

# Ozean/Atmosphären - Wechselwirkung und N<sub>2</sub>O Emissionen in der Küstenauftriebsregion vor Mauretanien

Diplomarbeit  
von  
Franziska Wittke



MATHEMATISCH NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT DER  
CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL  
LEIBNIZINSTITUT FÜR MEERESWISSENSCHAFTEN IFM-GEOMAR  
-MARITIME METEOROLOGIE-  
SEPTEMBER 2009



Gedanken für Unterwegs

Rätselhaft verworren  
erscheinen all die Wege,  
die mir täglich begegnen.

All die Gedanken,  
die an mir vorüberziehen,  
schicken mich weiter...  
Keiner weiß genau wohin!

Und dennoch verfolgt  
mich dieser eine Gedanke,  
nach einem Ziel, einem Sinn!

Bin ich selbst dieser eine Gedanke,  
der immer dann vorüberzieht,  
wenn ich, an mich,  
an meinen Weg, denke?

Bin ich selbst nur ein Gedanke unter vielen?

Immer Derselbe?

Immer ein Anderer?

Bin ich überhaupt  
oder bin ich immer noch unterwegs zu mir?

Nadine Wittke



## Zusammenfassung

Aufgrund von stetig küstenparallelen Winden vor der Küste von Mauretanien kommt es zum Phänomen des Küstenauftriebs, der abhängig von der Region saisonal oder ganzjährig sein kann. Diese Auftriebsregion stellt ein "Hot Spot" für die Emission von Distickstoffmonoxid ( $N_2O$ ) dar. Mit Hilfe eines einfachen windgetriebenen Modells basierend auf der Ekman-Theorie wird der Fluss von  $N_2O$  während dieses Ereignisses berechnet. Dafür werden zwei verschiedene Winddatensätze verwendet, zum einen von dem Modell des National Center of Environmental Prediction (NCEP), und zum anderen vom Satelliten QuikSCAT. Beide unterscheiden sich in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung. Mit beiden Winddatensätzen werden mit dem Modell von *Nevison et al.* (2004) die  $N_2O$ -Emissionen und die Konzentrationen von  $N_2O$  an der Oberfläche berechnet und miteinander verglichen. Ebenfalls werden beide Winddaten gegenübergestellt. Hier ist augenfällig, dass die Winddaten von NCEP sehr viel größer sind als die von QuikSCAT und damit auch die berechneten Flüsse von  $N_2O$ . Darüber hinaus weisen beide Modelldatensätze, im Vergleich mit den insitu-Flüssen, die in dieser Arbeit als 100 % angesehen werden, eine schlechte Korrelation auf. Exemplarisch wird mit Hilfe des Modells mit beiden Winddatensätzen die Flüsse für das Jahr 2008 berechnet und miteinander verglichen. Diese Analyse liegt folgende Auftriebsbedingung zu Grunde; die Windgeschwindigkeit darf drei Tage über 4,6 m/s nicht unterschreiten. Beide Ergebnisse zeigen die nach Süden einsetzende Saisonalität des Auftriebs. Auch hier ist zu sehen, dass die Emissionen von NCEP größer sind als die von QuikSCAT. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung von QuikSCAT wird insbesondere der Übergang von jährlichem zu saisonellem Auftrieb sichtbar. Für die Berechnung der Unsicherheiten der Flüsse wird die Fehlerfortpflanzung und die sogenannte Monte-Carlo-Simulation verwendet, weil beide ihre Fehlerquellen aufweisen, werden zwei Methoden zum tragen kommen. Die Fehler der Flüsse berechnet mit den Winddatensätzen NCEP und QuikSCAT sind dabei sehr hoch. Die mit der Fehlerfortpflanzung ermittelten Unsicherheit sind in diesem Zusammenhang größer als die berechneten mit der Monte-Carlo-Simulation. Letzteres weist auch auf, dass die Gleichungen auf die das Modell beruht nicht linear sind. Um in dieser Analyse wichtige Effekte wie Strömung und Schichtung zu berücksichtigen, wird mit einem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell ein Korrekturfaktor abgeschätzt,

der die Vertikalgeschwindigkeit, ermittelt mit der Ekman-Theorie, um einem Faktor von 0,6 anpasst. Mit Hilfe einer allgemeinen Advektionsgleichung und der Daten aus dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphärenmodells wird die Größe der Emissionen abgeschätzt, sowie der Anwendungsbereich des Modells geprüft. Es zeigt sich schließlich, dass die Größe der Werte ermittelt für einen Punkt mit denen berechnet vom *Nevison et al. (2004)* Modell übereinstimmt. Außerdem wird deutlich, dass das Modell von *Nevison et al. (2004)* an der Küste für einen ausgedehnten küstennahen Bereich anwendbar ist, jedoch nicht für einen Messpunkt.

## Abstract

Due to continuous alongshore winds off Mauritania, there is the phenomenon of coastal upwelling, which depends on the region if it is seasonal or annual. This upwelling region is a “hot spot“ for the fluxes of nitrous oxide. With the help of a simple wind-driven model by *Nevison et al.* (2004) based on the Ekman-Theory the flux of  $N_2O$  is calculated during the incident. Two different wind data sets are used, firstly by the Model National Center of Environmental Prediction (NCEP) and the other from the QuikSCAT satellite. Both differ in their spatial and temporal resolution. With this model, the calculated  $N_2O$ -fluxes and concentrations at the surface and the wind data are compared. It is striking that the wind data from NCEP are much greater than that of QuikSCAT and thus the calculated fluxes of  $N_2O$ . Both model data show, compared with the insitu-fluxes which is considered in this work as 100 %, a poor correlation, but the magnitudes generally agree. For the example from 2008 annual fluxes are calculated for the two wind records and are compared. The upwelling condition is that the wind speed not falls below 4,6 m/s for three days. Both results show the seasonal upwelling coming further south. Here also the emissions from NCEP are larger than those of QuikSCAT. Because of the higher spatial resolution of QuikSCAT, the transition from annual to seasonal upwelling is visible. The model and the calculated emissions are applied by statistical methods. For the calculation of the uncertainties of the fluxes, the error propagation and the so-called Monte-Carlo-Simulation is applied. Since both have their sources of error, two methods are used. The calculated error of the fluxes with the NCEP and QuikSCAT wind data sets are very high, while the uncertainties are determined using the error propagation is greater than in the Monte-Carlo-Simulation. The latter also shows that the equations of the model from *Nevison et al.* (2004) is based are not linear. Furthermore estimated with a high-resolution ocean/atmospheric model, a correction factor of the vertical velocity, calculated using the Ekman-Theory in order to adapt a factor of 0.6 to take into account effects such as stratification and currents. With the help of a general advection equation and the data from the high-resolution ocean/atmosphere model is to estimate the size of the emissions, and examine the scope of the model. It turns out that the size of the calculated values with those calculated for a point of match with the results from *Nevison et al.* (2004)

model. It also demonstrates that the model of *Nevison et al.* (2004) on the coast for a vast coastal area is applicable, but not for one point.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Distickstoffmonoxid . . . . .	2
1.2 Distickstoffmonoxid in der Atmosphäre . . . . .	2
1.2.1 Der direkte und indirekte Einfluss von N <sub>2</sub> O auf das Klimageschehen . . . . .	3
1.2.2 Verteilung des N <sub>2</sub> O Mischungsverhältnisses . . . . .	4
1.3 Quellen von Distickstoffmonoxid . . . . .	5
1.4 Der Ozean als Quelle von Distickstoffmonoxid . . . . .	5
1.4.1 Denitrifikation . . . . .	6
1.4.2 Nitrifikation . . . . .	7
1.4.3 N <sub>2</sub> O-Verteilung im Ozean . . . . .	7
1.5 Der Tropische Nordost-Atlantik . . . . .	8
1.5.1 Hydrographie . . . . .	9
1.5.2 Küstenauftrieb . . . . .	10
1.5.3 Saisonalität des Auftriebes . . . . .	11
<b>2 Methode und Daten</b>	<b>15</b>
2.1 Methode . . . . .	15
2.1.1 Modellbeschreibung . . . . .	16
2.1.2 Berechnung der Insitu-Messung . . . . .	18
2.1.3 Der Transferkoeffizient . . . . .	18
2.2 Daten . . . . .	20
2.2.1 Distickstoffmonoxid . . . . .	20
2.2.2 Winddaten . . . . .	21
2.2.3 NCEP . . . . .	21
2.2.4 QuikSCAT . . . . .	22
2.2.5 Windwerte vom Schiff aus gemessen (Schiffswinde) . . . . .	24

<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>27</b>
3.1	Berechnung und Darstellung der Flüsse vor Mauretanien . . . . .	27
3.1.1	Berechnung der Flüsse mit NCEP . . . . .	27
3.1.2	Berechnung der Flüsse mit QuikSCAT . . . . .	29
3.1.3	Vergleich der berechneten Flüsse mit NCEP und mit QuikSCAT	31
3.2	Vergleich der berechneten Flüsse mit den Winddatensätzen NCEP und QuikSCAT mit der insitu-Messungen . . . . .	34
3.2.1	Vergleich der berechneten Flüsse mit NCEP und der insitu- Messungen . . . . .	35
3.2.2	Vergleich der berechneten Flüsse mit QuikSCAT und der insitu-Messungen . . . . .	37
3.3	Berechnung der Flüsse extrapoliert auf ein Jahr . . . . .	39
3.3.1	Berechnung der Jahresflüsse mit NCEP . . . . .	40
3.3.2	Berechnung der Jahresflüsse mit QuikSCAT . . . . .	42
3.3.3	Vergleich der Jahresflüsse berechnet mit NCEP und mit QS .	44
<b>4</b>	<b>Fehlerbetrachtung</b>	<b>55</b>
4.1	Berechnung der Unsicherheiten mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung . . . . .	55
4.2	Ermittlung eines Korrekturfaktors für die berechneten Ekman-Vertikalgeschwindigkeiten . . . . .	58
4.3	Berechnung der Unsicherheiten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation . . . . .	61
4.4	Prüfung der Anwendbarkeit des <i>Nevison et al.</i> (2004) Modells und Abschätzung der Größe der berechneten Flüsse . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Schlussbetrachtung</b>	<b>71</b>
	<b>Anhang</b>	<b>75</b>
	<b>Literatur</b>	<b>77</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>81</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Danksagung</b>	<b>87</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>89</b>

# 1 Einleitung

Der  $\text{N}_2\text{O}$ -Gehalt in der Atmosphäre ist aufgrund von anthropogener Einflüsse in den letzten 80 Jahren stetig an und erreichte im Jahr 2005 ein Mischungsverhältnis von 319 ppb. Das beeinflusst das Klima der Erde, da Distickstoffmonoxid ein Treibhausgas (direkt) ist und in der Stratosphäre ozonschädigend (indirekt) wirkt. In der Natur wird Lachgas hauptsächlich durch bakterielle Abbauprozesse gebildet, dabei stellt der Ozean eine erhebliche Quelle von  $\text{N}_2\text{O}$  dar. Ein besonderer "Hot Spot" sind in diesem Kontext Küstenauftriebsregionen. Aufgrund von küstenparallelen Winden (z.B. Passate), findet ein Massentransport von oberflächennahen Wassermassen statt (Ekman-Theorie). Dies hat zur Folge, dass kälteres, nährstoffreichereres und  $\text{N}_2\text{O}$ -reichereres Tiefenwasser aufsteigt und mit der Atmosphäre wechselwirkt. Bedingt durch jährliche Schwankungen der Windgeschwindigkeiten kommt es in diesem Gebiet zum Einsetzen einer Saisonalität des Küstenauftriebs. In dieser Arbeit sollen nun die Flüsse von  $\text{N}_2\text{O}$  für die Küstenauftriebsregion vor Mauretaniien (Nordwestafrika) mit Hilfe eines windgetriebenen Modells berechnet werden. Diesem liegt die Ekman-Theorie, der treibende Mechanismus für Auftrieb, zu Grunde. Wo *Nevison et al.* (2004) in ihrer Publikation dieses Modell auf die Westküsten aller Kontinente angewandt hat, wird es in dieser Arbeit speziell für die Mauretanische Küste eingesetzt. Dieses Modell bietet die Möglichkeit die Emissionen eines beliebigen Jahres zu berechnen in Abhängigkeit der vorherrschenden Windgeschwindigkeiten. Ziel dieser Arbeit ist es die Methode von *Nevison et al.* (2004) zu evaluieren und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Dafür werden zwei verschiedene Winddatensätze, der Vergleich zu insitu-Messungen und die Abschätzung der Unsicherheiten der Emissionen mit verschiedenen Fehlerberechnungen zur Hilfe genommen. Desweiteren wird der Anwendungsbereich des Modells überprüft. Zu dem werden Einzelemissionen berechnet sowie auf ein Jahr extrapoliert. Es gilt auch die Frage zu klären, wie viel  $\text{N}_2\text{O}$  innerhalb eines Jahres emittiert werden, um abschätzen zu können, in wie weit Küstenauftriebsregionen eine Quelle von  $\text{N}_2\text{O}$  für die Atmosphäre darstellen und welchen Einfluss die oben beschriebene Saisonalität auf die Größe der Emissionen hat.

## 1.1 Distickstoffmonoxid

Distickstoffmonoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), auch Lachgas genannt, wurde 1772 von Joseph Priestley entdeckt und fand zuerst Anwendung als Narkosemittel in der Zahnmedizin. Heutzutage wird dieses farblose Gas in verschiedenen Bereichen genutzt, beispielsweise in der Nahrungsmitteltechnik als Treibgas in Schlagsahne oder beim Autotuning. Lachgas weist eine asymmetrische lineare Struktur auf, hat ein Molekulargewicht von 44,0125 g/mol und einen Siedepunkt von  $-88,5^\circ\text{C}$ . Die Abbildung 1.1 zeigt die Strukturformel von  $\text{N}_2\text{O}$  und weist auf das Lachgas in zwei tautomere Grenzformen vorliegt (*Greenwood and Earnshaw (1984); Trogler (1999)*).



Abbildung 1.1: Zeigt die Strukturformel von Distickstoffmonoxid (*wikipedia, 2009*).

## 1.2 Distickstoffmonoxid in der Atmosphäre

Seit der Entdeckung 1938 (*Adel, 1938*) hat sich das atmosphärische Mischungsverhältnis von Lachgas deutlich verändert. Die Abbildung 1.2 zeigt, dass vor der Industrialisierung das  $\text{N}_2\text{O}$  Mischungsverhältnis 270 ppb (*parts per billion*) entsprach. Nach dieser Zeit stieg das Mischungsverhältnis von  $\text{N}_2\text{O}$  in der Atmosphäre deutlich an und erreichte mit einem nahezu linearen Anstieg von 0,8 ppb/Jahr (1999-2000) ein Mischungsverhältnis von 319 ppb im Jahr 2005. Die Auswertung von Eisbohrkernen zeigt, dass die  $\text{N}_2\text{O}$  Mischungsverhältnis während der letzten 11.500 Jahre bis zur Industrialisierung um weniger als 10 ppb schwankte. Der Anstieg ist hauptsächlich auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen, insbesondere durch intensiver Landwirtschaft, sowie die Änderung der Landnutzung (*IPCC, 2007*).

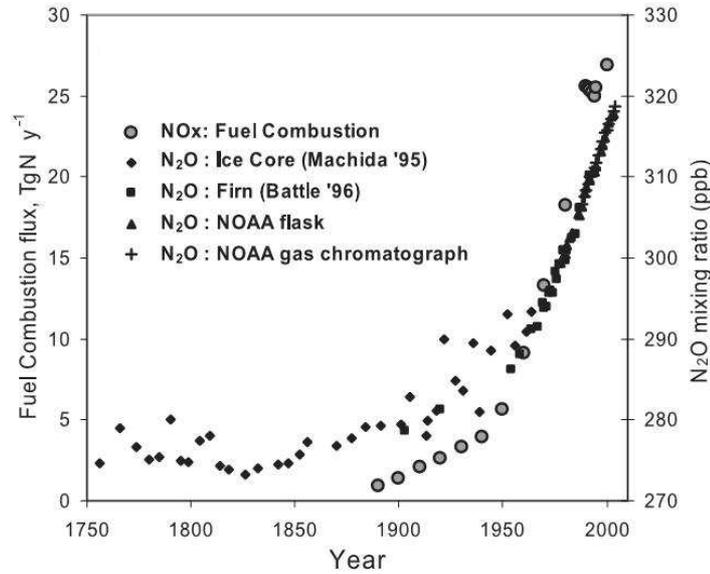


Abbildung 1.2: Darstellung der Änderung der N<sub>2</sub>O und NO<sub>x</sub> Mischungsverhältnisse in ppb seit 1750 (*IPCC*, 2007).

### 1.2.1 Der direkte und indirekte Einfluss von N<sub>2</sub>O auf das Klimageschehen

N<sub>2</sub>O ist ein wichtiges Spurengas in der Atmosphäre und wirkt direkt und indirekt auf das Klimageschehen der Erde. Spurengase wie Lachgas absorbieren die langwellige, terrestrische Strahlung und emittieren die Infrarotstrahlung entsprechend ihrer Temperatur. Der Teil, der wieder zur Erdoberfläche zurück kommt, wird als atmosphärische Gegenstrahlung bezeichnet. Diese zusätzliche Erwärmung ist als natürlicher Treibhauseffekt bekannt und sorgt für eine Erhöhung der globalen Mitteltemperatur auf 15 °C. Die Zunahme durch anthropogene Emissionen von Treibhausgasen führt zu einer Erhöhung dieser globalen Mitteltemperatur. Das Absorptionsspektrum von N<sub>2</sub>O liegt im Bereich des atmosphärischen Fensters, ein Wellenlängenintervall des elektromagnetischen Strahlungsspektrums für welches die Atmosphäre der Erde durchlässig ist, was zur Folge hat, dass sich die globale Mitteltemperatur weiter erhöht (globale Erwärmung). Eine ähnliche Wirkung hat Kohlenstoffdioxid, jedoch liegt die Treibhauswirksamkeit von N<sub>2</sub>O 298 Mal höher pro Molekül (in einem Zeitfenster von 100 Jahren) (*IPCC*, 2007).

### 1.2.2 Verteilung des $N_2O$ Mischungsverhältnisses

Lachgas ist aufgrund seiner Halbwertszeit von 114-120 Jahren (*Prather et al.*, 2001) in der Troposphäre gut durchmischt (*Nevison et al.* (2007); *Ravishankara A. R.* (2009)) und weist in diesem Abschnitt der Atmosphäre keinen vertikalen Gradienten auf (Abbildung 1.3). Sie zeigt die Höhenverteilung der atmosphärischen  $N_2O$ -

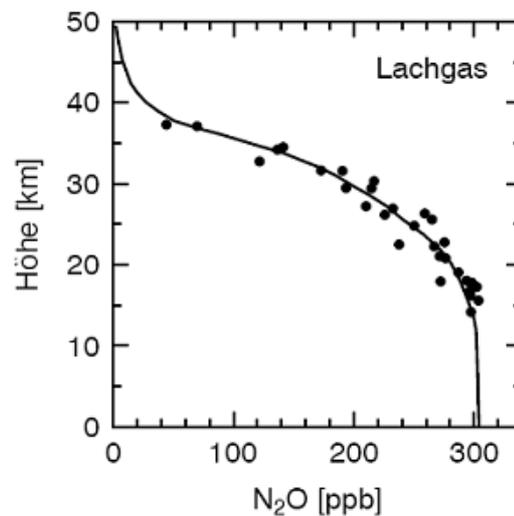


Abbildung 1.3: Darstellung eines vertikalen Profils der  $N_2O$ -Konzentration in der Atmosphäre in ppb aus dem Jahr 1993 (*IAC*, 1993).

Konzentration in ppb im Jahr 1993. In der Meridionalen ist der  $N_2O$ -Gradient schwach ausgebildet, ansteigend von der südlichen zur nördlichen Hemisphäre. Der Grund dafür sind die vermehrt im Norden vorhandenen Quellen von  $N_2O$ . In den Höhen oberhalb der Tropopause (ca. 11 km) ist ein Rückgang des  $N_2O$  Mischungsverhältnisses zu verzeichnen. In der Stratosphäre wird durch energiereiche UV - Strahlung Distickstoffmonoxid photochemisch in Stickoxiden,  $NO_x$  ( $= NO_2 + NO$ ), gespalten. Die kurzlebigen Stickstoffmonoxidradikale reagieren schnell weiter und greifen in den Ozonzyklus ein (*Crutzen* (1970); *Crutzen and Schmailzl* (1983)). Aus diesem Grund hat  $N_2O$  auch einen indirekten Einfluss auf das Klima der Erde. Neueste Studien belegen, dass die im 21. Jahrhundert emittierte, dominierende Substanz, welche Ozon abbaut,  $N_2O$  ist (*Ravishankara A. R.*, 2009). Die Stratosphäre stellt damit die bis jetzt einzige signifikante Senke von atmosphärischem Lachgas dar.

### 1.3 Quellen von Distickstoffmonoxid

Die größten natürlichen Quellen von  $N_2O$  sind die Emissionen von Böden mit natürlicher Vegetation (z.B. Sümpfe und Moore), die Ozeane und die Flüsse, Ästuar- und Küstengebiete. Das Diagramm 1.4 zeigt die prozentuale Verteilung dieser Quellen aus dem *IPCC* (2007). Landwirtschaftlich genutzte Böden und die Verwendung von künstlichem Dünger, die Verbrennung von Biomasse oder industrielle Prozesse machen die anthropogene Herkunft von Lachgas aus. Der Ozean mit Flüssen, Ästuaren und Küstengebiete, bei denen eine Emission von  $\sim 10\%$  abgeschätzt wird, stellt zu  $\sim 1/3$  die Gesamtquelle von  $N_2O$  dar.

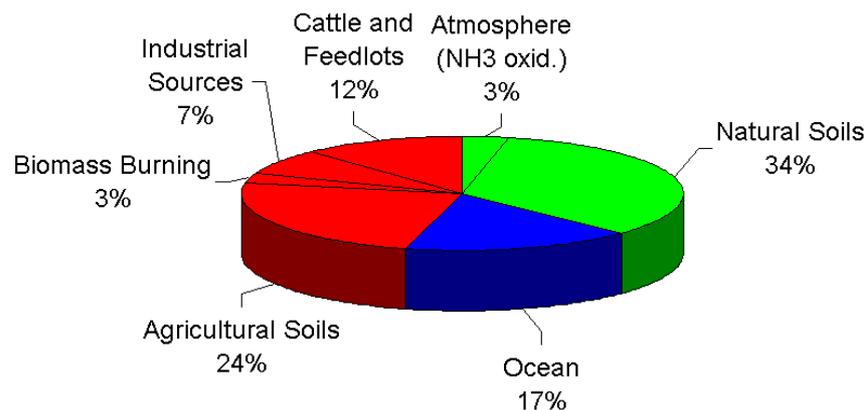


Abbildung 1.4: Darstellung der Gesamtemissionen von  $N_2O$  in Prozent aus dem *IPCC* (2007), in grün die natürlichen Quellen (ohne Ozean), in rot die anthropogenen und in blau die ozeanischen Quellen.

### 1.4 Der Ozean als Quelle von Distickstoffmonoxid

Distickstoffmonoxid wird hauptsächlich durch mikrobiologische Prozesse gebildet, der Denitrifikation und der Nitrifikation. Abbildung 1.5 zeigt schematisch einen

Überblick über die zwei im Ozean ablaufenden Prozesse, in denen  $N_2O$  gebildet werden kann. Beide Reaktionen fungieren gleichzeitig als Quelle und Senke von  $N_2O$  in Abhängigkeit vom Sauerstoff. Sie sind dominierend für die Bildung von Lachgas im Ozean (*Bange, 2008*).

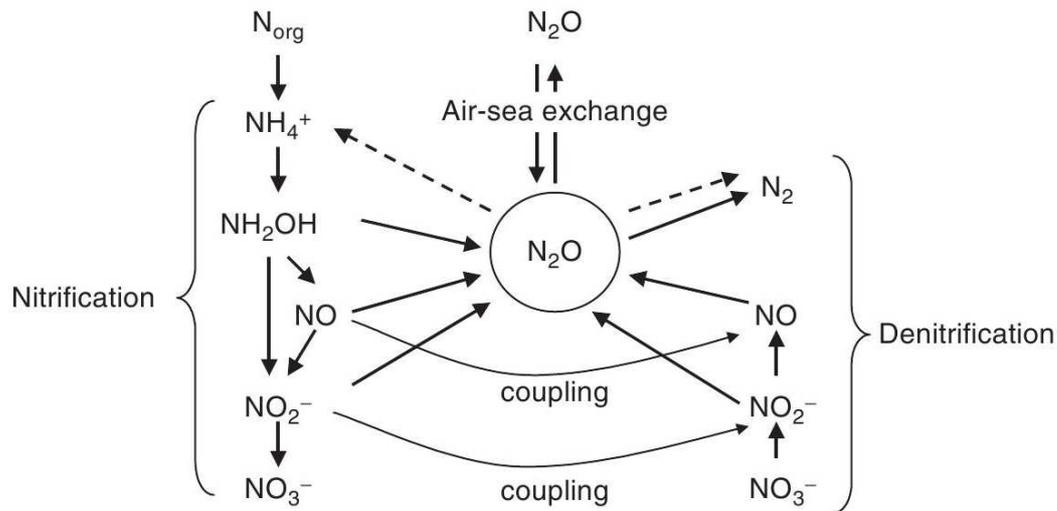
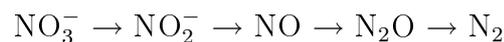


Abbildung 1.5: Überblick über die Prozesse, welche die  $N_2O$  Verteilung im Ozean beeinflussen. Die gestrichelten Pfeile induzieren die  $N_2O$  Reduktion während der Stickstofffixierung (*Bange, 2008*).

### 1.4.1 Denitrifikation

Die Denitrifikation ist die Reduktion von Nitrat zu molekularem Stickstoff. Bei dieser Reaktionskette stellt  $N_2O$  ein Zwischenprodukt dar.

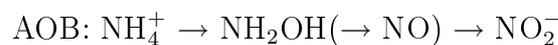


Denitrifizierer sind zumeist anoxische Bakterien, die Nitrat reduzieren, wenn Sauerstoff limitiert ist. Aus diesem Grund läuft der Prozess der Denitrifikation vermehrt unter suboxischen ( $0 < O_2 < 2-10 \mu\text{mol/L}$ ) Bedingungen ab (*Codispoti et al., 2005*). Bei anoxischen ( $O_2 = 0 \mu\text{mol/L}$ ) Bedingungen wird  $N_2O$  verbraucht. Unter oxischen

( $O_2 > 10 \mu\text{mol/L}$ ) Bedingungen findet wiederum keine Denitrifikation statt (*Bange, 2008*).

### 1.4.2 Nitrifikation

Nitrifikation ist wie die Denitrifikation ein Teil des Stickstoffkreislaufes und stellt die Oxidation von Ammoniak zu Nitrat über Hydroxylamin dar. Autotrophe Nitrifikation läuft in zwei Teilprozessen ab; zum einen durch die Ammoniak - oxidierenden Bakterien (AOB, wie zum Beispiel *Nitrosomonas*) und zum anderen durch die Nitrit - oxidierenden Bakterien (NOB, zum Beispiel *Nitrobacter*). Bei der Nitrifikation entsteht  $N_2O$  als Nebenprodukt (*Bange, 2008*).



### 1.4.3 $N_2O$ -Verteilung im Ozean

Um ein Verständnis für die Tiefenverteilung von  $N_2O$  für die Region des Tropischen Nord-Atlantiks zu erlangen, wird die Grafik 1.6 beschrieben. Diese zeigt den Verlauf der Kurve von geringe  $N_2O$ -Konzentrationen an der Oberfläche, die in ein Maximum in ca. 300 m übergehen und mit der Tiefe wieder abnehmen. Die Sauerstoffverteilung weist im Bereich des  $N_2O$  Maximums ein Minimum auf.

In der Abbildung 1.7 ist hingegen die weltweite Verteilung von  $N_2O$  Anomalien in der Wasseroberfläche ( $\Delta pN_2O = pN_2O_{\text{Gemessen}} - pN_2O_{\text{Gleichgewicht}}$  in  $\text{natm}$ ) veranschaulicht. Die positive Werte von  $\Delta pN_2O$  weisen in diesem Zusammenhang auf eine Übersättigung und damit auf eine Quelle vom Ozean in die Atmosphäre hin und vice versa. Negative  $\Delta pN_2O$  Werte markieren eine Untersättigung. Dies bedeutet, dass der Ozean eine Senke von  $N_2O$  ist.

Zu erkennen ist;

- dass der größte Teil des offenen Ozeans nahezu im Gleichgewicht mit der Atmosphäre ist.
- eine Übersättigung und damit erhöhte  $N_2O$  Werte im Ozean als in der Atmosphäre im Bereich des äquatorialen Auftriebsgebietes (Quelle).

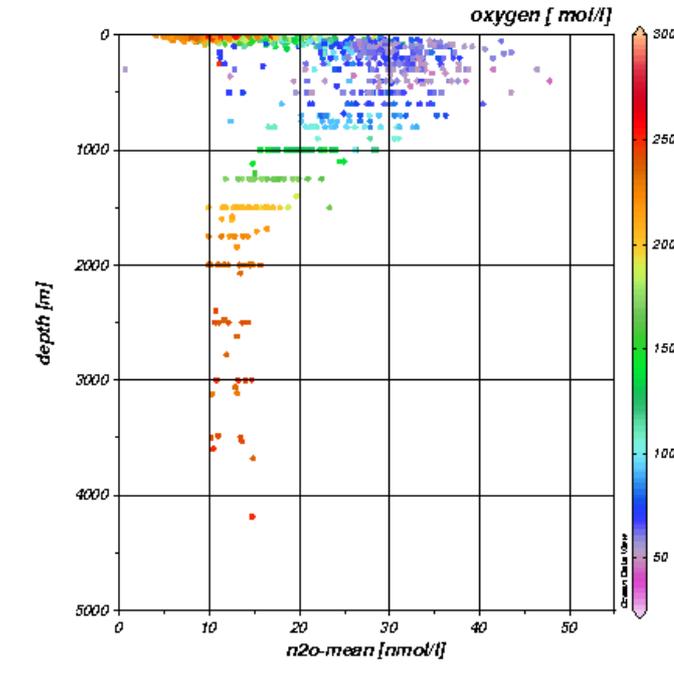


Abbildung 1.6: Tiefenverteilung der  $\text{N}_2\text{O}$  Konzentration in  $\text{nmol/L}$  sowie die Sauerstoff Konzentration in  $\text{mol/L}$  im Tropischen Nord-Atlantik.

- eine Übersättigung entlang der Küstenauftriebsregionen, wie vor der Küste von Nord- und Mittelamerika, Nordwestafrika, Peru oder im nordwestlichen Indischen Ozeans (Quelle).
- eine Untersättigung und somit geringere  $\text{N}_2\text{O}$  Werte im Ozean als in der Atmosphäre im Bereich des Nordatlantiks (Senke).

## 1.5 Der Tropische Nordost-Atlantik

Im nächsten Abschnitt wird die Küstenregion vor Mauretanien näher beschrieben, aus der die untersuchten Daten dieser Arbeit stammen. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf das vorherrschende Phänomän des Küstenauftriebs gelegt, dass aufgrund von jährlichen Schwankungen der Windgeschwindigkeiten eine Saisonalität aufweist, die die Größe der Emissionen beeinflusst. Dadurch wird zum einen ein besseres Verständnis der hydrographischen Besonderheit dieser Region erlangt und zum anderen dargelegt, warum diese Region eine Quelle von  $\text{N}_2\text{O}$  ist.

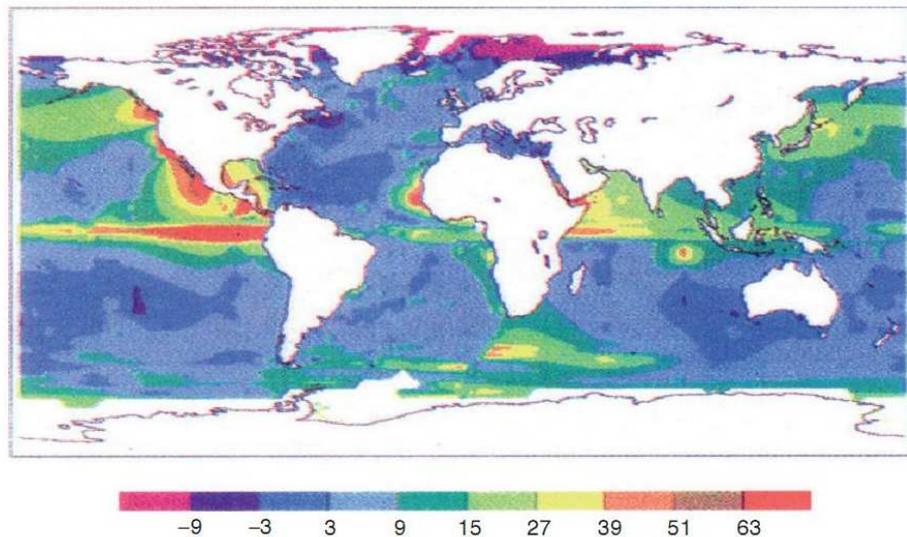


Abbildung 1.7: Zeigt eine Karte von  $\Delta pN_2O$  in  $\text{natm}$  in der Wasseroberfläche der Weltozeane (Nevison *et al.*, 1995).

### 1.5.1 Hydrographie

Der Tropische Nordost-Atlantik ist eine Region mit sehr unterschiedlichen hydrographischen Eigenschaften. Zum einen sind die Kanaren- und der Nordäquatoriale Strom, die den Ostteil der Subtropen Wirbel beschreiben, nährstoffarm und tragen daher wenig zur Primärproduktion bei. Zum anderen die vor der Westküste von Afrika aufgetriebenen nährstoffreichen Wassermassen, die eine hohe biologische Produktivität aufweisen (Mittelstaedt, 1983). Der südwestlich gerichtete Kanarenstrom fließt entlang des nordafrikanischen Kontinents von der Straße von Gibraltar bis zu Cape Blanc. Südlich von Cape Blanc löst er sich von der Küste und geht in den Nordäquatorialen Strom über. Die Abbildung 1.8 zeigt die Oberflächenzirkulation im tropischen Nordost Atlantik im Sommer und im Winter. Solange die Nordost Passate stark genug ausgeprägt sind, herrscht ein südwärtsige Strömung über dem Schelf, der ist mit Küstenauftrieb verbunden. Wenn sich die ITCZ (Innertropische Konvergenz Zone) im Frühling nach Norden verschiebt, dreht sich der südwärts gerichtete Fluss über dem Schelf in einen nordwärtigen um. Dieser gelangt im Sommer, wenn die ITCZ ihren nördlichsten Position erreicht hat, bis Cap Blanc ( $21^\circ\text{N}$ ) gelangt. Ein Grund für diesen Wechsel ist ein Abschwächen der Nordost Passate. Diese

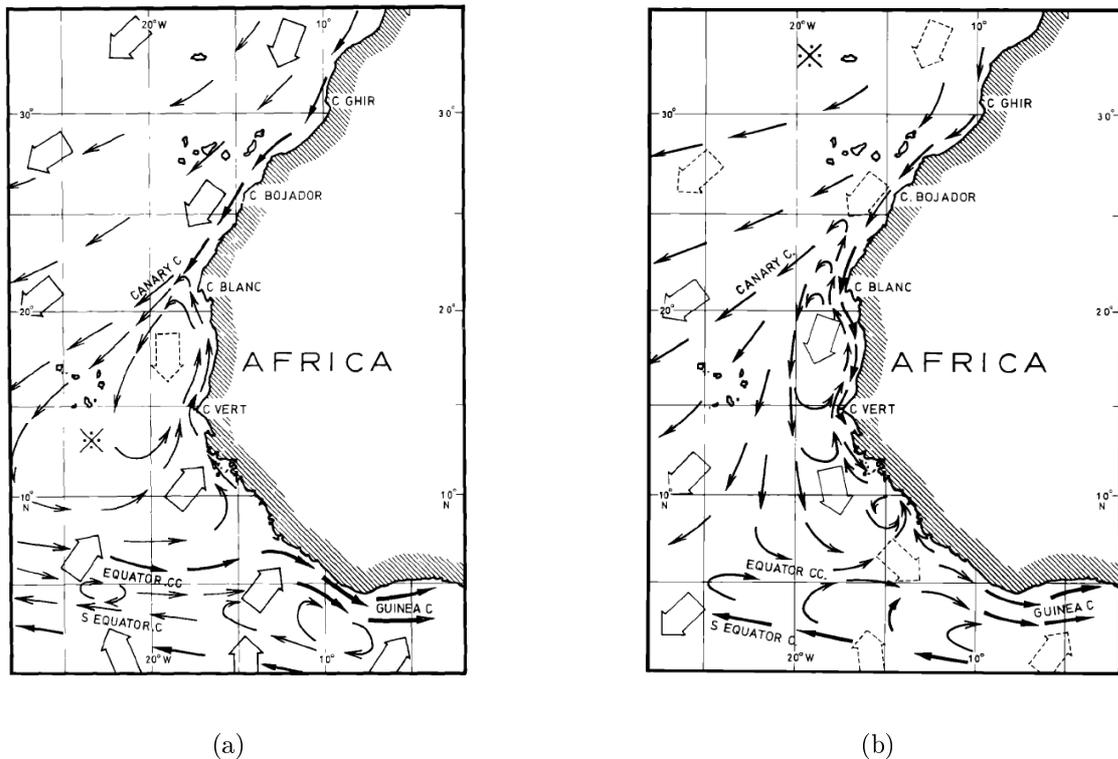


Abbildung 1.8: Oberflächenzirkulation im tropische Nordost Atlantik im a) Sommer und b) Winter (schwarze dünne Pfeile). Die großen offenen Pfeile beschreiben die bevorzugte Windrichtung. Die großen gestrichelten Pfeile beschreiben die periodische Änderung der Windrichtung und schwache Windgeschwindigkeiten. Die Kreuze mit vier Punkten beschreiben schwach und variable Winde (*Mittelstaedt, 1983*).

Strömung ist nun der küstennahe Teil eines großausgeprägten zyklonalen Wirbels, dessen ablandiger Teil der südwärtsige Kanarenstrom ist. Geschlossen wird dieser Kreis durch den äquatorialen Gegenstrom. Im späten Herbst wird der küstennahe Gegenstrom wieder ersetzt durch einen südwärtigen Strom, da die Passate wieder an Intensität zunehmen (*Mittelstaedt (1986; 1983)*).

### 1.5.2 Küstenauftrieb

Stetige küstenparallele Winde erzeugen aufgrund von Reibung auf der Wasseroberfläche Windstress und ist um  $15^\circ$  gegenüber dem Windvektor verschoben. Dieser Mechanismus setzt sich durch die gesamte Wassersäule fort und erzeugt eine so-

nannte Ekman-Spirale. Der Nettomassentransport über alle Schichten ist um  $90^\circ$  zum Windvektor verschoben. Dieses Phänomen existiert an jeder Westküste des Landes mit stetigen Winden und wird durch das Relief unterstützt. Auf der Nordhalbkugel erzeugt Nordwind ein Auftrieb von Wassermassen während Südwind ein Absinken der Wassermassen zur Folge hat (Downwelling). Auf der Südhalbkugel ist dies entgegengesetzt. Nordwind produziert an Küsten ein Absinken und Südwinde ein Auftrieb von Wassermassen. Schematisch ist dieser Effekt für die Nordhemisphäre in Abbildung 1.9 mit Hilfe von Vektorpfeilen abgebildet (Nevison et al., 2004). In dem hier verwendeten Modell ist der windgetriebene Ekman-Prozess der Mechanismus für Auftrieb. Aufgetrieben werden, im Vergleich zur Umgebung, kältere Wassermassen. Daher ist ein Merkmal für Auftrieb die Erniedrigung der Oberflächentemperatur (SST). Die Abbildung 1.10 a), b) stellt die monatlich gemittelten SST von MODIS für die Region vor Mauretanien für September 2003 und Februar 2008. Gut zu erkennen ist die hohe Oberflächentemperatur von  $27 - 28^\circ\text{C}$  in Grafik 1.10 a). Im Gegensatz dazu weist die Abbildung 1.10 b) in der gleichen Region eine viel niedrigere SST von ca.  $20^\circ\text{C}$  auf. Das legt die Hypothese nahe, dass während eines Jahres der Auftrieb variable ist und es bestimmte Zeiträume gibt, an denen der Auftrieb von kalten und  $\text{N}_2\text{O}$ -reichen Wassermassen begünstigt wird. Ein Grund dafür kann die Variabilität des Windes sein.

### 1.5.3 Saisonalität des Auftriebes

Die Wanderung der ITCZ während eines Jahres und die damit verbundene Verschiebung der Passatwindzone bewirken eine Saisonalität des Auftriebs vor der nordwestlichen Küste von Mauretanien. In Abbildung 1.11 ist die Breitengradabhängige Dauer der Auftriebsperiode aufgrund der Verlagerung der ITCZ grafisch dargestellt.

Das Auftriebsgebiet erstreckt sich über einen schmalen Streifen von ca. 10 km Breite nahe dem Schelf und säumt eine Region von  $10^\circ\text{N}$  bis  $25^\circ\text{N}$  ein (Tomczak and Godfrey, 2002). Südlich von  $20^\circ\text{N}$  findet der Auftrieb während des Frühjahrs und Winters mit einer Maximalintensität in den Monaten Februar-März statt. Diese Saisonalität verstärkt sich weiter nach Süden. Zwischen  $20^\circ\text{N}$  und  $25^\circ\text{N}$  herrscht das ganze Jahr über Auftrieb (Minas H. J., 1892). Ein weiterer Effekt, der einen Einfluss auf die Fluktuation des Auftriebs haben kann, ist das Eintreten vom Land-See-Windsystem. Nahe am Kontinent liegen die täglichen Schwankungen der v-Komponente der Pas-

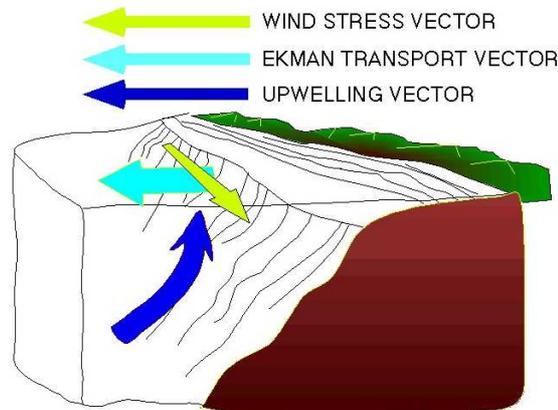


Abbildung 1.9: Schematische Darstellung von Küstenauftrieb angetrieben durch küstenparallele Winde (*Nevison et al., 2004*).

sate bei  $25^\circ$  zu  $50^\circ$ . Morgens hat der Wind seine größte Ost-Komponente (ablandig) und nimmt zum frühen Abend bis zu einer Windstärke ab (*Mittelstaedt, 1983*). Das aufgetriebene Wasser kommt aus einer Tiefe von 100 m - 200 m. Dabei handelt es sich um zwei unterscheidliche Wassermassen nördlich und südlich von Cape Blanc ( $21^\circ\text{N}$ ). Im Norden besteht das aufgetriebene Wasser aus dem salzigen, relativ warmen und nährstoffarmen Nordatlantische Zentralwasser (NACW), während im Süden das relativ kühle, frische und nährstoffreichere Südatlantische Zentralwasser (SACW) dominiert. Beide Wassermassen sind oberflächennah und bis in einer Tiefe von 150 m - 600 m zu finden. Das SACW wird durch den polwärts gerichteten Unterstrom Richtung Norden advehiert (*Tomczak and Godfrey, 2002*). Das aufgetriebene Wasser weist eine hohe  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration auf (Kapitel 1.3), die mit der angrenzenden Luftschicht wechselwirkt.

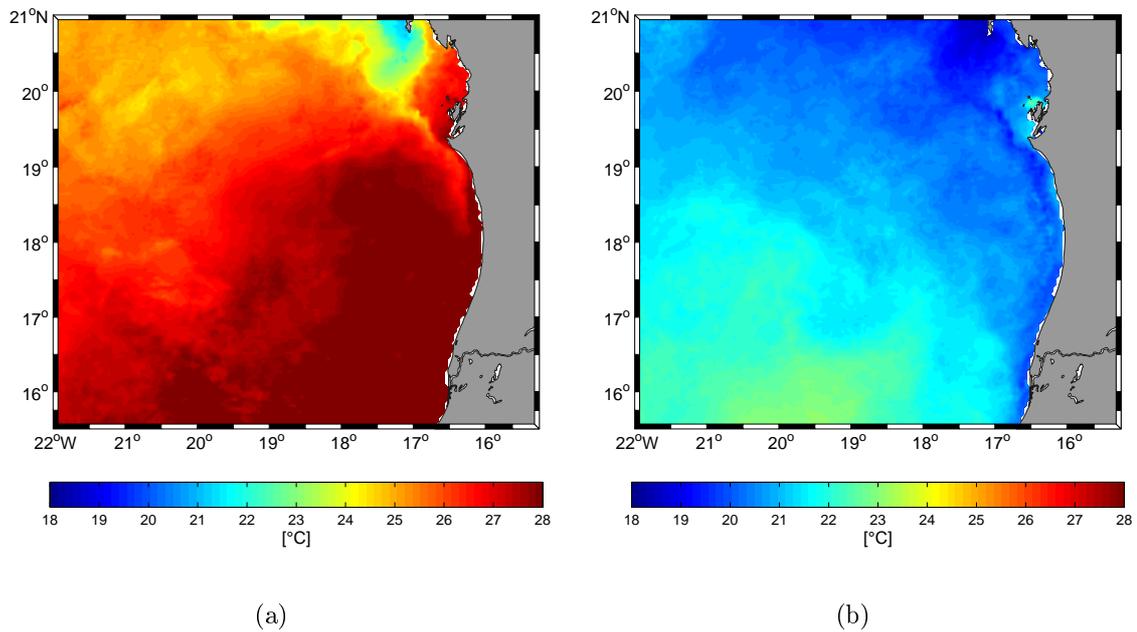


Abbildung 1.10: Dargestellt sind die monatlich gemittelten Oberflächentemperaturen (SST) von MODIS vor der Küste von Mauretanien in °C für a) September 2003 und b) Februar 2008 (*Schafstall, 2009*).

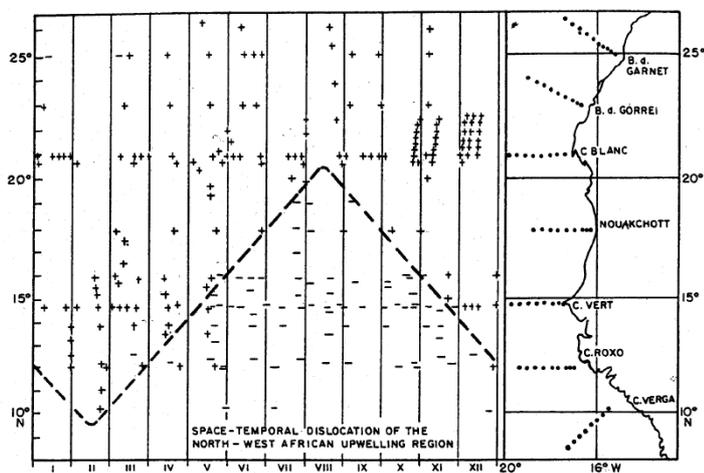


Abbildung 1.11: Breitengradabhängige Dauer der Auftriebsperiode. Das (+) Zeichen weist Regionen auf bei denen Auftrieb beobachtet worden ist. Das (-) Zeichen zeigt Stationen bei denen kein Auftrieb erkennbar war. Gestrichelt dargestellt die Wanderung der ITCZ während des Jahres. Rechts ist die Küste von Mauretanien zu erkennen sowie die verwendeten Datenpunkte (*Minas H. J., 1892*).



## 2 Methode und Daten

In diesem Kapitel wird das in dieser Arbeit verwendete Modell und die Methode der insitu-Messungen, sowie die eingehenden Daten beschrieben.

### 2.1 Methode

Im Folgenden werden zwei Methoden, die insitu-Messung und die Modellberechnung zur Ermittlung der Flüsse vor der Küste Mauretaniens vorgestellt.

Beide Methoden basieren auf der Gleichung (1) zur Berechnung des Gasaustausches von  $N_2O$  zwischen der Wasseroberfläche und der darüber liegenden Luftschicht. Diese ist gegeben durch:

$$F_{n_2o} = k \Delta N_2O, \quad (1)$$

wobei sich  $\Delta N_2O$  aus  $\Delta N_2O = N_2O_w - N_2O_a$  zusammensetzt.  $k$  steht für den Transferkoeffizient in m/s.

Der Gleichgewichtswert  $N_2O_a$ , das heißt die Konzentration, die im Seewasser vorhanden wäre, wenn sie mit der Atmosphäre im Gleichgewicht wäre, weist 2005 einen atmosphärischen Wert von 319 ppb auf (*IPCC*, 2007). Dieser wird nach *Weiss and Price* (1980) in nmol/L wie folgt berechnet:

$$N_2O_a = \exp^\beta p x', \quad (2)$$

wobei

$$\beta = A + B + C + D + E \quad (3)$$

ist und sich folgendermaßen zusammensetzt:

$$A = -165,8806 + 222,8743 \left[ \frac{100}{(T + 273,15)} \right], \quad (4)$$

$$B = 92.0792 \log \left[ \frac{(T + 273,15)}{100} \right], \quad (5)$$

$$C = -1,48425 \left[ \frac{(T + 273,15)}{100} \right]^2, \quad (6)$$

$$D = S \left[ -0,056235 + 0,031619 \left( \frac{(T + 273,15)}{100} \right) \right], \quad (7)$$

$$E = -0,0048472 \left[ \frac{(T + 273,15)}{100} \right]^2, \quad (8)$$

wobei  $T$  für die Oberflächentemperatur in °C,  $S$  für den Salzgehalt an der Oberfläche in PSU,  $p$  für den Standarddruck in atm und  $x'$  für den trockenen Molenbruch von Luft in ppb steht.  $N_2O_w$  steht für die Gaskonzentration einer gut durchmischten an der Oberfläche liegenden Wassermasse. Beide Methoden, insitu-Messung und Modellberechnung, unterscheiden sich in der Eingangsgröße Wind (Kapitel 2.2.2), die Konzentration von  $N_2O$  in der Atmosphäre, sowie die der Wasseroberfläche. In den folgenden Unterkapiteln werden die Unterschiede dargelegt.

### 2.1.1 Modellbeschreibung

Das verwendete Modell basiert auf der Veröffentlichung von *Nevison et al.* (2004) in Global Biogeochemical Cycles mit dem Titel “Quantifying the nitrous oxide source from coastal upwelling” (*Nevison et al.*, 2004). Das einfache Modell beschreibt den Gasaustausch von  $N_2O$ . Die gemessenen  $N_2O$ -Konzentrationen in 100 m, die aufgrund der Ekman-Theorie vor der Küste von Mauretaniens binnen drei Tagen aufgetrieben werden, gelangen an die Wasseroberfläche und treten in Wechselwirkung mit dem Gleichgewichtswert in der Atmosphäre. Auf dem Weg an die Oberfläche wirken Abklingfunktionen auf die  $N_2O$ -Konzentration, die abhängig von der Stärke des Auftriebs sind. Ist die  $N_2O$ -Konzentration an der Wasseroberfläche größer als in der darüberliegenden Luftschicht gibt es einen Fluss von  $N_2O$  in die Atmosphäre, ist sie kleiner, stellt der Ozean eine Senke dar. Das Modell wird von Wind angetrieben. Jedoch ist die Anwendungsmöglichkeit, aufgrund von Lücken in den Winddaten selbst limitiert. Den elementaren Mechanismus für den Küstenauftrieb ist der ablandige Massentransport angetrieben durch oberflächennahe Winde. Die stetigen parallel zur Küstenlinie wehenden Winde erzeugen eine küstenparallele Windstresskomponente, welche einen Ekman-Transport von Oberflächenwasser 90 ° rechts (auf der Nordhalbkugel) zur Windstresskomponente entwickeln 1.5.2.

Zur Berechnung des Windstress aus den Winddaten von 10 m über dem Meeresspiegel wird folgende Gleichung benutzt:

$$\tau = \rho C_D U_{10}^2, \quad (9)$$

wobei  $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$  die Dichte von Luft,  $U_{10}^2$  die Windgeschwindigkeit in 10 m über dem Meeresspiegel in m/s ist.  $C_D$  steht für den dimensionslosen Strömungswiderstandskoeffizient, der abhängig von der Windgeschwindigkeit ist.

Der ekmangetriebene Transport in Verbindung mit küstenparallelem Windstress wird berechnet mit

$$M = \frac{\rho_w f}{\tau}, \quad (10)$$

wobei  $M$  der Massentransport in  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $\tau$  der Windstress parallel zur Küstenlinie in  $\text{N/m}$ ,  $\rho_w = 1025 \text{ kg m}^{-3}$  die Dichte von Meerwasser und  $f$  der Coriolisparameter in  $1/\text{s}$  ist.

Das Wasser, dass offshore transportiert wird, wird ersetzt durch aufgetriebenes Tiefenwasser. Die durch Küstenauftrieb hervorgerufene Vertikalgeschwindigkeit  $w$  in  $\text{m/s}$  ist gegeben durch

$$w = \frac{R_b}{M}. \quad (11)$$

$R_b$  steht für den Deformations-Rossbyradius, der in dem betrachteten Gebiet einen Wert von 35,2 km aufweist (*Emery et al.*, 1984). Dieser Radius verändert sich mit dem Coriolisparameter  $f$  und steigt Richtung Äquator an. Zu jedem Zeitschritt  $t$  wird  $w$  berechnet und der Wert  $w_{max}$  bestimmt. Dieser Wert ist definiert, als die maximale Vertikalgeschwindigkeit, die während der drei Tage Auftrieb zu dem Zeitpunkt  $t_{max}$  auftritt. Wenn  $w_{max}$  einen kritischen Wert  $w_{crit} = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  überschreitet, entsteht Auftrieb und die  $\text{N}_2\text{O}$  Konzentration  $N_2O_w$  an der Wasseroberfläche kann berechnet werden durch

$$N_2O_w = N_2O_{100m} Q_w Q_t, \quad (12)$$

wobei  $N_2O_{100m}$  die gemessene mittlere  $\text{N}_2\text{O}$  Konzentration in 100 m Tiefe ist. Hierfür wird angenommen, dass diese in Folge von Auftrieb an die Oberfläche gelangt. Auf dem Weg zur Oberfläche werden die  $N_2O_{100m}$  durch die Abklingfunktionen  $Q_w$

und  $Q_t$  beeinflusst. Beide sind einfache Skalierungsfunktionen, die den Betrag der Oberflächenkonzentration zur Stärke des Auftriebs anpasst. Beides sind exponentielle Abklingfunktion, die in Abhängigkeit von der Stärke und dem Zeitpunkt des Auftriebs fungieren

$$Q_w = \exp \left[ -\frac{(w_{peak} - w_{crit})}{(w_{peak} - w_{max})} \right], \quad (13)$$

$$Q_t = \exp \left[ -\frac{(t - t_{max})}{nback} \right]. \quad (14)$$

Beide Exponentialfunktionen können einen Wert von 0 und 1 annehmen. Die Konstanten  $w_{peak} = 2 \times 10^{-4}$  m/s (der größte Betrag an Vertikalgeschwindigkeit berechnet für den Nordwest Pazifik),  $nback = 12$  (drei Tage) und  $w_{crit}$  werden aus der Publikation von *Nevison et al.* (2004) übernommen. An allen Tagen an denen  $w_{max} < w_{crit}$  ist, wird  $F_{n2o} = 0$  gesetzt (*Nevison et al.*, 2004). Für die Berechnung des Gleichgewichtswertes  $N_2O_a$  wird ein Atmosphärenwert von 319 ppb (*IPCC*, 2007) angenommen.

### 2.1.2 Berechnung der Insitu-Messung

Bei der insitu-Messung wurde ein Gleichgewichtswert in der Atmosphäre von 320 ppb angenommen (A. Kock persönliche Mitteilung) und die Winddaten vom jeweiligen Schiff benutzt (Kapitel 2.2.5). Die Oberflächenwerte für  $N_2O_w$  entsprechen den gemessenen Oberflächenwerten von den jeweiligen verwendeten Profilen, von denen auch der 100 m Wert genommen worden ist. Um zu erkennen wie gut das Modell ist, werden die Ergebnisse des Modells mit den Resultaten und Eingangsgrößen, die für die Berechnung der insitu-Messungen entwickelt wurden, miteinander verglichen. Dazu gehören die Winddaten, die berechneten  $N_2O$ -Oberflächenkonzentrationen und Flüsse. Dabei wird angenommen, dass die insitu-Messungen 100 % entsprechen. Bei der Analyse werden nur 16 Proben miteinander verglichen. Die Werte von 2003 sind nicht enthalten, sowie der 3. Wert von 2006, da die zugehörigen Windwerte nicht vorhanden sind.

### 2.1.3 Der Transferkoeffizient

Für die Analyse des Gasaustauschkoeffizientens existieren zahlreiche Parametrisierungen. In der Abbildung 2.1 sind drei von ihnen graphisch dargestellt. In dieser

Arbeit wurde die Bulkformel von *Nightingale P. D.* (2000) zur Berechnung herangezogen. Die Parametrisierungen von *Wanninkhof* (1992) und *Liss and Merlivat* (1986) können als die obere und untere Grenze von  $k$  angesehen werden.

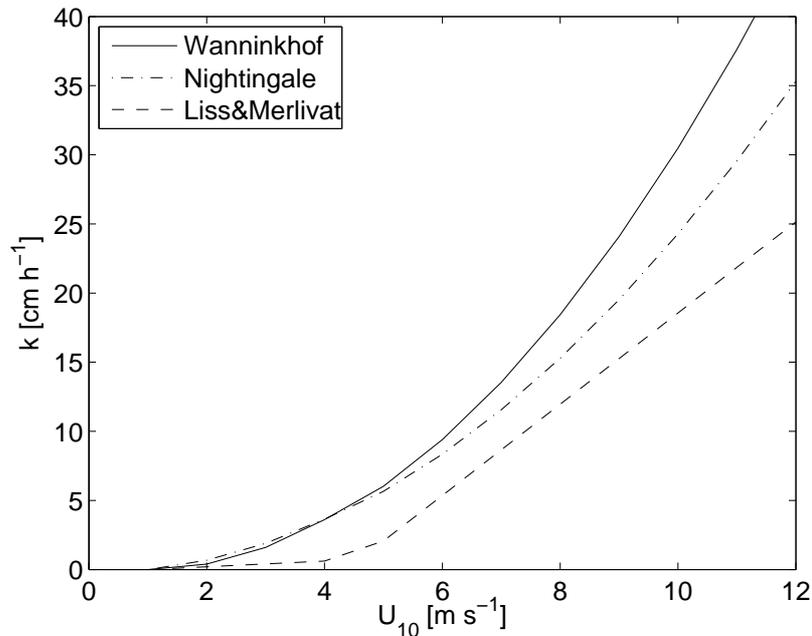


Abbildung 2.1: Dargestellt ist die Abhängigkeit des Transferkoeffizienten  $k$  in  $\text{cm/h}$  von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe in  $\text{m/s}$ .

Der Transferkoeffizient  $k$  wird wie folgt parametrisiert:

Nach *Nightingale P. D.* (2000):

$$k = \frac{0,01}{3600} (0,222 U_{10}^2 + 0,333 U_{10}), \quad (15)$$

1. für  $0 \leq U_{10} \leq 3,6 \text{ m/s}$

$$k_1 = k \left( \frac{Sc_{n2o}}{600} \right)^{-\frac{2}{3}}, \quad (16)$$

2. für  $U_{10} \geq 3,6$

$$k_2 = k \left( \frac{Sc_{n2o}}{600} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (17)$$

$Sc_{n2o}$  steht für die Schmidtzahl.

Die Schmidtzahl  $S_{c_{n_2o}}$  wird berechnet nach

$$S_{c_{n_2o}} = \frac{\nu}{D}. \quad (18)$$

$\nu$  ist die kinematische Viskosität von Meerwasser,  $\nu = f(T, S)$  und der Diffusionskoeffizient  $D$  in  $\text{m}^2/\text{s}$  für  $\text{N}_2\text{O}$  wird berechnet nach *Rhee* (2000).

## 2.2 Daten

Im Folgenden Abschnitt werden die verwendeten Daten, die in das Modell eingehen, beschrieben und untersucht.

### 2.2.1 Distickstoffmonoxid

Die  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentrationen der Wassersäule von verschiedenen Fahrten (2003, 2006, 2007 und 2008) wurden aus einer  $\text{N}_2\text{O}$ -Datenbank generiert (*Bange et al.* (2009); *Freiing and Bange* (2007)). Für die Berechnungen werden die mittleren  $\text{N}_2\text{O}$  Konzentrationen in 100 m Tiefe benutzt, die am Kontinentalhang zwischen der Isolinie 200 und 2000 m liegen. Dieser Bereich ist definiert als Küstenauftriebsregion ("Slope") (*Hoepffner et al.*, 1999). Die Messung von  $\text{N}_2\text{O}$  erfolgt mit Hilfe eines Gaschromatographens, der einen Elektronen-Einfang-Detektor (ECD) enthält. Von jeder Tiefe wurden 3 Proben für die Bestimmung eines mittleren  $\text{N}_2\text{O}$ -Wertes pro Tiefe genommen. Der Variationskoeffizient (Var) wird für jeden mittleren  $\text{N}_2\text{O}$ -Wert bestimmt, welcher sich folgendermaßen zusammensetzt:

$$Var = \frac{(C_{wmax} - C_{wmin})}{1,91}, \quad (19)$$

wobei  $C_{wmax}$  und  $C_{wmin}$  für die Maximal- und Minimalkonzentration der drei Lachspalten steht. Der Faktor 1,91 (beziehungsweise für Doppelproben 1,52) ist abgeleitet von der statistischen Methode von *David* (1951).

Die mittleren  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentrationen in 100 m,

- deren Variationskoeffizient unter 10 % liegt,
- dessen Tiefenprofil dem typischen im Tropischen Nord-Atlantik entspricht,
- die sich im Bereich des Kontinentalhanges befinden,

Fahrt	AMT13	M683	P348	P347	ATA3
Monat/Jahr	Sep 2003	Juli 2006	Feb 2007	Jan 2007	Feb 2008
Anzahl der verwendeten Datenpunkte	2	3	3	2	9
Spalte	1:2	3:5	6:8	9:10	11:19

Tabelle 2.1: Dargestellt ist der verwendete Datensatz; die mittleren  $N_2O$ -Konzentrationen in 100 m der jeweiligen Fahrten, deren Variationskoeffizient unter 10 % liegt, dessen Tiefenprofil dem typischen im Tropischen Nordatlantik entspricht und die sich im Bereich des Kontinentalhanges befinden. Die letzte Spalte stellt die Position auf der x-Achse der dann im Kapitel 3 folgenden Resultate dar.

sind in Tabelle 2.1 zu sehen und stellen den in dieser Arbeit verwendeten Datensatz dar. Die letzte Zeile von Tabelle 2.1 stellt die Position auf der x-Achse, der dann im Kapitel 3 folgenden Resultate, dar. Eine geographische Einteilung der Datenpunkte ist in der Abbildung 2.2 zu erkenntlich (siehe Anhang). Darüberhinaus werden die Temperaturen und Salzgehalte an der Oberfläche von jedem Vertikalprofil, bei dem die 100 m-Werte signifikant sind, als Eingangsgröße genutzt.

### 2.2.2 Winddaten

Als weitere Eingangsgröße dient die v-Komponente (Nord-Süd-Komponente) des Windes in 10 m über dem Meeresspiegel von zwei verschiedenen Winddatensätzen:

1. National Center of Environmental Prediction (NCEP)
2. NASA-Satelliten QuikSCAT

Die Datensätze unterscheiden sich in der zeitlichen und räumlichen Auflösung (Tabelle 2.2).

### 2.2.3 NCEP

Die NCEP-Produkte sind Modelldaten, die mit Hilfe des Reanalyseverfahrens gewonnen werden. Bei der Reanalyse werden Beobachtungsdaten aus der Vergangen-

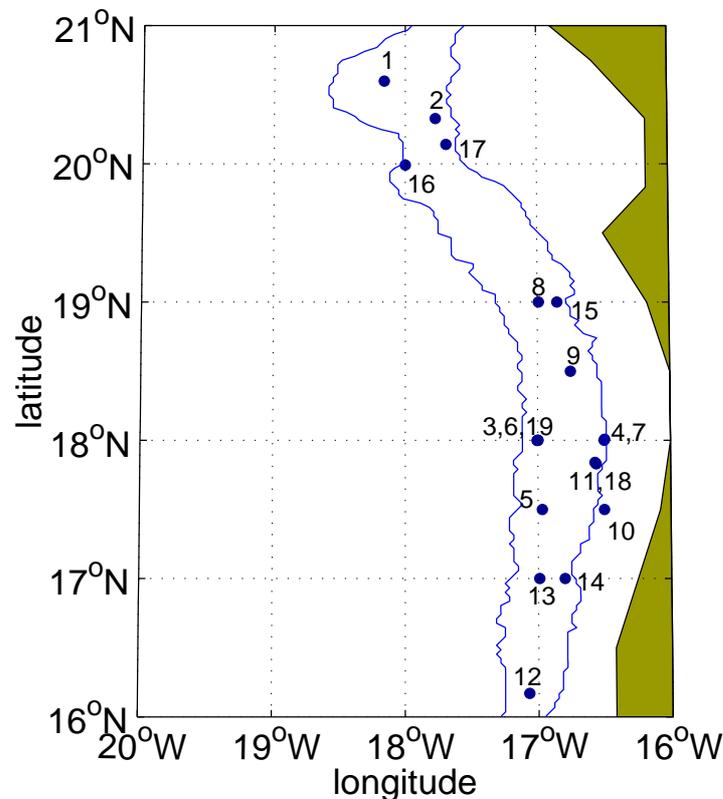


Abbildung 2.2: Geographische Position der verwendeten Datenpunkte aus den Jahren 2003, 2006, 2007 und 2008.

heit (von 1948 bis heute) mit modernen Analyseprogrammen aufbereitet und auf ein Gitter interpoliert. Der verwendete Datensatz ist von NCEP-DOE Reanalysis 2, eine verfeinerte Version von dem NCEP Reanalysis I Model. Das globale Gitter erfasst ein Gebiet von 144 Punkten in der Breite und 73 Punkte in der Länge, was eine räumliche Auflösung von  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  entspricht. Die zeitliche Abdeckung beträgt sechs Stunden (*Kanamitsu et al.*, 2002). Für die weitere Berechnung der NCEP-Winddaten werden die Datenpunkte von  $18.8^\circ\text{W}$ ,  $20^\circ\text{N}$  und  $16.9^\circ\text{W}$ ,  $20^\circ\text{N}$  räumlich und zeitlich linear interpoliert, damit der daraus folgende Datenpunkt über der Küstenauftriebsregion liegt.

#### 2.2.4 QuikSCAT

QuikSCAT, in Betrieb genommen 1999, ist ein polar umkreisender Satellit, der mit einem 1800 km breiten Messstreifen die Oberfläche der Erde abtastet. Dieses Ver-

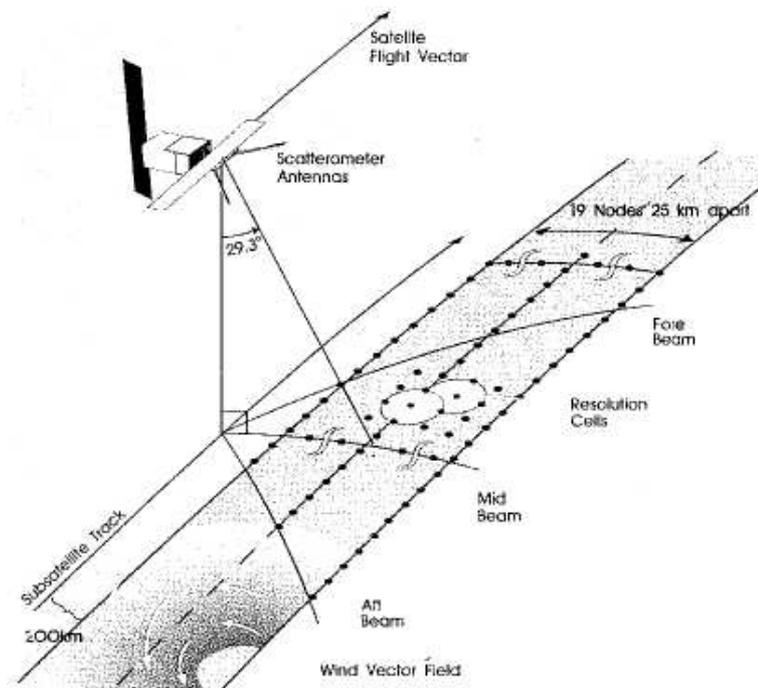


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Messmethode von QuikSCAT/Scatterometer (*wikipedia*, 2009).

fahren ist schematisch in der Abbildung 2.3 dargestellt. Ein auf dem Satelliten angebrachtes Scatterometer sendet Mikrowellenimpulse auf die Oberfläche des Ozeans aus und misst die zurück gestreute Energie, die am Instrument ankommt. Das Scatterometer gebraucht eine indirekte Technik, um die Windgeschwindigkeit über der Meeresoberfläche zu bestimmen. Dabei wird der Zusammenhang ausgenutzt, dass je rauer die Ozeanoberfläche ist, desto größer ist der Betrag der vorherrschenden Windgeschwindigkeit und desto weniger Energie wird wieder an den Satelliten zurückgestreut. Die Daten existieren auf einem rechtwinkligen globalen Gitter von 1440 Punkte in der Breite und 720 Punkte in der Länge, was einer räumlichen Auflösung von  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  entspricht. Es werden separate Karten für die verschiedenen Durchgänge angefertigt. Der QuikSCAT Orbit ist so konzipiert, dass die aufsteigende und absteigende Äquatorüberquerungen um 6 Uhr morgens, sowie um 6 Uhr abends (beide lokale Zeit) erfolgen. Die Daten, die sich bei nachfolgenden Durchgängen überlappen, werden nicht gemittelt sondern überschrieben, was bedeutet, dass die zeitliche Auflösung einem Wert pro Tag entspricht. Die Windgeschwindigkeiten weisen eine Standardabweichung von  $< 2 \text{ m/s}$  auf und die Windrichtungen eine Stan-

	NCEP	QuikSCAT	Schiffswinde
Vorteile	-zeitliche Auflösung (6 h)	-räumliche Auflösung (1/4 °)	-entsprechen Zeit und Ort der Proben- nahme
Nachteile	-wenige Beobachtun- gen vor Mauretani- en -schlechte räumliche Auflösung -schlechte Auflösung von kleins- kaligen Windfeldern	-Fehler nahe der Küste und bei Niederschlag ( <i>Perez- Brunius et al.</i> (2007); <i>Tang et al.</i> (2004)) -Datenlücken -zeitliche Auflö- sung (1 d) -zeitliche Windfeldänderungen werden nicht erfasst	-von 10 m Höhe herunter gerech- net -keine weiteren Korrekturen (z.B. Beeinflussung des Schiffes auf das Windfeld)

Tabelle 2.2: Dargestellt sind die Vor- und Nachteile der Winddatensätze NCEP, QuikSCAT und den gemessenen Windgeschwindigkeiten vom Schiff

dardabweichung von 20 ° für Windgeschwindigkeiten größer als 3 m/s. Aufgrund von Niederschlägen und systematischen/methodischen Fehlern wird eine geringere Genauigkeit erzielt (*Halpern*, 2001). Für die weitere Berechnung der QuikSCAT-Daten werden Datenlücken, wenn die benachbarten Punkte Daten aufweisen, zeitlich linear interpoliert.

### 2.2.5 Windwerte vom Schiff aus gemessen (Schiffswinde)

Die Schiffswinde werden für die Berechnung der insitu-Messungen herangezogen. Die Schiffswerte beschreiben absolute Windwerte und wurden auf 10 m Höhe runter gerechnet und stellen den Betrag des Windes dar. Es wurden keine weiteren Korrekturen vorgenommen (Tabelle 2.2). Gemessen wurde mit einem Schalenkreuzanemometer, die auf den Schiffen unterschiedlich justiert waren. Die Schiffswerte entsprechen der Zeit der jeweiligen Probennahme. Da diese zu unterschiedlichen Zeiten stattfand, war es nur möglich die gleichen Tage zu vergleichen, jedoch nicht die gleichen Uhrzeiten. Der Windwert von NCEP wurde daher über den Tag gemittelt.

Alle drei Winddatensätze haben ihre Vor- und Nachteile (Tabelle 2.2), die im weiteren Verlauf stark die Berechnung der Emissionen von Lachgas bestimmen werden.



## 3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für einzelne Zeitpunkte, sowie für mehrere Kalenderjahre mit den jeweiligen Winddatensätze NCEP und QuiKSCAT ermittelt und untereinander, mit insitu-Messungen und dem Ergebniss von *Nevison et al.* (2004) verglichen. Das Modell von *Nevison et al.* (2004) wird auf die im Kapitel 2 beschriebene Daten angewendet. Hierbei beeinflussen die unterschiedlichen Auflösungen der Winddaten die Ergebnisse entscheiden gravierend. In dieser Arbeit werden berechnete Werte als statistisch signifikant angesehen, wenn deren Korrelationskoeffizient  $r$  im Bereich des 95 % Konfidenzintervalls liegt. Dieser ist nach folgender Funktion definiert:

$$|r| > r(f,P), \quad (20)$$

wobei  $f = 2 - m$  für die Freiheitsgrade,  $m$  für die Anzahl der Messdaten und  $P$  für das Konfidenzniveau steht (*Doerffel*, 1984).

### 3.1 Berechnung und Darstellung der Flüsse vor Mauretanien

Im Folgenden werden die mit Hilfe des oben beschriebenen Modells von *Nevison et al.* (2004), für die verschiedenen Fahrten berechnete Gasaustausch-Flüsse vor der Küste von Mauretanien, graphisch dargestellt und analysiert. Die x-Achse der Ergebnisse ist jeweils nach den im Kapitel 2 beschriebenen Datenpunkten von 1 bis 19 nummeriert und stellt wie in Tabelle 2.1 und der Abbildung 2.2, die chronologische Einteilung der Fahrten in den verschiedenen Jahren; Sep. 2003 (1:2), Jul. 2006 (3:5), Feb. 2007 (6:8), Jan. 2007 (9:10) und Feb. 2008 (11:19) dar. Innerhalb der Jahre sind die Daten wiederum nach Datum aufsteigend geordnet.

#### 3.1.1 Berechnung der Flüsse mit NCEP

Die Abbildung 3.1 zeigt die berechneten Flüsse  $F_{n2o}$  in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$ , sowie die v-Komponente des Windes gemittelt über die 3 Tage in  $\text{m}/\text{s}$  in 10 m Höhe. Im Allgemeinen ist zu erkennen, dass die berechneten Flüsse sowohl positiv als auch negativ sein können. Zum anderen zeigen die Flüsse eine hohe Variabilität. Der Median von 0,067 zeigt jedoch, dass es eher kleine Flüsse sind, die emittieren. Ebenfalls eine hohe Variabilität über die betrachteten Jahre zeigen die mittleren Windgeschwindigkeiten. Zu erkennen ist, dass bei hohen mittleren Windgeschwindigkeiten die Flüsse

ebenfalls erhöht sind, wie im Jahr 2003, Feb. 2007 und die letzten beide Tage von 2008, und vice versa. Wenn  $v$  gering ist, sind die Flüsse kleiner, wie im Jahr 2006. Jedoch ist die Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und berechneten Flüssen  $r = 0,27$  (statistisch nicht signifikant). Für die Flüsse beispielsweise im Jahr 2008 ist dieser Zusammenhang nicht zu sehen. Trotz hoher Windgeschwindigkeiten sind die Flüsse eher klein.

Die Größe der Flüsse wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die Korrelation mit der berechneten Oberflächenkonzentration von  $N_2O$ , dem Transferkoeffizienten und dem Produkt beider Abklingfunktionen und den berechneten Flüssen ist jeweils rund  $r = 0,9$ . Dies spricht für einen starken linearen Zusammenhang. Der Gleichgewichtswert und die Konzentration in 100 m weisen gar keine bis geringe Korrelation zu den Flüssen auf. Dies ist hinsichtlich der Gleichung (1-13) (Kapitel 2) nicht verwunderlich. Am stärksten wird die Wassermasse, die von 100 m an die Wasseroberfläche gelangt, durch die Abklingfunktionen  $Q_w$  und  $Q_t$  beeinflusst. Diese wirken auf die sich im Auftrieb befindenden Wassermassen.

$Q_w$  wird beschrieben durch eine Exponentialfunktion, dessen einzige Variable die berechnete maximale Vertikalgeschwindigkeit ist. Je größer  $w_{max}$  ist, desto größer ist auch die Abklingfunktion  $Q_w$ , und umso höher ist auch die berechnete  $N_2O$ -Konzentration an der Wasseroberfläche, und umgekehrt. Das heißt, je schneller der Auftrieb ist, desto mehr bleibt die ursprüngliche  $N_2O$ -Konzentration in 100 m erhalten, die an die Oberfläche gelangt. Die zweite Abklingfunktion  $Q_t$  ist ebenfalls eine Exponentialfunktion und ist abhängig von dem Zeitpunkt  $t_{max}$  an dem die maximale Vertikalgeschwindigkeit  $w_{max}$  berechnet wird. Je später dieses erfolgt, desto eher liegt der Wert nahe eins, das heißt, die ursprüngliche  $N_2O$ -Konzentration in 100 m bleibt mehr erhalten. Ein Grund für den Erhalt der ursprünglichen  $N_2O$ -Konzentration an der Oberfläche könnte sein, dass oberhalb der Mischungsschichttiefe, die im Mittel bei rund 20 m Tiefe liegt, eine geringe Schichtung und Vermischung vorliegt. Somit besteht die Möglichkeit, dass mehr die ursprüngliche  $N_2O$ -Konzentration erhalten bleibt. Wird  $w_{max}$  und somit auch  $t_{max}$  sehr früh ermittelt, liegt der Wert für  $t_{max}$  näher an null als an eins und das  $N_2O$ -Paket befindet sich unterhalb der Mischungsschichttiefe. Die Schichtung ist im Bereich unterhalb der Mischungsschichttiefe noch vergleichsweise stark und die  $N_2O$ -Werte aus 100 m werden durch Vermischung beeinflusst. Das heißt, dass weniger die ursprünglichen  $N_2O$ -Konzentration erreicht die

Wasseroberfläche. Somit beeinflussen beide Abklingfunktionen die berechnete  $N_2O$ -Konzentration an der Oberfläche in Abhängigkeit von der Stärke und Zeitpunkt des Auftriebes. Abbildung 3.2 zeigt den  $\Delta N_2O$  Wert in nmol/L, das Verhältnis der  $N_2O$ -Konzentration an der Wasseroberfläche zum Atmosphärenwert, sowie das Produkt beider berechneter Abklingfunktionen. Im Mittel liegt der Gleichgewichtswert bei rund 7,2 nmol/L und variiert schwach. Es ist zu erkennen, dass für das Jahr 2008 der  $\Delta N_2O$  Wert nahe zu im Gleichgewicht ist, woraus dann die geringen Flüsse resultieren. Auch bei den anderen Jahren kann der Zusammenhang gesehen werden, dass je größer der  $\Delta N_2O$  Wert ist, desto größer ist auch der Fluss von  $N_2O$  und umgekehrt. Wenn der  $\Delta N_2O$  negativ ist, sind auch die Flüsse negativ. Das Produkt aus beiden Abklingfunktionen und der  $\Delta N_2O$  Gehalt weisen eine Korrelation von 0,96 (statistisch signifikant) auf. Das erklärt, warum die  $\Delta N_2O$  Werte diese Amplitude aufweisen, sowie die berechneten Flüsse.

Der Zusammenhang zwischen dem Produkt von  $Q_w$  und  $Q_t$  und dem  $\Delta N_2O$  Gehalt ist durch die ganzen Jahre zu erkennen, beispielsweise das Jahr 2003. Die Abklingfunktionen sind im Vergleich relativ hoch, daraus folgt ein hoher  $N_2O$ -Gehalt an der Oberfläche und damit ein hoher  $\Delta N_2O$  Wert und vice versa. Ist der  $\Delta N_2O$  Gehalt und die Exponentialfunktionen niedrig, dann resultieren daraus auch geringere Flüsse, die nahe zu Null sein können, wie beispielsweise im Jahr 2006.

### 3.1.2 Berechnung der Flüsse mit QuikSCAT

Im Folgenden werden die Resultate mit dem QuikSCAT Winddatensatz dargestellt und untersucht. Die berechneten Flüsse von  $N_2O$  werden durch die gleichen Variablen beeinflusst wie die von NCEP berechneten. Die Korrelation zwischen der Windgeschwindigkeit und den berechneten Flüssen liegt bei  $r = 0,72$  und ist statistisch signifikant, da  $r$  im 95 % Konfidenzintervall liegt. Die Abbildung 3.3 zeigt die berechneten Emissionen von  $N_2O$  in nmol/m<sup>2</sup>s vor der Küste von Mauretanien und dazu die mittlere v-Komponente des Windes in m/s in 10m Höhe. Es treten sowohl positive als auch negative Flüsse für die gewählten Zeiträume auf. Außerdem weisen die Flüsse eine starke Variabilität auf. Im Zusammenhang mit der mittleren v-Komponente des Windes ist zu erkennen, dass bei hohen Windgeschwindigkeiten die Flüsse ebenfalls erhöht sind, wie in den Jahren 2003 und 2007 sowie zum Teil im Jahr 2008 und umgekehrt, das die schwachen Windgeschwindigkeiten auf geringe

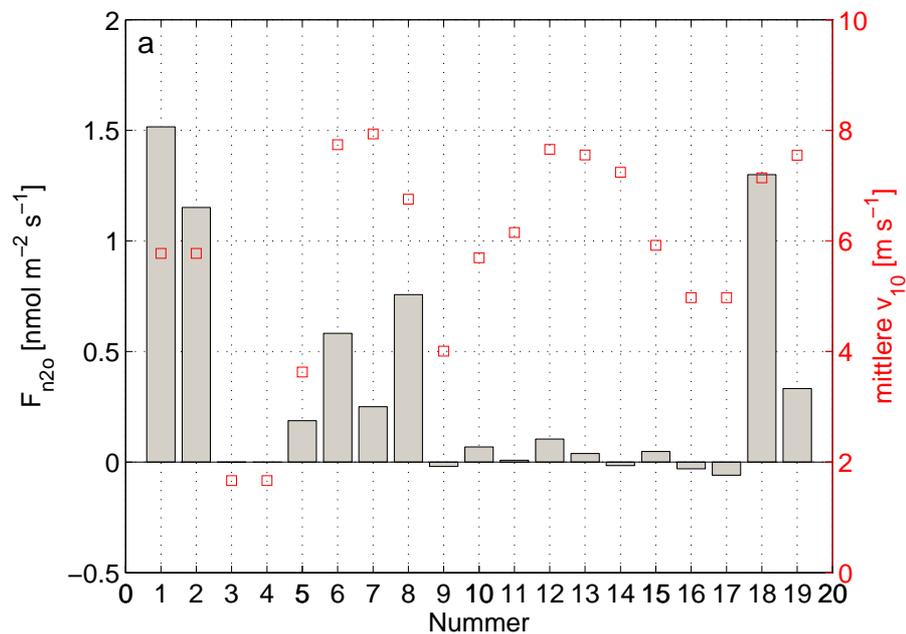


Abbildung 3.1: Berechnete Flüsse von  $N_2O$  in  $nmol/m^2s$  mit den Winddaten von NCEP und den dazugehörigen mittleren Windgeschwindigkeit der  $v$ -Komponente in  $m/s$  in 10 m Höhe.

Emissionen, wie im Jahr 2006, schließen lassen. Jedoch stimmen die vorherrschenden Windgeschwindigkeiten nicht immer mit den berechneten Flüssen überein, wie beispielsweise im Jahr 2006 (Spalte 5) oder Ende 2008 (16, 17, 19). Beim Hinzuziehen der Abbildung 3.4, dass die  $\Delta N_2O$  Konzentration in  $nmol/L$  und das Produkt beider Abklingfunktionen zeigt, ist zu erkennen, dass für das Jahr 2006 (Spalte 5), die  $\Delta N_2O$  Konzentration relativ hoch ist und somit der Fluss auch erhöht ist, trotz des geringen Wertes der Exponentialfunktionen. Die Werte von Ende 2008 zeigen gegensätzliche Eigenschaften, die  $\Delta N_2O$  Konzentrationen sind gering, aufgrund von niedrigen Werten der Abklingfunktionen. Allgemein ist zu sehen, dass je kleiner das Produkt der Abklingfunktionen ist, desto geringer ist auch die  $N_2O$ -Konzentration an der Oberfläche und somit geringer ist die  $\Delta N_2O$  Konzentration an der Oberfläche und vice versa. Ebenfalls gut zu erkennen ist das Verhalten, dass je größer bzw. geringer der  $\Delta N_2O$  Wert ist, desto erhöhter bzw. niedriger ist der Fluss von  $N_2O$ . Dieses Verhalten erklärt die hohe Korrelation von  $r = 0,88$  (statistisch signifikant).

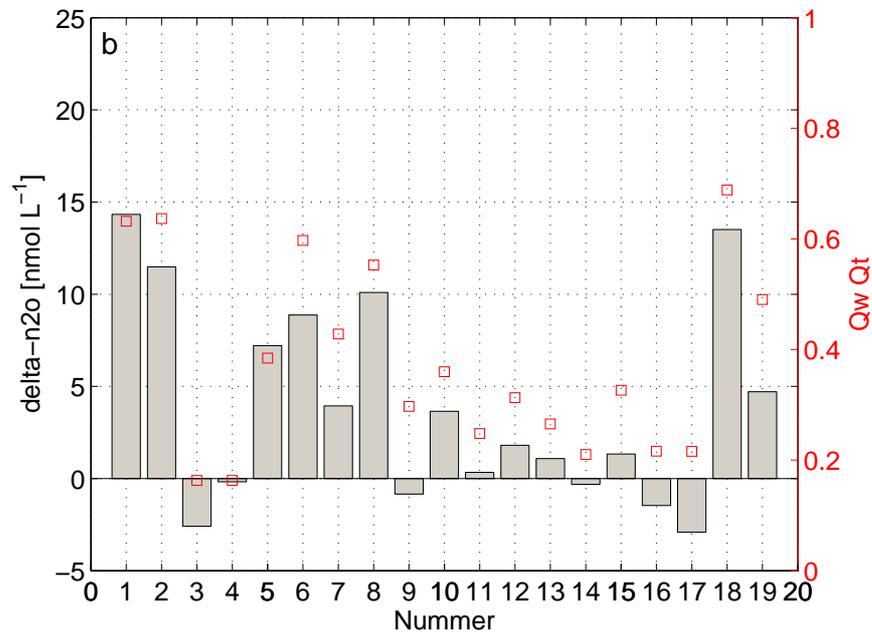


Abbildung 3.2: Berechnete  $\Delta N_2O$  in nmol/L und das Produkt der Abklingfunktionen  $Q_w$ ,  $Q_t$  mit dem Winddatensatz von NCEP.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass hohe Windgeschwindigkeiten verbunden sind mit erhöhten Emissionen. Dies konnte sowohl bei NCEP als auch bei QuikSCAT erkannt werden. Auch wenn dieser Zusammenhang bei einigen Daten nicht gegeben war, war die Begründung, dass die berechneten Abklingfunktionen die Ursache sind, ebenfalls bei beiden verwendeten Winddatensätzen gleich. Interessant ist, dass die Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und berechneten Flüssen bei NCEP viel geringer ist als bei QuikSCAT.

### 3.1.3 Vergleich der berechneten Flüsse mit NCEP und mit QuikSCAT

Im nächsten Abschnitt werden die Parameter  $v$ -Komponente des Windes, die  $N_2O$ -Konzentration an der Oberfläche, sowie die Emissionen, jeweils berechnet von beiden vorgestellten Winddatensätze miteinander verglichen, um herauszufinden, warum die Flüsse von QuikSCAT niedriger sind als die von NCEP.

Zuerst wird die mittlere  $v$ -Komponente in m/s der beiden Winddaten für den jeweiligen Tag im Jahr gegeneinander dargestellt. Die Grafik 3.5 a) stellt die NCEP und QuikSCAT Werte nebeneinander dar und die rechte Grafik 3.5 b) zeigt die glei-

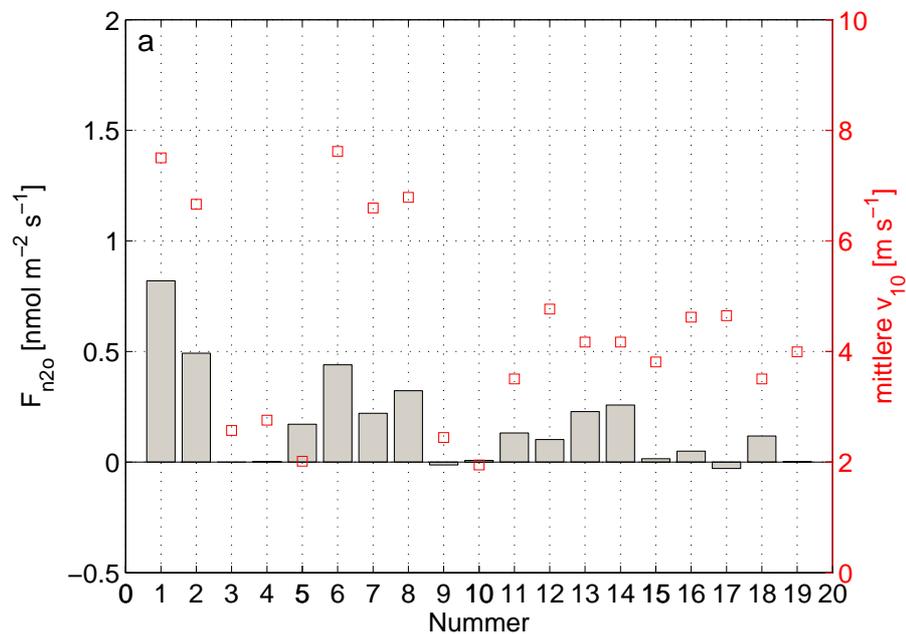


Abbildung 3.3: Berechnete Flüsse von  $N_2O$  in  $nmol/m^2s$  mit den Winddaten von QuikSCAT und den dazugehörigen mittleren Windgeschwindigkeit der v-Komponente in  $m/s$  in 10 m Höhe.

chen Daten im Streudiagramm. Diese Art und Weise der Darstellung wurde für die folgenden Bilder ebenfalls gewählt. Im Balkendiagramm wird ersichtlich, dass die Daten nur geringfügig übereinstimmen. Größtenteils liegen die NCEP-Winddaten weit über denen von QuikSCAT. Das Diagramm 3.5 b) zeigt eine starke Streuung der Werte und die Werte liegen unterhalb der 1:1 Linie. Trotz einer Korrelation von  $r = 0,53$ , die statistisch signifikant ist, weisen beide Winddatensätze unterschiedliche Verhalten auf. Es sollte darauf hingewiesen werden, dass bei der Mittelung auf unterschiedliche Datenmengen zurückgegriffen wurde. Für QuikSCAT standen drei und für NCEP 12 Werte für drei Tage zur Verfügung. Des weiteren werden die berechneten  $N_2O$ -Konzentrationen in  $nmol/L$  an der Wasseroberfläche miteinander verglichen (Abbildung 3.6) Das Bild ist genauso aufgebaut wie das Vorherige, auch alle weiteren haben die gleiche Art der Präsentation. Augenscheinlich ist beim Balkendiagramm in Abbildung 3.6 a) zu erkennen, dass die Werte zum Teil ganz gut übereinstimmen, wie zum Teil in 2007 und 2008, sich aber auch vor allem Ende 2008 und 2003 stark unterscheiden. In der Grafik 3.6 b) ist zu erkennen, dass die Werte

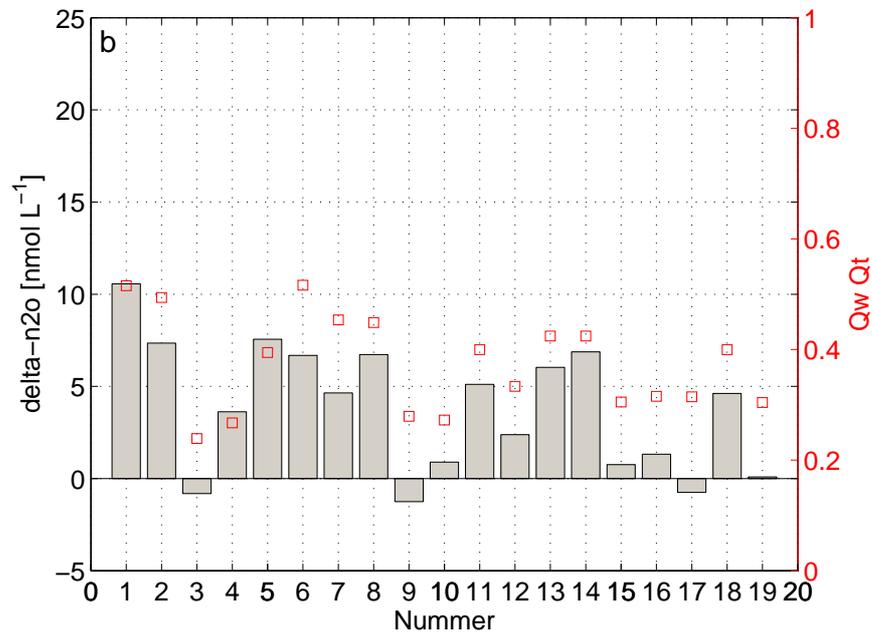


Abbildung 3.4: Berechnete  $\Delta N_2O$  in nmol/L und das Produkt der Abklingfunktionen  $Q_w$ ,  $Q_t$  mit dem Winddatensatz von QuikSCAT.

sehr stark um die 1:1 Linie streuen (besonders bei hohen  $N_2O$ -Konzentrationen). Die Korrelation liegt bei  $r = 0,69$  (statistisch signifikant). Auch hier sind die mit NCEP berechneten Werte größer als die von QuikSCAT. Aber das ist auch nicht verwunderlich, da die Eingangsgröße, die das Modell antreibt, der Wind bei NCEP schon größer war. Zum Schluss werden die berechneten Flüsse in nmol/m<sup>2</sup>s beider Rechnungen gegeneinander dargestellt und verglichen (Abbildung 3.7 a, b). Im Balkendiagramm von der Grafik 3.7 a) ist ersichtlich, dass die Flüsse von NCEP größer sind als die von QuikSCAT, besonders 2003 und Ende 2008. Größtenteils weisen sie den gleichen Trend auf und im Jahr 2006 stimmen sie sehr gut überein. In der Grafik 3.7 b) ist zu erkennen, dass bei niedrigen Flüssen streuen die Werte geringer und liegen gut auf der 1:1 Linie, jedoch bei großen Flüssen streuen sie sehr stark. Die Korrelation liegt bei  $r = 0,75$  (statistisch signifikant).

Im Vergleich beider Winddatensätze zeigte sich, dass die Winde von NCEP im mittel stärker sind als die von QuikSCAT und somit auch die berechneten Flüsse. Da die  $N_2O$  Konzentrationen an der Wasseroberfläche durch die windabhängigen Abklingfunktionen beeinflusst werden, ist es nicht verwunderlich warum die berechneten

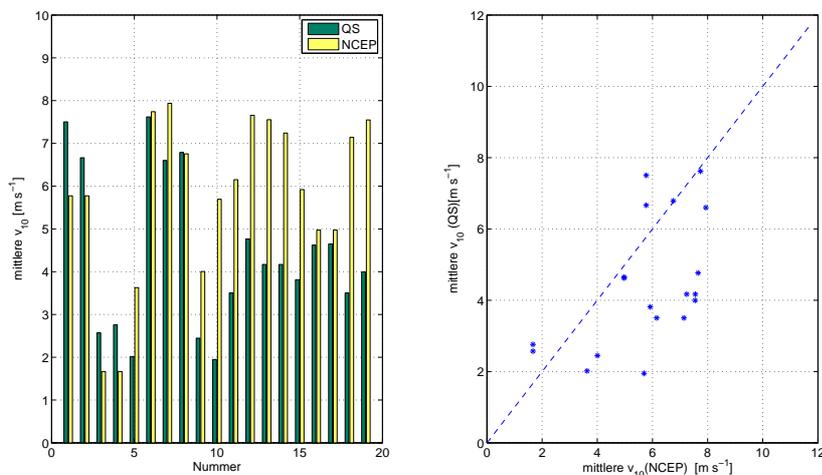


Abbildung 3.5: a) Vergleich der mittleren v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe von NCEP und QuikSCAT b) v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe von NCEP gegen die von QuikSCAT aufgetragen, zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie.

Flüsse von NCEP auch höher sind. Es wurde dargelegt, dass je stärker der Wind ist, desto mehr bleibt die ursprüngliche  $\text{N}_2\text{O}$  Konzentration erhalten. Das wiederum sorgt für einen stärkeren  $\text{N}_2\text{O}$  Gradienten zwischen Wasseroberfläche und darüberliegender Luftschicht und der berechnete Gasaustausch erhöht sich.

Hier werden zwei Dinge sichtbar. Zum einen, dass die Winddaten, die den gleichen Zeitpunkt beschreiben, sich doch sehr unterscheiden. Das kommt vor allem durch die zeitliche und räumliche Auflösung, aber auch durch die unterschiedliche Aufbereitung der Daten. Es zeigt sich, dass es entscheidend ist, welche Winddaten verwendet werden. Dabei ist es nicht zu entscheiden welcher Datensatz den tatsächlichen Windverhältnissen nahekommt.

### 3.2 Vergleich der berechneten Flüsse mit den Winddatensätzen NCEP und QuikSCAT mit der insitu-Messungen

Im Folgenden werden die Parameter Windgeschwindigkeit,  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration an der Oberfläche sowie berechnete Flüsse von NCEP und QuikSCAT mit den insitu-Messungen verglichen. Wie schon im Kapitel 2 stellen die insitu-Messungen in dieser

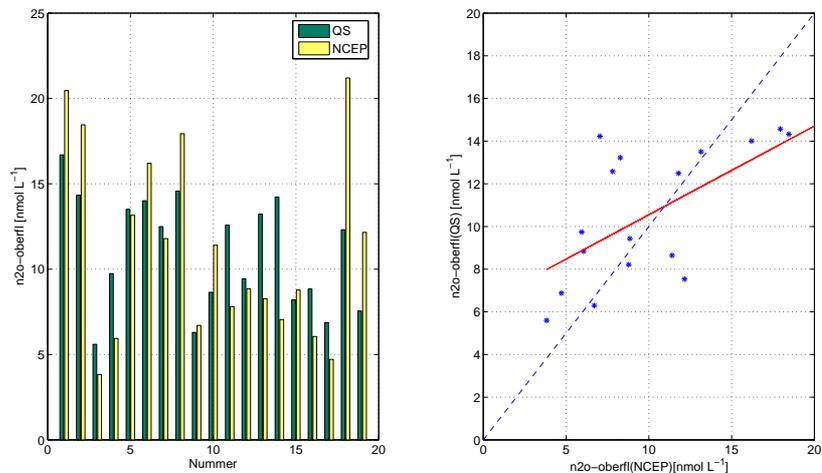


Abbildung 3.6: a) Vergleich der berechneten N<sub>2</sub>O-Konzentration an der Wasseroberfläche in nmol/L von NCEP und QuikSCAT b) berechneten N<sub>2</sub>O-Konzentration an der Wasseroberfläche in nmol/L von NCEP gegen die von QuikSCAT aufgetragen, zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie, sowie in rot die lineare Regressionsgerade.

Arbeit 100 % dar. Der Vergleich dient zur Evaluierung des Modells von *Nevison et al.* (2004).

### 3.2.1 Vergleich der berechneten Flüsse mit NCEP und der insitu-Messungen

Im Balkendiagramm der Abbildung 3.8 a) und noch mehr in 3.8 b) wird ersichtlich, dass die beiden Winddatensätze nur eine schwache lineare Abhängigkeit zeigen. Die Streuung um die 1:1 Linie ist stark und die Korrelation liegt bei  $r = 0.48$  (statistisch nicht signifikant,  $P < 0,95$ ). Das bedeutet, dass die jeweiligen Werte keinen linearen Zusammenhang aufweisen.

Im Folgenden werden die vom Modell berechneten N<sub>2</sub>O-Oberflächenkonzentrationen in nmol/L mit denen verglichen, die in die Berechnung mit den insitu-Messungen verwendet werden (Abbildung 3.9 a, b). Auch hier ist eine große Streuung um die 1:1 Linie zuerkennen. Ein linearer Zusammenhang ist nicht gegeben, da die Korrelation von  $r = 0,39$  unter dem 95 % Konfidenzintervall liegt.

Bei der Betrachtung der Flüsse in nmol/m<sup>2</sup>s zeigt sich ein ähnliches Bild, grafisch dargestellt in der Abbildung 3.10. In dieser Grafik werden die berechneten Flüsse von

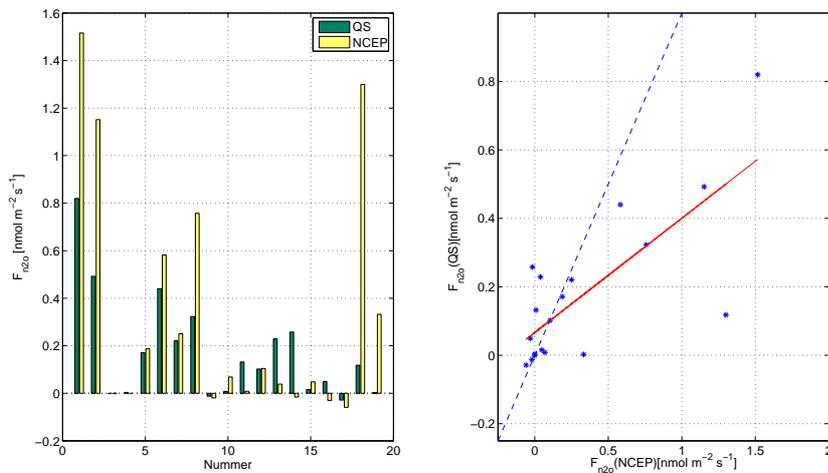


Abbildung 3.7: a) Vergleich der berechneten Flüsse in  $\text{nmol/m}^2\text{s}$  von NCEP und QuikSCAT b) berechneten Emissionen in  $\text{nmol/m}^2\text{s}$  von NCEP gegen die von QuikSCAT aufgetragen zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie sowie in rot durchgezogener Linie die Regressionsgerade

$\text{N}_2\text{O}$  mit den Winddaten von NCEP und der insitu-Flüsse miteinander verglichen. Wie schon im Vergleich mit QuikSCAT zu erkennen war, sind die erhöhten Flüsse dominierend (siehe Ende 2008 und 2007). Die kleineren Flüsse liegen leicht gestreut um die 1:1 Linie, während die größeren Flüsse deutlich von der 1:1 Linie abweichen. Die Korrelation beträgt  $r = 0,55$  und liegt damit im 95 % Konfidenzintervall und ist demzufolge signifikant.

Auch hier zeigt sich noch mehr wie im Kapitel zuvor wie sich die Winddaten, gemessen und modelliert, unterscheiden und es entscheidend ist welcher Zeitpunkt verglichen wird. Die letztendliche Berechnung des Gasaustausches ist die gleiche, nur dass das Modell die Oberflächenkonzentrationen berechnet und bei den insitu-Messungen dieser gemessen wird. Insgesamt unterscheiden sich beide Datensätze sehr. NCEP zeigt nicht grundsätzlich höhere Werte ist aber charakterisiert durch einzelnd erhöhte Flüsse, die eine linearen Zusammenhang erschweren.

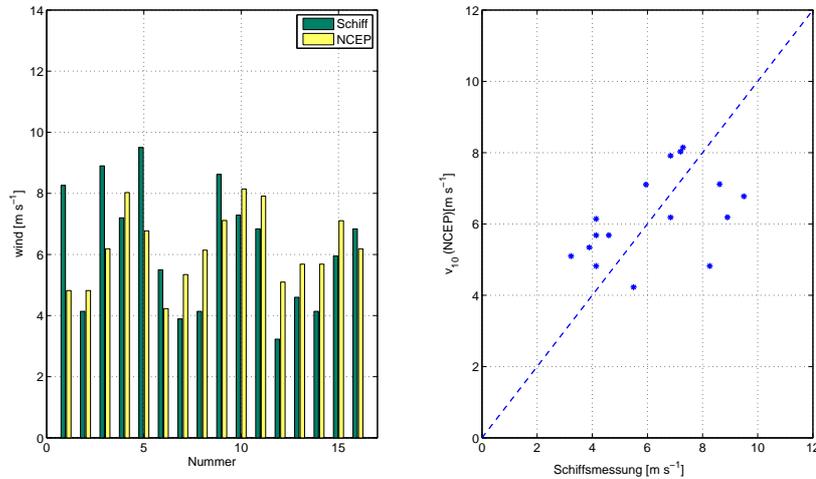


Abbildung 3.8: a) Vergleich der Schiffsdaten, die für die Berechnung der Insitu-Messungen verwendet werden in m/s in 10 Höhe und die v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe von NCEP, gemittelt über den jeweiligen Tag b) die v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe von NCEP gegen die Schiffsmessungen, beide in m/s, zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie.

### 3.2.2 Vergleich der berechneten Flüsse mit QuikSCAT und der insitu-Messungen

Die gleichen Parameter wie bei dem Vergleich zwischen den insitu-Messungen und den Ergebnissen mit dem Winddatensatz NCEP wurden nun auch bei der Gegenüberstellung mit QuikSCAT herangezogen. Die Abbildungen 3.11 a,b - 3.13 a,b zeigen ein ähnliches Verhalten wie bei dem Vergleich mit NCEP. Bei dem Vergleich von den Schiffswinden und den ermittelten von QuikSCAT (Abb. 3.11a, b), einen Wert pro Tag (nicht gemittelt), aufgrund der schlechteren zeitlichen Auflösung, zeigt sich eine starke Streuung um die 1:1 Linie. Das gleiche Verhalten wird auch bei dem nächsten Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen  $N_2O$ -Oberflächenkonzentrationen deutlich (Abb. 3.12 a,b). In der letzten Abbildung 3.13 a,b zeigt sich, dass die Werte im Vergleich mit NCEP besser übereinstimmen, trotzdem besitzen die QuikSCAT-Werte im Vergleich zu den insitu-Flüssen ebenfalls einzeln erhöhte Werte, die aber nicht so stark ausgeprägt sind wie bei NCEP. Vereinzelt weisen beide Datensätze einen ähnlichen Wert auf, größtenteils unterscheiden

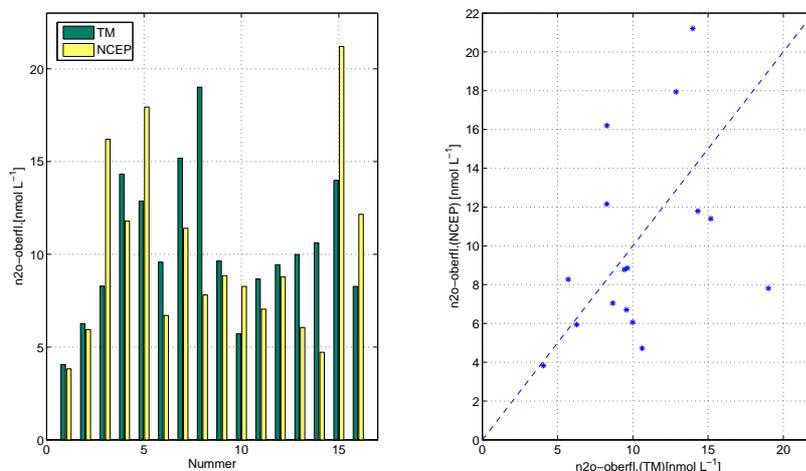


Abbildung 3.9: a) Vergleich der N<sub>2</sub>O-Konzentration an der Oberfläche gemessen für die Berechnung für die Insitu-Messungen und die berechneten mit NCEP in nmol/L b) N<sub>2</sub>O-Konzentration an der Oberfläche berechnet mit NCEP gegen gemessene für die Berechnung für die Insitu-Messungen dargestellt, zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie.

sie sich aber, was in der starken Streuung um die 1:1 Linie in der Grafik 3.13 b) zu erkennen ist. Insgesamt kann zwischen den einzelnen verglichenen Parametern kein linearer Zusammenhang gefunden werden. Die Korrelationen sind dabei geringer als bei NCEP und liegen alle unterhalb des 95 % Konfidenzintervalls und sind somit nicht signifikant. In diesem Kapitel wird deutlich, dass weder die berechneten Emissionen von NCEP noch von QuikSCAT mit denen mit den insitu-Flüssen übereinstimmen. Die unterschiedlichen Gleichgewichtswerte sind dabei nur ein minimaler Fehler. Exakt die Werte der insitu-Messungen können nicht aus dem Modell resultieren, da der größte Unterschied im Input Wind liegt und den daraus resultierenden Berechnungen für die N<sub>2</sub>O-Oberflächenkonzentrationen. Dabei ist der gewählte Zeitpunkt entscheidend. Auch hier zeigt sich, dass der Wind eine große Unsicherheit darstellt. Es gibt keine 100 % Übereinstimmung zwischen Windbeobachtungen und beispielsweise modellierten Winden. Der Vergleich hat aber auch gezeigt, dass die Größen der einzelnen berechneten Parameter in etwa gleich sind. Es ist interessant wie sehr sich die Winddaten unterscheiden und wie sie mit ihren Vor- und Nachteilen den Charakter der Emissionen beeinflussen (Tabelle 2.2).

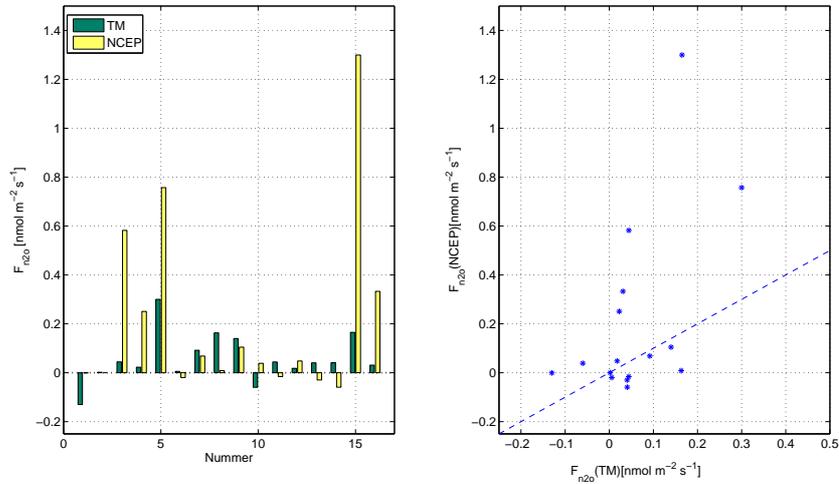


Abbildung 3.10: a) Vergleich der In situ-Flüsse mit den berechneten von NCEP in  $\text{nmol/m}^2\text{s}$  b) berechnete Flüsse von NCEP gegen die In situ-Flüsse dargestellt zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie.

### 3.3 Berechnung der Flüsse extrapoliert auf ein Jahr

Es ist nicht nur interessant zu wissen wie viel  $\text{N}_2\text{O}$  zu einem gegebenen Zeitpunkt emittiert werden, sondern auch wie viel binnen eines Jahres. Es können somit Abschätzungen vorgenommen werden, wie viel Stickstoff in Form von  $\text{N}_2\text{O}$  dem marinen Stickstoffkreislauf vor Mauretania entzogen wird. Im folgenden Kapitel werden die Winddaten (NCEP, QuikSCAT) für das entsprechende Kalenderjahr betrachtet und für die Modellberechnung verwendet, um Jahresflüsse für zu berechnen. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

1. Die  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration in 100 m entspricht dabei dem Mittelwert aus den vorhandenen Daten in 100 m aus den jeweiligen Jahren.
2. Damit Auftrieb statt finden kann, muss zum einen eine Windgeschwindigkeit von  $v_{critical} = 4,6 \text{ m/s}$  überschritten werden und zum anderen muss der Wind drei Tage lang stetig wehen.  $v_{critical}$  wurde wie folgt berechnet:

$$v_{critical} = \sqrt{\frac{w_{crit} \rho_w f R_b}{\rho_a C_d}} \quad (21)$$

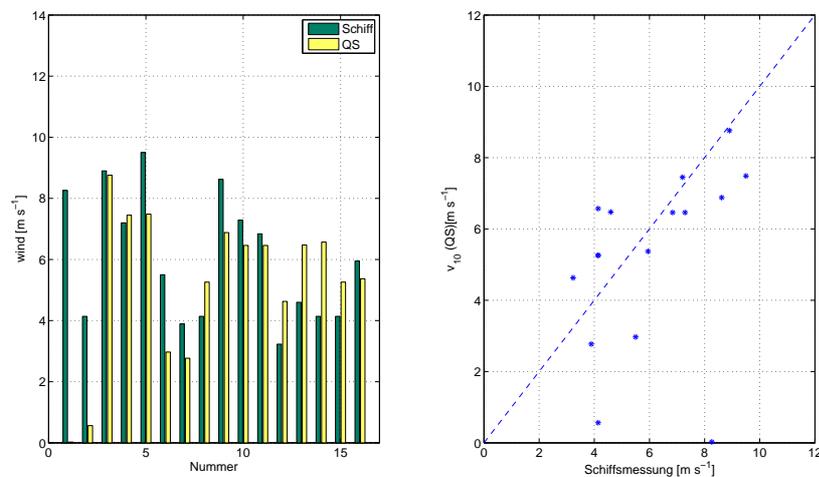


Abbildung 3.11: a) Vergleich der Schiffsdaten, die für die Berechnung der In situ-Messungen verwendet werden in m/s in 10 Höhe und die v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe QuikSCAT, gemittelt über den jeweiligen Tag b) die v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe von QuikSCAT gegen die Schiffsmessungen, beide in m/s, zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie

dabei wurden die Daten von  $w_{crit}$ ,  $\rho_w$ ,  $R_b$  und  $\rho_a$  von Kapitel 4 übernommen und für  $f$  und  $C_d$  wurde ein mittlerer Wert von  $f = 4,55$  1/s und  $C_d = 0,0012$  angenommen.

Am Beispiel des Jahres 2008 werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der berechneten Emissionen mit den Winddaten NCEP und QuikSCAT sichtbar.

### 3.3.1 Berechnung der Jahresflüsse mit NCEP

Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung wurde für die Berechnung des Jahresflusses die Küstenauftriebsregion in drei Teile gegliedert, da nur drei NCEP-Punkte im Bereich des Kontinentalhangs liegen (Abbildung 3.14). Diese Einteilung wurde in der Art und Weise getroffen, dass die NCEP-Windkoordinate etwa im Zentrum der betrachteten Fläche liegt. Dabei weisen die Regionen eins bis drei unterschiedliche Flächeninhalte auf und sind von Nord nach Süd nummeriert.

Im Diagramm 3.15 ist die Schwankung der v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe im Jahr 2008 für die drei verschiedenen Regionen grafisch dargestellt. Die

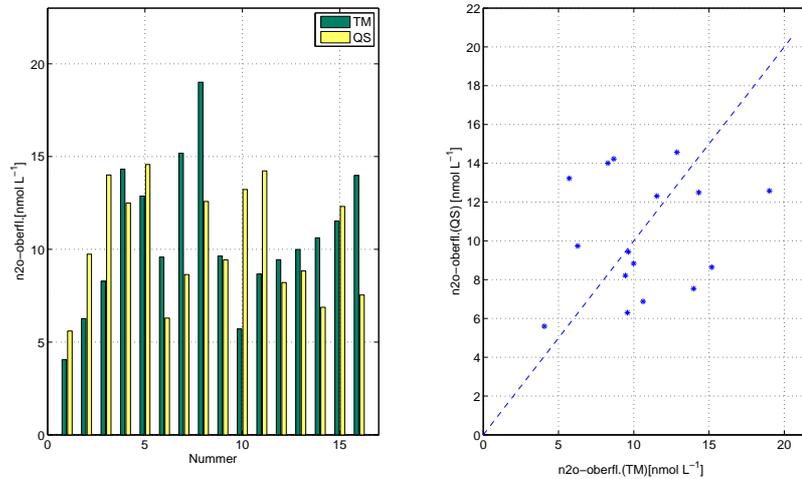


Abbildung 3.12: a) Vergleich der N<sub>2</sub>O-Konzentration an der Oberfläche gemessen für die Insitu-Messungen und berechnet mit den Winddaten QuikSCAT in nmol/L b) N<sub>2</sub>O-Konzentration an der Oberfläche berechnet mit QuikSCAT gegen gemessene für die Insitu-Messungen dargestellt, zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie.

Lücken stellen dabei die Zeiten dar, deren Windgeschwindigkeit unter dem  $v_{critical}$  liegen. Zu erkennen ist zum einen, dass diese Lücken, von Region 1 zu 3 größer und zahlreicher werden und zum anderen die Zunahme der Saisonalität Richtung Süden mit einem Maximum im April bis Mai und November bis Januar zu verzeichnen ist. Diese Saisonalität im Jahrgang zeigt, dass im Norden der betrachteten Region fast ganzjährig Auftrieb möglich ist und weiter südlich verschwindet. Dort sind von Juli bis September, die Windgeschwindigkeiten zum größten Teil zu gering, um Küstenauftrieb zu ermöglichen. Die Grafik 3.16 zeigt den Jahrgang der berechneten Emissionen und spiegelt wieder, was zuvor in den Windgeschwindigkeiten erkennbar wurde. In der Region 1 sind die berechneten Emissionen in den Monaten März bis Ende Juni sowie September bis Dezember zu finden. Nicht ganzjährig, da die NCEP-Windkoordinate zu weit südlich liegt (20 °N, 17.9 °W) und somit die Saisonalität schon zu stark zu erkennen ist. In den beiden anderen Regionen ist zu erkennen, dass es eine Verschiebung der Emissionen zu Februar bis Mitte/Anfang Juni, sowie Oktober bis Dezember gibt. Interessant ist, dass in der ersten Region im Februar die Flüsse sehr gering zum Teil auch negativ sind, jedoch in der zweiten und dritten

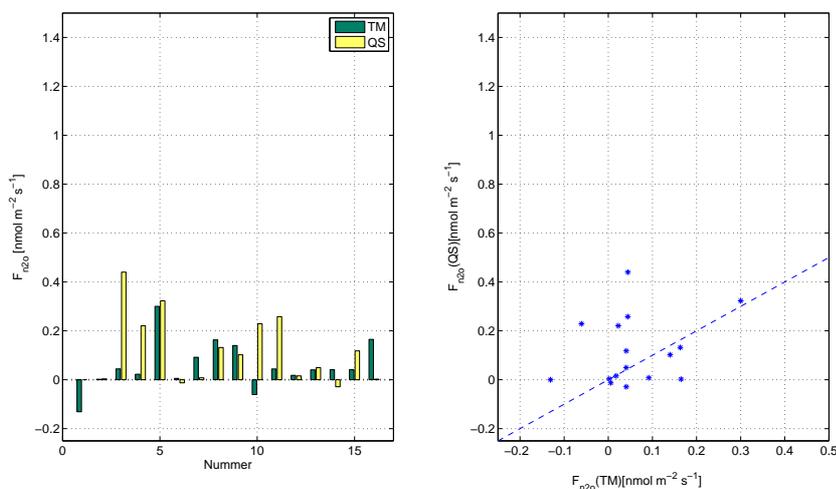


Abbildung 3.13: a) Vergleich der In situ-Flüsse mit den berechneten von QuikSCAT in  $\text{nmol/m}^2\text{s}$  b) berechnete Flüsse von QuikSCAT gegen die In situ-Flüsse dargestellt zusätzlich gestrichelt eingezeichnet die 1:1 Linie.

die Emissionen stark ausgeprägt sind. Die Zeiten, in denen die Auftriebsbedingungen nicht erfüllt sind, und somit keine Emissionen berechnet werden können, werden von der 1. zur 3. Region immer ausgeprägter.

### 3.3.2 Berechnung der Jahresflüsse mit QuikSCAT

Auch für die Berechnung der Emissionen für das Jahr 2008 mit dem Winddatensatz von QuikSCAT wurde der Kontinentalhang vor Mauretanien in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung der Winddatenpunkte in Regionen eingeteilt. Die Grafik 3.17 zeigt, dass aufgrund der guten räumlich Auflösung eine Einteilung in 10 Regionen á  $0,5^\circ$  möglich ist. Die Flächen sind von Nord nach Süd nummeriert. Der Vorteil dabei ist, dass das räumliche Verhalten der Windgeschwindigkeit und der berechneten Emissionen besser zu verfolgen ist. Für jeden einzelnen Windpunkt wurden die Emissionen für das gesamte Jahr berechnet und dann über die Anzahl der in dieser jeweiligen Region vorkommenden Winddatenpunkte gemittelt.

Zuerst wird die  $v$ -Komponente in 10 m Höhe in  $\text{m/s}$  für 2008 für die verschiedenen Regionen betrachtet (Grafik 3.18). Die Lücken zeigen zum einen das Fehlen an Daten sowie die Zeiten bei denen die Windgeschwindigkeit unter  $v_{\text{critical}}$  liegt. Zu erkennen ist, wie auch schon bei NCEP, die zunehmende Saisonalität innerhalb des

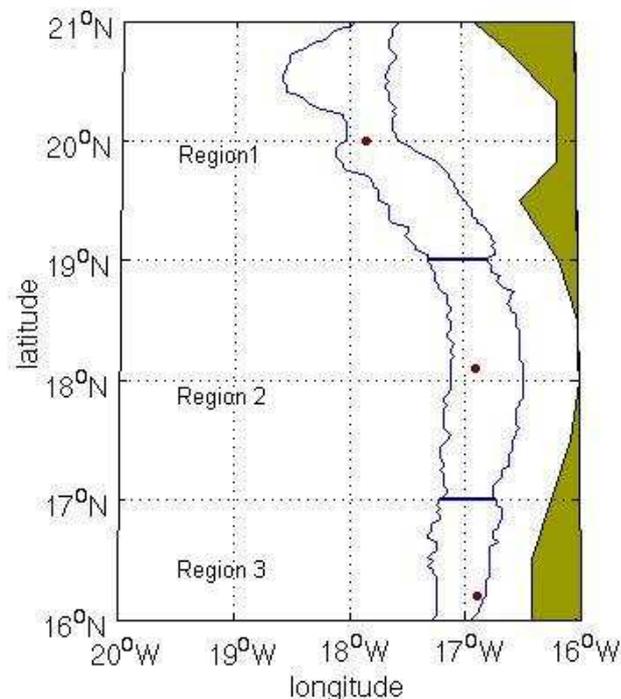


Abbildung 3.14: Schematische Darstellung der Region vor Mauretanien. Ein-gezeichnet in Punkten die NCEP-Koordinaten und in blau die Küstenauftriebsregion, sowie deren Unterteilung in 3 Regionen. Die gegliederten Bereiche weisen unterschiedliche Flächeninhalte auf.

Jahres Richtung Süden. Der Übergang von ganzjährig starken Winden, die Küstenauftrieb ermöglichen, zu einsetzender Saisonalität ist zwischen der 2. ( $20,5^\circ\text{N}$ ) und 3. ( $20^\circ\text{N}$ ) Region zu erkennen. Ab der dritten Region gibt es einen Einbruch der Windgeschwindigkeiten um den Zeitraum Juli-September. Ebenfalls nimmt die Intensität der Windgeschwindigkeit von Nord nach Süd ab und es kristallisieren sich zwei Maxima im Frühling und Herbst heraus.

Mit Hilfe dieser Winddaten werden nun die Emissionen in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für das Jahr 2008 berechnet. Diese sind in der Abbildung 3.19 grafisch dargestellt. Dabei gelten die gleichen Bedingungen wie für NCEP. Die Reihenfolge der Regionen ist dabei die gleiche, wie bei der Grafik 3.18. Auch hier bestätigt der Verlauf der berechneten Emissionen die zuvor betrachteten Windgeschwindigkeiten. Von Nord nach Süd ist zu erkennen, dass sich das Maximum im Juli-August ab der ersten Region abbaut und der Zeitraum, an dem der Fluss Null ist, sich ausbreitet und sich somit

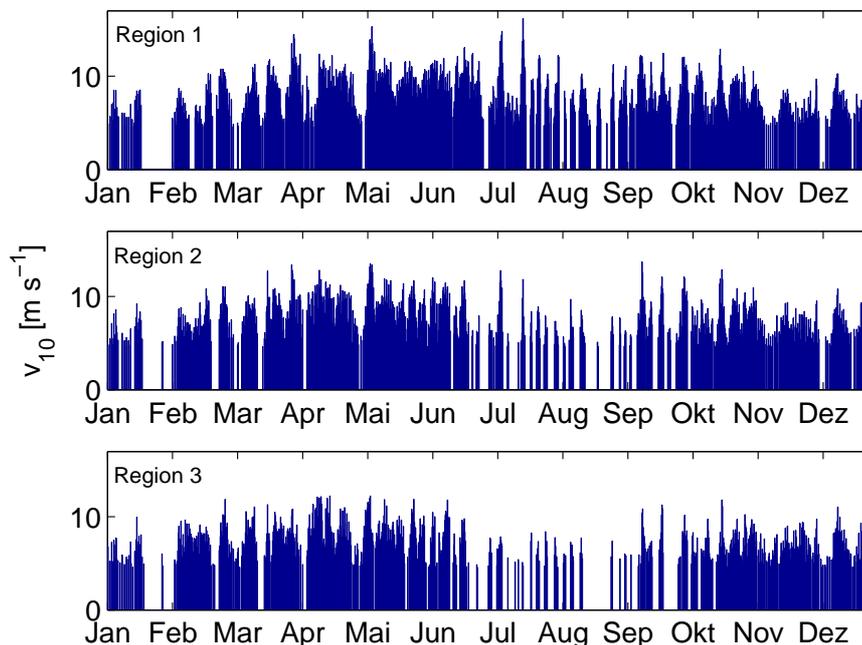


Abbildung 3.15: Darstellung der  $v$ -Komponente des Windes von NCEP für das Jahr 2008 in  $\text{m/s}$  in 10 m Höhe alle 4 h. Eingeteilt in drei Regionen von Nord nach Süd.  $v_{10} = 0$  beschreibt die Zeiten an denen  $v_{critical}$  unterschritten wird.

zwei Maxima im Frühling und im Herbst herauskristallisieren. Diese Lücke, breitet sich Richtung Süden weiter aus und die Zeiten an denen Flüsse berechnet werden können, wird geringer. In der ersten und zweiten Region ist gut zu sehen, dass ganzjährig Auftrieb herrscht und  $\text{N}_2\text{O}$  ganzjährig emittiert wird. Ebenfalls nimmt die Amplitude von Nord nach Süd ab.

### 3.3.3 Vergleich der Jahresflüsse berechnet mit NCEP und mit QS

Damit ein Vergleich zwischen QuikSCAT und NCEP möglich wird, wird die Küstenauftriebsregion für die QuikSCAT-Daten ebenfalls in drei Teile wie bei NCEP gegliedert (Abbildung 3.14). Die in der jeweiligen Region berechneten Emissionen werden gemittelt und mit Hilfe von Histogrammen mit denen von NCEP verglichen. Die Grafiken 3.20 (NCEP) und 3.21 (QuikSCAT) zeigen die Verteilung (PDF) der  $v$ -Komponente des Windes in  $\text{m/s}$  in 10 m Höhe während des Jahres 2008. Beide

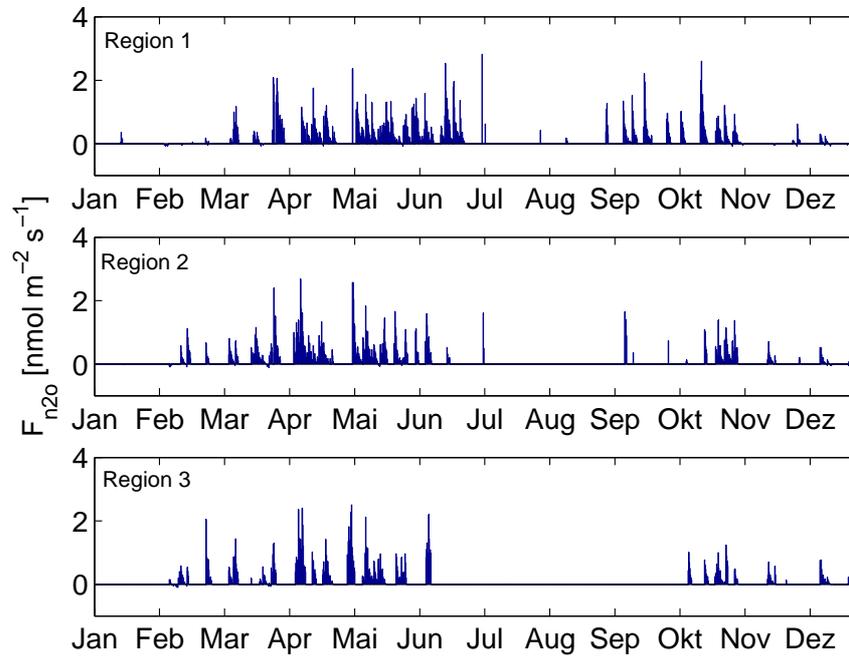


Abbildung 3.16: Berechnete Emissionen mit den Winddaten von NCEP für das gesamte Jahr 2008 in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$ . Eingeteilt in drei Regionen von Nord nach Süd.  $F_{n2o} = 0$  gibt die Zeiten an, an denen die Windgeschwindigkeit unter  $v_{critical}$  ist.

PDF sind in Prozent angegeben, das heißt wie oft eine gewisse Windgeschwindigkeit im gesamten betrachteten Jahr eingetreten ist. Dabei werden die Tage mitberücksichtigt an denen  $v_{critical}$  nicht überschritten worden ist. Außerdem ist mit rot durchgezogener Linie der Median und rot gestrichelter Linie der Mittelwert eingetragen. Die Breite der Verteilung nimmt von der ersten zur dritten Region ab, wobei die PDF bei NCEP generell breiter ist als bei QuikSCAT. Dies hat zur Folge, dass es nach Norden hin immer weniger hohe Windgeschwindigkeiten gibt. Der Mittelwert ist bei beiden Grafiken zum Teil ein wenig größer als der Median, was für eine leichte negative Schiefe (Linksschiefe) spricht. Die Extremwerte liegen dabei auf der rechten Seite der Verteilung, das heißt zu höheren Windgeschwindigkeiten. Von Region eins zu drei ist eine Verschiebung des Mittelwertes und des Median zu niedrigeren Windgeschwindigkeiten zu erkennen, was mit der schmäler werdenden PDF einhergeht. Dabei unterscheiden sich NCEP und QuikSCAT in der Größe der

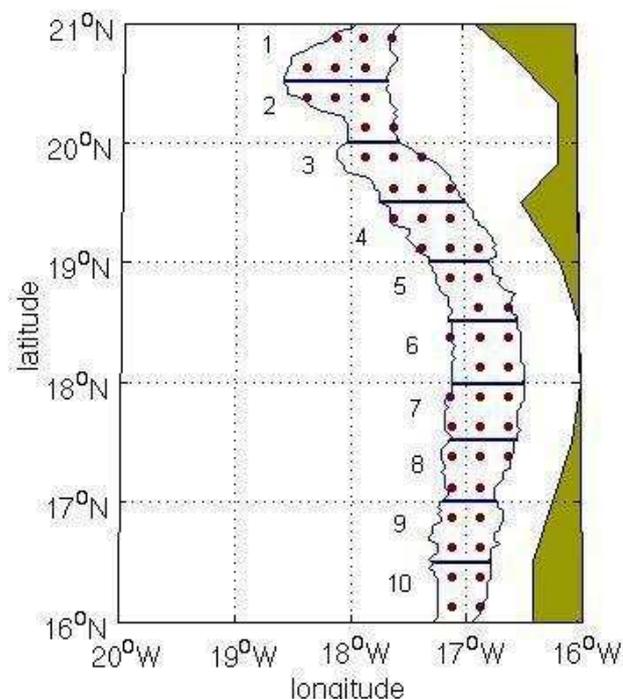


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung der Region vor Mauretanien. In Punkten dargestellt sind die QuikSCAT-Koordinaten und in blau die Küstenaufrichtsregion, sowie deren Unterteilung in 10 Regionen von Nord nach Süd. Die gegliederten Bereiche weisen unterschiedliche Flächeninhalte auf.

berechneten Momente. Der Mittelwert bei NCEP verlagert sich von der ersten zur dritten Region von ca. 8 m/s zu 7,3 m/s, bei QuikSCAT dagegen von ca. 7,6 m/s zu 6,5 m/s. Die v-Komponente der Windgeschwindigkeiten nehmen während des gesamten Jahres 2008 bei NCEP größere Werte an als bei QuikSCAT an und die Windgeschwindigkeiten verringern sich deutlich von Nord nach Süd. Auffällig ist, dass die Verteilung von QuikSCAT im Vergleich zu NCEP, die sehr regelmäßig ist, stark in der Häufigkeit der einzelnen Windgeschwindigkeiten variiert. Ein Grund dafür kann die Mittelung über die große Fläche sein. Wie bereits im Kapitel zuvor analysiert wurde, schwankt die Größe der Windgeschwindigkeiten schon ab dem 20. Breitengrad mit einsetzender Verstärkung der Saisonalität. Aufgrund der Mittelung über das große Gebiet, kann es daher zu diesen Streuungen in den prozentualen Anteilen kommen und somit ein Indiz geben, dass der Wind räumlich sehr variabel ist.

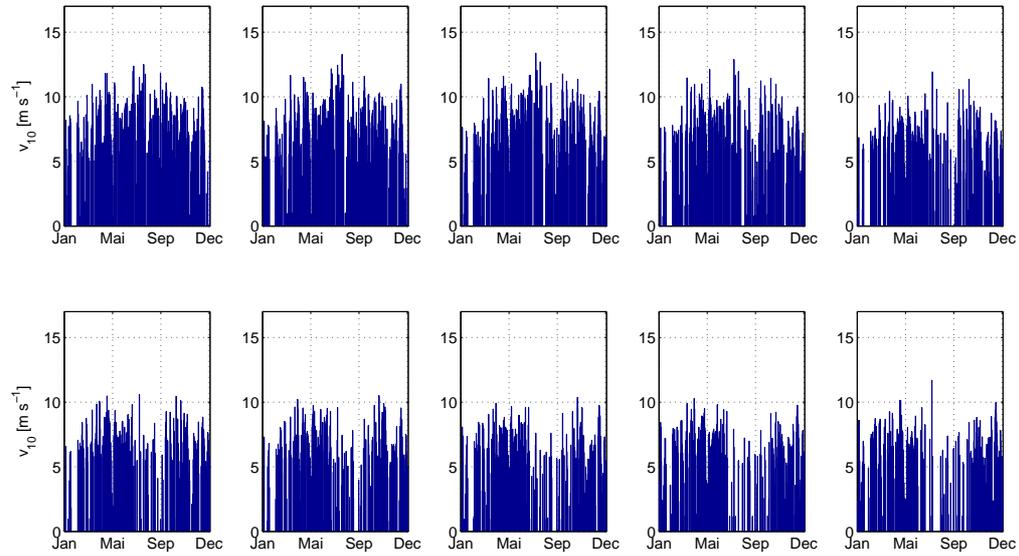


Abbildung 3.18: Darstellung der täglichen  $v$ -Komponente des Windes von QuikSCAT in  $\text{m/s}$  in 10 m Höhe für das Jahr 2008. Lücken weisen auf fehlende Daten sowie Windgeschwindigkeiten unter  $v_{critical}$  hin. Unterteilung in 10 Regionen, erste Zeile zeigt die Regionen 1 bis 5 und die zweite die Regionen 6 bis 10.

Mit diesen Windgeschwindigkeiten wurden die Emissionen für das Jahr 2008 berechnet und werden nun miteinander verglichen. Die Abbildung 3.20 (NCEP) sowie die Grafik 3.21 (QuikSCAT) zeigen für jede Region die jeweils berechnete Emissionen in  $\text{nmol/m}^2\text{s}$  für das Jahr 2008 in einem Häufigkeitsdiagramm. Die Grafik ist dargestellt in Prozent, das heißt, wie oft eine gewisse Emission im gesamten betrachteten Jahr eingetreten ist. Die Tage an denen kein Fluss berechnet werden konnte, aufgrund von Windgeschwindigkeiten unter  $v_{critical}$ , sowie das Vorhandensein von Datenlücken, wurde bei der Erstellung des Histogramms mitberücksichtigt. Auch hier nimmt der Median deutlich kleinere Werte an als der Mittelwert, was für eine negative Schiefe spricht (Linksschiefe). Eine Verschiebung, wie sie bei der Windgeschwindigkeit der  $v$ -Komponente zu erkennen war, gibt es hier kaum. Der Mittelwert von den NCEP-Daten ist bei der Betrachtung von der ersten zur dritten Region nahezu konstant bei  $0,4 \text{ nmol/m}^2\text{s}$  und der Median schwankt ebenfalls nur leicht von  $0,26 \text{ nmol/m}^2\text{s}$  zu  $0,29 \text{ nmol/m}^2\text{s}$ . Bei QuikSCAT ist eine markante Ver-

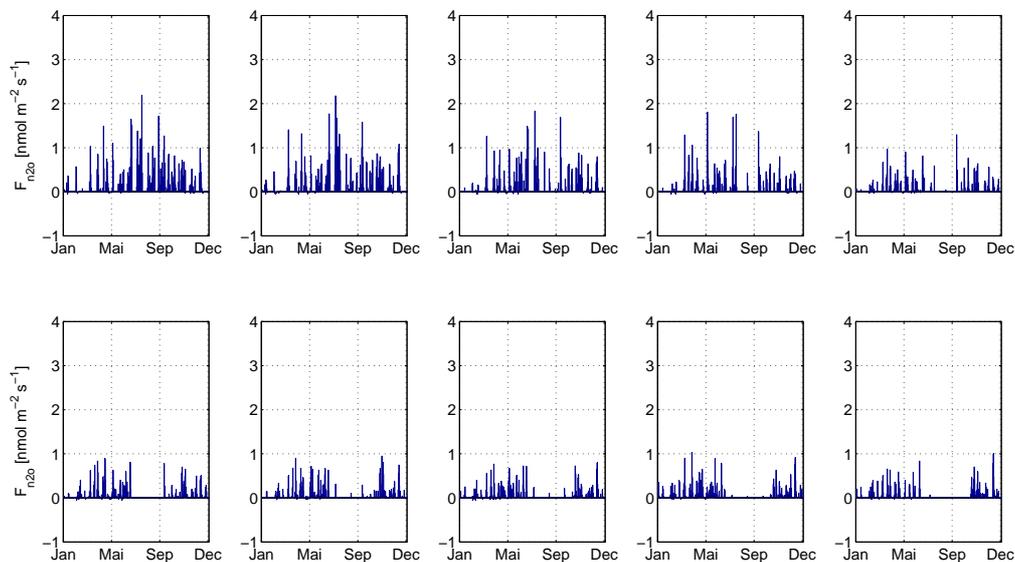


Abbildung 3.19: Darstellung der berechneten Emissionen mit den Winddaten von QuikSCAT für das Jahr 2008 in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$ . Lücken weisen auf fehlende Daten sowie Windgeschwindigkeiten unter  $v_{critical}$  hin. Unterteilung in 10 Regionen, erste Zeile zeigt die Regionen 1 bis 5 und die zweite die Regionen 6 bis 10.

schiebung von der ersten zur zweiten Region zu erkennen. Der Median verlagert sich von  $0,13 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$  zu  $0,08 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$  und der Mittelwert von  $0,26 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$  zu  $0,15 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$ . Die dritte Region nimmt dabei ähnliche Werte an wie die Zweite. Auch hier zeigt sich das die berechneten Flüsse von QuikSCAT kleiner sind als die von NCEP und zwar in jeder Region. Gut zu sehen ist dies zum einen in der Breite der Verteilung, die von der ersten zur dritten Region abnimmt, als auch in der Größe der Werte. Bei QuikSCAT ist der prozentuale Anteil bei sehr geringen Flüssen größer als bei NCEP. Diese Anteile werden von der ersten zur dritten Region geringer, was mit der geringer werdenden Windgeschwindigkeit einhergeht. Die Verteilung von NCEP, die wieder sehr viel glatter ist als bei QuikSCAT, ist dabei sehr viel breiter. Es treten mehr höhere Flüsse auf als bei QuikSCAT. Es ist erwähnenswert, dass die Datenlücken, das heißt die Zeiträume an denen keine Daten vorhanden sind, bei QuikSCAT von der ersten zur dritten Region zunehmen, von rund 11 % auf 29 %. Hier spiegelt sich das schon im Kapitel 3 gezeigte Verhalten beider Winddatensätze

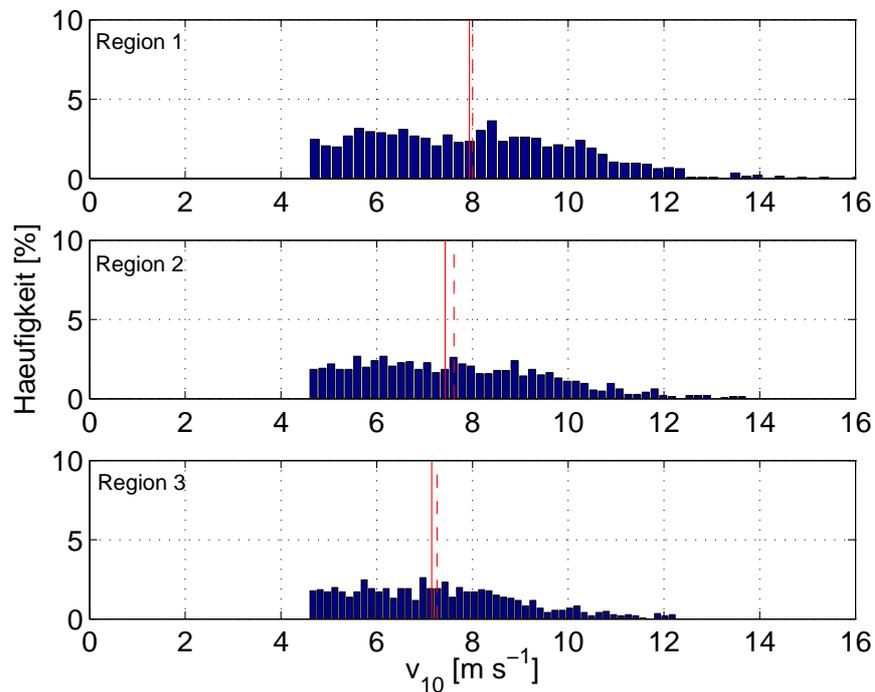


Abbildung 3.20: NCEP, Verteilung der  $v$ -Komponente des Windes in  $\text{m/s}$  in 10 m Höhe während des Jahres 2008. In Prozent dargestellt, das heißt wie oft eine gewisse Windgeschwindigkeit im gesamten betrachteten Jahr eingetreten ist, die rot gestrichelt zeigt den Mittelwert der Verteilung und in rot durchgezogener Linie der Median.

wieder, dass die NCEP-Winde vom Betrag größer sind als die von QuikSCAT. Jedoch kann aufgrund von der erfolgten Mittelung die Werte von QuikSCAT sich verkleinert haben. Wegen der geringen Windgeschwindigkeiten von QuikSCAT werden auch die berechneten Flüsse, im Vergleich zu den mit NCEP ermittelten, niedriger.

Auf diese Art und Weise wurde für jedes einzelne Kalenderjahr, das heißt für 2003, 2006, 2007 und 2008 die Emissionen jeweils mit NCEP und mit QuikSCAT berechnet. Diese werden im Folgenden gegeneinander dargestellt und ihr räumliches Verhalten analysiert. In Grafik 3.24 ist der Fluss berechnet mit den Winddaten von NCEP in  $\text{g N}_2\text{O-N/a}$  für die jeweilige Region unabhängig von der Fläche dargestellt. Es ist auffällig, dass die NCEP-Jahresemissionen um fast eine Größenordnung größer sind als die von QuikSCAT. Charakteristisch bei NCEP ist die fast linear abfallenden Emissionen von der ersten zur dritten Region in allen Jahren, aufgrund der

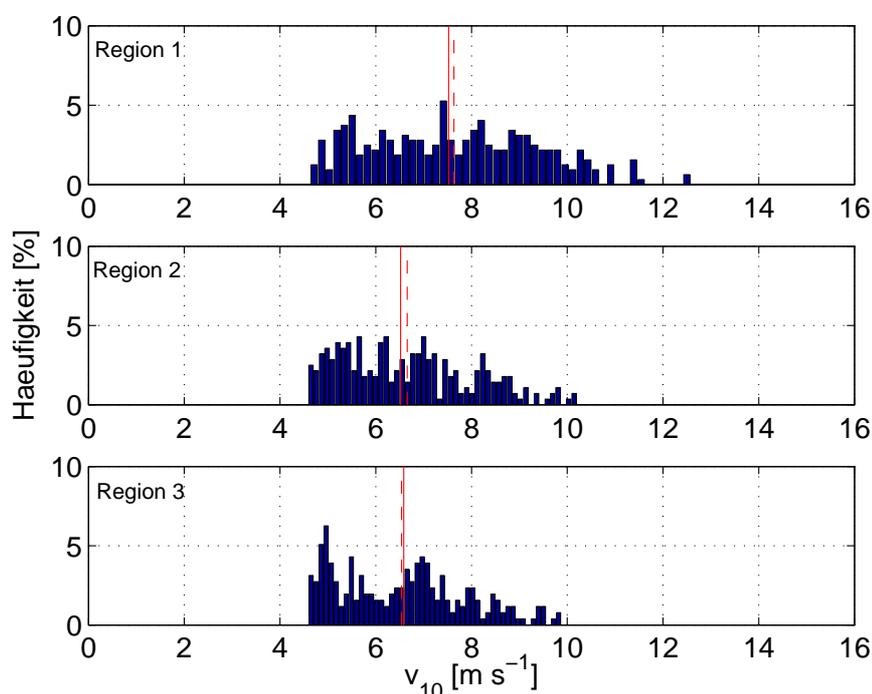


Abbildung 3.21: QuikSCAT, Verteilung der v-Komponente des Windes in  $\text{m/s}$  in 10 m Höhe während des Jahres 2008. In Prozent, das heißt wie oft eine gewisse Windgeschwindigkeit im gesamten betrachteten Jahr eingetreten ist. in rot gestrichelt dargestellt der Mittelwert der Verteilung und in rot durchgezogener Linie der Median.

immer stärker einsetzenden Saisonalität des Auftriebes. Viel hochaufgelöster sind die Emissionen bei QuikSCAT zu erkennen (Grafik 3.25), der den gleichen Trend aufweist wie NCEP. In der Abbildung 3.25 sind die Flüsse berechnet wurden mit den Winddaten von QuikSCAT in  $\text{g N}_2\text{O-N/a}$  für die jeweilige Region 1 bis 10 und das jeweilige Jahr, grafisch dargestellt, ebenfalls unabhängig von der Fläche. Bemerkenswert ist, dass zwischen der dritten und vierten Region der Abfall am stärksten ist, also womöglich die Region abgrenzt zwischen jährlichen Küstenauftrieb und damit verbunden ganzjährigen Emissionen zu der immer mehr einsetzender Veränderung des Windfeldes. Aus diesem Grund weist die Kurve in der ersten und zweiten Region ein Plateau auf, der dann verbunden ist mit einem Rückgang der Emissionen, die dann ab der sechsten Region gleich bleibt. Bis auf das Jahr 2006 weisen alle Jahre in der neunten Region einen kleinen Anstieg der Emissionen auf der dann in der 10.

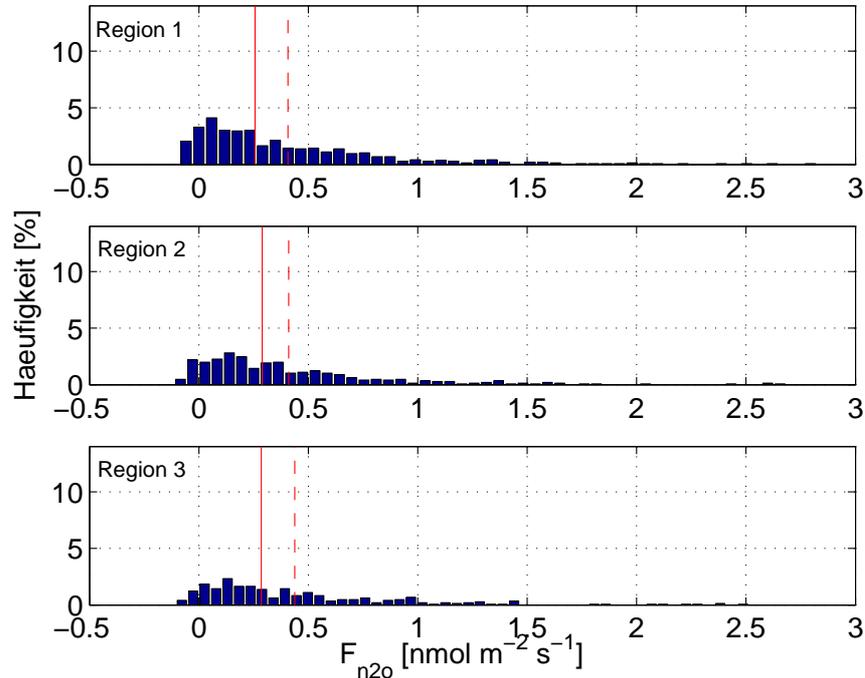


Abbildung 3.22: Mit NCEP berechnete Emissionen in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für das Jahr 2008. Dargestellt in Prozent, das heißt wie oft eine gewisse Emission im gesamten betrachteten Jahr eingetreten ist. In rot gestrichelt dargestellt der Mittelwert der Verteilung und in rot durchgezogener Linie der Median.

Region wieder schwächer wird. Der hochaufgelöste Datensatz von QuikSCAT macht es möglich, einen genaueren Einblick in die räumliche Abhängigkeit der Jahresflüsse in der Küstenauftriebsregion zu geben. Die Aussage die mit dem Winddatensatz NCEP erlangt werden kann, ist dabei verhältnismäßig gering.

Im Folgenden werden nun die Gesamtemissionen der jeweiligen Kalenderjahre, die mit den Winddatensätzen von NCEP und QuikSCAT berechnet wurden, mit der von Nevison et al. 2004 berechneten Gesamtemission verglichen. Hochgerechnet auf die Fläche der betrachteten Küstenauftriebsregion ( $3,7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ) wurde mit NCEP und QuikSCAT die folgenden Emissionen in  $\text{Gg N}_2\text{O-N/a}$  für die verschiedenen Jahre berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 3.1 dargestellt. Zusätzlich wird der maximale Fehler aus der Fehlerfortpflanzung aufgeführt (siehe nächstes Kapitel). Nevison et al. (2004) hat für die Berechnung der Emission, dass in dieser Arbeit verwendete Modell mit den Winddatensätzen von NCEP und QuikSCAT benutzt,

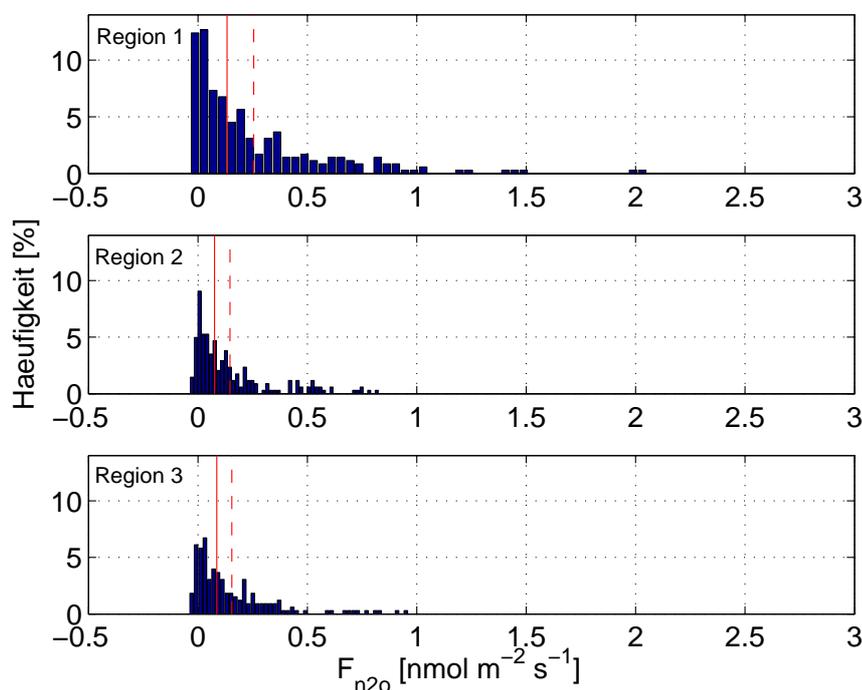


Abbildung 3.23: Mit QuikSCAT berechnete Emissionen in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für das Jahr 2008. Dargestellt in Prozent, das heißt wie oft eine gewisse Emission im gesamten betrachteten Jahr eingetreten ist, in rot gestrichelt dargestellt der Mittelwert der Verteilung und in rot durchgezogener Linie der Median.

jedoch mit unterschiedlichen Konzentrationen in 100 m, unterschiedlichen Salzgehalten und Temperaturen an der Oberfläche. Die berechnete Emission von Nevison et al. 2004 beträgt  $F_{n2o} = 22 \text{ Gg N}_2\text{O-N/a}$  für eine Fläche von  $5^\circ\text{N}$  bis  $30^\circ\text{N}$ , was eine Region von  $2,4 \times 10^5 \text{ km}^2$  einschließt. Es ist dabei unklar wie weit die Küste entfernt ist. Runtergerechnet auf die Fläche, die in dieser Arbeit verwendet worden ist ergibt sich eine Gesamtemission von  $3,4 \text{ Gg N}_2\text{O-N/a}$  für das Jahr 2000.

Auffällig ist zum einen, dass die Emissionen mit NCEP vier- bis fünfmal so groß sind wie die berechneten mit QuikSCAT. Was angesichts der bisherigen Ergebnisse nicht überrascht. Im Vergleich zu *Nevison et al.* (2004), die eine Gesamtemission von  $3,4 \text{ Gg N}_2\text{O-N/a}$  aufweist, liegt der Wert zwischen den von NCEP und QuikSCATs berechneten Gesamtemissionen. Bei der Berechnung von *Nevison et al.* (2004) wurde der Transferkoeffizient  $k$  von *Wanninkhof* (1992) verwendet, der (Kapitel 2.1.3) einen steileren Verlauf in Abhängigkeit vom Wind darstellt als der Transferkoeffizient von

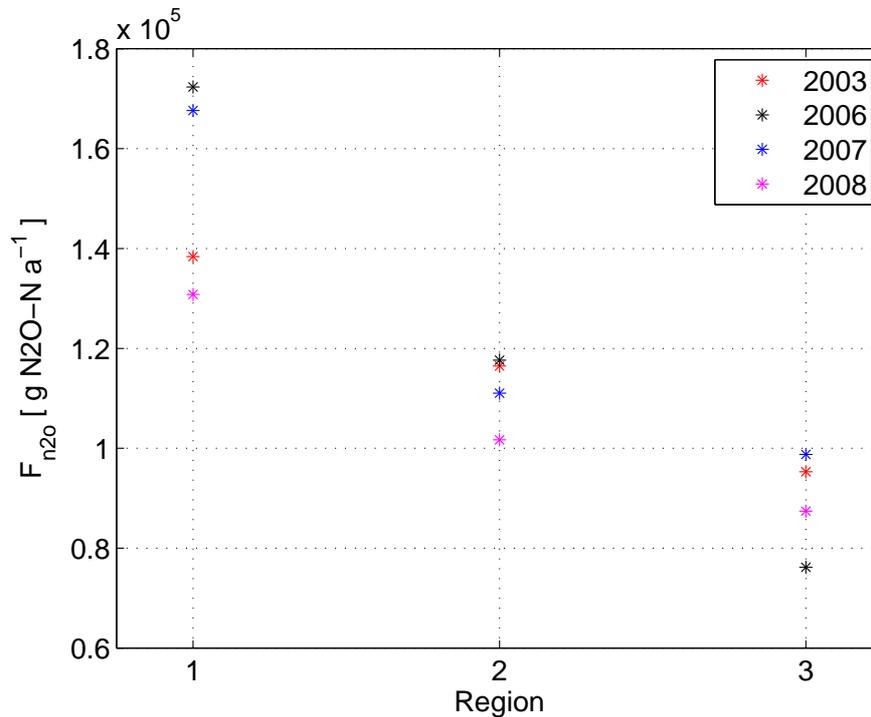


Abbildung 3.24: Berechnete Emissionen mit den Winddaten NCEP in g N<sub>2</sub>O-N/a für die Regionen eins bis drei für die Jahre 2003, 2006, 2007 und 2008 unabhängig von der Fläche

*Nightingale P. D.* (2000). Die Emissionen von *Nevison et al.* (2004) würden bei Verwendung der Parametrisierung von *Nightingale P. D.* (2000) sich erniedrigen und sich somit den QuikSCAT-Daten annähern. Ebenso sollte beachtet werden, dass die Emissionen, die in dieser Arbeit berechnet worden sind, im sogenannten “Hot Spot” Bereich liegen. Die Region, die *Nevison et al.* (2004) betrachtet, beinhaltet Gebiete in denen die Emissionen von N<sub>2</sub>O aufgrund von fehlenden Küstenauftrieb gering ist. Das würde gegen einer Unterschätzung der *Nevison et al.* (2004) sprechen. Ein Trend für die Gesamtemissionen ist nicht klar zu definieren, da die Fehlerbalken (Tabelle 3.1) zu groß sind.

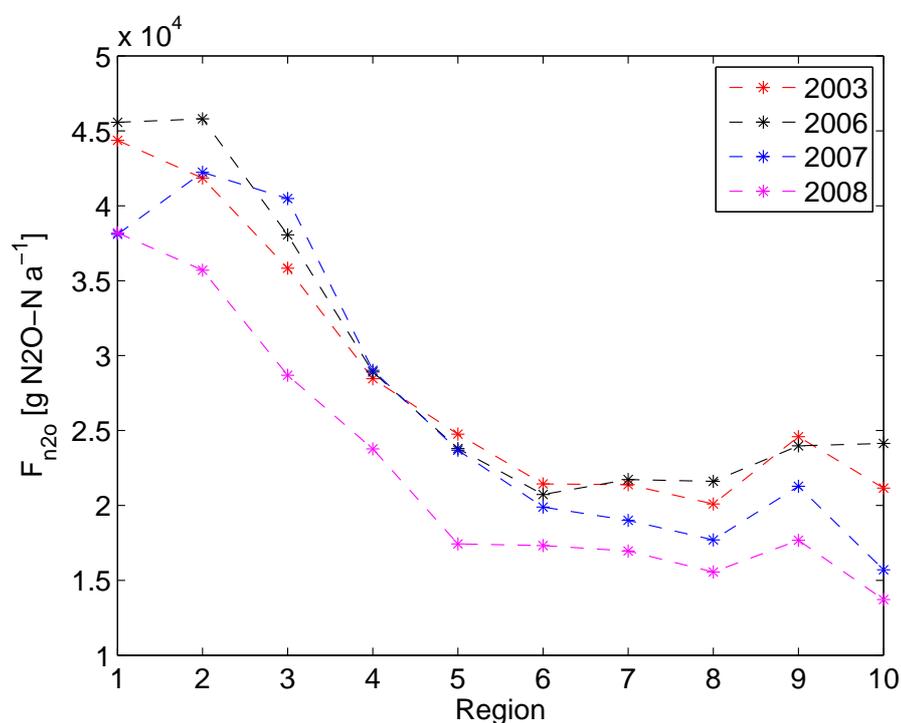


Abbildung 3.25: Berechnete Emissionen mit den Winddaten QuikSCAT in g N<sub>2</sub>O-N/a für die Regionen eins bis zehn für die Jahre 2003, 2006, 2007 und 2008 unabhängig von der Fläche.

Jahr	NCEP	QuikSCAT	<i>Nevison et al.</i> (2004)
2000			3,4
2003	4,6 ± 8,0	1,1 ± 2,1	
2006	5,1 ± 9,3	1,1 ± 2,4	
2007	5,0 ± 9,7	1,0 ± 2,4	
2008	4,2 ± 7,8	0,9 ± 1,9	

Tabelle 3.1: Darstellung der Gesamtemissionen mit dem maximalem Fehler aus der Fehlerfortpflanzung für das jeweilige Kalenderjahr (2003, 2006, 2007, 2008) in Gg N<sub>2</sub>O-N/a für die Winddatensätze NCEP und QuikSCAT, sowie das Ergebnis von *Nevison et al.* (2004) runtergerechnet auf die Küstenauftriebsregion vor Mauretanien (3,7 x 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>) für das Jahr 2000 in N<sub>2</sub>O-N/a

## 4 Fehlerbetrachtung

Im Folgenden werden verschiedene Methoden zur Berechnung der Unsicherheit auf die Ergebnisse und das Modell angewendet, um eine Fehlerabschätzung der Ergebnisse zu erhalten. Die verwendeten Daten sind zum Beispiel aufgrund von Messgerätfehlern, zufälligen Fehlern oder systematischen Fehlern mit einer Unsicherheit behaftet, die sich in der Berechnung der Flüsse fortpflanzen. Um die Genauigkeit einer physikalischen Größe zu bestimmen, die bei einer unmittelbaren Messung unzugänglich ist, wird die Methode der Fehlerfortpflanzung und die sogenannte Monte Carlo Simulation angewendet. Es werden zwei Verfahren verwendet, da beide Fehlerquellen aufweisen. Bei der Fehlerfortpflanzung wird angenommen, dass die Gleichungen, auf die das Modell beruht, einen linearen Zusammenhang aufweisen und bei der Berechnung der Unsicherheiten mit der Monte Carlo Simulation wird angenommen, dass die Fehler der Eingangsparameter normalverteilt sind. Ebenfalls wird in diesem Kapitel ein Korrekturfaktor für die berechneten Ekman-Vertikalgeschwindigkeiten ermittelt. Dabei werden die Daten von einem hochaufgelösten Ozeanmodell benutzt. Dieser Faktor berücksichtigt Effekte wie Strömungen oder Schichtung, die die Vertikalgeschwindigkeiten mit beeinflussen. Außerdem wird zum einen in diesem Abschnitt geprüft für welche Bereiche das Modell anwendbar ist. Zwischen der Vertikalgeschwindigkeit berechnet mit der Ekman-Theorie und der dazugehörigen Windgeschwindigkeit besteht ein linearer Zusammenhang. Dieser Zusammenhang wird bei den Daten aus dem hochaufgelösten Ozeanmodell für verschiedene Regionen (offshore, inshore) gesucht. Zum anderen wird die Größe der berechneten Emissionen, ermittelt mit den Winddatensätzen von NCEP und QuikSCAT, evaluiert. Dies geschieht mit Hilfe der Anwendung einer Advektionsgleichung, die mit den Daten aus dem hochaufgelösten Modell angetrieben werden. Dabei wird angenommen, dass für ein Kalenderjahr eine konstante  $N_2O$  Konzentration in 100 m an die Wasseroberfläche advehiert wird und mit der Atmosphäre wechselwirkt.

### 4.1 Berechnung der Unsicherheiten mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung

Ist die zu bestimmende Größe eine Funktion verschiedener Messgrößen, dann muss der resultierende absolute Fehler unter Berücksichtigung der Fehler dieser Mess-

größen berechnet werden. Dies geschieht mit Hilfe der Fehlerfortpflanzung, die den absoluten Maximalfehler bestimmt.

Die Fehlerfortpflanzung beruht auf folgender Gleichung:

$$\Delta y_{max} \approx \sum_{n=1}^N \left| \frac{\delta y}{\delta x_n} \Delta x_n \right|, \quad (22)$$

wobei  $\Delta y_{max}$  den absoluten Maximalfehler,  $\Delta x$  der jeweilige absolute Maximalfehler,  $x$  die Messgröße und  $y$  die berechnete Größe darstellt. Diese Gleichung stellt den linearen Teil einer Taylor Reihenentwicklung dar, wobei der Rest aufgrund geringer Beiträge zum Gesamtfehler weggelassen wird. In Tabelle 4.1 sind die Abschätzungen der Fehler der einzelnen Eingangsgrößen aufgelistet. Dabei wurden die meisten Fehlerabschätzungen aus der Veröffentlichung von *Bange et al. (2001)* entnommen. Der Fehler für die v-Komponente des Windes entstammt aus der Publikation von *Halpern (2001)*.

Eingangsgröße	mittlere Fehler	Referenzen
Wassertemperatur, T	$\pm 0,5$ K	<i>Bange et al. (2001)</i>
Salzgehalt, S	$\pm 0,1$	<i>Bange et al. (2001)</i>
Atmosphärischer Druck, p	$\pm 5$ %	<i>Bange et al. (2001)</i>
Diffusionskoeffizient von N <sub>2</sub> O, D	$\pm 10$ %	<i>Bange et al. (2001)</i>
Kinematische Viskosität, $\nu$	$\pm 1$ %	<i>Bange et al. (2001)</i>
trockener Molenbruch von N <sub>2</sub> O, x'	$\pm 2$ %	<i>Bange et al. (2001)</i>
v-Komponente des Windes, v <sub>10</sub>	$\pm 2$ m/s	<i>Halpern (2001)</i>

Tabelle 4.1: Dargestellt sind die mittleren absoluten Fehler der verschiedenen Größen, die in die Berechnung der Fehlerfortpflanzung eingehen.

Es ist immer noch schwer, den wahren Wind exakt zu simulieren bzw. weltweit z.B. mit Hilfe von Satelliten zu messen. Dabei weist jede Methode ihre eigene Unsicherheit auf. Der Wind stellt bei der Betrachtung der Fehlerfortpflanzung die größte Unsicherheit dar, die in die Berechnung mit eingeht. Die Unsicherheit der v-Komponente des Windes ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Es existieren alternative Ansätze für den Fehler von QuikSCAT beziehungsweise NCEP, die im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt worden (*Wallcraft et al. (2009)*; *Perez-Brunius et al. (2007)*; *Chelton and Freilich (2005)*). In dieser Arbeit wird die

gleiche Größenordnung des Fehlers für die Windgeschwindigkeit von NCEP und von QuikSCAT angenommen.

Der Variationskoeffizient für  $N_2O_w$  wurde wie im Kapitel 2.2.1 erörtert berechnet. Die Gleichungen für die Berechnungen des Maximalfehlers der Emission von  $N_2O$  ( $\Delta F_{n2o}$ ) sehen wie folgt aus:

$$\Delta F_{n2o} = \left| \frac{\delta F_{n2o}}{\delta k_{1,2}} \Delta k_{1,2} \right| + \left| \frac{\delta F_{n2o}}{\delta N_2O_w} \Delta N_2O_w \right| + \left| \frac{\delta F_{n2o}}{\delta N_2O_a} \Delta N_2O_a \right| \quad (23)$$

Für die Berechnung der Unsicherheiten für die  $N_2O$ -Konzentration an der Wasseroberfläche  $\Delta N_2O_w$  und für den Gleichgewichtswert  $\Delta N_2O_a$  folgt:

$$\Delta N_2O_w = \left| \frac{\delta N_2O_w}{\delta N_2O_{100m}} \Delta N_2O_{100m} \right| + \left| \frac{\delta N_2O_w}{\delta Q_w} \Delta Q_w \right| \quad (24)$$

$$\Delta N_2O_a = \left| \frac{\delta N_2O_a}{\delta x'} \Delta x' \right| + \left| \frac{\delta N_2O_a}{\delta \beta} \Delta \beta \right| + \left| \frac{\delta N_2O_a}{\delta p} \Delta p \right| \quad (25)$$

$$\Delta \beta = \left| \frac{\delta \beta}{\delta T} \Delta T \right| + \left| \frac{\delta \beta}{\delta S} \Delta S \right| \quad (26)$$

Für die Berechnung der Unsicherheit des Ekman-Massentransports  $\Delta M$  wird der Fehler des Windstressses  $\Delta \tau$  benötigt:

$$\Delta M = \left| \frac{\delta M}{\delta \tau} \Delta \tau \right| \quad (27)$$

$$\Delta \tau = \left| \frac{\delta \tau}{\delta u} \Delta u \right| \quad (28)$$

Im nächsten Schritt werden die Unsicherheiten der Abklingfunktion  $\Delta Q_w$  und dazugehöriger Vertikalgeschwindigkeit  $\Delta w$  berechnet:

$$\Delta Q_w = \left| \frac{\delta Q_w}{\delta w} \Delta w \right| \quad (29)$$

$$\Delta w = \left| \frac{\delta w}{\delta M} \Delta M \right| + \left| \frac{\delta w}{\delta R_b} \Delta R_b \right| \quad (30)$$

Zur Ermittlung der Unsicherheit des Transferkoeffizientens  $\Delta k$  wird zuvor der Fehler von  $\Delta S_c$  benötigt:

$$\Delta k = \left| \frac{\delta k}{\delta u} \Delta u \right| + \left| \frac{\delta k}{\delta S_{c_{n2o}}} \Delta S_{c_{n2o}} \right| \quad (31)$$

$$\Delta S_{c_{n2o}} = \left| \frac{\delta S_{c_{n2o}}}{\delta \nu} \Delta \nu \right| + \left| \frac{\delta S_{c_{n2o}}}{\delta D} \Delta D \right| \quad (32)$$

Die Grafiken 4.1 und 4.2 zeigen die berechneten Emissionen in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  von NCEP (4.1) und QuikSCAT (4.2) mit dem jeweiligen maximalen Fehler. Auffällig ist, dass die Fehlerbalken größer sind als die berechneten Emissionen.

Bei der Berechnung des Fehlers der Emission  $\Delta F_{n2o}$  wird ein Problem sichtbar, weswegen das Ergebnis der Fehlerfortpflanzung kritisch betrachtet werden muss. Sowohl  $\Delta N_2 O_w$  als auch der Fehler des Transferkoeffizienten  $k$  ist abhängig und fehlerbehaftet durch die Windgeschwindigkeit. Dabei geht der Wind unterschiedlich ( $k(v^2)$ ,  $N_2 O_w(v)$ ) in die jeweilige Berechnung ein und es kann dazu kommen, dass bei der Fehlerberechnung von  $\Delta k$  die Windgeschwindigkeit einen anderen bzw. gegenläufigen Effekt auf die Berechnung ausübt als bei der von  $\Delta N_2 O_w$ . Das wiederum kann zur Folge haben, dass bei der Berechnung sich der Wert von  $\Delta F_{n2o}$  verstärkt oder abschwächt.

Trotzdem ist diese Methode eine erste gute Möglichkeit ein Mass für die Unsicherheit der berechneten Flüsse zu erlangen und weist darauf hin, dass die Ergebnisse des Gausaustausches kritisch beurteilt werden müssen.

Im folgenden Kapitel wird ein erster Versuch unternommen, das Modell von *Nevison et al.* (2004) mit Hilfe eines hochaufgelösten Ozean/Atmosphärenmodell zu verbessern.

## 4.2 Ermittlung eines Korrekturfaktors für die berechneten Ekman-Vertikalgeschwindigkeiten

Die berechneten Flüsse waren im Vergleich zu den In-situ-Messungen verhältnismäßig groß. Ein Grund dafür kann die in dem Modell einzig verwendete Methode (Ekman-Theorie) für die Berechnung der Vertikalgeschwindigkeit während des Küstenauftriebs sein. Da in dieser Theorie zum Beispiel Schichtung oder Strömungen nicht berücksichtigt werden, kommt es zu einer Überschätzung der Vertikalgeschwindigkeit, was wiederum zu erhöhten Flüssen führt. Daher wird mit Hilfe eines hochaufgelösten Modells ein Korrekturfaktor berechnet, um diese oben erwähnten Effekte

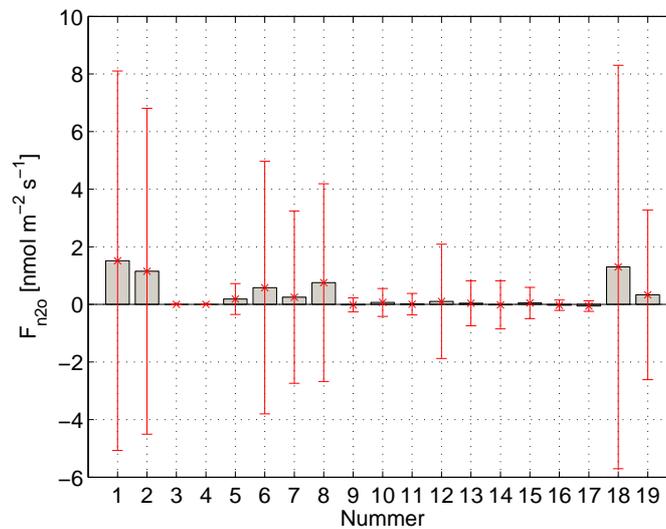


Abbildung 4.1: Mit NCEP berechnete Emissionen von Kapitel 3.1 in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für die jeweiligen Jahre mit Fehlerbalken ermittelt mit der Fehlerfortpflanzung.

zu berücksichtigen.

Das dreidimensionale Modell basiert auf einer verfeinerten Konfiguration des GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) MOM2.1 Codes und wurde als Teil des FLAME (family of linked Atlantic Ocean model experiments) Projekts entwickelt. Vorgegebene Atmosphärendaten werden verwendet, um das Ozeanmodell anzutreiben. In dem Modell wird der Atlantische Ozean zwischen  $20^\circ\text{S}$  bis  $70^\circ\text{N}$  aufgespannt. Die räumliche Auflösung beträgt in der Longitude  $1/12^\circ$  und in der Latitude  $1/12\cos^\circ(\pi)$ , was ein Gebiet von  $5\text{ km} \times 5\text{ km}$  entspricht. Die Vertikale ist in 45 Levels eingeteilt mit  $10\text{ m}$  Auflösung an der Oberfläche. Der klimatologische Wind, die Oberflächenwerte der Wassertemperatur und des Salzgehaltes und die Vertikalgeschwindigkeit für verschiedene Schichten liegen als drei Tagesmittel vor (*Eden et al. (2004); Eden (2006)*).

In Abbildung 4.3 sind Ekmantransport und Vertikalgeschwindigkeit in  $100\text{ m}$  im Jahresverlauf dargestellt. Beide Daten sind in Sverdrup ( $10^6\text{ m}^3/\text{s}$ ) angegeben und über eine Box von  $18.5^\circ\text{W} - 16^\circ\text{W}$ ,  $21^\circ\text{N} - 16^\circ\text{N}$  gemittelt. Auffällig ist, dass der Jahresgang von Ekman im Vergleich zu der Vertikalgeschwindigkeit in  $100\text{ m}$  sehr gut wieder gegeben wird. Dabei liegt die Korrelation bei  $r = 0,66$ . Dies bedeutet der Wert liegt im 95 % Konvidenzintervall und ist statistisch signifikant. Jedoch weist

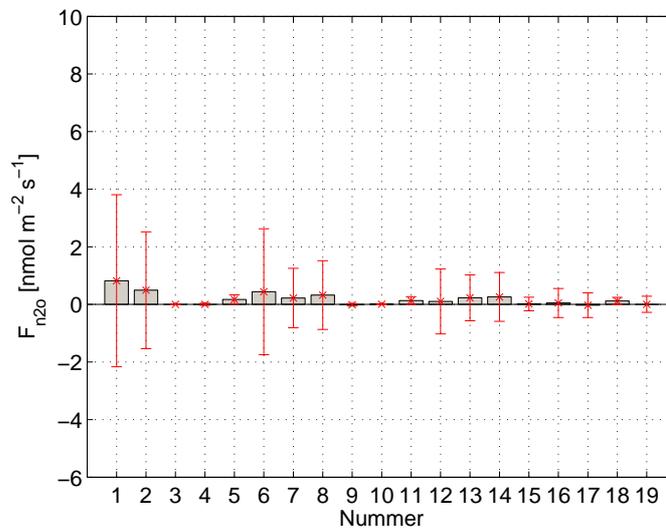


Abbildung 4.2: Mit QuikSCAT berechnete Emissionen von Kapitel 3.1 in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für die jeweiligen Jahre mit Fehlerbalken ermittelt mit der Fehlerfortpflanzung.

der Ekman-Transport berechnet mit dem hochaufgelösten Modell Größenordnungen auf, die ca. 1 bis 1.5-mal größer sind als die berechneten Vertikalgeschwindigkeiten in 50 m. Der Faktor von 0.64 berechnet aus dem Mittel der Differenz zwischen Ekman-Transport und Vertikalgeschwindigkeit in 100 m (beides vom hochaufgelösten Modell), korrigiert die Überschätzung der Vertikalgeschwindigkeit berechnet mit der Ekman-Theorie von *Nevison et al.* (2004) Modell. Die Grafiken 4.4 sowie 4.5 zeigen die Differenz beider berechneten Flüsse mit und ohne Faktor in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$ , jeweils für NCEP (4.4) und QuikSCAT (4.5). Bei beiden wurden die Flüsse mit Faktor verringert. Deutlich zu erkennen, ist dass die NCEP-Werte stärker korrigiert worden sind als die von QuikSCAT. Interessant ist auch, dass vor allem die Amplitude bei hohen Flüssen zurückgegangen ist. Bei dem Vergleich mit den insitu-Messungen ist überraschend, dass die Korrelationen ebenfalls besser geworden sind. Auch bei der Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen  $\text{N}_2\text{O}$ -Oberflächenkonzentration wurde eine höhere Korrelation berechnet (nicht grafisch dargestellt). Die auf die Fläche hochgerechneten Emissionen in  $\text{Gg nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für die jeweiligen Kalenderjahren wurden ebenfalls mit der gleichen Methode neu berechnet (Tabelle 4.2). Auch diese sind im Vergleich zu den Berechnungen zuvor geringer geworden. Ebenfalls dargestellt ist die Differenz beider Emissionen mit und ohne Faktor. Dabei ist auffällig,

dass wie auch in der Grafik zuvor vor allem die NCEP-Werte geringer geworden sind.

Jahr	NCEP (Faktor)	$\Delta$ NCEP	QuikSCAT (Faktor)	$\Delta$ QuikSCAT	<i>Nevison</i> <i>et al. (2004)</i>
2000					3,39
2003	2,6	1,96	0,72	0,36	
2006	2,9	2,15	0,73	0,39	
2007	2,8	2,2	0,62	0,41	
2008	2,24	1,94	0,54	0,32	

Tabelle 4.2: Dargestellt die Gesamtemissionen für die Küstenauftriebsregion in Gg N<sub>2</sub>O-N/a mit Korrekturfaktor (NCEP(Faktor); QuikSCAT(Faktor)) und die Differenz mit und ohne (Kapitel 3) Korrekturfaktor( $\Delta$ NCEP = NCEP-NCEP(Faktor);  $\Delta$ QuikSCAT) = QuikSCAT-QuikSCAT(Faktor)), sowie zum Vergleich das Ergebnis von *Nevison et al. (2004)* in Gg N<sub>2</sub>O-N/a.

Im Allgemeinen ist zu sagen, dass die gute Übereinstimmung des Jahresganges des Ekman-Transportes mit der Vertikalgeschwindigkeit in 100 m (beides hochaufgelöstes Modell) für die in *Nevison et al. (2004)* verwendete Parametrisierung spricht. Weiterhin war eine Verbesserung der Korrelationen durch Einführung des Faktors unter Erhalt der Einfachheit des Modells möglich. Es ist trotzdem zu beachten, dass der Faktor ein räumliches sowie zeitliches Mittel darstellt, was für eine Unterschätzung spricht. Jedoch wird der Faktor auch überschätzt, da für alle Tiefen der gleiche Faktor angenommen wird. Dabei sollte der Faktor größer werden je näher die Oberfläche erreicht wird. Jedoch ist unbekannt wo sich das Wassermasse während der drei Tage Auftrieb befindet. Bekannt ist nur der Start in 100 m sowie der Endpunkt an der Wasseroberfläche.

### 4.3 Berechnung der Unsicherheiten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation

Die Monte Carlo - Methode ist ein allgemeiner Ausdruck für eine Simulation, bei der sehr häufig Zufallsexperimente durchgeführt werden. Ziel ist die Bestimmung des

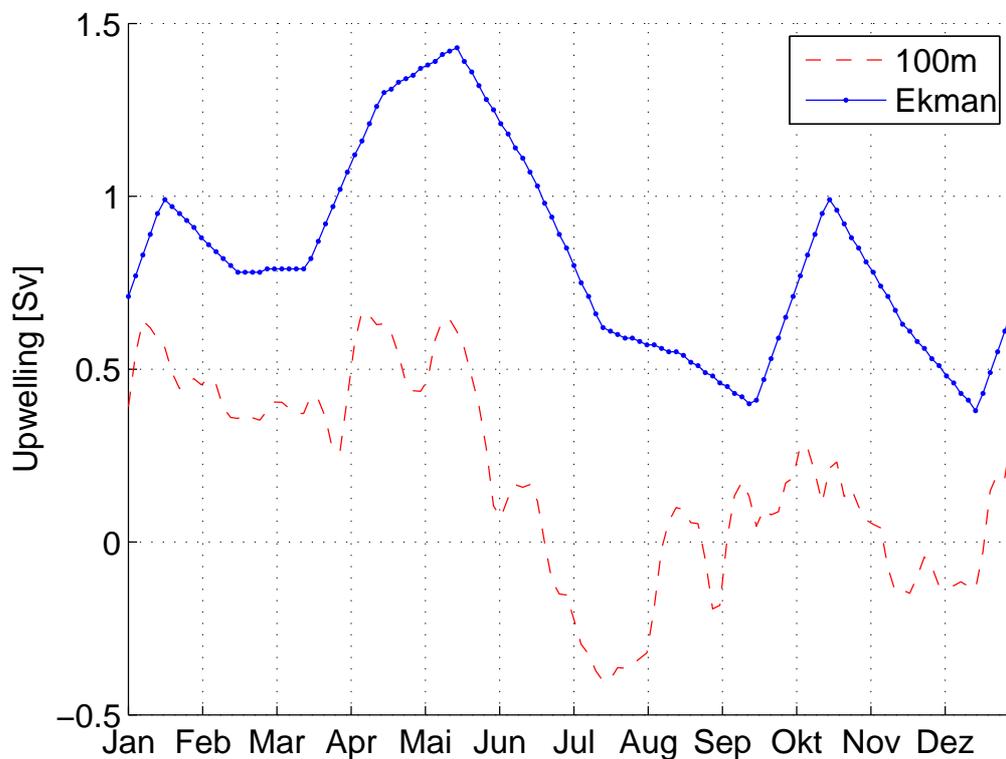


Abbildung 4.3: Mit hochaufgelöstem Modell berechneter Ekmantransport und die Vertikalgeschwindigkeit in 100m Tiefe für ein klimatologisches Jahr. Beide Daten sind in Sverdrup ( $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) angegeben und gemittelt über eine Box von  $18.5^\circ\text{W} - 16^\circ\text{W}$ ,  $21^\circ\text{N} - 16^\circ\text{N}$ .

Fehlers einer Variablen, die nicht messbar ist. Dabei sind einige Variablen fest, da sie keinen Fehler aufweisen, und andere sind zufällig ausgesuchte Werte aus einer vorgegebenen Verteilung (PDF). Die einfachste Annahme ist, dass die Eingangsgrößen Wind, Oberflächentemperatur, Salzgehalt an der Oberfläche und mittlere  $\text{N}_2\text{O}$  Konzentration in 100m normal verteilt sind. Dabei streuen diese Parameter um den fest gegebenen Wert mit einer Standardabweichung, die gleich dem Fehler ist der angenommen (*Bange et al., 2001*) beziehungsweise in der Fehlerfortpflanzung berechnet wurde. Pro Durchgang wird jeweils ein Zufallswert aus der Verteilung genommen und damit der Fluss berechnet. Diese Simulation wurde für jedes Jahr 10.000-mal durchgeführt. Die Grafiken 4.6 und 4.7 zeigen die resultierenden Verteilungen der

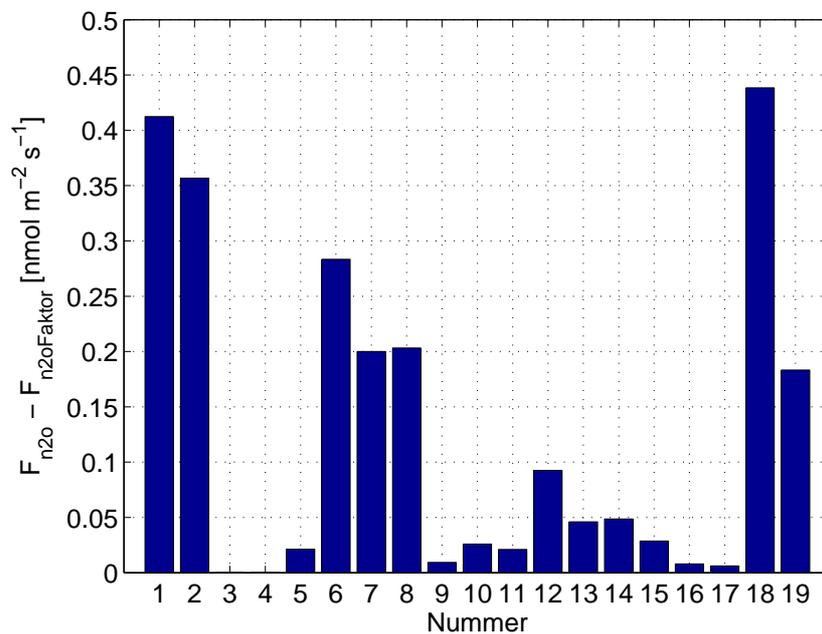


Abbildung 4.4: Differenz beider berechneten Flüsse ermittelt mit NCEP mit und ohne Faktor in nmol/m<sup>2</sup>s für die jeweiligen Jahre (Kapitel 3.1).

Flüsse für die Jahre 2003 und 2008 für NCEP (Abb. 4.6 a,b) und QuikSCAT (Abb. 4.7 a,b)

Dies sind je zwei willkürlich gewählte Beispiele mit den NCEP und den QuikSCAT-Datensätzen. Da die PDF nicht normal verteilt ist, hat dies zum einen zur Folge, dass der berechnete Fluss nicht mit dem Mittelwert der Verteilung übereinstimmt, jedoch sich im Bereich der Standardabweichung befindet. Zumeist liegt die tatsächliche Emission in der Region der PDF, die die meiste Häufigkeit aufweist. Zum anderen zeigt es, dass die Gleichungen die dem Modell zu Grunde liegen, nicht linear sind. Im Vergleich mit der berechneten Standardabweichung der Verteilung der Monte-Carlo-Methode und dem Fehler aus der Fehlerfortpflanzung wird ersichtlich, dass zweiteres oft sehr viel höhere Werte annimmt. Die Monte Carlo Simulation stellt einen weiteren Versuch dar, den Fehler der Emissionen zu berechnen und ist verglichen mit der Methode der Fehlerfortpflanzung stabiler, da dieser Weg nicht in der Weise anfällig auf analytische Fehler (z.B. Ableitungsfehler) ist. Die Annahme, dass alle Eingangsdaten, vor allem der Wind, normal verteilt sind, dient der Einfachheit, entspricht aber nicht der Wirklichkeit und ist somit eine zusätzlichen

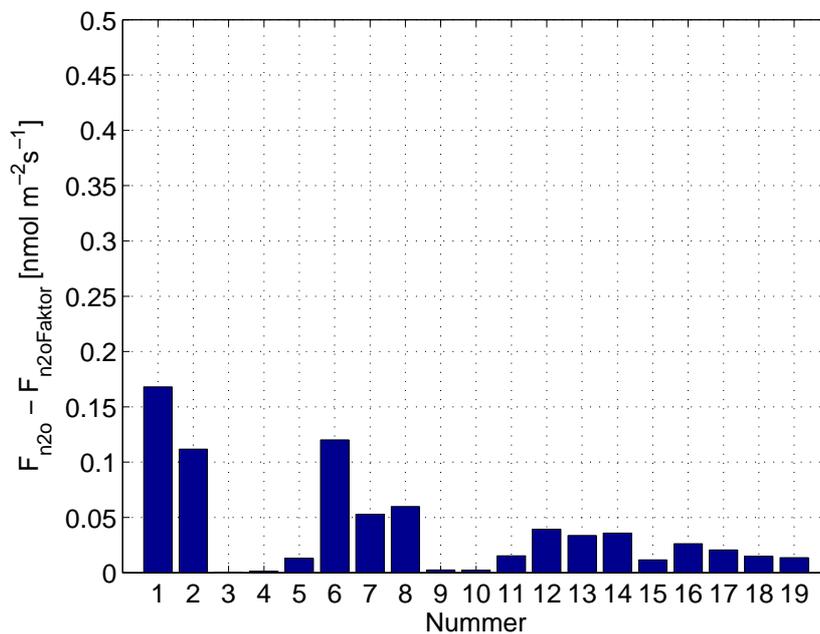


Abbildung 4.5: Differenz beider berechneten Flüsse mit QuikSCAT mit und ohne Faktor in nmol/m<sup>2</sup>s, für die jeweiligen Jahre (Kapitel 3.1).

Fehlerquelle. Die gleiche Simulation mit Berücksichtigung des berechneten Faktors weist das gleiche Verhalten auf (nicht grafisch dargestellt).

#### 4.4 Prüfung der Anwendbarkeit des *Nevison et al.* (2004) Modells und Abschätzung der Größe der berechneten Flüsse

Mit Hilfe der Advektionsgleichung und der Daten aus dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell wird versucht den Anwendungsbereich des *Nevison et al.* (2004) Modells, sowie deren berechnete Größenordnung der Emissionen zu evaluieren.

Die N<sub>2</sub>O-Konzentration in 100 m wird aufgrund der Vertikalgeschwindigkeiten an die Wasseroberfläche advehiert. An der Oberfläche wechselwirkt die verbleibende N<sub>2</sub>O-Konzentration in der Wassersäule mit der atmosphärischen Konzentration und der Fluss wird berechnet. Dies stellt einen Verlust oder Gewinn von N<sub>2</sub>O in der Wasseroberfläche dar, dabei verbleibt der Gleichgewichtswert nach der Berechnung des Flusses in der oberen Wassersäule. Der Transferkoeffizient wird dabei nach

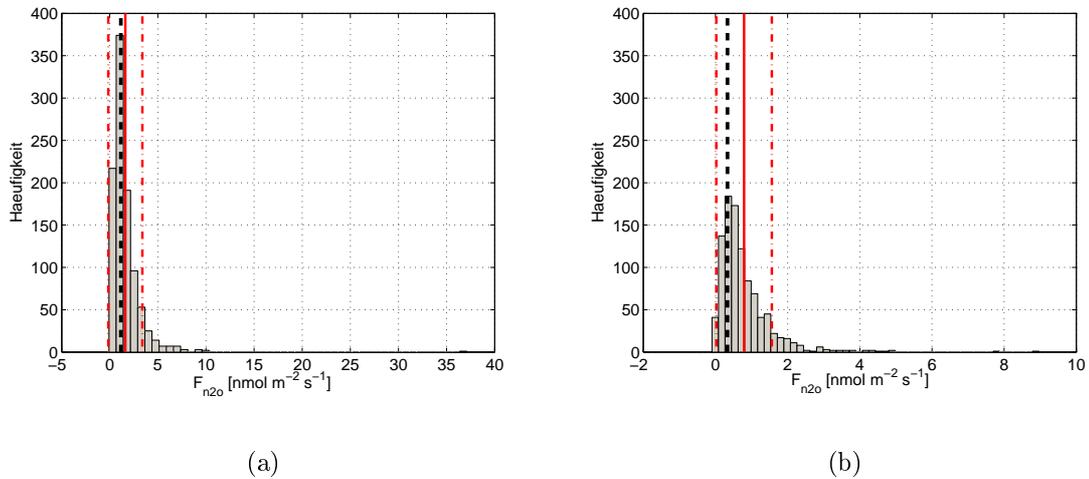


Abbildung 4.6: Dargestellt ist die Verteilung der berechneten Emissionen in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  ermittelt mit der Monte-Carlo-Simulation mit dem Winddatensatz NCEP für a) das Jahr 2003 (2.Spalte) und b) für das Jahr 2008 (19.Spalte) Mit rot durchgezogener Linie ist der Mittelwert und rot gestrichelt die Standardabweichung eingezeichnet, sowie in schwarz gestrichelt der tatsächliche Wert aus Kapitel 3.1.

*Nightingale P. D.* (2000) berechnet. Die Vertikalgeschwindigkeiten werden aus dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell entnommen, sowie die y-Komponente des Windstresses in 10 m über dem Meeresspiegel und die Oberflächenwerte der Temperatur und der Salinität. Alle Daten entsprechen drei-Tages-Mittel für ein klimatologisches Jahr. Das eine Jahr wird fünf Mal durchlaufen, um ein Einschwingen des Systems zu gewährleisten. Die Ergebnisse zeigen jeweils den fünften Durchlauf. Die allgemeine Advektionsgleichung lautet:

$$\frac{\delta N_2O}{\delta t} + w \frac{\delta N_2O}{\delta x} = 0, \quad (33)$$

wobei  $w$  für die Vertikalgeschwindigkeit in  $\text{m}/\text{s}$  steht und  $N_2O$  für den berechneten  $N_2O$ -Wert in der jeweiligen Schicht. Die Advektionsgleichung wird diskretisiert und zeitlich und räumlich entwickelt, dabei entspricht die zeitliche Auflösung drei Tagen und die Gitterauflösung 10 m. Dabei ist die einfache Annahme getroffen worden, dass die  $N_2O$ -Konzentration in 100 m immer  $30 \text{ nmol}/\text{L}$  beträgt.

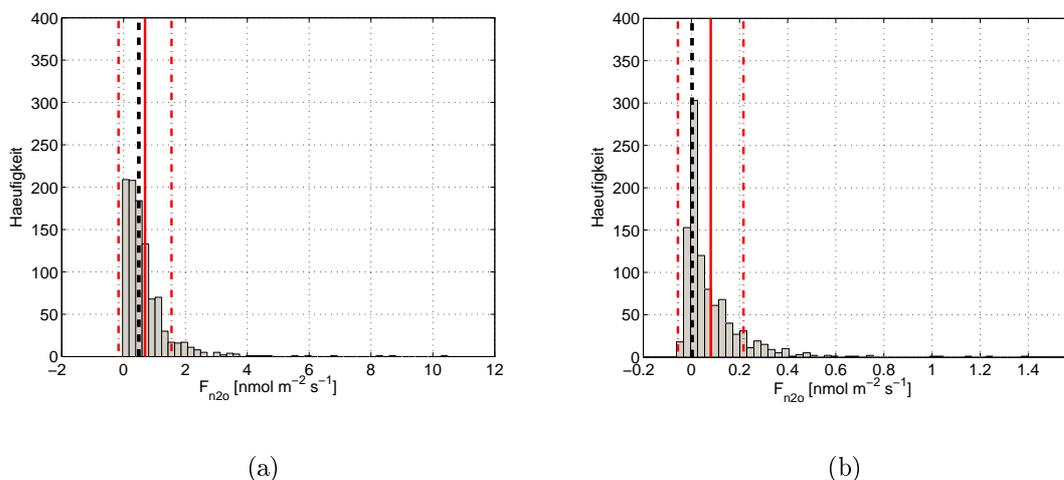


Abbildung 4.7: Dargestellt ist die Verteilung der berechneten Emissionen in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  ermittelt mit der Monte-Carlo-Simulation mit dem Winddatensatz QuikSCAT für a) das Jahr 2003 (2.Spalte) und b) für das Jahr 2008 (19.Spalte) Mit rot durchgezogener Linie ist der Mittelwert und rot gestrichelt die Standardabweichung eingezeichnet, sowie in schwarz gestrichelt der tatsächliche Wert aus Kapitel 3.1.

Diese Methode wurde für den Stationspunkt  $17^\circ\text{W}$ ,  $18^\circ\text{N}$  angewendet. Diese Koordinate liegt im Bereich des Kontinentalhangs. Die mit dieser Methode berechnete Emissionen in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für ein klimatologisches Jahr zeigt die Abbildung 4.8. Diese zeigt, fast ganzjährige Emissionen, die eine Größenordnung von bis zu  $1,4 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$  aufweisen. Zwischen August und September konnten keine Flüsse berechnet werden, da die Windgeschwindigkeit zu gering war, einen Strömungswiderstandskoeffizienten zu berechnen. Die Emissionen variieren stark im Verlauf des Jahres und auch innerhalb der Monate. Im Mittel weisen die berechneten Emissionen einen Wert von  $0,11 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$  auf. Im Vergleich zu dem Mittelwert der berechneten Emissionen in Region 2, in diesem liegt der Stationspunkt von  $17^\circ\text{W}$ ,  $18^\circ\text{N}$ , von NCEP ( $F_{n2o\text{-mittel}} = 0,4 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$ ) und QuikSCAT ( $F_{n2o\text{-mittel}} = 0,15 \text{ nmol}/\text{m}^2\text{s}$ ) sind diese größer. Vorallem im Vergleich zu NCEP ist der Mittelwert von den Emissionen, berechnet mit der Advektionsgleichung, größer. Der Mittelwert von QuikSCAT stimmt da hingegen gut überein.

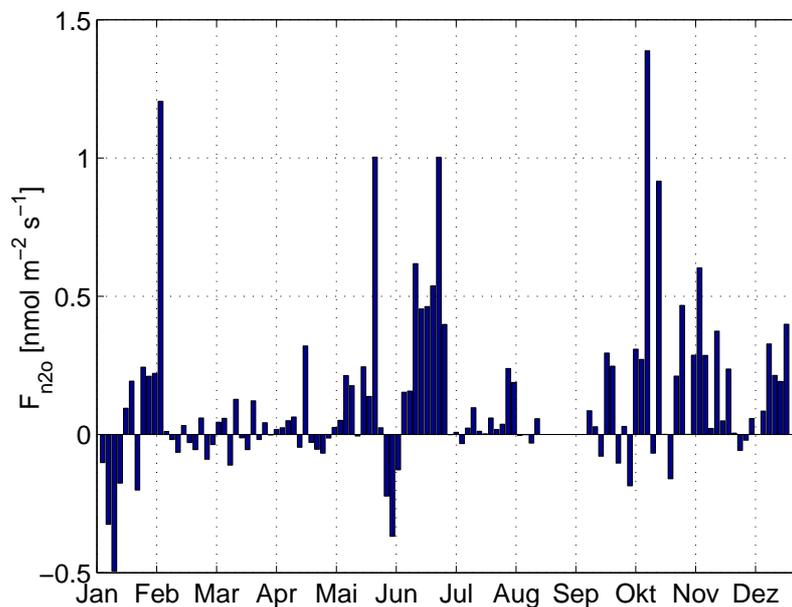


Abbildung 4.8: Berechnete Emissionen mit der Advektionsgleichung in  $\text{nmol}/\text{m}^2\text{s}$  für ein klimatologisches Jahr für den Stationspunkt  $17^\circ\text{W}$  und  $18^\circ\text{N}$  (fünfter Durchlauf). Die Eingangsparameter stammen aus dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell.

Im Folgenden wird der Anwendungsbereich des Modells von *Nevison et al.* (2004) evaluiert, mit Hilfe der Betrachtung der Vertikalgeschwindigkeiten und der v-Komponenten des Windes für verschiedene Regionen. Zuerst werden die Vertikalgeschwindigkeiten, berechnet durch die Ekman-Theorie (*Nevison et al.*, 2004), gegen die v-Komponente des Windes (beide in  $\text{m}/\text{s}$ ) gegeneinander dargestellt. Die Grafik 4.9 zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen den Größen Vertikalgeschwindigkeit und v-Komponente des Windes. Bei niedrigeren Winden werden auch geringere Vertikalgeschwindigkeiten berechnet und umgekehrt. Die Korrelation liegt bei beiden bei einem Wert von rund 0.94 (statistisch signifikant). Die unterschiedliche Datenmenge ist aufgrund der unterschiedlichen zeitlichen Auflösung zurückzuführen.

Im Folgenden werden die Vertikalgeschwindigkeiten und v-Komponenten des Windes für verschiedene Boxen betrachtet, die unterschiedlich weit von der Küste von Mauretanien entfernt liegen. Die Vertikalgeschwindigkeit in 50 m Tiefe und die v-Komponente des Windes stammen von dem hochaufgelösten Modell und wurde über

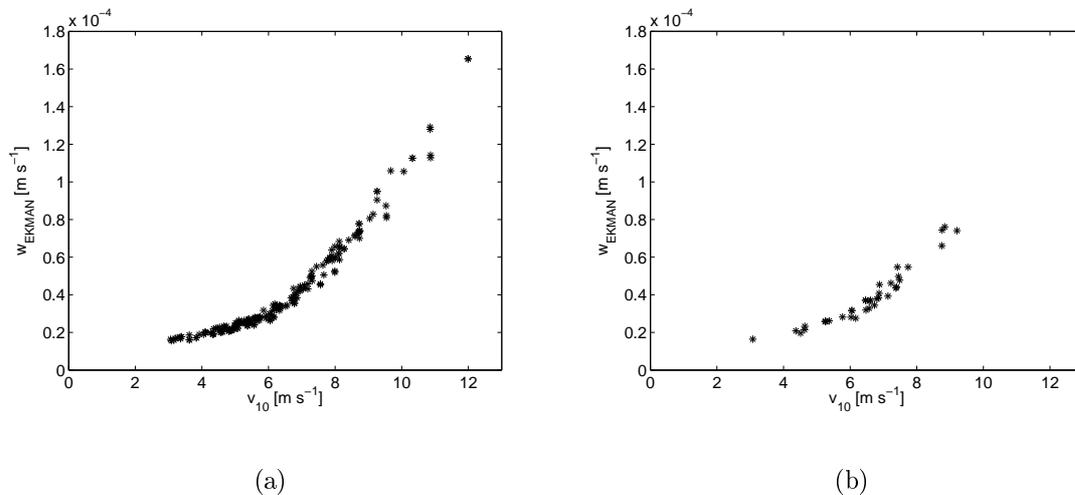


Abbildung 4.9: Dargestellt ist die Vertikalgeschwindigkeit berechnet mit der Ekman-Theorie (*Nevison et al. (2004)*) gegen die  $v$ -Komponente des Windes in 10 m über dem Meeresspiegel, beide in m/s von den Ergebnissen aus Kapitel 3 a) berechnet mit NCEP, b) berechnet mit QuikSCAT.

die jeweilige Box integriert (Abbildung 4.9) Diese weisen eine unterschiedliche Breite auf. Die Länge ist dabei gleich von 16 °N - 21 °N.

Die Abbildungen 4.10 a-c) zeigen die Vertikalgeschwindigkeit aufgetragen gegen die  $v$ -Komponente des Windes in 10 m über dem Meeresspiegel, beide in m/s. Die Grafik c) entspricht der Region, die für die Berechnung des Faktors verwendet worden ist. Auffällig ist, dass der lineare Zusammenhang je weiter die Box von der Küste entfernt ist, verloren geht, wie der Landeffekt auf die Windgeschwindigkeit. Das Vorhandensein von niedrigeren Windgeschwindigkeiten nimmt von der Küste hin ab. Im Vergleich zu der Abbildung zuvor streuen die Werte mehr und auch negative Vertikalgeschwindigkeiten sind zu erkennen. Unter anderem ist die Vertikalgeschwindigkeit von dem hochaufgelösten Modell um fast 2 Größenordnungen kleiner als die mit NCEP und QuikSCAT berechneten. Die Grafik c) zeigt, was ebenfalls in den Abbildung von NCEP und QuikSCAT zu erkennen ist. Je kleiner/größer die Windgeschwindigkeit ist desto geringer/erhöhter ist auch die Vertikalgeschwindigkeit. In der Abbildung b) ist dieser Zusammenhang nur noch sehr gering zusehen und auch nur bei hohen Windgeschwindigkeiten. Bei geringeren Windgeschwindigkeiten ist kein Effekt auf die Vertikalgeschwindigkeit zu erkennen. Die Grafik a), die Region

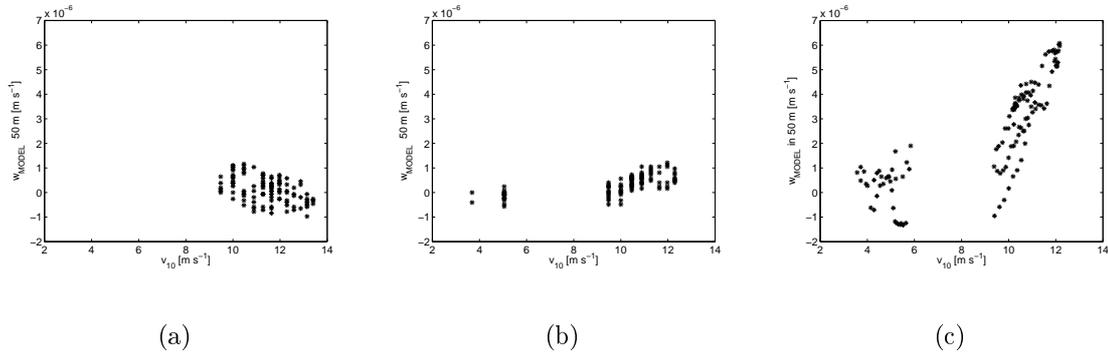


Abbildung 4.10: Dargestellt ist die Vertikalgeschwindigkeit gegen die  $v$ -Komponente des Windes in 10 m über dem Meeresspiegel, beide in  $m/s$  und berechnet mit dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell. Dabei beschreibt das Grafik c) ( $18.5^\circ W - 16^\circ W$ ) die Region, die am dichtesten an der Küste von Mauretanien liegt und die Grafik a) ( $18,5^\circ W - 21^\circ W$ ), die die am weitesten von ihr liegt. Die in der Mitte liegende Abbildung b) ( $19^\circ W - 17^\circ W$ ) überlappt die beiden zuvor eingeführten Boxen.

die am weitesten von der Küste entfernt ist, weist nur Windgeschwindigkeiten über  $8 m/s$  auf, sowie keinen linearen Zusammenhang zwischen Vertikalgeschwindigkeit und Wind.

In Abbildung 4.11 wird die Vertikalgeschwindigkeit und die  $v$ -Komponente des Windes in 10 m über dem Meeresspiegel gezeigt, für den zum Anfang eingeführten Stationspunkt  $17^\circ W, 18^\circ N$ . Im Vergleich zu Abbildung zuvor streuen die Daten sehr stark. Obwohl der Stationspunkt  $17^\circ W, 18^\circ N$  in der Küstenauftriebsregion liegt ist kein linearer Zusammenhang zu erkennen.

Diese Ergebnisse zeigen auf, dass der Anwendungsbereich von dem Nevison et al. 2004 räumlich begrenzt ist. Da in dem verwendeten Modell von *Nevison et al.* (2004) nur der windgetriebene Ekman-Transport der Mechanismus für Auftrieb ist und ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen gezeigt wurde, sowie auch mit den Daten aus dem hochaufgelösten Modell für den Bereich vor der Küste, wurde damit bestätigt, dass das Modell von *Nevison et al.* (2004) für diese Region (Küste) anwendbar ist. Jedoch hat Abbildung 4.11 gezeigt, dass für einen Stationspunkt, der in der Küstenauftriebsregion liegt der lineare Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Vertikalgeschwindigkeit nicht gegeben ist. Das bedeutet,

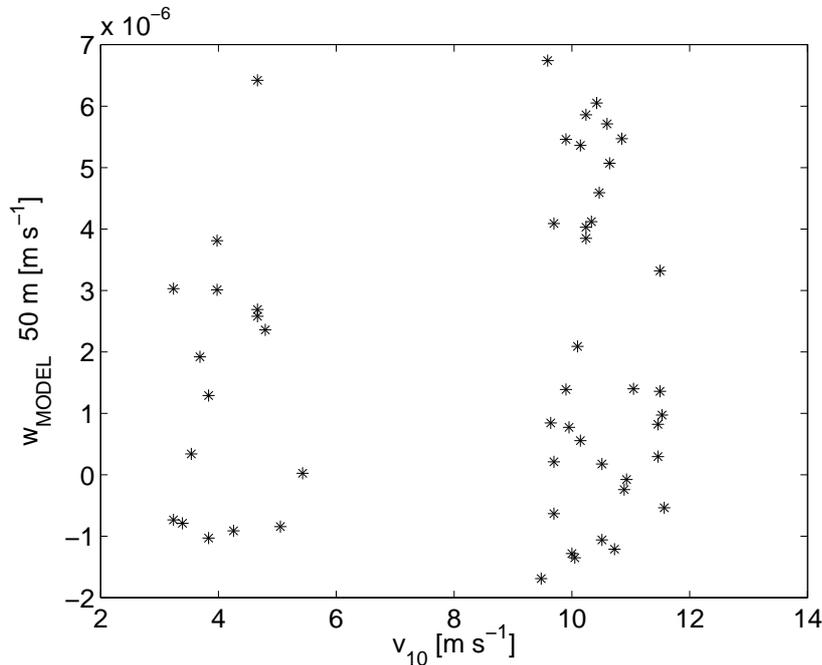


Abbildung 4.11: Zeigt die Vertikalgeschwindigkeit in 50 m aufgetragen gegen die  $v$ -Komponente des Windes in 10 m über dem Meeresspiegel für den Stationspunkt  $17^\circ\text{W}$ ,  $18^\circ\text{N}$  in  $\text{m/s}$ , berechnet von dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell.

dass das Modell von *Nevison et al.* (2004) für die Berechnung von Flüssen zwar auf den Bereich von Küstenregionen anwendbar ist, aber nicht auf einen einzelnen Punkt (Abbildung 4.11), sondern nur für großräumige Regionen (Abbildung 4.10), da der Prozess, der die Ekman-Theorie beschreibt, ein großräumiger ist. Die Advektionsgleichung ist dabei ein einfacher Ansatz den Prozess des vertikalen Transportes der  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration zu beschreiben. Die Daten von dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären Modell sind geglättete Werte, bei dem vor allem der Wind eine Fehlerquelle darstellt. Interessant ist ebenfalls, dass die Emissionen in Abbildung 4.11 ganzjährig sind und stark fluktuieren, was ein Indiz dafür ist, dass Flüsse im Küstenauftriebsgebiet nicht nur windabhängig sind. Das *Nevison et al.* (2004) Modell jedoch ist begrenzt auf die Größe der Windgeschwindigkeit.

## 5 Schlussbetrachtung

Ziel dieser Arbeit war es die Methode von *Nevison et al.* (2004) für die Küste von Mauretanien zu evaluieren und gegebenenfalls zu verbessern. Dies geschah mit Hilfe von zwei verschiedenen Winddatensätze, der Vergleich zu insitu-Messungen und die Extrapolation auf ein Jahr. Außerdem wurden für die Abschätzungen der Unsicherheiten der Ergebnisse zwei verschiedene Fehlerbetrachtungen angewendet, sowie die Größe der berechneten Flüsse und der Anwendungsbereich des *Nevison et al.* (2004) überprüft. Das einfache Modell von *Nevison et al.* (2004) wurde in dieser Arbeit nachgebaut und mit den Winddatensätzen von NCEP und QuikSCAT angetrieben. Bei dem Vergleich der Ergebnisse (ermittelte  $\text{N}_2\text{O}$ -Konzentration an der Oberfläche und Flüsse), berechnet mit den Winddatensätzen, zeigten sich erhebliche Unterschiede, insbesondere bei der Gegenüberstellung der v-Komponente des Windes. In allen Berechnungen weisen die Ergebnisse von NCEP höhere Werte auf als QuikSCAT. Jedoch ist das Verhalten der Emissionen in dem jeweiligen Jahr ähnlich. Im Vergleich mit den Windmessungen vom Schiff korrelieren die verwendeten Datensätze schlecht. Was nicht verwundert; zum einen ist der Zeitpunkt der Beobachtung der Winddaten zumeist verschieden, aufgrund zu geringer zeitlicher Auflösung. Zum anderen divergieren der Ort der Messung und der nächst gelegene Winddatenpunkt räumlich stark voneinander. Aus diesem Grund führen die unterschiedlichen Winde auch zu unterschiedlichen Emissionen, was im Vergleich mit den insitu-Flüssen gut sichtbar wurde. Des weiteren wurden die Emissionen für beide Winddatensätze für die Jahre 2003, 2006, 2007 und 2008 berechnet und auf die Küstenauftriebsregion, das Gebiet in dem Küstenauftrieb stattfindet, extrapoliert, um herauszufinden wie viel Stickstoff in Form von  $\text{N}_2\text{O}$  aus dem marinen Stickstoffkreislauf verloren geht. Aufgrund der räumlich hochaufgelösten Verteilung der QuikSCAT-Daten war gut zu erkennen ab welcher Region kein ganzjähriger Auftrieb mehr vorherrschte und zunehmens die Saisonalität einsetzte. Bei NCEP war in der Hinsicht nur eine Tendenz zu erkennen, da in der Küstenauftriebsregion nur drei Winddatenpunkte gegeben waren. Für die Abschätzung der Unsicherheiten wurden zwei verschiedene Verfahren zur Hilfe genommen. Zuerst wurde die Methode der Fehlerfortpflanzung angewendet. Das Resultat zeigte, das die berechneten Fehlerbalken zumeist größer sind, als die berechneten Werte selbst. Eine andere und stabilere Methode stellt

dem gegenüber die Unsicherheitenberechnung mit der Monte-Carlo-Simulation dar, die ebenfalls den Fehler für die jeweiligen Flüsse eruiert hat. Diese sind wesentlich kleiner als die aus der Fehlerfortpflanzung. Außerdem wurde mit dieser Methode gezeigt, dass die Gleichungen auf die das *Nevison et al.* (2004) Modell basieren nicht linear sind. Beide Verfahren sind trotz ihrer Vorzüge nicht frei von Fehlerquellen. Zu dem wurde versucht das Modell von *Nevison et al.* (2004) weiterzuentwickeln und auf die Region vor Mauretanien genauer anzupassen. Mit Hilfe eines hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modells wurde ein Faktor von 0,6 ermittelt. Dieser korrigiert die mit der Ekman-Theorie berechnete und überschätzte Vertikalgeschwindigkeit. Die Flüsse wurden mit diesem Faktor neu berechnet und wieder gegeneinander dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass durch den Vergleich untereinander (QuikSCAT und NCEP) und mit den insitu-Messungen die Korrelationen besser geworden sind. So war es möglich, das Modell von *Nevison et al.* (2004) von der Struktur einfach zu lassen, aber Prozesse wie Strömungen und Schichtung in der Berechnung der Vertikalgeschwindigkeit mit zuberücksichtigen. Ein Grund, warum die berechneten Flüsse nicht mit den insitu-Messungen übereinstimmen, wurde anhand der Advektionsgleichung und den verwendeten Daten aus dem hochaufgelöstem Modell dargelegt. Für einen Punkt kann die Methode der Ekman-Theorie, die im *Nevison et al.* (2004) Modell als einziger Antrieb für Auftrieb fungiert, nicht angewendet werden. Dies ist ein zu großräumiger physikalischer Prozess ist. Mit Hilfe der Advektionsgleichung wurde ebenfalls gezeigt, dass die verwendete Methode für Auftrieb im *Nevison et al.* (2004) Modell für großräumige küstennahe Regionen anwendbar ist. Es wurde des weiteren deutlich, dass die Größe der Flüsse mit dem *Nevison et al.* (2004) Modell, mit denen berechnet mit der Advektionsgleichung und den Daten aus dem hochaufgelösten Modell, in einem Punkt gut übereinstimmen. Dabei wurde aber auch gezeigt, dass die Flüsse innerhalb eines Jahres stark variieren und ganzjährig sind. Das Modell von *Nevison et al.* (2004) ist in dieser Hinsicht begrenzt, da es von den hiesigen Windverhältnisse abhängig ist.

Das Modell ist ein Versuch die Flüsse, die aufgrund von Küstenauftrieb emittiert werden, zu berechnen, sowie auch Hochrechnungen für ein ganzes Jahr in Abhängigkeit vom Wind zu ermitteln. Es ist erkenntlich, dass der Wind in Raum und Zeit eine sehr variable Größe ist, die es genauer zu bestimmen gilt, um damit auch die Unsicherheit der berechneten Emissionen zu verbessern.

Es existieren schon viele Arbeiten zu dem Themenbereich, Gasaustausch in Küstenregionen, jedoch sind die berechneten Emissionen von  $N_2O$  noch mit großen Unsicherheiten versehen (*Nevison et al. (2004)*; *Nevison et al. (2003)*; *Bange et al. (2001)*). Ein Grund dafür ist zum einen der nicht direkt messbare Gasaustausch. Dieser hat zur Folge, dass für die Berechnung viele Annahmen getroffen werden müssen. Im Laufe der Jahre wurden viele Parametrisierungen entwickelt. Somit existieren zum Beispiel zahlreiche für den Transferkoeffizient  $k$  (*Wanninkhof (1992)*; *Nightingale P. D. (2000)*; *Liss and Merlivat (1986)*). Diese weisen eine starke Abhängigkeit des Windes auf (linear, quadratisch, kubisch). Gut räumlich und zeitlich aufgelöste Winde sind daher essentiell, um ein sicheres, sowie signifikantes Ergebnis zu erlangen. Zum anderen ist ein Grund für die Unsicherheiten die spärlichen Messungen und die hohen regionalen und zeitlichen Variabilitäten der Ozeanemissionen. Es existieren Versuche die QuikSCAT-Daten an der Küste höher aufzulösen auf 12,5 km (*Tang et al., 2004*) oder auf andere Winddaten zurückzugreifen wie ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) (*Christiansen M. B., 2007*) und somit die Berechnung von Flüssen in Küstenauftriebsregionen zu verbessern.



## Anhang

In der folgenden Tabelle sind die eingehenden Daten der  $N_2O$ -Konzentration in 100 m ( $N_2O_{100m}$ ), sowie deren Koordinaten (lat, lon) zu sehen. Des weiteren sind die Flüsse berechnet mit den jeweiligen Winddatensätzen von QuikSCAT ( $F_{qs}$ ) und NCEP ( $F_{ncep}$ ) dargestellt. Die Ziffern 1-19 beschreiben die Position der  $N_2O_{100m}$ -Werte auf der x-Achse (Kapitel 3) und sind geordnet wie in der Tabelle 2.1.

Gliederung auf der x-Achse	lat	lon	$N_2O_{100m}$	$F_{ncep}$	$F_{qs}$
1	20.6	18.16	32.39	1.5160	0.8198
2	20.33	17.77	28.99	1.1515	0.4923
3	18	17.01	23.43	-0.0008	0.0000
4	18.01	16.5	36.41	-0.0001	0.0036
5	17.5	16.97	34.22	0.1871	0.1712
6	18	17	27.13	0.5822	0.4401
7	18	16.5	27.55	0.2507	0.2206
8	19	16.99	32.46	0.7574	0.3228
9	18.5	16.75	22.56	-0.0197	-0.0127
10	17.5	16.5	31.7	0.0684	0.0079
11	17.84	16.57	31.46	0.0084	0.1319
12	16.17	17.07	28.29	0.1046	0.1021
13	17	16.99	31.17	0.0387	0.2288
14	17	16.8	33.53	-0.0158	0.2580
15	19	16.85	26.9	0.0479	0.0157
16	19.99	18	28.02	-0.0299	0.0494
17	20.14	17.69	21.86	-0.0592	-0.0287
18	17.83	16.56	30.79	1.2996	0.1179
19	18	17	24.79	0.3327	0.0023



## Literatur

- Adel, A., *Further detail in the rock-salt prismatic solar spectrum*, vol. 88, 186-188 pp., *Astrophys. J.*, 1938.
- Bange, H., M. Andreae, S. Lal, C. Law, S. Naqvi, P. Patra, T. Rixen, and R. Upstill-Goddard, Nitrous oxide emissions from the arabian sea: A synthesis, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 1(1), 61–71, 2001.
- Bange, H. W., Gaseous nitrogen compounds (NO, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>) in the Ocean, in *Nitrogen in the Marine Environment, 2nd Edition*, edited by D. G. Capone, D. A. Bronk, M. R. Mulholland, and E. J. Carpenter, pp. 51–94, Elsevier, 2008.
- Bange, H. W., T. G. Bell, M. Cornejo, A. Freing, G. Uher, R. C. Upstill-Goddard, and G. Zhang, MEMENTO: a proposal to develop a database of marine nitrous oxide and methane measurements, *Environmental Chemistry*, 6(3), 195–197, doi: 10.1071/EN09033, 2009.
- Chelton, D., and M. Freilich, Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ecmwf and ncep numerical weather prediction models, *monthly weather review*, 133(2), 409–429, 2005.
- Christiansen M. B., N. J., Sorensen L. L., The carbon cycle from north to south along the galathea 3 route, pp. 23–27, 2007.
- Codispoti, L. A., T. Yoshinari, and A. H. Devol, Suboxic respiration in the oceanic water column, in *Respiration in Aquatic Ecosystems*, edited by P. A. del Giorgio and P. J. I. B. Williams, pp. 225–487, Oxford University Press, 2005.
- Crutzen, P. J., The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96, 320–325, 1970.
- Crutzen, P. J., and U. Schmailzl, Chemical Budgets of the Stratosphere, *Planetary and Space Science*, 31(9), 1009–1032, 1983.
- David, H., Further applications of range to the analysis of variance, *Biometrika*, 38, 393–409, 1951.

- Doerffel, K., *Statistik in der analytischen Chemie*, vol. 3, 152ff pp., Verlag Chemie, Weinheim, 1984.
- Eden, C., Middepth equatorial tracer tongues in a model of the Atlantic Ocean, *Journal of geophysical Research-oceans*, 111(C12), 2006.
- Eden, C., R. Greatbatch, and C. Boning, Adiabatically correcting an eddy-permitting model using large-scale hydrographic data: Application to the Gulf Stream and the North Atlantic Current, *Journal of Physical Oceanography*, 34(4), 701–719, 2004.
- Emery, W., W. Lee, and L. Magaard, Geographic and seasonal Distribution of Brunt-Vaisala frequency and Rossby Radii in the North Pacific and North Atlantic, *Journal of Physical Oceanography*, 14(2), 294–317, 1984.
- Freing, A., and H. W. Bange, Towards a global database of oceanic nitrous oxide measurements, *imber update*, issue 8, 2007.
- Greenwood, N. N., and A. Earnshaw, *Chemistry of the elements*, Pergamon, Press, Oxford, 1984.
- Halpern, e. a., D., Monthly mean global surface ocean variables, *NASA JPL Physical Oceanography DAAC, Pasadena, CA.*, 2001.
- Hoepffner, N., B. Sturm, Z. Finenko, and D. Larkin, Depth-integrated primary production in the eastern tropical and subtropical North Atlantic basin from ocean colour imagery, *International Journal of remote sensing*, 20(7), 1435–1456, 1999.
- IAC, Institute for atmospheric and climate science: Stratosphärische chemie, [www.iac.ethz.ch/people/dbrunner/teaching/chemphys\\_kapitel7\\_v2008.pdf](http://www.iac.ethz.ch/people/dbrunner/teaching/chemphys_kapitel7_v2008.pdf), 1993.
- IPCC, *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 104 pp., IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. Yang, J. Hnilo, M. Fiorino, and G. Potter, Ncep-doe amip-ii reanalysis (r-2), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(11), 1631–1643, 2002.

- Liss, P. S., and L. Merlivat, Air-sea gas exchange rates: Introduction and synthesis, in *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, edited by P. B. Menard, pp. 113–127, D. Reidel, Norwell, Mass., 1986.
- Minas H. J., D. R. C., Codispoti L.A., Nutrients and primary production in the upwelling region off northwest africa, *Rapp. P.-V. Réun. Cons. Int. Explr. Mer.*, pp. 148–182, 1892.
- Mittelstaedt, E., The Upwelling Area off Nothwest Africa - a description of Phenomena related to Coastal Upwelling, *Progress in Oceanographie*, 12(3), 307–331, 1983.
- Nevison, C., R. F. Weiss, and D. J. Erickson III, Global oceanic emissions of nitrous oxide, *Journal of Geophysical Research*, 100(C8), 809–815, 1995.
- Nevison, C., J. H. Butler, and J. W. Elkins, Global distribution of N<sub>2</sub>O and the  $\Delta$ N<sub>2</sub>O-AOU yield in the subsurface ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 1119, doi:10.1029/2003GB002068, 2003.
- Nevison, C. D., T. J. Lueker, and R. F. Weiss, Quantifying the nitrous oxide source from coastal upwelling, *Global Biogeochemical Cycles*, 18(1), 2004.
- Nevison, C. D., N. M. Mahowald, R. F. Weiss, and R. G. Prinn, Interannual and seasonal variability in atmospheric N<sub>2</sub>O, *Global Biogeochemical Cycles*, 21(3), 2007.
- Nightingale P. D., L. C. S., Malin G., In situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers, *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 373–387, 2000.
- Perez-Brunius, P., M. Lopez, A. Pares-Sierra, and J. Pineda, Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources, *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*, 48, 204–214, 2007.
- Prather, M., D. Ehhalt, F. Dentener, R. Derwent, E. Dlugokencky, E. Holland, I. Isaksen, J. Katima, V. Kirchhoff, P. Matson, P. Midgley, and M. Wang, Atmospheric chemistry and greenhouse gases, in *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the*

- Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by J. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, M. Noguer, P. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. Johnson, pp. 239–287, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- Ravishankara A. R., P. R. W., Daniel J. S., Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century, *Scienceexpress*, 2009.
- Rhee, T. S., The process of air-water gas exchange and its implications, Ph.D. thesis, Texas A&M University, 2000.
- Schafstall, J., monatlich gemittelte sst von modis, [jschafstall@ifm-geomar.de](mailto:jschafstall@ifm-geomar.de), 2009.
- Tang, W., W. Liu, and B. Stiles, Evaluations of high-resolution ocean surface vector winds measured by QuikSCAT scatterometer in coastal regions, *ieee Transactions on Geoscience and remote sensing*, 42(8), 1762–1769, 2004.
- Tomczak, M., and J. S. Godfrey, *Regional Oceanography: An Introduction*, 2002.
- Trogler, W., Physical properties and mechanisms of formation of nitrous oxide, *Coordination Chemistry Reviews*, 187, 303–327, 1999.
- Wallcraft, A. J., A. B. Kara, C. N. Barron, E. J. Metzger, R. L. Pauley, and M. A. Bourassa, Comparisons of monthly mean 10 m wind speeds from satellites and NWP products over the global ocean, *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114, 2009.
- Wanninkhof, R., Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *Journal of Geophysical Research*, 97(C5), 7373–7382, 1992.
- Weiss, R., and B. Price, Nitrous oxide solubility in water and seawater, *Marine Chemistry*, 8(4), 347–359, 1980.
- wikipedia, Distickstoffmonoxid, <http://de.wikipedia.org/wiki/Distickstoffmonoxid>  
[upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Scattometer\\_principle.GIF](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Scattometer_principle.GIF), 2009.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Zeigt die Strukturformel von Distickstoffmonoxid ( <i>wikipedia</i> , 2009). . . . .	2
1.2	Darstellung der Änderung der $N_2O$ und $NO_x$ Mischungsverhältnis in ppb seit 1750 ( <i>IPCC</i> , 2007). . . . .	3
1.3	Darstellung eines vertikalen Profils der $N_2O$ -Konzentration in der Atmosphäre in ppb aus dem Jahr 1993 ( <i>IAC</i> , 1993). . . . .	4
1.4	Darstellung der Gesamtemissionen von $N_2O$ in Prozent aus dem <i>IPCC</i> (2007) . . . . .	5
1.5	Überblick über die Prozesse, welche die $N_2O$ Verteilung im Ozean beeinflussen ( <i>Bange</i> , 2008) . . . . .	6
1.6	Tiefenverteilung der $N_2O$ Konzentration in nmol/L sowie die Sauerstoff Konzentration in mol/L im Tropischen Nord-Atlantik. . . . .	8
1.7	Zeigt eine Karte von $\Delta pN_2O$ in natm in der Wasseroberfläche der Weltozeane ( <i>Nevison et al.</i> , 1995). . . . .	9
1.8	Oberflächenzirkulation im tropische Nordost Atlantik im a) Sommer und b) Winter ( <i>Mittelstaedt</i> , 1983) . . . . .	10
1.9	Schematische Darstellung von Küstenauftrieb angetrieben durch küstenparallele Winde ( <i>Nevison et al.</i> , 2004). . . . .	12
1.10	Dargestellt sind die monatlich gemittelten Oberflächentemperaturen von MODIS vor der Küste von Mauretania ( <i>Schafstall</i> , 2009) . . . . .	13
1.11	Breitengradabhängige Dauer der Auftriebperiode ( <i>Minas H. J.</i> , 1892) . . . . .	13
2.1	Darstellung der Abhängigkeit des Transferkoeffizienten von der Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe . . . . .	19
2.2	Geographische Position der verwendeten Datenpunkte aus den Jahren 2003, 2006, 2007 und 2008. . . . .	22
2.3	Schematische Darstellung der Messmethode von QuikSCAT/Scatterometer ( <i>wikipedia</i> , 2009). . . . .	23
3.1	Darstellung der berechneten Flüsse mit dem Winddatenstz NCEP mit dazugehörigen mittleren v-Komponente des Windes . . . . .	30
3.2	Berechnete $\Delta N_2O$ in nmol/L und das Produkt der Abklingfunktionen $Q_w$ , $Q_t$ mit dem Winddatensatz von NCEP. . . . .	31

3.3	Darstellung der berechneten Flüsse mit dem Winddatensatz QuikSCAT mit dazugehörigen mittleren v-Komponente des Windes . . . . .	32
3.4	Berechnete $\Delta N_2O$ in nmol/L und das Produkt der Abklingfunktionen $Q_w, Q_t$ mit dem Winddatensatz von QuikSCAT. . . . .	33
3.5	Vergleich der mittleren v-Komponente des Windes in m/s in 10 m Höhe von NCEP und QuikSCAT . . . . .	34
3.6	Vergleich der berechneten $N_2O$ -Konzentration an der Wasseroberfläche von NCEP und QuikSCAT . . . . .	35
3.7	Vergleich der berechneten Flüsse von NCEP und QuikSCAT . . . . .	36
3.8	Vergleich der Schiffsdaten, die für die Berechnung der Insitu-Messungen verwendet werden, mit der v-Komponente des Windes von NCEP . . . . .	37
3.9	Zeigt den Vergleich der $N_2O$ -Konzentration an der Oberfläche gemessen für die Berechnung für die Insitu-Messungen und die berechneten mit NCEP . . . . .	38
3.10	Vergleich der insitu-Flüsse mit den berechneten von NCEP . . . . .	39
3.11	Vergleich der Schiffsdaten, die für die Berechnung der Insitu-Messungen verwendet werden, mit der v-Komponente des Windes von QuikSCAT . . . . .	40
3.12	Vergleich der $N_2O$ -Konzentration an der Oberfläche gemessen für die Insitu-Messungen und berechnet mit den Winddaten QuikSCAT . . . . .	41
3.13	Vergleich der insitu-Flüsse mit den berechneten Flüsse mit QuikSCAT . . . . .	42
3.14	Schematische Darstellung der Region vor Mauretanien mit eingezeichneten NCEP-Koordinaten in der Küstenauftriebsregion . . . . .	43
3.15	Darstellung der v-Komponente des Windes von NCEP für das Jahr 2008 . . . . .	44
3.16	Berechnete Emissionen mit den Winddaten von NCEP für das gesamte Jahr 2008 . . . . .	45
3.17	Schematische Darstellung der Region vor Mauretanien mit eingezeichneten QuikSCAT-Koordinaten in der Küstenauftriebsregion . . . . .	46
3.18	Darstellung der täglichen v-Komponente des Windes von QuikSCAT für das Jahr 2008 . . . . .	47
3.19	Darstellung der berechneten Emissionen mit den Winddaten von QuikSCAT für das Jahr 2008 . . . . .	48

3.20	NCEP, Verteilung der v-Komponente des Windes während des Jahres 2008 . . . . .	49
3.21	QuikSCAT, Verteilung der v-Komponente des Windes während des Jahres 200 . . . . .	50
3.22	Berechnete Emissionen mit dem Winddatensatz NCEP für das Kalenderjahr 2008 . . . . .	51
3.23	Berechnete Emissionen mit dem Winddatensatz QuikSCAT für das Kalenderjahr 2008 . . . . .	52
3.24	Berechnete Emissionen mit den Winddaten NCEP in g N <sub>2</sub> O-N/a . . .	53
3.25	Berechnete Emissionen mit den Winddaten QuikSCAT in g N <sub>2</sub> O-N/a	54
4.1	Berechnete Emissionen mit NCEP wie Kapitel 3.1, sowie eingezeichnet die Unsicherheiten aus der Fehlerfortpflanzung . . . . .	59
4.2	Berechnete Emissionen mit QuikSCAT wie Kapitel 3.1, sowie eingezeichnet die Unsicherheiten aus der Fehlerfortpflanzung . . . . .	60
4.3	Mit hochaufgelöstem Modell berechneter Ekmantransport und die Vertikalgeschwindigkeit in 100m Tiefe für ein klimatologisches Jahr .	62
4.4	Differenz beider berechneten Flüsse ermittelt mit NCEP mit und ohne Faktor für die jeweiligen Jahre (Kapitel 3.1 ) . . . . .	63
4.5	Differenz beider berechneten Flüsse ermittelt mit QuikSCAT mit und ohne Faktor für die jeweiligen Jahre (Kapitel 3.1 ) . . . . .	64
4.6	Dargestellt ist die Verteilung der berechneten Emissionen ermittelt mit der Monte-Carlo-Simulation, sowie dem Winddatensatz NCEP . .	65
4.7	Dargestellt ist die Verteilung der berechneten Emissionen ermittelt mit der Monte-Carlo-Simulation, sowie dem Winddatensatz QuikSCAT	66
4.8	Berechnete Emissionen mit der Advektionsgleichung für ein klimatologisches Jahr für den Stationspunkt 17 °W und 18 °N . . . . .	67
4.9	Dargestellt ist die Vertikalgeschwindigkeit berechnet mit der Ekman-Theorie ( <i>Nevison et al. (2004)</i> ) gegen die v-Komponente des Windes .	68
4.10	Dargestellt ist die Vertikalgeschwindigkeit gegen die v-Komponente des Windes berechnet mit dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell für drei Boxen . . . . .	69

- 4.11 Berechnete Vertikalgeschwindigkeit in 50 m aufgetragen gegen die v-Komponente des Windes für den Stationspunkt 17 °W, 18 °N in m/s, berechnet von dem hochaufgelösten Ozean/Atmosphären-Modell . . . 70

## Tabellenverzeichnis

2.1	Darstellung des verwendeten Datensatz . . . . .	21
2.2	Dargestellt sind die Vor- und Nachteile der Winddatensätze NCEP, QuikSCAT und den gemessenen Windgeschwindigkeiten vom Schiff .	24
3.1	Darstellung der Gesamtemissionen berechnet mit den Winddatensätzen NCEP und QuikSCAT mit dem maximalem Fehler aus der Fehlerfortpflanzung für das jeweilige Kalenderjahr (2003, 2006, 2007, 2008)	54
4.1	Dargestellt sind die mittleren absoluten Fehler der verschiedenen Größen, die in die Berechnung der Fehlerfortpflanzung eingehen. . . . .	56
4.2	Dargestellt die Gesamtemissionen für die Küstenauftriebsregion in Gg N <sub>2</sub> O-N/a mit Korrekturfaktor . . . . .	61



## Danksagung

Für die Bereitstellung des Arbeitsplatzes bedanke ich mich bei Prof. Dr. Doug Wallace. Für die liebevolle und umfangreiche Betreuung, den vielen Ideen und kritischen Anmerkungen möchte ich mich bei Prof. Dr. Dietmar Dommengeset und Dr. Hermann Bange bedanken. Für die Vergabe des Themas danke ich vor allem Dr. Hermann Bange, der eine Kooperation zwischen der maritimen Meteorologie und der Marinen Biogeochemie ermöglichte. Diese Arbeit wurde vom BMBF-Verbandprodukt (FKZ: 03F0462A) gefördert.

Meiner Familie gilt ein besonderer Dank. Meine Eltern, die immer wollten, dass ich glücklich werde, egal was ich mache. Danke für die Freiheiten, das Vertrauen in mich und das Zeigen eines Weges, der bedeutete über seine Handlungen zu reflektieren, zu lernen und nicht alles blind zu glauben. Danke Schwesterherz für die philosophischen Diskussionen, für das Denken über den Tellerrand, das "da sein" an sich und das Gedicht geschrieben aus deinem Herzen.

Während meines Weges bin ich wunderbaren Menschen begegnet, die mich jeweils ein Stück beeinflusst haben und ohne die ich wohl nur halb so gut das Studium gemeistert und nur halb so wenig gelacht hätte. Daher gilt mein Dank vor allem: Henning, ohne dich könnte ich wohl keinen Fahrradreifen reparieren und wechseln. Danke für das Zeigen der Werkzeugwelt und zahlreiche interessante Filmabende. Du bist wahrlich ein Mac Gyver.

Taalke, die erste Person, die ich in Kiel kennengelernt habe und immer noch schätze, ohne dich wäre das Physikpraktikum sehr langweilig geworden und denk daran, Aufläufe macht man immer zu zweit.

Robert, ohne dich würde ich nicht die wunderbare Welt des Aikidos und Iaidos kennen. Danke auch für nachdenkliche Diskussionen und motivierenden Worte, das einfach Spaßhaben, das viele Lachen, das Vertrauen und meine erste selbstgemachte Schwarzwälder-Kirschtorte.

Stephan, du bist einmalig und es ist ein Freude dich zu kennen, ohne dich würde ich wohl nicht wissen, das Bach in die Barock-Zeit gehört. Danke für die vielen Diskussionen bis 3 Uhr morgens, den Streitereien und Julia, du als Retterin in der Not, warst immer als Schiedsrichterin da, um zu schlichten mit was Süßem. Unvergessen der letzte Tag unserer Welt-WG. Ihr Zwei habt mein Einstieg in das fremde Kiel

sehr erleichtert.

Michi, auf dich kann man zählen. Auf Umwegen haben wir uns kennen und schätzen gelernt und ich hoffe, dass wir uns auch weiterhin so gut verstehen und vertrauen. Die HPA, bestehend aus: Annette, was hatten wir für Diskussionen und wie oft endeten sie mit den Worten: "Man, ist das alles kompliziert!". Danke für deine Fürsorge, Interesse an meiner Arbeit, Ideen, Hilfe und überhaupt für alles. Cathleen, Danke, dass ich dich überhäufen durfte mit meinen Gedanken und dass ich sie dann ordnen konnte, für deine Unterstützung und motivierenden Worte. Kathrin, Danke für die seelische und moralische Unterstützung in meinen Tiefphasen. Björn, Danke für deine Hilfe in Bildfragen und das dein Tisch so schön pink aussieht. Dank euch allen für viele schöne Abende.

Alina, ohne dich wäre der Weg doch erheblich steiler gewesen. Danke für die Daten, die Gespräche, die Matlab und Latexhilfe.

Mirjam, Danke für das kritische Auseinandersetzen mit meinem Modell, deine Ideen und Anregungen und dass ich dich, sowie Tim und Jens löchern durfte mit vielen Fragen. Und Danke für deine Modelldaten.

Christoph, Danke für deine Unterstützung und Hilfe insbesondere, dass ich dich mit den Winddaten belästigen durfte.

Georg, mein persönlicher IT-Fachmann. Danke für das Retten meiner Nerven, wenn es um Linux und zu installierende Programmen ging.

Jan, Danke für das Öffnen einer Tür, die mein Leben verändert hat.

Fürs Lesen und korrigieren meines doch sehr umgangssprachlichen Ausdrucks gilt meinen Helden: Robert, Netti und Lena (du wirst trotzdem nicht gestrichen!)

Und last but not least, Janina und Ingo. Danke für das Zeigen einer bewussteren Lebensart/-gefühl, das Wahrnehmen der augenscheinlich kleinen Dinge des Lebens, die doch so wertvoll sind, für unbezahlbare Gespräche, das Vertrauen in mich, die Erfahrungen in Life-Rollen-Spielen, die lustigen Lehrgänge, die spaßigen Autofahrten, das wundervolle Aikido und Iaido, das Ordnen meiner Gedanken für meine Diplomarbeit, die wertvollen Tipps dazu und die motivierenden Worte. Ich bin stolz ein Teil eurer Familie sein zu dürfen.

“Das ist ein Langschwert! Erkennbar an der Länge!”

# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides Statt, dass die vorliegende Diplomarbeit – abgesehen von der Beratung durch meinen wissenschaftlichen Lehrer und der Verwendung der angegebenen Hilfsmittel – nach Inhalt und Form meine eigene ist. Sie hat weder ganz noch teilweise an einer anderen Stelle im Rahmen eines Prüfungsverfahrens vorgelegen.

Kiel, den 30. September 2009

---

(Franziska Wittke)

