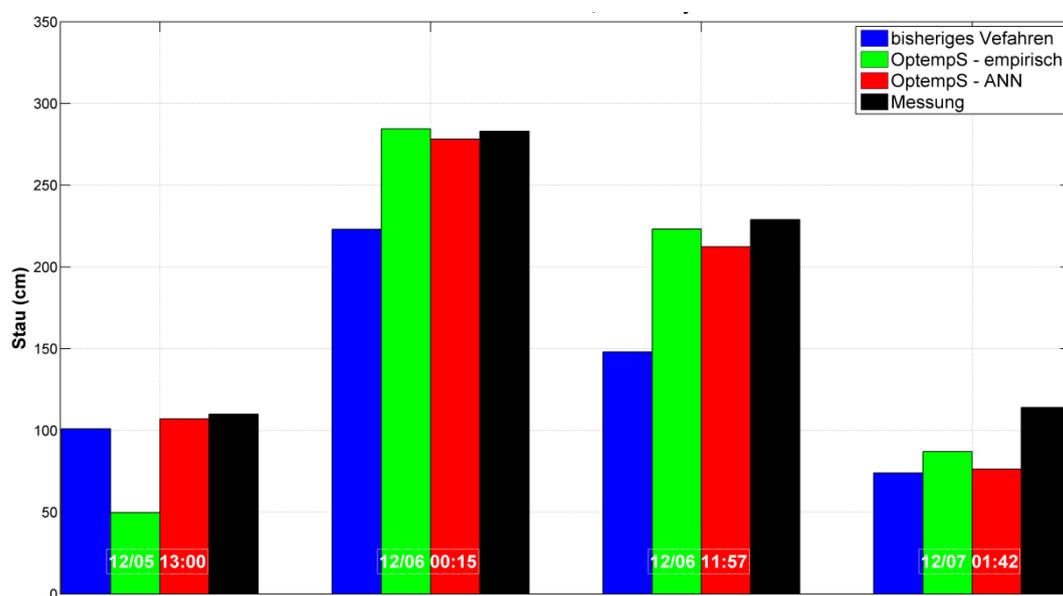
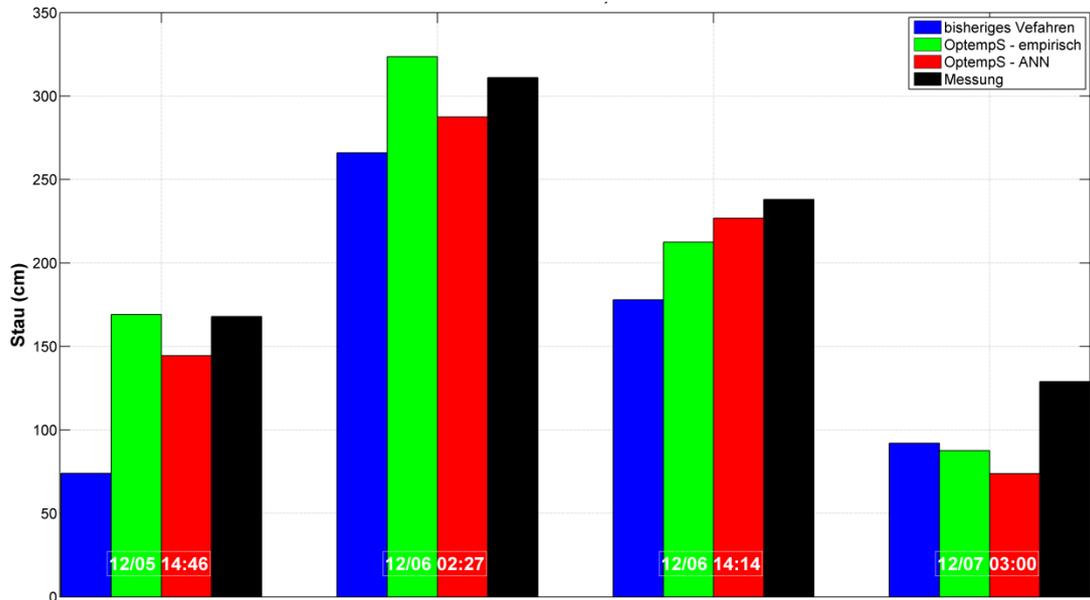


Abbildung 58: Berechneter und vorhergesagter Stau am Pegel Norderney für die Sturmflut „Xaver“

Der trigonometrische Ansatz sowie der Ansatz mit den Künstlichen Neuronalen Netzen lieferten ein sehr gutes Vorhersageergebnis für die beiden höheren Sturmzeiten mit einer Abweichung von weniger als 20 cm für den Pegel Norderney. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse dieser Verfahren gegenüber der bisherigen Methode eine deutliche Verbesserung. Hier kommt zum Tragen, dass bei diesem Ereignis mit Sturm aus Nordwest über nahezu die gesamte Länge der Nordsee (siehe Abb. 4 rechts), dass alte Verfahren – den Wind nur in der Deutschen Bucht berücksichtigend- den Eintrag aus der nördlichen Nordsee nicht mit einrechnen kann, während die neuen Verfahren explizit auf diesen Fall abzielen. Die erste Sturmzeit wird außer durch den trigonometrischen Ansatz ebenfalls sehr gut vorher berechnet. Für das Versagen des trigonometrischen Modells in diesem Fall konnte bisher kein Grund gefunden werden. Die Abweichungen für die letzte vorhergesagte Sturmzeit am 7. Dezember sind höher als für die beiden Hauptsturmzeiten, allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass zwischen der Windvorhersage und dem Ereignis mehr als 48 Stunden liegen.

Die Ergebnisse für Cuxhaven sind ähnlich (Abb. 59), wenn auch die tatsächlich eingetretenen Wasserstände nicht ganz so gut vorhergesagt wurden wie für Norderney.



**Abbildung 59: Berechneter und vorhergesagter Stau am Pegel Cuxhaven für die Sturmflut „Xaver“**

Es sei in diesem Zusammenhang aber auch daraufhin gewiesen, dass die Vorhersagen mit den im Projekt ermittelten Ansätzen bei der jüngsten Sturmflut am 11.01.2015 Werte lieferten, die deutlich – in der Größenordnung eines halben Meters- unter dem eingetretenem Stau an der niedersächsischen Küste lagen. Eine eindeutige Erklärung konnte bisher nicht gefunden werden. Dieses Ereignis zeigte somit nochmals die Grenzen der empirisch basierten Sturmflutvorhersage auf.

## 5. Zusammenfassung

Ziel des Projektes war die Optimierung der empirischen Sturmflutvorhersage für die niedersächsische Küste auf Basis der meteorologischen Daten ausgewählter Sturmfluten und statistischer Betrachtungen der Pegel entlang der Nordseeküste. In diesem Zusammenhang hat der DWD einen Katalog von 39 nachgerechneten hoch aufgelösten Sturmereignissen aus den Jahren 1962 bis 2011 erarbeitet, die zu Sturmfluten an der Deutschen Nordseeküste geführt haben. Mit den Ergebnissen dieser hoch auflösenden Windmodellierungen sind neue Berechnungsansätze für die Ermittlung des Staus an der niedersächsischen Küsten abgeleitet und vergleichend zu den bisherigen empirischen Vorhersageverfahren des Sturmflutwarndienstes der NLWKN-Forschungsstelle Küste angewendet worden.

Die vom DWD bereit gestellten numerischen meteorologischen Eingangsdaten der 39 Sturmflutmodelle wurden dahingehend aufbereitet, dass über der Nordsee Regionen detektiert wurden, die für die Stauentwicklung an der niedersächsischen Küste besonders relevant sind. In diesen 5 Gebieten (2 zwischen Schottland und den Shetland-Inseln, 1 vor Südengland und 2 im Bereich der Deutschen Bucht) wurden zur Datenreduktion räumliche Mittel der Windwerte berechnet. Darüber hinaus wurden die Daten zeitlich über drei Stunden gemittelt sowie ein zeitlicher Versatz von 1 Stunde pro 75 km von Windausgabebereich bis zum betrachteten Wasserstandsvorhersageort eingerechnet.

Mit den so aufbereiteten meteorologischen Daten wurden multiple lineare Regressionen zum Stau an den Pegeln Norderney, Cuxhaven, Alte Weser und Wangerooge West ermittelt. Diese Berechnungen erfolgten getrennt für die Hochwasser- und Niedrigwasserscheitelwerte sowie für die vollständigen Ganglinien während der 39 untersuchten Sturmflutsituationen. Die RMSE zwischen gemessenem und berechnetem Stau betragen bis zu 37 cm. Die geringste Streuung zeigt die Regression mit den Hochwasserscheitelwerten mit RSME Werten zwischen 25 und 30 cm.

Der Stau an den Pegeln Emden, Bengersiel, Wilhelmshaven und Bremerhaven wurde anhand des lokalen Windes und dem Stau an vorgelagerten Pegeln (Borkum, Norderney, Alte Weser und Wangerooge West) hergeleitet. Es wurden ebenfalls Regressionsformeln für Hochwasser- und Niedrigwasserscheitelwerte bestimmt. Die Standardabweichungen der Residuen als Maß für die Streuung liegen unter 10 cm und sind in etwa gleich gut für Hochwasser- und Niedrigwasserscheitelregression. Als Vorlaufpegel für Emden und Bengersiel eignet sich am besten Norderney, für Wilhelmshaven der Vorlaufpegel Wangerooge West und für Bremerhaven der Vorlaufpegel Alte Weser.

Eine weitere Variante der Stauvorhersage wird für die kurzfristige Vorhersage wenige Stunden vor dem Hochwasser genutzt. Dazu wird eine Hochrechnung des Pegels Terschelling nach Norderney anhand der gemessenen Stauwerte und lokalen Windverhältnisse durchgeführt. Die Hinzunahme des lokalen Windes in die Regressionsbeziehung bringt dabei eine Verbesserung der Vorhersage, während die Berücksichtigung weiterer Parameter wie z.B. der Stau zum vorhergehenden Niedrigwasser, die Anstiegsrate in Terschelling usw. keine signifikante Verbesserung mehr brachte.

Die neu ermittelten Stauberechnungen werden unter Verwendung einer neuen Matlab basierten Benutzeroberfläche in der Routinevorhersage des NLWKN verwendet und vergleichend neben den älteren Vorhersageformeln betrachtet. Für die Sturmflut vom 6. Dezember 2013 („Xaver“) haben die neuen Berechnungsformeln sehr gute Stauvorhersagen geliefert. Zusätzlich wird die

Anwendung Künstlicher Neuronaler Netze für die Stauvorhersage an den Pegeln Norderney, Wangerooge West, Alte Weser und Cuxhaven erprobt. Diese liefern für Ereignisse, deren Winddaten innerhalb der Spannbreite der trainierten Fälle liegen, gute Ergebnisse, aber im täglichen Routinebetrieb zeigen sich häufig stark abweichende Ergebnisse und somit ist bei dieser Methodik der Vertrauensbereich schwer abschätzbar.

### 5.1. Verwertung der Ergebnisse

Das Projekt mündet unmittelbar in einer Verbesserung der empirischen Sturmflutvorhersage für die niedersächsische Küste. Die gewonnenen Kenntnisse zur Windeinwirkung, statistischen Zusammenhängen der Stauentwicklung sowie der Nutzbarkeit Künstlicher Neuronaler Netze in diesem Arbeitsfeld lassen sich jedoch prinzipiell auch auf andere Gebiete der deutschen Nordseeküste übertragen und gegeben Falls zum Beispiel in Kombination mit Ergebnisse aus dem Projekt OPTEL auch in die Ästuare hinein. Darüber hinaus stellen einzelne Teile des Vorhabens auch einen Beitrag zur Frage der naturähnlichen Modellierung von Sturmfluten dar, der auch hinsichtlich anderer Fragestellungen der Küstenforschung und des Küstenschutzes von Wert sein kann.

Für das Gesamtprojekt ist hervor zu heben, dass der DWD mit dem Katalog der 39 hochaufgelösten Sturmflutsituationen eine wertvolle Datenbasis für verschiedenste Untersuchungen im Nordseeraum geschaffen hat.

### 5.2. Ausblick

Aus den numerisch modellierten und gemessenen Winddaten sind neue Zusammenhänge für den Stau an den niedersächsischen Küsten- und Inselpegeln hergestellt worden. Diese werden seit einigen Monaten im Routinebetrieb der Sturmflutvorhersage am NLWKN getestet. Zukünftig gilt es, den Test der neuen Zusammenhänge im laufenden Betrieb fortzuführen und die Ansätze durch Vergleich der vorhergesagten Wasserstände mit den tatsächlich gemessenen Wasserständen weiter zu optimieren. Darüber hinaus müssen praktische Erfahrungen gewonnen werden, welcher Ansatz für welche Wind- und Tidekonstellationen die besten Abschätzungen liefert. Des Weiteren ist die Matlab basierte Benutzeroberfläche zu verbessern und weiter dem Bedarf der täglichen Arbeit anzupassen.

## 6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Sturmfluten an der niedersächsischen Küste .....	3
Abbildung 2: Die niedersächsische Küste zwischen Ems und Elbe an der südlichen Nordsee .....	5
Abbildung 3: Windstaudefinition (Oumeraci 2001) .....	5
Abbildung 4: Sturmflut erzeugende Windfelder: 'Christian' (28.10.2013) sehr kurz mit hohen Windgeschwindigkeiten aus südwestlicher Richtung (erzeugte nur eine leichter Sturmflut) und 'Xaver' (6.12.2013) mit langem ausgedehnten Fetch aus nordwestlicher Richtung (erzeugte eine sehr schwere Sturmflut) .....	6
Abbildung 5: Sturmfluttypen unterschieden nach den Zugbahnen der Tiefdruckgebiete (aus Oumeraci 2001 nach Prügel und Schelling in Petersen und Rhode 1991) .....	7
Abbildung 6: Modellgebiet von COSMO: Die roten Umrandungen zeigen die Gebiete der im Projekt verwendeten Modelle, die blauen Umrandungen stellen die Gebiete der operationellen Versionen dar (Brecht & Frank, 2014a).....	13
Abbildung 7: Lage der verwendeten Wasserstandspegel .....	15
Abbildung 8: Lage der Windmessstationen und bisher benutzte Windausgabepunkte des SEEWIS-Systems in der Deutschen Bucht.....	17
Abbildung 9: Vergleich der Regressionsberechnungen für den Pegel Norderney bei unterschiedlicher Mittelung von küstenfernem („S“) und küstennahem („K“) Wind.....	19
Abbildung 10: Vergleich der Regressionsberechnungen für den Pegel Norderney bei unterschiedlicher Gruppierung der Windrichtung und der Stauwerte, sortiert nach Windrichtung (oben) und Windstauhöhe (unten).....	20
Abbildung 11: Theoretische Windstaukurven für Norderney bei Aufteilung der Windmessungen in 60°-Windrichtungsklassen und unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (WS) .....	21
Abbildung 12: Ausgewählte Windpunkte über der Nordsee, extrahiert aus den DWD-Windfeldern der COSMO-EU Modellierung (1 Grad Gitter).....	23
Abbildung 13: 18 Windvorhersagegebiete für die ein Mittelwind der eingeschlossenen Ausgabepunkte gebildet wird.....	23
Abbildung 14: Häufigkeit und Reihenfolge mit der die 18 Windgebiete während einer Stepwisefit- Regression gewählt wurden.....	24
Abbildung 15: Häufigkeit mit der die 18 Windgebiete während der Stepwisefit- Regression verwendet wurden.....	25
Abbildung 16: Vergleich der Streuung der Stauberechnungen für Norderney aus 20 Regressionen (StepwiseFit) unter Berücksichtigung von 5 oder 18 Windeingabegebieten über der Nordsee .....	26
Abbildung 17 RMSE (oben) und Bestimmtheitsmaß (unten) für die Regressionsergebnisse bei variiertem zeitlichem Versatz zwischen Wind und Stau.....	27
Abbildung 18: Einfluss des zeitlichen Versatzes zwischen dem Stau in Aberdeen und dem Stau in Norderney auf die Regressionsberechnung .....	29
Abbildung 19: Gemessener gegen berechneter Stau für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Norderney .....	30
Abbildung 20: Gemessener gegen berechneter Stau für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Norderney .....	31
Abbildung 21: Gemessener gegen berechneter Stau für gesamte Ganglinie am Pegel Norderney .....	31
Abbildung 22: Gemessener Stau Norderney (links) und Borkum (rechts) gegen gemessenen Stau Emden für Hochwasserscheitelwerte.....	33
Abbildung 23: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Norderney .....	33

Abbildung 24: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Borkum Fischerbalje .....	34
Abbildung 25: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Norderney .....	35
Abbildung 26: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte und den Pegel Emden. Startpegel ist Borkum Fischerbalje .....	35
Abbildung 27: Regressionsberechnung für Emden mit Startpegel Norderney für die Ganglinie ..	36
Abbildung 28: Gemessener Stau Norderney gegen gemessenen Stau Bengersiel für Hochwasserscheitelwerte .....	37
Abbildung 29: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bengersiel für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel ist Norderney) .....	37
Abbildung 30: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bengersiel für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel ist Norderney) .....	38
Abbildung 31: Gemessener Stau Wangerooge West (links) und Leuchtturm Alte Weser (rechts) gegen gemessenen Stau Wilhelmshaven Alter Vorhafen für Hochwasserscheitelwerte .....	38
Abbildung 32: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel ist Wangerooge West).....	39
Abbildung 33: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel ist Leuchtturm Alte Weser) .....	39
Abbildung 34: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Wangerooge West) .....	40
Abbildung 35: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Wilhelmshaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Leuchtturm Alte Weser) .....	40
Abbildung 36: Gemessener Stau Wangerooge West (links) und Alte Weser (rechts) gegen gemessenen Stau Bremerhaven für Hochwasserscheitelwerte .....	41
Abbildung 37: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel Wangerooge West) .....	42
Abbildung 38: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Hochwasserscheitelwerte (Startpegel Leuchtturm Alte Weser) .....	42
Abbildung 39: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Wangerooge West) .....	43
Abbildung 40: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Bremerhaven für Niedrigwasserscheitelwerte (Startpegel Leuchtturm Alte Weser) .....	43
Abbildung 41: Verlauf der Tidewelle in der Nordsee.....	44
Abbildung 42: Gemessener gegen den aus Terschelling hochgerechneten Stau in Norderney. Es wird der Polynomansatz für verschiedene Windklassen verwendet.....	45
Abbildung 43: Gemessener gegen den aus Terschelling hochgerechneten Stau in Norderney. Es wird der trigonometrischer Ansatz verwendet .....	46
Abbildung 44: Gemessener den aus Terschelling hochgerechneten Stau in Norderney. Es wird der erweiterte trigonometrische Ansatz verwendet .....	46
Abbildung 45: Standardabweichung der Residuen aufgeteilt nach Windrichtung in Norderney (oben) und Stauhöhe in Terschelling (unten).....	47
Abbildung 46: Gemessener Stau in Norderney und Wangerooge Wset .....	48
Abbildung 47: Beziehung zwischen dem Stau am Pegel Norderney und Wangerooge West - Vergleich der Messwerte und Berechnungen .....	48
Abbildung 48: Ablaufschema Künstliche Neuronale Netze .....	49
Abbildung 49: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Norderney (zum Vergleich sind die Ergebnisse der linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	50

Abbildung 50: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Norderney (zum Vergleich sind die Ergebnisse der linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	51
Abbildung 51: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Ganglinie am Pegel Norderney (zum Vergleich sind die Ergebnisse der linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	51
Abbildung 52: Gekoppelte Modelle Kontinentales Schelf Modell und Deutsche Bucht Modell ..	53
Abbildung 53: Vergleich der gemessenen und berechneten Wasserstände am Pegel Norderney Riffgat für die Sturmflut vom 09.11.2007 .....	55
Abbildung 54: Astronomischer Tidenverlauf am Pegel Norderney Riffgat vom 08.11. bis 23.11.2007, sowie Hochwasser die für die Überlagerung mit dem Windfeld genutzt werden .....	55
Abbildung 55: Wasserstandsverläufe der astronomischen Tidekurve bei Spring- und Nipptide sowie deren Überlagerung mit dem Windstau .....	56
Abbildung 56: Darstellung des Verhältnisses $d_a$ (Differenzen astronomischer Wasserstand) zu $d_s$ (Differenzen Wasserstand aus Astronomie und Wind) für den Pegel Norderney Riffgat auf Basis der Sturmflut Dezember 1993.....	57
Abbildung 57: Darstellung des Verhältnisses $d_a$ zu $d_s$ für die Sturmfluten vom 31.12.1977, 09.12.1993, 28.01.1994, 01.01.1995 und 09.11.2007 für den Pegel Norderney Riffgat.....	57
Abbildung 58: Berechneter und vorhergesagter Stau am Pegel Norderney für die Sturmflut „Xaver“ .....	59
Abbildung 59: Berechneter und vorhergesagter Stau am Pegel Cuxhaven für die Sturmflut „Xaver“ .....	60
Abbildung 60: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Wangerooge West.....	72
Abbildung 61: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Wangerooge West.....	72
Abbildung 62: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Leuchtturm Alte Weser .....	73
Abbildung 63: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Leuchtturm Alte Weser .....	73
Abbildung 64: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für gesamte Ganglinie am Pegel Leuchtturm Alte Weser .....	74
Abbildung 65: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Cuxhaven .....	74
Abbildung 66: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Cuxhaven .....	75
Abbildung 67: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für gesamte Ganglinie am Pegel Cuxhaven .....	75
Abbildung 68: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Wangerooge West (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt).....	76
Abbildung 69: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Wangerooge West (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	76
Abbildung 70: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Leuchtturm Alte Weser (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	77
Abbildung 71: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Leuchtturm Alte Weser (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	77

Abbildung 72: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Ganglinie am Pegel Leuchtturm Alte Weser (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	78
Abbildung 73: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Cuxhaven (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	78
Abbildung 74: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Cuxhaven (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	79
Abbildung 75: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Ganglinie am Pegel Cuxhaven (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt) .....	79

## 7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sturmflutdefinition nach DIN 4049; die angegebenen Grenzwerte wurden aus dem Stau gegen MThw aus der Zeitreihe 1951 bis 2010 ermittelt.....	8
Tabelle 2: Ausgewählte Sturmfluten .....	14
Tabelle 3: Übersicht über den Informationsgehalt der 39 Sturmflutzeiträume .....	16
Tabelle 4: Anzahl Messwerte, die an den Windmessstationen vorliegen .....	16
Tabelle 5: Ergebnisse der Regressionsrechnungen zwischen gemessenem Stau und meteorologische Daten für den Validierungsdatensatz .....	30
Tabelle 6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Stauberechnung mit Künstlichen Neuronalen Netzen und multipler Regression - RSME der Residuen der Validierungsdatensätze.	52
Tabelle 7: Ausgewählte sturmfluterzeugende Windfelder für die Untersuchung der Überlagerungseffekte .....	54
Tabelle 8: Beispiel für den Zeitlichen Abstand zwischen den Hochwassern, die zur Überlagerung mit dem Wind genutzt werden - Sturmflut „Tilo“ .....	56

## 8. Literaturverzeichnis

- ANNUTSCH, R. (1978): Über das empirisch-statistische Sturmflutvorhersageverfahren des Deutschen Hydrographischen Instituts. *Promet* 8 H. 4, S. 9- 12.
- BORK, I., JENSEN, J., KOZIAR, C., MUDERSBACH, C., MÜLLER-NAVARRA, S.H., RENNER, V. (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste (MUSE). Abschlussbericht, S. 304
- BORK, I., MÜLLER-NAVARRA, S.,H. (2011): Entwicklung eines operationellen Tideelbemodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHmod für die Nord- und Ostsee (OPTEL-A). BMBF-Förderkennzeichen 03KIS069, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg
- BRECHT, B., Frank, H. (2014a): Schlussbericht OptempS-MohoWif: Optimierung empirischer Sturmflutvorhersagen und Modellierung hoch auflösender Windfelder – Teilprojekt B: Modellierung hoch auflösender Windfelder an der deutschen Nordseeküste. BMBF-Förderkennzeichen 03KIS098, Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- BRECHT, B., FRANK, H. (2014b): High resolution modelling of wind fields for optimization of empirical storm flood predictions. *Adv. Sci. Res.* 11, 1-6
- BREMER, J.-A., GÖNNERT, G. (2009): Das Zusammenwirken von Tide und Sturmflut im Elbe-Ästuar. *Marburger Geographische Zeitschriften*, Heft 145, S. 17- 32.
- BRUSS, G., GÖNNERT, G., MAYERLE, R. (2010): Extreme scenarios at the German North Sea coast - A numerical model study. *Proceedings of the 32 Int. Conf. Coastal Eng.*, Shanghai, China, S. 13.
- COLDEWEY, H.-G. (2007): Vorsorglicher Sturmflutwarndienst des NLWKN – Erfahrungsbericht aus dem Winterhalbjahr 2006/2007. Dienstbericht (unveröff.)
- CHRISTIANSEN, H., SIEFERT, W. (1979): Grundzüge eines neuen Sturmflutvorhersage-Verfahrens für die deutsche Nordseeküste. *Die Küste* 34, S. 34.
- DELTA RES (2011): Delft3D-FLOW - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual Hydro-Morphodynamics. Delft
- DICK, S., MÜLLER- NAVARRA, S.,H., KLEINE, E. (1993): Das operationelle Modellsystem des BSH - Gegenwärtiger Stand und zukünftige Entwicklung. *Mitteilung Deutscher Meteorologischen Gesellschaft*, 3, S. 6-13.
- GANSKE; A., ROSENHAGEN; G: (2010): KFKI-Projekt OPTEL: Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die TideElbe. Fördernummer KFKI 101, Deutscher Wetterdienst , Hamburg
- GÖNNERT, G. (2003): Sturmfluten und Windstau in der Deutschen Bucht - Charakter, Veränderungen und Maximalwerte im 20. Jahrhundert. *Die Küste* 67, S. 185- 365.
- GÖNNERT, G., GERKENSMEIER, B., MÜLLER, J.M., SOSSIDI, K., THUMM, S. (2010): Zur hydrodynamischen Interaktion zwischen den Sturmflutkomponenten Windstau, Tide und Fernwelle (XtremRisk Zwischenbericht Teilprojekt 1a). Hamburg
- HANSEN, W. (1966): The reproduction of the motion in the sea by means of hydrodynamical-numerical methods. *Mitteilungen des Instituts für Meereskunde der Universität Hamburg*. Nr. 25, 57 S.
- HEIJER, den F., NOORT, J., PETERS, H., de GRAVE, P., OOST, A., VERLAAN, M. (2007): Allerheiligenvloed 2006 – Achtergrondverslag van de stormvloed van 1 november 2006. Rijkswaterstaat RIKZ, NL, 70 S.

- HUANG, W., MURRAY, C., KRAUS, N., ROSATI, J. (2003): Development of a regional neural network for coastal water level predictions. *Ocean Engineering* 30, S. 2275 – 2295.
- JENSEN, J., MUDERSBACH, C., MÜLLER- NAVARRA, S.H., BORK, I., KOZIAR, C., RENNER, V. (2006): Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, H. 71.
- KEERS, J., F. (1968): An empirical investigation of interaction between storm surge and astronomical tide on the east coast of Great Britain. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Jahrgang 21, Heft 3.
- KIM, S.Y., MATSUMI, Y., MASE, H., MORI, N., YASUDA, T. (2014): Development of real time storm surge forecasting using artificial neural network. ICHE 2014, Hamburg
- KREMP, C. (2011): KFKI-Projekt OPTEL: Windstaustudien und Entwicklung eines operationellen Tideelbmodells – OPTEL-C: Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. BMBF-Fördernummer 03KIS071. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg
- KRIESEL, D. (2005): Ein kleiner Überblick über Neuronale Netze (ZETA2-DE). [https://www.dkriesel.com/science/neural\\_networks](https://www.dkriesel.com/science/neural_networks)
- KRUHL, H. (1978): Sturmflut- Wetterlagen. *Promet* 8, Heft 4, S.6- 8.
- LEE, T.-L. (2006): Neural network prediction of a storm surge. *Ocean Engineering* 33, S. 483 – 494.
- LEENDERTSE J. J. (1967): Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation. RM-5294-RR. Rand Corporation, Santa Monica
- MÜLLER-NAVARRA, S.H., KNÜPFER, K. (2010): Improvement of water level forecasts for tidal harbours by means of model output statistics (MOS). Part I Skew surge forecast. *Ber. Bundesamtes für Seeschifffahrt u. Hydrographie* Nr. 47, Hamburg
- MÜLLER-NAVARRA, S.H., GIESE, H. (1999): Improvement of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. *Deutsche hydrographische Zeitschrift* 51,385 - 405.
- MÜLLER-NAVARRA, S.H., LANGE, W., DICK, S., SOETJE, K.C. (2003): 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, Nr. 1-4, 117 - 124
- NIEMEYER, H.D. (1987): Zur Klassifikation und Häufigkeit von Sturmtiden. *Jber. 1986 Forschungsstelle Küste, Norderney*, Bd. 36, 99-125
- NIEMEYER, H.D., KAISER, R. (1996): Sturmfluten. IN: *Umweltatlas Wattenmeer Band 2: Wattenmeer zwischen Elbe und Emsmündung*, Ulmer Verlag
- OUMERACI, H. (2001): *Taschenbuch der Wasserwirtschaft*, S.659- 744.
- OUMERACI, H.,GÖNNERT, G., JENSEN, J., KORTENHAUS, A., FRÖHLE, P.,GERKENSMEIER, B., WAHL, T., MUDERSBACH, C., NAULIN, M., UJEYL, G., PASCHE, E., DASSANAYAKE, D.R., BURZEL, A. (2012): Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten - Risikoermittlung und –beherrschung im Klimawandel (XtremRisk). Abschlussbericht BMBF Förderkennzeichen 03F0483A/B/C/D
- PETERSEN, M., RHODE, H. (1991): Sturmfluten. *Die großen Fluten an den Küsten Schleswig-Holsteins und in der Elbe*. 3. Aufl., Neumünster
- PHILIPPART, M.E, GEBRAAD, A. (1997): 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
- RÖSKE, F. (1997): Sea Level Forecasts Using Neural Networks. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Vol. 49, S. 71 -99.
- SCHMITZ, H.P. (1978): Sturmfluterzeugende Vorgänge in der Nordsee. Promet 8 H. 4, S. 2- 5.
- SIEFERT, W. (1980): Sturmflutvorhersage-Verfahren für Küsten und Flüsse im Tidegebiet. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, Nummer 34, S. 221- 234.
- SIEFERT, W., LASSSEN, H. (1985): Gesamtdarstellung der Wasserstandsverhältnisse im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht nach neuen Pegelbewertungen. Die Küste, Heft 42, S. 1- 77.
- SCHMITZ, H.,P. (1978): Sturmfluterzeugende Vorgänge in der Nordsee. Promet 8, Heft 4, S. 2-4.
- STORCH, H. von, WOTH, K. (2011): Sturmfluten. Historischen Sozialkunde, Geschichte-Fachdidaktik-Politische Bildung 41, Heft 3
- STROTMANN, T., RADEGAST, C., FERK, U. (2011): Windstaustudien und Entwicklung eines Operationellen Tideelbmodells (OPTEL) – Abschlussbericht des Teilprojektes OPTEL-D: Studien zur Stauentwicklung in der Tidelbe. BMBF-Fördernummer 03KIS072. Hamburg Port Authority, Hamburg
- TOMCZAK, G. (1952): Der Einfluss der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers an der deutschen Nordseeküste zwischen Ems und Elbe. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Band 5, Heft 5/6
- TOMCZAK, G. (1960): Über die Genauigkeit der Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Jahrgang 13, Heft 1, S. 1- 13.

## 9. Abkürzungen

ANN	Artificial Neural Network
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
COSMO	Consortium for Small Scale Modelling
CSM	Continental Shelf Model
$d_a$	Höhendifferenz zwischen zwei astronomisch berechneten Scheitelwasserständen
$d_s$	Höhendifferenz zwischen zwei Scheitelwasserständen
DWD	Deutscher Wetterdienst
ERA-40	meteorologische Re-Analysen für 1957 – 2002 des EZMW
ERA-interim	meteorologische Re-Analysen von 1979 bis heute EZMW
EZMW	Europäische Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage, Reading,GB
GME	Global Modell des Deutsche Wetterdienstes
HW	Hochwasser
KNMI	Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut
KNN	Künstliche Neuronale Netze
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
MThw	Mittleres Tidehochwasser
MTnw	Mittleres Tideniedrigwasser
MOS	Model Output Statistics
NW	Niedrigwasser
$p$	Luftdruck (hPa)
PN	Pegelnullpunkt
$R^2$	Bestimmtheitsmaß einer Korrelation (-)
RMSE	Root Mean Square Error
Std.abw.	Standardabweichung
UTC	koordinierte Weltzeit (Coordinated Universal Time)
WG	Windgeschwindigkeit (m/s)
WR	Windrichtung (° N)
WS	Windstau
WSV	Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

Abbildungen zur multiplen Regressionen für weitere Pegelstandorte

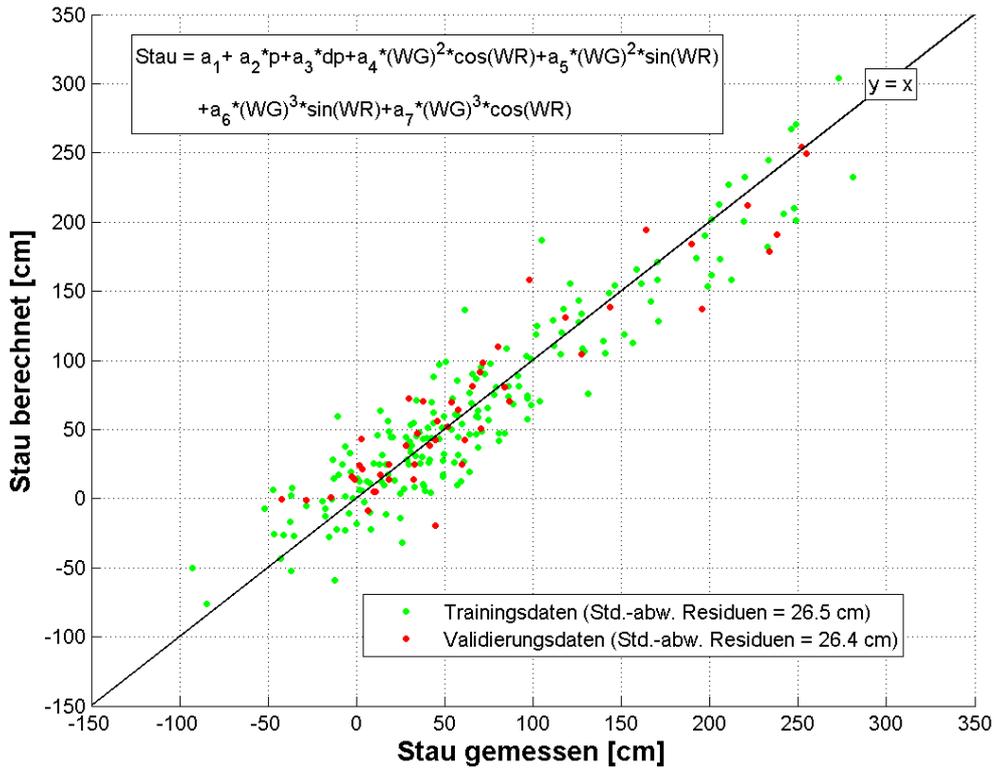


Abbildung 60: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Wangerooge West

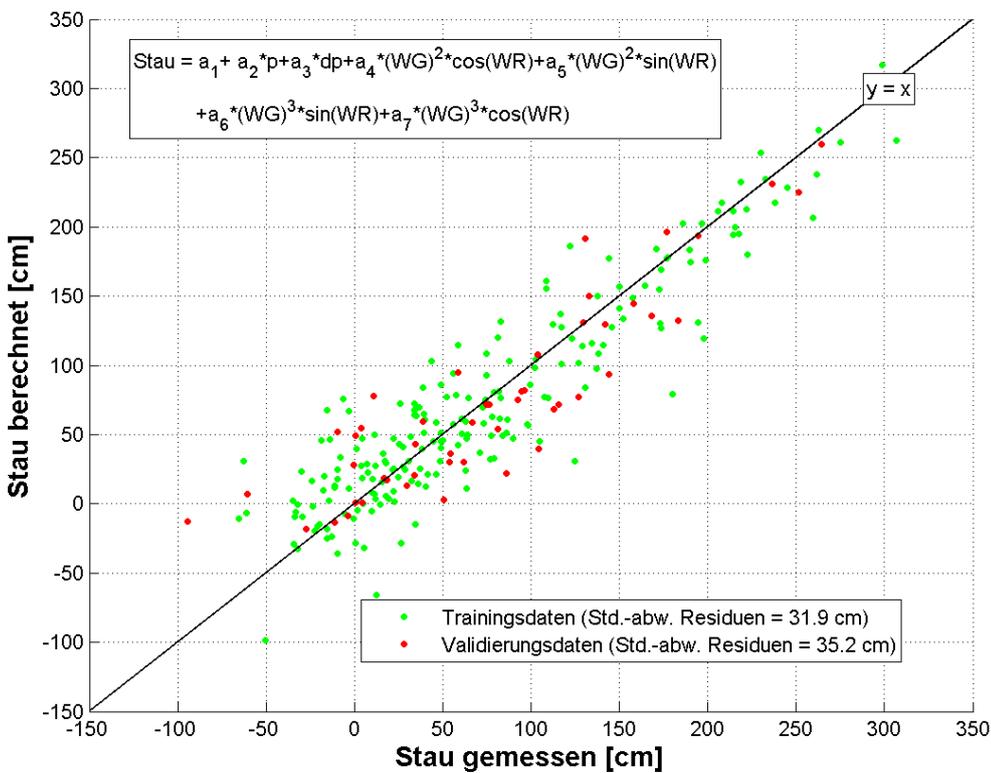


Abbildung 61: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Wangerooge West

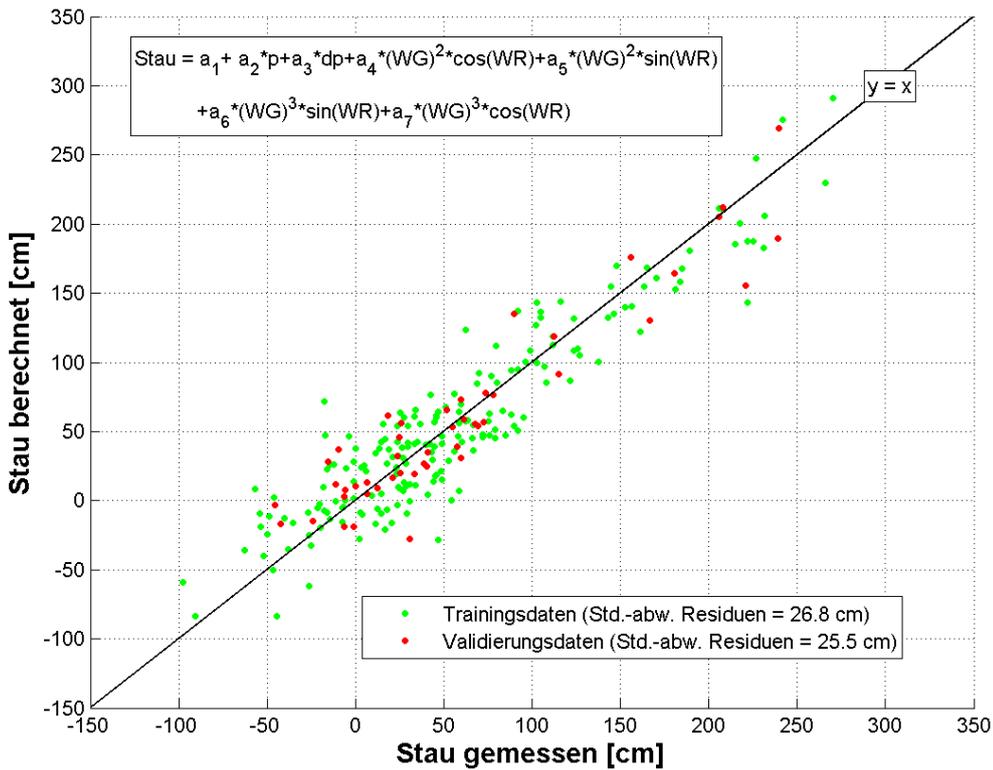


Abbildung 62: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Leuchtturm Alte Weser

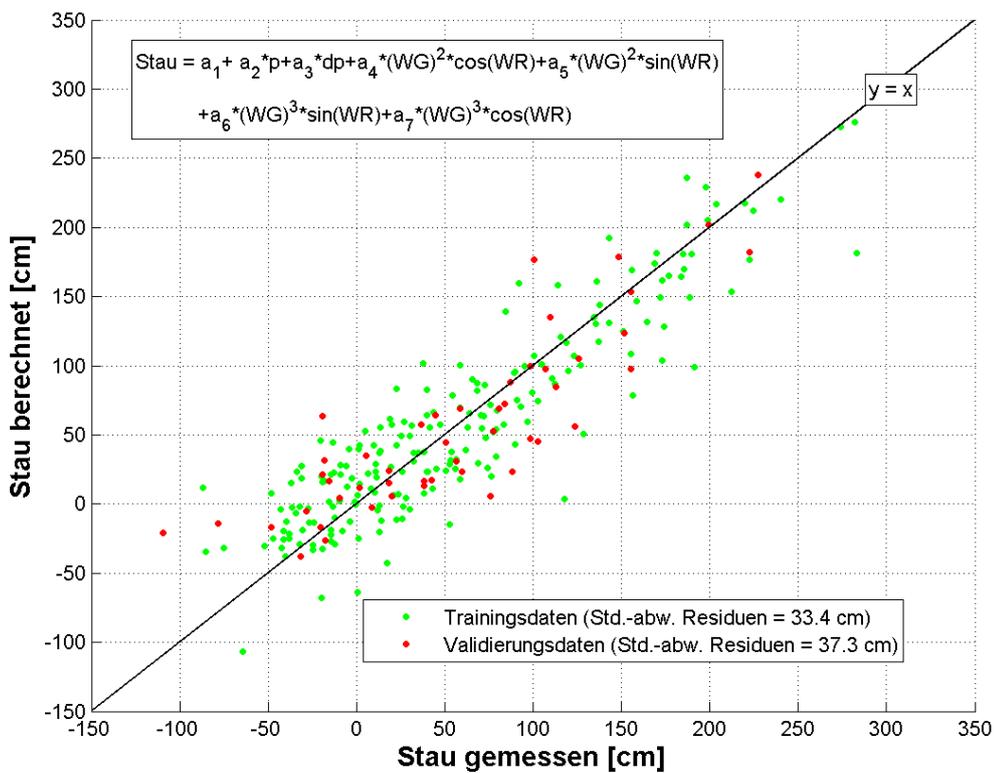


Abbildung 63: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Leuchtturm Alte Weser

Anhang

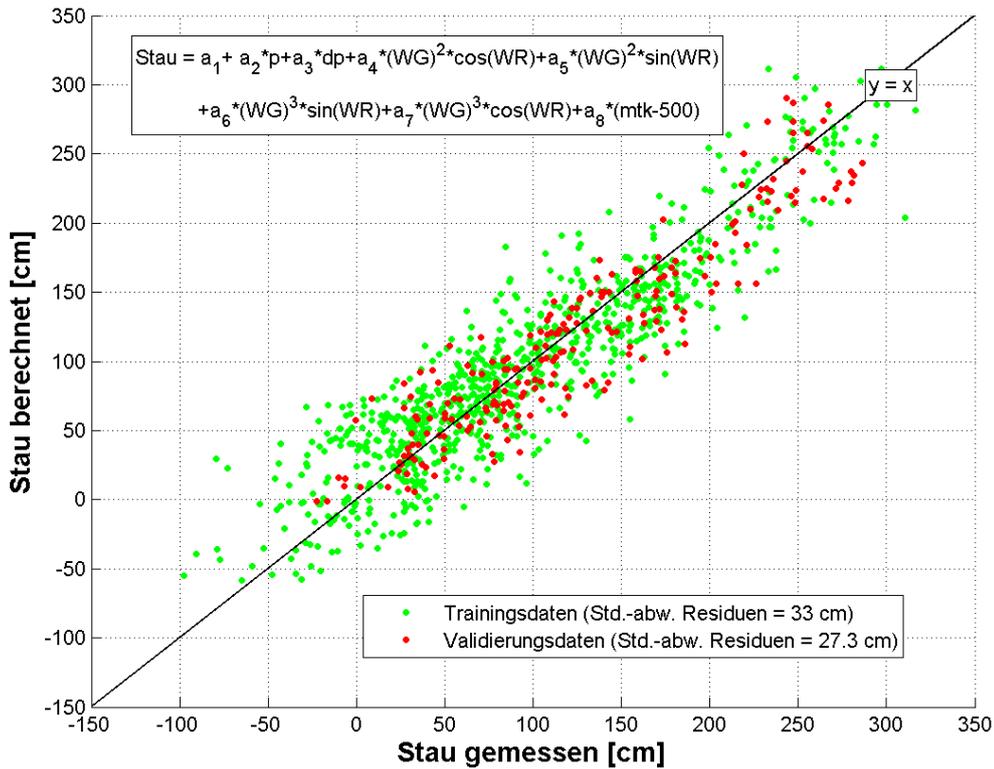


Abbildung 64: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für gesamte Ganglinie am Pegel Leuchtturm Alte Weser

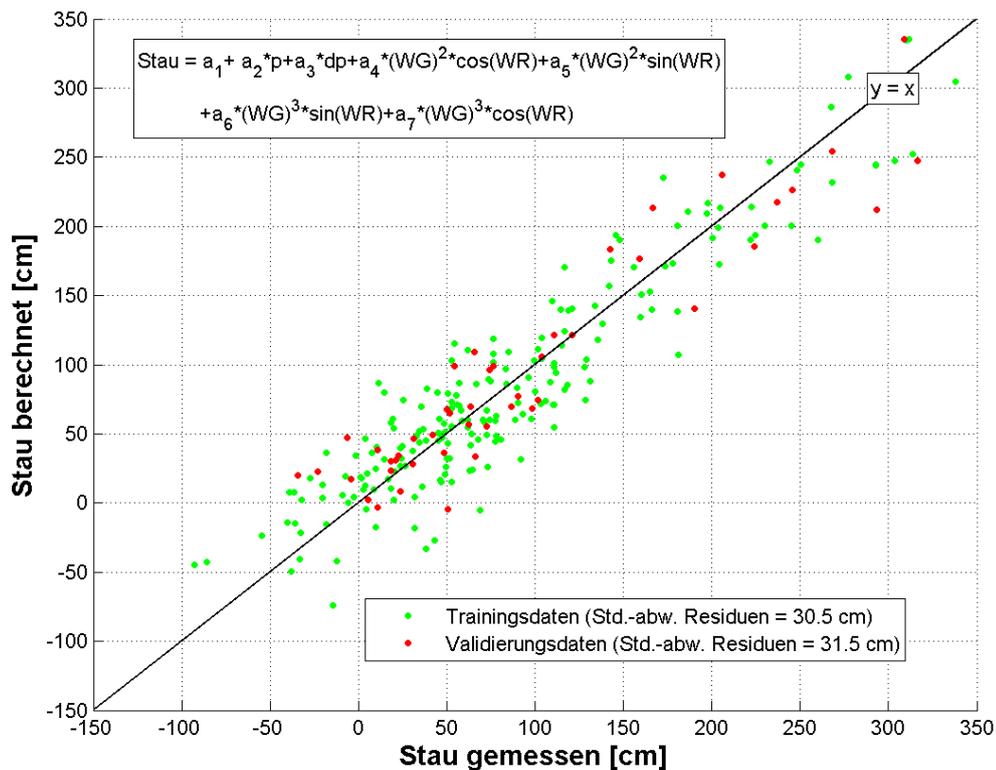


Abbildung 65: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Cuxhaven

Anhang

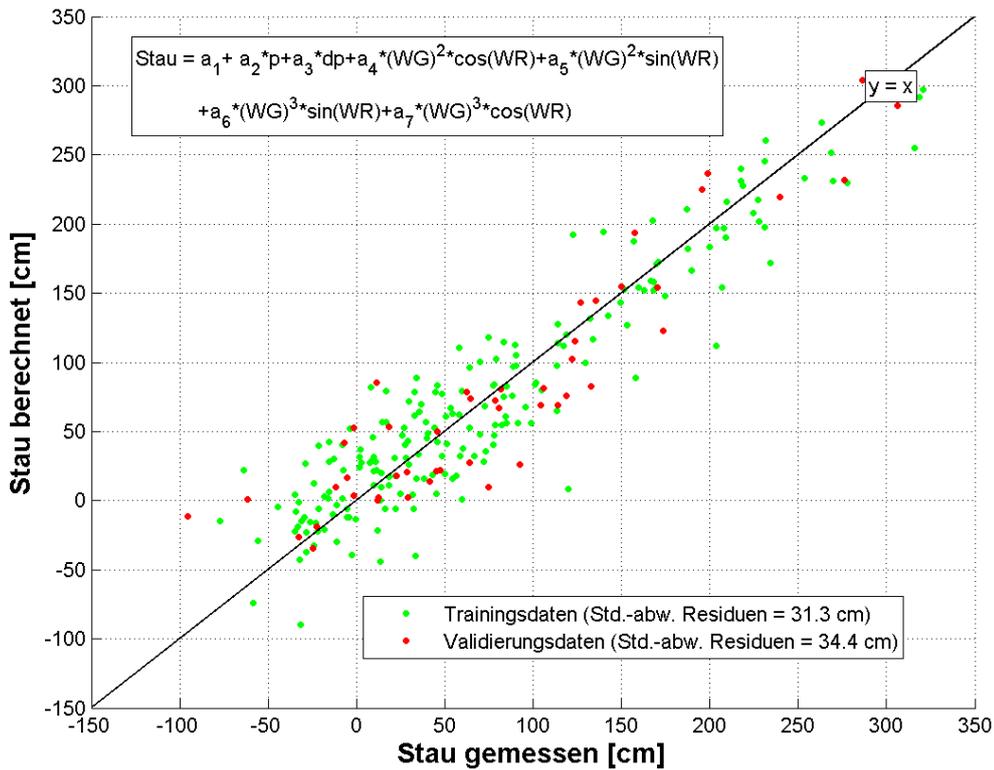


Abbildung 66: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für Niedrigwasserscheitelwerte am Pegel Cuxhaven

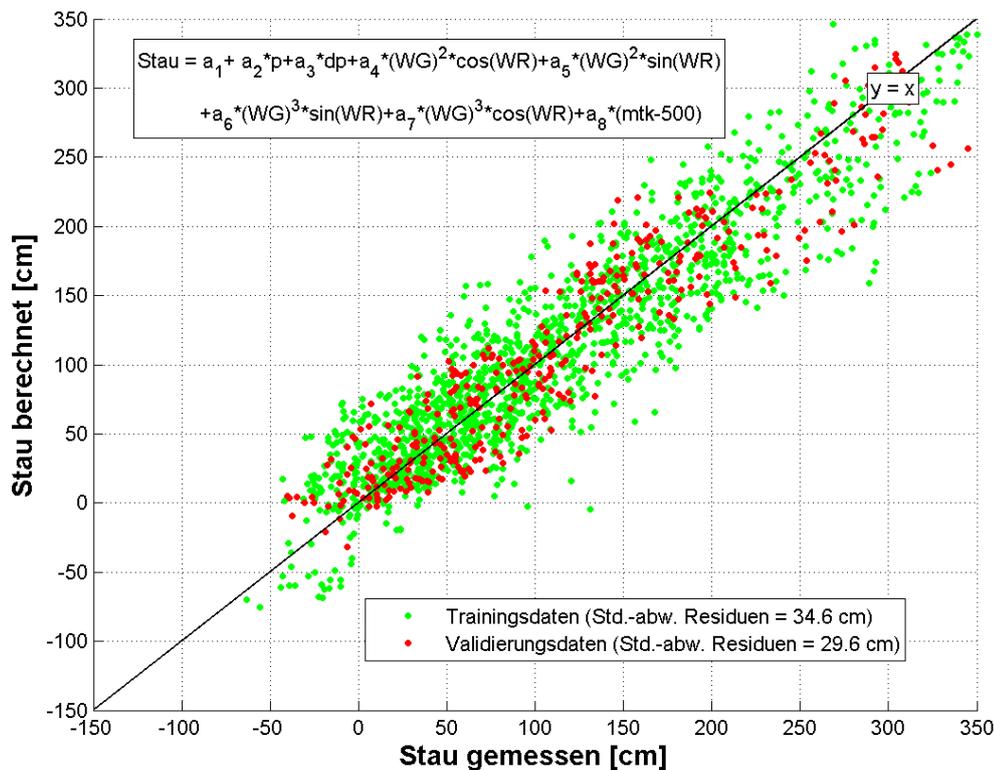


Abbildung 67: Gemessener Stau gegen Stau aus der Regressionsberechnung für gesamte Ganglinie am Pegel Cuxhaven

Abbildungen zu Künstlichen Neuronalen Netzen für weitere Pegel

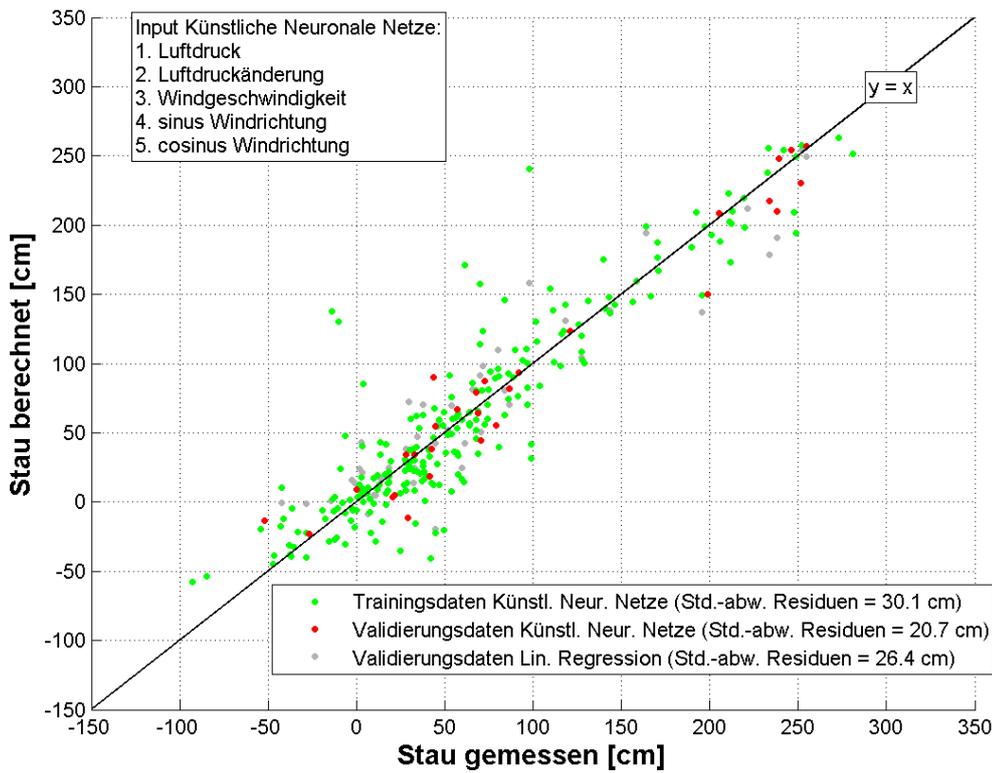


Abbildung 68: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Wangerooge West (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

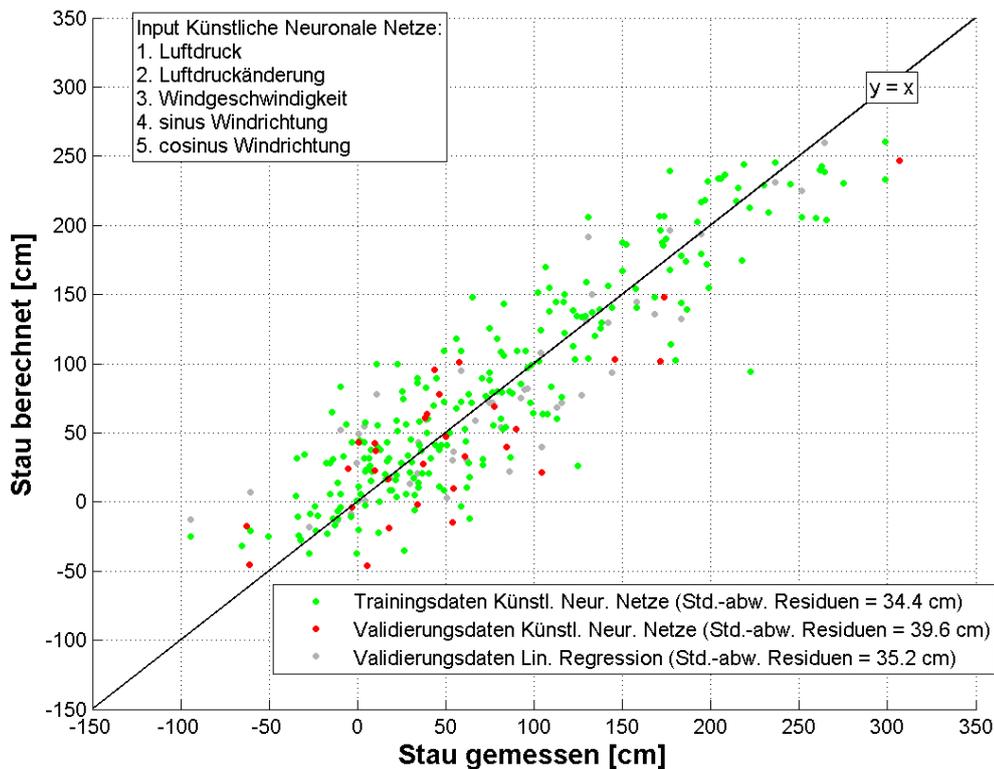


Abbildung 69: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Wangerooge West (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

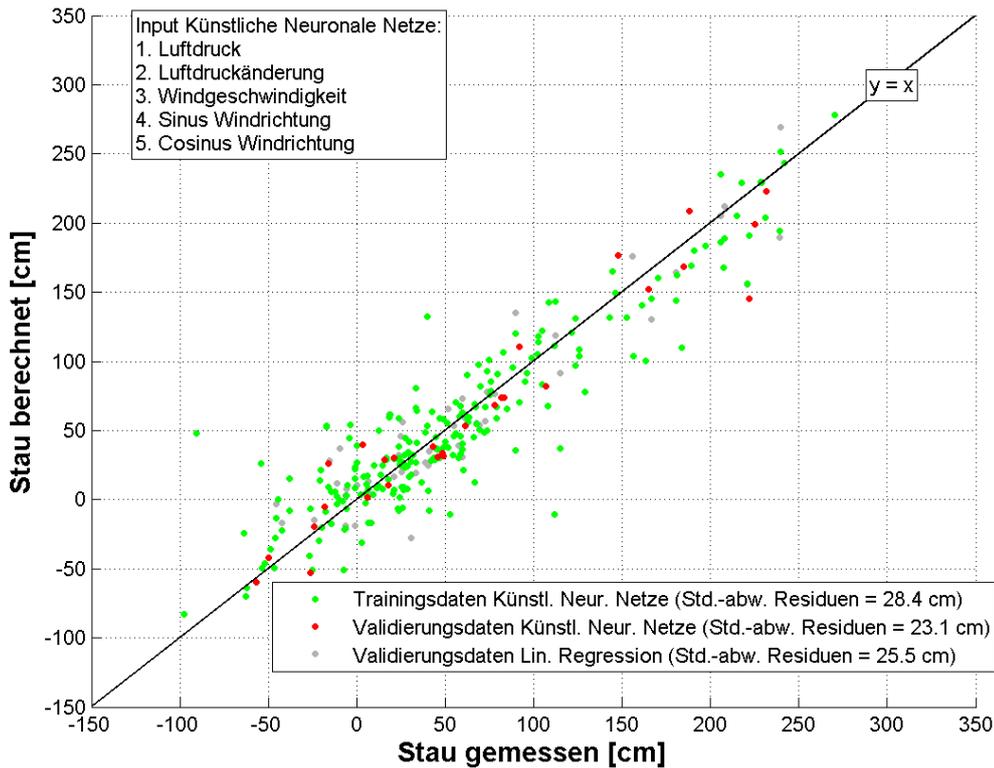


Abbildung 70: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Leuchtturm Alte Weser (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

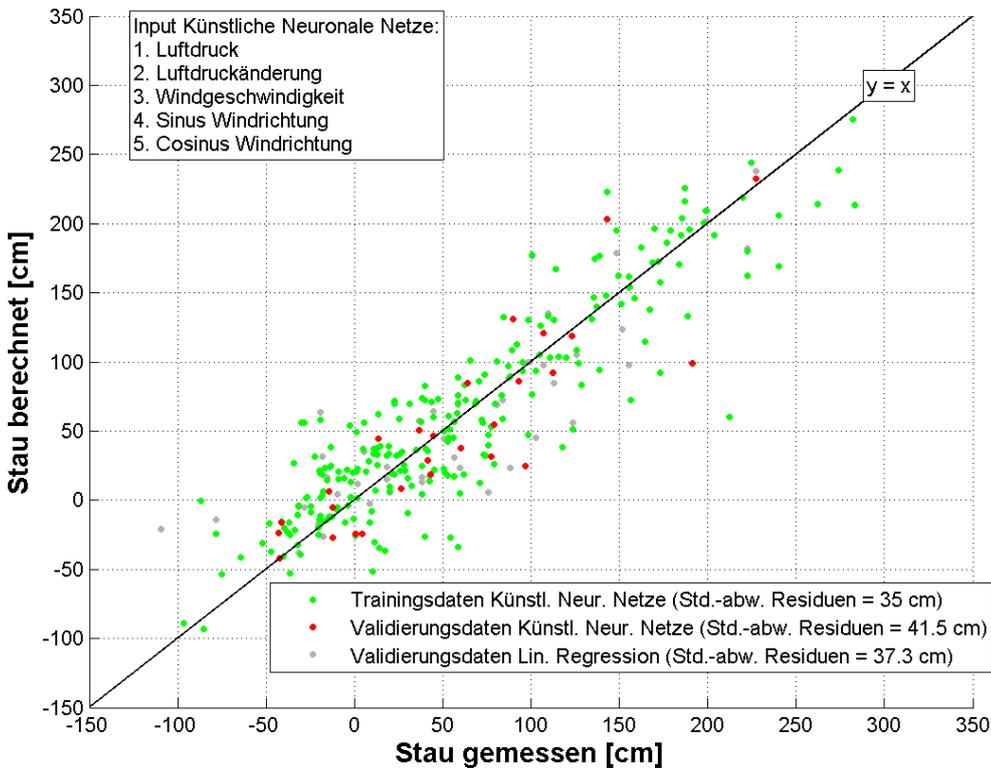


Abbildung 71: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Leuchtturm Alte Weser (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

Anhang

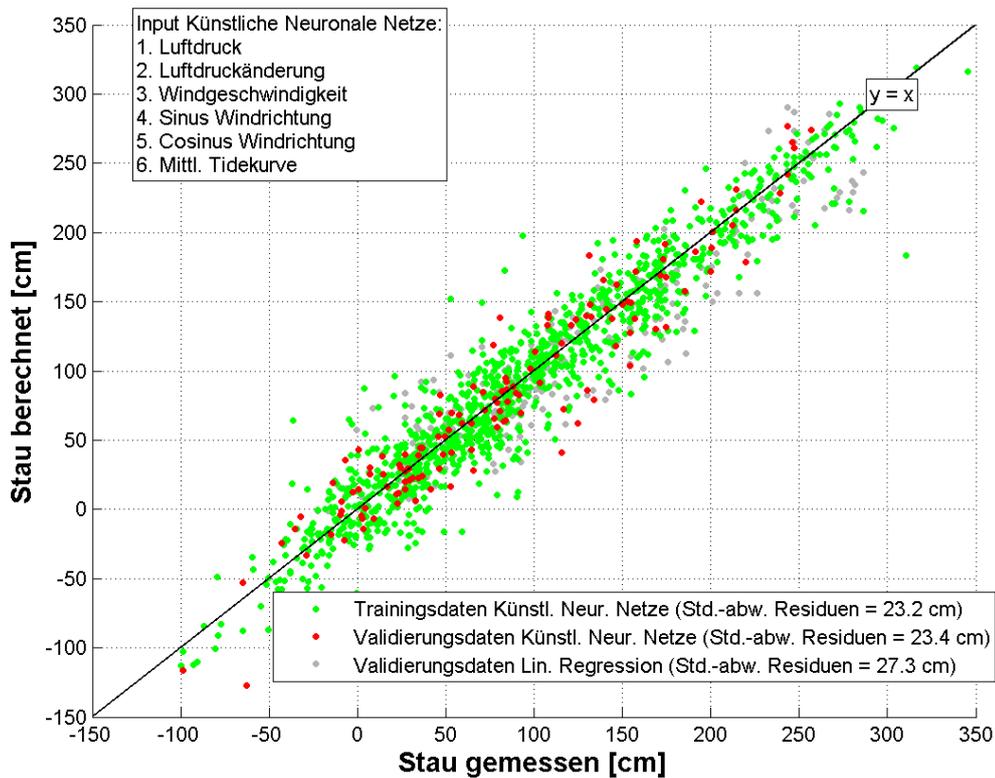


Abbildung 72: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Ganglinie am Pegel Leuchtturm Alte Weser (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

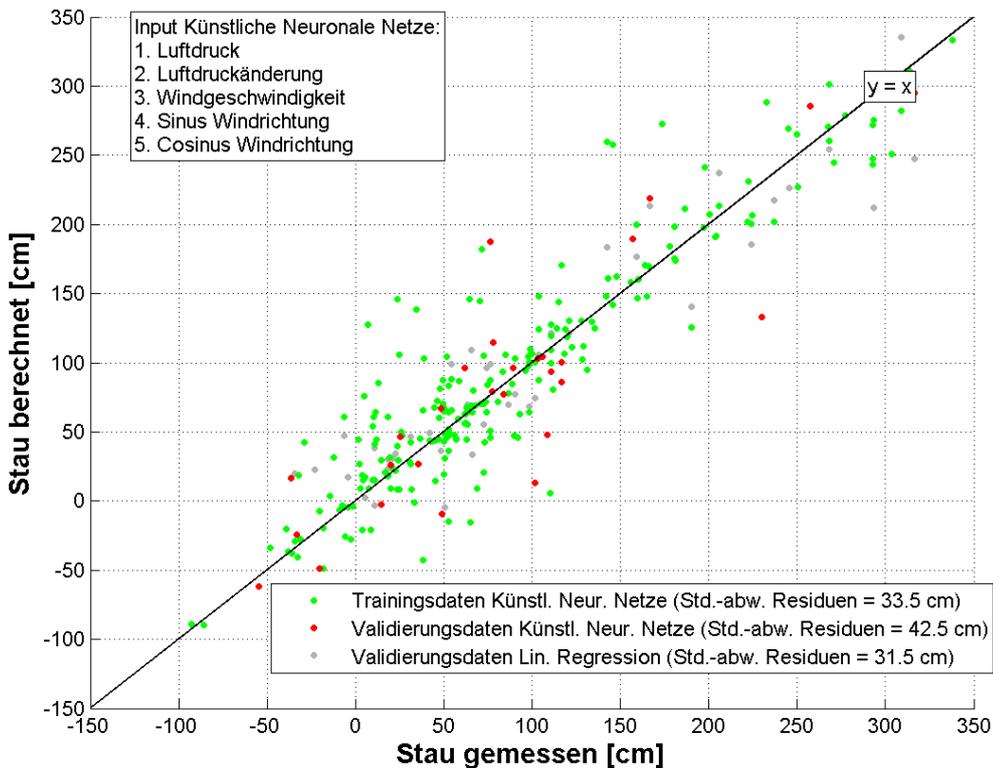


Abbildung 73: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Hochwasserscheitelwerte am Pegel Cuxhaven (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

Anhang

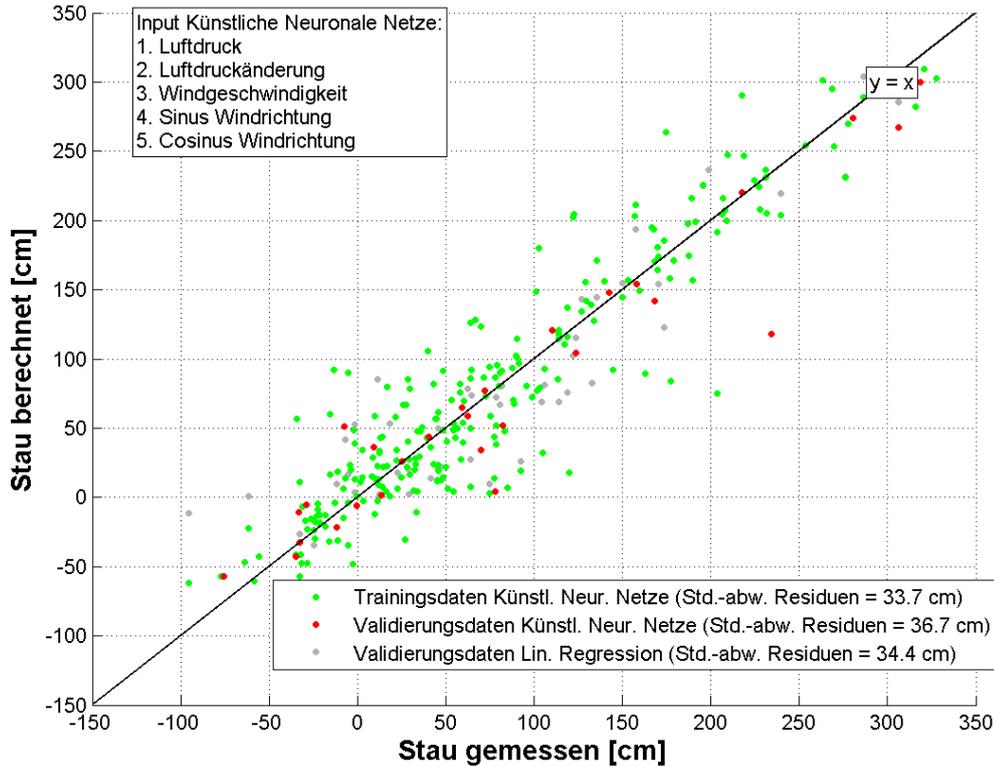


Abbildung 74: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Niedrigwasserscheitel am Pegel Cuxhaven (zum Vergleich sind die Ergebnisse der multiplen Regressionsberechnung grau hinterlegt)

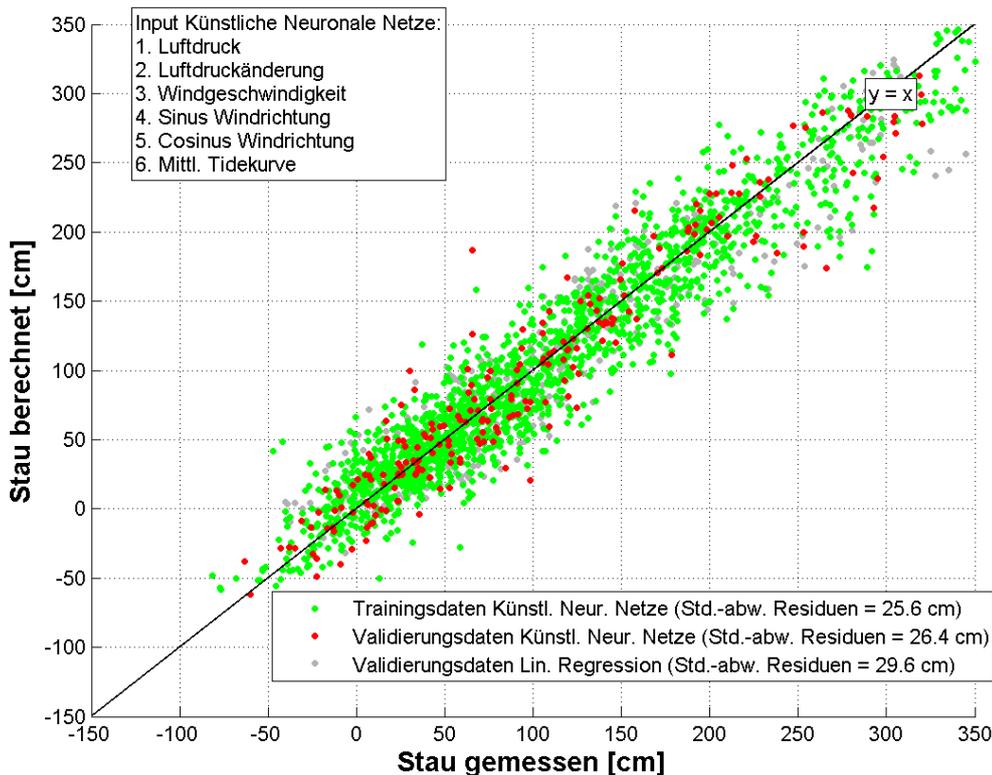


Abbildung 75: Gemessener Stau gegen Stau aus der KNN-Berechnung für Ganglinie am Pegel Cuxhaven (zum Vergleich sind die Ergebnisse der Linearen Regressionsberechnung grau hinterlegt)