

KFKI-Projekt OPTEL

**Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen
auf die TideElbe**

Fördernummer KFKI 101

A. Ganske und G. Rosenhagen

Deutscher Wetterdienst Hamburg

April 2010

Inhalt

- 1. Einleitung**
- 2. Die Wettervorhersagemodelle COSMO-EU und COSMO-DE**
- 3. Berechnung der Windfelder mit WAsP**
 - 3.1 Das Windmodell WAsP**
 - 3.2 Festlegung der Rechengebiete**
 - 3.3 Bestimmung der Rauigkeits- und Topographiefelder**
 - 3.4 Berechnete Windfelder**
- 4. Berechnung der Korrekturfaktoren**
 - 4.1 Korrekturfaktoren für COSMO-EU**
 - 4.2 Korrekturfaktoren für COSMO-DE**
 - 4.3 Abhängigkeiten der Korrekturfaktoren vom Wasserstand**
 - 4.3.1 Differenzen der Korrekturfaktoren von COSMO-EU bei T_{mw} und T_{hw}**
 - 4.3.1 Differenzen der Korrekturfaktoren von COSMO-EU bei T_{mw} und T_{nw}**
- 5. Vergleiche der korrigierten Windfelder mit Messungen**
 - 5.1 Messstationen in Elbnähe**
 - 5.2 Vergleiche von Häufigkeitsverteilungen der COSMO-EU-Daten und der Messdaten**
 - 5.3 Vergleiche von kurzen Zeitreihen während der Sturmflut vom 8.1.2007**
 - 5.4 Vergleiche von Häufigkeitsverteilungen der COSMO-DE-Daten und der Messdaten**
- 6. Zusammenfassung**
- 7. Danksagung**
- 8. Literatur**

1. Einleitung

Im Projekt OPTEL werden zwei räumlich hoch aufgelöste, hydrodynamische Modelle zur Berechnung von Strömungen und Wasserständen in der Elbe vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) entwickelt. Diese Modelle sollen später operationell zur Wasserstandsvorhersage für die Elbe eingesetzt werden. Sie benötigen als eine Randbedingung Windfelder, die eine ähnlich hohe räumliche Auflösung wie die hydrodynamischen Modelle haben sollten. Da eine gesonderte Berechnung dieser Windfelder mit einem räumlich hoch aufgelösten Atmosphärenmodell zu viel Rechenzeit während der Wasserstandsvorhersage in Anspruch nähme, müssen Windfelder aus bestehenden, gröber aufgelösten operationellen Atmosphärenmodellen verwendet werden.

Die operationellen Modelle des BSH verwenden zum Antrieb die Windfelder des Wettervorhersagemodells COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Es soll auch für die Elbe verwendet werden, hat jedoch mit einer Gitterweite von 7 km eine vergleichsweise grobe räumliche Auflösung im Vergleich zur geplanten Auflösung der Elbe-Modelle, die Auflösungen von weniger als 100 m haben werden. Zusätzlich könnten auch Windfelder des Wettervorhersagemodells COSMO-DE benutzt werden, welches eine Gitterweite von 2,8 km hat.

Verwendet man die räumlich groben Windfelder von COSMO-EU oder COSMO-DE, 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 zum Teil Wasserflächen sind.

Um die Einflüsse der Rauigkeitsunterschiede auf das Windfeld zu korrigieren, werden im Projekt OPTEL mit Hilfe des Modells WASP (**W**ind **A**tlas **A**nalysis and **A**pplication **P**rogram) windrichtungsabhängige Korrekturfaktoren für die mit COSMO-EU und COSMO-DE berechneten Windgeschwindigkeiten bestimmt. Diese Korrekturfaktoren berücksichtigen die Unterschiede zwischen den Rauigkeitsfeldern, die bei den COSMO-Modellen verwendet werden, und dem hoch aufgelösten Feld. Die windrichtungsabhängigen Korrekturfaktoren werden aus zeitlich gemittelten Windfeldern auf einem Gitter mit Gitterweiten von 250 m über der Elbe bestimmt.

Der folgende Bericht beschreibt zuerst kurz die Wettervorhersagemodelle COSMO-EU und COSMO-DE, die später im operationellen Betrieb die Windfelder liefern werden. Danach folgt eine kurze Vorstellung des Windmodells WASP, mit dem die Korrekturfaktoren bestimmt werden. Anschließend werden Berechnung und Ergebnisse der Korrekturfaktoren vorgestellt. Zum Schluss werden die mit den Korrekturfaktoren multiplizierten Windfelder mit Messungen verglichen.

2. Die Wettervorhersagemodelle COSMO-EU und COSMO-DE

Die Wettervorhersagemodelle des Deutschen Wetterdienstes COSMO-EU und COSMO-DE sind dynamische, nichthydrostatische Atmosphärenmodelle, siehe Schättler (2005), Schättler et al. (2005) sowie Baldauf et al. (2009). Dabei läuft

COSMO-EU als Wettervorhersagemodell 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).

Das Wettervorhersagemodell COSMO-DE hat eine räumliche Gitterweite von rund 2,8 km und wird seit dem 16.1.2007 operationell betrieben. Sein Modellgebiet deckt Deutschland, Österreich, die Schweiz und die Deutsche Nordseeküste ab. Es bekommt an den seitlichen Rändern Werte von COSMO-EU. Von COSMO-DE stehen Vorhersagen bis zu 18 Stunden zur Verfügung.

Für die geplante operationelle Vorhersage der Wasserstände ist eine Vorhersagezeit von bis zu 72 Stunden geplant. Da dafür die Vorhersagen von COSMO-DE nicht ausreichen, müssen die Windfelder von COSMO-EU für die Vorhersagen verwendet werden. Es soll jedoch im Laufe des Projekts oder auch später, während des operationellen Betriebs geprüft werden, ob eine zusätzliche Verwendung von COSMO-DE Feldern für die Wasserstandsvorhersage der ersten 18 Stunden vorteilhaft wäre.

Verwendet man als Randbedingung der hydrodynamischen Modelle für die Elbe das Windfeld von COSMO-EU, so ergibt sich folgendes Problem: Abbildung 1 zeigt die Gitterpunkte von COSMO-EU in einer Karte mit den Küsten- und Uferlinien der Elbe. Es zeigt sich, dass im Mündungsbereich der Elbe nur wenige Gitterpunkte von COSMO-EU liegen. 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 geringer ist als die Rauigkeit von Wasser. Wird mit der Rauigkeit von Land eine Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe berechnet, so ist diese geringer als eine Windgeschwindigkeit, die über Wasser bestimmt wird. Interpoliert man aus den Windfeldern von COSMO-EU ein räumlich höher aufgelöstes Windfeld über der Elbe, so wird dieses Windfeld über dem Wasser zu geringe Windgeschwindigkeiten aufweisen, wodurch das hydrodynamische Modell die Wasserstände im Vergleich zu den gemessenen Wasserständen unterschätzt.

Auch wenn das Gitter von COSMO-DE eine geringere Gitterweite hat als COSMO-EU, besteht auch dort das Problem der ungenügenden Auflösung der Elbe. Deshalb wurden nicht nur für COSMO-EU sondern auch für COSMO-DE Korrekturfaktoren bestimmt.

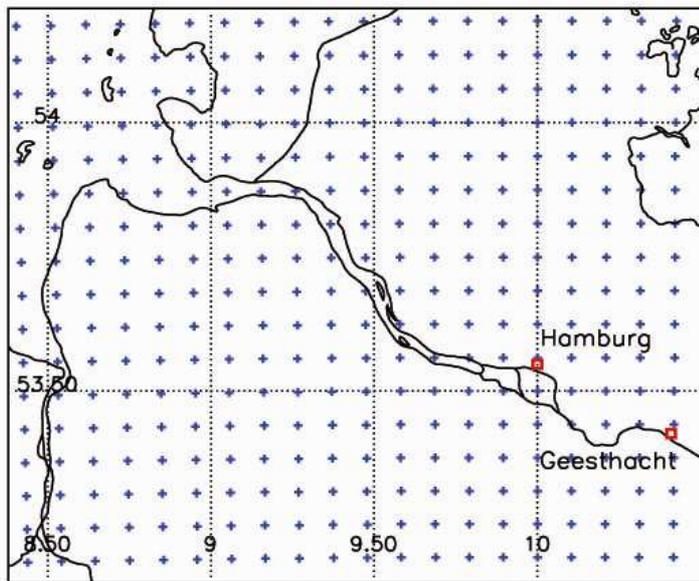


Abb. 1: Lage der COSMO-EU-Gitterpunkte im Gebiet zwischen Elbmündung und Bleckede. Schwarze Linien: Elbufer und Küsten.

3. Berechnung der Windfelder mit WAsP

WAsP ist ein Programm des dänischen Risø National Laboratories zur Berechnung von Windstatistiken für die Planung von Windparks (siehe Mortensen et al. 1993). Es stellt eine Standardmethode zur Berechnung von Windenergieressourcen über Land und über See dar.

3.1 Das Windmodell WAsP

Bei der Berechnung der Windfelder mit WAsP gibt man eine Zeitreihe der Windgeschwindigkeit vor. Daraus wird das sogenannte regionale Windklima berechnet. Dieses beinhaltet für 12 Windrichtungsklassen je eine Häufigkeitsverteilung der geostrophischen Windgeschwindigkeiten oberhalb der atmosphärischen Grenzschicht. Dabei werden die in Abhängigkeit von den Windrichtungsklassen die Einflüsse der Topographie und der Rauigkeiten im Gebiet rund um die Messstation auf die Winddaten berechnet und die Häufigkeitsverteilungen so korrigiert, dass sie gültig sind für ein Gebiet mit einer Einheitsrauigkeit und Einheitshöhe. Anschließend wird in dem gewünschten Untersuchungsgebiet die dort vorherrschende Rauigkeit und Orographie vorgegeben und für jede Windrichtungsklasse aus der jeweiligen Windstatistik in der Höhe eine Verteilung der Windgeschwindigkeiten in Bodennähe berechnet. Dabei wird bei all diesen Berechnungen von einer neutralen Temperaturschichtung der Atmosphäre ausgegangen. Dies ist in der Natur bei höheren Windgeschwindigkeiten im Allgemeinen gegeben.

Somit kann man mit diesem Programm von einer Messreihe an einem Punkt auf zeitlich gemittelte Windfelder für 12 Windrichtungsklassen in einem Gebiet schließen. Diese Windfelder können jeweils auf einem Gitter mit einer frei wählbaren Gitterweite ausgegeben werden.

Petersen (1993) verglich mit WAsP in mehreren Höhen berechnete Windgeschwindigkeiten mit Messungen an Küstenmessstationen sowie auf See und zeigte, dass die mit WAsP berechneten Windgeschwindigkeiten keine signifikanten Abweichungen von den gemessenen Werten zeigen. Er stellte jedoch fest, 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 haben ergeben, dass dies einerseits durch eine Nichtberücksichtigung der atmosphärischen Temperaturschichtung und andererseits durch eine Abhängigkeit der Seerauhigkeit vom Fetch hervorgerufen wird, siehe Lange und Højstrup (2001).

Berechnet man mit WAsP ein Windfeld, so sollte die Messstation der Eingabezeitreihe in der Nähe des Gebiets liegen, für das man das Windfeld berechnen möchte. 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 wir bei unseren Berechnungen aber nicht an einem Windfeld selbst, sondern an den Verhältnissen zweier Windfelder interessiert sind, verwenden wir zur Berechnung aller Windfelder zwischen Cuxhaven und Bleckede das gleiche Höhenwindfeld. Dabei geben wir die in Scharhörn gemessenen Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten und -richtungen der Jahre 1998 - 2007 vor.

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 Abbildung 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.

Die von uns gewählten Teilgebiete sind einerseits so groß, dass sie mindesten zwei Messstationen einschließen und alle Gebiete zusammen das Gebiet zwischen Scharhörn und Bleckede abdecken. Andererseits sind die Ränder aller Gebiete immer weit genug entfernt von der Elbe, so dass Randeffekte die berechneten Windfelder nicht beeinflussen. Zur Berechnung der Windfelder mit WAsP wird empfohlen, dass insbesondere, wenn Wasser- und Landflächen aneinander grenzen, die Gebietsgrenzen rund 10 km entfernt sind vom Punkt, an dem das Windfeld bestimmt werden soll, siehe WAsP (2005).

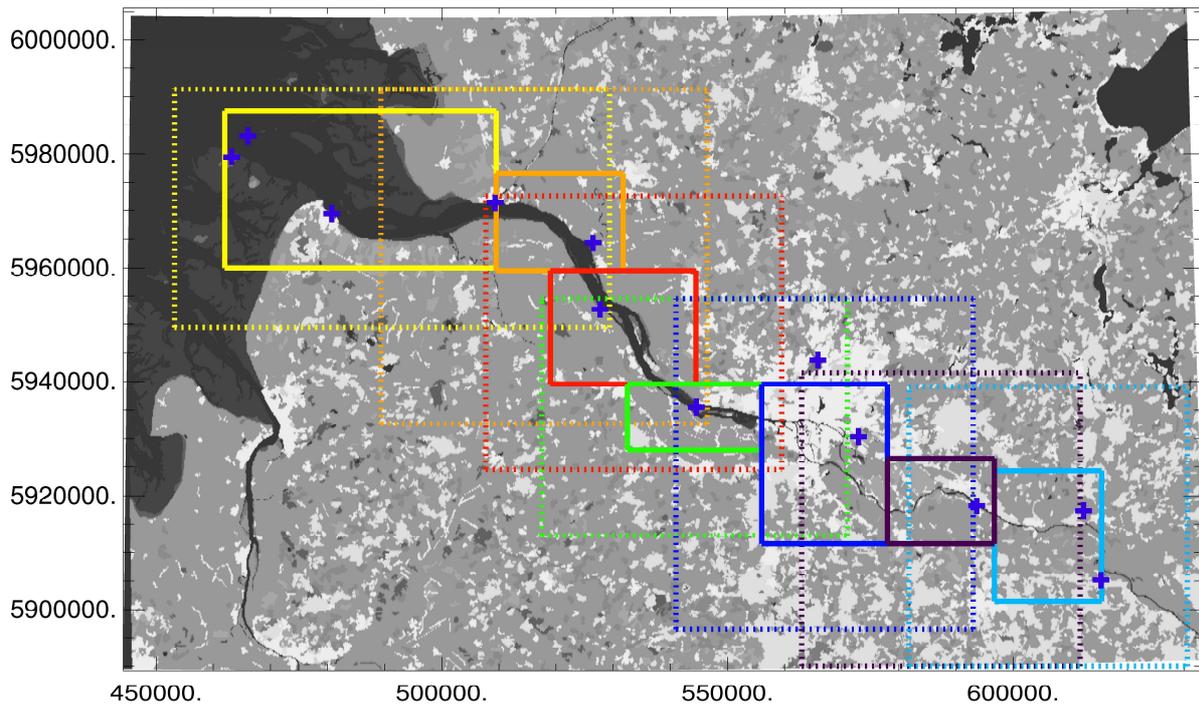


Abb. 2: Einteilung des Gesamtgebiets in Teilgebiete. Gezeigt ist ein hoch aufgelöstes Feld der Rauigkeiten im Elbgebiet im UTM-Koordinatensystem. Dabei sind glatte Flächen (wie z.B. das Meer) in dunklen Grautönen, raue Felder (z.B. die Stadt Hamburg) in hellen Grautönen dargestellt. Teilgebiete, innerhalb 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 der Windmessstationen.

Zur Berechnung der Korrekturfaktoren werden zuerst mit WASP verschiedene Windfelder bestimmt, in dem man unterschiedliche Randbedingungen vorgibt. Diese Randbedingungen sind:

1. Topographie- und Rauigkeitsfelder, die in COSMO-EU als Randbedingung vorliegen (COSMO-EU Randfelder). Eine Beschreibung der COSMO-EU Randfelder findet man in Schulz und Schättler (2009), Kapitel 2.5.
2. Topographie- und Rauigkeitsfelder, die in COSMO-DE als Randbedingung vorliegen (COSMO-DE Randfelder), siehe Kapitel 2.5 in Baldauf et al. (2009).
3. Randfelder, die aus topographischen Rasterdaten und amtlichen topographischen Karten erstellt wurden und die weiter als hoch aufgelöste Randfelder bezeichnet werden.

Aus dem Vergleich der mit den COSMO Randfeldern und den hoch aufgelösten Randfeldern berechneten Windfelder werden 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 müssen die an festen Gitterpunkten gegebenen Werte in Isolinienfelder umgewandelt werden. Für die Topographiefelder wur-

de mit Hilfe des Graphik-Pakets IDL die Isolinien aus den Gitterpunktwerten berechnet.

Im Laufe des Projekts stellte sich heraus, dass für die Felder aller Rauigkeiten eine manuelle Digitalisierung nötig war, da die bei einer automatischen Erstellung erzielte Genauigkeit der Darstellung für die Verwendung in WAsP nicht ausreichte. Zusätzlich besteht bei einer automatischen Berechnung von Isolinien das Problem, dass diese Isolinien die Gebiete gleicher Rauigkeit nicht wie in der Natur vorkommend erfassen. Da z.B. die Rauigkeitsfelder von COSMO-EU wegen der groben Auflösung die Elbe stromaufwärts nicht enthalten, werden mit einem Isolinienprogramm Gebiete gleicher Rauigkeit meist in Nord-Süd-Richtung zusammengefasst. Verläuft die Elbe in diesem Gebiet jedoch in Ost-West-Richtung, so ist eine Trennung der Rauigkeitsgebiete in einen nördlichen und einen südlichen Teil sicher realistischer. Deshalb wurden die Rauigkeitsfelder von COSMO-EU und COSMO-DE 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 1:50000 ebenfalls von Hand digital abgeleitet. Die Erstellung der Rauigkeitskarten der in Abbildung 2 gezeigten Teilgebiete wurde von zwei Mitarbeitern durchgeführt und war sehr zeitaufwändig. Dadurch entstand eine Verzögerung in der Abwicklung des Projekts von mindestens 6 Monaten. Diese Verzögerung konnte auch nicht durch erhöhten Personalaufwand ausgeglichen werden, da die Erstellung der Rauigkeitsfelder sehr viel Erfahrung erfordert. Es müssen Informationen zur Geländedenutzung in Rauigkeitswerte umgesetzt werden, was nicht immer eindeutig ist: So haben z.B. bewohnte Gebiet Rauigkeitswerte zwischen 0,5 und 1,0, je nachdem, wie dicht und hoch die Bebauung ist.

3.4 Berechnete Windfelder

Die Abbildungen 3-5 zeigen die mit WAsP und drei verschiedenen Randfeldern berechneten Felder der Mittelwerte von Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe im westlichsten Teilgebiet für die Windrichtungsklasse 300 °, welche die Windrichtungen zwischen 285 ° und 315 ° enthält. Zusätzlich enthalten alle drei Bilder die Uferlinien der Elbe aus einem Graphikprogramm.

Das in der Abbildung 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. Die darauf folgenden Abbildungen zeigen die mit den COSMO-EU (Abb. 4) und den COSMO-DE Randfeldern (Abb. 5) berechneten Windfelder. Bei COSMO-EU liegen die Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 5,0 m/s und 8,0 m/s, bei COSMO-DE zwischen 3,7 m/s und 8,0 m/s.

Vergleicht man die Windgeschwindigkeiten der drei Felder, so erkennt man den Einfluss der geringen Rauigkeit der Wasserfläche der Elbe auf das Windfeld. So sind bei den mit den hoch aufgelösten Randfeldern berechneten Windfeldern die Windgeschwindigkeiten auf der Elbe immer größer als die Windgeschwindigkeiten über Land. Dort, wo in der Elbe Sandbänke und Inseln liegen, sind die Windgeschwindig-

keiten im Lee reduziert im Vergleich zu den Wasserflächen. Je genauer die Ausdehnung der Wasserfläche im Rauheitsfeld erfasst ist, desto höher sind die Windgeschwindigkeiten und desto weiter reicht die Zone erhöhter Windgeschwindigkeiten von der Nordsee in die Elbe.

In Abbildung 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.

Auch die bei COSMO-DE verwendete Land-See-Maske stimmt auf Grund der groben Auflösung des Modells in vielen Abschnitten der Elbe nicht mit der tatsächlichen Verteilung der Landflächen überein. Dies spiegelt sich in dem mit den COSMO-DE Randfeldern und WAsP berechneten Windfeld am südlichen Elbufer östlich von Cuxhaven wieder, wo die Windgeschwindigkeiten auf der Elbe gleich den Windgeschwindigkeiten über Land sind, siehe Abbildung 5. Dort, wo große Bereiche der Elbe jedoch noch vom COSMO-DE Gitter erfasst werden, sind die Geschwindigkeiten auf der Elbe deutlich größer als die Geschwindigkeiten über Land. Betrachtet man jedoch die Geschwindigkeiten auf der Elbe zwischen Cuxhaven und Hamburg, so sind diese östlich von Brunsbüttel fast überall kleiner als die mit der hoch aufgelösten Rauigkeit bestimmten Windgeschwindigkeiten.

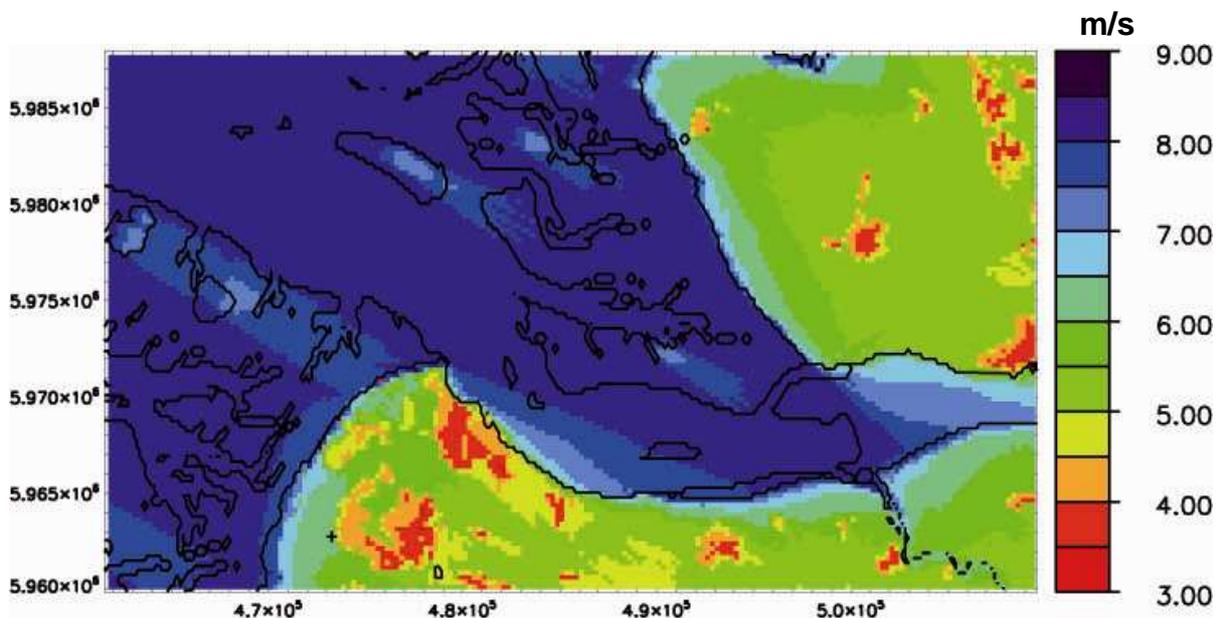


Abb. 3: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für Windrichtungen zwischen 285° und 315° im Elbmündungsgebiet, berechnet mit dem Programm WAsP und den hoch aufgelösten Randfeldern. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhörn der Jahre 1998 – 2007 ermittelt. Schwarze Linien: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

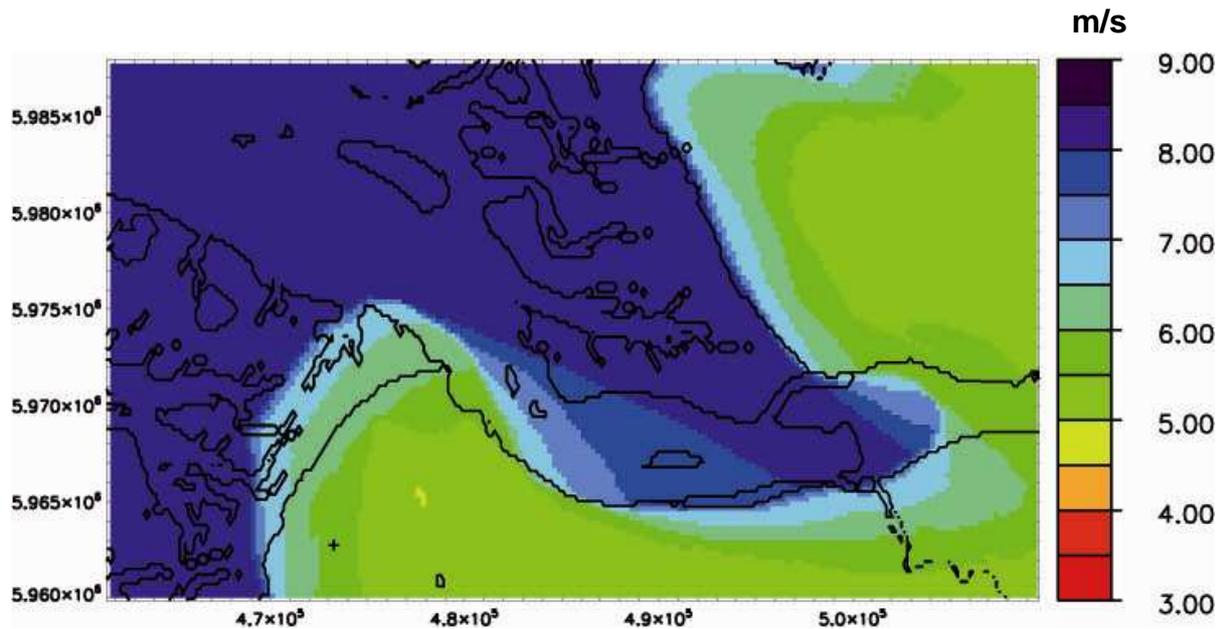


Abb. 4: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für Windrichtungen zwischen 285° und 315° im Elbmündungsgebiet, berechnet mit dem Programm WAsP und den COSMO-EU Randfeldern. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhörn der Jahre 1998 – 2007 ermittelt. Schwarze Linien: Elbufer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

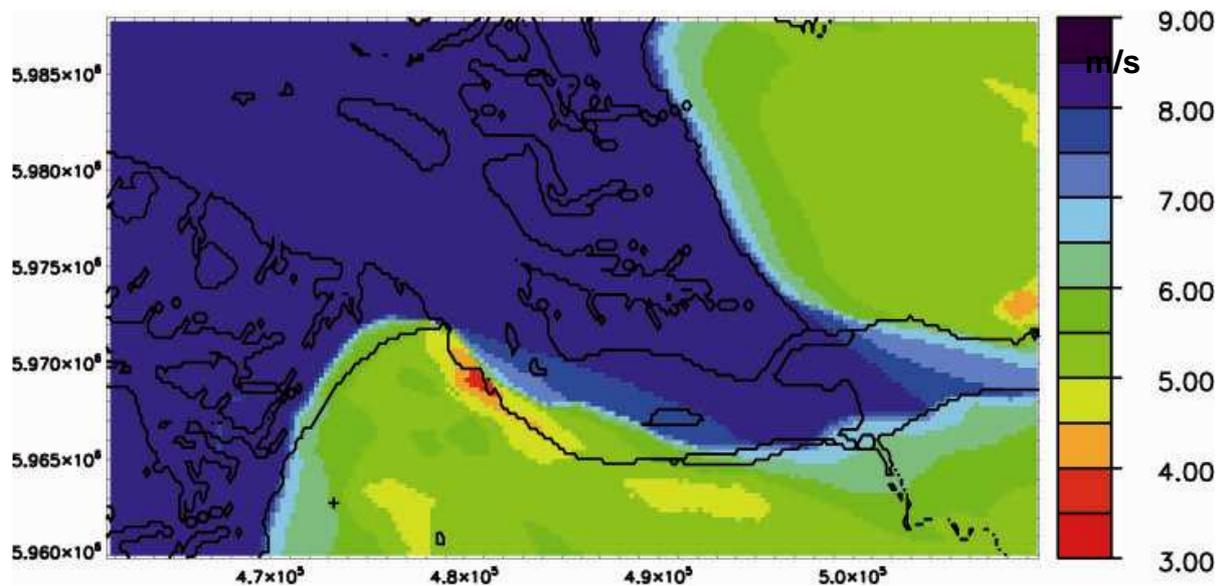


Abb. 5: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für Windrichtungen zwischen 285° und 315° im Elbmündungsgebiet, berechnet mit dem Programm WAsP und den COSMO-DE Randfeldern. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhörn der Jahre 1998 – 2007 ermittelt. Schwarze Linien: Elbufer und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

4. Berechnung der Faktoren

Berechnet man für dasselbe Gebiet sowohl mit den hoch aufgelösten Rauigkeiten und Topographien als auch mit den COSMO Rauigkeiten und Topographien für eine bestimmte Windrichtungsklasse d jeweils ein zeitlich gemittelt Windfeld, so zeigt das Verhältnis dieser Windfelder den Einfluss der groben Rauigkeiten und Topographien im Vergleich zu den räumlich hoch aufgelösten. 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 bestimmten werden. Abbildung 6 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 Abbildung 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.

In analoger Weise wurden Korrekturfaktoren für andere Windrichtungssektoren und für die anderen Gebiete bestimmt, siehe z.B. Abbildung 7. 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 2,375. Für die anderen Windrichtungsklassen haben die Faktoren auf der Elbe die gleiche Größenordnung wie die für die Windrichtungsklasse 300 °.

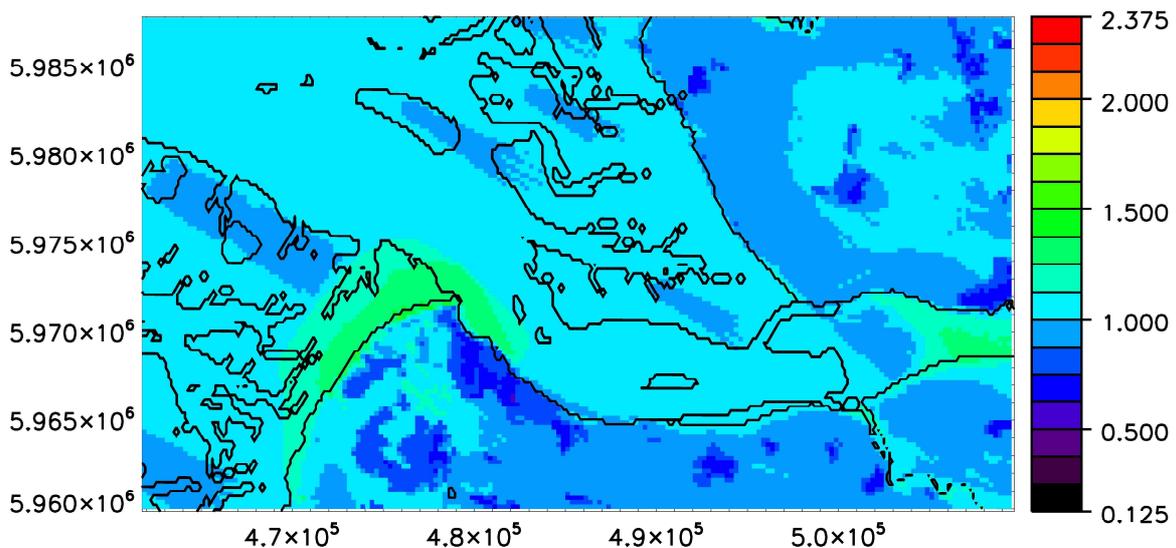


Abb. 6: Korrekturfaktoren im Elbmündungsgebiet bei Windrichtungen zwischen 285° und 315° ; berechnet aus den in Abbildung 3 und 4 g ezeigten Windfeldern, die mit dem Programm WASP und einerseits mit den hoch aufgelösten Randfeldern und andererseits mit den Randfeldern von COSMO-EU bestimmt wurden. Das verwendete Windklima wurde aus den Windmessungen von Scharhörn der Jahre 1998 – 2007 ermittelt. Schwarze Linien: Elbufer und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

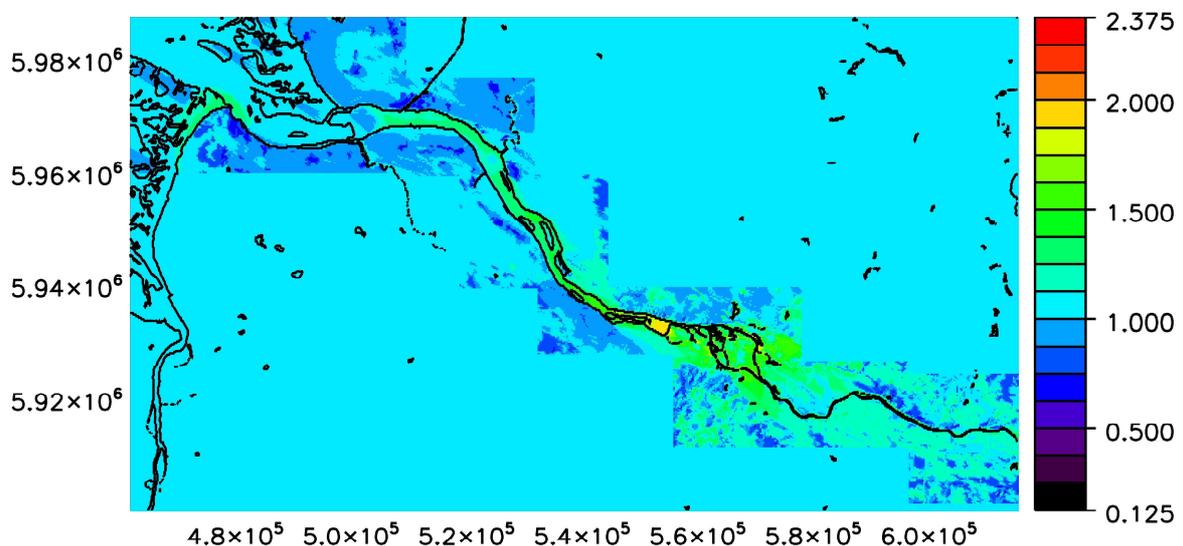


Abb. 7: Korrekturfaktoren im gesamten Gebiet zwischen Elbmündung und Blekede bei Windrichtungen zwischen 285° und 315° ; berechnet für die Teilgebiete in Abbildung 2 aus den Windfeldern, die mit dem Programm WASP und einerseits mit den hoch aufgelösten Randfeldern und andererseits mit den Randfeldern 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.

4.2 Korrekturfaktoren für COSMO-DE

In gleicher Weise wie für COSMO-EU werden auch Faktoren für COSMO-DE berechnet. Abbildung 8 zeigt diese Faktoren für das gesamte Gebiet, bestimmt für das Windrichtungsintervall von 285° bis 315°. Auch bei den COSMO-DE Faktoren liegen die Werte in der Mündung nahe 1, da hier alle COSMO-DE Gitterpunkte Wasserpunkte sind. Am südlichen Elbufer erkennt man dort erhöhte Faktoren, wo die Gitterpunkte von COSMO-DE bereits teilweise Landpunkte sind und die entsprechende Rauhmigkeit so höher ist als die Rauhmigkeit über Wasserflächen. In allen anderen Gebieten sind die Faktoren auf der Elbe, wie bei COSMO-EU, größer als 1. Auch für andere Windrichtungsklassen sind die Faktoren auf der Elbe in der gleichen Größenordnung wie in Abbildung 8. Dabei sind die Faktoren für COSMO-DE in der Regel näher an 1,0 als für COSMO-EU.

Auf der Höhe von Brunsbüttel gibt es jedoch ein größeres Gebiet auf der Elbe, in dem die Faktoren Werte zwischen 0,9 und 1,0 haben, siehe Abbildung 8. Dies liegt an den unterschiedlichen Rauhmigkeiten von COSMO-DE im Vergleich zum hoch aufgelösten Rauhmigkeitsfeld: Nördlich und südlich dieses Gebiets wurden bei COSMO-DE niedrigere Rauhmigkeiten vorgegeben, als im hoch aufgelösten Feld. Dies liegt zum größten Teil darin, dass rauhere Gebiete, wie z.B. Waldflächen und kleinere Ortschaften, von COSMO-DE nicht aufgelöst werden können und dass dort geringere mittlere Rauhmigkeiten vorgegeben wurden als im hoch aufgelösten Rauhmigkeitsfeld.

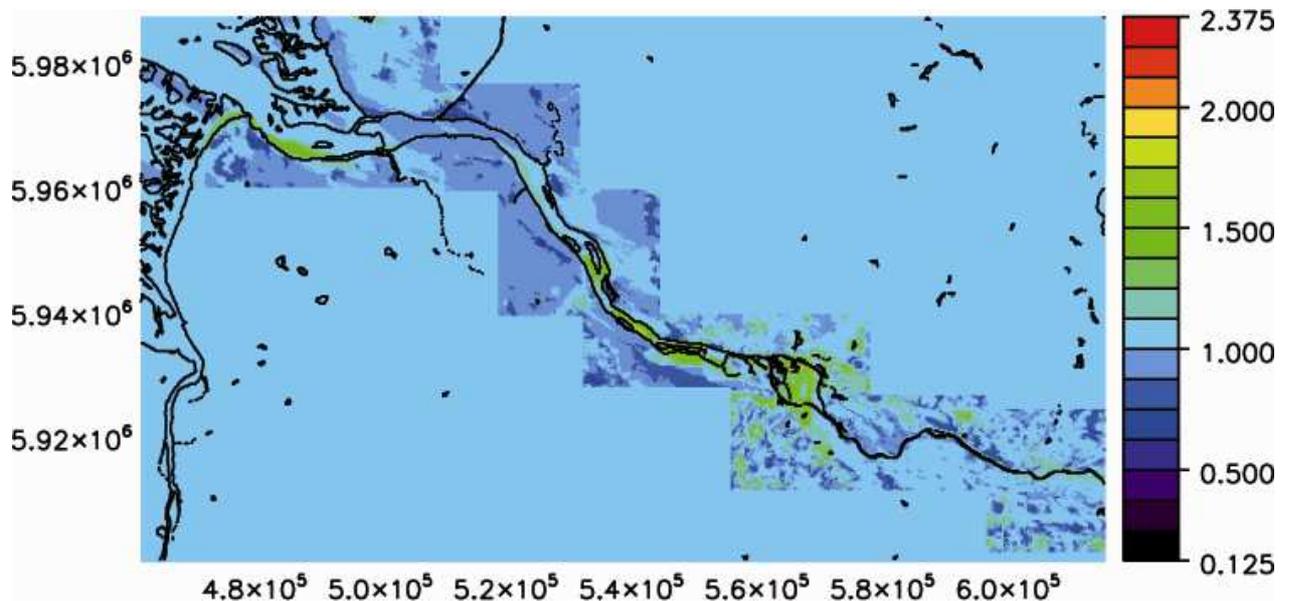


Abb. 8: Faktoren im gesamten Gebiet zwischen Elbmündung und Bleckede bei Windrichtungen zwischen 285 ° und 315°, berechnet für die Teilgebiete in Abbildung 2 aus den Windfeldern, die mit dem Programm WASP und einerseits mit den hoch aufgelösten Randfeldern und andererseits mit den Randfeldern von COSMO-DE 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.

4.3 Abhängigkeiten der Korrekturfaktoren vom Wasserstand

Das hoch aufgelöste Rauigkeitsfeld, mit dem die Windfelder und anschließend die Faktoren berechnet werden, wurde aus den Landnutzungsinformationen der topographischen Karten bestimmt. 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) oder Tidehochwasser (Thw), so wird deutlich, dass bei Tnw einige Flächen in Ufernähe der Elbe trocken fallen und dann eine höhere Rauigkeit haben als bei Tmw. Deshalb könnten sich bei Annahme von Thw oder Tnw andere Werte für die Korrekturfaktoren ergeben, als bei den für Tmw berechneten. Die Frage ist, ob die Unterschiede zwischen den Faktoren so groß sind, dass bei der Berechnung der korrigierten Windfelder für die Wasserstandsvorhersage eine Abhängigkeit der Faktoren vom Wasserstand berücksichtigt werden muss.

Abbildung 9 zeigt Kurven von mittlerem Tmw, Thw und Tnw entlang der Elbe zwischen der Mündung bei Cuxhaven und dem Wehr Geesthacht. Diese Werte wurden aus Ergebnissen eines hydrodynamischen Modells (UnTRIM) analysiert. Modelliert wurde ein Spring-Nipp Zeitraum im Mai 2002 (Analysezeitraum 11.5.2002 16:40 bis 25.5.2002 23:30) unter Berücksichtigung eines konstanten Oberwasserzuflusses von $350 \text{ m}^3/\text{s}$ (häufigster Oberwasserzufluss der Elbe zwischen 1995 und 2004).

Detaillierte Informationen zur Modellierung und Analyse findet man unter Bundesanstalt für Wasserbau (2006). Im Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch sind Informationen über Thw und Tnw lediglich für ausgewählte Pegelorte angegeben. Durch das Verwenden der von der BAW bereitgestellten Ergebnisse aus dem numerischen Modell der Elbe erhält man kontinuierliche Informationen zu Tnw und Thw entlang der Tideelbe.

4.3.1 Differenz der Korrekturfaktoren von COSMO-EU bei Tmw und Thw

Zuerst wird angenommen, dass der Wasserstand der Elbe dem mittleren Tidehochwasser entspricht. Dabei werden Sandbänke in der Elbe und die Wattenflächen überflutet. Auf diesen Flächen wird statt der Rauigkeit von Sand oder Wiese die geringere Rauigkeit von Wasser eingesetzt. Betrachtet man das Windfeld, so erhöht sich über diesen Flächen die Windgeschwindigkeit bei Thw an im Vergleich zu Tmw und so werden an diesen Flächen die Korrekturfaktoren bei Thw größer als bei Tmw.

In Abbildung 10, in der die Differenzen der Korrekturfaktoren bei Tmw minus der bei Thw im westlichen Teilgebiet gezeigt werden, sind diese Flächen zu einem kleinen Teil zu sehen. Vor allem über den bei Thw überfluteten Sandbänken unterscheiden sich die Faktoren um Werte zwischen 0,05 und 0,15. Berücksichtigt man, dass die Faktoren in diesem Gebiet absolute Werte nahe 1 haben, so ändern sich die Faktoren um 5 % – 15 %. Jedoch machen die Flächen, in denen sich die Faktoren ändern, nur einen geringen Teil der Gesamtfläche aus. Da in den restlichen Teilgebieten die Flächen mit Änderungen im Rauigkeitsfeld bei wachsendem Wasserstand deutlich geringer sind, wurde auf eine Untersuchung der Änderungen in den anderen Teilgebieten verzichtet.

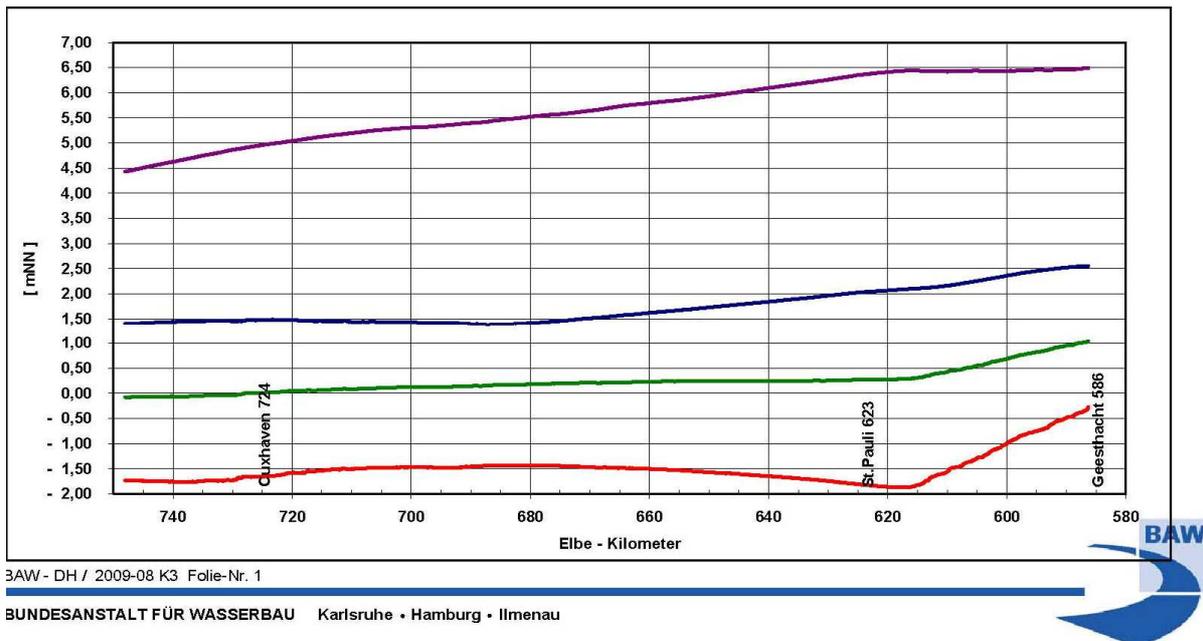


Abb. 9: Über den Querschnitt und die Zeit gemittelte Wasserstände auf der Elbe in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle (Elbe-Kilometer), bezogen auf NN. Zusätzlich eingezeichnet sind die Orte der Pegel Cuxhaven, St. Pauli und Geesthacht.

Rote Kurve: Mittleres Tideniedrigwasser (Tnw)

Grüne Kurve: Mittleres Tidemittelwasser (Tmw)

Blaue Kurve: Mittleres Tidehochwasser (Thw)

Lila Kurve: Höchstwasserstand bei der Sturmflut 1976.

Quelle: E. Rudolph, pers. Mitteilung (2009).

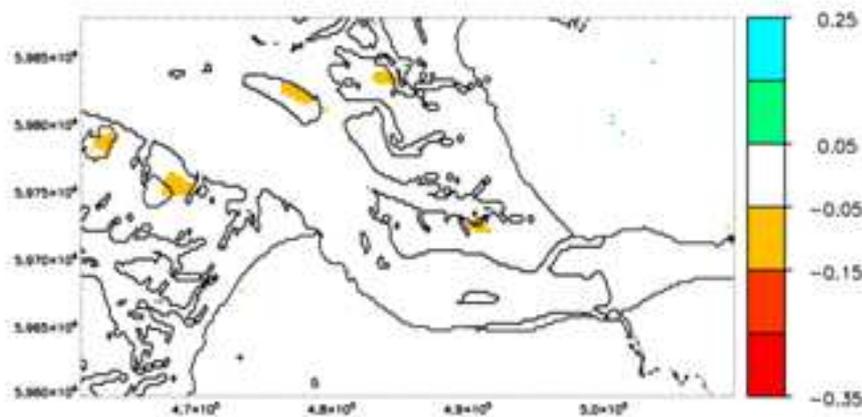


Abb. 10: Differenz der Korrekturfaktoren bei Windrichtungen zwischen 255° und 285°, berechnet für COSMO-EU im westlichsten Teilgebiet. Tmw-Faktoren wurden bestimmt aus dem Verhältnis der Windfelder, berechnet mit der hoch aufgelösten Rauigkeit bei mittlerem Tidemittelwasser (Tmw) dividiert durch die Windfelder, bestimmt mit der Rauigkeit von COSMO-EU. Thw-Faktoren werden analog mit dem hoch aufgelösten Rauigkeitsfeld bei Thw berechnet. Die oben gezeigte Differenz wurde berechnet aus den Faktoren bei Tmw minus der Faktoren bei Thw. Schwarze Linien: Elbufer und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

Eine Berücksichtigung des erhöhten Wasserstandes im Faktorenfeld würde einen deutlich erhöhten Aufwand bei der Berechnung der korrigierten Windfelder nach sich ziehen. Da die Änderung der Faktoren auf sehr kleine Flächen beschränkt und im Betrage gering ist, wurde beschlossen, vorerst auf eine Berechnung von Faktoren für verschiedene Wasserstände über Tmw zu verzichten.

4.3.2 Differenz der Korrekturfaktoren von COSMO-EU bei Tmw und Tnw

Nun wird angenommen, dass der Wasserstand in der Elbe dem mittleren Tideniedrigwasser entspricht. Dann fallen einige Wattenflächen am Elbufer trocken und es ragen mehr Sandbänke aus dem Wasser heraus. Über den trocken gefallenen Flächen ist die Rauigkeit im Vergleich zu den Wasserflächen erhöht und die Windgeschwindigkeit entsprechend erniedrigt. Somit sollten die Differenzen der bei Tmw berechneten Windgeschwindigkeiten minus der bei Tnw berechneten Windgeschwindigkeiten an den trocken gefallenen Flächen stets positiv sein.

Betrachtet man jedoch die Differenzen der Windgeschwindigkeiten in Abbildung 11, so erkennt man darin auch Flächen, bei denen die Differenzen der Windgeschwindigkeiten negativ sind, z.B. am südlichen Elbufer. Absolut gesehen sind die Änderungen kleiner als $\pm 0,7$ m/s und räumlich meist nur auf einzelne Gitterpunkte beschränkt. Da die negativen Änderungen der Windgeschwindigkeiten mit fallendem Wasserstand physikalisch nicht erklärbar sind, können sie nur durch die Genauigkeit der Berechnung der Windfelder durch WASP erklärt werden. Man muss aus diesen Ergebnissen schließen, dass mit WASP Windgeschwindigkeiten nur mit einer Genauigkeit von 0,5 m/s bis 1 m/s bestimmt werden können.

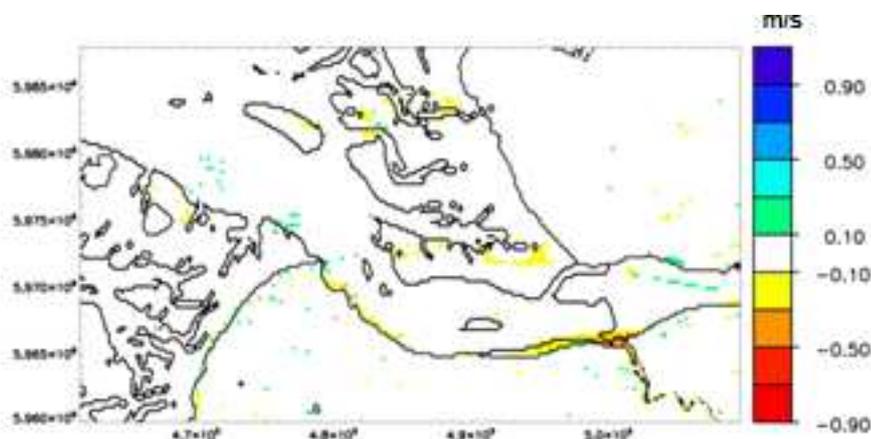


Abb. 11: Differenz der Windgeschwindigkeiten bei Windrichtungen zwischen 255° und 285°, berechnet für COSMO-EU im westlichsten Teilgebiet. Die Windgeschwindigkeiten wurden bestimmt mit der hoch aufgelösten Rauigkeit bei 1. Tidemittelwasser (Tmw) und 2. bei Tideniedrigwasser (Tnw). Die Differenz wurde berechnet aus den Windgeschwindigkeiten bei Tmw minus der Geschwindigkeiten bei Tnw. Schwarze Linien: Elbufer und Wattenflächen aus dem Datensatz des Plotprogramms.

Da die Änderung der Windgeschwindigkeiten bei unseren Untersuchungen in der gleichen Größenordnung liegt wie die Genauigkeit der Werte der berechneten Windfelder, können für fallende Wasserstände keine neuen Faktoren bestimmt werden.

5. Vergleich der Windfelder mit Messungen

Ziel der Berechnung der Korrekturfaktoren war eine Verbesserung der Windfelder über der Elbe im Vergleich zu den Modellergebnissen von COSMO-EU und COSMO-DE. Leider gibt es jedoch keine Windmessstation, die mitten auf der Elbe liegt, z. B. auf einer Sandbank. Deshalb bleibt nur ein Vergleich von Windmessdaten am Ufer in Elbnähe mit den korrigierten Modellergebnissen. Eine Beurteilung der berechneten Windfelder auf der Elbe ist damit jedoch nicht möglich und kann deshalb nur indirekt über die berechneten Wasserstände erfolgen. Für eine zukünftige Verbesserung der berechneten Windfelder wäre eine Messstation direkt auf der Elbe dringend notwendig, da man sonst bei fehlerhaften Ergebnissen für die berechneten Wasserstände nicht zwischen Fehlern des antreibenden Windfeldes und der Elbströmung unterscheiden 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. Wir stellten fest, dass es nur 7 Stationen entlang der Elbe gibt, von denen längere Reihen von digital archivierten Winddaten existieren. Da im Raum Hamburg keine einzige Station an der Elbe existiert, könnten in diesem Gebiet die berechneten Windgeschwindigkeiten nur mit Messungen von Fuhlsbüttel verglichen werden. Auf Grund der großen Entfernung von Fuhlsbüttel von der Elbe wurde auf diese Vergleiche verzichtet.

Von den verfügbaren Messstationen wurden Informationen über die sogenannten Metadaten gesammelt, d.h. z.B. über die Umgebung des Messmasts, die Messhöhe und Veränderungen am Messsystem. Zur genaueren Einschätzung der lokalen Verhältnisse wurde ein Teil der Stationen im Rahmen des Projektes besichtigt. Tabelle 1 zeigt für die Messstationen die Zeiten, für die ohne längere Ausfälle und ohne Veränderungen an der Station Windmessungen vorliegen. Weiter sind die Messhöhen 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 Messstationen 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 Abbildung 12:

- Scharhörn: die Station ist als Windmessstation ideal, liegt jedoch nicht direkt im Mündungsbereich der Elbe. In der Nähe von Scharhörn werden die COSMO-Windgeschwindigkeiten praktisch nicht korrigiert, da dort die Rauigkeiten der COSMO-Modelle mit denen des hoch aufgelösten Rauigkeitsfeldes ungefähr übereinstimmen. Zudem werden alle Windfelder mit dem Windklima

von Scharhörn bestimmt, so dass ein Vergleich der Ergebnisse mit den Messwerten von Scharhörn nicht sinnvoll ist.

- Cuxhaven: der Mast steht mitten in der Stadt in Ufernähe. Bei südlichen Windrichtungen zwischen rund 90 °(Ost) und 270 °(West) ist die Strömung durch die Stadt beeinflusst, so dass die Windgeschwindigkeiten auf Grund der erhöhten Rauigkeit im Vergleich zu den auf Scharhörn gemessenen Windgeschwindigkeiten deutlich reduziert sind.
- Brunsbüttel: Die Messungen werden auf einem kompakten Turm auf der Schleuseninsel in 27 m Höhe gemacht, was das gemessene Windfeld stark beeinflusst. Aus nördlichen Richtungen werden wegen der Anströmung über Land und der Bebauung der Schleuseninsel geringere Windgeschwindigkeiten gemessen als in Cuxhaven.
- Störsperrwerk: Der Windmast steht auf dem Betriebsgebäude des Störsperrwerks in 18 m Höhe. Das kompakte Gebäude verändert das Windfeld wobei die Veränderung jedoch nicht durch den Vergleich mit den anderen Messungen ableitbar ist.
- Ruthenstrom: der Messmast steht am Ruthenstrom, einem westlichen Zufluss in die Elbe. Der Messort liegt inmitten von Feldern und ist mehr für das flache Land als für die Elbe repräsentativ.
- Wedel: die Messungen werden auf einem Radarturm in 34 m Höhe vom Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA HH) durchgeführt. Nach Aussage eines Mitarbeiters des Wasser- und Schifffahrtsamts werden die Messgeräte unregelmäßig gewartet und kalibriert und zeigen verstärkt geringe Windgeschwindigkeiten an. Deutlich wird dies an der Zahl der Kalmen (Windgeschwindigkeiten kleiner 1 m/s), die an der Station Wedel sehr viel häufiger gemessen werden als an den übrigen Stationen. Zudem wird dort deutlich seltener eine Anströmung aus Süd beobachtet, als bei den anderen Stationen. Dies deutet auf eine Abschattung des Windmessers nach Süden hin.
- Krümmel: Die Messungen erfolgen auf einem sehr hohen Mast in 150 m Höhe über Grund auf dem Gelände des Kernkraftwerkes Krümmel. Wegen der großen Messhöhe ist eine Reduktion mit dem logarithmischen Windprofil problematisch, da das logarithmische Windprofil eigentlich nur für Korrekturen von kleineren Höhen verwendet werden kann.
- Boizenburg: die Messungen werden in 18 m Höhe über Grund in einiger Entfernung von der Elbe durchgeführt.

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

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.

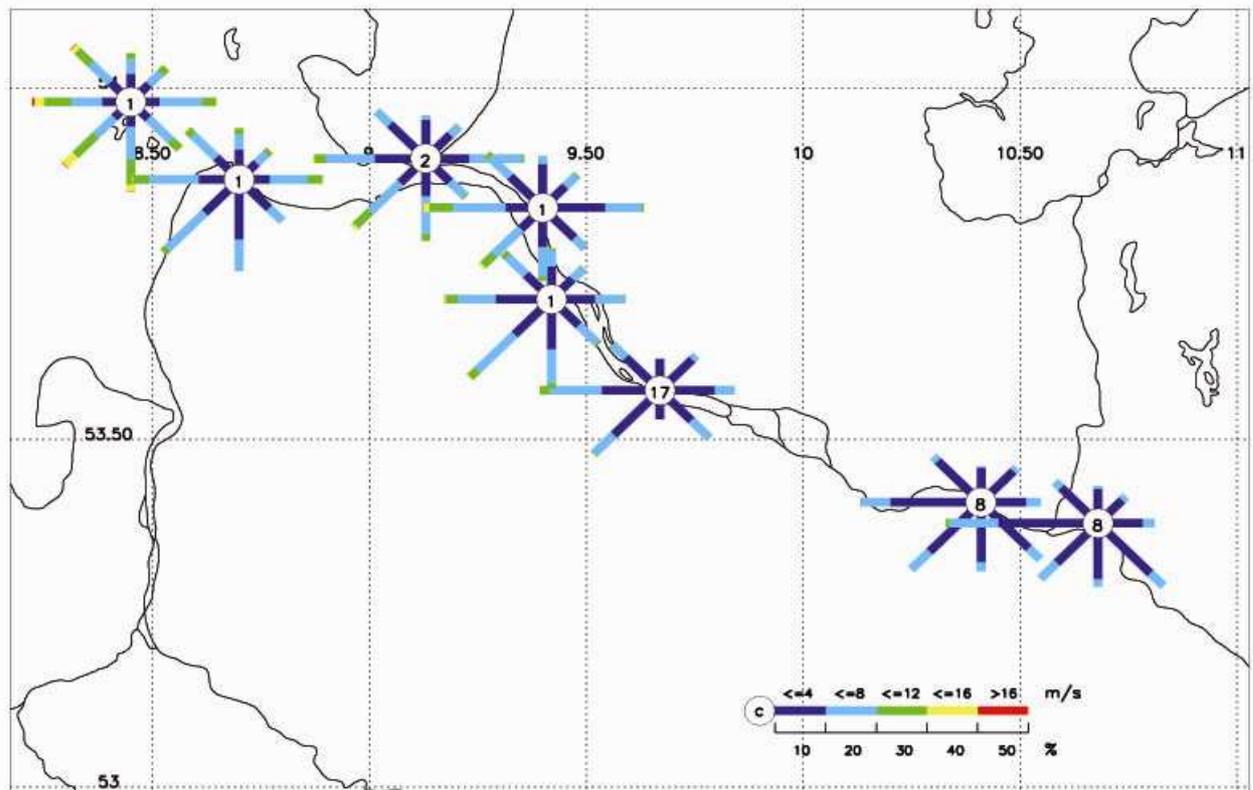


Abb. 12: Windsterne für die Stationen (von West nach Ost) Scharhörn, Cuxhaven, Brunsbüttel, Ruthenstrom, Störsperwerk, Wedel, Kernkraftwerk Krümmel und Boizenburg für den Zeitraum 2005 – 2006. Dargestellt ist die relative Häufigkeit in Prozent von Windmessungen in einer bestimmten Windrichtung für 8 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 wird für einzelne Gitterpunkte und Messungen an Stationen durchgeführt. Es werden folgende Werte miteinander verglichen:

1. Die Zeitreihen der Messungen
2. Die Werte der COSMO-EU Analysen der Jahre 2000 – 2006, die auf das Gitter des BSH-Küstenmodells interpoliert wurden. Dabei wurden zum Vergleich jeweils die Werte an den BSH-Gitterpunkten genommen, die im Modellgebiet des BSH-Modells am nächsten zur geographischen Koordinate des Messmasts liegen. Es wurden nicht direkt COSMO-EU Modellwerte, sondern BSH Werte verwendet, da diese bereits als Zeitreihe für bestimmte Gitterpunkte vorlagen. Eine Erstellung von Zeitreihen für einzelne Gitterpunkte von COSMO-EU war im Rahmen des Projekts nicht möglich, da die COSMO-EU Daten beim Deutschen Wetterdienst nur als ganze Felder für jeden Vorhersagezeit-

punkt im Datenarchiv abgespeichert werden. Eine Entarchivierung der Daten und anschließende Erzeugung von Zeitreihen für einzelne Gitterpunkte ist sehr zeitaufwändig, da das Archivsystem sehr langsam ist.

3. Die Zeitreihen von COSMO-EU an einem Gitterpunkt, multipliziert für jeden Zeitschritt mit dem zur vorherrschenden Windrichtung gehörenden Korrekturfaktor für COSMO-EU. Dabei wird derjenige Wert des Faktors genommen, der im Faktorenfeld am nächsten zur Koordinate der Messung liegt. Dieses Vorgehen entspricht nicht exakt dem Verfahren, das bei den Berechnungen der korrigierten Windfelder verwendet wird. Dort wird an jedem Gitterpunkt des Elbomodells die auf diesen Gitterpunkt gemittelte Windgeschwindigkeit mit dem Faktor multipliziert, der zu diesem Gitterpunkt gehört. Da die Windgeschwindigkeiten von COSMO-EU, gemittelt auf das Gitter des BSH-Küstenmodells, jedoch nur auf der Elbe und am Ufer archiviert wurden, war eine Mittelung mehrerer Werte beim Vergleich mit den Messdaten nicht möglich. Die Messstationen liegen mit Ausnahme von Scharhörn am Elbufer, so dass die um die Station liegenden Gitterpunkte von COSMO-EU zum größten Teil auf Land liegen. Diese Landpunkte waren aber nicht von BSH entarchiviert worden und standen uns nicht zur Verfügung. Bei einem Vergleich der Windgeschwindigkeiten zu festen Zeiten an den vorliegenden Gitterpunkten wurde jedoch festgestellt, dass die Windgeschwindigkeiten an benachbarten Gitterpunkten nicht stark voneinander abweichen. Somit ist nicht zu erwarten, dass bei Mittelung der Windgeschwindigkeiten mehrerer Gitterpunkte sich die Ergebnisse aus den Vergleichen der COSMO-EU Werte mit den Messwerten stark unterscheiden.

Für die folgenden Untersuchungen wurden die Werte der drei Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten jeweils nach ihrer Größe sortiert und die 20., 50., 90. und 95. Perzentilen ermittelt. Der Wert des 95. Perzentils ist z. B. derjenige Wert der Windgeschwindigkeit, unterhalb dessen 95 % aller Windgeschwindigkeitswerte der Zeitreihe liegen.

Abbildung 13 zeigt einen Vergleich der Perzentilen, die jeweils aus den drei Zeitreihen von Cuxhaven bestimmt wurden. 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.

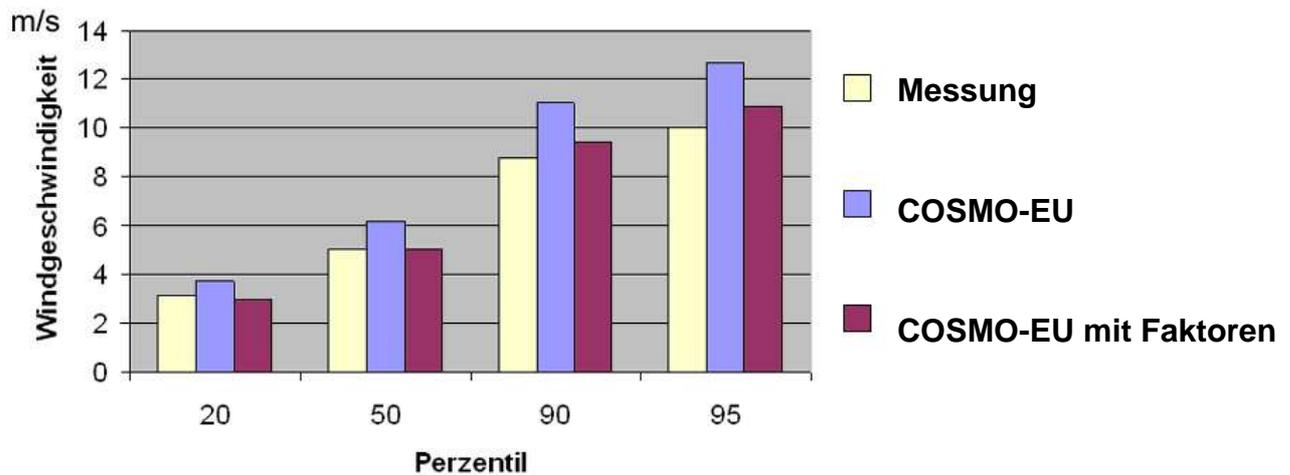


Abb. 13: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der gemessenen mit berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen von Cuxhaven für die Jahre 2006 - 2008. Ausgewertet wurden die 20., 50., 90. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Zeitreihen, die 1. in Cuxhaven gemessen, 2. mit COSMO-EU am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet und 3. mit COSMO-EU und den Faktoren für Cuxhaven bestimmt wurden.

Auch bei den für Brunsbüttel in Abbildung 14 gezeigten Verteilungen zeigt sich, dass die Faktoren eine Korrektur der Windgeschwindigkeiten in der richtigen Richtung erzielen. So liegen die Werte der Windgeschwindigkeiten der mit COSMO-EU bestimmten Verteilung für die 50., 90. und 95. Perzentile unter den Werten, die aus der Verteilung der gemessenen Zeitreihe bestimmt wurden. Die mit den Faktoren korrigierten Perzentilwerte der Windgeschwindigkeiten sind stets größer als die unkorrigierten Werte von COSMO-EU und auch größer als die der Messung. Beim Vergleich muss man jedoch beachten, dass die in Brunsbüttel gemessenen Windgeschwindigkeiten durch den Einfluss der Schleuseninsel eher niedriger ausfallen als die Windgeschwindigkeiten auf der Elbe.

Genau wie bei Brunsbüttel sind die Perzentilen am Störsperrwerk, die aus der Verteilung der COSMO_EU Zeitreihe bestimmt wurden, kleiner als die aus der Zeitreihe der Messung berechneten, siehe Abbildung 15. Nach der Korrektur der Windgeschwindigkeiten sind die Perzentilen von COSMO-EU größer als die der gemessenen Werte. Insgesamt ergibt sich durch die Korrektur der Werte eine größere Übereinstimmung zwischen den Verteilungen der Modellwerten und Messwerte als ohne Korrektur.

Auch für Ruthenstrom liegen die Werte für alle untersuchten Perzentilen der Verteilungen der COSMO_EU Windgeschwindigkeiten unterhalb und die der korrigierten COSMO_EU Windgeschwindigkeiten oberhalb der entsprechenden Perzentilwerte der Messungen, siehe Abbildung 16. Bei dieser Station weichen jedoch die Werte der korrigierten Zeitreihe deutlich stärker ab von denen der Messungen als die Werte der unkorrigierten Zeitreihe. Dies ist dadurch bedingt, dass die Messungen am Ruthenstrom nicht repräsentativ sind für die Elbe, da gerade bei hohen Windgeschwindigkeiten westliche Windrichtungen und somit Winde von Land vorherrschen. Die Windgeschwindigkeiten von COSMO-EU wurden jedoch für einen Gitterpunkte auf der Elbe bestimmt.

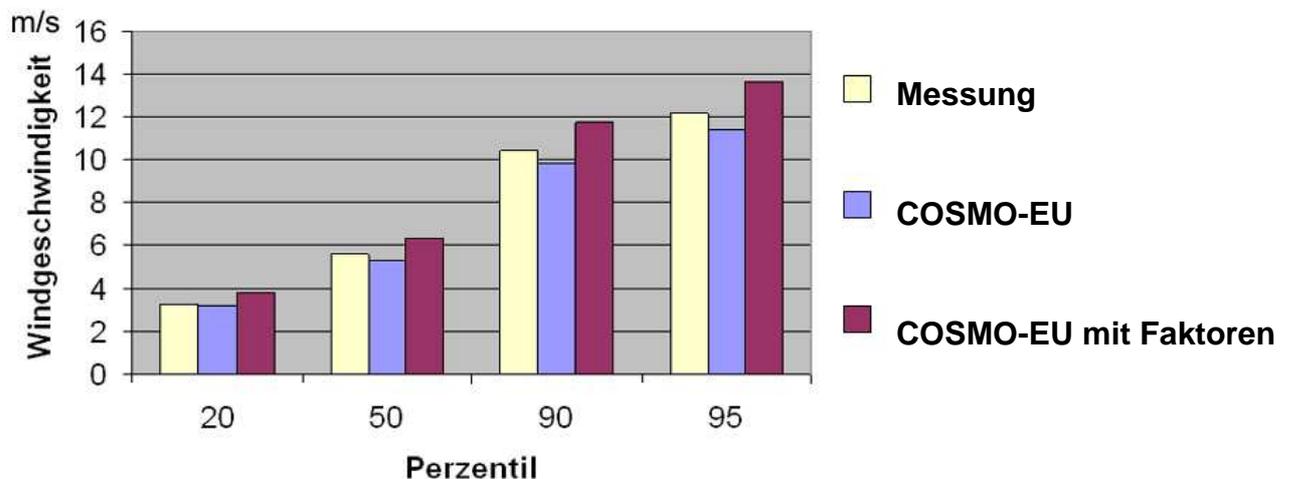


Abb. 14: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von gemessenen und berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen für Brunsbüttel für die Jahre 2000 - 2007. Ausgewertet wurden die 20., 50., 90. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Zeitreihen, die 1. in Brunsbüttel gemessen, 2. mit COSMO-EU am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet und 3. mit COSMO-EU und den Faktoren für Brunsbüttel bestimmt wurden.

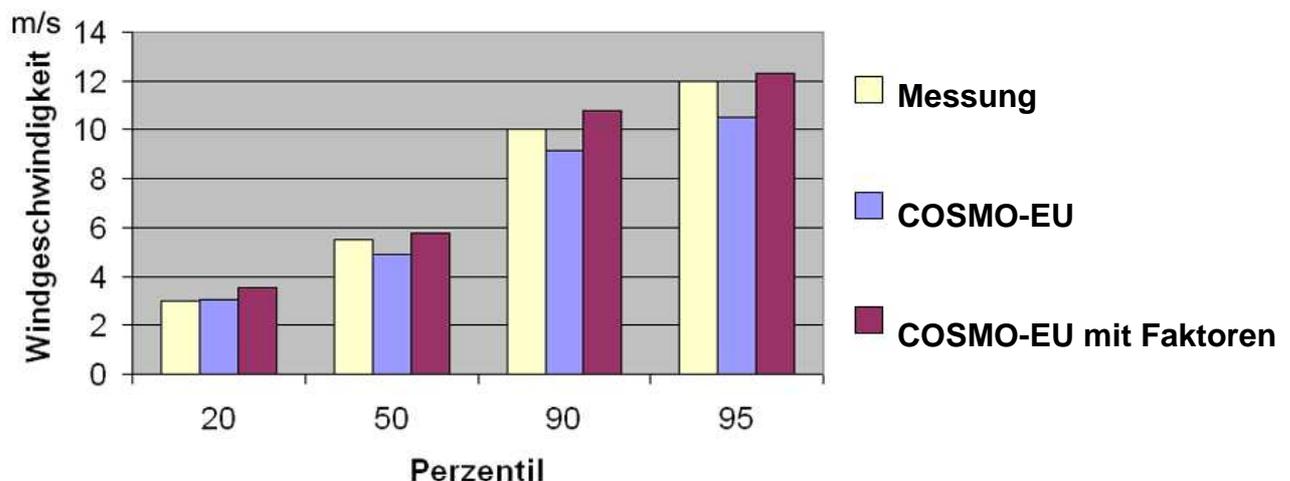


Abb. 15: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von gemessenen und berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen am Störsperrwerk für die Jahre 2000 - 2006. Ausgewertet wurden die 20., 50., 90. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Zeitreihen, die 1. in Störsperrwerk gemessen, 2. mit COSMO-EU am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet und 3. mit COSMO-EU und den Faktoren für die Station Störsperrwerk bestimmt wurden.

Insbesondere an den Vergleichen für Cuxhaven kann man erkennen, dass die Faktoren die COSMO-EU Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu den gemessenen Windgeschwindigkeiten verbessern. Bei allen anderen Stationen können keine eindeutigen Aussagen über die Verbesserung der Windfelder durch die Faktoren gemacht werden, da die Messungen nicht repräsentativ für das Windfeld auf der Elbe sind. Bei allen vier Vergleichen sind jedoch die Abweichungen der Überschreitungswerte der korrigierten Windzeitreihe von COSMO-EU von denen der Zeitreihe der Messun-

gen für hohe Windgeschwindigkeiten nicht deutlich größer als für niedrige Windgeschwindigkeiten. Somit zeigen die gezeigten Vergleiche nicht die Notwendigkeit auf, dass für hohe Windgeschwindigkeiten die Faktoren verändert werden müssen.

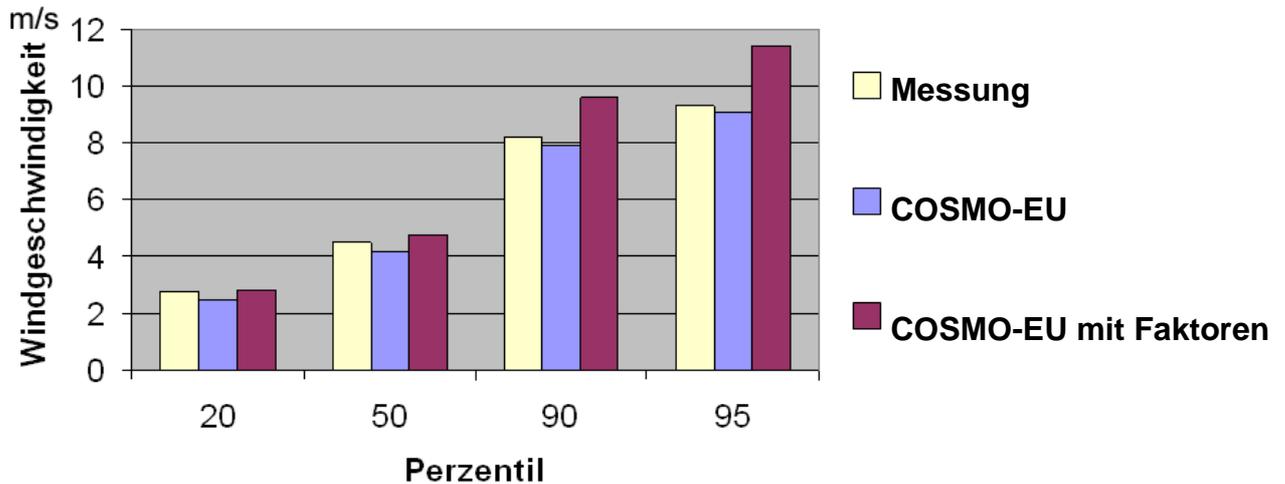


Abb. 16: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen von gemessenen und berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen für Ruthenstrom für die Jahre 2002 - 2007. Ausgewertet wurden die 20., 50., 90. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Zeitreihen, die 1. in Ruthenstrom gemessen, 2. mit COSMO-EU am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet und 3. mit COSMO-EU und den Faktoren für Ruthenstrom bestimmt wurden.

5.3 Vergleich von kurzen Zeitreihen während der Sturmflut vom 18.1.2007

Für das Projekt OPTEL wurden von der Hamburg Port Authority (HPA) fünf Sturmfluten seit 2006 nach verschiedenen Kriterien ausgewählt. Für diese Sturmfluten sollen Wasserstandsberechnungen 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. Es wird wieder überprüft, ob die Faktoren bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten möglicherweise zu groß sind.

Die Abbildungen 17 und 18 zeigen Vergleiche von korrigierten und unkorrigierten COSMO-EU Windgeschwindigkeiten an einzelnen Gitterpunkten mit Messdaten von Cuxhaven und Ruthenstrom für den Zeitraum 15.1.2007 0 UTC bis 21.1.2007 0 UTC. Dabei werden 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 bei COSMO-EU rund 8 m/s höher als die beobachtete Windgeschwindigkeit. Die korrigierten COSMO-EU Windgeschwindigkeiten sind im Vergleichszeitraum stets kleiner als die unkorrigierten Werte und liegen 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. Somit stehen die Werte der drei Zeitreihen in diesem kurzen Zeitabschnitt im

gleichen Verhältnis zueinander wie die über einen langen Zeitraum ermittelten Häufigkeitsverteilungen, so dass auch in diesem Fall durch die Anwendung der Korrekturfaktoren eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt wurde.

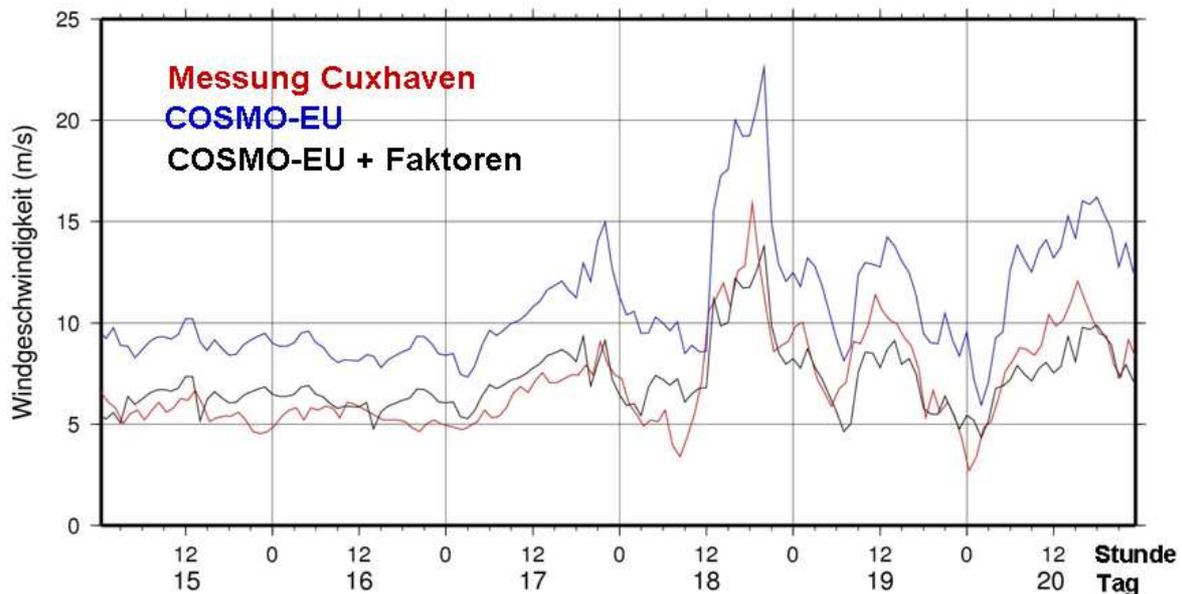


Abb. 17: Vergleich der gemessenen mit berechneten Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten während der Sturmflut vom 18.1.2007 in Cuxhaven.

Rot: Messungen Cuxhaven

Blau: Vorhersagewerte von COSMO-EU am Gitterpunkt mit dem kleinsten Abstand zum Messort

Schwarz: Werte von COSMO-EU aus der blauen Kurve, multipliziert mit dem Korrekturfaktor.

Quelle: I. Bork (2009): Pers. Mitteilung.

Am Gitterpunkt in der Nähe von Ruthenstrom sind die mit COSMO-EU bestimmten Windgeschwindigkeiten in diesem Zeitraum immer größer als die an der Station gemessenen Windgeschwindigkeiten. Die Korrektur der COSMO-EU Windgeschwindigkeiten mit den Faktoren führt zu jedem Zeitpunkt zu einem geringen Anstieg der Windgeschwindigkeiten und damit zu einer geringfügig größeren Abweichung von den Messwerten.

In Abbildung 16 jedoch sind die Überschreitungswerte der Häufigkeitsverteilungen von COSMO-EU für alle Perzentile kleiner sind als die der Verteilung der Messwerte. Der Unterschied ist dadurch zu erklären, dass während des betrachteten Zeitabschnitts ein Sturm über die Nordsee zog. Das COSMO-EU Windfeld erfasst den großräumigen Ablauf des Sturms im Bereich Ruthenstrom. Die Messungen hingegen spiegeln die lokalen Einflüsse der Umgebung auf das Windfeld wieder, die bei geringen Windgeschwindigkeiten stärker sind als bei hohen. Die gesamte Atmosphäre ist bei hohen Windgeschwindigkeiten stark durchmischt und so haben z.B. lokale Schwankungen in der Temperaturschichtung einen geringeren Einfluss auf das Windfeld als bei geringen Windgeschwindigkeiten. Deshalb wird das absolute Windmaximum während der Sturmflut sowohl von COSMO-EU als auch von den korrigierten Werten von COSMO-EU sehr gut getroffen, während es größere Abwei-

chungen zu den Zeiten gibt, in denen die gemessenen Windgeschwindigkeiten kleiner als 10 m/s sind.

Da die Messungen von Ruthenstrom nicht repräsentativ sind für Windgeschwindigkeiten auf der Elbe, aber mit einem Windgeschwindigkeiten an einem Gitterpunkt auf der Elbe verglichen werden, kann auch aus dem in Abbildung 18 gezeigten Vergleich nicht geschlossen werden, dass die für die Elbe berechneten Windgeschwindigkeiten in diesem Zeitraum zu hoch sind.

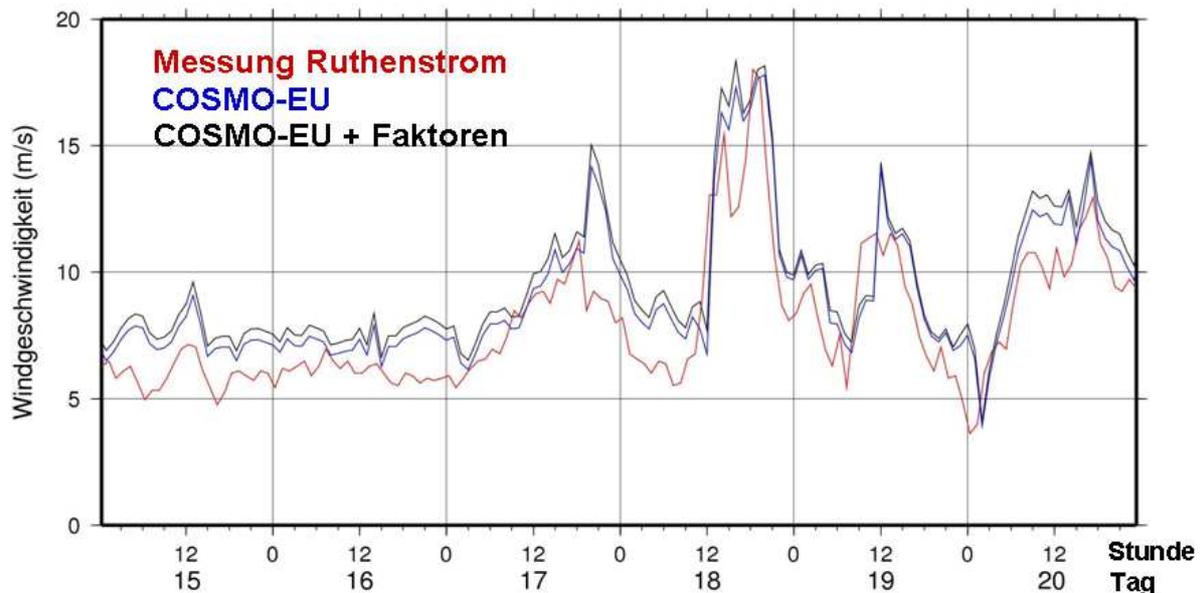


Abb. 18: Vergleich der gemessenen mit berechneten Zeitreihen der Windgeschwindigkeiten der Sturmflut vom 18.1.2007 in Ruthenstrom.

Rot: Messungen Ruthenstrom

Blau: Vorhersagewerte von COSMO-EU am Gitterpunkt mit dem kleinsten Abstand zum Messort

Schwarz: Werte von COSMO-EU aus der blauen Kurve, multipliziert mit dem Korrekturfaktor

Quelle: I. Bork (2009): Pers. Mitteilung.

Auch aus diesen zwei Vergleichen kann keine Beurteilung der Wirkung der Faktoren für COSMO-EU bei hohen Windgeschwindigkeiten abgeleitet werden. Es sind wieder keine Anzeichen dafür zu entdecken, dass die Faktoren bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten reduziert werden müssen.

5.4 Vergleich von Häufigkeitsverteilungen der COSMO-DE-Daten und der Messdaten

Genau wie für die Daten von COSMO-EU wird auch für die Winddaten von COSMO-DE und die zugehörigen Faktoren ein Vergleich mit Messwerten durchgeführt. Bei COSMO-DE werden jedoch die Originalgitterpunktwerte des Wettervorhersagemodells verwendet. Da die Entarchivierung der Daten sehr zeitaufwändig war, wurden nur die Daten des Jahres 2007 genutzt. Ein Vergleich mit Messdaten wurde nur für Cuxhaven und Brunsbüttel durchgeführt.

Auch bei diesem Vergleich werden nur Werte der Windgeschwindigkeiten an einzelnen Gitterpunkten mit den Messungen verglichen, obwohl bei der Wasserstandsrechnung an jedem Punkt des Ästuarmodells die Windgeschwindigkeiten der umliegenden COSMO-DE Gitterpunkte auf die Position des Gitterpunkts des Ästuarmodells gemittelt werden.

Da zum Zeitpunkt des Berichts die Mittelung der COSMO-DE Felder auf die Gitterpunkte der zwei Ästuarmodelle noch nicht fertig gestellt war, kann eine Mittelung der Werte wie in den Modellen nicht vorgenommen werden. Um jedoch ein Maß für die räumliche Variabilität der COSMO-DE Windfelder zu geben, wurden jeweils die Verteilungen von den 5 Gitterpunkten bestimmt, die am nächsten zum Messort liegen. Die Lage der Gitterpunkte ist in Abbildung 19 eingezeichnet.

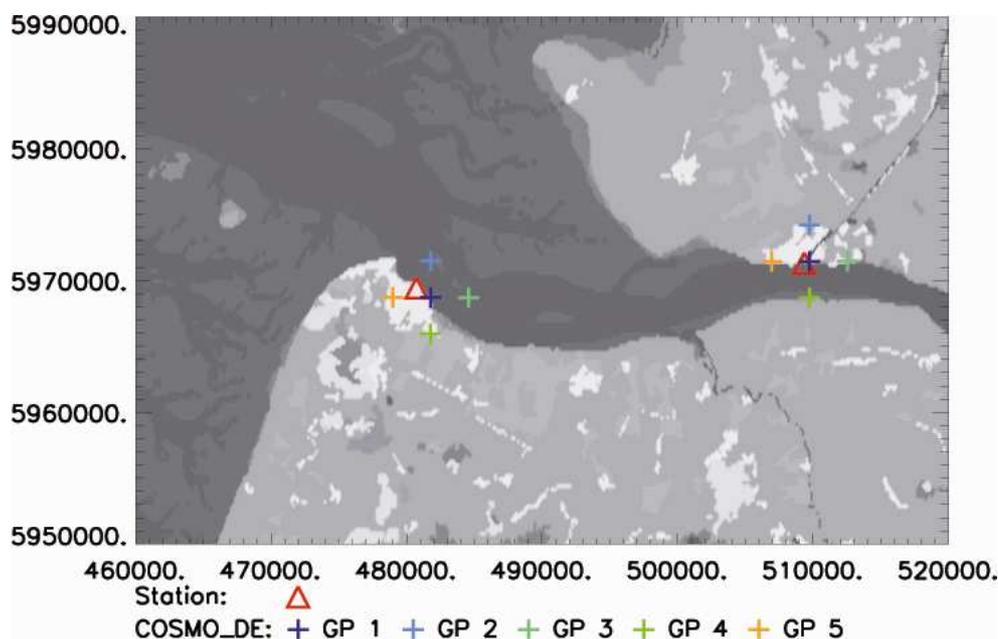


Abb. 19: Lage der Messstationen Cuxhaven und Brunsbüttel (rote Dreiecke) sowie der Gitterpunkte von COSMO-DE (Kreuze), die zum Vergleich herangezogen wurden. Gezeigt ist ein hoch aufgelöstes Feld der Rauigkeiten im Elbgebiet im UTM-Koordinatensystem. Dabei sind glatte Flächen (wie z.B. das Meer) in dunklen Grautönen, raue Felder (z.B. Städte) in hellen Grautönen dargestellt.

Abbildung 20 zeigt für Cuxhaven in gleicher Weise wie bei den in Kapitel 5.2 gezeigten Abbildungen einen Vergleich der Überschreitungswerte der Windgeschwindigkeiten bei bestimmten Perzentilen der Häufigkeitsverteilung, jeweils für die Zeitreihe der Messung, der mit COSMO-DE am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnete Windgeschwindigkeiten und der mit COSMO-DE mit den Korrekturfaktoren multiplizierten Geschwindigkeiten. Für alle bestimmten Perzentile sind die mit den Korrekturfaktoren und COSMO-DE berechneten Werte der Windgeschwindigkeiten stets größer als die der Verteilung der unkorrigierten Zeitreihe und der Messungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Messungen stark vom Umland beeinflusst sind und der Gitterpunktwert mehr den Einfluss der Elbe widerspiegelt.

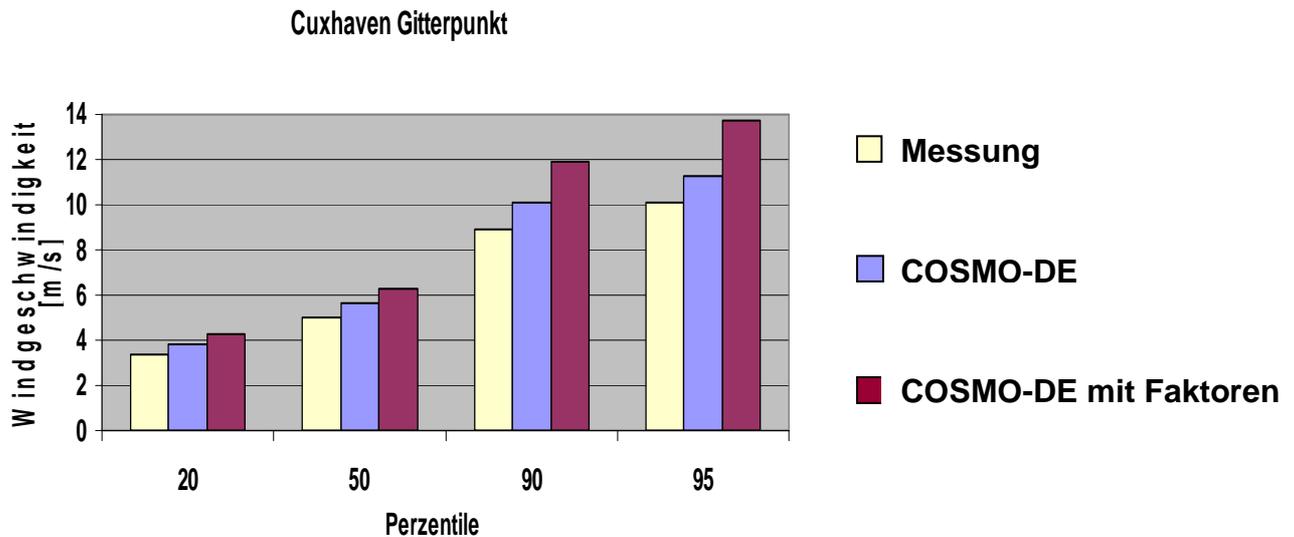


Abb. 20: Vergleich der Verteilungen der gemessenen mit berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen von Cuxhaven für 2007. Ausgewertet wurden die 20., 50., 90. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Zeitreihen, die 1. in Cuxhaven gemessen, 2. mit COSMO-DE am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet und 3. mit COSMO-DE und den Faktoren für Cuxhaven bestimmt wurden.

Vergleicht man in Abbildung 21 die Überschreitungswerte der Windgeschwindigkeiten von COSMO-DE an den 5 Gitterpunkten in der Nähe der Messstation, so erkennt man, dass sich die Werte für die 95. Perzentile um bis zu 4 m/s zwischen den Gitterpunkten unterscheiden. Bis auf die Werte des 5. Gitterpunkts, der westlich von Cuxhaven an Land liegt, sind alle Überschreitungswerte höher als die der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Werte. Dies ist sicher auch darauf zurückzuführen, dass das Windfeld in Cuxhaven für viele Windrichtungen von der Stadt beeinflusst ist und dass COSMO-DE diese Stadteinflüsse nicht genau wieder gibt. Auch das mit den Faktoren berechnete Windfeld berücksichtigt nur grob die Rauhmigkeit einer Stadt, aber nicht genau den Einfluss von z.B. einzelnen Gebäuden auf das Windfeld. Insgesamt kann man jedoch aus dieser Abbildung schließen, dass auch durch Mittelung der drei nächstgelegenen Gitterpunkte auf die Position der Messstation keine bessere Übereinstimmung der COSMO-DE Werte mit den Messwerten erzielt werden kann.

Führt man für Brunsbüttel den Vergleich der Häufigkeitsverteilungen durch, die einerseits aus den Messwerten und andererseits aus den mit COSMO-DE an den zur Messstation nächstgelegenen Gitterpunkt berechneten Windgeschwindigkeiten bestimmt werden, so sind die Überschreitungswerte der Verteilung der gemessenen Windgeschwindigkeiten stets größer als die der mit COSMO-DE berechneten, siehe Abbildung 22. Auch nach Korrektur der Windgeschwindigkeiten von COSMO-DE sind die Überschreitungswerte der Häufigkeitsverteilung der berechneten Windgeschwindigkeiten stets kleiner als die der gemessenen Windgeschwindigkeiten. Somit sind im Mittel die COSMO-DE Windgeschwindigkeiten an diesem Gitterpunkt zu klein im Vergleich zu den gemessenen.

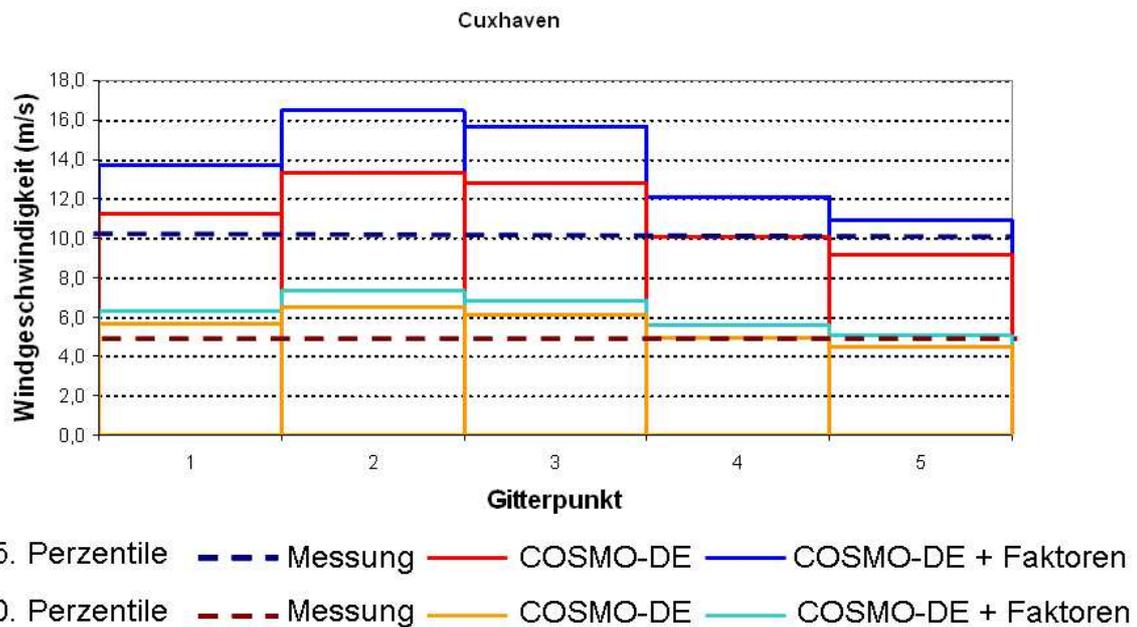


Abb. 21: Vergleich der 50. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der gemessenen mit den an den 5 zur Messstation nächstgelegenen Gitterpunkten berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen von Cuxhaven für 2007. Ausgewertet wurden die Zeitreihen, die 1. in Cuxhaven gemessen, 2. mit COSMO-DE berechnet und 3. mit COSMO-DE und den Faktoren für Cuxhaven bestimmt wurden.

Vergleicht man jedoch die Geschwindigkeiten für die fünf umliegenden Gitterpunkte in Abbildung 23, so sind am 3. und 4. Gitterpunkt die Überschreitungswerte für die 50. Perzentile, die aus den Häufigkeitsverteilungen der mit COSMO-DE berechneten und der mit den Faktoren korrigierten Zeitreihen bestimmt wurden, fast gleich mit den Überschreitungswerten der Zeitreihe der Messung. Die Werte des 95. Perzentils der Windgeschwindigkeit sind jedoch bei der Häufigkeitsverteilung der Messwerte immer deutlich größer als bei der aus COSMO-DE und aus der mit dem korrigierten COSMO-DE bestimmten Verteilungen.

Mittelt man wieder die Werte an den Gitterpunkten 1, 4 und 5 an den Ort der Messung, so werden die Werte der gemittelten Verteilung im Mittel weniger stark von dem Mittelwert der Messung abweichen, als dies im Vergleich des 1. Gitterpunkts mit der Messung der Fall war. Hohe Windgeschwindigkeiten werden jedoch auch in den gemittelten Zeitreihen für COSMO-DE und das korrigierte COSMO-DE seltener sein als in der Zeitreihe der Messung.

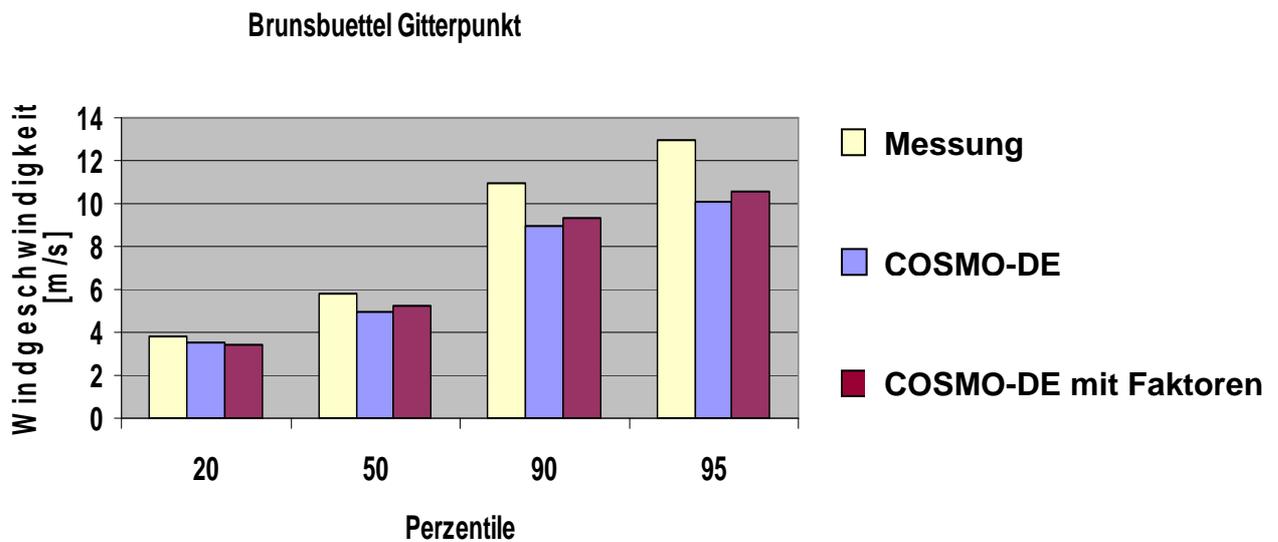


Abb. 22: Vergleich der Verteilungen der gemessenen mit berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen von Brunsbüttel für 2007. Ausgewertet wurden die 20., 50., 90. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Zeitreihen, die 1. in Brunsbüttel gemessen, 2. mit COSMO-DE am nächstgelegenen Gitterpunkt berechnet und 3. mit COSMO-DE und den Faktoren für Brunsbüttel bestimmt wurden.

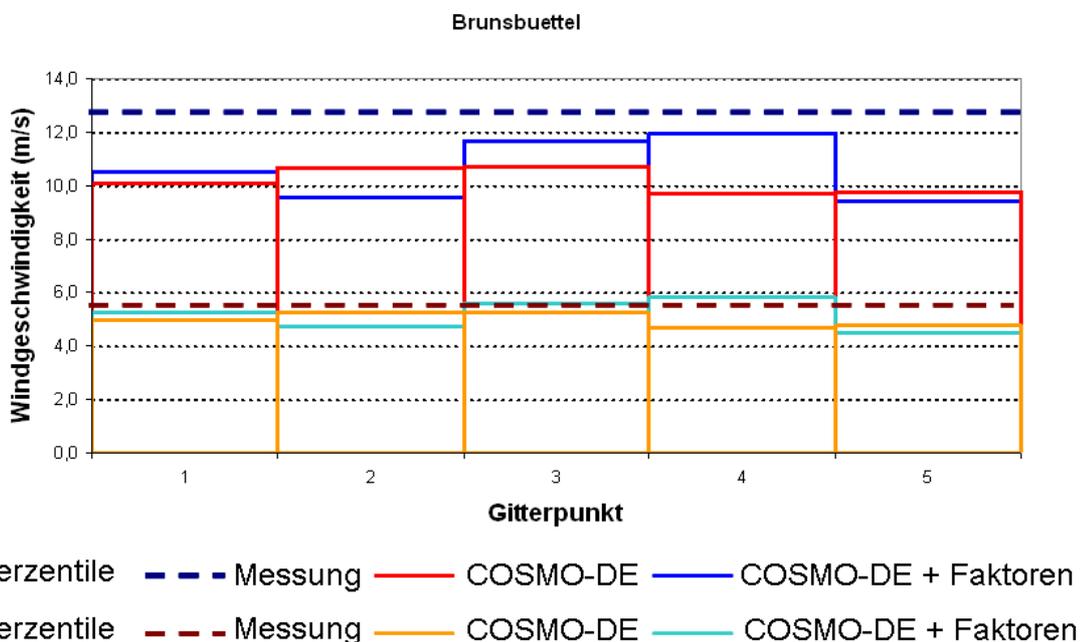


Abb. 23: Vergleich der 50. und 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen der Verteilungen der gemessenen mit den an den 5 zur Messstation nächstgelegenen Gitterpunkten berechneten Windgeschwindigkeitszeitreihen von Brunsbüttel für 2007. Ausgewertet wurden die Zeitreihen, die 1. in Cuxhaven gemessen, 2. mit COSMO-DE berechnet und 3. mit COSMO-DE und den Faktoren für Brunsbüttel bestimmt wurden.

Insgesamt kann man aus den zwei gezeigten Vergleichen der Zeitreihen von COSMO-DE und dem korrigierten COSMO-DE mit den Messungen in Cuxhaven und Brunsbüttel nicht beurteilen, ob die Ergebnisse der korrigierten Windfelder näher an den tatsächlichen Windfeldern liegen, oder nicht. Dies liegt vor allem daran, dass keine idealen Windmessungen vorliegen und dass die tatsächlichen Windfelder an den Messmasten auch mit dem Programm WASP nicht simuliert werden können. Es bleibt deshalb nur der Weg, über einen Vergleich der mit den Windfeldern bestimmten Wasserständen mit den gemessenen Wasserständen zu zeigen, ob die korrigierten Windfelder näher an den wirklichen Windfeldern sind oder nicht. Dies kann zum jetzigen Zeitpunkt jedoch nicht getestet werden, da die entsprechenden Projektergebnisse noch nicht vorliegen.

6. Zusammenfassung

Im Projekt OPTEL werden mit Hilfe des Windmodells WASP Korrekturfaktoren für die mit den Wettervorhersagemodellen COSMO-EU und COSMO-DE berechneten Windgeschwindigkeiten auf der Elbe bestimmt.

Mit WASP kann man von einer Zeitreihe von gemessenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an einem Ort auf zeitlich gemittelte Windfelder für 12 Windrichtungsklassen in einem Gebiet schließen. Zur Berechnung des Windfelds benötigt WASP zusätzlich das Topographie- und Rauigkeitsfeld des Gebiets. Gibt man eine Zeitreihe von gemessenen Windgeschwindigkeiten an einem Ort vor und berechnet für das Gebiet mit WASP und zwei verschiedenen Rauigkeitsfeldern jeweils ein mittleres Windfeld, so spiegeln die unterschiedlichen Ergebnisse für die Windgeschwindigkeiten die Unterschiede zwischen den zwei Rauigkeitsfeldern wider. Aus den Quotienten der Windgeschwindigkeiten, die einerseits mit räumlich hoch aufgelösten Topographie- und Rauigkeitsfeldern und andererseits mit den Randfeldern von COSMO-EU bzw. COSMO-DE bestimmt wurden, berechneten sich die Korrekturfaktoren für die Elbe.

Zur Validation der korrigierten COSMO-EU Windfelder erfolgte für einzelne Gitterpunkten 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 Messung 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 Brunsbüttel wird durch die Korrekturfaktoren eine Reduktion der Differenzen der

Messwerte im Vergleich zu den mit COSMO-EU bestimmten Windgeschwindigkeiten erzielt. Bei der Station Ruthenstrom weichen die Werte der korrigierten Zeitreihe deutlich stärker ab von denen der Messungen als die Werte der unkorrigierten Zeitreihe. Dies ist dadurch erklärbar, dass die Messungen am Ruthenstrom 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 niedrige Windgeschwindigkeiten. Somit können die Faktoren zur Korrektur sowohl von hohen als auch von niedrigen Windgeschwindigkeiten verwendet werden.

Für die Ergebnisse von COSMO-DE wurden die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeiten an 5 Gitterpunkten in der Nähe der Messstation mit den Verteilungen der Messwerte verglichen. Innerhalb der 5 Gitterpunkte rund um Cuxhaven unterscheiden sich die Werte für die 95. Perzentile der Häufigkeitsverteilungen um bis zu 4 m/s. Bis auf die Werte des 5. Gitterpunkts, der westlich von Cuxhaven an Land liegt, sind alle Perzentilwerte, die auf COSMO-DE und auf korrigierten COSMO-DE Daten beruhen höher als die der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Werte. Dies ist sicher darauf zurückzuführen, dass das Windfeld der Station Cuxhaven für viele Windrichtungen von der Stadt beeinflusst ist und dass im Modell COSMO-DE diese Stadteinflüsse nicht genau wiedergegeben werden. Auch das mit den Faktoren berechnete Windfeld berücksichtigt zwar grob die Rauigkeit einer Stadt, aber nicht genau den Einfluss von z.B. einzelnen Gebäuden auf das Windfeld.

Vergleicht man die Geschwindigkeiten für 5 um den Messort liegende Gitterpunkte in Brunsbüttel, so sind an den westlich und südlich der Messstation gelegenen Gitterpunkten die Werte für die 50. Perzentile, die aus den Häufigkeitsverteilungen der mit COSMO-DE und den Faktoren korrigierten Zeitreihen bestimmt wurden, fast gleich mit dem Wert der Zeitreihe der Messung. Die Werte des 95. Perzentils sind dagegen bei der Zeitreihe der Messung immer deutlich größer als bei den Zeitreihen, die mit COSMO-DE und dem korrigierten COSMO-DE bestimmt werden. Daraus folgt, dass in Brunsbüttel hohe Windgeschwindigkeiten in den Zeitreihen für COSMO-DE und das korrigierte COSMO-DE seltener sein werden als in der Zeitreihe der Messung.

Eine genauere Beurteilung der berechneten Windfelder auf der Elbe ist nicht möglich, da es keine Messungen direkt auf der Elbe gibt. Sie kann deshalb nur indirekt im Laufe des weiteren Projekts über die berechneten Wasserstände erfolgen. Es wäre jedoch sehr empfehlenswert, wenn direkt auf der Elbe Windmessstationen eingerichtet werden würden.

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 Modellwindoutput von COSMO-EU und COSMO-DE hin und können so zu einer Verbesserung der Wasserstandsvorhersagen beitragen.

7. Danksagung

Ich danke allen meinen Kollegen beim Deutschen Wetterdienst für die freundliche Unterstützung bei der Entarchivierung von Daten und Fragen zu den Modellen COSMO-DE und COSMO-EU. Insbesondere danke ich Frau Rosskamp für die geduldige Unterstützung bei der Digitalisierung der Rauigkeitsfelder.

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

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

8. Literatur

Baldauf, M., J. Förstner, S. Klink, T. Reinhardt, C. Schraff, A. Seifert und K. Stephan, 2009: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Kurzzeitfrst COSMO-DE (LMK) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 77 S.

Bundesanstalt für Wasserbau, 2006: Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt, Gutachten zur ausbaubedingten Änderung von Hydrodynamik und Salzgehalt.
http://www.fahrrinnenausbau.de/planaenderung/kapitel_h1-h3/index.php

Lange, B. and J. Højstrup, 2001: Evaluation of the wind-resource estimation program WASP for offshore applications. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 89, issue 3-4, pp. 271 – 291.

Majewski, D., D. Liermann, P. Prohl, B. Ritter, M. Buchhold, T. Hanisch, G. Paul, W. Wergen, J. Baumgardner, 2002: The operational global icosahedral-hexagonal gridpoint model GME: Description and high-resolution tests. Mon. Wea. Rev., 130, 319 – 338.

Mortensen, N.G., L. Landberg, I. Troen und E. L. Petersen, 1993: Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP). Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.

Petersen, E.L., 1993: Wind Resources Part I, The European Wind Climatology. Proceedings of the European Wind Energy Conference, Lübeck-Travemünde, 1993, pp.663 – 668.

Schättler, U., 2005: A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part V:

Preprocessing: Initial and Boundary data for LM. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 32 S.

Schättler, U., G. Doms und C. Schraff, 2005: A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part VII: User's Guide. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 132 S.

Schulz, J.-P. und U. Schättler, 2009: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Europa COSMO-EU (LME) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD. Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 71 S.

WAsP, 2005: Wind Atlas Analysis and Application Program. Version 8, Course Notes 2005. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.