

Wasserstände bei Sturmfluten entlang der nordfriesischen Küste mit den Inseln und Halligen

Von STEFANIE DIBBERN und SYLVIN H. MÜLLER-NAVARRA

Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass neben den Gezeiten Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht die maßgebenden Größen für die Entstehung einer Sturmflut sind, werden für ausgewählte Pegel an der nordfriesischen Nordseeküste Windstaukurven hergeleitet, die die regionalen Wasserstandsunterschiede bei Sturmfluten aufzeigen. Zusätzlich werden Pegeldata ausgewertet, die bei Überflutungen der Halligen Hooe, Nordstrandischmoor und Gröde aufgezeichnet wurden.

Das mittlere Windstauverhalten in Nordfriesland spiegelt der Pegel Hooe-Anleger wider. Um diesen Bezugspegel gliedert sich Nordfriesland in sechs Regionen. Aufbauend auf diese Einteilung wird eine Realisierungsmöglichkeit für die Verwendung der ermittelten Windstaukurven im Rahmen einer regionalisierten Sturmflutvorhersage für den Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein vorgestellt.

Schlagwörter

Schleswig-Holstein, Nordfriesland, Sturmfluten, Windstau, Halligen, Vorhersagen

Summary

Taking into account the fact that the significant factors causing storm surges on the North Sea coast, besides the tides, are wind direction and wind speed in the German Bight, wind surge curves showing local water level differences during storm surges have been derived for selected tide gauges on the North Frisian North Sea coast. This paper additionally analyses the tide gauge data recorded during several inundations of the small islands of Hooe, Nordstrandischmoor and Gröde.

The Hooe-Anleger gauge data show the average characteristics of wind surges in North Friesland. Around this reference gauge, North Friesland is divided into six regions. Based on this regional subdivision, the paper concludes by proposing use of the results in the context of regional storm surge forecasts made by the Schleswig-Holstein Agency of Coastal Defence, National Park and Marine Conservation.

Keywords

Schleswig-Holstein, North Frisia, storm surges, wind set-up, forecast

Inhalt

1. Einleitung	206
2. Regional differenzierte Windstauanalyse	207
2.1 Datenbasis	207
2.2 Windstauanalyse	209
2.3 Validierung	217
3. Überflutung der Halligen	218
4. Realisierungsvorschlag	221
5. Schriftenverzeichnis	223

1. Einleitung

An der Schleswig-Holsteinischen Westküste können Sturmfluten sehr unterschiedlich verlaufen. Während zum Beispiel die sehr schweren Sturmfluten am 3./4. Januar 1976 und 24. November 1981 entlang der gesamten Küste Schleswig-Holsteins zu Wasserständen größer als 3,0 m über dem Mittleren Tidehochwasser (MThw) führten, zeigen die schweren Sturmfluten am 10. Januar 1995 und am 8. Januar 2005, dass die höchsten Wasserstände auch nur im südlichen oder nördlichen Bereich auftreten können (Abb. 1). Das MThw (1996/2005) in diesem Küstenabschnitt liegt zwischen 81 cm über NN (Pegel Westerland) und 168 cm über NN (Pegel Husum).

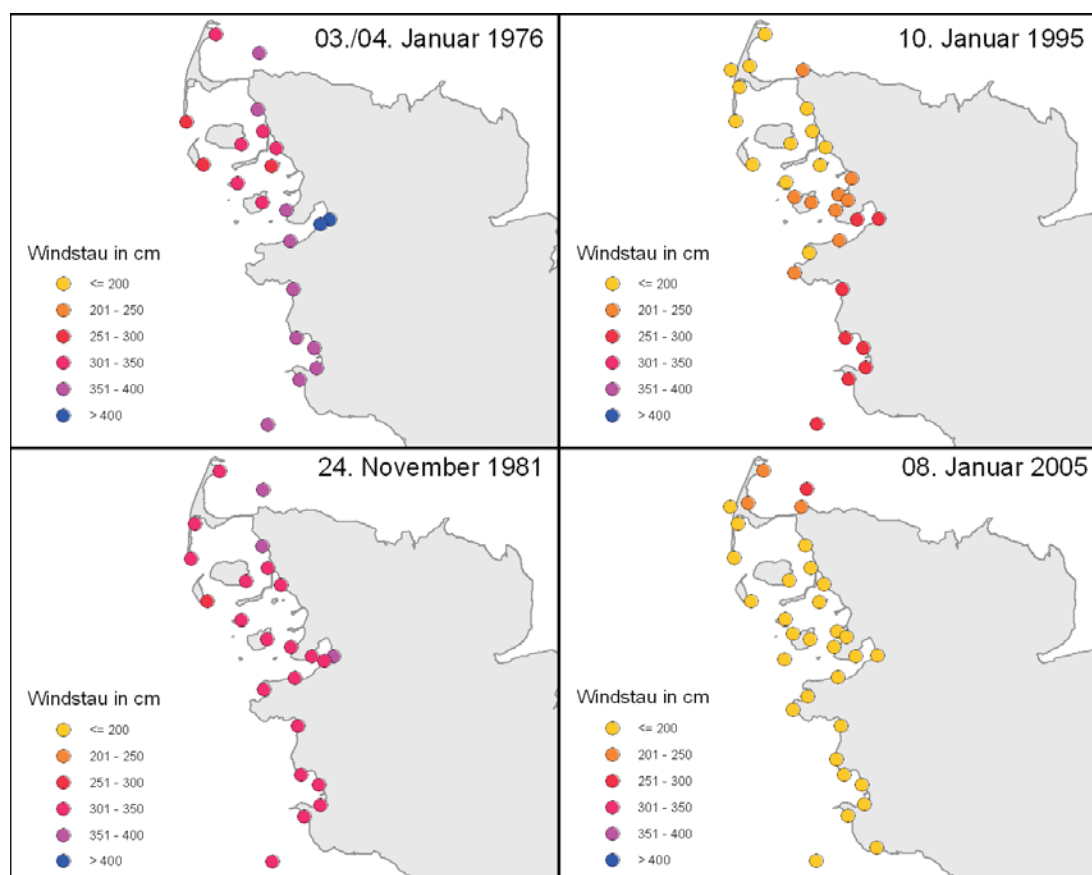


Abb. 1: Scheitelwerte über MThw an der Schleswig-Holsteinischen Westküste der Sturmfluten am 3./4. Januar 1976, 24. November 1981, 10. Januar 1995 und 8. Januar 2005

Unter Berücksichtigung, dass neben den Gezeiten Windrichtung und Windgeschwindigkeit in der Deutschen Bucht die maßgebenden Größen für die Entstehung einer Sturmflut sind (TOMCZAK, 1952), werden im Folgenden in Anlehnung an die Verfahren von MÜLLER-NAVARRA et al. (1999) und TOMCZAK (1952) für ausgewählte Pegel an der nordfriesischen Nordseeküste Windstaukurven anhand von aktuellen Datensätzen hergeleitet, die die regionalen Wasserstandsunterschiede der geographisch stark strukturierten Region der nordfriesischen Wattenmeerküste bei Sturmfluten aufzeigen.

Zusätzlich werden Pegeldata ausgewertet, die bei Überflutungen der Halligen Hooge, Nordstrandischmoor und Gröde aufgezeichnet wurden.

2. Regional differenzierte Windstauanalyse

Der meteorologische Antrieb während einer Sturmflut bildet sich in der sogenannten Windstaukurve ab, welche die Differenz zwischen eingetretener und astronomisch vorausberechneter Tideganglinie darstellt. Neben der lokalen Windrichtung und lokalen Windgeschwindigkeit zeigt eine Windstaukurve auch weitere Einflüsse wie den Luftdruck und seine Schwankungen, Fernwellen, topographische Effekte und den Seegangseinfluss (MURAWSKI, 2007).

Je größer die Windgeschwindigkeit über der Meeresoberfläche ist, desto größer ist die Windschubspannung, die auf die Meeresoberfläche wirkt und umso stärker ist die induzierte Bewegungsenergie, die bei auflandigen Winden eine Strömung in der oberflächennahen Wasserschicht in Richtung Küste bewirkt. Durch innere Reibung wird diese Bewegungsenergie in die Tiefe übertragen, wobei die Geschwindigkeit mit zunehmender Wassertiefe abnimmt. An der Küste kommt es zu einem Anstieg des Wasserstandes. Die geneigte Meeresoberfläche führt zu einem Druckgefälle im Inneren der Wassermasse und es erfolgt eine Rückströmung in den bodennahen Schichten. Wenn im Fall eines Sturms oder Orkans die gegen die Küste gerichtete winderzeugte Oberflächenströmung nur unvollständig durch eine entgegengesetzte bodennahe Kompensationsströmung ausgeglichen werden kann, kommt es zu einem erheblichen Windstau.

Die Windschubspannung τ bestimmt sich aus der Luftdichte ρ_a , einem dimensionslosem Reibungskoeffizienten c_D und dem Quadrat der horizontalen Windgeschwindigkeit W zu

$$\tau = \rho_a c_D W^2 \quad (1)$$

Dabei kann der Reibungskoeffizient nach dem Ansatz von SMITH et al., (1975) mit

$$c_D = (0,63 + 0,066 W) 10^{-3} \quad (2)$$

ermittelt werden. Dieser Ansatz ist mit Daten im Bereich von 3 m/s bis 22 m/s durch Messdaten belegt, eine Extrapolation des Ansatzes bis zu einer Windgeschwindigkeit von 26 m/s ist jedoch akzeptiert (JENSEN et al., 2006).

2.1 Datenbasis

Für diese Untersuchung stehen stündliche Winddaten von fünf Stationen des Deutschen Wetterdiensts (DWD), Tidescheitelwerte von insgesamt 18 Pegeln des Landesbetriebes für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) und der Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) des Bundes sowie die zugehörigen Gezeitenvorausrechnungen vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung (Abb. 2). Um die Ergebnisse nicht durch einen signifikanten Trend (JENSEN et al., 2007) in den Zeitreihen der Tidescheitelwerte zu verfälschen, wird die verwendete Datenbasis auf den Zeitraum vom 1. Januar 1990 bis 31. Dezember 2005 begrenzt.

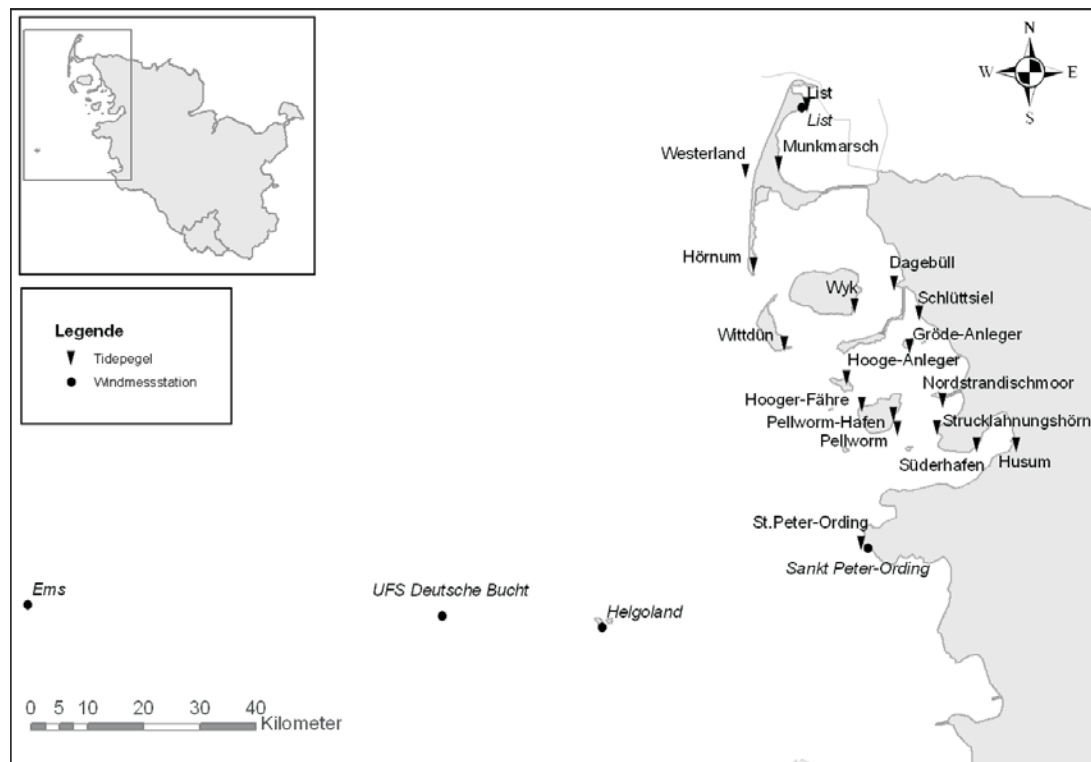


Abb. 2: Lage der Pegel und Windmessstationen

Die Vorausberechnungen der Gezeiten für die deutsche Nordseeküste werden beim BSH mit Hilfe der harmonischen Darstellung der Ungleichheiten durchgeführt und in der Gezeitentafel und dem Gezeitenkalender veröffentlicht (ANONYMUS, 2008).

Die Gezeitenvorausberechnungen liegen für die 18 Pegelorte in dem Zeitraum vom 1. Januar 1990 bis 31. Dezember 2005 nicht digital vor und wurden daher vom BSH rückwirkend berechnet und zur Verfügung gestellt. Da aber die Gezeitengrundwerte nicht mehr für jeden Ort und jedes Jahr rückwirkend vorliegen, sind den Berechnungen die Parameter des Jahres 2006 zugrundegelegt. Dadurch kommt es zu Abweichungen zu den in den Gezeitentafeln veröffentlichten Gezeitenvorausberechnungen. Die Vorausberechnungen aus den Gezeitentafeln für den Ort Husum liegen ab dem Jahr 1995 digital vor. Die Differenz zwischen den Werten in den Gezeitentafeln und den vom BSH nachträglich berechneten Werten mit dem einheitlichen Bezugsjahr 2006 beträgt in der Höhe im Mittel 2 cm bei einer Standardabweichung von 9 cm und in der Zeit im Mittel 0,5 min bei einer Standardabweichung von 21 min. Für die weiteren Untersuchungen sind diese Unterschiede unbedeutend.

2.2 Windstauanalyse

Es wird davon ausgegangen, dass sich der beobachtete Windstau h_i mit Hilfe eines konstanten Glieds b_0 , den Regressionskoeffizienten b_i und den unabhängigen Variablen Windgeschwindigkeit W_i und Windrichtung φ_i mit

$$h_i = b_0 + b_1 W_i^2 \sin(\varphi_i) + b_2 W_i^2 \cos(\varphi_i) + b_3 W_i^3 \sin(\varphi_i) + b_4 W_i^3 \cos(\varphi_i) + e_i \quad (3)$$

beschreiben lässt (BAEHRENS et al., 2003 und MÜLLER-NAVARRA et al., 1999). Mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate wird die Zielfunktion

$$\sum_{i=1}^i e_i^2 = \sum_{i=1}^i [h_i - (b_0 + b_1 W_i^2 \sin(\varphi_i) + b_2 W_i^2 \cos(\varphi_i) + b_3 W_i^3 \sin(\varphi_i) + b_4 W_i^3 \cos(\varphi_i))]^2 \rightarrow \min! \quad (4)$$

bestimmt. Als globales Gütemaß zur Prüfung der Regressionsfunktion wird der mit Hilfe der Residuen e_i , der Anzahl der Beobachtungen N und der Anzahl der Regressoren J zu ermittelnde Standardfehler

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^i e_i^2}{N-J-1}} \quad (5)$$

herangezogen. Dieser gibt an, welcher mittlere Fehler bei Verwendung der Regressionsfunktion zur Schätzung der abhängigen Variablen h gemacht wird. Als Maß zur Prüfung der Regressionskoeffizienten wird der p -Wert verwendet. Mit dem empirischen t -Wert

$$t_{\text{emp}} = \frac{b_i}{s_{b_i}} \quad (6)$$

und dem theoretischen t -Wert t_{tab} der Student-Verteilung wird bei einer vorgegebenen Vertrauenswahrscheinlichkeit von 95 % und der Anzahl der Freiheitsgrade J der Einfluss der unabhängigen Variablen als signifikant erklärt, wenn $|t_{\text{emp}}| > t_{\text{tab}}$. Dabei gibt der p -Wert die zweiseitige Überschreitungswahrscheinlichkeit für den empirischen t -Wert an.

Zunächst wird untersucht, welcher Wind als repräsentativ für die Deutsche Bucht anzusehen ist und welcher Wert dabei als stauwirksam für Sturmfluten gilt. Dabei wurden bisher unterschiedliche Ansätze verfolgt. Während TOMCZAK (1952) für die Berechnung der Windstauunterschiede an der Schleswig-Holsteinischen Westküste die Wettermeldungen der Feuerschiffe Borkumriff, Außenjade, Elbe 1 und Amrumbank sowie der Station Helgoland nutzte und dabei als stauwirksam den Wind annahm, der in den letzten vier bis fünf Stunden vor dem Hochwasser an der nordfriesischen Küste herrschte, verfolgen MÜLLER-NAVARRA et al. (1999) einen empirischen Windstauansatz anhand der Feuerschiffe Ems, Elbe und Deutsche Bucht sowie der Station Helgoland, der den Wind der dritten vollen Stunde vor Eintritt des Hochwassers berücksichtigt.

Für die Windstauanalyse im Bereich Nordfriesland werden die Aufzeichnungen der Windmessstationen Ems, Unbemanntes Feuerschiff (UFS) Deutsche Bucht, Helgoland, List auf Sylt und Sankt Peter-Ording vektoriell gemittelt. Dabei wird die Station Helgoland nur berücksichtigt, wenn sowohl Ems als auch UFS Deutsche Bucht keine Werte aufgezeichnet

haben (RÖSKE, 1997). Außerdem wird nur dann ein gültiger Wert berechnet, wenn von den drei Stationen Ems, UFS Deutsche Bucht und Helgoland und den beiden Stationen List auf Sylt und Sankt Peter-Ording jeweils mindestens eine Station einen gültigen Wert liefert. Somit ist gewährleistet, dass sowohl eine Station im Norden und Süden des Gebietes als auch eine Land- und eine Küstenstation in die Berechnung eingeht. Die Winddaten des UFS Elbe wurden nicht verwendet, da das Feuerschiff nach dem Kentern in der Nacht zum 4. Dezember 1999 aus dem Verkehr gezogen wurde.

Für die Analyse werden die Eintrittszeiten der beobachteten Windstauwerte auf volle Stunden gerundet und dem vektoriell gemittelten Wind zugeordnet. Der geringste Standardfehler s wird überwiegend bei der Verwendung des Mittelwindes der zweiten vollen Stunde vor Eintritt des Hochwassers erreicht. Einzig am Pegel Hörnum ist dies nicht eindeutig zu erkennen. Dabei könnte die Ursache in der sehr geschützten Lage des Pegels an der Leeseite der Insel Sylt im Hörnumer Hafen begründet sein.

Sofern die Windrichtungen der verwendeten Stationen eine sehr heterogene Verteilung zu einem bestimmten Zeitstempel aufweisen, führen entsprechende Datensätze zu einer Verschlechterung der Anpassungsgüte. Deshalb wird ein Homogenitätsindex I_h eingeführt, der anhand der Komponenten u_i und v_i der Windvektoren ermittelt wird (FELLER et al., 1997). Es gilt:

$$I_h = \frac{[(\sum_i u_i)^2 + (\sum_i v_i)^2]^{1/2}}{\sum_i (u_i^2 + v_i^2)^{1/2}} \quad (7)$$

Für die Herleitung der dargestellten Ergebnisse werden nur auflandige Windrichtungen φ mit $180^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ$ verwendet. Zudem werden nur die Datensätze genutzt, die einen Homogenitätsindex größer als 0,9 aufweisen. Insgesamt stehen somit für die weiteren Berechnungen in Abhängigkeit vom Pegel zwischen 4.232 und 5.956 Datensätze zur Verfügung.

Die ermittelten Regressionsgleichungen werden für die Darstellungen bis 26,0 m/s extrapoliert. Eine weitere Extrapolation ist nicht gültig, da die einleitend beschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten für größere Windgeschwindigkeiten nicht gegeben sind.

Die Regressionskoeffizienten b_i für alle Pegel sind in Tab. 2 aufgeführt. Insgesamt schwanken die Regressionskoeffizienten b_0 zwischen 9,73 cm am Pegel St. Peter-Ording und –5,52 cm am Pegel Pellworm. Sie liegen damit in derselben Größenordnung wie in (MÜLLER-NAVARRA et al., 1999) und stellen eine Wasserstandssituation bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten dar. Die Regressionskoeffizienten b_1 und b_2 sind alle signifikant und weisen, mit Ausnahme der Pegel Husum und Süderhafen bei b_2 , ein negatives Vorzeichen auf. Während die Regressionskoeffizienten b_3 alle signifikant sind und ein negatives Vorzeichen besitzen, weisen die Regressionskoeffizienten b_4 mit Ausnahme der Pegel Husum und Süderhafen ein positives Vorzeichen auf. Der p_4 -Wert der Pegel Dagebüll, Husum, Schlüttsiel, Süderhafen und Wyk ist nicht signifikant.

Tab. 2: Empirisch ermittelte Regressionskoeffizienten für alle Pegel

Pegel	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Dagebüll	-9,23	-0,406	-0,029	-0,0038	0,0003
Gröde-Anleger	-7,81	-0,311	-0,084	-0,0076	0,0054
Hörnum	-8,11	-0,375	-0,085	-0,0035	0,0031
Hooge-Anleger	-7,33	-0,283	-0,067	-0,0086	0,0045
Hooger-Fähre	-6,85	-0,298	-0,041	-0,0086	0,0041
Husum	-9,47	-0,428	0,047	-0,0062	-0,0003
List	-8,21	-0,383	-0,116	-0,0024	0,0069
Munkmarsch	-7,16	-0,284	-0,115	-0,0073	0,0108
Nordstrandischmoor	-8,43	-0,358	-0,070	-0,0067	0,0068
Pellworm	-5,52	-0,354	-0,077	-0,0042	0,0069
Pellworm Hafen	-7,24	-0,318	-0,070	-0,0071	0,0067
Schlüttsiel	-6,90	-0,310	-0,056	-0,0077	0,0013
St. Peter-Ording	-9,73	-0,287	-0,112	-0,0093	0,0075
Strucklahnungshörn	-7,84	-0,358	-0,064	-0,0060	0,0061
Süderhafen	-7,26	-0,384	0,047	-0,0067	-0,0005
Westerland	-5,60	-0,289	-0,120	-0,0055	0,0077
Wittdün	-7,16	-0,275	-0,092	-0,0077	0,0060
Wyk	-7,91	-0,337	-0,027	-0,0063	0,0005

Abb. 3 zeigt exemplarisch die Windstaudiagramme an den Pegeln Husum und Munkmarsch. Dabei sind die für die jeweiligen Windgeschwindigkeiten stauwirksamsten Windrichtungen durch eine Linie verbunden.

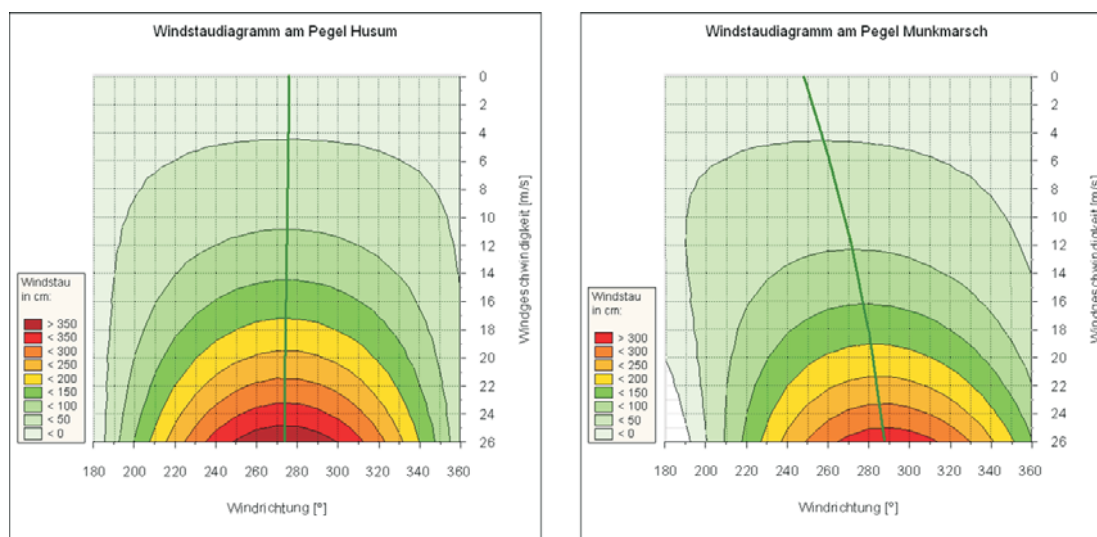


Abb. 3: Windstaudiagramme für die Pegel Husum und Munkmarsch

Ein Vergleich der Windstauansätze für alle Pegel mit dem arithmetischen Mittelwert

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{i} \left[\sum_{i=1}^i b_{0i} + \sum_{i=1}^i b_{1i} W^2 \sin(\varphi) + \sum_{i=1}^i b_{2i} W^2 \cos(\varphi) + \sum_{i=1}^i b_{3i} W^3 \sin(\varphi) + \sum_{i=1}^i b_{4i} W^3 \cos(\varphi) \right] \quad (8)$$

zeigt, dass der Pegel Gröde, gefolgt vom Pegel Hooge-Anleger, dem mittleren Windstauverhalten in Nordfriesland am Nächsten kommt. Da der Pegel Gröde aufgrund einer nicht vorhandenen Stromversorgung keine Daten für den operationellen Betrieb übertragen kann und eine Aufrüstung aufgrund der exponierten Lage auch nicht realisierbar ist, wird der Pegel Hooge als Bezugspegel herangezogen und für jeden Pegel die Windstaudifferenz zum Pegel Hooge gebildet. Im Ergebnis bilden sich für die Region Nordfriesland sechs Regionen heraus, die jeweils ähnliche Windstaudifferenzen zum Pegel Hooge aufzeigen (Abb. 4).

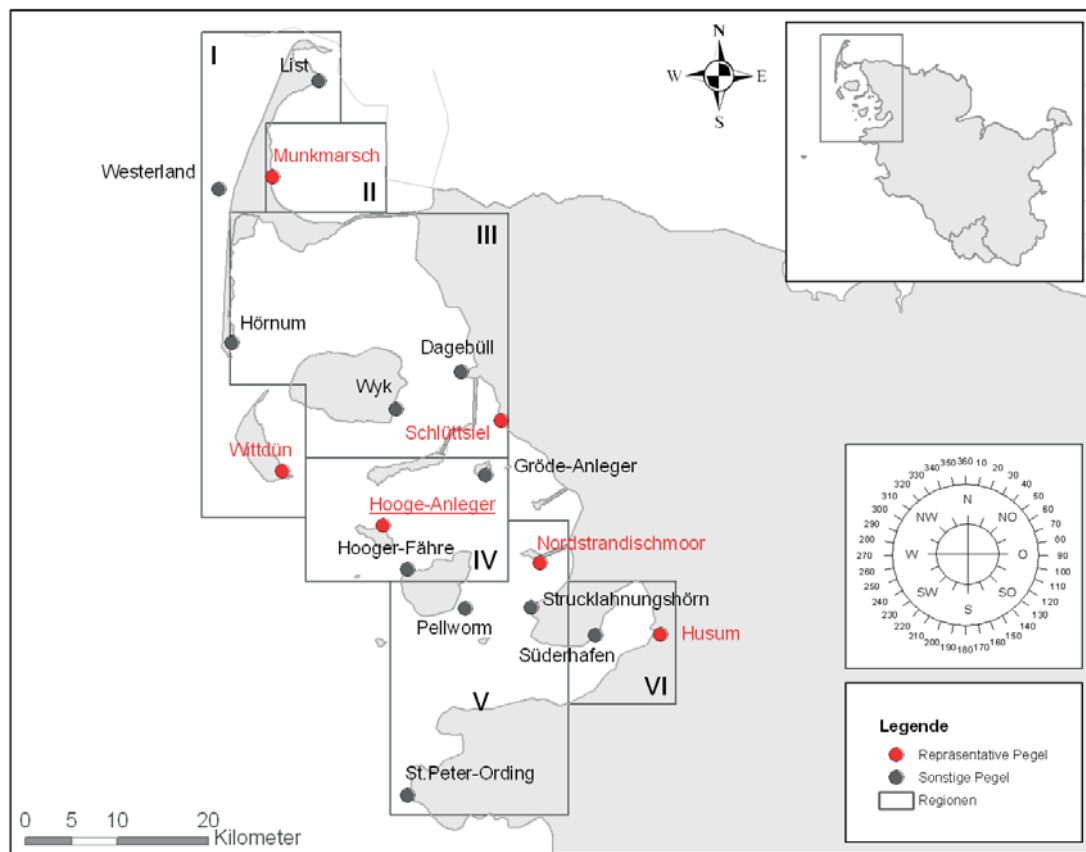


Abb. 4: Die sechs Regionen in Nordfriesland und der jeweils repräsentative Pegel

An den Pegeln Gröde und Hooger-Fähre sind die Differenzen überwiegend positiv und erreichen Werte von maximal ± 20 cm. An den Pegeln Wittdün, Westerland und List sind die Differenzen überwiegend negativ und erreichen Werte zwischen -60 cm und $+20$ cm. An den Pegeln Nordstrandischmoor, Strucklannungshörn, Pellworm Hafen und St. Peter-Ording wechseln die Windstaudifferenzen bei einer Drehung der Windrichtung von Süd nach Nord ihre Vorzeichen von positiv nach negativ und erreichen dabei Werte von maximal ± 40 cm. An den Pegeln Husum und Süderhafen sind die Differenzen überwiegend positiv und errei-

chen Windstaudifferenzen zwischen -20 cm und $+60$ cm, dabei nehmen die Differenzen bei einer Drehung des Windes von Nord nach Süd zunächst zu und dann wieder ab. An den Pegeln Dagebüll, Schlüttsiel, Wyk und Hörnum wechseln die Windstaudifferenzen bei einer Drehung der Windrichtung von Süd nach Nord ihre Vorzeichen von negativ nach positiv und erreichen dabei Werte von maximal ± 60 cm. Am Pegel Munkmarsch werden die höchsten Windstaudifferenzen von ± 100 cm erreicht, wobei die Differenzen bei einer Drehung des Windes von Nord nach Süd zunehmen.

Vereinfachend lassen sich die jeweiligen Regionen im Sinne einer Gefährdung durch den Pegel repräsentieren, der die höchsten Windstaudifferenzen enthält. Dies sind die Pegel Witt-dün, Nordstrandischmoor, Husum, Schlüttsiel und Munkmarsch. Die Region um Hooge mit den Pegeln Gröde und Hooger-Fähre wird aufgrund der geringen Windstaudifferenzen durch den Bezugspegel Hooge selbst vertreten. Aufgrund der räumlichen Nähe der Pegel Pellworm und Pellworm Hafen wird nur der Pegel Pellworm aufgeführt.

Einen Überblick über die gesamte nordfriesische Küste ermöglicht die Abb. 5. Hier zeigt sich, welcher maximale Windstau bei gegebener Windrichtung und Windgeschwindigkeit zu erwarten ist, und in welchem Gebiet dieser eintreten wird.

So sind zum Beispiel bei einer prognostizierten Windrichtung von 280° und einer Windgeschwindigkeit von 23 m/s der maximale Windstau in Nordfriesland in der Region Husum (VI) mit circa 280 cm und gleichzeitig der minimale Windstau in der Region Witt-dün (I) mit circa 210 cm zu erwarten. Bei einer Windrichtung von 330° und einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s hingegen, sollte vor allem die Region Munkmarsch (II) aufmerksam beobachtet werden, während die Region Schlüttsiel (III) keine höheren Windstauwerte erwarten lässt.

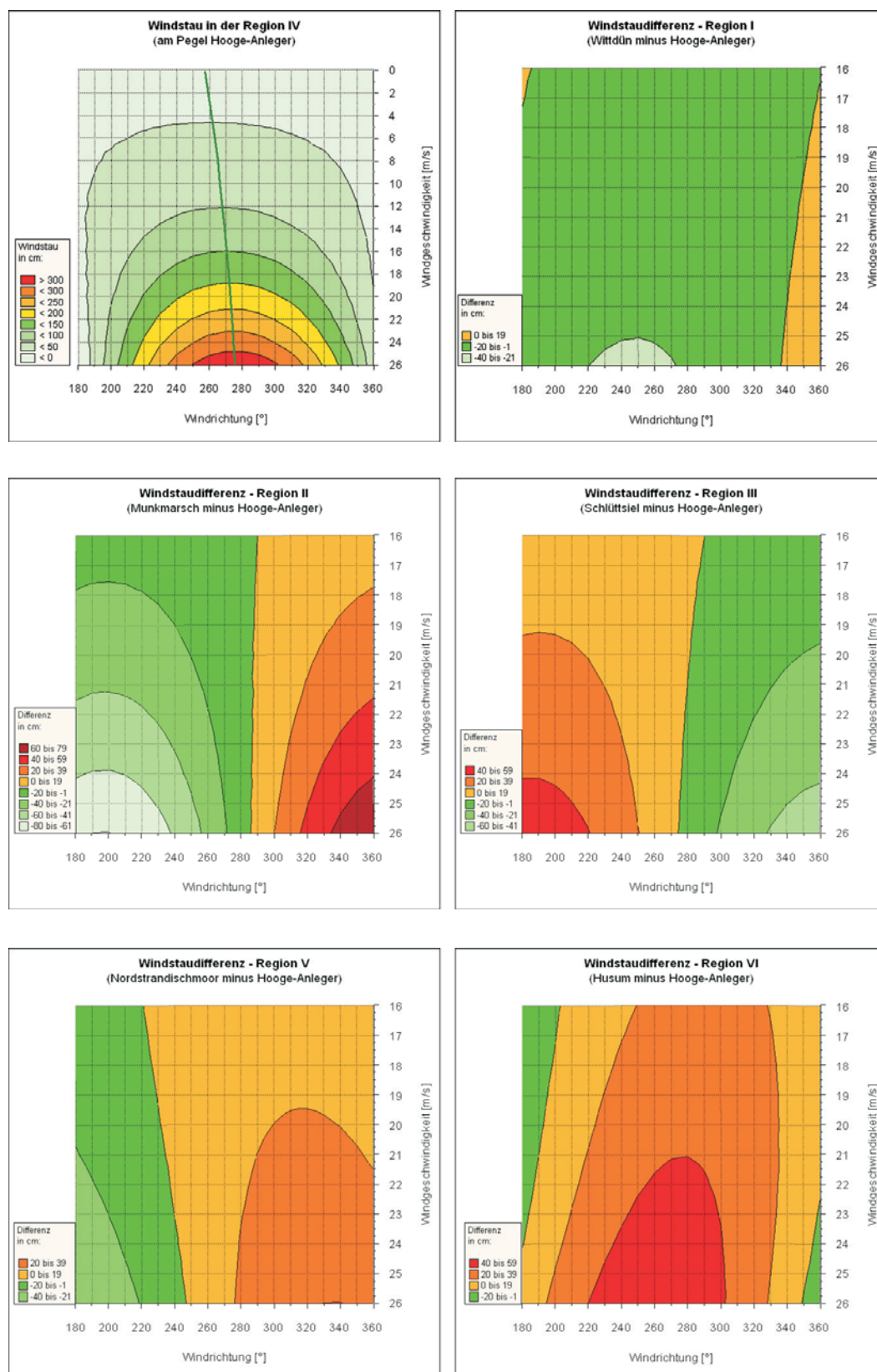


Abb. 5: Windstaudifferenzen zum Pegel Hooe-Anleger in den sechs Regionen

Abb. 6 zeigt den Unterschied der Windstauentwicklung am Bezugspegel Hooge-Anleger zum Pegel Cuxhaven unter Zuhilfenahme des in (MÜLLER-NAVARRA et al., 1997) veröffentlichten Koeffizientensatzes. Während hier für die Bildung des Mittelwindes ausschließlich Windmessstationen auf der freien See verwendet werden, fließen in den in dieser Studie verwendeten Mittelwind auch die Messwerte von Küstenstationen ein. Da sich die Windgeschwindigkeit beim Übergang von See auf Land deutlich reduziert (DUENSING et al., 1985), ist die Zuordnung der Windstauhöhen zur Windgeschwindigkeit bei der Verwendung der unterschiedlichen Mittelwinde nicht vergleichbar, liefert aber gute Anhaltswerte.

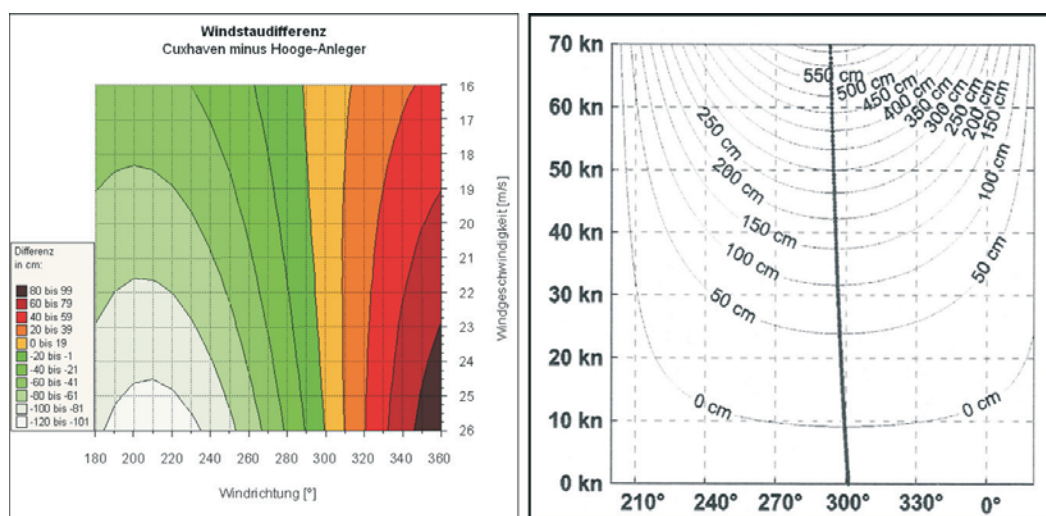


Abb. 6: Windstaudifferenz zum Pegel Hooge-Anleger am Pegel Cuxhaven (links) und Windstaukurve am Pegel Cuxhaven (aus: JENSEN et al., 2008) (rechts)

Es zeigt sich, dass der Windstau am Bezugspegel Hooge-Anleger bei Windrichtungen zwischen 180° und 295° höher und zwischen 295° und 360° niedriger zu erwarten ist als am Pegel Cuxhaven. Insbesondere bei Windrichtungen zwischen 190° und 230° ist der zu erwartende Windstau am Pegel Hooge-Anleger betragsmäßig über 1,0 m höher als am Pegel Cuxhaven. Für diesen Windsektor sind jedoch nicht die sehr schweren Sturmfluten zu erwarten. Weiterhin lässt sich schließen, dass besondere Aufmerksamkeit bei Südsüdwest-Winden erforderlich ist, wenn diese Sturmstärken erreichen und überraschend sehr lokal Grenzwasserstände zu überschreiten drohen.

Die in dieser Studie ermittelten empirischen Windstauformeln ermöglichen einen Vergleich mit den von TOMCZAK (1952) beschriebenen Windstaudifferenzen zum Bezugsort Cuxhaven. Hierzu werden anhand der ermittelten Windstauformeln und des in (MÜLLER-NAVARRA et al., 1997) veröffentlichten Koeffizientensatzes für den Pegel Cuxhaven die Windstaudifferenzen für die Pegel Husum und List zum Pegel Cuxhaven gebildet. Für Husum zeigt der Vergleich jeweils eine positive Windstaudifferenz bei Windrichtungen zwischen 180° bis 310° und eine negative Windstaudifferenz bei Windrichtungen zwischen 310° und 360° . Während die Windstaudifferenzen für den Windsektor 310° bis 360° im Vergleich betragsmäßig nahezu identisch sind, treten im Windsektor 180° bis 310° bei heutigen Verhältnissen deutlich höhere Windstauwerte auf (Abb. 7). Mögliche Ursachen können sowohl anthropogene Einflüsse wie zum Beispiel bauliche Maßnahmen an der Nordküste von

Eiderstedt, Vertiefungen der Zufahrtsrinne nach Husum oder die Eindeichung der Nordstrander Bucht als auch natürliche Veränderungen des westlich von Husum gelegenen Heverstroms sein. Ein Vergleich der Windstaudifferenzen beider Studien für den Pegel List hingegen zeigt ungefähr die gleiche Größenordnung (Abb. 8).

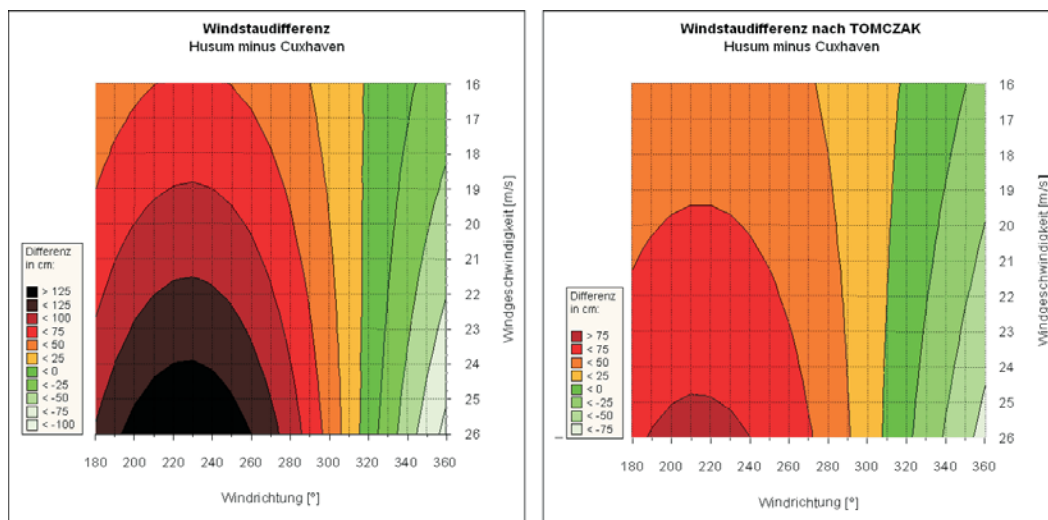


Abb. 7: Vergleich der Windstaudifferenzen für den Pegel Husum.
Links: Ergebnis aus dieser Studie unter Verwendung von (MÜLLER-NAVARRA et al., 1997).
Rechts: Ergebnis aus (TOMCZAK, 1952)

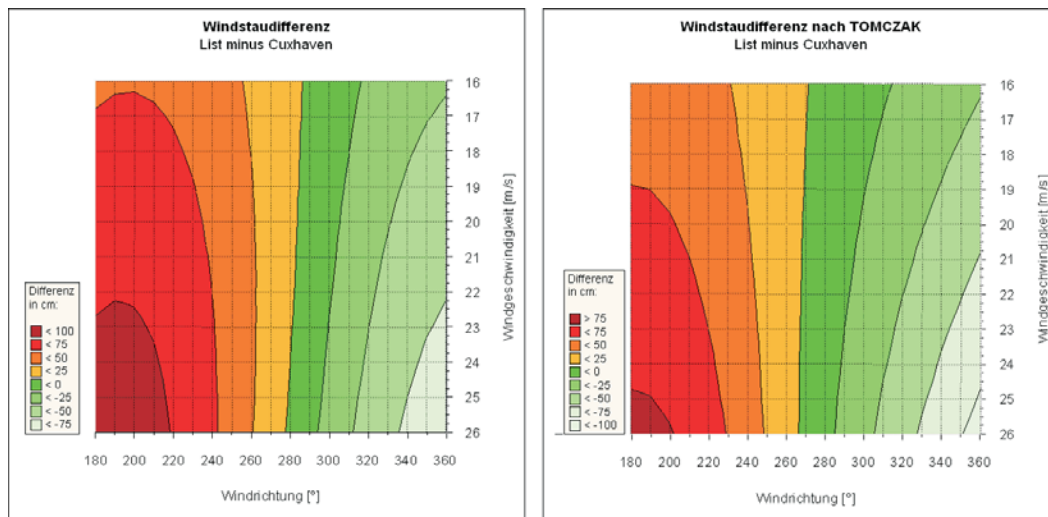


Abb. 8: Vergleich der Windstaudifferenzen für den Pegel List.
Links: Ergebnis aus dieser Studie unter Verwendung von (MÜLLER-NAVARRA et al., 1997).
Rechts: Ergebnis aus (TOMCZAK, 1952)

Bei der Vorhersage von Sturmfluten ist neben dem zu erwartenden Scheitelwert ebenfalls die Kenntnis über die Eintrittszeit wünschenswert. Diese trifft keinesfalls immer mit der astronomisch zu erwartenden Eintrittszeit zusammen, sondern kann mehrere Stunden früher oder später eintreten. Bei der Analyse der vorliegenden Daten zeigt sich, dass mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit keine signifikante Zu- oder Abnahme der Zeitdifferenz

verbunden ist. Die Streuung der beobachteten Zeitdifferenzen nimmt jedoch mit steigenden Windgeschwindigkeiten zu. Ab circa 12 m/s muss mit abweichenden Eintrittszeiten von mehr als 60 Minuten gerechnet werden. Bei einer Drehung der Windrichtung von Süd nach Nord nimmt die Streuung der Zeitdifferenzen geringfügig ab. Insgesamt sind die Streuungen jedoch so groß, dass sich kein anwendbarer Zusammenhang ableiten lässt.

2.3 Validierung

Die Validierung der ermittelten Ansätze aus dem Zeitraum 1990 bis 2005 erfolgt anhand der beobachteten Tidehochwasserscheitelwerte vom 1.1.2006 bis 31.12.2006. Dabei wird dem astronomisch zu erwartendem Tidehochwasserzeitpunkt der gemessene Mittelwind zwei Stunden zuvor zugeordnet und anhand dieser Windgeschwindigkeit und Windrichtung der zu erwartende Windstau berechnet. Als Maß für die Güte der berechneten Windstauwerte wird die Differenz zwischen dem berechneten und beobachteten Windstau berechnet. Im Mittel unterschätzt das empirische Modell die Tidehochwasser um 7 cm bei einer mittleren Standardabweichung von 19 cm. Speziell die Sturmflut am 1.11.2006 führt zu hohen maximalen Abweichungen an den einzelnen Pegeln.

Die Verteilung des Fehlers für diesen sehr kurzen Vorhersagezeitraum von circa zwei Stunden zeigt die Schranken dieses Verfahrens deutlich auf (Abb. 9). Um den Vorhersagezeitraum zu verlängern können Windprognosen genutzt werden. In Abhängigkeit von der Qualität dieser Prognosen wird sich der Vorhersagefehler für die berechneten Windstauwerte vergrößern. Insbesondere bei kleinräumigen Tiefs, die rasch von West nach Ost über die Nordsee ziehen, bereitet die Anwendung empirischer Verfahren Probleme. Bei durch langsam ziehende, großräumige Tiefs verursachten Sturmfluten ist es zuverlässig.

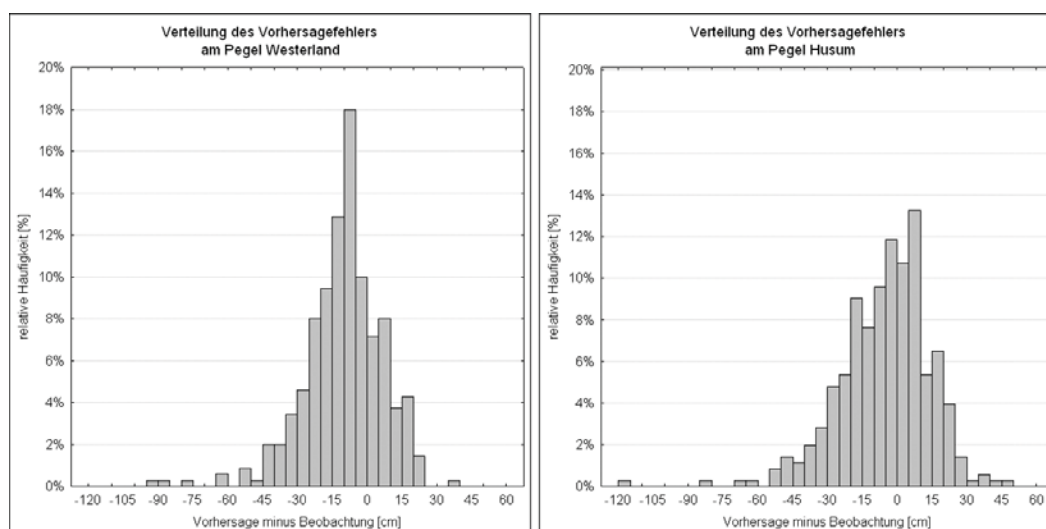


Abb. 9: Verteilung des Vorhersagefehlers an den Pegeln Husum und Westerland

Durch die zusätzliche Verwendung geeigneter numerischer Modelle gelingt es, den Vorhersagefehler deutlich zu reduzieren (MÜLLER-NAVARRA, 2009). Im Allgemeinen ist zudem die Form der Häufigkeitsverteilungen des absoluten Vorhersagefehlers von numerischen Windstaumodellen (MÜLLER-NAVARRA et al., 2003) deutlich schmäler als die Form der in Abb. 9 gezeigten Verteilungen.

3. Überflutung der Halligen

Seit den 1970er bzw. 1980er Jahren werden auf den Halligen Hooge, Gröde und Nordstrandischmoor die Überflutungen mit einem Schreibpegel analog aufgezeichnet (Tab. 3). Diese Aufzeichnungen wurden vom LKN-SH kürzlich aufbereitet und können erstmals ausgewertet werden. Bei der Aufbereitung zeigt sich, dass die zeitliche Zuordnung der Wasserstände sehr ungenau ist, da die Wasserstände mit einem vier-Wochen-Umlauf des Trommelschreibers erhoben wurden; üblich ist ein 24-Stunden-Umlauf. Das Ablesen der Höhen war deutlich genauer möglich, jedoch erwiesen sich einige Aufzeichnungen aufgrund fehlender Angaben der Wasserstände zum Zeitpunkt des Auflegens und Abnehmens der Pegelbögen oder durch offensichtlich falsches Auflegen der Pegelschreiber als sehr unzuverlässig. Einige Pegelbögen (am Pegel Gröde Hallig sogar der überwiegende Teil) fehlten komplett.

Tab. 3: Vorhandene Aufzeichnungen der Wasserstände auf den Halligen und die Höhen der beginnenden und vollständigen Überflutungen der Halligen

Hallig	Aufzeichnung liegt vor		Beginnende Überflutung bei [cm über NN]	Vollständige Überflutung bei [cm über NN]
	von	bis		
Gröde	27.11.1976	13.12.2000	210	220
Hooge	24.11.1977	19.03.2007	250	270
Nordstrandischmoor	04.03.1982	08.12.2007	200	220

Alle über dem Schwellwert der beginnenden Überflutung liegenden Scheitelwerte wurden digital in Tabellenform erhoben. Die Höhe der beginnenden Überflutung wurde vom LKN-SH in Abstimmung mit den Halligbewohnern festgelegt. Diese Höhe kann aber nur einen Anhalt darstellen und nicht als feste Höhe interpretiert werden, da die Höhe der beginnenden Überflutung wesentlich von der Windangriffsrichtung und dem damit verbundenem Seegang abhängt. Die unterschiedlichen Höhen der beginnenden und vollständigen Überflutungen sind in der unterschiedlichen Topographie der Halligen begründet. Im Gegensatz zu den Halligen Gröde und Nordstrandischmoor ist die Hallig Hooge von einem Sommerdeich umgeben. Die Höhe des Sommerdeiches beträgt circa zwischen 120 cm über MThw im Osten und 180 cm über MThw im Westen der Hallig, wobei das MThw (1996/2005) am Pegel Hooge-Anleger 133 cm über NN beträgt.

Zum Vergleich und zur Plausibilisierung der Pegelaufzeichnungen auf den Halligen stehen in den in Tab. 3 genannten Zeiträumen lückenlos Scheitelwerte zur Verfügung, die an Messstellen vor den Halligen aufgezeichnet wurden. Durch eine Gegenüberstellung beider Datensätze ist festzustellen, dass in den untersuchten Zeiträumen für die Hallig Gröde nur circa 15 % aller Überflutungen, für die Hallig Hooge circa 47 % und für die Hallig Nordstrandischmoor circa 25 % aller Überflutungen anhand von Aufzeichnungen belegt sind.

Die Abb. 10 zeigt das Verhalten der Scheitelwasserstände im Vergleich der Pegel vor und auf der Hallig sowie die Lage der Pegel. Deutlich sind in den Darstellungen der Scheitelwerte auch eine Vielzahl von Ausreißern zu erkennen. Eine zeitintensive Überprüfung dieser Ausreißer anhand der Pegelbögen ist noch nicht erfolgt. Die gestrichelte Ober- und Untergrenze kennzeichnet den Bereich, der physikalisch als sinnvoll erachtet wird.

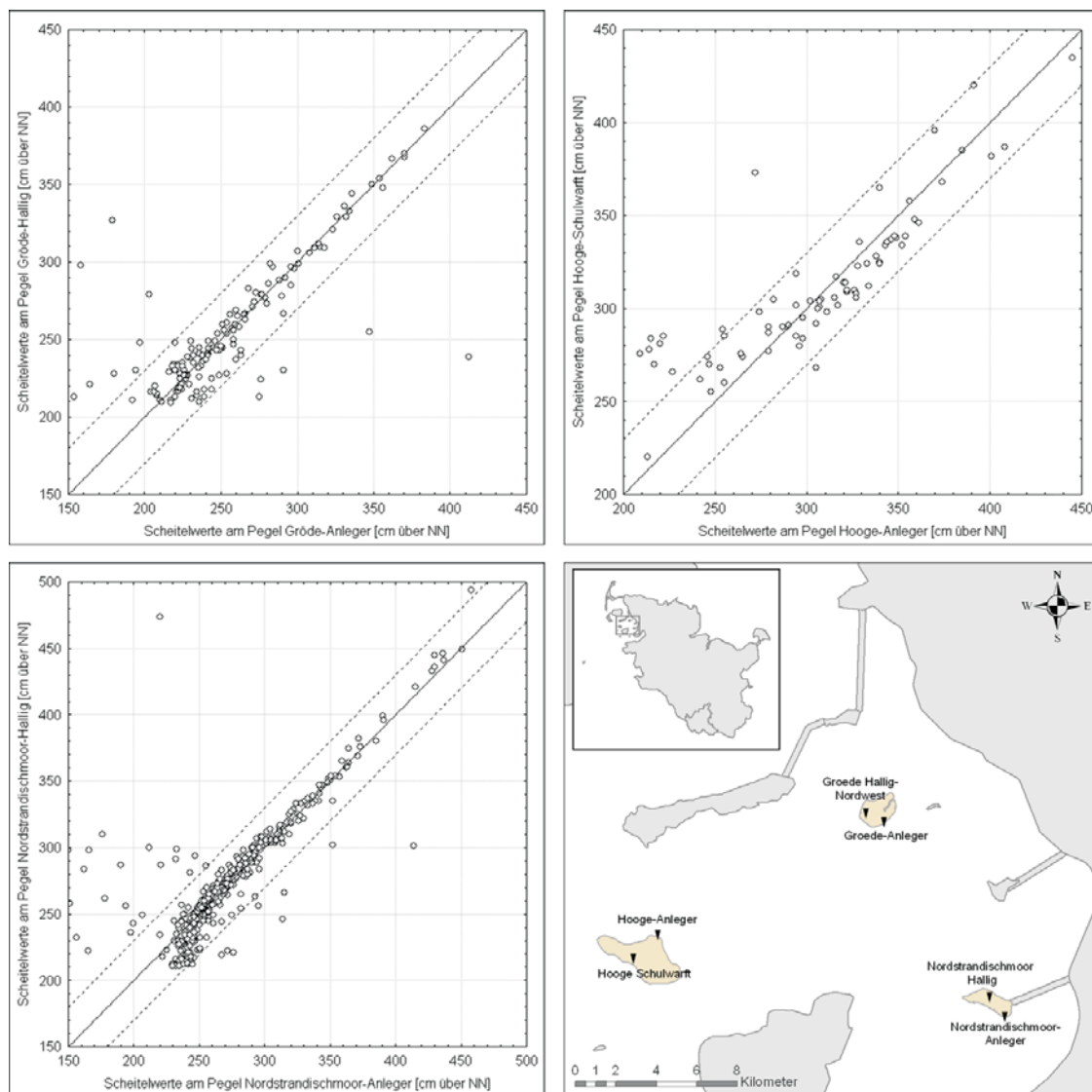


Abb. 10: Scheitelwerte im Vergleich jeweils auf und vor den Halligen sowie Lage der Pegel

Neben den Scheitelwerten wurden vom LKN-SH auch alle im Zusammenhang mit einer Sturmflut aufgezeichneten Überflutungen digitalisiert. Bei Betrachtung der aufgezeichneten Sturmflutverläufe auf den Halligen Hooge und Nordstrandischmoor zeigt sich, dass die Wasserstände auf den Halligen bei auflaufendem Wasser zeitverzögert ansteigen, bis die Scheitelwasserstände erreicht sind. Zum Teil scheint sich das Wasser auf der Hallig um bis zu 20 cm höher aufzustauen als vor der Hallig. Ob dies in den unpräzisen Aufzeichnungen begründet oder tatsächlich bei bestimmten Wetterlagen so zu beobachten ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht belegt werden.

Nach der Überschreitung der Scheitelwasserstände entspricht die Fallgeschwindigkeit auf den Halligen zunächst der Fallgeschwindigkeit vor den Halligen von circa 40 cm/h. Sofern eine Höhe von circa 30 cm bis 50 cm über dem Schwellwert einer beginnenden Überflutung unterschritten wird, verringert sich die Fallgeschwindigkeit auf den Halligen deutlich. Auf der Hallig Hooge sind dabei Fallgeschwindigkeiten von circa 6 cm/h bis 10 cm/h und auf der Hallig Nordstrandischmoor von circa 10 cm/h bis 30 cm/h zu beobachten (Abb. 11 und Abb. 12). Anhand der Sturmflutverläufe auf der Hallig Gröde können keine Fallge-

schwindigkeiten abgeleitet werden, da zwischen den wenigen verwertbaren Datensätzen weder parallele Aufzeichnungen zwischen dem Pegel Gröde-Hallig und Gröde-Anleger vorhanden sind, noch existieren zeitgleiche Aufzeichnungen an einem mit dem Pegel Gröde-Anleger korrelierenden Pegel.

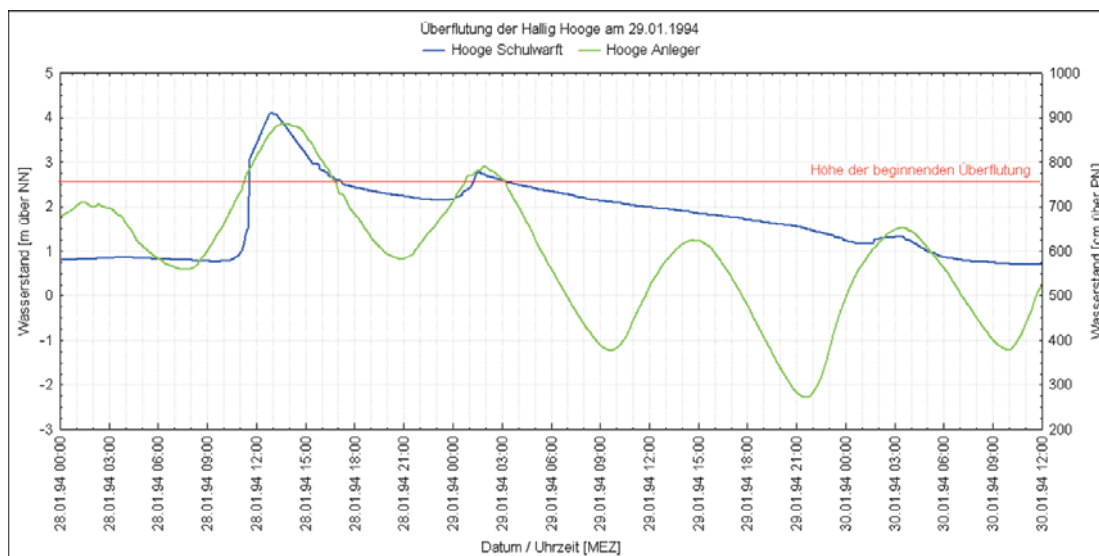


Abb. 11: Ganglinie am Pegel Hooge-Schulwarft und Hooge-Anleger bei der Überflutung der Hallig Hooge am 29. Januar 1994

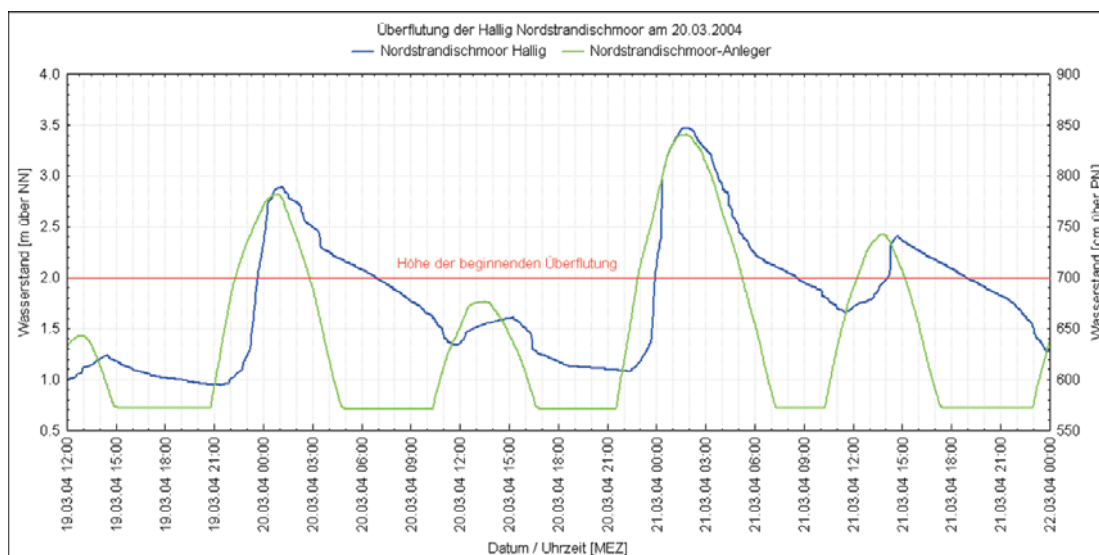


Abb. 12: Ganglinie am Pegel Nordstrandischmoor Hallig und Nordstrandischmoor bei der Überflutung der Hallig Nordstrandischmoor am 20. März 2004

Abb. 13 zeigt die Zunahme der Verweilzeit der Überflutungen auf den Halligen Hooge und Nordstrandischmoor in Abhängigkeit vom höchsten Scheitelwasserstand während der Überflutung. Während die Verweilzeit auf der Hallig Hooge bei allen Aufzeichnungen maximal circa sieben Stunden beträgt, wurden auf der Hallig Nordstrandischmoor auch schon Verweilzeiten von annähernd 24 Stunden aufgezeichnet. Hier muss ab Wasserständen größer als circa 290 cm über NN damit gerechnet werden, dass die Überflutung über zwei Tidehochwasser bestehen bleibt.

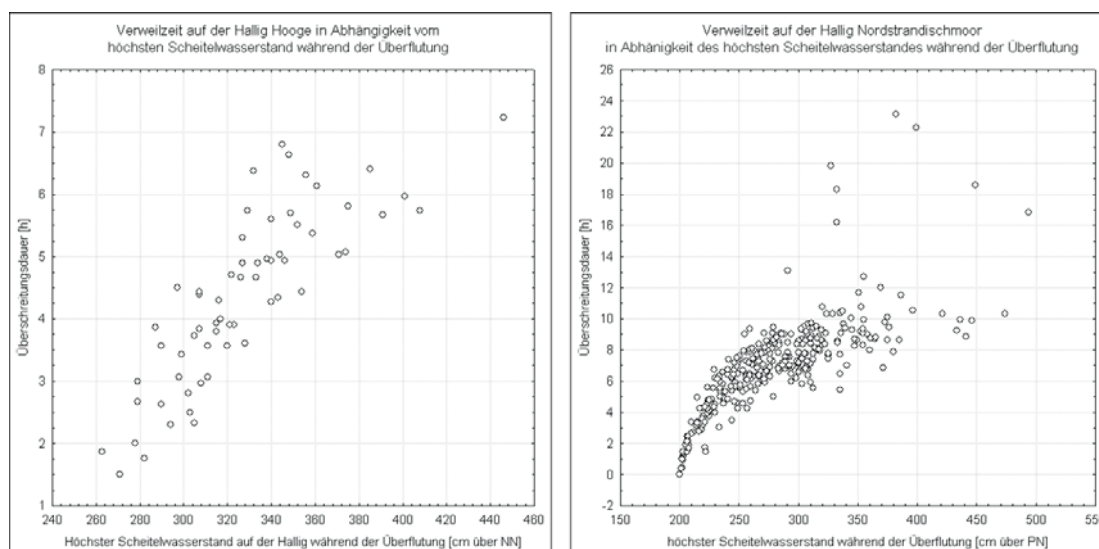


Abb. 13: Verweilzeit auf den Halligen Hooge und Nordstrandischmoor in Abhängigkeit vom höchsten Scheitelwasserstand während der Überflutung

4. Realisierungsvorschlag

Gemäß dem Landeskatastrophenschutzgesetz¹ haben an der Westküste und an der tidebeeinflussten Elbe die Landräte der Kreise Nordfriesland, Dithmarschen, Steinburg und Pinneberg sowie die Bürgermeisterin bzw. der Bürgermeister der Gemeinde Helgoland als Untere Katastrophenschutzbehörde den Katastrophenschutz für den Hochwasser-Katastrophenfall (zum Beispiel bei Sturmfluten) aufzubauen. Der LKN-SH nimmt gemäß Landeswassergesetz² die mit der Abwehr der durch den Zustand der Hochwasserschutzanlagen hervorgerufenen Gefahren für die Allgemeinheit zusammenhängenden Aufgaben wahr. Im Sturmflut- und Katastrophenfall ist der LKN-SH zur technischen Beratung und Lagebeurteilung in die Katastrophenabwehrorganisation der Kreise integriert.

Für die Sicherstellung eines geordneten Ablaufs werden im Katastrophenfall im Dienstbezirk des LKN-SH fünf Abschnittsführungsstellen aufgebaut, die insgesamt 18 Wehrabschnitte koordinieren. Diese teilen sich in kleinere Wachabschnitte auf, die von Deichwachen kontrolliert werden. Um bei der Auslösung eines Sturmflutalarms die Abschnittsführungs-

¹ Gesetz über den Katastrophenschutz in Schleswig-Holstein (Landeskatastrophenschutzgesetz) i.d.F.d.B. 10. Dezember 2000.

² Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (Landeswassergesetz) in der Fassung vom 11. Februar 2008.

stellen, Wehrabschnitte etc. aufbauen zu können, bedarf es einer Vorlaufzeit von circa einer Stunde, wobei der Aufwand als extrem hoch einzustufen ist (persönliche Mitteilung Frerk Jensen, LKN-SH). Deshalb wird die Auslösung eines Sturmflutalarms jeweils intensiv mit den Kreisen diskutiert. Dem LKN-SH obliegt es dabei, die Situation unter anderem aus hydrologischer Sicht zu bewerten und eine Einschätzung über die zu erwartende Entwicklung der Sturmflutwasserstände abzugeben.

Dafür werden unter anderem der Wasserstandsvorhersage- und Sturmflutwarndienst des BSH (JENSEN et al., 2008) genutzt, der den LKN-SH neben persönlichen Beratungen auch über einen sogenannten FACT24-Service automatisch informiert, sobald Wasserständen von 1,0 m und 1,5 m über dem mittleren Hochwasser am Pegel Husum erwartet werden. Um die geographisch stark strukturierte Region der nordfriesischen Wattenmeerküste mit den vorgelagerten Außensänden, Inseln und Halligen, differenzierter zu berücksichtigen, werden bei Sturmfluten zusätzlich manuell Windstauwerte am Pegel Husum ermittelt und die aktuelle Tideganglinie, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie die aktuelle Windstaukurve mit historischen Sturmfluten verglichen.

Am Pegel Munkmarsch können bei Windrichtungen von circa 340° Windstauhöhen von bis zu 150 cm auftreten, während die Wasserstände in Husum noch unterhalb dieses Schwellwertes liegen. Dasselbe gilt für den Pegel Schlüttsiel, dort können die Wasserstände bei hohen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen von circa 200° ebenfalls höher als am Pegel Husum auflaufen (vgl. Kap. 2.2). Die Ermittlung von Windstauwerten allein am Pegel Husum ist demnach nicht für die gesamte nordfriesische Küste repräsentativ.

Im Folgenden wird eine Realisierungsmöglichkeit für die Verwendung der vorgestellten Ergebnisse im Rahmen einer regionalisierten Sturmflutvorhersage für den LKN-SH vorgestellt, um die äußerst geringe Vorlaufzeit im Falle einer Entscheidung für die Auslösung eines Sturmflutalarms durch eine Kombination von guten Vorhersagen des BSH und eigenen Kenntnissen über das Sturmflutgeschehen zu verlängern.

Eine Voraussetzung für die Anwendung der hier vorgestellten Verfahren ist die Verfügbarkeit der notwendigen Daten im operationellen Betrieb. Dies trifft insbesondere auf die Pegeldaten der als repräsentativ hervorgehobenen Pegel und die für die Berechnung des Mittelwindes notwendigen Windinformationen zu (vgl. Kap. 2.2).

Derzeit sind die Daten der Pegel Husum und Wittdün online verfügbar und die Daten der Pegel Schlüttsiel, Hooqe-Anleger und Munkmarsch können im Sturmflutfall alle 15 Minuten zum LKN-SH übertragen werden. Der Pegel Nordstrandischmoor steht im operationellen Betrieb aufgrund einer nicht vorhandenen festen Stromversorgung nicht zur Verfügung, kann aber annähernd durch den mit einem ISDN- und Stromanschluss ausgestatteten Pegel Strucklahnungshörn ersetzt werden. Prinzipiell ist eine hohe Verfügbarkeit an allen repräsentativen Pegeln zu empfehlen.

Die für den Mittelwind notwendigen Winddaten der Stationen stehen im LKN-SH nur teilweise mit den Stationen List, St. Peter-Ording und Helgoland operationell zur Verfügung. Die Stationen Ems und UFS Deutsche Bucht sollten hier ebenfalls ergänzt werden. Die Winddaten sollten automatisiert in den Mittelwind umgerechnet und neben dem ebenfalls automatisch berechneten Inhomogenitätsindex in dem vom LKN-SH genutzten Wasserstands-Informationssystem vorgehalten werden. Die Möglichkeit, graphisch aufbereitete Ergebnisse aus dem operationellen Modellsystem des BSH im Sturmflutfall zur Verfügung gestellt zu bekommen, sollte ebenfalls genutzt werden, um die eigenen punktuellen Messungen in die Fläche projizieren zu können.

Über den berechneten Mittelwert kann der LKN-SH den Windstau am Bezugspegel Hooqe-Anleger bestimmen, um darüber auf die zu erwartenden Scheitelwasserstände in den

einzelnen Regionen zu schließen (Abb. 5). Dabei ist zu beachten, dass die Qualität der berechneten Scheitelwasserstände in den einzelnen Regionen nur so gut sein kann, wie die Qualität des Inputs für die Berechnung der Vorhersage am Bezugsort. Beträgt der Inhomogenitätsindex $< 0,9$ (vgl. Kap. 2.2), so ist eine eingehende Prüfung der Winddaten und gegebenenfalls eine Rückkopplung mit dem BSH über die Windstauentwicklung zu empfehlen.

Die Vorhersagen und die Modellergebnisse des BSH sowie die Naturdaten können anschließend mit den eigenen Vorhersagen verglichen werden. Treten signifikante Differenzen zwischen den einzelnen Ergebnissen auf, so ist eine Diskussion mit dem BSH über die zu erwartenden Wasserstände anzustreben, um die Vorhersagen zu verifizieren.

Mit Hilfe dieser möglichst belastbaren Vorhersagen kann bei der Katastrophenabwehr der Fokus zunächst auf die Region gesetzt werden, bei der mit den höchsten Wasserständen zu rechnen ist. Diese Vorgänge sollten regelmäßig wiederholt werden, um die Berechnungen an die jeweils aktuelle Wetterlage anzupassen.

Die aufgetretenen Differenzen zwischen Vorhersagen und Beobachtungen sollten nach jedem Sturmflutereignis analysiert werden, um die gewonnenen Erkenntnisse wenn möglich in das Vorhersageverfahren mit einfließen zu lassen und um die Vorhersagen in einem iterativen Prozess weiter zu verbessern.

Im Allgemeinen liefern die numerischen Modelle des BSH gute Sturmflutvorhersagen für den Vorhersagezeitraum bis 24 Stunden. Sofern jedoch über die Vorhersagen des BSH hinaus kleinräumige Aussagen für Nordfriesland benötigt werden, stellt das vorgestellte empirische Verfahren eine gute Ergänzung für einen Vorhersagezeitraum bis sechs Stunden dar. Zudem kann durch die Anwendung der Windstaukurven eine klare Vorstellung über die regionale Verteilung der in Nordfriesland zu erwartenden Sturmflutwasserstände vermittelt werden.

5. S c h r i f t e n v e r z e i c h n i s

- ANONYMUS: Gezeitentafeln. Europäische Gewässer. BSH Hamburg und Rostock, 2008.
- BAEHRENS, C.; BAUDLER, H.; BECKMANN, B.-R.; BIRR, H.-D.; DICK, S.; HOFSTEDE, J.; KLEINE, E.; LAMPE, R.; LEMKE, W.; MEINKE, I.; MEYER, M.; MÜLLER, R.; MÜLLER-NAVARRA, S. H.; SCHMAGER, G.; SCHWARZER, K. und ZENZ, T.: Die Wasserstände an der Ostseeküste. *Die Küste*, 66, 2003.
- DUENSING, G.; HÖFLICH, O.; KAUFELD, L.; SCHMIDT, H.; OLBRÜCK, G. und BRANDT, B.: Meteorologische Untersuchungen über Stürme an der deutschen Nordseeküste. Seewetteramt Hamburg: Deutscher Wetterdienst, Einzelveröffentlichung Nr. 108, 1985.
- FELLER, W. and GASSMANN, F.: Analysis of Wind and Turbulence Fields in a Region with Complex Orography. *Journal of Applied Meteorology*, Volume 36, Issue 9, 1133–1137, 1997.
- JENSEN, J. und MUDERSBACH, C.: Zeitliche Änderungen in den Wasserstandszeitreihen an den Deutschen Küsten. In: Glaser R., Schenk, W., Vogt, J., Wießner, R., Zepp, H. und Wardenga, U. (Hrsg.), *Berichte zur Deutschen Landeskunde. Themenheft: Küstenszenarien*, Band 81, Heft 2, 99–112, Leipzig: Selbstverlag Deutsche Akademie für Landeskunde e.V., 2007.
- JENSEN, J.; MUDERSBACH, C.; MÜLLER-NAVARRA, S.-H.; BORK, I.; KOZIAR, C. und RENNER, F.: Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der deutschen Nordseeküste. *Die Küste*, 71, S. 123–168, 2006.
- JENSEN, J. und MÜLLER-NAVARRA, S.: Storm Surges on the German Coast. *Die Küste*, 74, 2008.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. und GIESE, H.: Empirische Windstauformeln für die deutsche Bucht. In: *Deutsche IDNDR-Reihe*, 7, 37–41, 1997.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H. and GIESE, H.: Improvements of an empirical model to forecast wind surge in the German Bight. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Jahrgang 51, 4, 385–405, 1999.

- MÜLLER-NAVARRA, S. H.; LANGE, W.; DICK, S. und SOETJE, K.: Über die Verfahren der Wasserstands-Sturmflutvorhersage. *Promet*, Jahrgang 29, Nr. 1–4, 117–124, 2003.
- MÜLLER-NAVARRA, S. H.: Über neuere Verfahren der Wasserstands- und Sturmflutvorhersage für die deutsche Nordseeküste. *Die Küste*, 76, 2009.
- MURAWSKI, J.: Die Wechselwirkung von Seegang und Strömung: Eine theoretische Grundlegung mit Modellanalysen. GKSS Bericht 2007/12.
- RÖSKE, F.: Sea Level Forecasts Using Neural Networks. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Volume 49, Number 1, 71 – 99, 1997.
- SMITH, S. D. and BANKE, E. G.: Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 101, 665–673, 1975.
- TOMCZAK, G.: Der Einfluß der Küstengestalt und des vorgelagerten Meeresbodens auf den windbedingten Anstau des Wassers, betrachtet am Beispiel der Westküste Schleswig-Holsteins. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, Band 5, 2/3, 114–131, 1952.