

Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tidelbe

Anette Ganske und Gudrun Rosenhagen

Zusammenfassung

Im KFKI-Projekt OPTTEL wurden zwei hydrodynamische Modelle zur operationellen Vorhersage von Wasserständen auf der Tidelbe entwickelt. Beide verwenden als Antrieb die Windfelder des Wettervorhersagemodells COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes. Die räumliche Auflösung der von diesem Wettervorhersagemodell gelieferten Windwerte beträgt 7 km und ist im Vergleich zur Auflösung der hydrologischen Elbe-Modelle, die Gitterpunktabstände von weniger als 100 m haben, deutlich gröber und damit unzureichend. Zweck des Projekts OPTTEL war deshalb die Entwicklung eines Verfahrens, das die Auflösung der Windfelder aus dem COSMO-Modelle ausreichend verfeinert. Dafür wurden unter Anwendung des Modells WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) windrichtungsabhängige Korrekturfaktoren für die mit COSMO-EU berechneten Windgeschwindigkeiten bestimmt. Die Ableitung der Korrekturfaktoren für die Windgeschwindigkeit erfolgte aus zeitlich gemittelten Windfeldern für Gitterweiten von 250 m.

Dazu wurden mit WASP mit zwei unterschiedlichen Randbedingungen Windfelder berechnet; einerseits mit den räumlich sehr hoch aufgelösten Rauigkeits- und Topographiefeldern, die mit Hilfe von topographischen Datensätzen abgeleitet wurden, und andererseits mit den Rauigkeits- und Topographiefeldern von COSMO-EU. Aus dem Vergleich dieser Windfelder berechnen sich die Korrekturfaktoren, mit denen aus den COSMO-EU-Windfeldern räumlich hoch aufgelöste Windfelder über der Elbe bestimmt werden können.

Die Methode wurde nun überprüft, indem für verschiedene Gitterpunkte die Häufigkeitsverteilungen der mit Hilfe der Korrekturfaktoren bestimmten Windgeschwindigkeiten mit denen nahegelegener Messstationen verglichen wurden. Die Vergleiche mit den Messwerten belegen durchweg eine verbesserte Übereinstimmung der mit den Korrekturfaktoren für die Elbe bestimmten Windgeschwindigkeiten gegenüber dem reinen Modellwindoutput von COSMO-EU.

Schlagwörter

Windgeschwindigkeit, Operationelles Vorhersagemodell, Elbe-Ästuar

Summary

In the KFKI project OPTTEL, two hydrodynamical models for the operational forecast of the water levels of the Elbe estuary were developed which use the wind data of the weather forecast model COSMO-EU of the German Meteorological Service (DWD) as driving fields. The spatial resolution of these wind fields is 7 km, which is much coarser than the resolution of the hydrological models, the grid size of which is about 100 m. Hence, one aim of the project OPTTEL was to develop a method to calculate wind fields on a finer grid from COSMO-EU fields for operational use. Correction factors for the COSMO wind data

in the Elbe estuary were derived, depending on the wind directions, by use of the Wind Atlas Analysis and Application Program WAsP. For that, calculations were performed for mean wind fields basing on two different boundary conditions: One with fields of topography and roughness of high spatial resolution, which were derived from official topographic data sets, the other with the topography and roughness fields used by COSMO-EU. The correction factors were then derived by the point wise comparison of the two wind fields. The method was tested by comparing the frequency distributions of wind speed calculated with the correction factors at several model grid points, with the frequency distributions of data of observation stations close to these grid points. The comparisons of the corrected wind speed data on the river Elbe and the pure model results of COSMO-EU with measurements show prevailingly improved agreement.

Keywords

wind speed, operational forecast model, elbe estuary

Inhalt

1	Einleitung.....	126
2	Das Wettervorhersagemodell COSMO-EU	127
3	Berechnung der Windfelder mit WAsP.....	128
3.1	Das Windmodell WAsP.....	129
3.2	Festlegung der Rechengebiete.....	130
3.3	Bestimmungen der Rauigkeits - und Topographiefelder.....	131
3.4	Berechnete Windfelder.....	131
4	Berechnung der Faktoren.....	132
4.1	Korrekturfaktoren für COSMO-EU	133
4.2	Abhängigkeiten der Korrekturfaktoren vom Wasserstand	134
5	Vergleich der Windfelder mit Messungen	135
5.1	Messstationen in Elbnähe.....	135
5.2	Vergleiche von Häufigkeitsverteilungen der COSMO-EU-Daten und der Messdaten.....	136
5.3	Vergleich von kurzen Zeitreihen während der Sturmflut am 18.1.2007	137
6	Zusammenfassung und Fazit.....	138
7	Danksagung	139
8	Schriftenverzeichnis	140

1 Einleitung

Der Wasserstand der Tideelbe wird stark vom Wind beeinflusst. Dieser Einfluss wächst mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten. Bei den Wasserstandsvorhersagen spielt deshalb neben der Tide die Vorhersage des Winds eine maßgebliche Rolle. Dabei liefern die Windfelder die atmosphärische Randbedingung für die hydrodynamischen Modelle, mit denen der Wasserstand berechnet wird.

Im KFKI-Projekt OPTTEL wurden zwei hydrodynamisch-numerische Modelle zur operationellen Vorhersage von Wasserständen auf der Tideelbe entwickelt, für deren Betrieb operationell verfügbare Windfelder in 10 m Höhe als Randbedingung benötigt werden. Die verwendeten Windfelder sollten eine ähnlich hohe räumliche Auflösung wie die hydrodynamischen Modelle haben. Da eine gesonderte Berechnung dieser Windfelder mit einem Atmosphärenmodell mit ähnlicher räumlicher Auflösung zu viel Rechenzeit während der Wasserstandsvorhersage in Anspruch nähme, werden die Windfelder aus bestehenden, gröber aufgelösten operationellen Atmosphärenmodellen auf ein feineres Gitter umgerechnet.

Die operationellen Modelle des BSH verwenden zum Antrieb die Windfelder des Wettervorhersagemodells COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Verwendet man die räumlich groben Windfelder von COSMO-EU, um daraus ein räumlich hoch aufgelöstes Windfeld über der Elbe zu interpolieren, so wird dieses Windfeld über der Elbe zu geringe Windgeschwindigkeiten aufweisen, da die verschiedenen Rauigkeiten des Geländes bei der Berechnung der Windfelder auf Grund der groben Auflösung ungenügend erfasst werden. So haben z. B. viele Gitterelemente von COSMO-EU die Rauigkeit von Land, wo in Wirklichkeit ganz oder teilweise Wasserflächen sind.

Um die Einflüsse der Rauigkeitsunterschiede auf das Windfeld zu korrigieren, werden im Projekt OPTTEL mit Hilfe des Modells WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) windrichtungsabhängige Korrekturfaktoren für die mit COSMO-EU berechneten Windgeschwindigkeiten bestimmt. Diese Korrekturfaktoren berücksichtigen die Unterschiede zwischen den Rauigkeitsfeldern, die bei COSMO-EU verwendet werden, und dem hoch aufgelösten Feld. Die windrichtungsabhängigen Korrekturfaktoren werden aus zeitlich gemittelten Windfeldern auf einem Gitter mit Maschenweiten von 250 m über der Elbe berechnet. Diese Faktoren berücksichtigen lediglich Änderungen der Windgeschwindigkeit auf Grund der Rauigkeitsunterschiede, nicht aber mögliche Änderungen der Windrichtung z. B. aufgrund von Kanalisierungseffekten des Elbestromtals. Es wird jedoch bei diesen Betrachtungen davon ausgegangen, dass diese Kanalisierungseffekte die Windgeschwindigkeiten weniger beeinflussen als die unterschiedliche Rauigkeit von Wasser und Land. Ein vergleichbares Vorgehen zur Berechnung von räumlich hoch aufgelösten Windfeldern hatte sich bereits bei anderen Projekten bewährt, siehe z. B. SCHMIDT und BEHRENS (1998).

Der folgende Artikel beschreibt zuerst kurz das Wettervorhersagemodell COSMO-EU, das im operationellen Betrieb die Windfelder liefert. Danach folgt eine kurze Vorstellung des Windmodells WASP, mit dem die Korrekturfaktoren bestimmt wurden. Die Berechnung und die Ergebnisse der Korrekturfaktoren werden beschrieben und schließlich die mit den Korrekturfaktoren multiplizierten Windfelder mit Messungen verglichen.

2 Das Wettervorhersagemodell COSMO-EU

Das regionale numerische Wettervorhersagemodell COSMO-EU bildet zusammen mit dem Globalmodell (GME) und dem Konvektion auflösenden Modell COSMO-DE den Kern des numerischen Wettervorhersagesystems des Deutschen Wetterdienstes.

COSMO-EU (SCHÄTTLER 2005; SCHÄTTLER et al. 2005) läuft seit dem 1.1.1999 im operationellen Vorhersagebetrieb mit einer räumlichen Gitterweite von rund 7 km und Vorhersagezeiten von bis zu 78 Stunden. Sein Modellgebiet erstreckt sich über nahezu

ganz Europa inklusive dem Nordost-Atlantik, der Nordsee und Ostsee, dem Mittelmeer und dem Schwarzen Meer. An den seitlichen Rändern erhält es Randwerte aus dem globalen Wettervorhersagemodell des DWD (GME), siehe MAJEWSKI et al. (2002).

Die Lage der Gitterpunkte von COSMO-EU im Untersuchungsgebiet ist in Abb. 1 dargestellt. Verwendet man als Randbedingung der hydrodynamischen Modelle für die Elbe das Windfeld von COSMO-EU, liegen im Mündungsbereich der Elbe nur wenige COSMO-EU-Gitterpunkte. Flussaufwärts befinden sich nur noch einzelne Gitterpunkte auf der Elbe, die meisten Gitterpunkte liegen auf Land. Für diese Gitterpunkte wird bei der Windfeldberechnung die Rauigkeit von Land vorgegeben, die höher ist als die Rauigkeit von Wasser. Interpoliert man aus den 10 m Windfeldern von COSMO-EU ein räumlich höher aufgelöstes Windfeld über der Elbe, so wird dieses Windfeld über dem Wasser zu geringe Windgeschwindigkeiten aufweisen, da bei deren Berechnung die höhere Rauigkeit von Landoberflächen verwendet wird. Mit diesem fehlerbehafteten Windfeld wird das hydrodynamische Modell die Wasserstände im Vergleich zu den gemessenen Wasserständen unterschätzen, so dass eine Methode gesucht werden musste, mit der in einfacher Weise die Einflüsse der nicht richtig erfassten Rauigkeiten auf das Windfeld berücksichtigt wird.

Das hochauflösende Regionalmodell COSMO-DE, das seit 2007 im Einsatz ist, überdeckt im Wesentlichen nur Deutschland und die angrenzenden Gebiete der Nachbarländer sowie der Nord- und Ostsee. Mit einer Maschenweite von nur 2,8 km liefert es alle drei Stunden eine achtzehnstündige Vorhersage. Die seitlichen Randwerte stammen von COSMO-EU. Für die operationelle Wasserstandsvorhersage sind sowohl das Vorhersagegebiet als auch die -dauer nicht ausreichend.

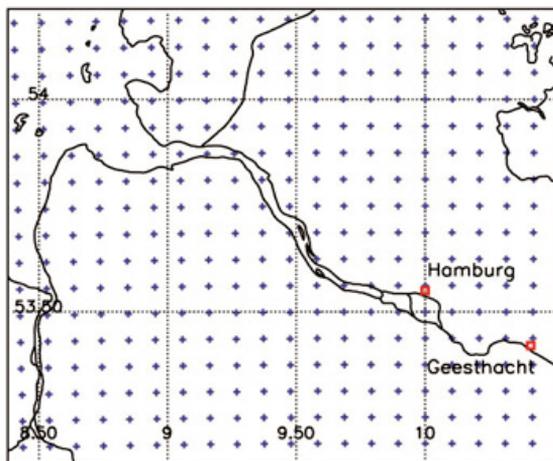


Abbildung 1: Lage der COSMO-EU-Gitterpunkte im Gebiet zwischen Elbmündung und Blekede. Schwarze Linien: Elbufer und Küsten.

3 Berechnung der Windfelder mit WAsP

WAsP ist ein Programm von DTU Wind Energy zur Berechnung von Windstatistiken für die Planung von Windparks (siehe WAsP 2012; MORTENSEN et al. 1993). Es stellt

eine Standardmethode zur Berechnung von Windenergieressourcen über Land und über See dar. Mit diesem Programm kann man unter Berücksichtigung der genauen Topographie und Rauigkeit eines Gebiets von je einer gemessenen Zeitreihe der Windgeschwindigkeit und -richtung an einem Punkt auf zeitlich gemittelte Windfelder in einem Gebiet schließen.

3.1 Das Windmodell WAsP

Bei der Berechnung der Windfelder mit WAsP für ein Gebiet gibt man eine Windmessung (Windgeschwindigkeit und -richtung), an einem nicht zu weit entfernten Standort vor. Daraus wird das sogenannte regionale Windklima berechnet, indem die Winddaten bezüglich ihrer lokalen Eigenschaften wie Topographie, Rauigkeit und Hindernisse bereinigt werden, so dass sie als repräsentativ für die Region ohne Topographie und mit einer Einheitsrauigkeit der Landflächen gelten können. Dann wird die Windmessung auf das gewünschte Gebiet mit seinen Besonderheiten übertragen und für 12 Windrichtungsklassen werden jeweils Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten in Bodennähe berechnet. Diese mittleren Windfelder können jeweils auf einem Gitter mit einer frei wählbaren Gitterweite ausgegeben werden. Dabei wird bei all diesen Berechnungen von einer neutralen Temperaturschichtung der Atmosphäre ausgegangen. Dies ist in der Natur bei höheren Windgeschwindigkeiten im Allgemeinen gegeben.

Bei der Berechnung der Rauigkeit auf See wird bei WAsP bei allen Windgeschwindigkeiten von einer festen Rauigkeit von 0.002 cm ausgegangen, siehe WAsP (2012). Bei Windberechnungen auf der freien See nimmt man jedoch an, dass die Rauigkeit der Wasseroberfläche mit der Windgeschwindigkeit anwächst, da mit wachsenden Windgeschwindigkeiten höhere Wellen entstehen, die die Seeoberfläche rauer machen. Eine Standardmethode zur Berechnung von Rauigkeiten auf See bietet die Formel von CHARNOCK (1955). Diese Formel wurde jedoch für die Wechselwirkungen zwischen Windgeschwindigkeiten und Wellen auf der offenen See abgeleitet. Da es praktisch keine Arbeiten zur Rauigkeit von Wasser in Küstennähe und in Ästuaren gibt, ist eine genaue Abschätzung der Wechselwirkung zwischen der Rauigkeit des Wassers mit dem Windfeld auf der Elbe nicht möglich. Für das Projekt XtremRisk wurde der Einfluss der veränderten Rauigkeit von Land- und Wasserflächen in Ästuaren und Flüssen auf die Windfelder bei extremen Stürmen untersucht, siehe HENNEMUTH (2011). Es wurde festgestellt, dass auch in Ästuaren mit wachsender Windgeschwindigkeit die Rauigkeit des Wassers zunimmt und so die Unterschiede zwischen den Windgeschwindigkeiten über Wasser und über Land abnehmen. Diese Untersuchung deutet darauf hin, dass die mit WAsP berechneten Windgeschwindigkeiten über Wasser bei hohen Windgeschwindigkeiten möglicherweise überschätzt sind.

PETERSEN (1993) zeigte jedoch durch einen Vergleich der mit WAsP in mehreren Höhen berechneten Windgeschwindigkeiten mit Messungen an Küstenmessstationen sowie auf See, dass die mit WAsP berechneten Windgeschwindigkeiten keine signifikanten Abweichungen von den gemessenen Werten aufweisen. Es wurde jedoch festgestellt, dass über See die gefundenen Abweichungen der berechneten Windgeschwindigkeit von den Messungen mit dem Fetch (Abstand des Seepunkts von der nächstgelegenen Küste in Gegenwindrichtung) zusammenhängen: Bei kleinem Fetch wird die berechnete Windgeschwindigkeit von WAsP leicht überschätzt, bei großem Fetch über 30 km jedoch

leicht unterschätzt. Weitere Untersuchungen von LANGE und HØJSTRUP (2001) haben ergeben, dass dies einerseits durch eine Nichtberücksichtigung der atmosphärischen Temperaturschichtung und andererseits durch eine Abhängigkeit der Seerauhigkeit vom Fetch hervorgerufen wird.

Berechnet man mit WAsP ein Windfeld für ein Gebiet, so sollte die Entfernung zur Messstation der Eingabezeitreihe nicht zu groß sein. Das Gebiet der Elbe, für das Windfelder bestimmt werden sollen, ist deutlich größer als die Gebiete, die z. B. zur Berechnung von Windparks untersucht werden. Da bei den Berechnungen im Projekt aber nicht ein Windfeld selbst, sondern die Verhältnissen zweier Windfelder bestimmt werden, wurde zur Berechnung aller Windfelder zwischen Cuxhaven und Bleckede das gleiche Höhenwindfeld verwendet. Dabei wurden die in Scharhörn gemessenen Werte der Windgeschwindigkeiten und -richtungen der Jahre 1998 - 2007 als Eingabezeitreihen verwendet.

3.2 Festlegung der Rechengebiete

Um die Windfelder mit WAsP berechnen zu können, musste das gesamte Gebiet der Elbe zwischen Cuxhaven und Bleckede in 7 Teilgebiete eingeteilt werden, siehe Abb. 2. Diese Einteilung ist nötig, da WAsP zur Berechnung von Windfeldern in deutlich kleineren Gebieten als das gesamte Gebiet konzipiert ist, so dass mit diesem Programm das Windfeld im Gesamtgebiet nicht in einem Schritt berechnet werden konnte.

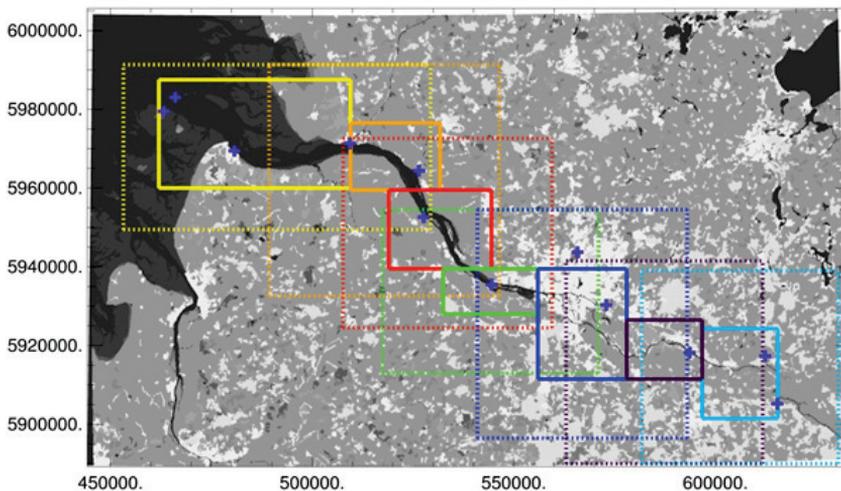


Abbildung 2: Einteilung des Gesamtgebiets in Teilgebiete. Gezeigt ist ein hoch aufgelöstes Feld der Rauigkeiten im Elbegebiet im UTM-Koordinatensystem. Dabei sind glatte Flächen (wie z. B. das Meer) in dunklen Grautönen, raue Felder (z. B. die Stadt Hamburg) in hellen Grautönen dargestellt. Teilgebiete, innerhalb derer Windfelder bestimmt wurden, sind mit gestrichelten Linien eingezeichnet, die Umrisse der Teilfelder, in denen die Faktoren bestimmt wurden, mit durchgezogenen Linien. Kreuze markieren die Orte von Windmessstationen.

Zur Berechnung der Korrekturfaktoren wurden zunächst mit WAsP verschiedene Windfelder bestimmt, in dem unterschiedliche Randbedingungen vorgegeben wurden. Diese Randbedingungen waren:

- Topographie- und Rauigkeitsfelder, die in COSMO-EU als Randbedingung verwendet werden (COSMO-EU Randfelder). Eine Beschreibung der COSMO-EU Randfelder findet man in SCHULZ und SCHÄTTLER (2009), Kap. 2.5.
- Randfelder, die aus topographischen Rasterdaten und amtlichen topographischen Karten erstellt wurden und die weiterhin als „hoch aufgelöste Randfelder“ bezeichnet werden.

Durch Vergleich der mit den COSMO-EU Randfeldern und den hoch aufgelösten Randfeldern berechneten Windfelder wurden dann die Korrekturfaktoren bestimmt.

3.3 Bestimmungen der Rauigkeits- und Topographiefelder

Für das Programm WASP müssen alle Felder der Topographie und Rauigkeit als Isolinienfelder vorgegeben werden. Dazu mussten die für die festen Gitterpunkte vorliegenden Werte in Isolinienfelder umgewandelt werden.

Die Rauigkeitsfelder von COSMO wurden zuerst als Hintergrundbild mit Zahlen dargestellt, die Isolinien der Rauigkeit von Hand gezogen und dann digitalisiert.

Räumlich höher aufgelöste Rauigkeitsfelder wurden aus digitalen topographischen Karten im Maßstab 1:50000 ebenfalls von Hand digital abgeleitet.

3.4 Berechnete Windfelder

Die Abb. 3 und 4 zeigen die mit WASP und zwei verschiedenen Randfeldern berechneten Felder der mittleren Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe über der Land- bzw. Wasseroberfläche im westlichsten Teilgebiet des Untersuchungsbereichs für die Windrichtungs-kategorie 300°, welche die Windrichtungen zwischen 285° und 315° enthält. Zusätzlich enthalten die Bilder die Uferlinien der Elbe aus einem Graphikprogramm.

Das in der Abb. 3 gezeigte Windfeld wurde mit den räumlich hoch aufgelösten Randfeldern berechnet. Dabei haben die Windgeschwindigkeiten Werte zwischen 3,3 m/s und 9,0 m/s. Abb. 4 zeigt das Windfeld, das mit den Rauigkeits- und Topographiefeldern von COSMO-EU berechnet wurde. Die Geschwindigkeiten liegen im Bereich zwischen 5,0 m/s und 8,0 m/s.

Vergleicht man die Windgeschwindigkeiten der zwei Felder, so erkennt man den Einfluss der geringen Rauigkeit der Wasseroberfläche der Elbe auf das Windfeld. So sind bei dem mit den hoch aufgelösten Randfeldern berechneten Windfeld die Windgeschwindigkeiten auf der Elbe immer größer als die Windgeschwindigkeiten über Land. Dort, wo in der Elbe Sandbänke und Inseln liegen, sind die Windgeschwindigkeiten im Lee reduziert im Vergleich zu den Wasseroberflächen. Da die Ausdehnung der Wasseroberfläche im Rauigkeitsfeld genauer erfasst ist, sind die Windgeschwindigkeiten höher und die Zone erhöhter Windgeschwindigkeiten reicht weiter von der Nordsee in die Elbe.

In Abb. 4 haben die mit den COSMO-EU Randfeldern berechneten Windgeschwindigkeiten am östlichen Rand des Gebiets bei Brunsbüttel über der Elbe Werte von der gleichen Größenordnung wie die Windgeschwindigkeiten über Land. Westlich von Cuxhaven erkennt man an den reduzierten Windgeschwindigkeiten über See den Einfluss der grob aufgelösten Land-See-Verteilung, die an dieser Stelle statt See Land vorgibt.

Verwendet man diese Windfelder zur Berechnung des Wasserstands, so wird mindestens in diesen Gebieten der Wasserstand unterschätzt.

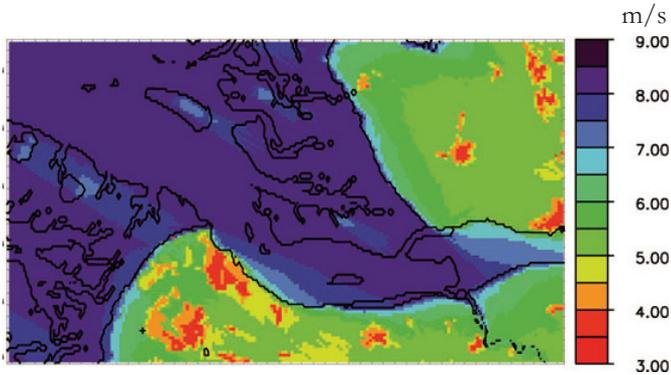


Abbildung 3: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für Windrichtungen zwischen 285° und 315° im Elbmündungsgebiet, berechnet mit dem Programm WAsP und den hoch aufgelösten Randfeldern. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhörn der Jahre 1998 - 2007 ermittelt. Schwarze Linien: Elbufer und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

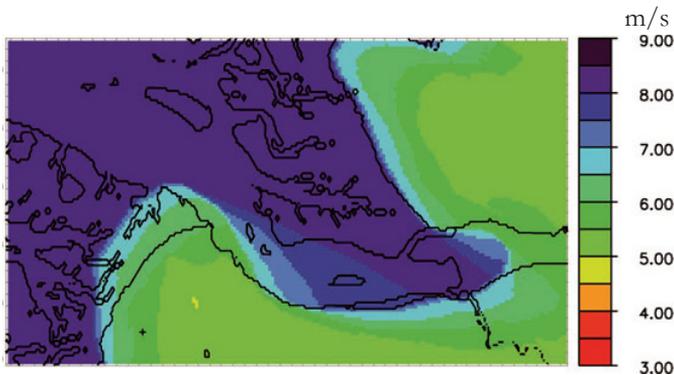


Abbildung 4: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für Windrichtungen zwischen 285° und 315° im Elbmündungsgebiet, berechnet mit dem Programm WAsP und den COSMO-EU Randfeldern. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhörn der Jahre 1998 - 2007 ermittelt. Schwarze Linien: Elbufer und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

4 Berechnung der Faktoren

Berechnet man für dasselbe Gebiet sowohl mit den hoch aufgelösten Rauigkeiten und den zugehörigen Topographien als auch mit den Rauigkeiten und der Topographie von COSMO-EU für eine bestimmte Windrichtungsklasse d jeweils ein zeitlich gemitteltes Windfeld, so lässt sich aus dem Verhältnis dieser Windwerte der Einfluss der groben Rauigkeiten und Topographien im Vergleich zu den räumlich hoch aufgelösten darstellen.

Dieses Verhältnis definiert genau die Korrekturfaktoren Kf für die gewählte Windrichtungsklasse d:

$$\text{Korrekturfaktor Kf}(d) = \frac{\text{Windgeschwindigkeit}(d) \text{ hoch aufgelöste Randfelder}}{\text{Windgeschwindigkeit}(d) \text{ COSMO-Randfelder}}$$

Da die Korrekturfaktoren aus den zeitlich gemittelten Windfeldern bestimmt werden, spiegeln sie immer die mittleren Windverhältnisse an einem Ort wieder.

4.1 Korrekturfaktoren für COSMO-EU

Die Korrekturfaktoren für COSMO-EU werden berechnet aus den Verhältnissen der mittleren Windgeschwindigkeiten für die 12 Windrichtungsklassen, die einerseits mit den COSMO-EU Randfeldern und andererseits mit den hoch aufgelösten Feldern bestimmt werden. Abb. 5 zeigt ein Beispiel für die Korrekturfaktoren von COSMO-EU bei Windrichtungen zwischen 285° und 315°. Im hier gezeigten Fall wurden die Faktoren aus den in Abb. 3 und 4 gezeigten Windfeldern bestimmt.

Im Mittel liegen die Korrekturfaktoren zwischen 0,8 und 1,2, am südlichen Ufer der Elbe erreichen sie Werte bis maximal 1,6. Über Land sinken die Werte der Faktoren in Gebieten mit Ortschaften oder Wäldern auf Werte von 0,6 ab, im ganzen Mündungsgebiet sind sie nahe 1,0. Dort, wo z. B. im hoch aufgelösten Rauigkeitsfeld Sandbänke sind, sind die Faktoren kleiner als 1,0. An den Küstenabschnitten östlich und westlich von Cuxhaven zeigt die Land-See-Maske von COSMO-EU Landflächen, wo im hoch aufgelösten Rauigkeitsfeld noch Wasserflächen sind. Da über Land die Windgeschwindigkeiten reduziert sind im Vergleich zu denen über Wasser, werden hier im Vergleich zur direkten Umgebung sehr hohe Faktoren berechnet.

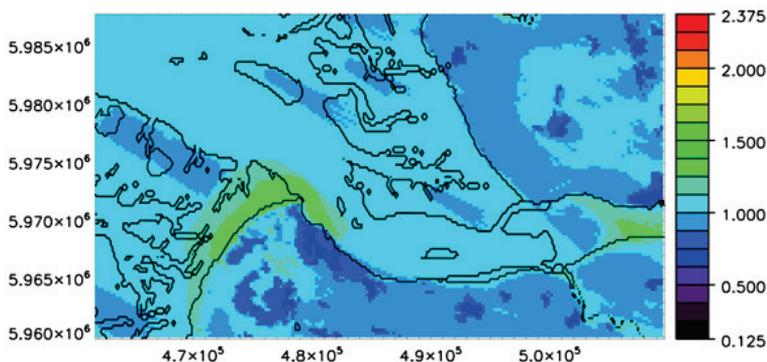


Abbildung 5: Korrekturfaktoren im Elbmündungsgebiet bei Windrichtungen zwischen 285° und 315°, berechnet aus den in Abb. 3 und 4 gezeigten Windfeldern, die mit dem Programm WASP und einerseits mit den hoch aufgelösten Randfeldern und andererseits mit den Randfeldern von COSMO-EU bestimmt wurden. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhorn der Jahre 1998 - 2007 ermittelt. Schwarze Linien: Elbufer und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

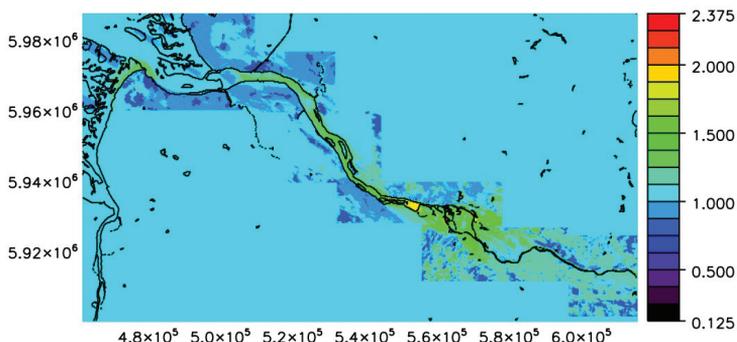


Abbildung 6: Faktoren im gesamten Gebiet zwischen Elbmündung und Bleekede bei Windrichtungen zwischen 285° und 315°, berechnet für die Teilgebiete in Abb. 2 aus den Windfeldern, die mit dem Programm WASP und einerseits mit den hoch aufgelösten Randfeldern und andererseits mit den Randfeldern von COSMO-EU bestimmt wurden. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhörn der Jahre 1998 - 2007 ermittelt. In den Gebieten, in denen keine Faktoren berechnet wurden, sind Werte gleich 1 eingetragen. Schwarze Linien: Flüsse, Kanäle, Seen und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

In analoger Weise wurden Korrekturfaktoren für andere Windrichtungssektoren und für die anderen Gebiete bestimmt. Abb. 6 zeigt für alle Gebiete die Korrekturfaktoren, die für die gleiche Windrichtungsklasse wie in Abb. 5 bestimmt wurden. Dabei wurde in den Gebieten, in denen keine Faktoren bestimmt wurden, die Werte 1,0 eingetragen. Von Brunsbüttel ab, stromaufwärts der Elbe, sind die Faktoren auf der Elbe stets größer als 1,0 und erreichen an einzelnen Gitterpunkten Werte bis zu 2,4. Für die anderen Windrichtungsklassen haben die Faktoren auf der Elbe die gleiche Größenordnung wie die für die Windrichtungsklasse 300°.

4.2 Abhängigkeiten der Korrekturfaktoren vom Wasserstand

Das hoch aufgelöste Rauigkeitsfeld, mit dem die Windfelder und anschließend die Faktoren berechnet werden, basiert auf den Landnutzungsinformationen der topographischen Karten. Dabei wurde in der Elbe und der Elbmündung in allen Gebieten, die unterhalb des mittleren Tidemittelwassers (Tmw) liegen, Wasserflächen angenommen. Betrachtet man jedoch andere Wasserstände, z. B. Tideniedrigwasser (Tnw) so wird deutlich, dass bei Tnw einige Flächen in Ufernähe der Elbe trocken fallen und dann eine höhere Rauigkeit haben als bei Tmw. Bei Tidehochwasser (Thw) hingegen werden mehr Wattenflächen überspült im Vergleich zum Zustand bei Tmw und diese Flächen werden bei Thw weniger rau sein als bei Tmw. Deshalb müssen sich bei Annahme von Thw oder Tnw andere Werte für die Korrekturfaktoren ergeben, als bei den für Tmw berechneten.

Probeweise wurden Faktorenfelder bei Vorgabe von Niedrig- und Hochwasserständen berechnet. Eine Berücksichtigung des veränderten Wasserstandes im Faktorenfeld zieht jedoch einen deutlich erhöhten Aufwand bei der Berechnung der korrigierten Windfelder nach sich. Es stellt sich jedoch heraus, dass die Änderungen der Faktoren mit veränderten Wasserstand auf sehr kleine Flächen beschränkt und im Betrage gering sind, weshalb auf eine weitere Berechnung von Faktoren für verschiedene Wasserstände über bzw. unter Tmw verzichtet wurde.

5 Vergleich der Windfelder mit Messungen

Ziel der Berechnung der Korrekturfaktoren war eine Verbesserung der Windfelder über der Elbe gegenüber den Modellergebnissen von COSMO-EU. In Ermanglung einer repräsentativen Windmessstation auf der Elbe, z. B. auf einer Sandbank, konnte nur ein Vergleich von Windmessdaten am Ufer in Elbnähe mit den korrigierten Modellergebnissen erfolgen. Eine Beurteilung der berechneten Windfelder auf der Elbe ist damit jedoch nicht möglich und kann deshalb nur indirekt über die berechneten Wasserstände erfolgen. Zur Methodvalidierung ist eine Messstation direkt auf der Elbe erforderlich, da sonst bei fehlerhaften Ergebnissen für die berechneten Wasserstände nicht zwischen Fehlern des antreibenden Windfeldes und der Elbströmung unterschieden werden kann.

5.1 Messstationen in Elbnähe

Vor dem Vergleich der berechneten Windfelder mit Windmessungen wurden Informationen über Windmessstationen entlang der Elbe zwischen Cuxhaven und Boizenburg gesammelt. Von 7 Stationen entlang der Tideelbe existieren längere Reihen von digital archivierten Winddaten. Da im Raum Hamburg keine einzige Station an der Elbe existiert, wäre lediglich ein Vergleich der berechneten Windgeschwindigkeiten mit Messungen am Flughafen Fuhlsbüttel möglich. Auf Grund der großen Entfernung von Fuhlsbüttel von der Elbe wurde darauf verzichtet.

Tab. 1 zeigt für die sieben Messstationen die Zeiträume, von denen ohne längere Ausfälle und ohne Veränderungen an der Station Windmessungen vorliegen. Weiter sind die Messhöhen über Grund verzeichnet sowie der Faktor, mit dem die Messungen von der Messhöhe auf die Standardhöhe von 10 m über Grund umgerechnet werden. Der Faktor wurde aus dem logarithmischen Windprofil mit einer abgeschätzten Bodenrauigkeit bestimmt.

Beim Vergleich der Messdaten mit den Modelldaten muss berücksichtigt werden, dass an allen Stationen die Windmessungen mehr oder weniger stark von ihrer Umgebung beeinflusst sind. Dies zeigt sich sowohl in den Metadaten der Stationen als auch im Vergleich der Windmessergebnisse der Jahre 2005 - 2006 in Abb. 7: So zeigt z. B. die Zeitreihe der Windgeschwindigkeiten an der Station Wedel einen sehr hohen Anteil an Kalmen von rund 17 %. Da sich aus der Umgebung der Station keine meteorologisch sinnvolle Erklärung für diese erhöhte Anzahl an Kalmen ableiten lässt, wurden die Messdaten von Wedel nicht zum Vergleich mit den Modelldaten herangezogen.

Tabelle 1: Vorhandene Messreihen im Zeitraum von 2000 - 2007 ohne längere Ausfälle sowie Messhöhen über Grund und Faktoren zur Berechnung der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe aus dem logarithmischen Windprofil.

Station	Zeitraum	Höhe h (m)	U(10 m)/U(h)
Boizenburg	2000 – 2006	18,0	0,86
Brunsbüttel	2000 – 2007	27,0	0,79
Cuxhaven	2005 – 2007	12,0	0,97
Krümmel	2005 – 2006	150,0	0,46
Ruthenstrom	2002 – 2007	12,0	0,95
Scharhörn	2003 – 2006	10,0	1,00
Störsperrwerk	2000 – 2005	18,2	0,86
Wedel	2003 – 2004	34,0	0,73

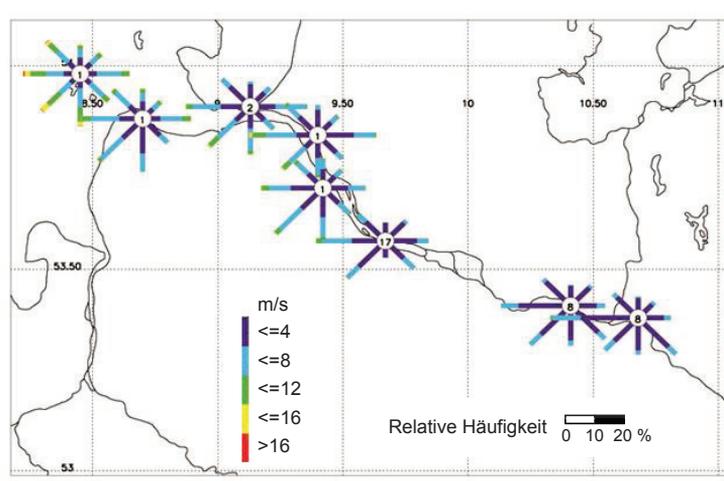


Abbildung 7: Windsterne für die Stationen (von West nach Ost) Scharhörn, Cuxhaven, Brunsbüttel, Ruthenstrom, Störsperrwerk, Wedel, Kernkraftwerk Krümmel und Boizenburg für den Zeitraum 2005 – 2006. Dargestellt ist die relative Häufigkeit in Prozent von Windmessungen in einer bestimmten Windrichtung für 8 Windrichtungsklassen als Länge der Balken. Darin farblich unterschieden fünf verschiedene Windgeschwindigkeitsklassen. In der Mitte des Kreises steht jeweils die relative Häufigkeit der Kalmen (Windgeschwindigkeiten kleiner 1 m/s) in Prozent.

5.2 Vergleiche von Häufigkeitsverteilungen der COSMO-EU-Daten und der Messdaten

Der Vergleich der korrigierten Windfelder mit Messdaten wurde für ausgewählte Gitterpunkte und Stationen durchgeführt. Folgende Vergleiche fanden statt:

1. Zeitreihen der Messwerte
2. Werte der COSMO-EU Analysen der Jahre 2000 - 2006, die auf das Gitter des BSH-Küstenmodells interpoliert wurden, wobei jeweils für die Werte an den BSH-Gitterpunkten ein Vergleich erfolgte, die im Modellgebiet des BSH-Modells am nächsten zur geographischen Koordinate der Messstation liegen.
3. Die Zeitreihen von COSMO-EU an einem Gitterpunkt, multipliziert für jeden Zeitschritt mit dem zur vorherrschenden Windrichtung gehörenden Korrekturfaktor. Dabei wurde derjenige Wert des Faktors verglichen, der im Faktorenfeld am nächsten zur Koordinate der Messung liegt.

Für die folgenden Untersuchungen wurden aus den Werten der drei Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten jeweils Häufigkeitsverteilungen gebildet und die 20., 50., 90. und 95. Perzentile bestimmt.

Abb. 8 zeigt einen Vergleich der Perzentilwerte der drei Zeitreihen für Cuxhaven. Im Vergleich zu den Messungen sind für alle gezeigten Perzentile die Werte von COSMO-EU jeweils größer. Vergleicht man die Überschreitungswerte der korrigierten Zeitreihe von COSMO-EU mit denen der gemessenen, so unterscheiden sich die Verteilungen der korrigierten COSMO-EU Windgeschwindigkeiten und der Messwerte für die Werte der

20. und 50. Perzentile nur geringfügig. Die Werte der 90. und 95. Perzentile der Verteilung der korrigierten COSMO-EU Zeitreihe sind zwar immer noch größer als die der Verteilung der gemessenen Zeitreihe, die Differenzen sind jedoch geringer als bei der Verteilung der unkorrigierten Werte im Vergleich zur Verteilung der Messwerte.

Die Werte der niedrigen Perzentile stimmen bei den korrigierten Werten fast mit den Werten aus den Messungen überein, während bei den hohen Perzentilen die korrigierten Werte größer sind als die aus den Messungen. Da aber auch die unkorrigierten Werte für die hohen Perzentile stärker von denen der Messwerte abweichen als für die niedrigen Perzentile, kann nicht eindeutig geschlossen werden, ob auf Grund der angenommenen konstanten Rauigkeit des Wassers die korrigierten Werte bei hohen Windgeschwindigkeiten stark überschätzt werden.

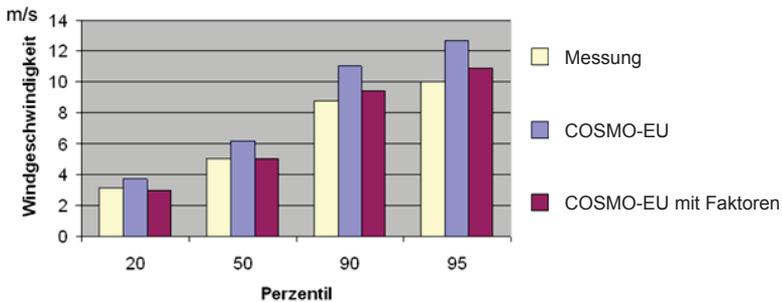


Abbildung 8: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der gemessenen mit berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen für Cuxhaven für die Jahre 2006 - 2008. Ausgewertet wurden die 20., 50., 90. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Zeitreihen, die 1. in Cuxhaven gemessen, 2. mit COSMO-EU am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet und 3. mit COSMO-EU und den Faktoren für Cuxhaven bestimmt wurden.

Die Vergleiche mit den gemessenen Windgeschwindigkeiten für Cuxhaven lassen eine Verbesserung der COSMO-EU Windgeschwindigkeiten durch die Faktoren erkennen. Zusätzliche Vergleiche mit Messungen an anderen Stationen findet man in GANSKE und ROSENHAGEN (2010). Mangels ausreichender Repräsentanz der Stationen für die freie Elbe sind die Ergebnisse jedoch insgesamt nicht aussagekräftig.

5.3 Vergleich von kurzen Zeitreihen während der Sturmflut am 18.1.2007

Für das Projekt OPTEL wurden von der Hamburg Port Authority (HPA) die zwei Sturmfluten vom 1.11.2006 und 18.1.2007 ausgewählt. Für diese Sturmfluten sollten Wasserstandsrechnungen von Projektteilnehmern der HPA, des BSH und der BAW gemacht werden. Zur Vorbereitung erfolgte vom BSH ein Vergleich der Windgeschwindigkeiten an bestimmten Modellgitterpunkten mit Messwerten. Im Folgenden wird hier nur ein Windvergleich für die Sturmflut vom 18.01.2007 gezeigt.

Abb. 9 zeigt Vergleiche von korrigierten und unkorrigierten COSMO-EU Windgeschwindigkeiten an einzelnen Gitterpunkten mit Messdaten von Cuxhaven für den Zeitraum 15.1.2007 00 UTC bis 21.1.2007 00 UTC. Dabei wurden die drei Zeitreihen in gleicher Weise erstellt wie im vorigen Abschnitt.

Auch innerhalb des kurzen Zeitraums sind die COSMO-EU Windgeschwindigkeiten am Gitterpunkt nahe Cuxhaven stets größer als die Messwerte. So ist die maximale Windgeschwindigkeit von COSMO-EU rund 8 m/s höher als die gemessene. Die korrigierten COSMO-EU Windgeschwindigkeiten sind im Vergleichszeitraum stets kleiner als die unkorrigierten Werte und liegen deutlich näher an den Messwerten. Das absolute Maximum der Windgeschwindigkeit in diesem Zeitraum ist jedoch rund 3 m/s kleiner als das Maximum der beobachteten Windgeschwindigkeit.

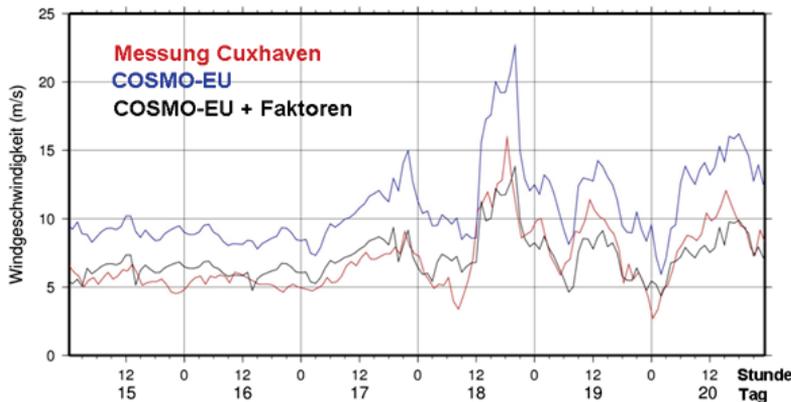


Abbildung 9: Vergleich der Zeitreihen von gemessenen und berechneten Windgeschwindigkeiten während der Sturmflut vom 18.1.2007 in Cuxhaven. Rot: Messwerte Station Cuxhaven Blau: Modellwerte von COSMO-EU am Gitterpunkt mit dem kleinsten Abstand zur Messstation. Schwarz: Werte von COSMO-EU aus der blauen Kurve multipliziert mit dem Korrekturfaktor. Abb. von I. Bork, OPTTEL A.

Bei allen durchgeführten Vergleichen zeigt sich im Mittel eine größere Übereinstimmung zwischen korrigierten COSMO-EU-Windgeschwindigkeiten und Messdaten als zwischen den COSMO-EU-Daten und den Messungen. Es konnten keine Hinweise darauf gefunden werden, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten die korrigierten COSMO-EU-Windgeschwindigkeiten überhöht sind.

6 Zusammenfassung und Fazit

Zweck des Projekts OPTTEL war die Entwicklung eines Verfahrens, das auf der Basis der Windfelder aus dem COSMO-EU Modell des DWD ausreichend hoch aufgelöste Windfelder für die im Projekt entwickelten hydrologischen Wasserstandsvorhersagemodelle im operationellen Betrieb bereitstellt. Dafür wurden mit Hilfe des Windmodells WASP Korrekturfaktoren für die mit dem Wettervorhersagemodell COSMO-EU berechneten Windgeschwindigkeiten auf der Elbe bestimmt.

Mit WASP lässt sich von einer Zeitreihe von gemessenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an einem Ort auf zeitlich gemittelte Windfelder für 12 Windrichtungsklassen in einem nahegelegenen Gebiet schließen. Zur Berechnung des Windfelds benötigt WASP dafür lediglich das Topographie- und das Rauigkeitsfeld des Gebiets. Dieses relativ einfache Verfahren wurde genutzt, um eine vorgegebene Zeitreihe von gemessenen Windgeschwindigkeiten eines Ortes auf ein Zielgebiet für zwei unterschiedliche

Rauigkeitsfelder zu übertragen. Die unterschiedlichen Ergebnisse der beiden Felder der mittleren Windgeschwindigkeitsfelder beruhen damit lediglich auf den Unterschieden in den Rauigkeiten. Die Quotienten der Windgeschwindigkeiten an den Modellpunkten des Zielgebiets, die zum einen mit räumlich hoch aufgelösten Topographie- und Rauigkeitsfeldern und zum anderen mit den Randfeldern von COSMO-EU mit WASP bestimmt wurden, liefern die Korrekturfaktoren für den Tideelbereich.

Zur Validation der korrigierten COSMO-EU-Windfelder erfolgte für einzelne Gitterpunkte auf der Elbe ein Vergleich mit Messwerten. Dazu wurden für längere Zeiträume von ein bis fünf Jahren an jedem Punkt Zeitreihen abgespeichert und daraus Häufigkeitsverteilungen bestimmt. Verglichen wurden dann jeweils die Häufigkeitsverteilungen, die 1. aus der Zeitreihe der Messwerte bestimmt wurden, mit 2. den Häufigkeitsverteilungen, die aus den Zeitreihen des Windfelds am zum Messort nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet wurden, und 3. mit den Zeitreihen der korrigierten Windfelder am gleichen Gitterpunkt. Leider gibt es jedoch keine Windmessstation, die mitten auf der Elbe liegt, z. B. auf einer Sandbank und somit das Windfeld auf der Wasserfläche erfasst. Es war so nur ein Vergleich von Windmessdaten in Elbnähe mit den Modellergebnissen möglich.

Vergleicht man die Werte für bestimmte Perzentile, die jeweils aus den drei Häufigkeitsverteilungen für Cuxhaven bestimmt wurden, so sind die Werte von COSMO-EU am Gitterpunkt nahe Cuxhaven jeweils größer als die der gemessenen. Die Perzentilwerte der korrigierten Zeitreihe von COSMO-EU liegen deutlich näher an denen der Verteilung der Messwerte, als die der unkorrigierten COSMO-EU-Werte. Auch für andere Stationen ergibt sich durch die Korrekturfaktoren eine Reduktion der Differenzen der Messwerte im Vergleich zu den mit COSMO-EU bestimmten Windgeschwindigkeiten. Eine Beurteilung der Vergleiche mit anderen Stationen wird dadurch erschwert, dass die Messungen oft nicht repräsentativ sind für die Elbe, die Windgeschwindigkeiten von COSMO-EU jedoch für einen Gitterpunkte auf der Elbe bestimmt wurden.

Für alle Vergleichsorte sind die Abweichungen der Überschreitungswerte der korrigierten Windzeitreihe von COSMO-EU von denen der Zeitreihe der Messungen für hohe Windgeschwindigkeiten nicht deutlich größer als für kleinere Windgeschwindigkeiten. Somit können die Faktoren zur Korrektur sowohl für hohe als auch für geringere Windgeschwindigkeiten verwendet werden.

Die dargestellten Ergebnisse und Vergleiche deuten, zumindest im Mittel, eindeutig auf eine Verbesserung der mit den Korrekturfaktoren für die Elbe bestimmten Windgeschwindigkeiten gegenüber dem reinen Modellwind von COSMO-EU hin und tragen so zu einer Verbesserung der Wasserstandsvorhersagen bei.

7 Danksagung

Wir danken allen Kollegen beim Deutschen Wetterdienst für die freundliche Unterstützung bei der Bereitstellung von Daten und Lieferung von Informationen zum Modell COSMO-EU. Insbesondere danken wir Frau Roskamp für die geduldige Unterstützung bei der Digitalisierung der Rauigkeitsfelder.

Weiter danken wir den Kollegen des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie und der Bundesanstalt für Wasserbau, die alle Fragen zu Wasserständen in der Elbe und der Topographie der Elbe beantworteten. Besonders danken wir Herrn Schrader vom BSH, der die Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten von COSMO-EU bereitstellte.

Für die Vergleiche mit Messdaten wurden uns Daten von der Hamburg Port Authority, dem Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, dem Kernkraftwerk Krümmel und des Helmholtz Zentrums Geesthacht zur Verfügung gestellt. Wir danken auch sehr für diese freundliche Unterstützung.

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden in dem Verbundprojekt OPTEL vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF durch den Projektträger Jülich PTJ unter dem Förderkennzeichen 03KIS070 als KFKI-Forschungsvorhaben gefördert.

8 Schriftenverzeichnis

- CHARNOCK, H.: Wind stress on a water surface. Q. J.- Royal Meteorol. Soc., 81, 639-640, 1955.
- GANSKE, A. und ROSENHAGEN, G.: Abschlussbericht OPTEL B - Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tidelbe.
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/631226540.pdf>, 2010.
- HENNEMUTH, B.: Erstellung von Windfeldern für Sturmflutzzenarien von XtremRisk. Abschlussbericht Werkvertrag XtremRisk, 2011.
- LANGE, B. and HØJSTRUP, J.: Evaluation of the wind-resource estimation program WAsP for offshore applications. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 89, issue 3-4, 271-291, 2001.
- MAJEWSKI, D.; LIERMANN, D.; PROHL, P.; RITTER, B.; BUCHHOLD, M.; HANISCH, T.; PAUL, G.; WERGEN, W. and BAUMGARDNER, J.: The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests. Mon. Wea. Rev., 130, 319-338, 2002.
- MORTENSEN, N. G.; LANDBERG, L.; TROEN, I. and PETERSEN, E. L.: Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1993.
- PETERSEN, E. L.: Wind Resources Part I, The European Wind Climatology. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Lübeck-Travemünde, 1993, 663-668, 1993.
- SCHÄTTLER, U.: A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part V: Preprocessing: Initial and Boundary data for LM. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 32 S., 2005.
- SCHÄTTLER, U., DOMS, G. and SCHRAFF, C.: A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part VII: User's Guide. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 132 S., 2005.
- SCHULZ, J.-P. und SCHÄTTLER, U.: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Europa COSMO-EU (LME) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 71 S., 2009.
- SCHMIDT, H. und BEHRENS, K.: Regionale Windwirkungen in den Ästuarbereichen der inneren Deutschen Bucht. Abschlussbericht zum KFKI-Vorhaben: Untersuchung regionaler Windwirkungen , hydrodynamischer Systemzustände und Oberwasserereinflüsse auf das Sturmflutgeschehen in Tideästuarien, 1998.
- WASP: WAsP and the Wind Atlas Methodology. <http://www.wasp.dk/Products/WAsP/WindAtlasMethodology.aspx>, 2012.