

Vergleich beobachteter und aus parametrisierten Beziehungen berechneter Windreibungskoeffizienten während eines Sturmes an der Ostseeküste

Armin Raabe, Katja Friedrich, Holger Fritsch

Zusammenfassung:

Beobachtete und über parametrisierte Beziehungen berechnete Windreibungs-koeffizienten werden für die Zeit eines Sturms, der in der Zeit zwischen dem 08.07.96 und 11.07.96 an der Ostseeküste tobte, verglichen. Die innerhalb der ufernahen Zone aus Windprofildaten ermittelten Reibungskoeffizienten lassen sich mit weniger als 20% Fehler auch über vorliegende parametrisierten Beziehungen aus einer standardisierten Windgeschwindigkeitsmessung berechnen.

Summary:

A comparison between observed and calculated wind drag coefficients were investigated during a storm with wind speeds up to 20 m/s at the Baltic Sea coast between 8th July, 1996 and 11th July, 1996.

The drag coefficient which was determined from observed wind speeds from wind profile measurements can also be predicted on behalf of parameterised relations with a random error less than 20%.

1. Einführung

In der Literatur sind eine Vielzahl von Experimenten beschrieben, die den Versuch unternehmen, den reibungsbedingten Impulsaustausch zwischen der bewegten Atmosphäre und einer beweglichen Unterlage (Wasser, Meer) zu parametrisieren. Eine Übersicht findet man z.B. bei Garrat, 1977 oder Panin, 1985. In letzter Zeit gelang es auch, Ergebnisse von Experimenten zu vereinheitlichen, die aus Satellitendaten entsprechende Beziehungen ableiten (Yelland u.a., 1996).

Im großen und ganzen herrscht heute Einigkeit darüber, in welchem Maße der aerodynamische Reibungskoeffizient sich verändert, wenn die Windgeschwindigkeit zunimmt. Einmal variiert dieser mit der Stabilität der Schichtung zwischen Unterlage und Atmosphäre, zum anderen beobachtet man aber auch eine Zunahme des Reibungskoeffizienten mit wachsender Windgeschwindigkeit bei nahezu neutralen Schichtungsverhältnissen (s. Hasse, 1993).

Auf der Grundlage solcher parametrisierter Beziehungen wurden beispielsweise großräumige Klimaatlantent, die regionale Angaben über die Wechselwirkung zwischen Meer und Atmosphäre vorstellen, erarbeitet (z.B. Isemer und Hasse, 1987). Numerische Modelle greifen auf diese Beziehungen zurück, um die windgeschwindigkeitsabhängigen turbulenten Flüsse über der Unterlage zu den verschiedenen Prognosezeitpunkten festzulegen.

Seltener gelang es jedoch während der kurzen Zeit eines Experimentes die gesamte Breite der in der Natur auftretenden Windgeschwindigkeiten in den Meßdaten wiederzufinden. Oft setzen sich die abgeleiteten Beziehungen aus Daten zusammen, die über Jahre hinweg zu verschiedenen Zeiten und in verschiedenen Gebieten gesammelt wurden. Das zeigt das Vertrauen auf die

zugrundeliegenden physikalischen Prozesse, die egal wo, unter vergleichbaren Bedingungen übereinstimmende Reibungsverhältnisse reproduzieren müssen.

2. Die Parametrisierung der Reibungskoeffizienten

Reibt die bewegte Luft an der Unterlage, so verliert diese an Geschwindigkeit. Der Geschwindigkeitsverlust äußert sich vertikal zur parallel zur Unterlage verlaufenden Strömung als ein Gradient der Windgeschwindigkeit. Demnach wird von unten nach oben der Luft Impuls entzogen. Dieser Impulsstrom τ ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) quer zur Strömungsrichtung entspricht einer Schubspannung ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$) und ist eine der wichtigsten Größen, die zur Beschreibung der reibungsbeeinflussten Bewegung einer Luftmasse unter turbulenten Strömungsverhältnissen benötigt werden. Bei Berücksichtigung der Luftdichte ρ (kg/m^3) reduziert sich die Maßeinheit des auf die Dichte bezogen Impulsstromes τ/ρ zu (m^2/s^2). Das suggeriert eine Beziehung zum Quadrat einer Geschwindigkeit $(u_*)^2$. Diese Geschwindigkeit u_* trägt die Bezeichnung Schubspannungsgeschwindigkeit. Es liegt nahe, nach einer Beziehung zwischen der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und der leicht zu beobachtenden Windgeschwindigkeit u_{10} (z.B. bezogen auf die Standardhöhe 10m über der Unterlage) zu fragen. Damit letztlich die Verbindung zum Impulsstrom bzw. Schubspannung τ sichtbar wird, ist es zweckmäßig, einen Koeffizienten C_{10} , der als Reibungskoeffizient (engl. Drag-coefficient) bezeichnet wird, in der folgenden Form einzuführen:

$$C_{10} = \left(\frac{u_*}{u_{10}} \right)^2 = \frac{\tau}{\rho} \cdot u_{10}^{-2}$$

Der Reibungskoeffizient C_{10} charakterisiert die Reibung der bewegten Luft an einer bestimmten Unterlage. In erster Näherung sollte dieser Wert konstant sein. Das kann experimentell überprüft werden, wenn aus geeigneten Untersuchungen Windgeschwindigkeiten und Schubspannungsgeschwindigkeiten vorliegen. Experimentelle Untersuchungen zeigen dann dessen Variabilität mit der Stabilität der Luftschichtung über der entsprechenden Unterlage. Desweiteren gibt es feste und bewegliche Unterlagen. Über einer beweglichen Unterlage, Meer oder Wasser, variiert der Reibungskoeffizient selbst mit der Windgeschwindigkeit $C_{10}(u_{10})$, was in Verbindung zur Entwicklung der Wasserwellen an der Grenze zwischen Wasser und Luft gesetzt werden kann.

Bei der Vielzahl der Parametrisierungen $C_{10}(u_{10})$ ist es unmöglich zu entscheiden, welche man in welchem Zusammenhang verwenden sollte. Über die Güte der Parametrisierung entscheidet letztlich, wie gut es gelingt den Reibungskoeffizient abzuschätzen, wenn nur Windgeschwindigkeitsmessungen vorliegen.

Yelland u.a., 1996 stellen eine aus Satellitendaten abgeleitete Beziehung $C_{10}(u_{10})$ vor, die mit bodengebundenen Beobachtungen von Smith, 1988 übereinstimmt und deshalb hier in der folgenden einfachen Form verwendet werden soll:

$$C_{10} = (0,57 + 0,066 \cdot u_{10}) \cdot 10^{-3} \quad \text{im Bereich } 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq u_{10} \leq 25 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (1)$$

Für die ufernahe Zone des Meeres unterscheiden Hupfer und Raabe, 1994 zwischen niedrigen und hohen Windgeschwindigkeiten:

$$C_{10} = (0,8 + 0,08 \cdot u_{10}) \cdot 10^{-3} \quad \text{im Bereich } 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq u_{10} < 7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$C_{10} = (0,5 + 0,08 \cdot u_{10}) \cdot 10^{-3} \quad \text{im Bereich } 7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \leq u_{10} \leq 15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2)$$

Diese Unterscheidung wird auf eine Änderung der Reibungsverhältnisse zurückgeführt, die letztlich mit der Transformation des Seegangs im Flachwasserbereich der ufernahen Zone zusammenhängt (s. Raabe, 1991). Basis für die Ableitung dieser Zusammenhänge bildeten experimentelle Untersuchungen im Bereich der ufernahen Zone der Ostsee bei Zingst. An dieser Stelle wurden auch die in dem hier vorgestellten Experiment bestimmten Reibungskoeffizienten aus Windprofilen abgeleitet.

3. Ein standardisiertes Experiment zur Bestimmung von Reibungskoeffizienten

Während eines Praktikums an der Ostseeküste nahe Zingst ($54^{\circ} 26,6' \text{ N}$; $12^{\circ} 42,1' \text{ E}$) wurden unmittelbar am Ufer der Ostsee Windprofilmessungen durchgeführt. Aus den beobachteten Gradienten der Windgeschwindigkeit sollten auf der Grundlage üblicher Beziehungen die Reibungskoeffizienten der ufernahen Seeoberfläche bestimmt werden (Anwendung des logarithmischen Windgesetzes, Friedrich und Fritsch, 1996). Aufgrund des Standortes des Mastes repräsentieren die beobachteten Daten im Fall aufländiger und uferparalleler Windrichtungen Verhältnisse, wie sie für eine Wasserfläche typisch sind (s. Raabe u.a., 1987).

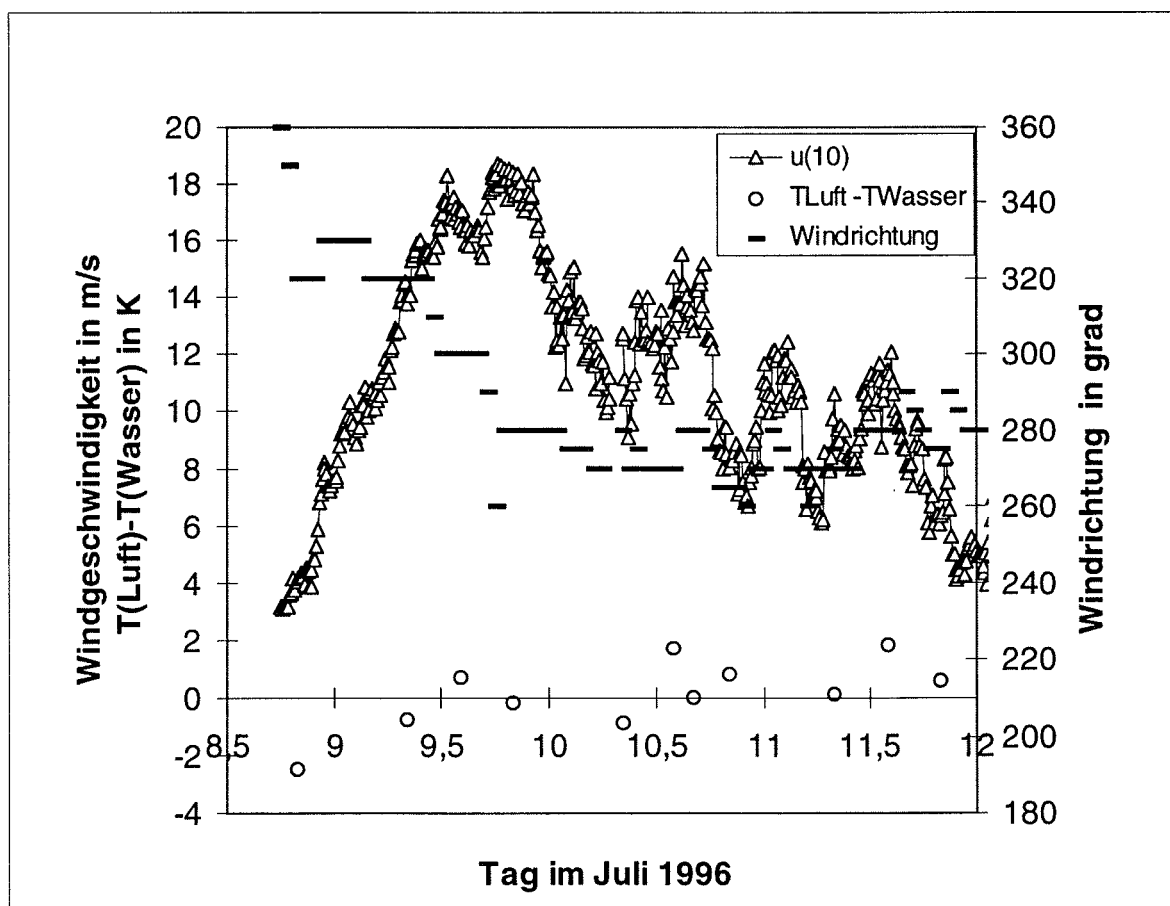


Abb. 1: Einige meteorologische Größen für die Zeit des Sturmes.

In der Zeit zwischen dem 08.07. und 12.07.96 wurde die Küste von Zingst von einem Sturm heimgesucht, der innerhalb weniger Stunden die Windgeschwindigkeit von 3m/s auf etwa 20m/s ansteigen ließ. Danach sanken die Windgeschwindigkeiten fast ebenso schnell wieder ab. Im Fall der Zunahme der Windgeschwindigkeit herrschten auflandige Windrichtungen vor (360° bis 280°), danach beim Abflauen drehte der Wind auf uferparallel (280° bis 260° , s. Abb.1).

Aus den Meßwerten der fünf zwischen einer Höhe von 1m bis 12m über Grund angeordneten Anemometer wurden zehn Minuten Mittelwerte der Windgeschwindigkeit gebildet. So ergab sich die seltene Gelegenheit, während des Sturmes einen Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und dem Reibungskoeffizienten im Bereich von 3 bis 20m/s abzuleiten. Das bietet auch die Möglichkeit, verschiedene vorliegende parametrisierte Beziehungen mit dieser einen Realisierung zu vergleichen. Die Höhen der Anemometer wurden korrigiert bezüglich des aktuellen Pegelstandes des Meeresspiegels. Die Anemometer wurden in einem Windkanal im Bereich zwischen 1m/s und 18m/s vor und nach dem Experiment geeicht, wobei die absolute Genauigkeit der Eichgeschwindigkeit im Windkanal 0,05m/s erreichte.

Die Stabilität der Schichtung zwischen Atmosphäre und Wasser wurde durch einfache Beobachtung von Lufttemperatur (in 2m Höhe) und Wassertemperatur (in 0,5m Tiefe) zu den meteorologischen Haupt- und Nebenterminen kontrolliert. Während der gesamten Beobachtungszeit überstiegen die Temperaturdifferenzen zwischen Wasser und Luft nicht 2K (s. Abb. 1), was zusammen mit den hohen Windgeschwindigkeiten auf nahezu neutrale Schichtung schließen läßt.

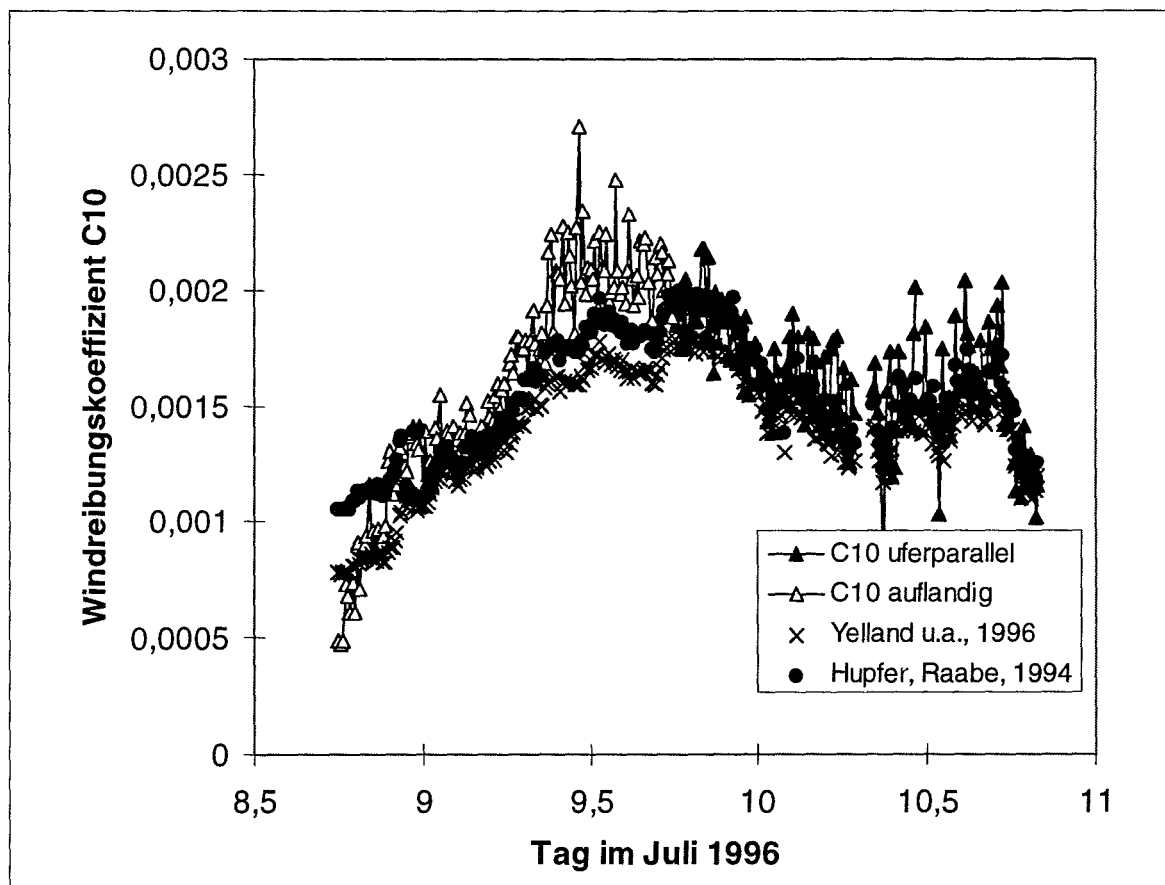


Abb.2: Experimentell bestimmte und über parametrisierte Beziehungen berechnete Reibungskoeffizienten während des Sturmes

4. Ergebnisse

Während des Sturmes nahm die Windgeschwindigkeit bei aufländiger Richtung vom Beginn der Beobachtungen an (18:00 am 08.07.96 MESZ) bis etwa 20:00 am 09.07.97 zu, danach drehte der Wind auf nahezu uferparallele Richtung und flaute bis zum Abend des 10.07.96 ab (Abb. 1).

Mißt man nur die Windgeschwindigkeiten und berechnet die Reibungskoeffizienten für diese Zeit über die parametrisierten Beziehungen Gl. (1) und (2), auch dann steht ein recht guter Wert für den Reibungskoeffizienten zur Verfügung (s. Abb. 2 und 3). Die Beziehung (1) nach Yelland u.a., 1996 stellt geringfügig geringere Reibungskoeffizienten bereit. Auffällig ist, daß selbst bei diesem einzelnen Sturm die Abnahme des Reibungskoeffizienten bei Übersteigen der Windgeschwindigkeit von etwa 7m/s beobachtet werden kann, wie das in den parametrisierten Beziehungen von Hupfer und Raabe, 1994 zum Ausdruck kommt (Gl. (2), s. Abb.3). Die experimentell bestimmten Reibungsparameter weichen besonders bei hohen Windgeschwindigkeiten stärker von denen über die parametrisierten Beziehungen berechneten ab. Das ist auf die Gestalt der Küste vor Zingst zurückzuführen. Bei aufländigem Wind spielt der Rückstau der Luft an dem Küstenschutzwald eine Rolle, in dessen Vorfeld der Windprofilmast aufgebaut wurde. Dieser Einfluß täuscht höhere Reibungskoeffizienten vor. Der Einfluß des Rückstaus verschwindet natürlich bei uferparalleler Windrichtung. Deshalb liegen die Reibungskoeffizienten, die bei uferparallelem Wind beobachtet werden niedriger als bei aufländigem Wind. Die parametrisierte Beziehung (2) stellt natürlich einen Zusammenhang für vom Rückstau der Luft unbeeinflusste Luftströmungen dar.

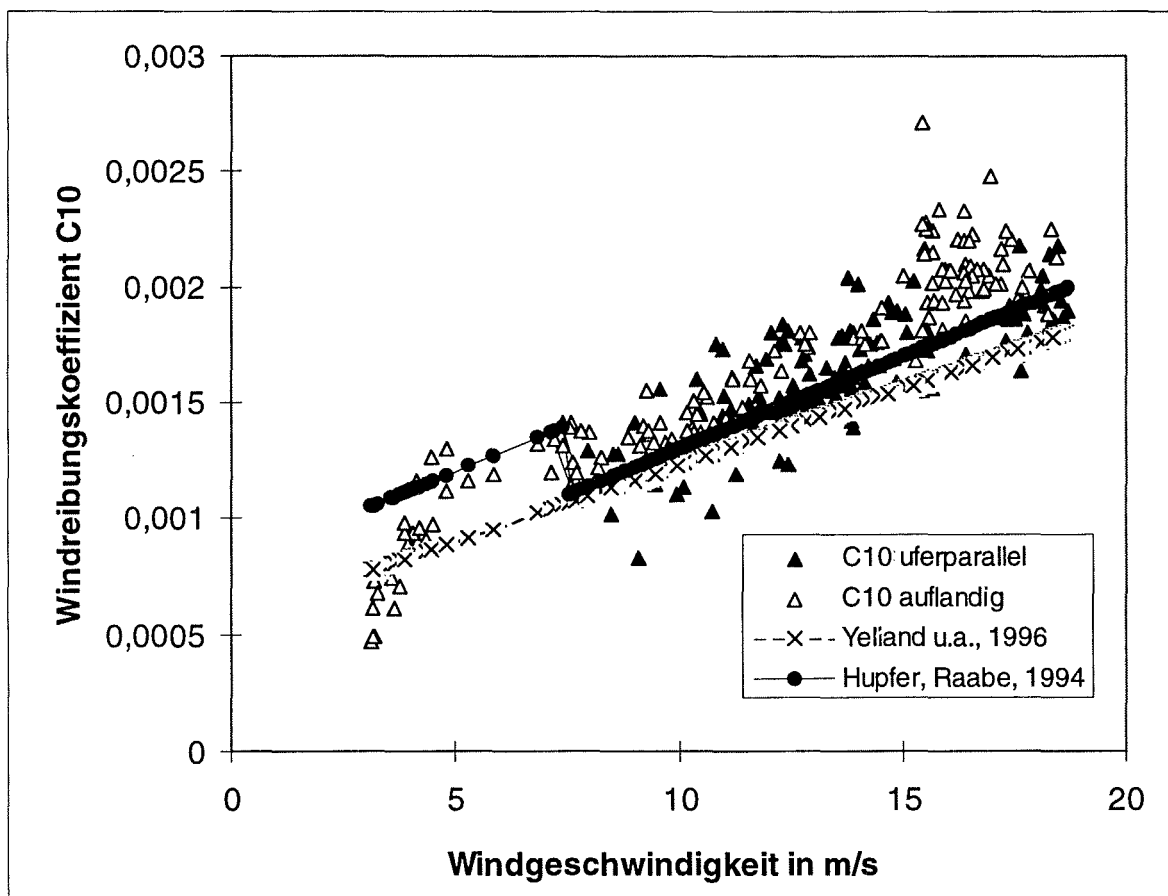


Abb.3: Die während des Sturmes beobachteten Reibungskoeffizienten im Vergleich zu nach parametrisierten Beziehungen berechneten Reibungskoeffizienten.

Deshalb fallen die damit für uferparallele Windrichtungen berechneten Werte besser mit den beobachteten zusammen. Es sei denn, die im Fall des auflandigen Windes beobachteten Windgeschwindigkeiten würden vor der Berechnung der Reibungskoeffizienten korrigiert (s. Raabe u.a., 1987).

Im einzelnen ergeben sich in einem Windgeschwindigkeitsbereich zwischen 4m/s und 20m/s die in Tab. 1 zusammengestellten relativen Abweichungen zwischen den beobachteten und den über die parametrisieren Beziehungen berechneten Werten.

$\frac{C_{10,\text{auflandig beo.}}}{C_{10\text{parametrisiert}}}$ nach	$\frac{C_{10,\text{auflandig beo.}}}{C_{10\text{parametrisiert}}}$ nach	$\frac{C_{10,\text{uferparallel beo.}}}{C_{10\text{parametrisiert}}}$ nach	$\frac{C_{10,\text{uferparallel beo.}}}{C_{10\text{parametrisiert}}}$ nach
Hupfer, Raabe, 1994	Yelland u.a., 1996	Hupfer Raabe, 1994	Yelland u.a. 1996
1,09±0,09	1,20±0,05	1,03±0,04	1,10±0,02

Tab. 1.: Vergleich zwischen beobachteten und berechneten Reibungskoeffizienten unterschieden nach auflandiger und uferparalleler Windrichtung

5. Schlußfolgerung

Die hier vorgestellten Beobachtungen von Reibungskoeffizienten während eines Sturmes an der Küste der Ostsee ermöglichen eine Überprüfung vorliegender parametrisierter Beziehungen zur Bestimmung des Impulsaustausches. Während dieses Experimentes konnten innerhalb kürzester Zeit Reibungskoeffizienten im Bereich zwischen 4 und 20m/s Windgeschwindigkeit beobachtet werden. Der turbulente Impulsaustausch zwischen bewegter Luft und Unterlage ist eine Größe, die in prognostischen Atmosphärenmodellen immer auf bestimmte parametrisierte Beziehungen, d.h. ursprünglich experimentell abgeleitete Beziehungen, zurückgreift. Die heute für Wasserflächen verwendeten parametrisierten Beziehungen zwischen Windgeschwindigkeit und Reibungskoeffizient können mit weniger als 20% Abweichung die aktuellen Reibungskoeffizienten festlegen, auch wenn die parametrisierten Zusammenhänge nicht für eine spezielle Region abgeleitet wurden (Gl.(1)).

Im Fall der hier ausgewerteten Situation reduziert sich der Unterschied zwischen beobachteten und einer aus früheren Beobachtungen speziell für dieses Gebiet abgeleiteten parametrisierten Beziehung auf weniger als 10%.

Literatur:

Friedrich, K.; H. Fritsch, 1996: Praktikumsbericht Zingst Juli 1996, Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig 35S. (unveröff.).

Garrat, J.R., 1977: Review of Drag Coefficients over Oceans and Continents. Month. Weather Rev. 105, 915-929.

Hasse, L., 1993: Observation of air sea fluxes. In Raschke, E.; D. Jacob (eds.): Energy and Water Cycles in the Climate System. NATO ASI Series Dordrecht I,5, 263-293.

Hupfer, P.; A. Raabe, 1994: Meteorological transition between land and sea in the microscale. Meteorol. Zeitschr. N.F. 3, 100-103.

Isemer, H.J.; L. Hasse, 1987: The Bunker Climate atlas of the North Atlantic Ocean. Vol. 2: Air-sea interaction. Springer Verlag , Berlin 252p.

Panin, G.N., 1985: Heat and mass exchange between the water and the atmosphere in the nature. Moscow: Nauka, 206p. (in Russian).

Raabe, A., 1991: Zur Wechselwirkung von Atmosphäre und Meer sowie Atmosphäre und Land in unmittelbarer Nähe einer Küste. Geophys. Veröff. Univ. Leipzig, 4, 57-73

Raabe, A.; G.N.Panin, H.J.Schönfeldt; 1987: Die Variabilität des Windreibungskoeffizienten über der See in der Nähe einer Küste mit steil ansteigendem Ufer. Zeitschr. F. Meteorol. 37,3, 137-147.

Smith, S.D., 1988: Coefficients for sea surface wind stress. J. Geophys. Res. 93, 15467-15472.

Yelland, u.a., 1996: Zitiert nach: Annual Report 1996 of the South Hampton Oceanogr. Centre, p.23.

Adresse der Autoren:

Dr. Armin Raabe, Katja Friedrich, Holger Fritsch
Universität Leipzig
Institut für Meteorologie
Stephanstr. 3
D-04103 Leipzig