

TEXTE

55/2013

Abhängigkeit der RCG-Simulation von unterschiedlichen meteorologischen Treibern

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 206 43 200/01
UBA-FB 001524/ANH,24

Abhängigkeit der RCG-Simulationen von unterschiedlichen meteorologischen Treibern

**Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur
Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“**

von

Andreas Kerschbaumer

Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische
Umweltforschung, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4530.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Freie Universität Berlin Institut für Meteorologie Troposphärische Umweltforschung Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10 12165 Berlin
Abschlussdatum:	August 2010
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet II 4.1 Grundsatzfragen der Luftreinhaltung Johanna Appelhaus

Dessau-Roßlau, Juni 2013

1.	Einleitung	1
2.	Methode – Daten	2
2.1	Diagnostischer Ansatz: TRAMPER.....	2
2.2	Prognostischer Ansatz: COSMO-EU (Barbara Fay et al., 1997):.....	5
2.3	Prognostischer Ansatz: COSMO-EU (Batchvarova-Gryning (1994):	7
2.4	Untersuchtes Gebiet und Variablen:	9
3.	Resultate - Meteorologievergleich	10
3.1	Vergleich TRAMPER – COSMO-EU:	10
3.1.1	Bodentemperatur	10
3.1.2	Bodenwind	12
3.1.3	Niederschlag.....	13
3.1.4	Wolkenbedeckung.....	14
3.1.5	Vertikalprofile: Temperatur und horizontale Windgeschwindigkeit	14
3.1.6	Schubspannungsgeschwindigkeit.....	16
3.1.7	Mischungsschichthöhe	20
3.2	Vergleich TRAMPER – (COSMO-EU – Batchvarova Gryning):	26
3.2.1	Mischungsschichthöhe	26
4.	Resultate – RCG-Simulationen	31
4.1.	Ozon	31
4.2.	NO ₂	34
4.3.	PM10 – PM2.5	38
4.4.	elementarer Kohlenstoff	43
4.5.	Sulfat – Nitrate.	45
5.	Diskussion	48
5.1.	Unterschiedliche Mischungsschichtberechnungen – B. Fay (1997) vs. Batchvarova-Gryning (1994).	48
5.1.1:	Ozon.	48
5.1.2:	NO ₂	49
5.1.3:	PM10	50
5.2.	Direkte und abgeleitete Meteorologische Größen für Melpitz.....	51
5.2.1:	Mischungsschichthöhe	52
5.2.2:	Schubspannungsgeschwindigkeit.....	53
5.2.3:	Monin-Obukhov-Länge.....	54
5.2.4:	Diffusionskoeffizient zwischen 1. und 2. RCG-Schicht	55
5.2.5:	Depositionsgeschwindigkeiten.....	56
5.2.5.1:	Ozon	56
5.2.5.2:	NO ₂	57
5.2.5.3:	Partikel	58
5.2.6:	Regen.....	59
5.3:	Nasse Deposition.....	59
6.	Zusammenfassung	61
7.	Bibliographie	62
8.	Abbildungsverzeichnis	64

1. Einleitung

Meteorologische Felder spielen eine wesentliche Rolle in der korrekten Vorhersage von Schadstoffkonzentrationen in der Luft. Schadstoffe werden vor allem über Emissionen am Boden oder in Schornsteinhöhe in die Luft eingespeist, dort werden sie chemisch umgewandelt und mit Luftpaketen transportiert und durchmischt, und werden wieder zum Boden über trockene und nasse Prozesse zurückgebracht. Der bodennahen Schicht muss dabei erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden, da sich dort die von den Schadstoffen betroffenen Menschen und Ökosystem befinden. 3000 bis 4000 m über Grund scheinen auszureichen, um korrekt die Ausbreitung über mesoskalige Gebiete zu simulieren. Demzufolge kommen den atmosphärischen Prozessen in der planetaren Grenzschicht eine bedeutende Rolle zu. Des Weiteren müssen orographisch induzierte Strömungen wie Hangwinde und Land-See-Zirkulationen korrekt wiedergegeben werden. Auch der Einstrahlung kommt eine besondere Rolle zu, da sie wesentlich die Atmosphärenchemie prägt. Trockene Deposition hängt stark vom atmosphärischen Widerstand ab, der den Transport zum Erdboden beeinflusst; nasse Deposition hängt vom Regen und vom Wassergehalt der Luft ab.

Um den Einfluss der Meteorologie auf die Berechnung von Luftschadstoffkonzentrationen quantitativ erfassen zu können, wird in dieser Studie ein Chemisches Transport-Modell (CTM) benutzt, und dieses mit zwei unterschiedlichen Meteorologien laufen gelassen. Dabei wird bei den Meteorologien jeweils die Analyse benutzt, da nicht die Güte der Vorhersage des Modells die korrekte Beschreibung der Schadstoffkonzentrationen beeinflussen soll. Deshalb wurde zum einen das diagnostische TRAMPER-System benutzt, zum anderen die Analysen des prognostischen COSMO-EU des DWD.

Im Folgenden werden beide Modelle kurz vorgestellt, wobei das Hauptaugenmerk auf die Beschreibung der Grenzschicht gelegt worden ist. Danach werden die meteorologischen Felder miteinander verglichen. Hauptpunkt der Studie ist die Untersuchung der unterschiedlichen Schadstoffkonzentrationssimulationen. Diese können aufgrund der Modellkonfiguration ausschließlich auf die meteorologischen Eingangsfelder zurückgeführt werden. Alle anderen Eingangsparameter wurden nicht geändert. In einer Diskussion der Resultate soll aufgezeigt werden, welche meteorologischen Felder für die größten Konzentrationsunterschiede verantwortlich gemacht werden können.

2. Methode – Daten

Um die meteorologischen Felder für das Aerosol-Chemie-Transport-Modell (CTM) RCG zu generieren, werden in dieser Studie zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zum einen werden meteorologische Messungen über ein optimales Interpolationsverfahren auf ein regelmäßiges Gitter gebracht, zum anderen werden prognostische Felder auf das CTM-Gitter interpoliert.

2.1 Diagnostischer Ansatz: TRAMPER

Im diagnostischen Ansatz wird das im Grundsatz bei Reimer (1986) und Reimer und Scherer (1992) beschriebene Modell TRAMPER verwendet. TRAMPER benutzt Bodenbeobachtungen und Radiosondenaufstiege aus dem weltweiten meteorologischen synoptischen Netz. Neben diesen Daten werden noch klimatologische Werte der Wassertemperatur und geographische Daten wie Landnutzungsdaten und Orographie verwendet. Auf 24 isentropen Höhenflächen werden über ein univariates Interpolationsschema folgende Variablen in der Troposphäre analysiert:

Montgomery Potential, Druck, lokale Stabilität, Wind und relative Feuchte. Am Boden werden unreduzierter Bodendruck, 10 Meter Wind, potentielle Temperatur, Drucktendenz, reduzierter Bodendruck und relative Feuchte betrachtet. Die dreidimensionalen Felder Wind, Temperatur und lokale Stabilität werden vom Boden ausgehend berechnet, um vertikale Konsistenz zu gewährleisten. Demzufolge werden den Bodenwerten größere Genauigkeit als den Radiosondenaufstiegen zugerechnet.

Durch die Wahl des isentropen Koordinatensystems werden insbesondere vertikal gering ausgedehnte thermische Strukturen besser wiedergegeben. Beispielsweise können so Inversionen oder allgemein lokale Stabilitäten flächenhaft erfasst und ihre schräge Raumlage dargestellt werden. Das TRAMPER-Analyseverfahren, das auf Arbeiten von Cressman (1959), Gandin (1963) und Bleck (1975) aufgebaut ist, geht in einem ersten Schritt von einem Ausgangsfeld aus, das aus einer Cressman-Interpolation stammen kann oder aber aus einem numerischen Wettermodell. Im zweiten Schritt werden alle Beobachtungen in das Ausgangsfeld integriert, indem eine optimale Interpolation angewandt wird. Die Beobachtungen gelten jeweils für einen Zeitpunkt. Für die Mittelung im Feld wird Isotropie und Homogenität der Feldgröße vorausgesetzt. Anisotropie wie beispielsweise Land-See-Unterschiede wird dabei über die Landnutzung und eine unterschiedlichen Wichtung erreicht. Um optimale Einbindung der Beobachtungsdaten zu erreichen, wird der Fehler zwischen dem über das inverse Distanzen gewichtete Ausgangsfeld und den Beobachtungen ermittelt. Diese Abweichungen werden wiederum über die inverse Distanz gewichtete Interpolationsmethode auf das vorgegebene Gitter gebracht und dem Ausgangsfeld aufaddiert. Dieses neue Feld gilt jetzt als Ausgangsfeld und die Methode wird weiteriteriert, bis ein festgesetzter minimaler Fehler erreicht ist.

Über das einfache Cressman-Interpolationsschema werden Wolkenbedeckungsgrad, Schneebedeckung, Niederschlagsmengen und Wassertemperatur zur Korrektur der Klimatologie bestimmt.

Die Grenzschicht wird wie folgt in TRAMPER charakterisiert:

Über Land und am Tage werden die Monin-Obukhov-Länge und die Schubspannungsgeschwindigkeit mit der Energiehaushaltsmethode von van Ulden und Holtslag (1983) berechnet, nachts werden die Ansätze von Hanna und Paine (1986) verfolgt. Über Wasser hingegen wird Hanna et al. (1985) berücksichtigt. Dabei werden iterativ die Monin-

Obukhov-Länge und die Schubspannungsgeschwindigkeit, die voneinander abhängen, bestimmt, bis sich minimale Veränderungen derselben Variablen einstellen.

$$u_* = \frac{ku(z)}{\ln \frac{z}{z_0} - \Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) + \Psi_m \left(\frac{z_0}{L} \right)}$$

u_*	Schubspannungsgeschwindigkeit
k	von Karman – Konstante 0.4
z_0	Rauhigkeitskonstante (abhängig nur von Landnutzungs-kategorie)
z	Höhe
$u(z)$	Windgeschwindigkeit in der Höhe z
L	Monin-Obukhov-Länge
Ψ_m	Stabilitätsfunktion

$$L = \frac{-\rho c_p T u_*^3}{kgH}$$

ρ	Luft-dichte
c_p	spezifische Wärmekapazität 14.24 kJ/kg K
T	Temperatur
g	Fallbeschleunigung (9.81 m/s ²)
H	vertikaler turbulenter Wärmestrom

Als Anfangswert für u_* wird für neutrale Schichtung ($L = \infty$) die folgende Bedingung gesetzt:

$$u_* = \frac{ku(z)}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}$$

und für stabile Schichtung (vor allem nachts) mit Hilfe von Strömungswiderstandskoeffizienten (Weil und Brower, 1983):

$$u_* = \frac{C_{dn} u(z)}{2} (1 + \sqrt{C})$$

$$C_{dn} \quad \text{neutraler Luftwiderstandskoeffizient} \quad C_{dn} = k \left(\ln \frac{z}{z_0} \right)^{-1}$$

$$C \quad \text{Widerstandskoeffizient} \quad C = 1 - \frac{4\gamma z_m g \Theta_*}{C_{dn} u(z)^2 T}$$

γ Konstante (4.7)

z_m Höhe über Grund

Θ_* Temperaturschwankungsmaß

Nach Holtslag und van Ulden (1983) wird dabei Θ_* als Minimum der beiden folgenden Abschätzungen verwendet:

$$a) \quad \Theta_* = 0.09(1 - 0.5N^2)$$

$$b) \quad \Theta_* = \frac{TC_{dn} u^2}{4\gamma z_m g}$$

Die Stabilitätsfunktion Ψ_m wird nach Paulson (1970) wie folgt ausgedrückt:

$$\Psi_m = 2 \ln \frac{1+x}{2} + \ln \frac{1+x^2}{2} - 2 \tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2} \quad \text{für } \frac{z}{L} < 0$$

$$x = \sqrt[4]{1 - 16 \frac{z}{L}}$$

$$\Psi_m = -17 \left[1 - \exp\left(-0.29 \frac{z}{L}\right) \right] \quad \text{für } \frac{z}{L} \geq 0.$$

In TRAMPER wird die Mischungsschicht durch eine einheitliche Bulk-layer realisiert. Die Obergrenze wird durch einen vertikalen potentiellen Temperatursprung als Sperrregion definiert.

Für die nächtliche Mischungsschicht wird für die neutrale (mechanische) Schichtung nach Venkatram (1980) folgender Ansatz verfolgt:

$$h = \frac{\sqrt{2}u_*}{\sqrt{fN_B}}$$

u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit,

f : Coriolisparameter

N_B : Brunt-Väisälä-Frequenz

und für die stabile Schichtung wird folgende Relation vorgeschlagen:

$$h = L \frac{-1 + \sqrt{1 + 2.28 \frac{u_*}{fL}}}{3.8} \quad L : \text{Monin-Obukhov-Länge.}$$

Liegen Informationen zu einer Inversionsschicht aus Beobachtungen vor, wird die Höhe der ersten Inversionsschicht für die Obergrenze der Mischungsschicht genommen.

Für die konvektive Mischungsschichthöhe über Land wird tagsüber die prognostische Methode nach Carson (1973) verwendet:

$$h_{t+dt} = \left[h_t^2 + \frac{2Q_h(1+E)dt}{\Psi_l \rho c_p} - \frac{2d\theta_t h_t}{\Psi_l} \right]^{1/2} + \frac{d\theta_{t+dt}}{\Psi_l}$$

$$d\theta_{t+dt} = \left[\frac{2\Psi_l Q_h dt}{\rho c_p} \right]^{1/2}$$

Ψ_l : adiabatische potentielle Temperaturabnahme oberhalb der Mischungsschicht

$d\theta$: Temperatursprung am Oberrand der Mischungsschicht

E : Konstante (0.15).

Dabei wird die potenzielle Temperaturabnahme über der Mischungsschicht aus der Bestimmung der Höhe der vorherigen Stunde genommen.

Über See wird aufgrund des sehr viel geringeren sensiblen Wärmeflusses die Mischungsschicht über neutrale Luftwiderstandskoeffizienten parametrisiert und nach Blackadar und Tennekes (1968) wie folgt ausgedrückt:

$$h_{water} = \frac{c_w u_*}{f}$$

c_w Konstante (0.16)

u_* Schubspannungsgeschwindigkeit

f Coriolisparameter (10^{-4} s^{-1}).

Am Ende werden die zwei-dimensionalen Felder der Schubspannungsgeschwindigkeit, der Monin-Obukhov-Länge und der Mischungsschicht mit einem numerischen Filter geglättet, um unrealistische Sprünge zwischen Gitterstützpunkten zu vermeiden.

2.2 Prognostischer Ansatz: COSMO-EU (Barbara Fay et al., 1997):

Im rein prognostischen Ansatz wird das numerische Vorhersagemodell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) COSMO-EU benutzt. Es handelt sich dabei um ein nicht hydrostatisches Gittermodell mit einer horizontalen Auflösung von ca. 7 km und einer vertikalen Schichtung in einem hybriden Koordinatensystem, das in der Stratosphäre horizontale Modellflächen aufweist, während in der Troposphäre die Höhenflächen der Orographie folgen – und zwar um so genauer, je tiefer die Schicht liegt. Operationell werden 40 Höhenschichten benutzt, von denen die erste Schicht bei ca. 10 Metern über Grund liegt. Die untere Troposphäre ist sehr gut aufgelöst. Das Rechengebiet umfasst ein geographisches Gebiet von Nordafrika bis Nordnorwegen und von Island bis einschließlich Schwarzem Meer. Die drei-dimensionalen prognostischen Größen Wind, Temperatur, Dichte und Feuchte sowie die 2-D-Felder 2 Meter Temperatur, 10 Meter Wind, Gesamtniederschlag und Gesamtbedeckung werden vom COSMO-EU-Gitter auf das RCG-Gitter linear in der Horizontalen und auch in der Vertikalen interpoliert.

Die Grenzschichtparameter u_* (Schubspannungsgeschwindigkeit) und L (Monin-Obukhov-Länge) sind einfach aus den Ergebnisdaten des numerischen Wettervorhersagemodells zu bestimmen.

Dabei werden folgende Definitionen ausgenutzt:

$$u_* = \overline{u'w'} \quad \Theta_* = \overline{u'\Theta'} \quad \frac{1}{L} = \frac{kg\Theta_*}{\Theta u_*^2}$$

wobei Querbalken über den Variablen zeitliche Mittelungen ausdrücken und Hochkommata für Abweichungen vom Mittelwert stehen.

Im COSMO-EU werden die folgenden Größen dafür benutzt:

$$u_*^2 = c_M v_{KE}^2 \quad \overline{w'\Theta'} = c_H \Delta\Theta_V$$

c_M und c_H werden als TCM (turbulenter Transferkoeffizient für Impuls an der Oberfläche) und TCH (turbulenter Transferkoeffizient für Wärme und Feuchte an der Oberfläche) von COSMO-EU ausgegeben. v_{KE} ist die Windgeschwindigkeit in der untersten Modellfläche. $\Delta\Theta_V$ ist die Differenz der potentiellen virtuellen Temperatur zwischen der ersten Modellfläche (Index $k = KE$) und dem Boden. $\Delta\Theta_V$ kann am einfachsten wie folgt berechnet werden:

$$\Delta\Theta_V \approx (T_V)_{KE} - (T_V)_g + \frac{\Phi_{KE} - \Phi_S}{c_p} \quad T_V = T \left[1 + \left(\frac{R_D}{R} - 1 \right) q_D \right]$$

g	$=$	9.80665	m/s ²
R	$=$	287.05 J/(kg K)	
R_D	$=$	461.51 J/(kg K)	
c_p	$=$	1005	J/(kg K)

Für die Bestimmung der Mischungsschichthöhe schlägt Fay et al. (1997) das diagnostische Richardson-Nummer-Schema (Schrodin, 1995, Fay et al., 1997) vor. Dabei wird die Höhe der Mischungsschicht dort angesetzt, wo der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung vonstatten geht und umgekehrt. In numerischen Wettervorhersagemodellen werden Richardson-Nummern an allen Gitterpunkten und zu allen Integrationszeitschritten zur Berechnung der Austauschkoeffizienten bestimmt. Dabei wird in COSMO-EU die Turbulenzschließung zweieinhalbter Ordnung nach Mellor und Yamada (1974) genommen. Es wird dabei ein Gleichgewicht zwischen Entstehung von Turbulenz aufgrund mechanischer und thermischer Anregung und Dissipation angenommen. Die kritische Richardson-Nummer wird mit 0.38 festgesetzt.

Es wird der Richardson-Nummer-Gradient wie folgt in diskreter Form bestimmt:

$$Ri = \frac{N^2}{M^2}$$

$$N^2 - \text{buoyancy term} = \frac{g}{\theta_v} \left(\frac{\partial \theta_v}{\partial z} \right)$$

$$M^2 - \text{Scherungsterm} = \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2$$

$$Ri = \frac{g \left[\frac{\Delta \theta_v}{\Delta z} + \frac{g}{c_p} \right]}{\theta_v \left(\frac{\Delta v}{\Delta z} \right)^2} \quad (\text{diskretisiert}).$$

Von der Bodenschicht ausgehend wird der Richardson-Nummer-Gradient sukzessive für alle Modellschichten bestimmt und bei einer Überschreitung des kritischen Wertes von $Ri_c = 0.38$ wird die Mischungsschichthöhe angesetzt. Diese erste Überschreitung wird als nächtliche stabile Mischungsschichthöhe angesehen. Danach werden die darüber liegenden Schichten ebenfalls auf einen Übergang der kritischen Richardson-Nummer geprüft und falls dies der Fall ist, also falls von einem turbulenten Regime wieder zu einem laminaren Regime gewechselt wird, wird die turbulente konvektive (tagsüber) oder die „residual layer“ nachts angenommen.

Demzufolge wird die Modellatmosphäre an jedem Gitterpunkt und zu jedem Zeitschritt vom Boden aus auf eine stabile nächtliche Mischungsschicht abgefragt, die beim ersten Überschreiten der kritischen Richardson-Nummer angenommen wird. Danach wird in den darüber liegenden Modellschichten auf eine konvektive oder auf eine „residual“ – Schicht abgefragt, und zwar beim Unterschreiten der kritischen Richardson-Nummer.

Die Schichthöhen werden dabei stabilitätsgewichtet auf eine kontinuierliche Höhe zwischen den Gitterzellen interpoliert.

Grundlegend wird bei diesem Schema davon ausgegangen, dass nachts stabile Mischungsschichthöhen zwischen 100 und 500 Metern liegen (Stull, 1988). Falls das Schema nachts keinen Übergang von laminarer Schichtung zu turbulenter Schichtung findet, wird ein konstanter Wert (ca. 320 Meter) angenommen.

2.3 Prognostischer Ansatz: COSMO-EU (Batchvarova-Gryning (1994):

Des Weiteren wurde mit einem Ansatz, beschrieben in Batchvarova-Gryning (1994), aus Daten des COSMO-EU-Modells die Mischungsschichthöhe nachgerechnet.

Bei der Bestimmung der konvektiven Mischungsschicht wird von einer konstanten potentiellen Temperatur zwischen Boden und Mischungsschichthöhe ausgegangen. In der Entrainment-Zone nimmt die potentielle Temperatur linear zwischen Untergrenze und Obergrenze zu und in der freien Luft über dieser Obergrenze wird von einer stabilen Luftschichtung ausgegangen. Bei konstanter Mischungsschicht lässt sich die Mischungsschichthöhe als Kontinuitätsgleichung ausdrücken und in einen Erhaltungssatz für das Volumen umschreiben. Dabei werden die Volumenänderungen aufgrund der Entrainment w_e (von der Mischungsschicht in die freie Atmosphäre) und der horizontalen Divergenz (Subsidenz) w_s bilanziert.

$$\frac{dh}{dt} = w_e + w_s \quad w_s = -\text{div } h$$

Als Anfangshöhe wird dabei die Höhe der morgendlichen stabilen Grenzschichthöhe genommen, bevor konvektive Turbulenz beginnt. Der Temperatursprung an der Obergrenze der Mischungsschicht hingegen ist vorgegeben.

Gryning und Batchvarova (1994) schlagen für diesen Temperatursprung und so als Obergrenze der Mischungsschicht folgende Relation vor:

$$\Delta \vartheta = \frac{Ah - BKL}{(1 + 2A)h - 2BKL} \gamma$$

L Monin-Obukhov-Länge

K von Karman-Konstante (0.4)

γ potentielle Temperaturänderung oberhalb der Grenzschicht

Daraus lässt sich nun das Anwachsen der Mischungsschicht ableiten:

$$\left[\frac{h^2}{(1 + 2A)h - 2BKL} + \frac{Cu_*^2 T}{\gamma g [(1 + A)h - BKL]} \right] \left(\frac{dh}{dt} - w_s \right) = \frac{(\overline{w' \theta'})_s}{\gamma}$$

mit A, B und C empirische Konstanten: A=0.2, B=2.5 und C=8.

Der Term in eckiger Klammer in der prognostischen Mischungsschichthöhenformel beschreibt den mechanischen und den konvektiven Antrieb des Grenzschichtaufbaus. Die Entrainment-Zone wird bei Gryning und Batchvarova (1994) über eine sehr stabile Stratifizierung gekennzeichnet, die dennoch turbulent ist. Die darüber liegende Luftmasse hingegen wird als nicht-turbulente stabile Schicht angenommen ($\Delta \vartheta = \gamma$). Es wird folgende Parametrisierung für die Schichtdicke der Entrainment-Zone vorgeschlagen:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{3.3}{Ri_E^{1/3}} + 0.2 \quad Ri_E = \frac{\frac{g}{T} \Delta \vartheta_t h}{w_e^2}$$

wobei Ri_E die Entrainment-Richardson-Nummer darstellt. Vor allem am Morgen kurz nach Sonnenaufgang ist die Entrainment-Zone groß, wenn die Mischungsschicht noch dünn ist aber sehr schnell anwächst. Am Nachmittag, bei hoher und langsam sich ändernder Mischungsschicht, wird Ri_E sehr groß und die Entrainment-Zone wird dementsprechend schmal. Gryning und Batchvarova (1994) kombinieren nun das Mischungsschicht- und das Entrainment-Modell und führen somit ein Zwei-Schichten-Modell zur Beschreibung der Mischungsschicht ein.

2.4 Untersuchtes Gebiet und Variablen:

Für diese Studie wurde ein Gebiet ausgewählt, das ganz Deutschland umfasst, von 3° Ost bis 18° Ost und von 46° Nord bis 56° Nord. Das Untersuchungsgebiet wurde des Weiteren in fünf verschiedene Bereiche unterteilt, um die Eigenschaften der einzelnen Modelle bzw. der Ansätze, die Grenzschicht zu simulieren, auf orographische Charakteristika hin zu prüfen. Dabei wurde unterschieden zwischen Voralpengebiet (von 7° Ost bis 15° Ost und von 46° Nord bis 47.5° Nord), Mittelgebirge (8° Ost bis 15° Ost, 47.7° Nord bis 51.5° Nord), Nordostdeutsche Tiefebene (8° Ost bis 17° Ost, 52° Nord bis 54° Nord), Ostsee (13° Ost bis 17.5° Ost, 54.5° Nord bis 56° Nord) und Nordsee (3° Ost bis 8° Ost, 54° Nord bis 56° Nord) (siehe Abbildung 1).

Zwischen TRAMPER und COSMO-EU unterscheiden sich alle meteorologischen Felder, innerhalb COSMO-EU hingegen nur die Mischungsschichthöhe. Die weiteren Felder sind die drei-dimensionalen meteorologischen Felder Windrichtungsvektoren in x- und in y-Richtung, Temperatur, Dichte und Feuchte und die restlichen zwei-dimensionalen Felder Schubspannungsgeschwindigkeit, Monin-Obukhov-Länge, Bedeckungsgrad, Bodenwind, Bodentemperatur und Niederschlag.

Alle meteorologischen Felder wurden auf das RCG-Gitter interpoliert. Dieses geht von 3° Ost bis 18° Ost und von 46° Nord bis 56° Nord, hat eine Auflösung in West-Ost-Richtung von 0.125° und in Süd-Nord-Richtung von 0.0625 Grad, und umfasst somit in der Horizontalen 120 Gitterpunkte entlang der Breitengrade und 160 Gitterpunkt entlang der Längengrade. In der Vertikalen wurden alle meteorologischen 3-dimensionalen Felder auf ein Topographie-folgendes Koordinatensystem gebracht mit den folgenden Schichthöhen über Grund: 25 m, 50 m, 150 m, 300 m, 500 m, 800 m, 1200 m, 1800 m, 2500 m und 3000 m.

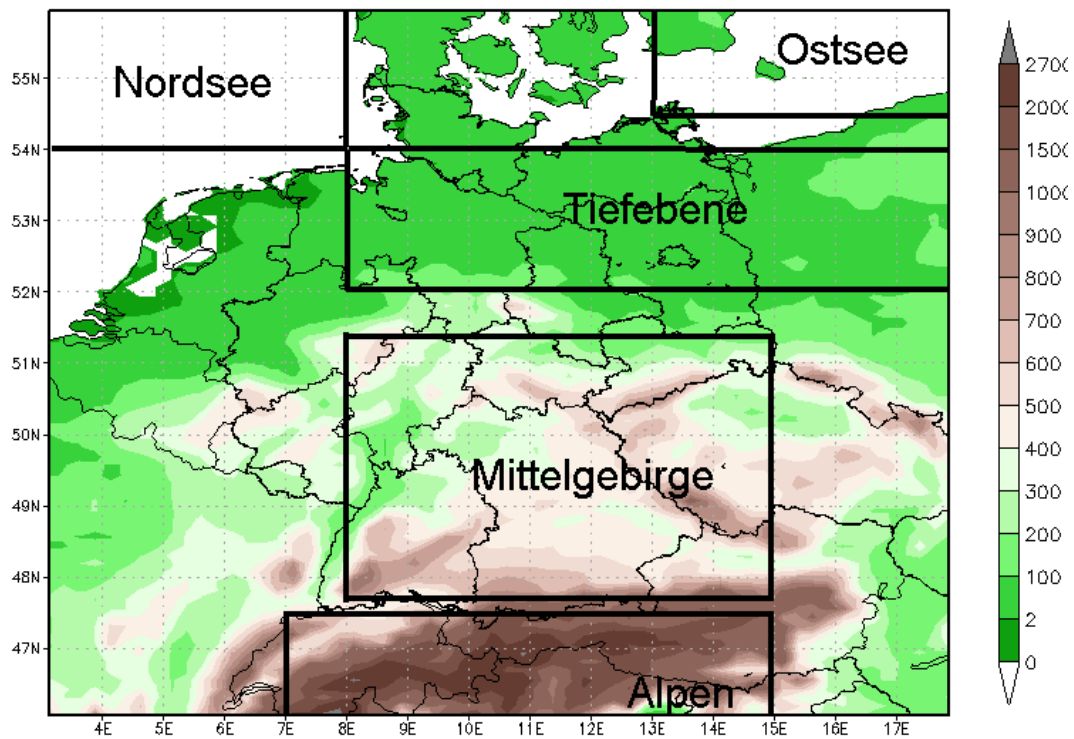


Abbildung 1 Untersuchungsgebiet mit benutzten Benennungen.

3. Resultate - Meteorologievergleich

3.1 Vergleich TRAMPER – COSMO-EU:

3.1.1 Bodentemperatur

Das prognostische COSMO-EU Modell und das diagnostische TRAMPER-Modell simulieren im Jahresmittel sehr ähnliche Bodentemperaturfelder. Im Allgemeinen ist TRAMPER etwas wärmer als COSMO-EU (Abbildung 2). Das macht sich vor allem in den Alpen und über den Mittelgebirgen bemerkbar. Dort werden von TRAMPER bis zu 7 Grad höhere Temperaturen simuliert als mit COSMO-EU. Dies liegt sehr wahrscheinlich an unterschiedlichen Modelltopographie-Daten. Da TRAMPER alle vorhandenen Bodendaten verwendet, auch die in den Alpen, kann davon ausgegangen werden, dass COSMO-EU im Jahresmittel das gemessene Temperaturfeld etwas unterschätzt.

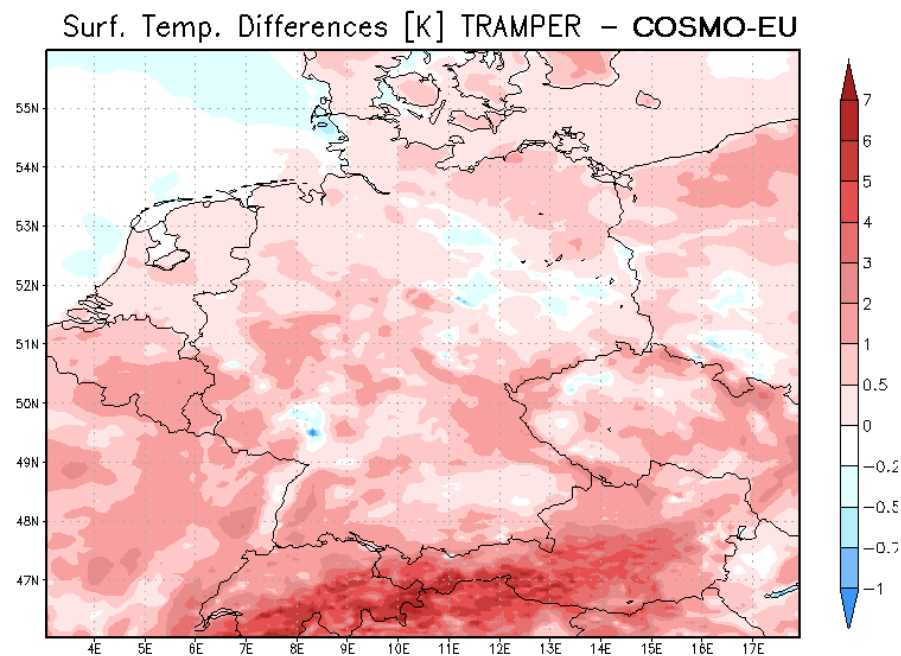


Abbildung 2. Temperaturdifferenz für das Jahresmittel 2005 in Kelvin zwischen TRAMPER und COSMO-EU

Die räumliche Verteilung (Abbildung 3) der Jahresmitteltemperaturen ist in beiden Modellen sehr ähnlich. In beiden Ansätzen werden auch lokale Muster wie beispielsweise der Oberrheingraben, aber auch kleinere topographische Feinheiten wie Alpentäler in der Schweiz und in Österreich richtig erkannt. Die Land-See-Differenz wird bei beiden Modellen relativ schwach ausgeprägt wiedergegeben.

Vor allem im Sommer werden von TRAMPER in fast allen untersuchten Gebieten höhere Tagesmitteltemperaturen modelliert als mit COSMO-EU (Abbildung 4).

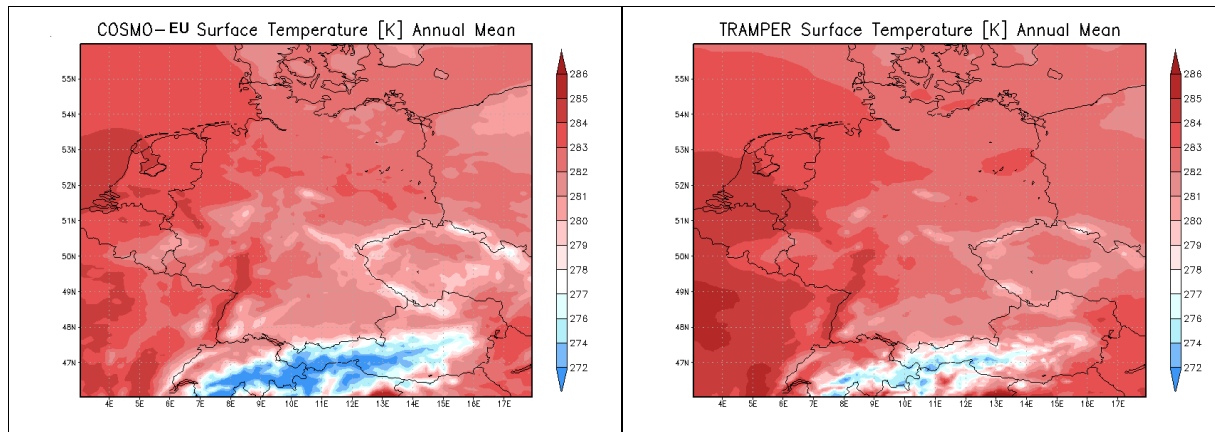


Abbildung 3 Absolute Jahresmitteltemperatur in Kelvin, simuliert von COSMO-EU (links) und von TRAMPER (rechts)

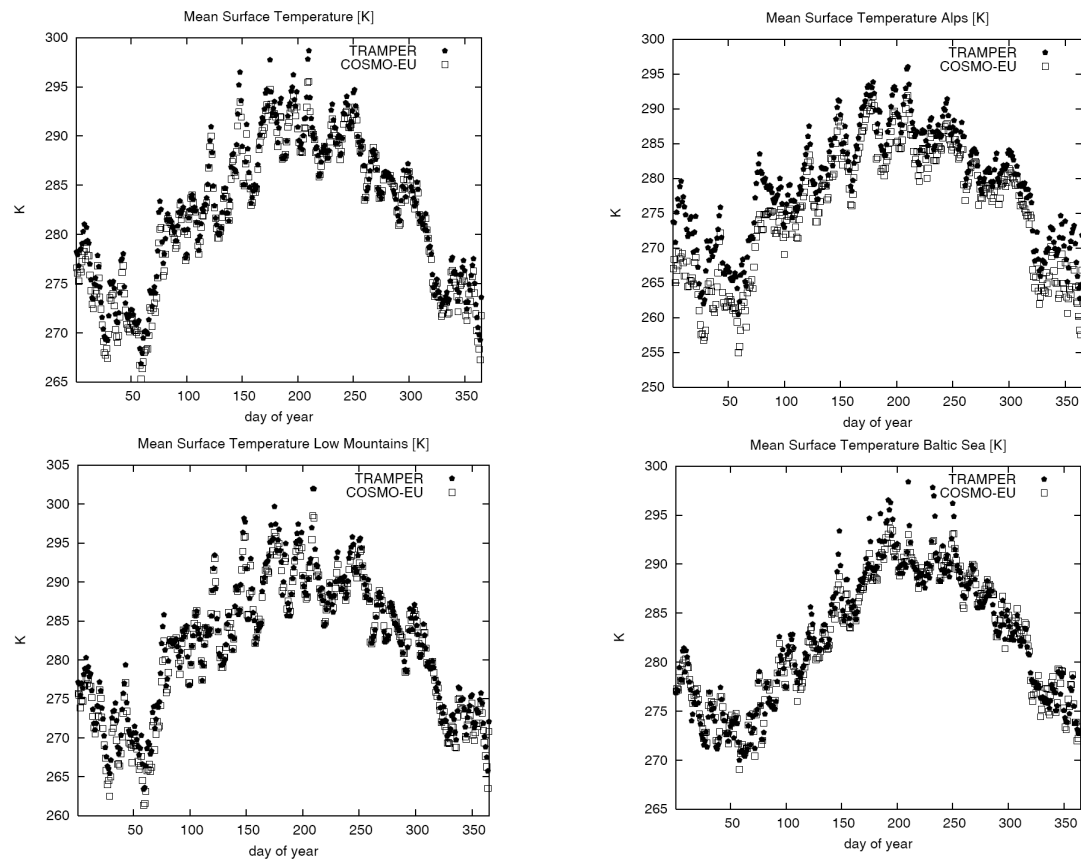


Abbildung 4 Tagesmitteltemperaturen, simuliert mit TRAMPER (Punkte) und mit COSMO-EU (Quadrate) für das **gesamte Untersuchungsgebiet** (oben links), für die **Alpen** (oben rechts), für die **Mittelgebirge** (unten links) und für die **Ostsee** (unten rechts).

3.1.2 Bodenwind

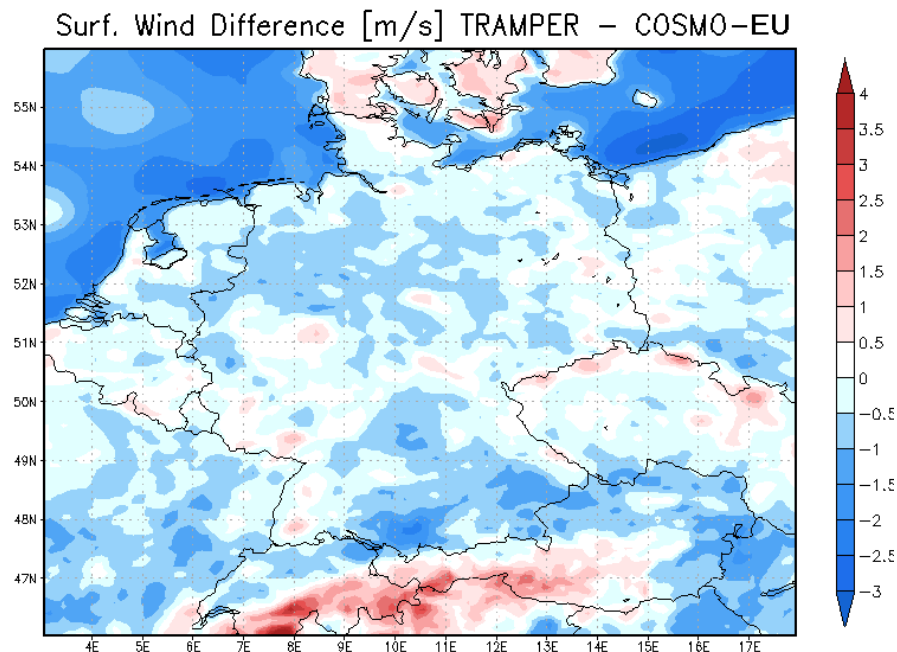


Abbildung 5 Differenz der mittleren Bodenwindstärken 2005 in m/s zwischen TRAMPER und COSMO-EU

Die Bodenwindfelder werden mit TRAMPER im Jahresmittel (Abbildung 5) vor allem über der Nord- und Ostsee deutlich niedriger simuliert als mit COSMO-EU. Über der norddeutschen Ebene und auch über den Voralpengebieten in Bayern sowie in den zentralen Mittelgebirgen werden niedrigere Bodenwinde mit TRAMPER, über den Alpen und über den höheren Bergzügen zwischen der Tschechischen Republik und dem Schwarzwald hingegen werden höhere Bodenwinde als mit COSMO-EU simuliert. Die Unterschiede liegen im Jahresmittel bei bis zu 4 m/s. Vor allem in den Mittelgebirgen werden dabei im Sommer die größten Unterschiede zwischen den beiden Modellen beobachtet (Abbildung 6). Während der Wintertage werden von beiden Modellen relative hohe Tagesmittelwerte prognostiziert, diese sind bei TRAMPER jedoch im Sommer sehr viel niedriger als bei COSMO-EU. Über den Alpen werden über das ganze Jahr hindurch mit TRAMPER höhere Windgeschwindigkeiten am Boden berechnet als mit COSMO-EU. Jahreszeitliche Abhängigkeiten lassen sich hier nicht feststellen. Wiederum kann die Ursache dieser Diskrepanz in der unterschiedlichen Höhenzuordnung aufgrund unterschiedlicher Topographien liegen. Während bei COSMO-EU die Berge, aufgrund der Mittelungen, eher niedriger in das Modellgebiet einfließen, werden die Messungen in den Bergen bei TRAMPER auf den realen Höhen in das Modell aufgenommen. Über der Ostsee werden mit COSMO-EU über das gesamte Jahr höhere Winde als mit TRAMPER simuliert. Hier hingegen, aufgrund der niedrigen Anzahl der Messstationen und dementsprechend der größeren Fehler im Interpolationsschema, kann davon ausgegangen werden, dass COSMO-EU realistischer die Windverhältnisse wiedergibt als TRAMPER.

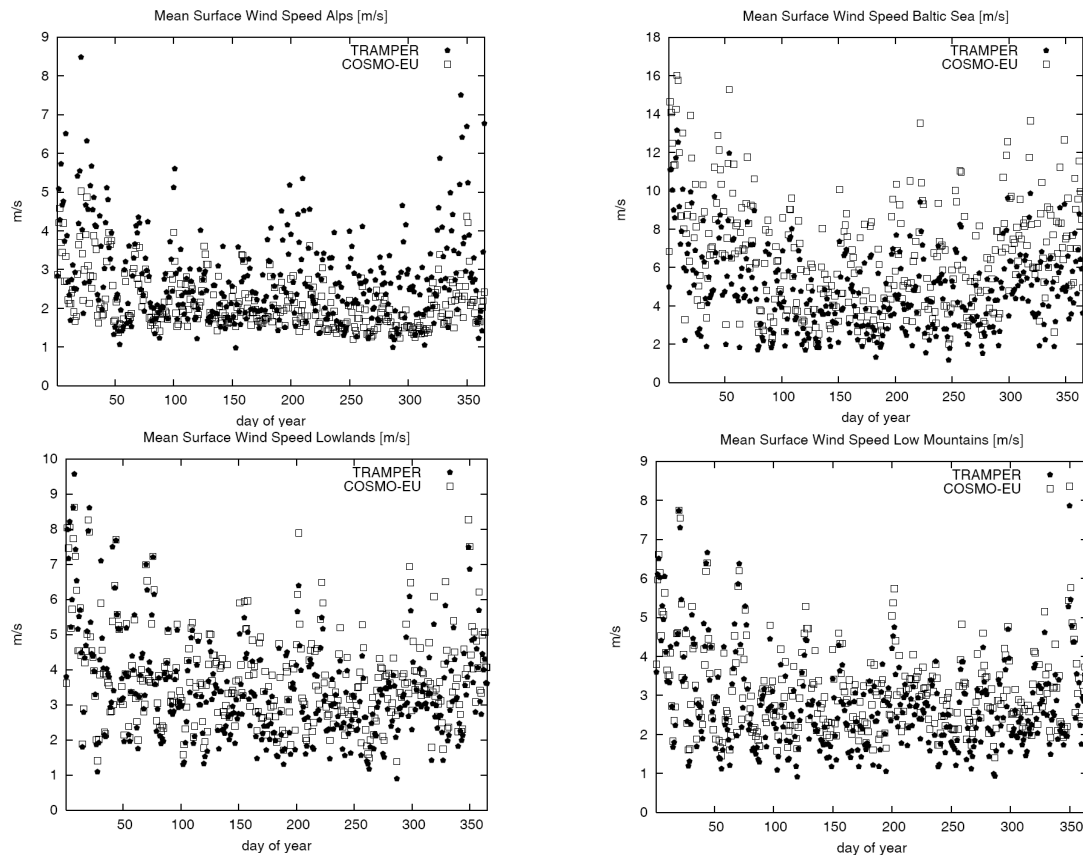


Abbildung 6 Tagesmittelwindstärken, simuliert mit TRAMPER (Punkte) und mit COSMO-EU (Quadrate) für die **Alpen** (oben links), für die **Ostsee** (oben rechts), für die norddeutsche **Tiefebene** (unten links) und für die **Mittelgebirge** (unten rechts).

3.1.3 Niederschlag

Vergleicht man die von beiden Modellen simulierten jährlichen Niederschläge (Abbildung 7), so ergeben sich im akkumulierten Jahresfeld deutliche Unterschiede. Vor allem die Gesamtsumme weicht stark ab: COSMO-EU produziert vor allem in orographisch gegliederten Gebieten deutlich mehr Regen als TRAMPER. Berücksichtigt man die Tatsache, dass TRAMPER Messwerte optimal interpoliert, d.h. dass die Messwerte zum Großteil unverfälscht in die Analyse aufgenommen werden, kann davon ausgegangen werden, dass COSMO-EU den Niederschlag deutlich überschätzt. Die optimale Interpolation, wenngleich sie die Messwerte wiedergibt, hat jedoch den Nachteil, dass der Einflussbereich von Punktwerten vor allem bei sich räumlich stark ändernden Feldern wie dem Niederschlag zu groß ist. Dies macht sich vor allem in den Mittelgebirgen bemerkbar, wo COSMO-EU ein sehr viel detaillierteres Bild liefert als TRAMPER. Des Weiteren macht sich ein anderer Nachteil der optimalen Interpolation sehr deutlich bemerkbar: wo keine Messstationen stehen, werden keine Felder produziert. Dies sieht man sehr deutlich über der Nordsee, wo COSMO-EU über 700 mm Regen pro Jahr simuliert, TRAMPER hingegen unter 200 mm. Auch macht sich gerade hier der Interpolationscharakter von TRAMPER bemerkbar. So werden beispielsweise Regenmessungen über den Niederlanden bis weit in die Nordsee hineininterpoliert. Schaut man sich das COSMO-EU – Feld an, so scheint genau das Gegenteil der Fall zu sein. Regen über der Nordsee wird ins Land getragen und nicht wie bei

TRAMPER, dass Regen vom Land ins Meer getragen wird. Über den Ebenen in Deutschland hingegen produzieren beide Schemata annähernd die gleiche Menge an Regen.

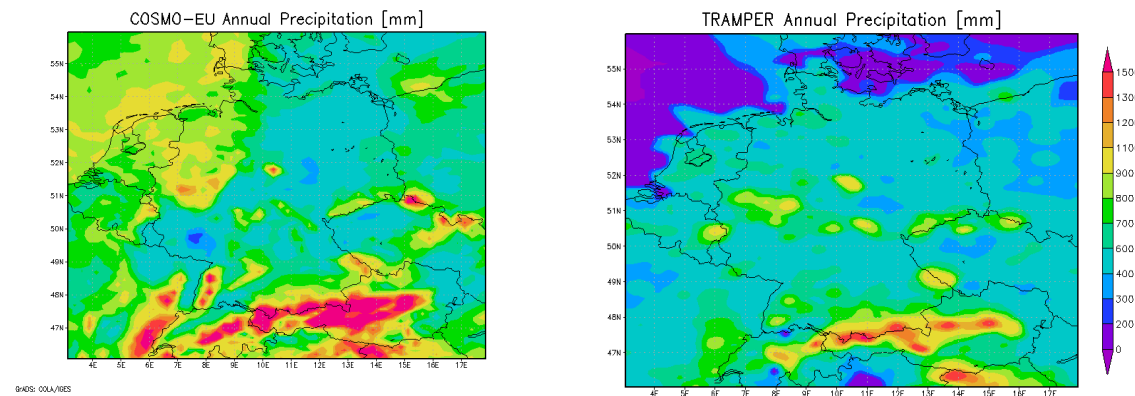


Abbildung 7 Jahresniederschlagsmengen mm, simuliert mit COSMO-EU (links) und mit TRAMPER (rechts)

3.1.4 Wolkenbedeckung

Auch der Jahresmittelwert der Gesamtbedeckung (Abbildung 8) wird von beiden Modellen annähernd gleich wiedergegeben. Im Jahresmittel ist Deutschland zu ca. 7/10 mit Wolken bedeckt. Wie schon beim Regen simuliert TRAMPER dabei die Bedeckung etwas flächenhafter als COSMO-EU. Die räumliche Struktur wird aber von den beiden Modellen sehr unterschiedlich wiedergegeben: während COSMO-EU in der Mitte Deutschlands ein Minimum an mittlerer Bedeckung zeigt, wird von TRAMPER dort ein Maximum simuliert.

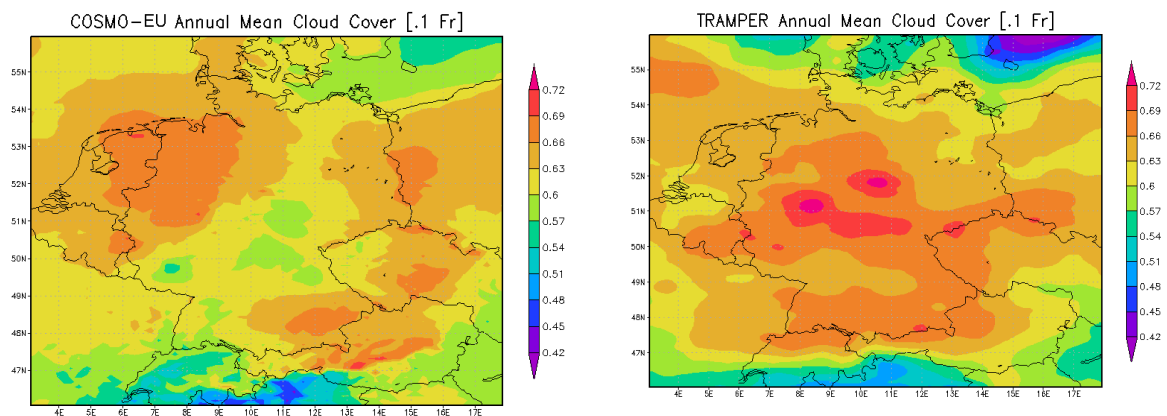


Abbildung 8 Jahresmittelwert der Gesamtbedeckung (in Zehntel Grad), simuliert mit COSMO-EU (links) und mit TRAMPER (rechts)

3.1.5 Vertikalprofile: Temperatur und horizontale Windgeschwindigkeit

Um Unterschiede in der Vertikalstruktur der beiden Modelle für Temperatur und Windstärke untersuchen zu können, wurde exemplarisch der Standort Lindenberg im Südosten Berlins genommen. Lindenberg liegt in der nordostdeutschen Ebene. Des Weiteren befindet sich hier eine SYNOP-Station des DWD mit Messballonaufstiegen alle 3 Stunden, deren Werte im diagnostischen TRAMPER-System Verwendung finden. Somit soll ein Referenzort für den prognostischen COSMO-EU-Lauf gefunden werden. Beide Modelle sind auf die im RCG

verwendeten topographiefolgenden Flächen linear interpoliert worden, und zwar das COSMO-EU-Modell von seinen Sigma-Flächen ausgehend, das TRAMPER-Modell von seinen isentropen Flächen.

COSMO-EU gibt sehr getreu das Vertikalprofil der Temperatur wieder (Abbildung 9). Vertikal sich erstreckende Maxima wie beispielsweise am 29. Juli 2005 werden jedoch von COSMO-EU etwas unterschätzt. Die Kaltluftintrusionen im Winter-Frühjahr 2005 (Mitte Januar und März) werden vom Prognostischen Modell sehr gut simuliert. Die Sommermonate jedoch sind in den Messungen und somit im TRAMPER-System durch mächtigere Warmluftprofile geprägt als die prognostischen Felder.

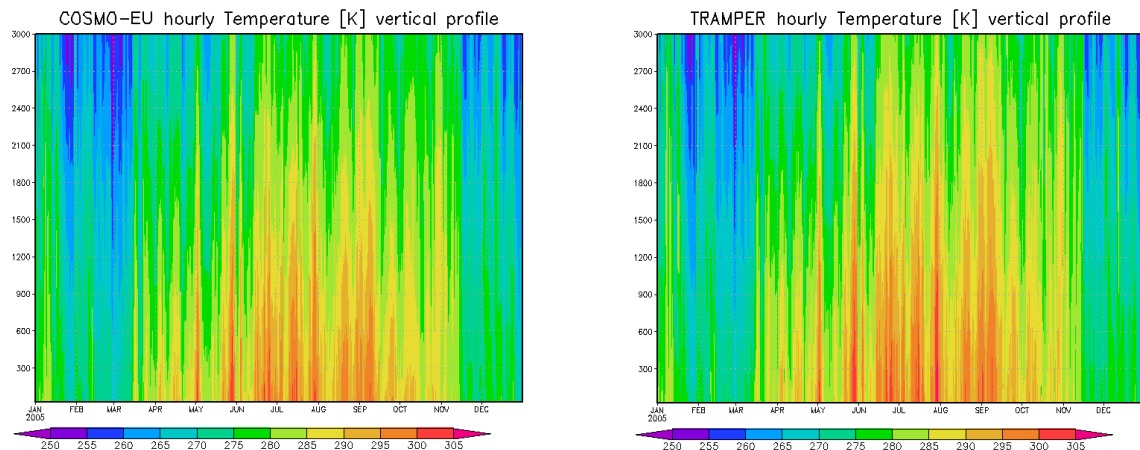


Abbildung 9 vertikales Temperaturprofil [in Kelvin] am Standort Lindenberg, simuliert mit COSMO-EU (links) und mit TRAMPER (rechts)

Die Vertikalverteilung des Horizontalwindes (Abbildung 10) ergibt für die Messungen relativ häufige windschwache Stunden bis fast 3000 Meter Höhe. So sind vor allem Ende März und Ende August/Anfang September annähernd vertikal gleich bleibend sehr geringe Windgeschwindigkeiten ($< 4\text{ m/s}$) beobachtet worden. Vor allem zum Jahreswechsel wurden bis in tiefe Schichten hohe ($> 15\text{ m/s}$) Windgeschwindigkeiten gemessen (und demnach von TRAMPER simuliert). Im Allgemeinen simuliert COSMO-EU dagegen häufiger höhere Windgeschwindigkeiten in allen Höhen. Wenn Tage mit niedrigen Geschwindigkeiten bis 3000 m gemessen wurden, so werden diese Tage auch von COSMO-EU mit relativ langsameren Winden prognostiziert, die absoluten Werte liegen jedoch bei bis zu 5 m/s höher als die gemessenen. So werden zum Beispiel die Winterstürme Anfang des Jahres richtig simuliert, die hohen Windgeschwindigkeiten reichen jedoch bei COSMO-EU von 3000 m hinunter bis ca. 700m, bei TRAMPER jedoch nur bis ca. 1500 m. Vor allem die unteren Schichten bis ca. 300 m werden von COSMO-EU sehr viel seltener durch windschwache Situationen simuliert als in den Messungen beobachtet.

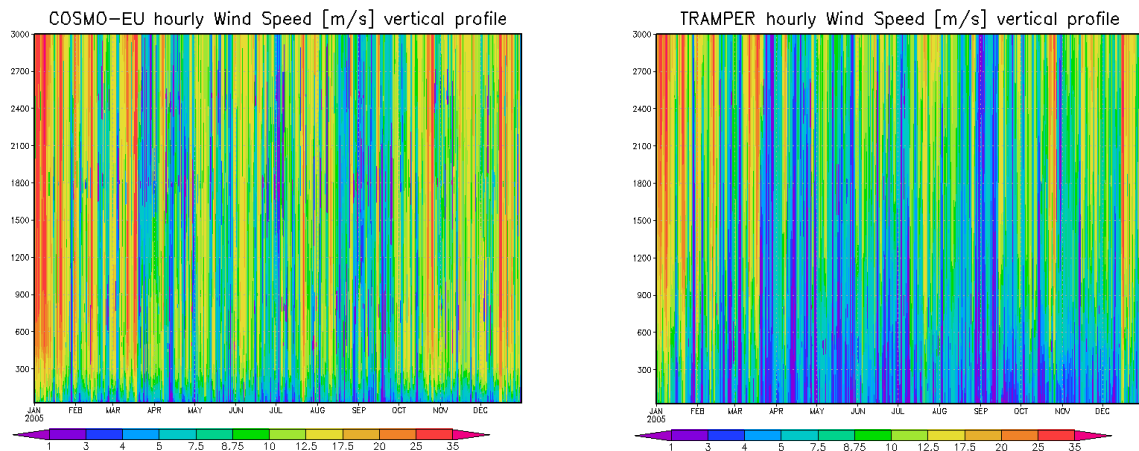


Abbildung 10 vertikales Windprofil [in m/s] am Standort Lindenberg, simuliert mit COSMO-EU (links) und mit TRAMPER (rechts)

3.1.6 Schubspannungsgeschwindigkeit

Die mit TRAMPER berechnete Schubspannungsgeschwindigkeit weicht stark von der mit COSMO-EU berechneten ab (Abbildung 11). Über dem gesamten untersuchten Gebiet ist die TRAMPER-Analyse gleich verteilt über das gesamte Jahr ca. halb so hoch wie die COSMO-EU-Analyse. Bei beiden Analyseverfahren lässt sich keine jahreszeitliche Abhängigkeit der Schubspannungsgeschwindigkeit feststellen. Im Mittel liegt die TRAMPER-Analyse über dem Untersuchungsgebiet bei 0.15 m/s, die COSMO-EU-Analyse bei 0.37 m/s. Während TRAMPER zwischen minimal 0.23 m/s und maximal 0.6 m/s die Schubspannungsgeschwindigkeit simuliert, variieren diese Werte bei COSMO_EU zwischen 0 m/s und 2.02 m/s. Diese Werte variieren jedoch sehr stark, werden einzelne Teilbereiche genauer beleuchtet, bzw. wird zwischen Mittelungen über Tag und über Nacht unterschieden.

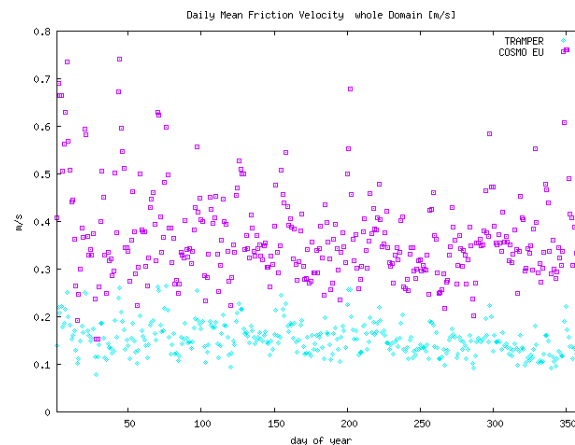


Abbildung 11 Tagesmittelwerte der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über das **gesamte Untersuchungsgebiet**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate)

Über den Alpen werden beispielsweise mit TRAMPER im Jahresmittel Schubspannungsgeschwindigkeiten von 0.14 m/s berechnet, mit COSMO-EU hingegen 0.45 m/s (Abbildung 12). Das ist mehr als drei mal so hoch im Mittel. Der höchste Tagesmittelwert wird mit TRAMPER über den Alpen mit 0.3, mit COSMO-EU mit 1.0 m/s simuliert. COSMO-EU berücksichtigt die subskaligen orographischen Effekte über eine Anpassung der Rauigkeitslänge, das heißt, dass die Rauigkeitslänge nicht nur von der

Beschaffenheit des Bodens, aber auch vom Auftreten enger Täler bestimmt wird. Dadurch lassen sich die hohen Schubspannungsgeschwindigkeiten bei COSMO-EU teilweise erklären. Tagsüber werden mit beiden Modellansätzen höhere Werte berechnet als nachts, wiederum sind dabei die COSMO-EU-Analysen im Schnitt mehr als doppelt so hoch als die TRAMPER-Analysen. Des Weiteren simuliert COSMO-EU einen Jahresgang in der Schubspannungsgeschwindigkeit zwischen 8 Uhr morgens und 20 Uhr abends: Im Sommer werden im Durchschnitt höhere Werte simuliert als im Winter. Nachts (zwischen 21 Uhr abends und 7 Uhr morgens) lässt sich kein Jahresgang erkennen. TRAMPER hingegen zeigt über den Alpen grundsätzlich keinen Jahreszeitengang, weder wenn nur Tagesstunden, noch wenn nur Nachtstunden berücksichtigt werden.

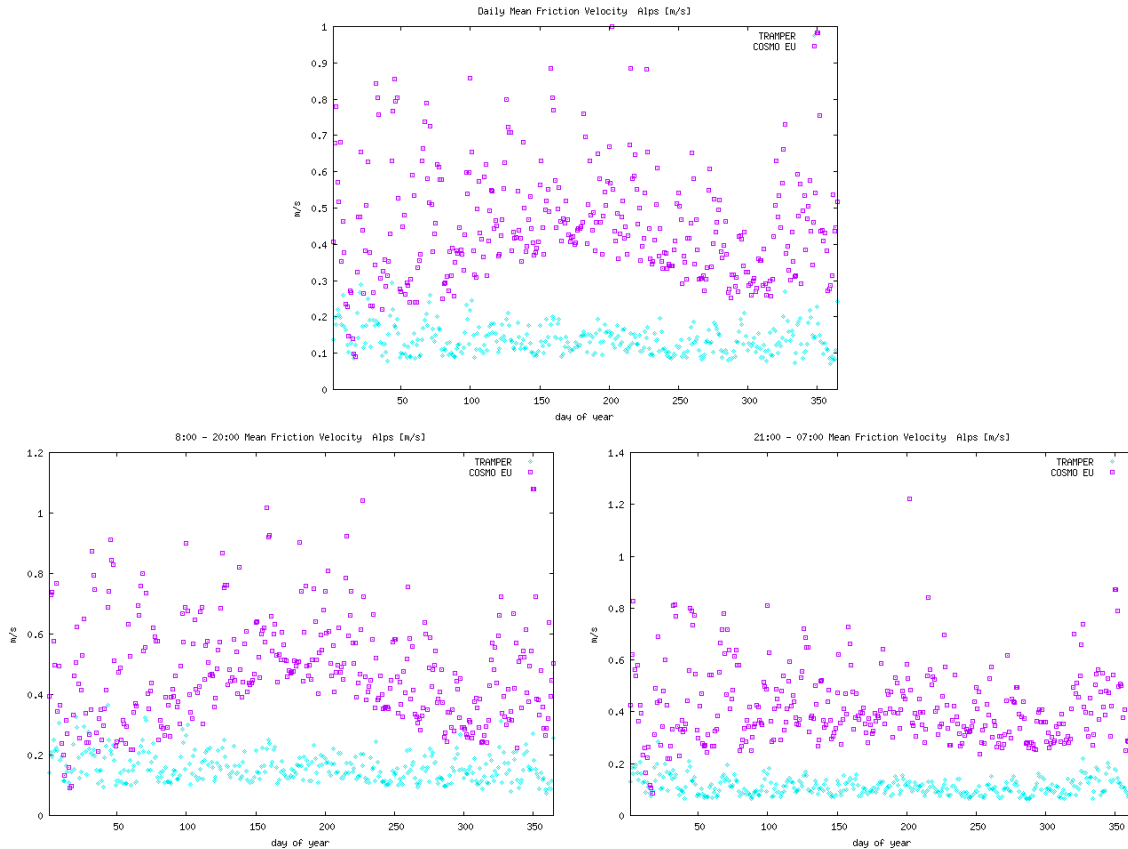


Abbildung 12 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über den **Alpen**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate)

Über den Mittelgebirgen Deutschlands (Abbildung 13) lässt sich dieser von COSMO-EU berechneter Jahresgang nicht wieder finden. Über das gesamte Jahr gemittelt ergeben sich auch hier höhere Schubspannungsgeschwindigkeiten, werden diese aus COSMO-EU-Rechnungen genommen, als aus TRAMPER-Rechnungen. TRAMPER prognostiziert für diese Geländeform einen durchschnittlichen Wert von 0.15 m/s, COSMO-EU hingegen von 0.37 m/s. Interessant dabei ist, dass während COSMO-EU ca. 25-30% niedrigere Werte für die Mittelgebirge im Vergleich zu den Alpen simuliert, bleibt der Wert bei TRAMPER im Mittel gleich. Die deutliche Abnahme der durchschnittlichen Schubspannungsgeschwindigkeit in den COSMO-EU-Simulationen ist auf den nun über den Mittelgebirgen wegfallenden Jahresgang in den Werten tagsüber zu suchen. Des Weiteren fallen natürlich subskalige Rauigkeitslängen in den Mittelgebirgen weit weniger ins Gewicht als in den Alpen, wo enge Täler häufiger auftreten als in den Niederungen. Während der Tagesstunden

werden jetzt über das gesamte Jahr hindurch ca. 0.41 m/s simuliert, nachts hingegen 0.32 m/s. TRAMPER simuliert tagsüber einen Durchschnittswert von 0.19 m/s, nachts hingegen von 0.11 m/s. Lag die durchschnittliche Schubspannungsgeschwindigkeitsamplitude in den Alpen bei COSMO-EU tagsüber zwischen 0.001 m/s und 1.8 m/s und nachts zwischen 0.0003 m/s und 1.82 m/s, so liegt sie nun über den Mittelgebirgen zwischen 0.01 m/s und 1.18 m/s tagsüber und 0.005 m/s und 1.15 m/s nachts.

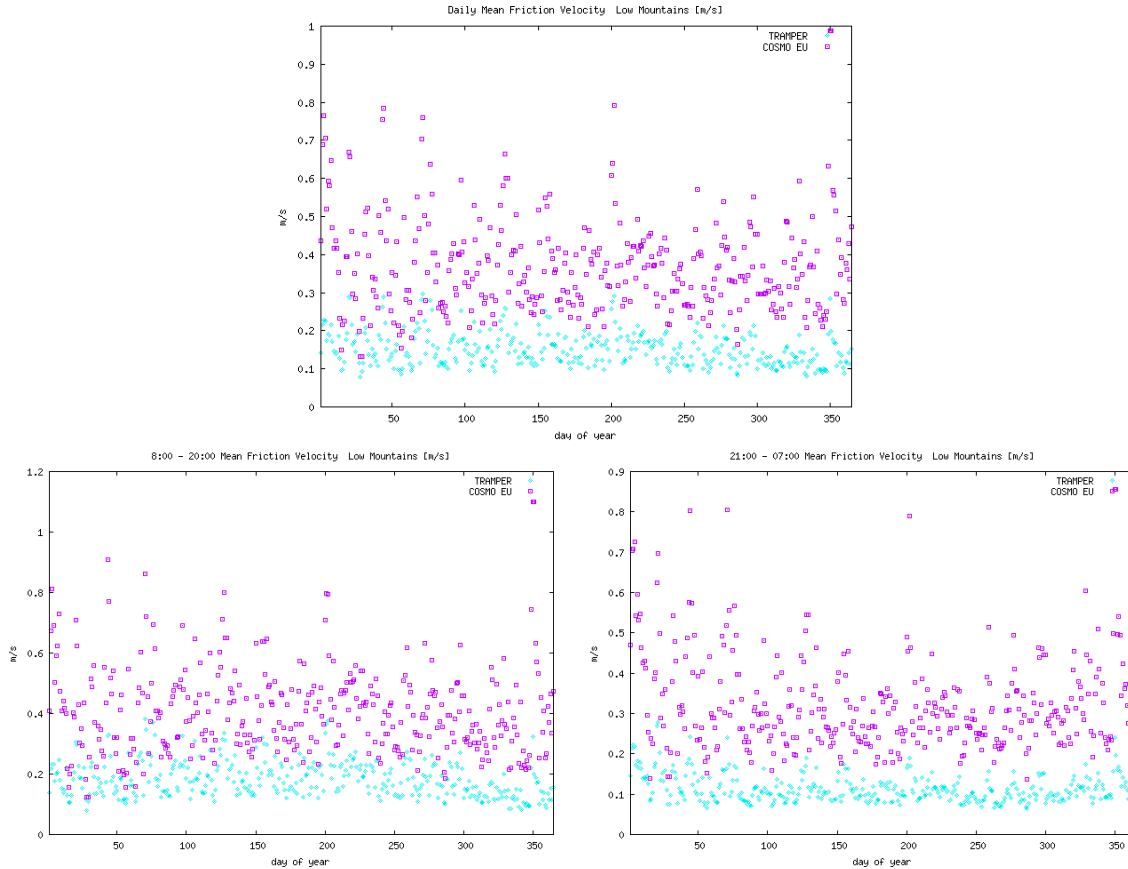


Abbildung 13 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über den **Mittelgebirgen**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate)

In den Tiefebene werden von COSMO-EU im Jahresmittel Schubspannungsgeschwindigkeiten von 0.38 m/s simuliert, von TRAMPER 0.16 m/s. In dieser Geländeform sind die Unterschiede in den zwei Analysemethoden am geringsten. Tagsüber werden von COSMO-EU Geschwindigkeiten von 0.42 m/s, von TRAMPER hingegen 0.19 m/s, nachts von COSMO-EU 0.33 m/s und von TRAMPER 0.12 m/s simuliert.

Auch über den Meeren treten (Abbildung 14) deutliche Unterschiede zwischen den zwei Modellen auf. So werden von COSMO-EU über der Nordsee beispielsweise Geschwindigkeiten von 0.33 m/s im Jahresmittel simuliert, von TRAMPER hingegen 0.15 m/s. COSMO-EU zeigt dabei keine Unterschiede zwischen Schubspannungsgeschwindigkeiten, die nur über den Tagesstunden gemittelt sind und solchen, die nur über Nachtstunden gemittelt sind. Die TRAMPER-Analyse hingegen zeigt tagsüber höhere (0.18 m/s) als nachts (0.13 m/s). Der Maximalwert über die Tagesstunden gemittelt liegt bei TRAMPER bei 0.33 m/s über der Nordsee. COSMO-EU hingegen liegt mit seinem tagsüber bestimmten Maximalwert von 0.52 m/s nur noch ca. 40% über dem von TRAMPER simulierten.

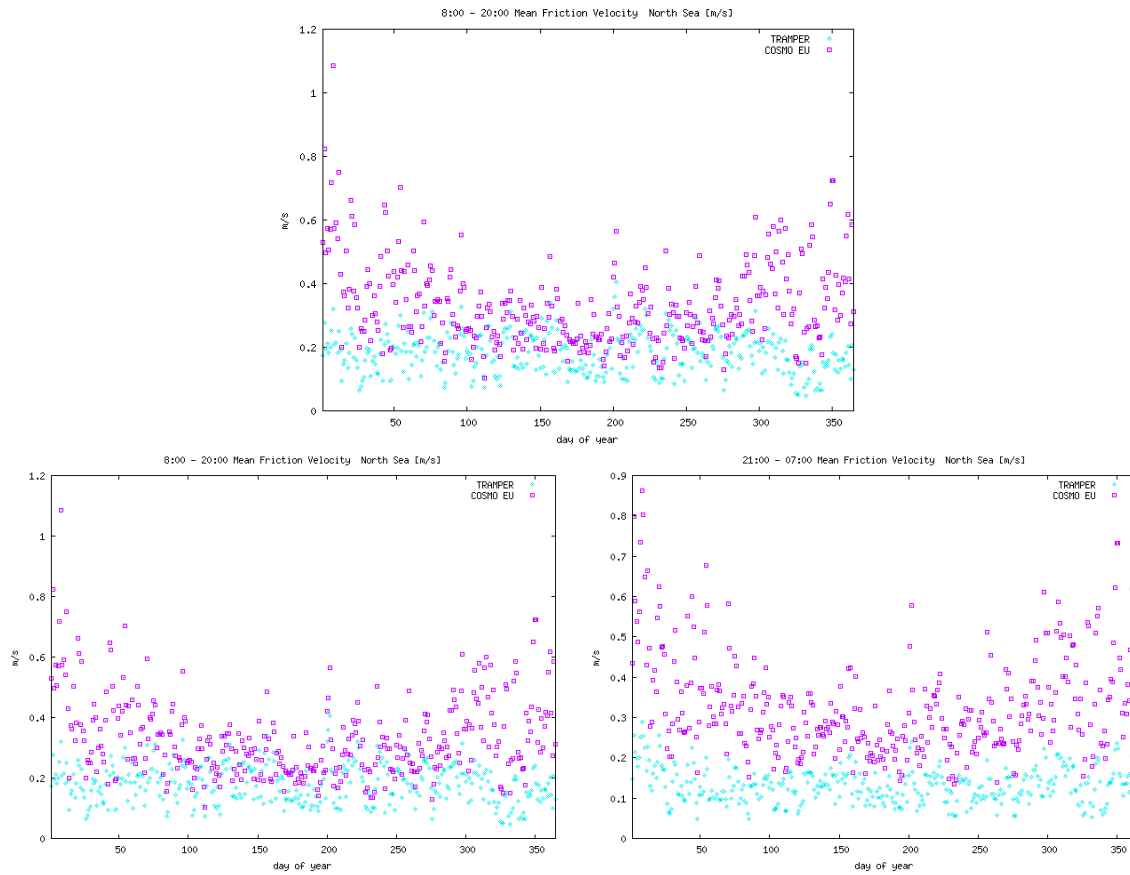


Abbildung 14 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über der **Nordsee**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate)

3.1.7 Mischungsschichthöhe

Die Jahresmittelwerte, gebildet aus den Tagesmittel der Mischungsschichthöhen (Abbildung 15) und berechnet über dem gesamten Untersuchungsgebiet, variieren zwischen 845 m bei COSMO-EU und 660 m bei TRAMPER. Schon über diese gemittelten Werte macht sich die Bandbreite der Unterschiede bemerkbar. Beiden Analyseschemata gleich ist der Jahresgang mit deutlich niedrigeren Werten im Winter als im Sommer. TRAMPER simuliert aber gerade in der kalten Jahreszeit deutlich niedrigere Mischungsschichthöhen als COSMO-EU. Darüber lässt sich auch der im Jahresmittel niedrigere Wert bei TRAMPER gegenüber COSMO-EU erklären. Des Weiteren wird im Mittel auch ein deutlicher Tagesgang sichtbar, der auf die konvektive Mischungsschicht zurückzuführen ist, die in beiden Schemata richtig wiedergegeben wird. Werden einzelne Teilgebiet und Mittelungen über Tagesstunden und Nachstunden getrennt betrachtet, so ergeben sich teilweise sehr große, teilweise auch kaum Unterschiede.

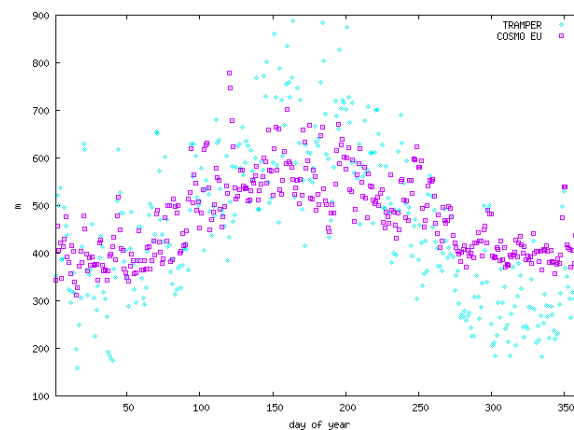


Abbildung 15 Tagesmittelwerte der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über das **gesamte Untersuchungsgebiet**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadratrate) nach Fay.

Über den Alpen beispielsweise waren die mit den beiden Schemata berechneten Schubspannungsgeschwindigkeiten immer sehr unterschiedlich, bei den berechneten gemittelten Mischungsschichthöhen unterscheiden sie sich jedoch sehr viel weniger (Abbildung 16). COSMO-EU simuliert zwar vor allem im Winter, Frühjahr und Herbst mittlere Tagesmischungshöhen, die ca. 200 m höher liegen als bei TRAMPER, im Sommer liegen die Werte jedoch sehr eng beisammen. Dies ist zum größten Teil auf die über alle 24 Stunden durchgeführte Mittelung zurückzuführen. Werden über den Alpen Tagesstunden von Nachtstunden getrennt betrachtet, so ergeben die beiden Modelle tagsüber ähnliche Höhen, nachts jedoch simuliert COSMO-EU über das gesamte Jahr hindurch deutlich höhere Werte als TRAMPER. Augenscheinlich wird auch der von Fay et al. (1997) vorgeschlagene Ansatz, bei Nicht-Erfüllung der notwendigen Bedingung der Mischungsschichtbestimmung über den Richardson-Ansatz, die Höhe auf ca. 320 m zu setzen. Vor allem im Winter und im Herbst, aufgrund der Tatsache, dass sich der Sonnenaufgang und der Sonnenuntergang innerhalb der gemittelten Nachtstunden zutragen, sind die Nachtmittelwerte konstant auf einer Höhe (ca. 320 m) gesetzt. Dies mag unrealistisch sein, führt aber dazu, dass die nächtliche Mischungsschicht bei COSMO-EU deutlich über der von TRAMPER liegt, die minimal bei 50 m angesetzt wird. Dieser Minimalwert tritt nachts sehr viel häufiger auf als tagsüber.

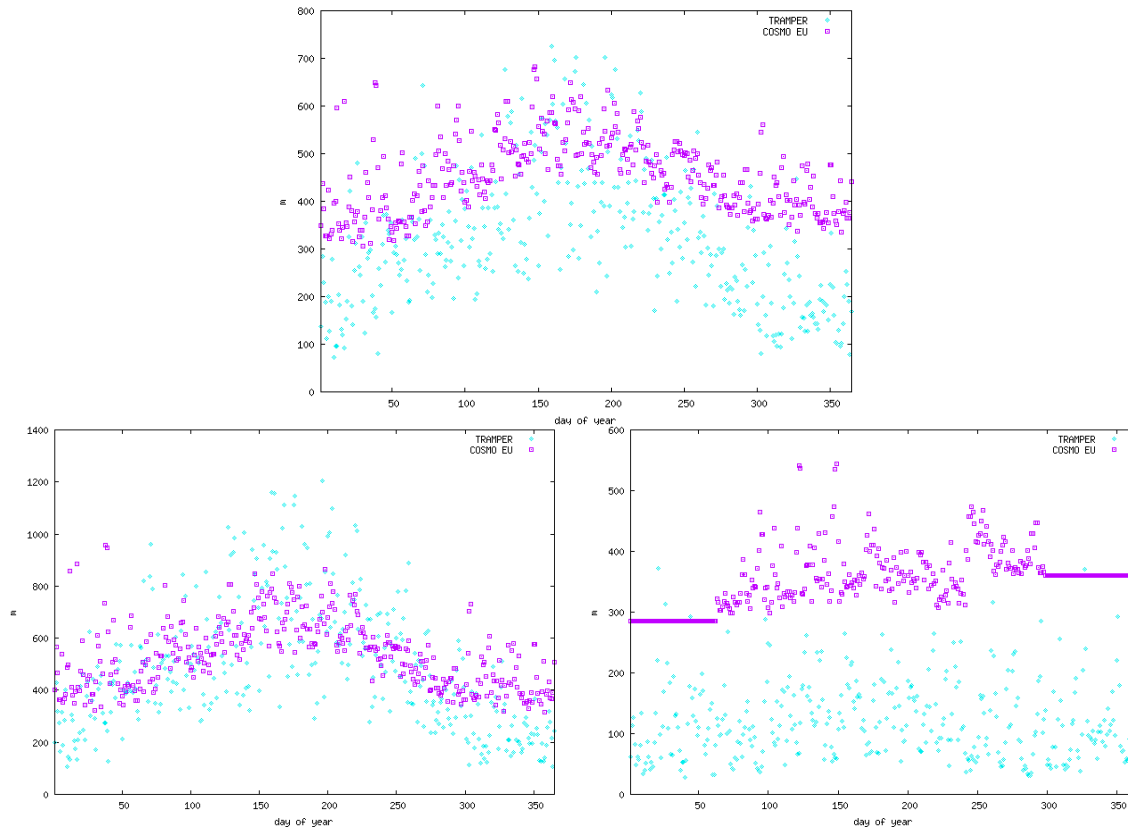


Abbildung 16 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über den **Alpen**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrat) nach Fay.

Über den Mittelgebirgen Deutschlands (Abbildung 17) werden mit TRAMPER wiederum vor allem im Sommer höhere Werte des Tagesmittels der Mischungsschichthöhe simuliert als mit COSMO-EU. Wiederum sind vor allem die Tagesstunden dafür verantwortlich. Liegt der maximale Mittelwert über den Tagesstunden bei TRAMPER bei ca. 2000 m, so liegt dieser bei COSMO-EU nur annähernd bei 1000 m. Nachts ergibt sich ungefähr das gleiche Bild wie über den Alpen, auch wenn in dieser Gegend TRAMPER vor allem im Winter teilweise sehr hohe nächtliche Mischungsschichthöhen simuliert (bis über 600 m im Winter). Im Sommer hingegen werden von TRAMPER deutlich niedrigere nächtliche Mischungsschichthöhen produziert als von COSMO-EU.

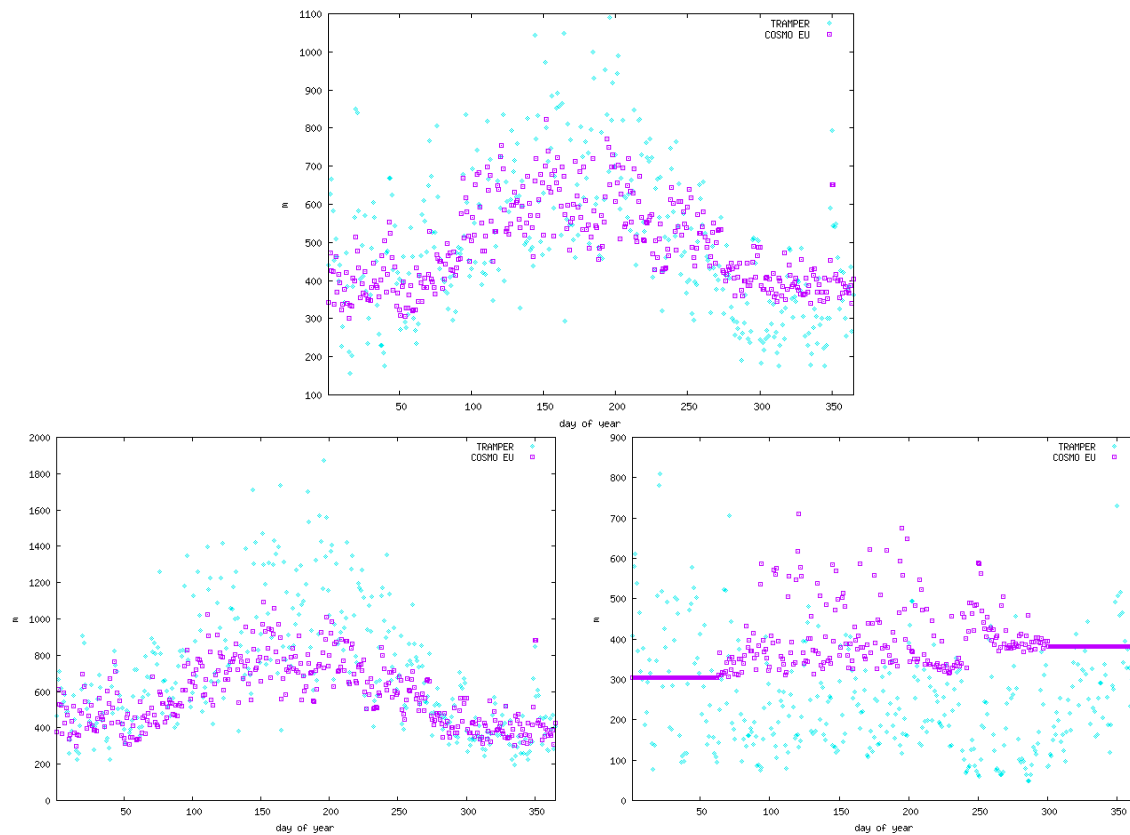


Abbildung 17 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über den **Mittelgebirgen**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay.

Die nord- und nordostdeutschen Tiefebene(n) (Abbildung 18) werden von beiden Modellen wiederum wie die Mittelgebirge simuliert: sowohl der Jahresgang als auch die Tag-Nacht-Unterschiede sind sehr ähnlich. Statistisch gesehen liegen die Mischungsschichthöhen über der Tiefebene im Mittel bis zu 500 m höher als über den Mittelgebirgen.

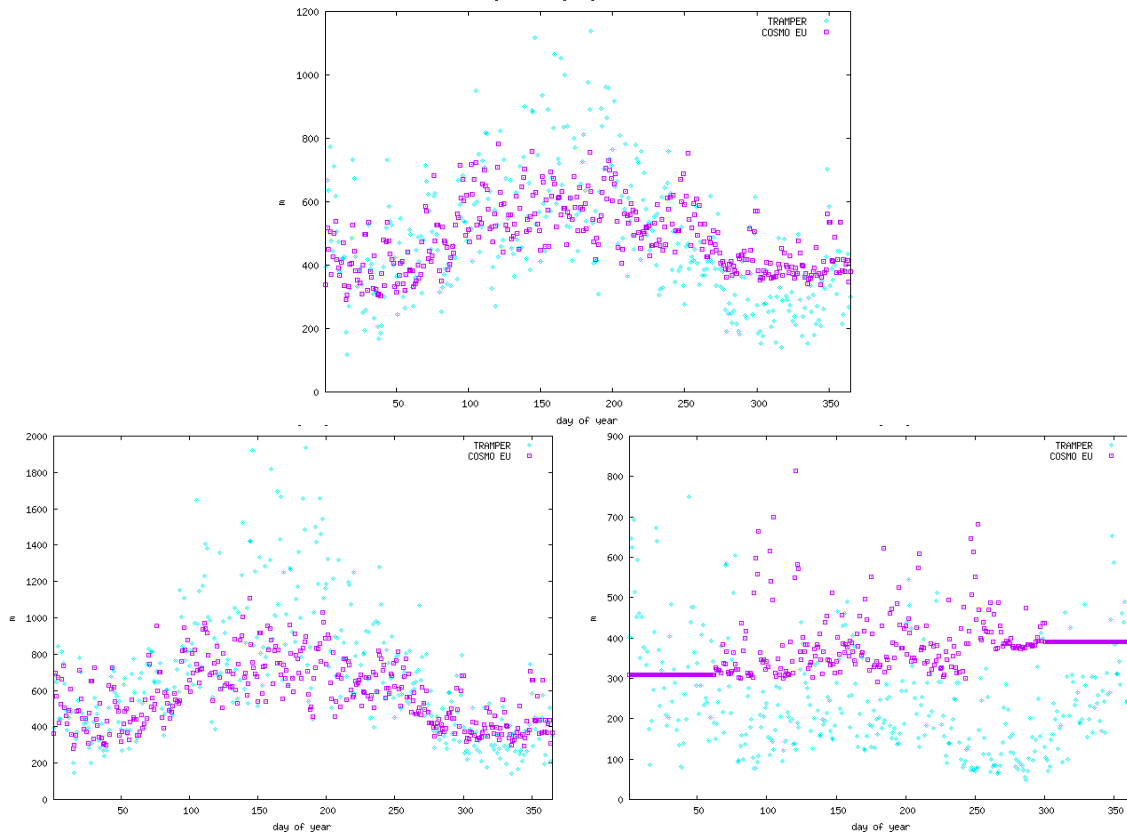


Abbildung 18 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der nordostdeutschen **Tiefebene**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay.

Die gemittelten Mischungsschichthöhen über den Meeren (Abbildung 19 und Abbildung 20) hingegen unterscheiden sich deutlich von den Werten über Land. Wird bei COSMO-EU das gleiche Verfahren sowohl über Wasser als auch über Land benutzt, so werden in TRAMPER dafür unterschiedliche Ansätze verfolgt. Dies macht sich in den Resultaten dadurch bemerkbar, dass nun COSMO-EU im Sommer an einzelnen Tagen deutlich höhere Mischungsschichthöhen produziert als TRAMPER, und zwar sowohl gemittelt über alle 24 Stunden, als auch getrennt für Tages- und für Nachtstunden. Die Nordsee wird dabei von COSMO-EU häufiger mit höheren Mischungsschichthöhen tagsüber belegt als die Ostsee. Da die Berechnung der Richardson-Zahl über den Meeren stärker von der Windgeschwindigkeit abhängt als über Land, ist die Ursache bei den erhöhten Bodenwinden im COSMO-EU zu suchen. Das Phänomen tritt jedoch über die Sommermonate nur vereinzelt auf. Während TRAMPER auch über den Meeren einen Jahresgang simuliert, so wird bei COSMO-EU diese Schwankung nicht sichtbar. Außer den sehr hohen Werten der Mischungsschicht an den vereinzelt Tagen befindet sich die mittlere Höhe vor allem über den warmen Jahreszeiten deutlich unterhalb der TRAMPER-Höhen. Ausnahme bilden wiederum die nächtlichen Mischungsschichthöhen.

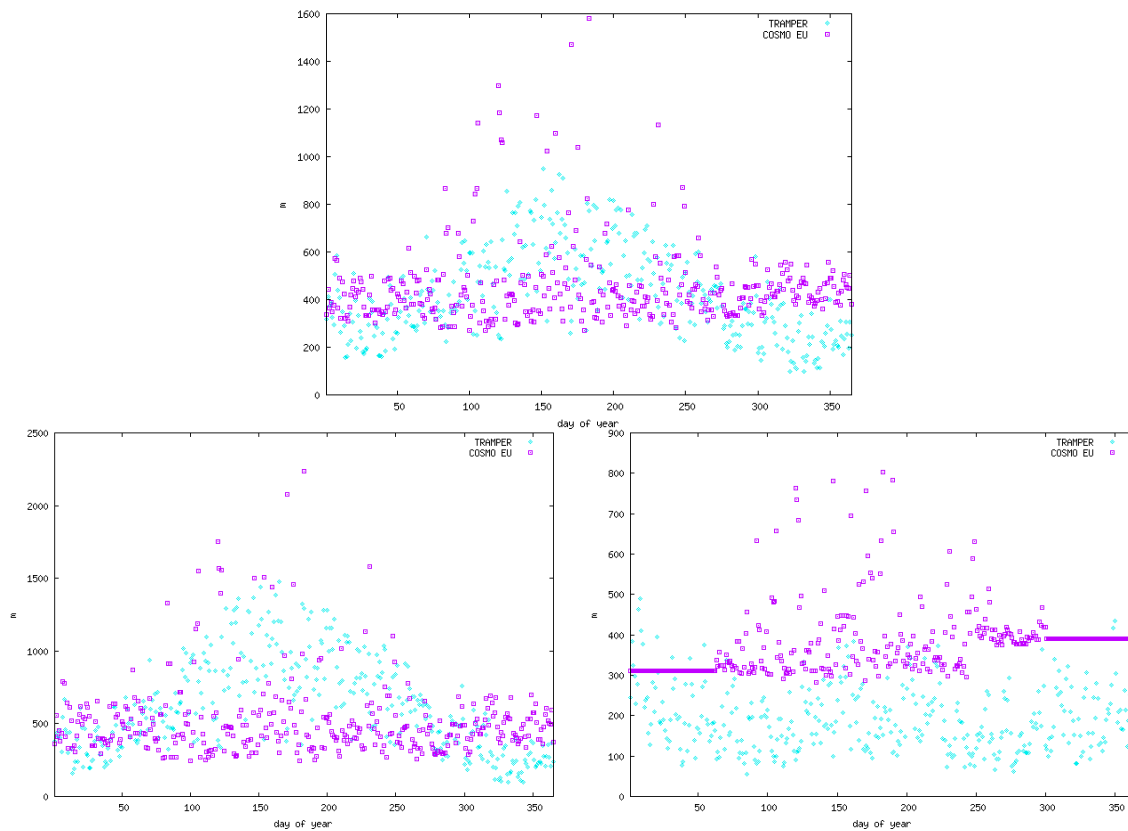


Abbildung 19 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der **Nordsee**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay

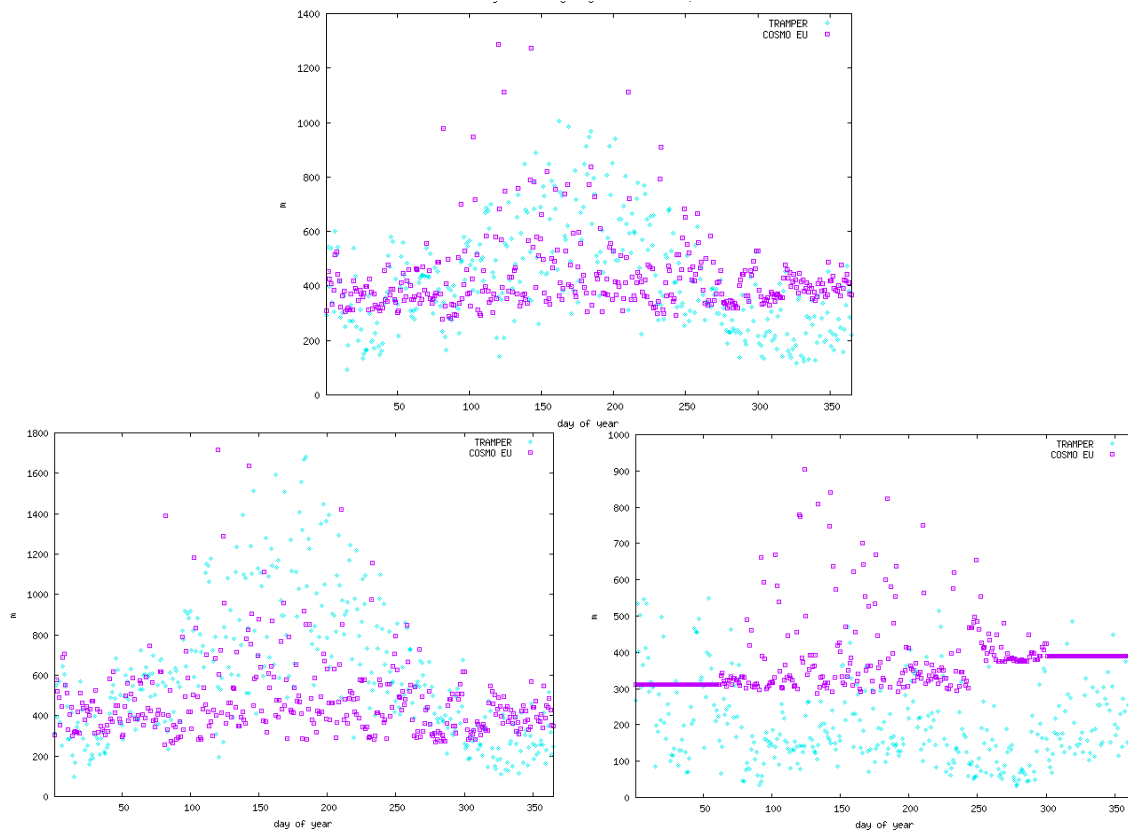


Abbildung 20 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der **Ostsee**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay.

3.2 Vergleich TRAMPER – (COSMO-EU – Batchvarova Gryning):

3.2.1 Mischungsschichthöhe

Die Mischungsschichthöhen, die aus den prognostischen COSMO-EU-Feldern mit den zwei unterschiedlichen Ansätzen berechnet wurden, werden im Folgenden detailliert untersucht. Der Ansatz nach Batchvarova-Gryning (1994) unterscheidet dabei in der Berechnungsart zwischen Land und Meer und Tag (zwischen Sonnenaufgang und Untergang) und Nacht, während der Ansatz nach Fay et al (1997) nur das Richardson-Schema für alle Oberflächen und Tageszeiten benutzt. Das Schema nach Batchvarova-Gryning ist dabei dem in TRAMPER angewandten sehr ähnlich, baut es doch grundsätzlich auf einem Strahlungsbilanzansatz auf.

Über das gesamte Untersuchungsgebiet und über alle 24 Stunden des Tages gemittelt (Abbildung 21) ergeben sich dabei mit dem Batchvarova-Gryning-Ansatz im Schnitt höhere Werte als mit dem Fay-Ansatz. Vor allem im Winter werden deutlich höhere Mischungsschichthöhen mit dem ersten Ansatz berechnet, die täglichen Durchschnittswerte im Sommer sehen denen mit TRAMPER berechneten sehr ähnlich.

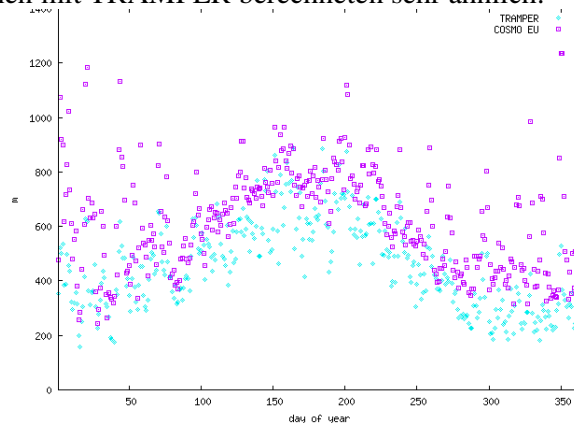


Abbildung 21 Tagesmittelwerte der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über das **gesamte Untersuchungsgebiet**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrat) nach Batchvarova-Gryning.

Über den Tiefebene Nord- und Ostdeutschlands (Abbildung 22) sieht man besonders deutlich, dass der Ansatz nach Batchvarova-Gryning dem in TRAMPER sehr ähnlich ist. Sowohl die über alle 24 Stunden gemittelten Mischungsschichthöhen, als auch die nur über den Tagesstunden und die nur über den Nachtstunden gemittelten Werte sind miteinander vergleichbar. Der Unterschied zu dem Routine-Verfahren in COSMO-EU wird vor allem in der Nacht deutlich.

Werden Tagesstunden von Nachtstunden getrennt betrachtet, so zeigt sich, dass im Sommer am Tage die Grenzschicht nach Batchvarova-Gryning deutlich höher simuliert wird als die nach Fay et al. Die Grenzschichthöhen nachts hingegen werden mit Batchvarova-Gryning deutlich niedriger im Jahresmittel simuliert, obwohl gerade im Winter auch Nachtwerte von über 1000 m erzielt werden.

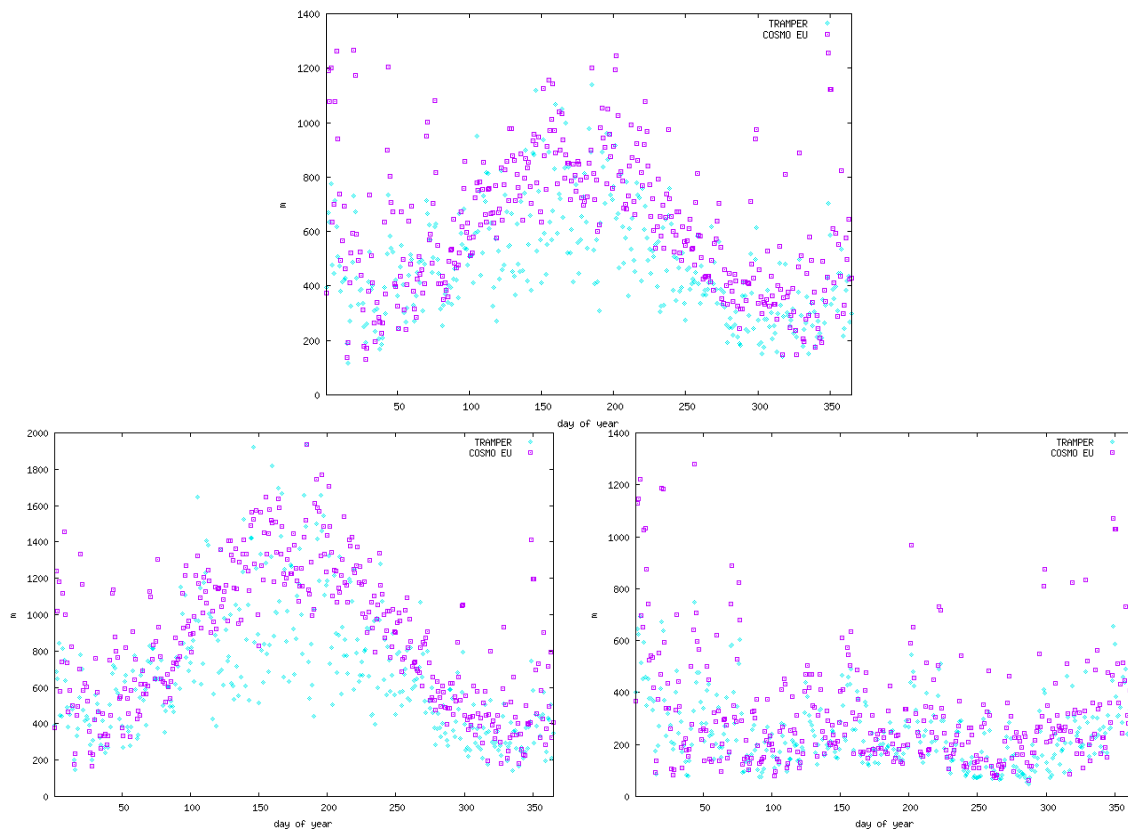


Abbildung 22 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der nordostdeutschen **Tiefebene**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning.

Über den Meeren (Abbildung 23 und Abbildung 24) sind die Unterschiede in der Mischungsschichthöhenbestimmung geringer als über Land. So werden beispielsweise über der Ostsee ähnliche Werte simuliert, sowohl wenn COSMO-EU mit dem Ansatz von Batchvarova-Gryning verfolgt wird, als auch wenn TRAMPER angewandt wird. Der größte Unterschied macht sich während der Nachtstunden bemerkbar: Fay et al. (1997) haben vorgeschlagen, bei Nicht-Erfüllung des Richardson-Kriteriums sollte eine Minimal-Mischungsschichthöhe von ca. 320 m angesetzt werden. Der Ansatz nach Batchvarova-Gryning hingegen liefert unterschiedliche Höhen für unterschiedliche Stunden, wobei ein Minimum von 50 m festgelegt wird. Dieser Ansatz ist mit dem TRAMPER-Ansatz sehr eng verwandt. Über den Meeren werden dabei, aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten und deshalb hoher mechanischer Turbulenz mit COSMO-EU, teilweise Grenzschichthöhen von über 1000 m, gemittelt über die Nachtstunden, simuliert. Dies kommt vor allem während Winterstürmen deutlich zum Tragen. TRAMPER simuliert über den Meeren im Winter nicht so hohe Werte. Augenscheinlich ist auch der Unterschied zwischen TRAMPER und COSMO-EU nach Batchvarova-Gryning, wenn man den Jahresgang über den Meeren ansieht: TRAMPER simuliert einen, COSMO-EU mit der nach Batchvarova-Gryning und mit der nach Fay nachgerechneten Mischungsschicht nicht. Dieser Jahresgang kommt in TRAMPER über deutlich höhere Mischungsschichten in den sommerlichen Tagesstunden. Winterstürme können dies in TRAMPER nicht ausgleichen.

Die Mischungsschichthöhen über der Nordsee sind ausgeprägter als die über der Ostsee.

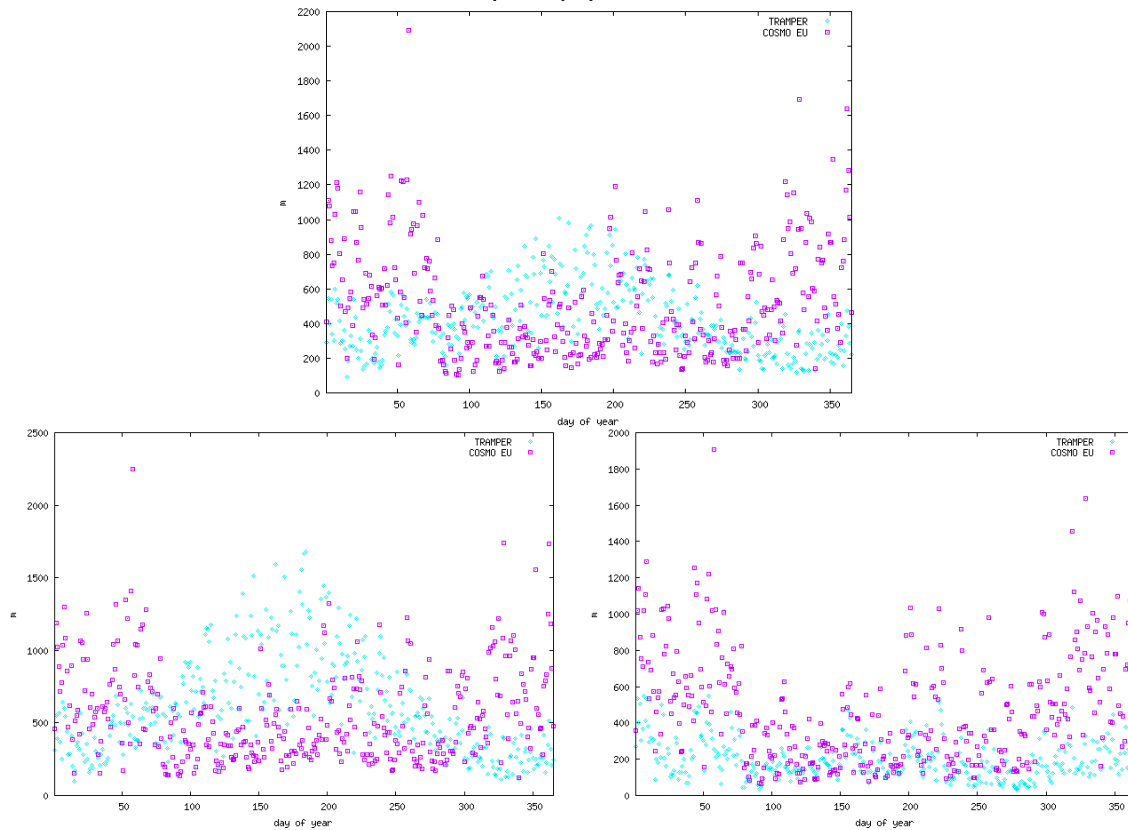


Abbildung 23 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der **Ostsee**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning.

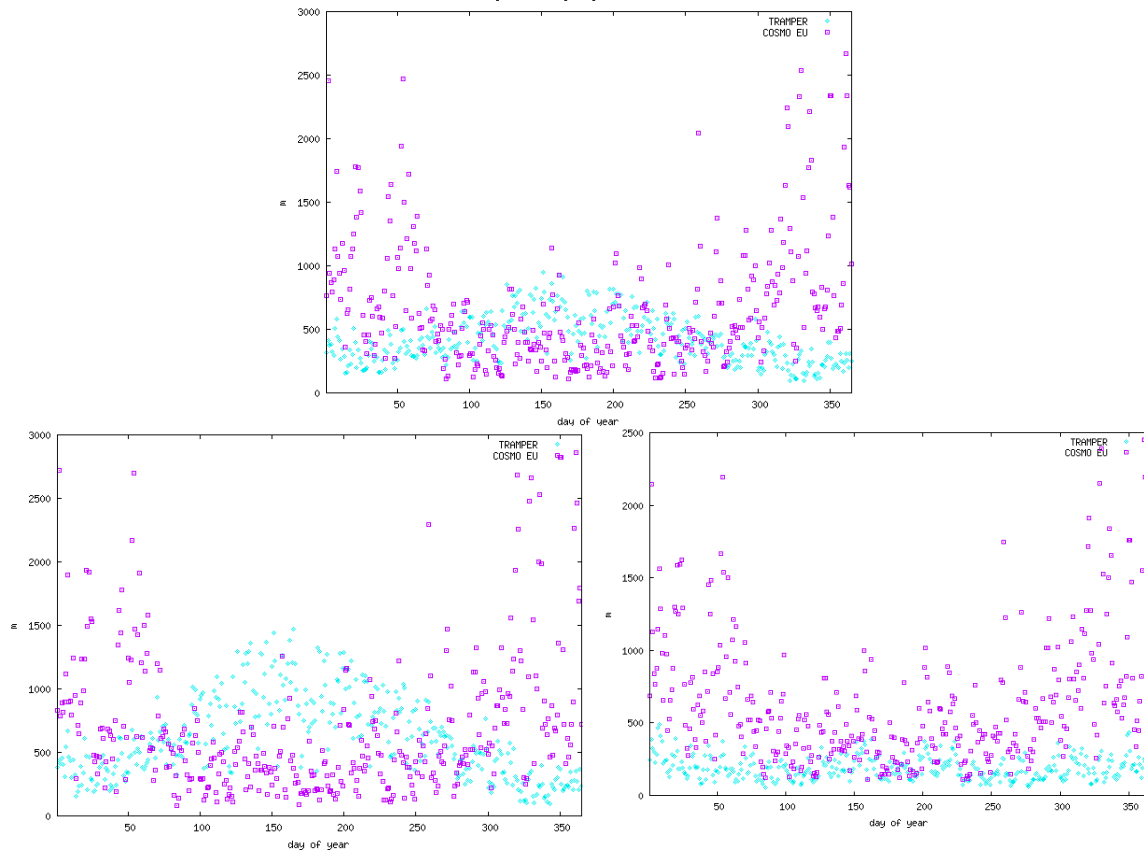


Abbildung 24 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der **Nordsee**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning.

Mischungsschichthöhen in den Mittelgebirgen und über den Alpen (Abbildung 25) werden mit dem Ansatz von Batchvarova-Gryning im Sommer deutlich höher berechnet als mit dem Ansatz nach Fay. Dies macht sich vor allem tagsüber bemerkbar, nachts werden sogar im Durchschnitt niedrigere Grenzschichthöhen produziert, wenn diese nach Batchvarova-Gryning abgeschätzt werden. Werden diese jedoch mit denen von TRAMPER verglichen, so zeigt sich, dass COSMO-EU übers gesamte Jahr, sowohl während der Tagesstunden, als auch während der Nachtstunden, deutlich höhere Werte liefert. Der Jahresgang zwischen den beiden Modellen bleibt jedoch sehr ähnlich.

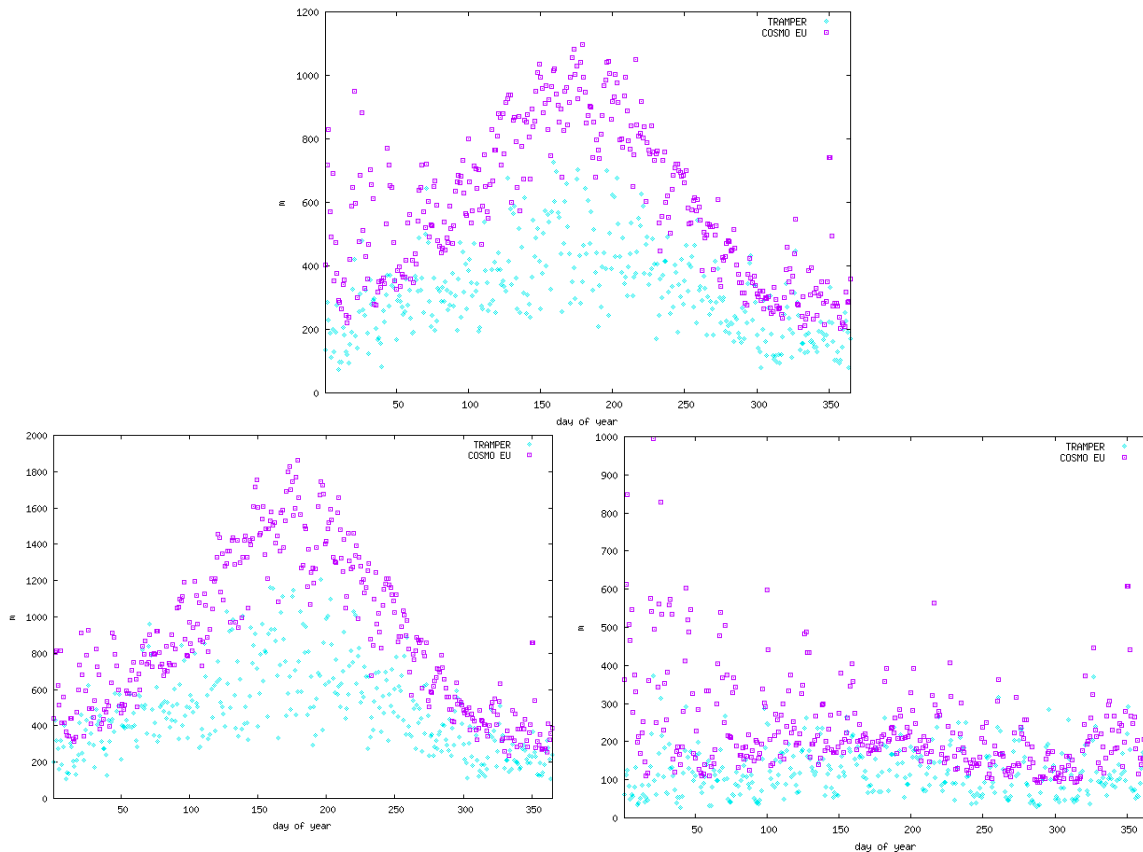


Abbildung 25 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über den **Alpen**, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrat) nach Batchvarova-Gryning.

Mischungsschichthöhen werden nicht standardmäßig von COSMO-EU berechnet. Sie müssen auf jeden Fall nachgerechnet werden; des Weiteren ist das Konzept der Mischungsschichthöhe als feste physikalische Obergrenze des Einflussbereiches der Erdoberfläche auf die Atmosphäre nicht eindeutig definiert. So wird bei Fay et al. (1997) davon ausgegangen, dass die Mischungsschicht dort aufhört zu existieren, wo laminare Strömung gegenüber der turbulenten Schichtung überhand nimmt. Batchvarova und Gryning hingegen definieren die Mischungsschicht formal über einen Temperatursprung an deren Obergrenze. Obwohl beide Ansätze auf die gleichen prognostischen Felder zurückgreifen, ist über die unterschiedlichen formalen Auffassungen der Mischungsschicht eine Differenz in der Höhenzuweisung vorgegeben.

Formal ist TRAMPER dem Konzept von Batchvarova-Gryning viel näher als dem von Fay et al. Hier wiederum treten Unterschiede dadurch auf, dass unterschiedliche Eingangsfelder verwendet werden.

Eine endgültige Validierung der Mischungsschichtparameter ist auch nicht möglich, da Messungen wiederum von der Definition der Mischungsschichthöhe ausgehen.

Während der HoVERT-Messkampagne in Berlin vom September 2001 bis September 2002 wurden beispielsweise über ein LIDAR-Gerät Mischungsschichthöhen gemessen. Diese wurden dort definiert, wo der stärkste Gradient in der Massenkonzentration von Feinstaub zu finden ist. Dies entspricht dem Ansatz von Batchvarova-Gryning oder auch dem von TRAMPER. Dennoch musste festgestellt werden, dass beispielsweise im Sommer maximale Mischungsschichthöhen von ca. 1500 m gemessen, aber von weit über 2500 m simuliert wurden.

4. Resultate – RCG-Simulationen

Das Aerosol-Chemie-Transport-Modell RCG wurde mit den in Kapitel 3 beschriebenen meteorologischen Feldern angetrieben. Zum einen wird RCG mit den TRAMPER – Feldern gefüttert, zum anderen wird die vom COSMO-EU abgeleitete Meteorologie verwendet, in der die Mischungsschicht nach Batchvarowa-Gryning nachgerechnet worden ist. Dies wird dadurch begründet, dass der Tagesgang der Mischungsschicht dadurch realistischer simuliert wird als beim Ansatz nach Barbara Fay. Es werden in Kapitel 5 auch Sensitivitätsstudien gezeigt, in denen der Einfluss der unterschiedlichen Mischungsschichthöhen hervorgehoben wird. Die Auflösung beträgt bei den hier vorgestellten Ergebnissen ca. $7 \times 8 \text{ km}^2$. Zur Auswertung wird nun hauptsächlich auf Ozon, NO_2 , PM_{10} und auf die PM_{10} -Inhaltsstoffe EC als passiven primären Stoff und Sulfat als sekundären Stoff eingegangen.

4.1. Ozon

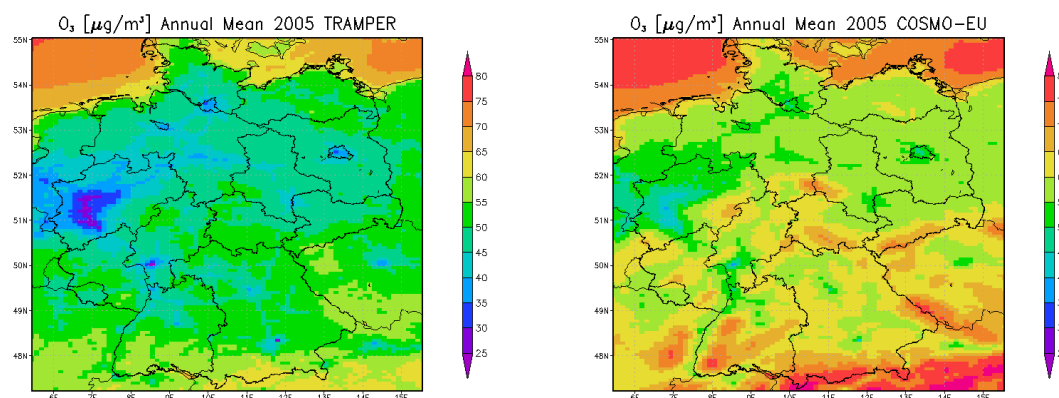


Abbildung 26 Ozon-Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)

Das RCG-TRAMPER-System simuliert Ozonwerte von durchschnittlich 50 bis $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ über ländlichen Flächen und unter $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in urbanen bzw. in Industriegebieten. Das RCG-COSMO-EU-System hingegen simuliert im Jahresmittel durchgehend 10 bis $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere Ozonwerte über Großteilen Deutschlands (Abbildung 26). Über den Meeren werden Ozonkonzentrationen von bis zu $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet. Vor allem aber über den Alpen und im Alpenvorland Bayerns werden wesentlich höhere Ozonkonzentrationen berechnet als mit dem RCG-TRAMPER-System. Mit dem RCG-COSMO-EU-System werden die Anhöhen mit höheren Ozonwerten simuliert als mit RCG-TRAMPER. Dies sieht man hauptsächlich über dem Schwarzwald, der Schwäbischen Alb und dem Bayrischen Wald, wo die räumlichen Strukturen mit dem COSMO-EU-Modell deutlicher hervortreten als mit TRAMPER.

Des Weiteren werden auch über den Meeren bis zu $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere Werte simuliert als bei RCG-TRAMPER. Da Ozon über Wasser nur sehr wenig abgebaut wird, kann davon ausgegangen werden, dass unterschiedliche Mischungsschichthöhen über Wasser für die entscheidend unterschiedlichen Ozonbelastungen verantwortlich sind. Über Land spielen sowohl die Schubspannungsgeschwindigkeiten über die aerodynamischen Widerstände, als auch die Mischungsschichthöhe über das Austauschvolumen eine wichtige Rolle in der Berechnung der Ozonkonzentrationen bei gleich bleibenden übrigen meteorologischen Feldern. Vor allem tagsüber und im Sommer sind die Mischungsschichthöhen, die nach dem Ansatz von Batchvarova-Gryning berechnet worden sind, wesentlich niedriger als die mit TRAMPER berechneten (Abbildung 24). Des Weiteren ist über den Meeren auch kein

deutlicher Jahresgang mit wesentlich höheren Mischungsschichten im Sommer als im Winter zu erkennen. Da vor allem tagsüber und im Sommer Ozon aufgebaut wird, machen sich diese unterschiedlichen meteorologischen Felder in der Ozonberechnung über Wasser bemerkbar. Außerdem wird nachts aufgrund der höheren Mischungsschicht bei COSMO-EU weniger Ozon abgebaut als bei TRAMPER. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei COSMO-EU mehr Ozon in der Mischungsschicht bleibt als bei TRAMPER, wo höherer Austausch mit der „Residual-Layer“ vonstatten geht, da nachts die Mischungsschicht niedriger ist.

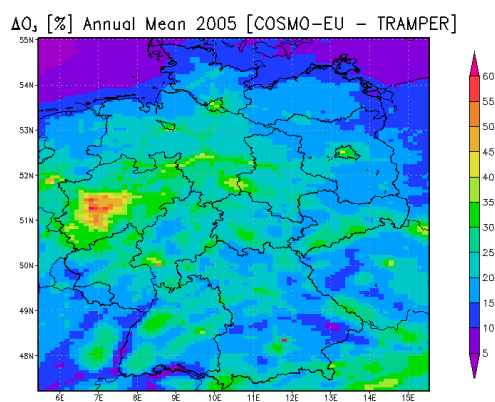


Abbildung 27 Prozentuale Änderung der Ozonjahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber

Prozentuale Ozonänderungen (Abbildung 27) aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Felder bewegen sich zwischen 5% und 15% über Nord- und Ostsee und bis ca. 35% in ländlichen Bereichen Deutschlands. Vor allem aber in urbanen, industrialisierten Gegenden und entlang der Hauptverkehrslinien sind Unterschiede bis weit über 40% sichtbar. Im Ruhrgebiet werden bis zu 60% höhere Werte mit COSMO-EU erzielt als mit TRAMPER.

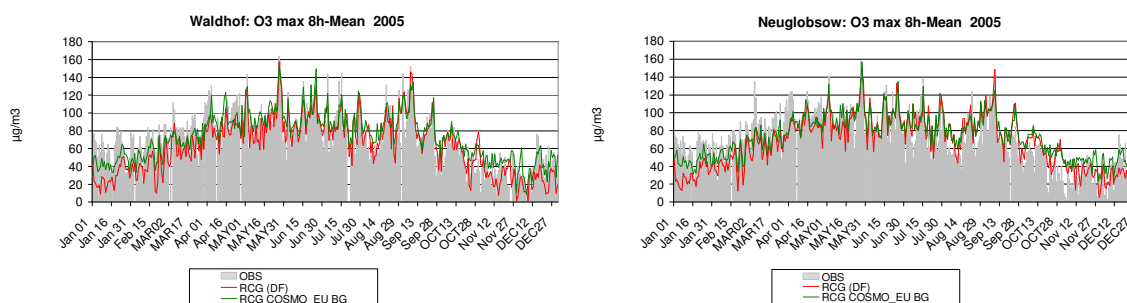


Abbildung 28 Vergleich der mittleren maximalen 8 Stunden Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Waldhof (links) und am Messort Neuglobsow (rechts).

Werden die stündlichen Ozonsimulationen mit Beobachtungen an Hintergrundstationen (z.B. Waldhof und Neuglobsow) (Abbildung 28) verglichen, so fällt auf, dass sowohl RCG-TRAMPER als auch RCG-COSMO_EU den allgemeinen Verlauf sehr gut treffen. Die sommerlichen Maxima werden von beiden Modell-Konfigurationen sehr gut wiedergegeben. Vor allem im Sommer werden auch die Ozonanhäufungen über mehrere Tage erkannt. Die 8 Stunden Maxima werden jedoch im Winter von beiden Modellversionen unterschätzt. Dabei unterschätzt RCG-TRAMPER diese jahreszeitlichen Werte sehr viel mehr als die RCG-COSMO_EU-Version.

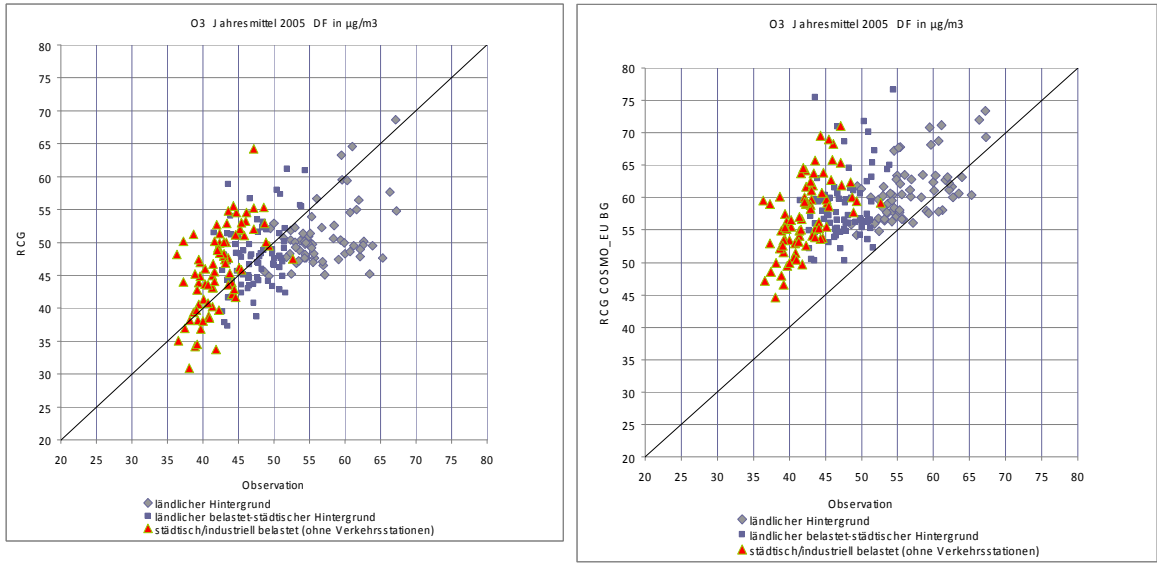


Abbildung 29 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) Ozon-Jahresmittelwerten, unterteilt in städtisch/industriell belastete Gebiete (rote Dreiecke), städtische Hintergrundgebiete (blaue Quadrate) und ländliche Hintergrundgebiete (graue Rhomben) für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).

Werden nun Jahresmittelwerte zwischen Messungen und Simulationen verglichen (Abbildung 29), so zeigt sich, dass RCG-TRAMPER die Ozonwerte sowohl im ländlichen und städtischen Hintergrund, als auch an städtisch/industriell belasteten Gebieten gut trifft. RCG-COSMO_EU überschätzt vor allem die Messungen in den städtischen und industriellen Gebieten. Während RCG-TRAMPER in den ländlichen Gebieten eher zu einer Unterschätzung im Jahresmittel neigt, ist dies bei RCG-COSMO_EU genau umgekehrt. Dies ist vor allem auf die Unterschätzung im Winter von RCG-TRAMPER zurückzuführen.

O3	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	0.81	0.75	0.68	0.68		0.79		
COSMO_EU	0.81	0.79	0.69	0.68		0.83		

Abbildung 30 Korrelationskoeffizienten für Tagesmittelwerte für RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU.

Die Tabelle in Abbildung 30 stellt die Korrelationskoeffizienten für tägliche Ozonwerte für ausgewählte Hintergrundstationen in Deutschland dar. Beide Modellversionen liefern annähernd gleich gute Werte; für Waldhof und Neuglobsow ergeben sich für RCG-COSMO_EU höhere Korrelationskoeffizienten. Sie liegen für beide Modellversionen zwischen 0.68 und 0.83. Dies zeigt, dass relevante zeitliche Prozesse erfasst werden.

O3	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	-19.4%	-6.0%	7.7%	2.1%		-12.6%		
COSMO_EU	-7.7%	3.7%	12.7%	4.5%		1.9%		

Abbildung 31: Prozentuale Abweichungen vom gemessenen Jahresmittelwert für RCG-TRAMPER und für RCG-COSMO_EU

Schaut man sich jedoch gleichzeitig die prozentuale Abweichung vom gemessenen Mittelwert der beiden RCG-Modell-Versionen an (Abbildung 31), so zeigt sich deutlich wieder das Bild, dass RCG-TRAMPER eher zu einer Unterschätzung (negative Werte) und RCG-COSMO_EU zu einer Überschätzung der Jahresmittelwerte im ländlichen Hintergrund neigt.

4.2. NO₂

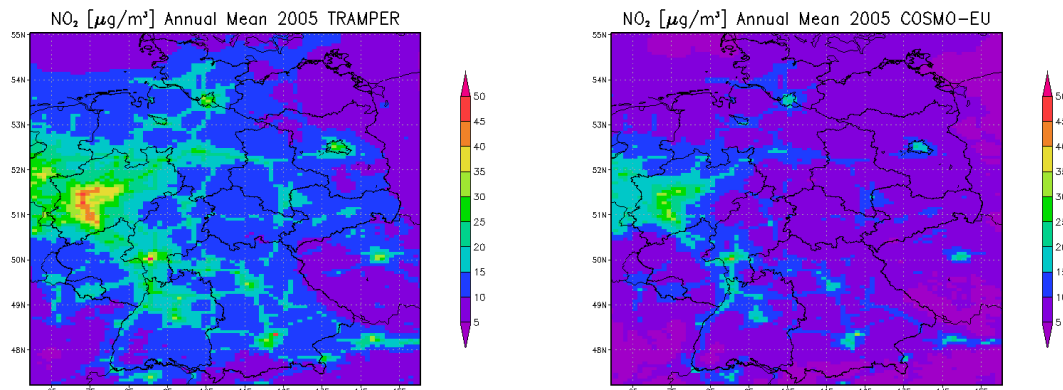


Abbildung 32 NO₂-Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)

Vergleicht man die NO₂-Simulationen von RCG-TRAMPER mit denen von RCG-COSMO_EU (Abbildung 32), so erkennt man deutlich, dass beide Modellversionen korrekt die Hauptverursachergruppen, Verkehr und allgemein Verbrennungsprozesse, wiedergeben. Vor allem in Städten und in Autobahnnähe werden deutlich erhöhte NO₂-Konzentrationen simuliert. Absolut werden bei der RCG-TRAMPER-Version zum Beispiel im Ruhrgebiet über weite Gebiete Werte über 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ simuliert, bei der RCG-COSMO_EU-Version Werte zwischen 25 und 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Deutlich lassen sich in beiden Simulationen die großen Ballungsgebiete Berlin, Frankfurt, Hamburg und München erkennen. Auch die Autobahnen sind deutlich mit erhöhten NO₂ – Konzentrationen modelliert.

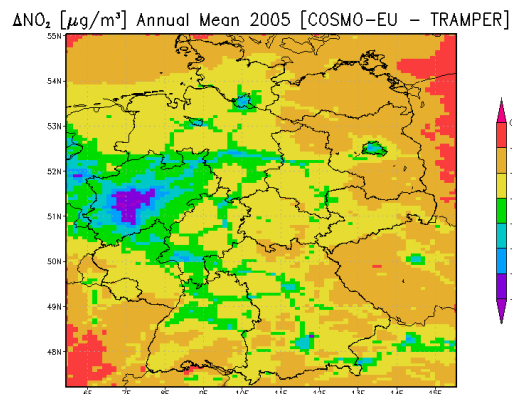


Abbildung 33 Absolute Änderung der NO₂-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber

Betrachtet man sich nun aber die absoluten Differenzen zwischen den beiden RCG-Rechnungen, so werden im Ruhrgebiet bis ca. 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere Werte mit RCG-TRAMPER simuliert. Auch entlang der Verkehrsstraßen und in den Ballungsgebieten werden zwischen 6 und 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere Werte simuliert als mit RCG-COSMO-EU. In ländlichen Gebieten und über den Meeren sind die absoluten Unterschiede weit geringer. Auch die prozentualen Unterschiede machen sich dort nicht so stark bemerkbar, da NO₂ zum Großteil ein lokales Phänomen bildet. Bringt man nun diese Simulationen mit den Ozonsimulationen in Verbindung, so erkennt man, dass bei RCG-TRAMPER im Ruhrgebiet beispielsweise höhere

NO₂-Werte und niedrigere O₃-Werte simuliert werden als bei RCG-COSMO_EU. Dies lässt sich durch den Titrationseffekt von NO_x und O₃ erklären. Dass RCG-TRAMPER vor allem in emissionsstarken Gebieten erhöhte NO₂ Werte simuliert, lässt sich hingegen hauptsächlich über die weit niedrigeren Schubspannungsgeschwindigkeiten erklären, die dazu führen, dass weniger bodennahes Stickstoffdioxid mit höheren Luftschichten ausgetauscht wird und deshalb zu einer bodennahen Akkumulation führt.

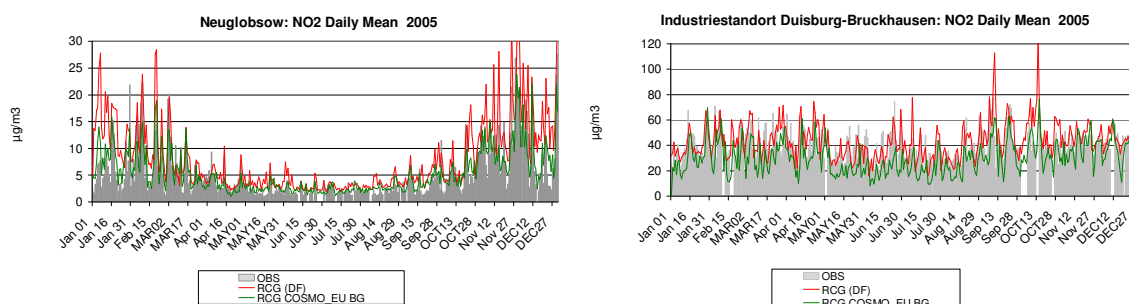


Abbildung 34 Vergleich der mittleren Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Neuglobsow (links) und am Messort Duisburg-Bruckhausen (rechts).

Schaut man sich die Zeitreihe für eine ländliche Hintergrundstation (Neuglobsow) und eine Stadtstation (Duisburg-Bruckhausen) für NO₂ genauer an, so sieht man, dass beide RCG-Modell-Konfigurationen korrekt den Jahresgang und auch Auf- und Abbauperioden wiedergeben, dass aber RCG-COSMO_EU immer unter den Simulationen von RCG-TRAMPER liegen. RCG-TRAMPER überschätzt häufig tägliche Maxima, wohingegen RCG-COSMO_EU diese besser trifft. RCG-COSMO-EU hingegen unterschätzt etwas den täglichen Durchschnittswert, und dies deutlich mehr im städtischen Gebiet als in emissionsfernen ländlichen Gegenden.

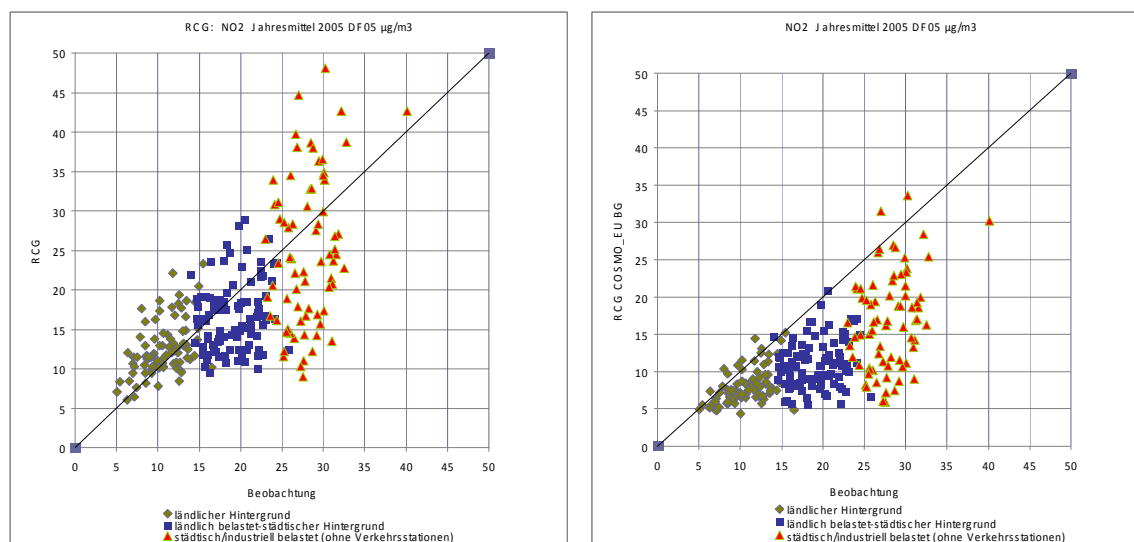


Abbildung 35 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) NO₂-Jahresmittelwerten, unterteilt in städtisch/industriell belastete Gebiete (rote Dreiecke), städtische Hintergrundgebiete (blaue Quadrate) und ländliche Hintergrundgebiete (graue Rhomben) für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).

Sieht man sich den Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Jahresmittelwerten (Abbildung 35) an, so werden bei RCG-TRAMPER Stadtstationen eher überschätzt, bei RCG-COSMO_EU eher unterschätzt. Diese Tendenz ist auch bei ländlichen Stationen sichtbar.

NO₂ Korr	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	0.59	0.79	0.50	0.65		0.71	0.60	0.69
COSMO_EU	0.72	0.87	0.80	0.72		0.84	0.67	0.77

Abbildung 36 Korrelationskoeffizienten für Tagesmittelwerte für RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU.

Die aus Tagesmittelwerten berechneten Korrelationskoeffizienten zeigen jedoch, dass die RCG-COSMO_EU-Variante deutlich höhere Werte liefert als die RCG-TRAMPER-Konfiguration. Sowohl an Messstationen im ländlichen Bereich, als auch im städtischen Bereich werden mit COSMO-EU Korrelationskoeffizienten über 0.65 erreicht, mit TRAMPER werden im Durchschnitt 0.1 niedrigere Werte erzielt. Dies weist auf eine genauere zeitliche Erfassung der Auf- und Abbauprozesse von NO₂ mit COSMO-EU als mit TRAMPER hin.

NO₂ Bias	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	19.9%	46.8%	11.8%	11.2%		51.5%	7.4%	38.0%
COSMO_EU	-19.2%	-1.5%	-30.2%	-25.7%		-5.3%	-24.6%	-5.3%

Abbildung 37 Prozentuale Abweichungen vom gemessenen Jahresmittelwert für RCG-TRAMPER und für RCG-COSMO_EU

Betrachtet man jedoch die prozentuale Abweichung vom gemessenen Mittelwert der beiden RCG-Modell-Versionen, (Abbildung 37), so zeigt sich deutlich wieder das Bild, dass RCG-TRAMPER eher zu einer Überschätzung (positive Werte) und RCG-COSMO_EU zu einer Unterschätzung der Jahresmittelwerte neigt.

NO₂ Varianz	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
Obs	42.37	24.04	27.82	24.90		35.53	141.22	144.61
TRAMPER	47.79	42.69	41.61	37.58		65.52	194.91	156.32
COSMO_EU	24.69	16.41	13.64	12.77		24.98	154.38	140.27

Abbildung 38 Varianz (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) der NO₂-Werte um den gemessenen (OBS) Mittelwert und um den von den beiden RCG-Konfigurationen mit TRAMPER und mit COSMO-EU durchgeführten simulierten Mittelpunkt für die genannten Messpunkte

Die Varianz gibt die Streuung der Variablen um ihren Mittelwert wieder. Abbildung 38 zeigt, wie sich die Beobachtungen und die Simulationen verhalten. Auffallend ist, dass die Modellkonfiguration RCG-TRAMPER an allen Messpunkten eine größere Streuung als die beobachtete Streuung aufweist, RCG-COSMO-EU hingegen weist an den ländlichen Stationen eine niedrigere Streuung und an den städtischen Messpunkten eine sehr ähnliche oder etwas zu hohe Streuung im Vergleich zu den Messungen auf. RCG-TRAMPER hat im Vergleich zu RCG-COSMO_EU eine deutlich höhere Streuung um den Mittelwert; dies bedeutet, dass RCG-TRAMPER ein unruhigeres Verhalten zeigt als RCG-COSMO-EU und teilweise auch als es aus den Beobachtungen ersichtlich wird.

NO₂ RMSE	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	5.51	4.98	6.04	4.05		6.91	11.57	14.49
COSMO_EU	5.54	2.45	4.11	0.46		3.21	14.14	8.40

Abbildung 39 Mittlerer quadratischer Fehler (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) zwischen Beobachtungen und Simulationen, durchgeführt mit RCG-TRAMPER (TRAMPER) und mit RCG-COSMO_EU (COSMO_EU) an den genannten Messpunkten

Abbildung 39 gibt den mittleren quadratischen Fehler zwischen Beobachtungen und Simulationen wieder. Dieser liegt bei 5 von 7 Messpunkten in Deutschland für RCG-COSMO-EU niedriger als für RCG-TRAMPER.

4.3. PM10 – PM2.5

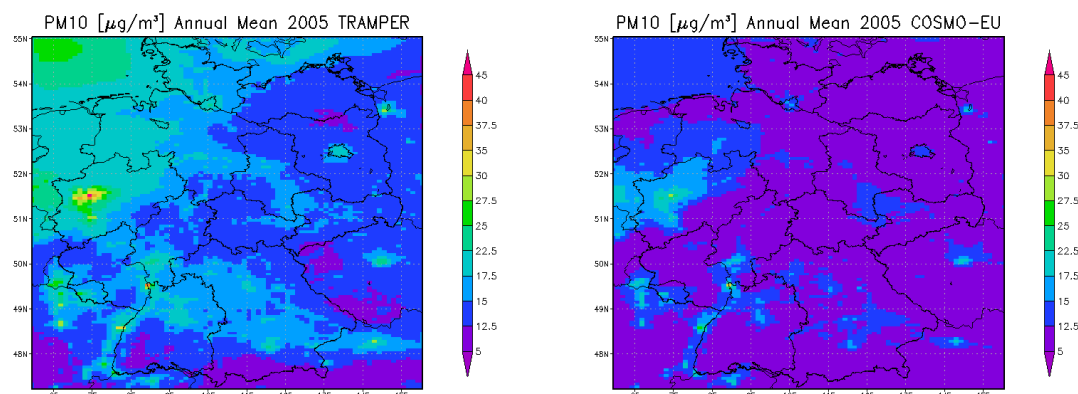


Abbildung 40 PM10- Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)

RCG simuliert Gesamt-PM10 als Summe der anorganischen Inhaltsstoffe Nitrate, Sulfate, Ammonium und Seesalz, der sekundären organischen Aerosole, des primären elementaren Kohlenstoffes (EC), des primären organischen Kohlenstoffes (OC) und der primären Restaerosole kleiner $2,5 \mu\text{m}$ und zwischen $2,5$ und $10 \mu\text{m}$ aerodynamischen Durchmessers. Die räumlichen Strukturen mit erhöhten PM10-Werten über den städtischen Gebieten vor allem im Ruhrgebiet, im Frankfurter Raum, in Linz, in Prag und in Berlin kommen bei beiden Modellversionen gut zum Vorschein. Vor allem das Zusammenspiel zwischen Industriegebieten und dicht besiedelten Gebieten wie beispielsweise im Ruhrgebiet führt zu räumlichen Maxima im Untersuchungsgebiet. Die Absolutwerte an simulierten Jahresmittelkonzentrationen jedoch unterscheiden sich sehr zwischen den 2 Modellversionen. RCG-TRAMPER liefert im Ruhrgebiet Maximalwerte von über $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RCG-COSMO-EU von knapp über $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

For allem in Großstädten wie Berlin, in denen es wenige Industriebetriebe gibt, wird mit allen Modellversionen der Jahresmittelwert deutlich unterschätzt. So wird an der Messstation Nansenstraße, einer Berliner städtischen Hintergrundstation, im Jahresmittel eine Schadstoffbelastung von $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen, RCG-TRAMPER hingegen simuliert ca. $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, RCG-COSMO-EU simuliert für das Jahr 2005 ca. $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Des Weiteren fällt auf, dass vor allem über den Meeren deutlich unterschiedliche PM10-Werte simuliert werden, die zum größten Teil vom Seesalz im Gesamtaerosol herrühren müssen.

Seesalz wird in RCG über die Windgeschwindigkeit in der bodennahen Schicht nach einem Ansatz von Monahan et al. (1986) parametrisiert. Je höher die Geschwindigkeiten über dem Meer, desto mehr Seesalzemissionen werden produziert. Abbildung 5 hat gezeigt, dass die Bodenwindgeschwindigkeiten mit COSMO-EU über der Nordsee und über der Ostsee im Mittel ca. 1 bis 2 m/s höher sind als in der TRAMPER-Analyse. Dies würde auf einen höheren Seesalzgehalt in der Luft mit COSMO-EU deuten. Da jedoch auch die Schubspannungsgeschwindigkeiten über den deutschen Meeren deutlich höher mit COSMO-EU als mit TRAMPER simuliert werden (Abbildung 14), ist dies die Ursache, dass PM10 deutlich rascher in höhere Atmosphärenschichten verteilt wird als mit TRAMPER. Die führt dann in der Endbilanz zu höheren PM10-Simulationen über den Meeren bei der RCG-TRAMPER-Version als bei der RCG-COSMO-EU-Version.

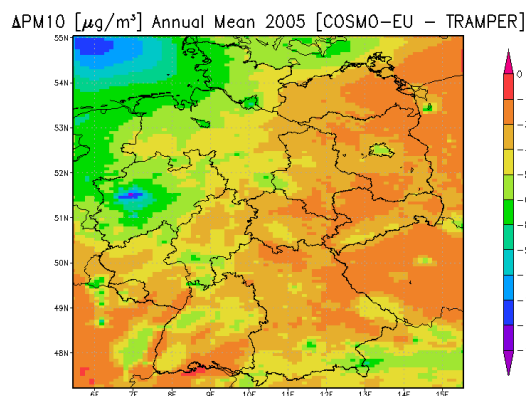


Abbildung 41 Absolute Änderung der PM10-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber

Betrachtet man sich das Differenzbild (Abbildung 41) zwischen RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU, so wird ersichtlich dass die absoluten Unterschiede über dem Land und in emissionsfernen Gebieten – außer über den Meeren – relativ gering sind. Vor allem in Ostdeutschland und über weiten Teilen Bayerns simuliert RCG-TRAMPER nur ca. 3 bis 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ höhere PM10-Werte als RCG-COSMO-EU. Die größte Differenz erkennt man in den Ballungsgebieten im Ruhrgebiet, in Berlin, Frankfurt und München und aufgrund der unterschiedlichen Seesalzemissionen über den Meeren und in Küstennähe.

Betrachtet man nur die feine Aerosolfraktion (PM2.5) (Abbildung 42), die im RCG nur die Seesalze und die groben primären Restaerosolen zwischen 2,5 und 10 μm aerodynamischen Durchmessers ausschließen, so lassen sich alle räumlichen Muster wieder finden, die schon bei der PM10-Simulation erkennbar waren. Wiederum werden vor allem die Ballungsgebiete von den beiden RCG-Version unterschiedlich simuliert, die Differenzen über den Meeren fallen hingegen weg, da Seesalz in der groben Fraktion modelliert wird.

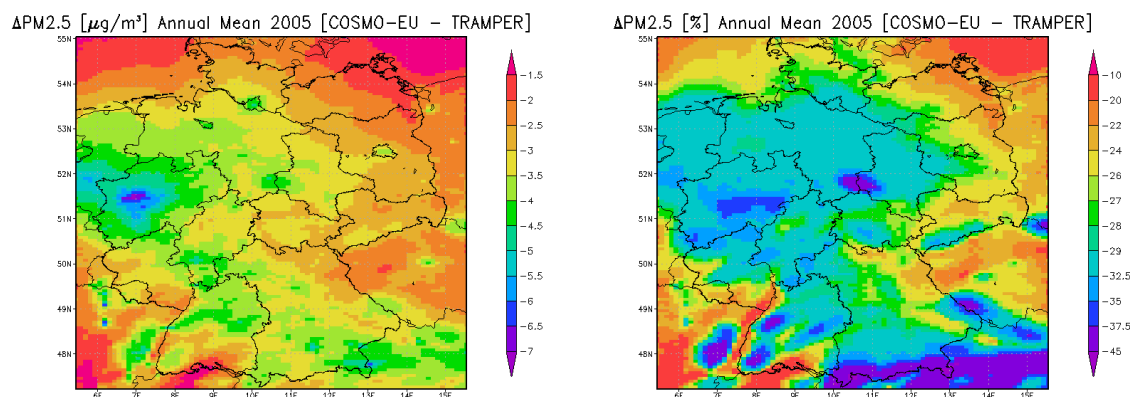


Abbildung 42 Absolute (links) und prozentuale (rechts) Änderung der PM2.5-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber

Betrachtet man die prozentualen Änderungen der PM2.5-Simulationen aufgrund unterschiedlicher Meteorologie, so zeigen sich deutlich orographische Effekte: Zum einen nimmt der Unterschied in den PM2.5-Simulationen zwischen RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU vom Land Richtung Meer ab, zum anderen erkennt man auch, dass die Unterschiede zwischen den beiden Konfigurationen von Tiefebene(n) (weniger Unterschiede) zu den Bergen (höhere Unterschiede) zunehmen. Dies sieht man vor allem am Beispiel des Harzes im Grenzgebiet Niedersachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen, im Schwarzwald bzw. in den Vogesen und über den Alpen. Ein eindeutiger Stadt-Land-Effekt in den Unterschieden aufgrund unterschiedlicher Meteorologien konnte nicht festgestellt werden.

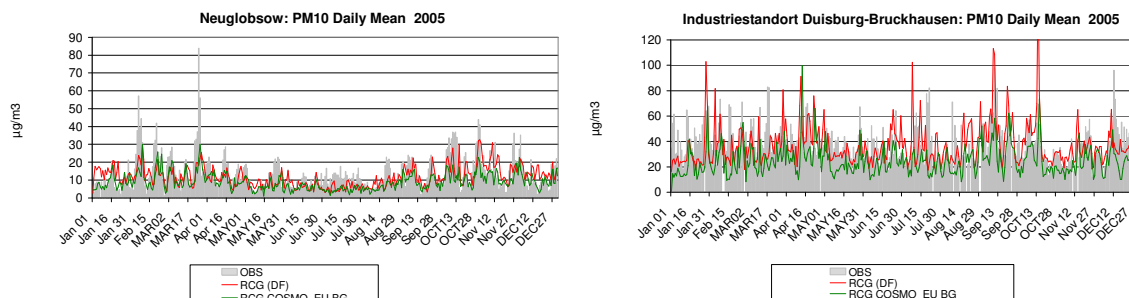


Abbildung 43 Vergleich der mittleren PM10-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Neuglobsow (links) und am Messort Duisburg-Bruckhausen (rechts).

Vergleicht man die Zeitreihen über einer ländlichen Station (Neuglobsow) und einer städtischen Station (Duisburg-Bruckhausen) mit den beiden RCG-Modellversionen (Abbildung 43), so sieht man wie schon bei NO_2 , dass beide Konfigurationen den allgemeinen Gang gut wiedergeben. Auffallend ist jedoch, dass RCG-TRAMPER im Ballungsgebiet zeitliche Maxima deutlich überschätzt. RCG-COSMO-EU überschätzt einen gemessenen Wert sehr selten, und liegt dementsprechend fast immer unter den RCG-TRAMPER – Simulationen.

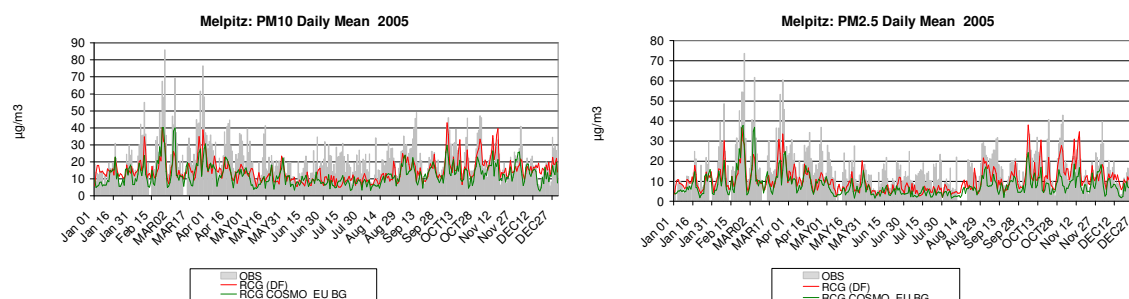


Abbildung 44 Vergleich der mittleren Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Melpitz für PM10 (links) und PM2.5 (rechts).

Vergleicht man die PM10- und PM2.5-Simulationen der beiden Modellkonfigurationen mit Messwerten in Melpitz (Abbildung 44), so sieht man, dass RCG-TRAMPER mehr PM10 im feinen Bereich simuliert (74% im Jahresmittel) als RCG-COSMO-EU (66% im Jahresmittel). Beiden Modellversionen gleich ist die Tatsache, dass bei erhöhten PM10-Konzentrationen der Anteil der feinen Fraktion höher als im Durchschnitt liegt. Im RCG werden alle sekundären Aerosole im Bereich kleiner $2.5 \mu\text{m}$ simuliert. Primäre Partikel im Größenbereich zwischen $2.5 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ in emissionsfernen Gebieten bilden vor allem aufgewirbelte Stäube, die im Modell über die Schubspannungsgeschwindigkeit parametrisiert werden. Dies ist im Einklang mit der Tatsache, dass COSMO-EU deutlich höhere Schubspannungsgeschwindigkeiten simuliert als TRAMPER. Erhöhte PM10-Konzentrationen treten aber häufiger bei schwachwindigen meteorologischen Situationen auf.

PM10	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	0.64	0.44	0.20	0.42		0.54	0.34	0.61
COSMO_EU	0.70	0.63	0.46	0.59		0.46	0.34	0.65

PM25	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	0.70					0.61		
COSMO_EU	0.76					0.72		

Abbildung 45: Korrelationskoeffizienten für PM10-gesamt und für PM2.5 für RCG-TRAMPER und für RCG-COSMO_EU

PM10	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	-34.6%	-13.7%	-10.8%	-1.3%		-20.3%	-6.6%	59.1%
COSMO_EU	-45.6%	-34.6%	-33.8%	-34.9%		-42.5%	-37.2%	4.2%

PM25	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	-38.5%					-21.9%		
COSMO_EU	-54.1%					-45.7%		

Abbildung 46: Prozentuale Abweichung für PM10-gesamt und für PM2.5 zwischen Beobachtungen und RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU

Schaut man sich die Korrelationskoeffizienten (Abbildung 45) für die beiden RCG-Konfigurationen an, so sieht man eine deutliche Verbesserung von RCG-COSMO-EU gegenüber RCG-TRAMPER, und zwar sowohl für die Simulation von PM10-Gesamt als auch für PM2.5. Nur an einer Station (Waldhof) wird die Korrelation zwischen Messdaten und RCG-COSMO-EU-Simulationen schlechter als mit RCG-TRAMPER. Berücksichtigt man aber auch die prozentuale Abweichung der Jahresmittelwerte (Abbildung 46), so zeigt sich doch wieder eine deutlich höhere Unterschätzung der Aerosolwerte, wenn COSMO-EU als meteorologischer Treiber für RCG genommen wird. Was jedoch stark auffällt ist die deutliche Überschätzung der Aerosolwerte am Industrieort Bottrop im Ruhrgebiet. RCG-TRAMPER überschätzt dort den gemessenen Wert um ca. 60%. Eine Überschätzung oder auch eine zu geringe Unterschätzung von PM10 widerspricht jedoch der allgemeinen Auffassung, dass noch nicht alle Entstehungsprozesse von bodennahen Aerosolen verstanden sind. Deshalb wird eine Unterschätzung von ca. 20% als akzeptabel, ja sogar als gewollt angenommen. Nicht verstandene Prozesse können natürlich nicht simuliert werden. Werden nun aber Werte simuliert, die den Messdaten sehr nahe kommen bzw. sie sogar übertreffen, so ist dies häufig ein Hinweis dafür, dass die Simulation richtig, aber aus falschen Gründen richtig ist (Stern et al., 2008).

PM10 Varianz	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
Obs	138.79	95.55	117.05	110.99		100.96	209.62	166.78
TRAMPER	42.07	32.48	69.27	215.21		40.54	272.82	233.83
COSMO_EU	38.12	22.80	29.28	60.47		24.60	131.01	180.89

Abbildung 47 Varianz (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) der PM10-Werte um den gemessenen (OBS) Mittelwert und um den von den beiden RCG-Konfigurationen mit TRAMPER und mit COSMO-EU durchgeführten simulierten Mittelpunkt für die genannten Messpunkte

Abbildung 47 vergleicht die gemessenen und die simulierten Varianzen der PM10-Werte um den Mittelwert. Aus den Beobachtungen wird ersichtlich, dass PM10 ein sehr unruhiges Verhalten aufweist. Dieses Verhalten wird von RCG-TRAMPER besser wieder gegeben als von RCG-COSMO-EU, zumindest an den ländlichen Stationen. In der Stadt hingegen kann beobachtet werden, dass RCG-TRAMPER größere Ausschläge produziert als in den Beobachtungen ersichtlich. RCG-COSMO-EU unterschätzt die Varianz für alle Stationen außer Bottrop, und zwar deutlich. Dies lässt auf einen zu ruhigen Gang der RCG-COSMO-EU-Simulationen für PM10 schließen.

PM10 RMSE	Melpitz	Neuglobsow	Zingst	Westerland	Deuselbach	Waldhof	Duisburg	Bottrop
TRAMPER	11.95	9.07	12.38	14.09		9.24	41.97	16.17
COSMO_EU	13.36	9.05	11.32	10.96		11.67	21.06	11.11

Abbildung 48 Mittlerer quadratischer Fehler (in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) zwischen Beobachtungen und Simulationen, durchgeführt mit RCG-TRAMPER (TRAMPER) und mit RCG-COSMO_EU (COSMO_EU) an den genannten Messpunkten

Abbildung 48 gibt den mittleren quadratischen Fehler für PM10 der zwei RCG-Konfigurationen wieder. In den städtischen Gebieten ist dieser bei RCG-COSMO-EU deutlich niedriger, an den ländlichen Hintergrundstationen ist er sehr ähnlich.

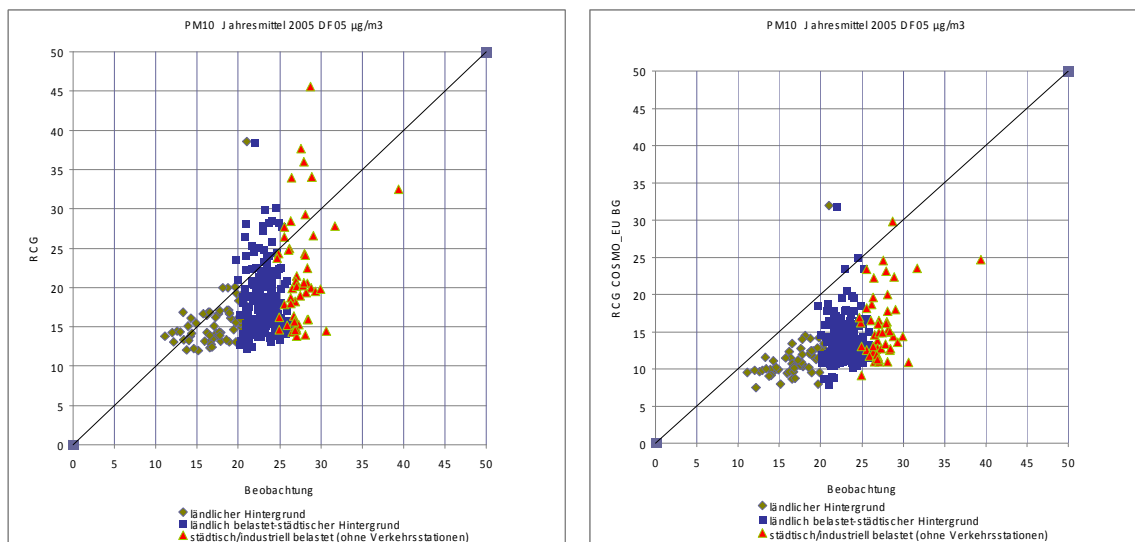


Abbildung 49: Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) PM10-Jahresmittelwerten, unterteilt in städtisch/industriell belastete Gebiete (rote Dreiecke), städtische Hintergrundgebiete (blaue Quadrate) und ländliche Hintergrundgebiete (graue Rhomben) für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).

Betrachtet man nun den Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Jahresmittelwerten (Abbildung 49), so sieht man deutlich, dass RCG-TRAMPER sehr viel häufiger die Beobachtungen vor allem in städtischen und in Industriegebieten überschätzt als RCG-COSMO_EU. Führt man sich nochmals Abbildung 43 vor Augen (Industriestandort Duisburg-Bruckhausen), so erkennt man, dass RCG-TRAMPER die beobachteten Maxima deutlich überschätzt. Dies führt dann zu den überschätzten Jahresmittelwerten.

4.4. elementarer Kohlenstoff

EC wird in RCG als rein primärer Schadstoff simuliert. EC kann somit als passiver Tracer aufgefasst werden, der emissionsnahe Strukturen wiedergibt. Außerdem wird EC im Modell vollkommen im Größenbereich unter $2.5\text{ }\mu\text{m}$ simuliert. Die Deposition von EC hängt im Modell nur vom aerodynamischen Widerstand ab. Es wird mehr Wert auf die Auswirkungen unterschiedlicher meteorologischer Treiber auf den Transport und auf die Deposition von primären Partikeln kleiner $2.5\text{ }\mu\text{m}$ gelegt als auf den Vergleich mit Messdaten. Dennoch soll auch der Vergleich mit den Messungen in Melpitz herangezogen werden, um Aussagen über den Einfluss der Meteorologie auf die Simulationen unterlegen zu können.

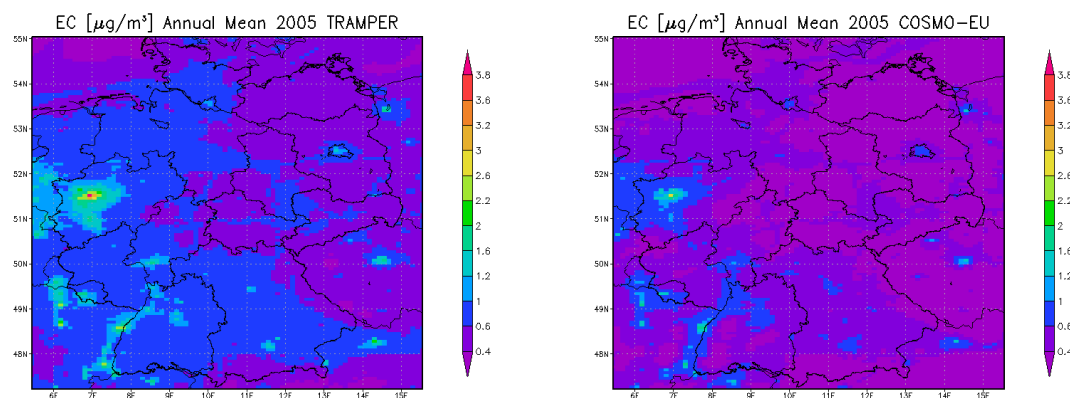


Abbildung 50 EC- Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)

Das Modell-System RCG-TRAMPER simuliert hohe EC-Konzentrationen über dicht besiedelten Gebieten sowie über Industriegebieten. Im Allgemeinen wird der Ferntransport von EC geringer eingeschätzt als bei Gesamt-PM₁₀ – dies aufgrund der Tatsache, dass Gesamt-PM₁₀ zu einem wichtigen Teil aus sekundären Stoffen besteht. Lokale Strukturen kommen beim Betrachten von EC dementsprechend deutlicher zum Tragen. Das Modellsystem RCG-COSMO-EU simuliert über emissionschwachen als auch über emissionsstarken Gegenden geringere EC-Konzentrationen als RCG-TRAMPER. Dies deutet darauf hin, dass RCG-TRAMPER mehr Ferntransport von passiven Tracern zulässt als RCG-COSMO-EU. Wird jedoch berücksichtigt, dass COSMO-EU die untere Atmosphäre aufgrund höherer Schubspannungsgeschwindigkeiten turbulenter sieht als TRAMPER, muss wiederum der Schluss gezogen werden, dass RCG-COSMO-EU hauptsächlich wegen der erhöhten Turbulenz und dementsprechend wegen der erhöhten Depositionsgeschwindigkeit bzw. geringerer atmosphärischer Widerstände geringere EC-Konzentrationen simuliert, auch über ländlichen Gebieten, als RCG-TRAMPER.

Betrachtet man sich die absoluten Änderungen (Abbildung 51) aufgrund der unterschiedlichen Meteorologie in den EC-Simulationen, so sieht man doch deutlich, dass die größten Unterschiede in den Ballungsgebieten zu finden sind. Prozentual jedoch erkennt man das gleiche Muster wie bei PM_{2.5}: Es gibt prozentual höhere Unterschiede über den Bergen und niedrigere über den Tiefebene und den Meeren.

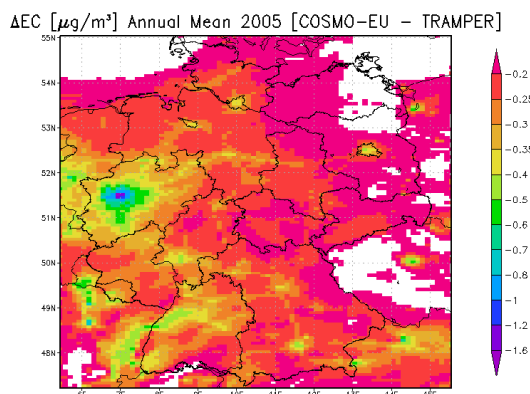


Abbildung 51 Absolute Änderung der EC-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber

Abbildung 52 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und simulierten EC-Werten an der ländlichen Hintergrundstation Melpitz. Deutlich ist zu sehen, dass beide Modellversionen die Messwerte sehr stark unterschätzen. Es zeigt sich jedoch auch beim passiven Stoff EC wiederum das gleiche Bild wie bei PM₁₀ und NO₂: bei erhöhten Werten vor allem im Herbst neigt RCG-TRAMPER dazu, die Stoffe höher zu simulieren als RCG-COSMO-EU.

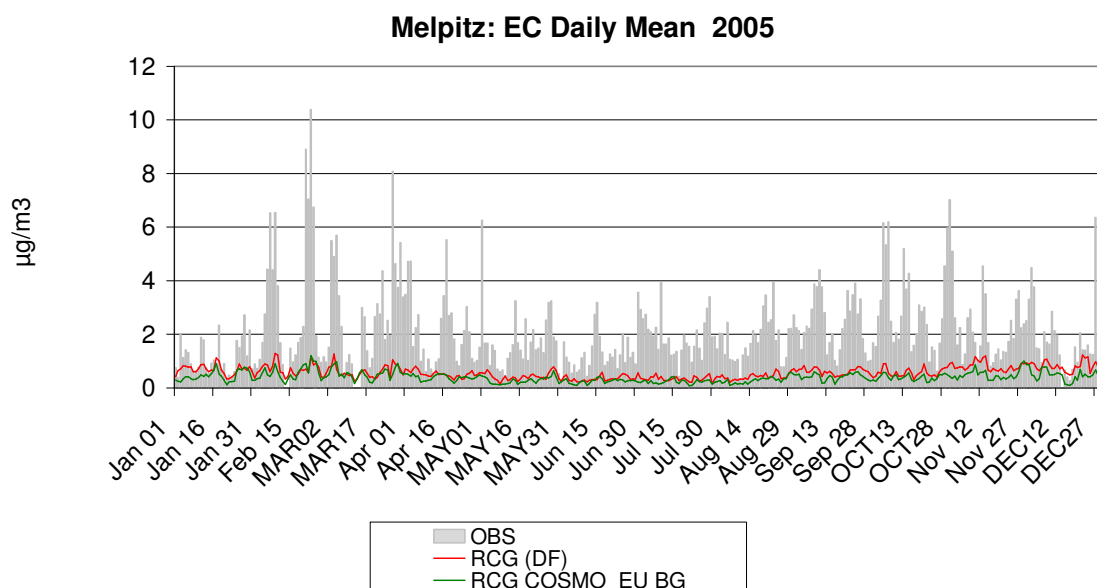


Abbildung 52 Vergleich der mittleren PM₁₀-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Melpitz

4.5. Sulfat – Nitrate.

Sulfat wird im RCG hauptsächlich als Sekundäraerosol behandelt. Vorläuferstoffe sind Schwefeldioxyde. Direkte Sulfatmissionen liegen unter 5% der anthropogenen Schwefeldioxydmissionen, die wiederum hauptsächlich aus Anlagen zur Stromerzeugung stammen. Das Sekundäraerosol Nitrat hat als direkten Vorläuferstoff NO_2 . NH_3 verbindet sich in der Atmosphäre mit vorhandenen SO_2/SO_3 und NO_x und bildet Ammoniumsulfat und Ammoniumnitrat.

Sulfate lassen sich als guten Tracer für Ferntransport und für langlebige Schadstoffe in der Luft verwenden.

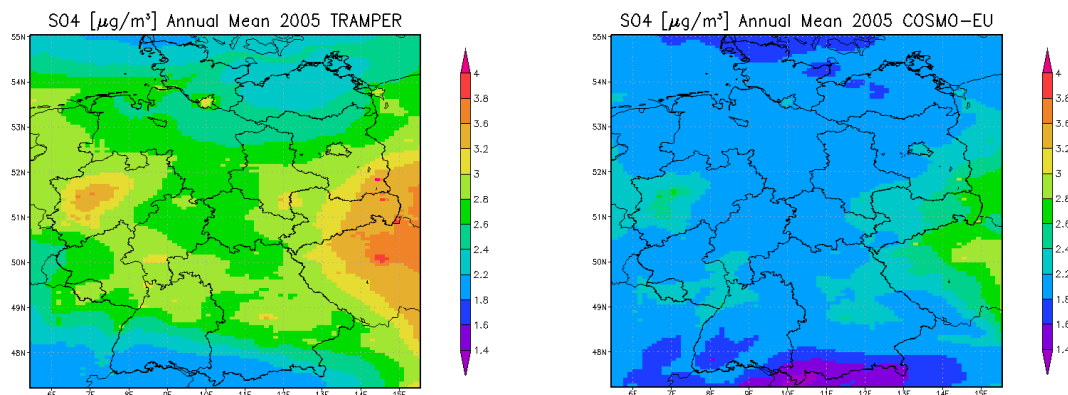


Abbildung 53 Sulfat- Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)

Das System RCG-TRAMPER simuliert erhöhte Sulfatkonzentrationen über Nord-West-Tschechien und über weiten Teilen Nordrheinwestfalens. In diesen Gebieten werden Werte zwischen 3 und 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ simuliert. Wird nun der meteorologische Treiber mit COSMO-EU ersetzt, werden in diesen Gebieten maximal 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet. Beide Modellversionen geben gut den überregionalen Charakter dieses Luftschadstoffes wieder, wobei RCG-TRAMPER etwas lokaler bleibt als RCG-COSMO_EU.

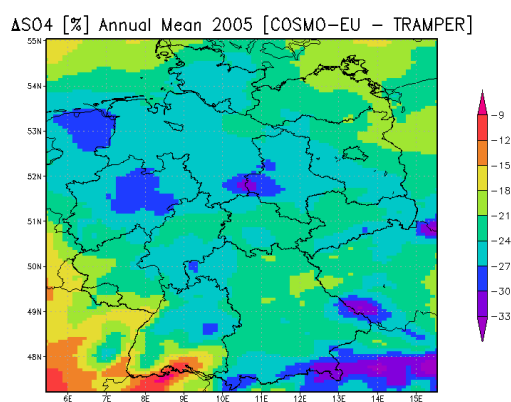


Abbildung 54 Prozentuale Änderung der Sulfat-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber

Abbildung 54 zeigt die prozentualen Differenzen der beiden Modellläufe. Erstaunlich ist dabei, dass auch bei diesem langlebigen Stoff RCG-TRAMPER im Jahresmittel überall höhere Werte liefert als RCG-COSMO-EU. Auch die räumliche Verteilung der Differenzen, d.h. höhere Differenzen in den Bergen und niedrigere in den Niederungen, lässt sich auch hier

gut wieder erkennen. Der Einfluss der Randbedingungen im Süd-Westen des Rechengebietes ist jedoch deutlicher zu erkennen als bei ähnlichen Betrachtungen für PM_{2.5}.

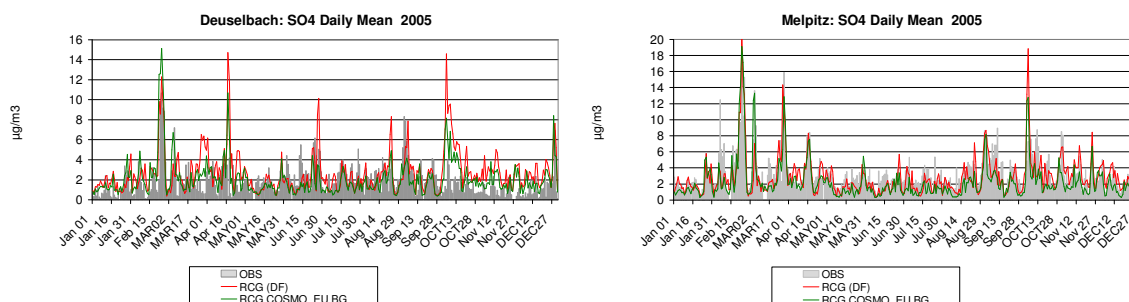


Abbildung 55 Vergleich der mittleren Sulfat-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Deuselbach (links) und Melpitz (rechts)

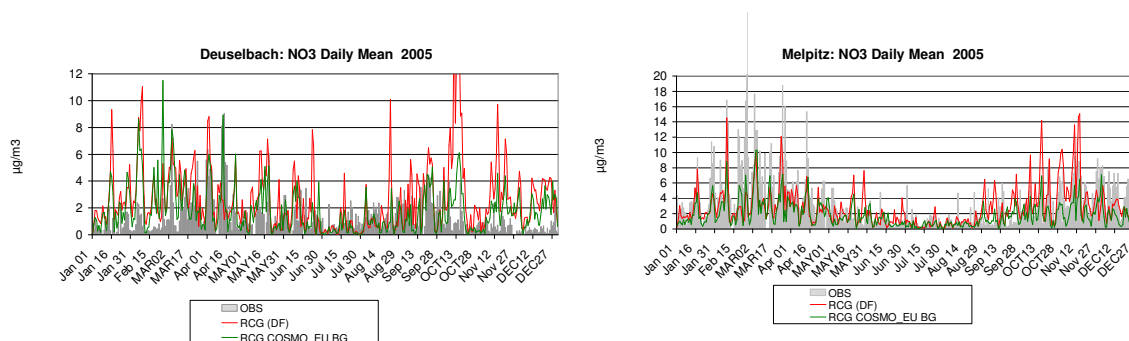


Abbildung 56 Vergleich der mittleren Nitrat-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Deuselbach (links) und Melpitz (rechts)

Vergleicht man gleichzeitig die Sulfat-Simulationen (Abbildung 55) und die Nitratsimulationen (Abbildung 56) mit beobachteten Konzentrationen in der Luft, so sieht man doch wiederum eine deutliche Überschätzung beider Stoffe von RCG-TRAMPER, vor allem in den Herbstmonaten. Während die hohen SO₄-Werte im Frühjahr sowohl in Deuselbach als auch in Melpitz von beiden Modellversionen korrekt erkannt worden sind, was auf eine richtige Einschätzung der meteorologischen Lage schließen lässt, so wird das Maximum im Oktober vor allem von RCG-TRAMPER deutlich über bewertet. Auch RCG-COSMO-EU simuliert hohe SO₄-Werte am 13. Oktober, sowohl in Deuselbach, als auch in Melpitz, die absoluten Simulationswerte liegen jedoch deutlich unter denen von RCG-TRAMPER. Aus den Messdaten erscheint es, als ob Melpitz und Deuselbach von unterschiedlichen Luftmassen betroffen sind, in den Simulationen hingegen scheinen die Modelle die gleiche Luftmasse in den beiden Gebieten simuliert zu haben. Vor allem in Deuselbach scheint außerdem RCG-TRAMPER einen stabilen Aufbau von Sekundäraersolen erkannt zu haben, wenn man sich die Nitratsimulationen von RCG-TRAMPER anschaut. Dies ist in den Messungen nicht zu erkennen. Es scheint vielmehr so, dass die Luftmasse an diesen Tagen sogar gereinigt worden ist. Was jedoch viel deutlicher ins Auge fällt, ist das absolute Überschätzen der Größenordnung in Deuselbach für NO₃ bei RCG-TRAMPER. Dies ist bei RCG-COSMO-EU nicht der Fall.

Betrachten wir uns die Scatterplots sowohl für Sulfate, aber vor allem auch für Nitrate (Abbildung 57), so wird zum einen deutlich, dass RCG-TRAMPER eine höhere Streuung aufweist. Zum anderen erkennt man jedoch auch, dass genau solche oben beschriebenen

Ausreißer des RCG-TRAMPER-Systems vor allem bei Sekundäraersolen häufiger auftreten als beim RCG-COSMO-EU-System. Dieses neigt vor allem bei der Nitratsimulation zu einer Unterschätzung. Geht man davon aus, dass vor allem Nitratmessungen häufig von Fehlern belastet sind, die vor allem auf die Verdunstung, also auf die Massenabnahme von NO_3 in der Messprobe zurückzuführen sind, so sind Unterschätzungen eher realistisch als Überschätzungen.

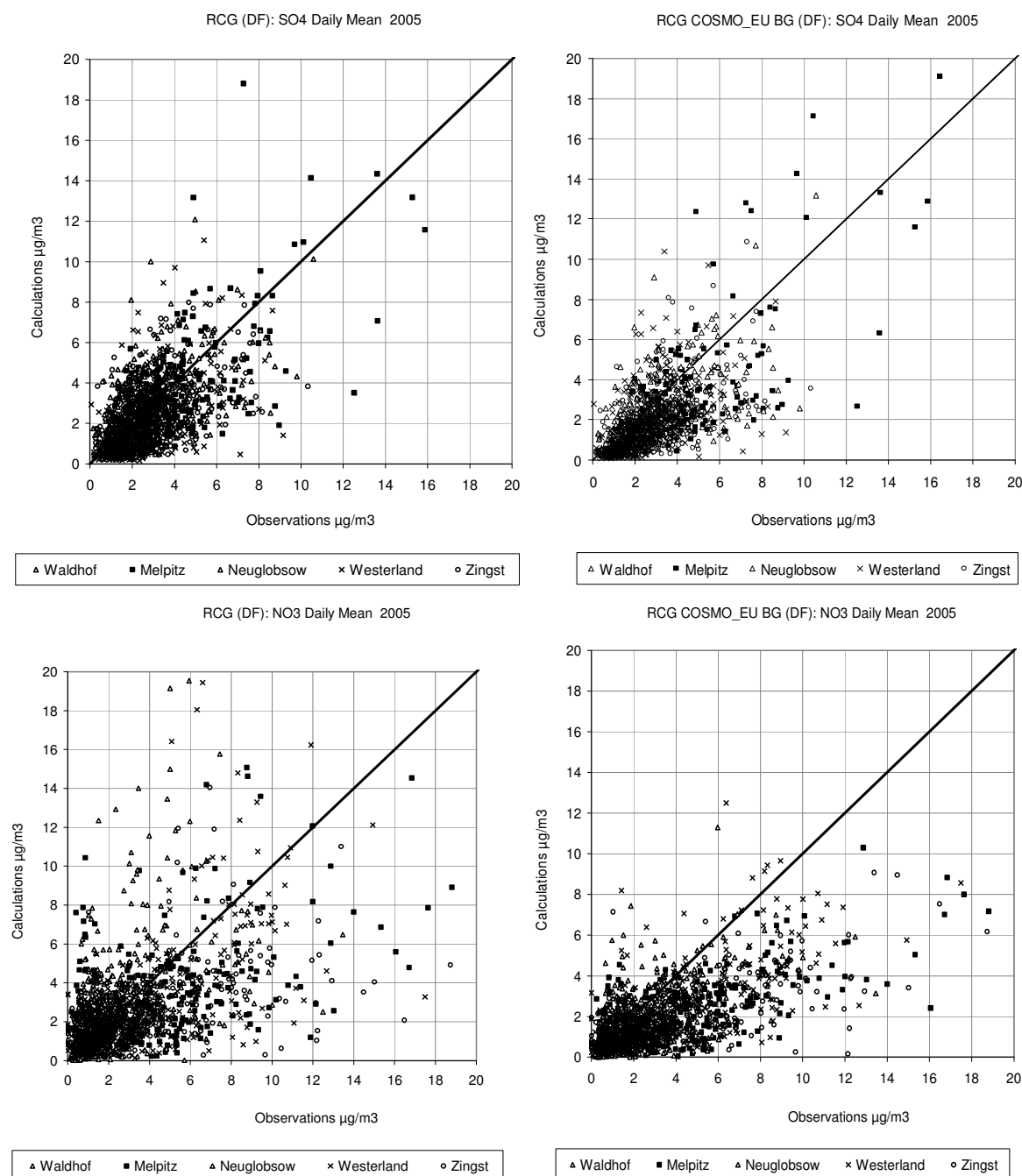


Abbildung 57 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) Sulfat-(oben)- und Nitrat (unten)-Tagesmittelwerten, für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).

5. Diskussion

5.1. Unterschiedliche Mischungsschichtberechnungen – B. Fay (1997) vs. Batchvarova-Gryning (1994).

Die von Barbara Fay nachgerechneten Mischungsschichthöhen werden im COSMO-EU-Archiv des DWD in Offenbach operationell zur Verfügung gestellt. Wie bereits in Kapitel 3.1.7 ausführlich diskutiert, sind diese jedoch vor allem nachts standardmäßig sehr hoch angesetzt (ca. 320 m über Grund). Deshalb wurden die Mischungsschichthöhen mit einem Ansatz nachgerechnet, der in Batchvarova – Gryning (1994) beschrieben worden ist (siehe Kapitel 3.2. Dieser Ansatz wird zum Großteil auch in TRAMPER verwendet und führt vor allem nachts und bei stabilen atmosphärischen Situationen zu realistischeren Abschätzungen der Mischungsschichthöhe. In einer Sensitivitätsstudie, in der die RCG-COSMO_EU-Konfiguration mit beiden Mischungsschichthöhen verwendet worden ist, hat sich gezeigt, dass der Einfluss der meist deutlich höheren nächtlichen Grenzschichten im Standard-COSMO-EU auf relevante Luftschadstoffkonzentrationen am Boden als sehr gering eingestuft werden kann.

5.1.1: Ozon.

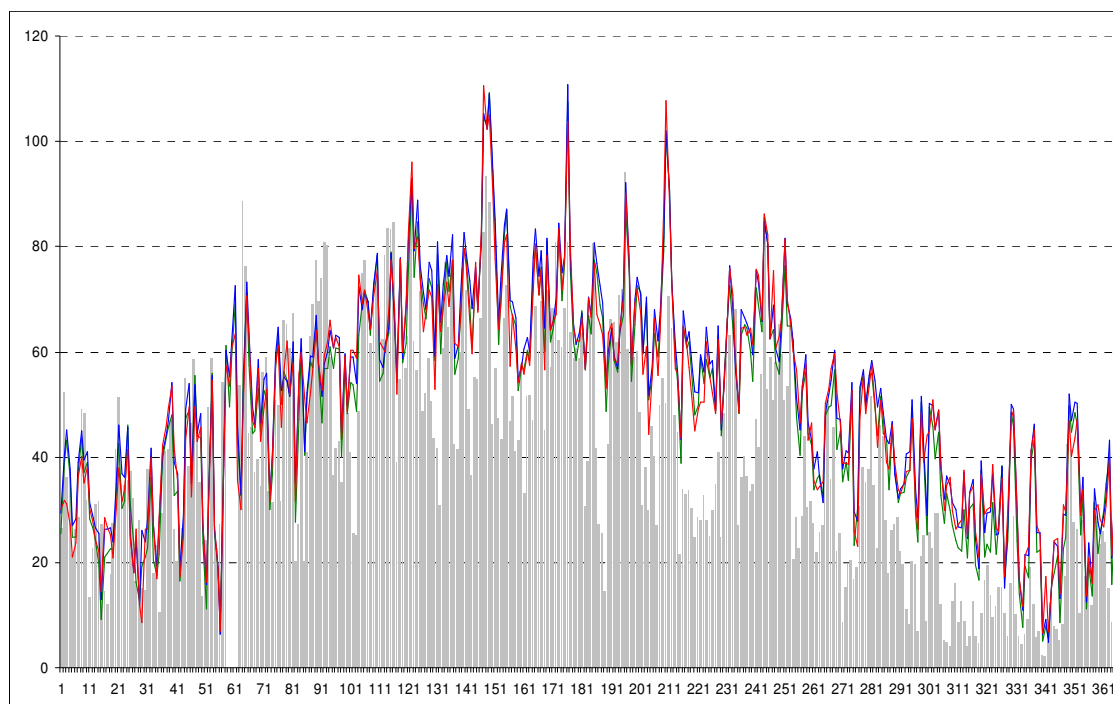


Abbildung 58: Vergleich der mittleren O₃-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung 7x8 km²) (grüne Linie), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung 15x15 km²) (blaue Linie) und RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Barbara Fay, Auflösung 15x15 km²) (rote Linie) am Messort Berlin-Nansenstraße. (x-Achse: Julianischer Tag 2005, y-Achse: µg/m³)

Abbildung 58 zeigt einen Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Tagesmittelwerten an einer Berliner Hintergrundstation für Ozon. Die grüne Linie zeigt die

RCG-COSMO_EU-Simulation mit den nach Batchvarova-Gryning nachgerechneten Mischungsschichthöhen und mit einer Auflösung von $7 \times 8 \text{ km}^2$, die blaue Linie gibt die gleiche Modell-Konfiguration wieder, aber mit einer Rechenauflösung von $15 \times 15 \text{ km}^2$ und die rote Linie stellt die Ozonsimulationen dar, die mit RCG-COSMO_EU mit einer Auflösung von $15 \times 15 \text{ km}^2$ gerechnet worden ist, aber mit den von Barbara Fay gerechneten Mischungsschichthöhen. Die Unterschiede zwischen RCG-COSMO_EU mit Mischungsschichthöhen nach Batchvarova-Gryning und mit Barbara Fay sind sehr gering. Der Einfluss der Rechenauflösung, obwohl auch eher schwach, macht sich bei weitem mehr bemerkbar als der reine Unterschied in den Mischungsschichthöhen. Der Korrelationskoeffizient der beiden RCG-COSMO_EU-Anwendungen ist der gleiche (0.78 sowohl für die $15 \times 15 \text{ km}^2$ aufgelöste RCG-COSMO_EU-Anwendung mit Mischungsschichthöhen berechnet nach Barbara Fay als auch mit Höhen berechnet nach Batchvarova-Gryning). Die Überschätzung ist etwas höher (31%), wird die Grenzschicht nach Batchvarova-Gryning nachgerechnet, als wenn sie von Barbara Fay berechnet wird (27%).

5.1.2: NO₂

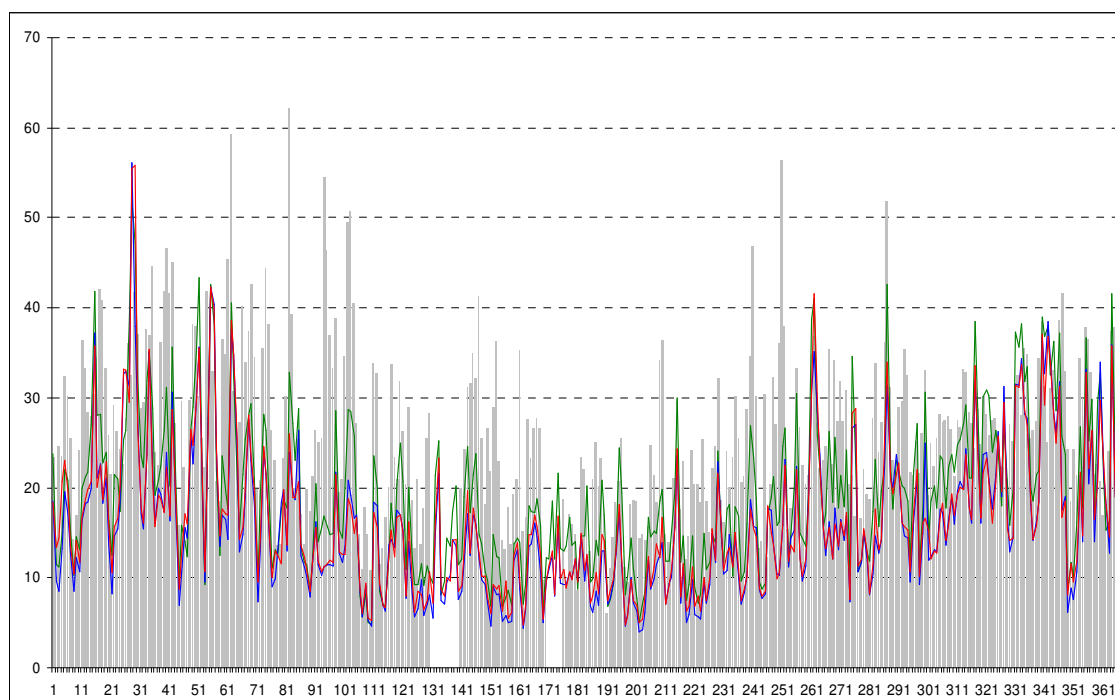


Abbildung 59: Vergleich der mittleren NO₂-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $7 \times 8 \text{ km}^2$) (grüne Linie), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (blaue Linie) und RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Barbara Fay, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (rote Linie) am Messort Berlin-Nansenstraße (x-Achse: Julianischer Tag 2005, y-Achse: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Abbildung 59 zeigt den Einfluss der unterschiedlichen Mischungsschichthöhen auf die NO₂-Simulation in Berlin-Nansenstraße. Wiederum ist die grüne Linie die höher aufgelöste RCG-Version, die blaue und die rote Linie hingegen stellen die RCG-Version auf einem Rechenraster mit $15 \times 15 \text{ km}^2$ Maschenweite dar, und zwar mit nach Batchvarova-Gryning bzw. mit nach Barbara Fay berechneten Grenzschichthöhen. Hier wird der Einfluss der Auflösung noch viel deutlicher als bei der Ozonsimulation. Werden nun aber nur die zwei RCG-COSMO_EU – Läufe mit gleicher Auflösung verglichen, so sind die Unterschiede wiederum vernachlässigbar. Die Korrelationskoeffizienten sind die gleichen (0.54), die

Unterschätzung ist innerhalb der statistischen Unsicherheit (40% und 38%). Die höhere Auflösung ergibt deutlich bessere Resultate mit einem Korrelationskoeffizienten von 0.67 und einer Unterschätzung von 27%. Wiederum muss festgestellt werden, dass der alleinige Austausch der Mischungsschichthöhe nicht zu wesentlich unterschiedlichen Resultaten führt. Vergleicht man nochmals die Unterschiede, die aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber (beispielsweise Abbildung 34) mit den Unterschieden, die ausschließlich aus unterschiedlichen Mischungsschichthöhen herrühren, so sieht man deutlich, dass die Grenzschichthöhe nicht der ausschlaggebende Faktor sein kann. Es scheint zumindest, dass Schubspannungsgeschwindigkeiten einen weitaus höheren Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen am Boden haben als das für die Diffusion zur Verfügung stehende Volumen.

5.1.3: PM10

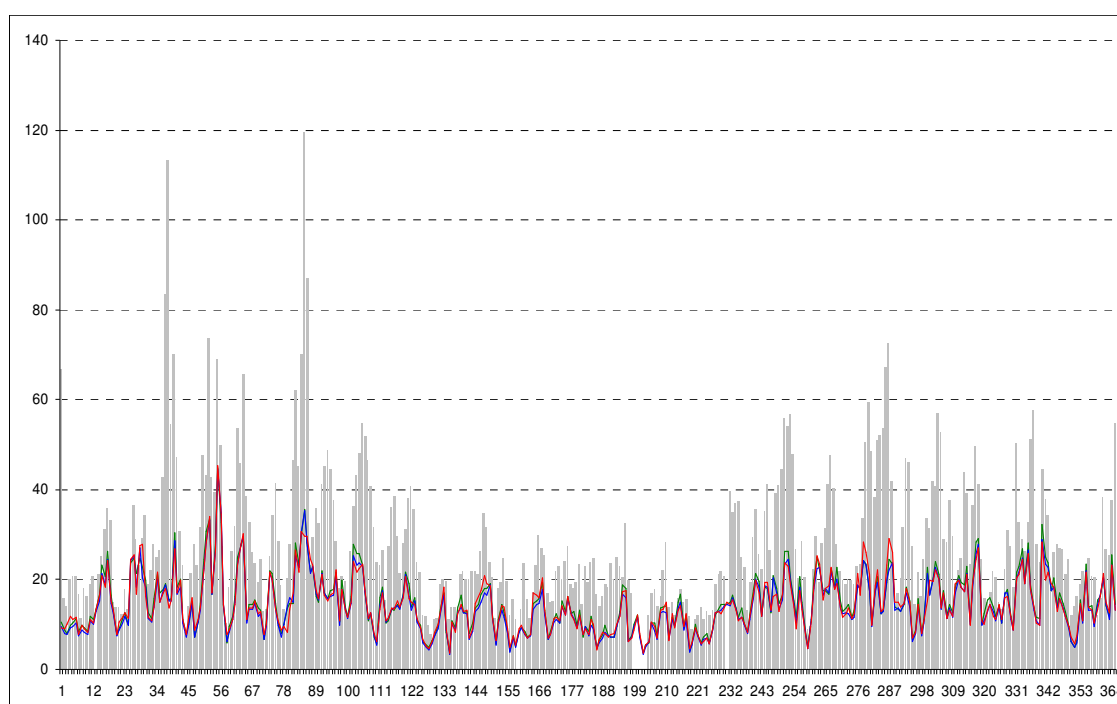


Abbildung 60: Vergleich der mittleren PM10-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung 7x8 km²) (grüne Linie), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung 15x15 km²) (blaue Linie) und RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Barbara Fay, Auflösung 15x15 km²) (rote Linie) am Messort Berlin-Nansenstraße (x-Achse: Julianischer Tag 2005, y-Achse: µg/m³).

Abbildung 60 zeigt die Auswirkung der Auflösung (grüne Linie – 7x8 km²) und der unterschiedlichen Mischungsschichthöhenparametrisierungen (blaue Linie – 15x15 km² Auflösung mit Grenzschichthöhenberechnungen nach Batchvarova-Gryning, rote Linie – 15x15 km² Auflösung mit Grenzschichthöhenberechnungen nach Barbara Fay). Hier wird besonders deutlich, dass bei PM10-Gesamt weder die Auflösung noch die Bestimmung der Grenzschichthöhe zu den deutlichen Unterschieden zu RCG-TRAMPER verantwortlich gemacht werden können. Die Erklärung für den Unterschied muss in den anderen grenzschichtrelevanten meteorologischen Parametern zu finden sein.

5.2. Direkte und abgeleitete Meteorologische Größen für Melpitz.

Um den Einfluss der Meteorologie auf bodennahe Schadstoffkonzentrationen besser verstehen zu können, werden im Weiteren nochmals bestimmte Eingangsfelder, aber auch die im RCG nachgerechneten Grenzschichtparameter wie Diffusionskoeffizienten und Depositionsgeschwindigkeiten an einem Ort (Melpitz) näher beleuchtet.

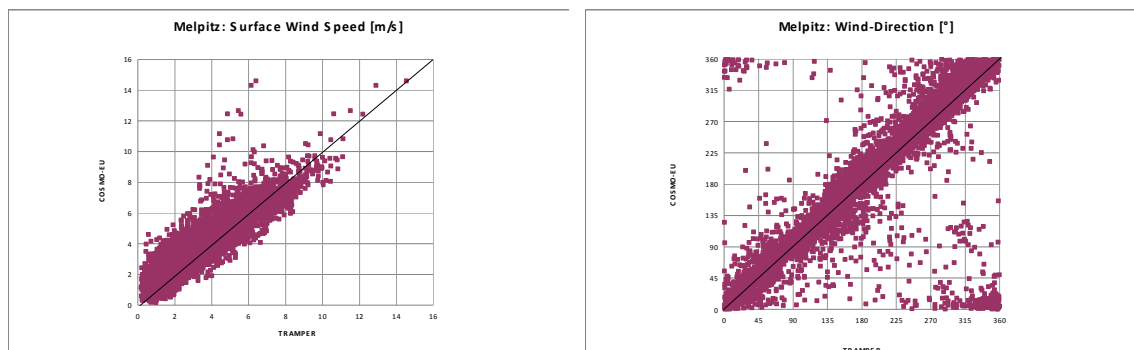


Abbildung 61 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Bodenwindgeschwindigkeiten (links) und Bodenwindrichtungen (rechts) für Melpitz (m/s)

Abbildung 61 zeigt den Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen Bodenwindgeschwindigkeiten und Bodenwindrichtungen für Melpitz, wie sie TRAMPER (x-Achse) und wie sie COSMO-EU (y-Achse) simuliert. Wie schon in Kapitel 3.1.2 beschrieben, stimmen die beiden Berechnungsarten ziemlich genau überein. Sowohl die Windstärke als auch die Windrichtung folgt einer 1-zu-1-Linie, was eine perfekte Übereinstimmung bedeuten würde.

5.2.1: Mischungsschichthöhe

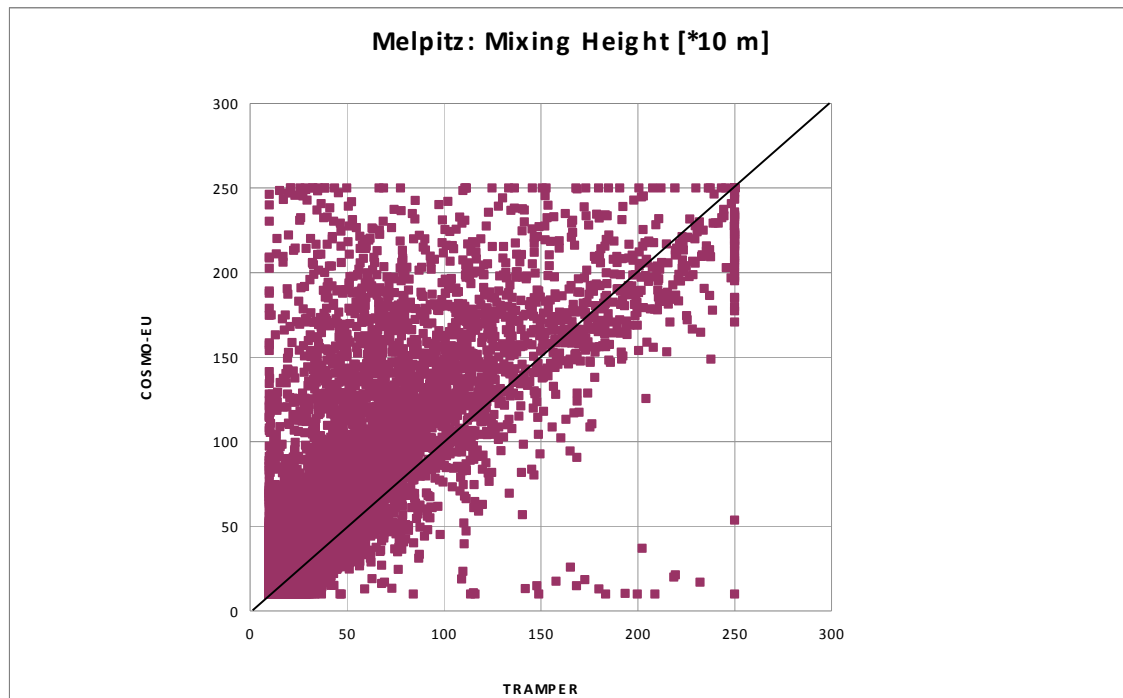


Abbildung 62 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Mischungsschichthöhen für den Standort Melpitz ($\text{m} \cdot 10$)

Betrachtet man jedoch die Mischungsschichthöhen (Abbildung 62), die von TRAMPER für Melpitz simuliert werden (x-Achse) und die von COSMO-EU mit dem Ansatz nach Batchvarova-Gryning (y-Achse) berechnet worden sind, so sieht man deutlich, dass in der nord- und ostdeutschen Tiefebene COSMO-EU deutlich höhere Grenzschichthöhen berechnet als TRAMPER. Obwohl die beiden Berechnungsschemata sehr ähnlich sind, so müssen die Ausgangsfelder doch sehr unterschiedlich sein. Für die Grenzschichthöhenberechnung sind vor allem Wärme Flüsse, mechanische Schubspannungsgeschwindigkeiten und Stabilitätsfunktionen von entscheidender Bedeutung. Wie schon in Kapitel 5.1 dargestellt, ist die Mischungsschichthöhe nicht wesentlich für unterschiedliche bodennahe Schadstoffkonzentrationen. Auch die Winde am Boden sind zwischen TRAMPER und COSMO-EU sehr ähnlich. Die Strahlungsbilanz am Boden ist zwischen TRAMPER und COSMO-EU sehr ähnlich (nicht gezeigt). Auch die Temperaturen am Boden sind vergleichbar (siehe Abbildung 4). Bleiben also die Schubspannungsgeschwindigkeit und die Stabilitätsfunktionen, die über die Monin-Obukhov-Länge beschrieben werden.

5.2.2: Schubspannungsgeschwindigkeit

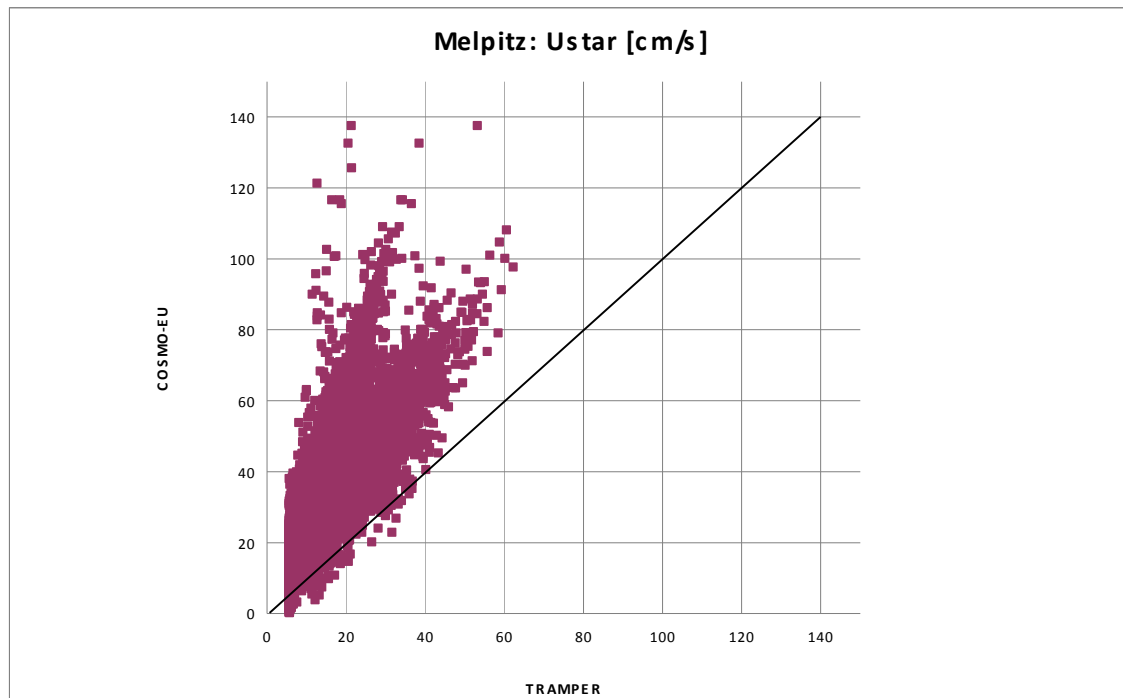


Abbildung 63 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Schubspannungsgeschwindigkeiten für den Standort Melpitz (cm/s)

Abbildung 63 zeigt den Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen Schubspannungsgeschwindigkeiten für Melpitz, berechnet mit TRAMPER (x-Achse) und berechnet mit COSMO-EU (y-Achse). Es wird sofort deutlich, dass alle TRAMPER-Stundenwerte deutlich unter denen von COSMO-EU liegen. Dies wurde auch schon in der ausführlichen Diskussion in Kapitel 3.1.6 gezeigt.

5.2.3: Monin-Obukhov-Länge

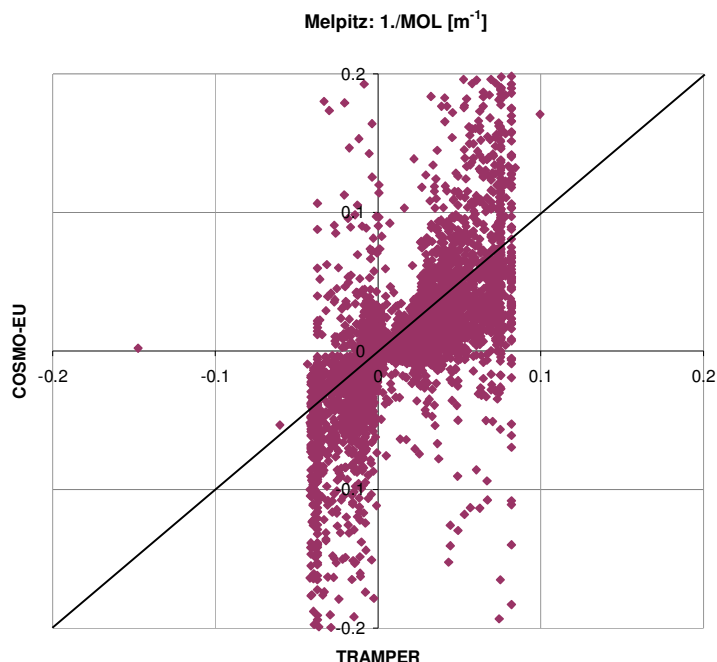


Abbildung 64 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) inversen Monin-Obukhov-Längen für den Standort Melpitz (m^{-1})

Betrachtet man sich auch die Monin-Obukhov-Längen aus den zwei meteorologischen Treibern, so ist eine Interpretation etwas schwieriger als bei der Schubspannungsgeschwindigkeit. Was aber deutlich wird, ist dass beide Modelle zumindest zu 80% der Stunden in Melpitz die Atmosphäre als stabil (positive Werte) oder labil (negative Werte) darstellen (siehe Abbildung 64). Die Fälle, dass COSMO-EU die Atmosphäre als stabil (positive Werte) und TRAMPER die Atmosphäre als instabil (negative Werte) klassifiziert, treten ungefähr gleich häufig auf wie umgekehrt. Neutrale Atmosphärensichtung ($1/(\text{Monin-Obukhov-Länge}) \rightarrow 0$ oder $(\text{Monin-Obukhov-Länge} \rightarrow \pm \infty)$) treten bei COSMO-EU häufiger auf als bei TRAMPER. Dennoch ist eine genaue Interpretation des Einflusses der Monin-Obukhov-Länge auf die Schadstoffkonzentrationen am Boden äußerst schwierig. Das Vorzeichen beschreibt innerhalb vom chemischen Transportmodell RCG jedoch die Stabilität der Atmosphäre und somit auch die Parametrisierung, die für die trockene Deposition Verwendung findet. Der absolute Wert hingegen ist zweitrangig. Wie schon angedeutet, ist die Übereinstimmung des Vorzeichens zwischen Monin-Obukhov-Längen aus COSMO-EU und aus TRAMPER häufig vorhanden.

5.2.4: Diffusionskoeffizient zwischen 1. und 2. RCG-Schicht

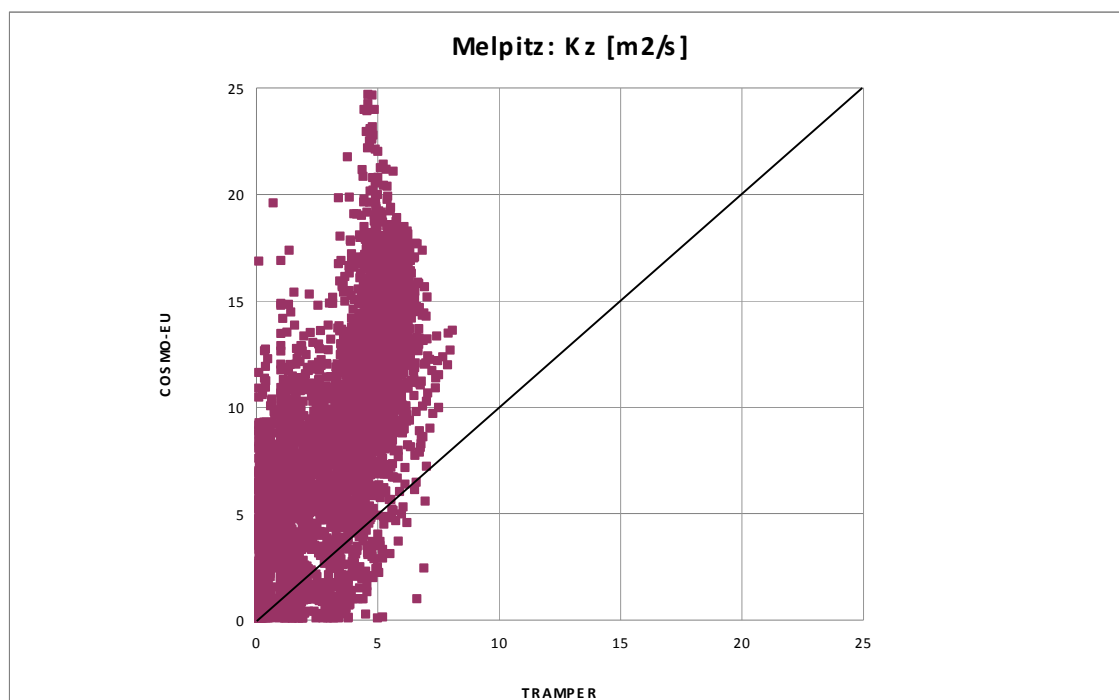


Abbildung 65 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Diffusionskoeffizienten zwischen erster und zweiter RCG-Vertikalschicht für den Standort Melpitz (m^2/s)

Abbildung 65 zeigt den vertikalen Diffusionskoeffizienten zwischen erster und zweiter RCG-Modellschicht in Melpitz als abgeleitete Größe zum einem aus dem TRAMPER-System (x-Achse), zum anderen aus dem COSMO-EU-Modell. Diese Größe wird über die Schubspannungsgeschwindigkeit und über die Stabilität der Atmosphäre parametrisiert. Es zeigt sich deutlich, dass vor allem Werte über $5 \text{ m}^2/\text{s}$ mit COSMO-EU deutlich höher berechnet werden als mit TRAMPER. Das Zusammenspiel zwischen stabilerer Atmosphäre und sehr viel niedrigerer Schubspannungsgeschwindigkeiten in TRAMPER führt zu einem sehr viel niedrigeren Austauschkoefizienten in Bodennähe, wenn TRAMPER-Felder als Antriebsfelder für RCG verwendet werden. Dies wird vor allem bei primären Schadstoffkonzentrationen in der Luft deutlich. Wie in Kapitel 4.2 und in Kapitel 4.4 bereits besprochen, zeigen sich deutlich höhere NO_2 bzw. EC – Konzentrationen vor allem in emissionsstarken Regionen, wenn die Modellvariante RCG-TRAMPER verwendet wird. RCG-COSMO-EU hingegen verteilt die Schadstoffe sehr viel schneller in der Luft als RCG-TRAMPER. Dies wurde vor allem in der Betrachtung der Seesalze über den Meeren deutlich (vergleiche Kapitel 4.3). Obwohl COSMO-EU deutlich höhere Winde über den Meeren simulierte als TRAMPER und dementsprechend RCG-COSMO-EU mehr Seesaltzmissionen über der Nord- und über der Ostsee produzierte, waren die Seesaltzkonzentrationen geringer als bei RCG-TRAMPER.

5.2.5: Depositionsgeschwindigkeiten

Auch die trockenen Depositionsgeschwindigkeiten hängen zu einem großen Teil von atmosphärischen Parametern ab. Für Gase wird ein so genannter Widerstandsansatz verwendet, bei dem wie beim Ohm'schen Gesetz in der Elektrodynamik die einzelnen Widerstände der Luftkonzentrationen von der Atmosphäre zum Rezeptor am Boden addiert werden. Bei Gasen sind dies aerodynamische Widerstände, die ausschließlich von der atmosphärischen Stabilität und von der mechanischen Turbulenz abhängen, laminare Widerstände, die vor allem von der Molekularbewegung in Pflanzen- bzw. Bodennähe abhängen und Rezeptorwiderstände, die bei Pflanzen vor allem von den Stomata abhängen und somit von der Pflanzentemperatur, Phenologie, Physiologie usw., oder über Böden und über Gewässern von der Beschaffenheit der Unterfläche. Nur die aerodynamischen Widerstände sind unabhängig von den Luftschadstoffen, die beiden anderen Widerstände hängen sehr stark von der Spezies ab. Aerosoldepositionen werden vor allem über die aerodynamischen Widerstände geleitet.

5.2.5.1: Ozon

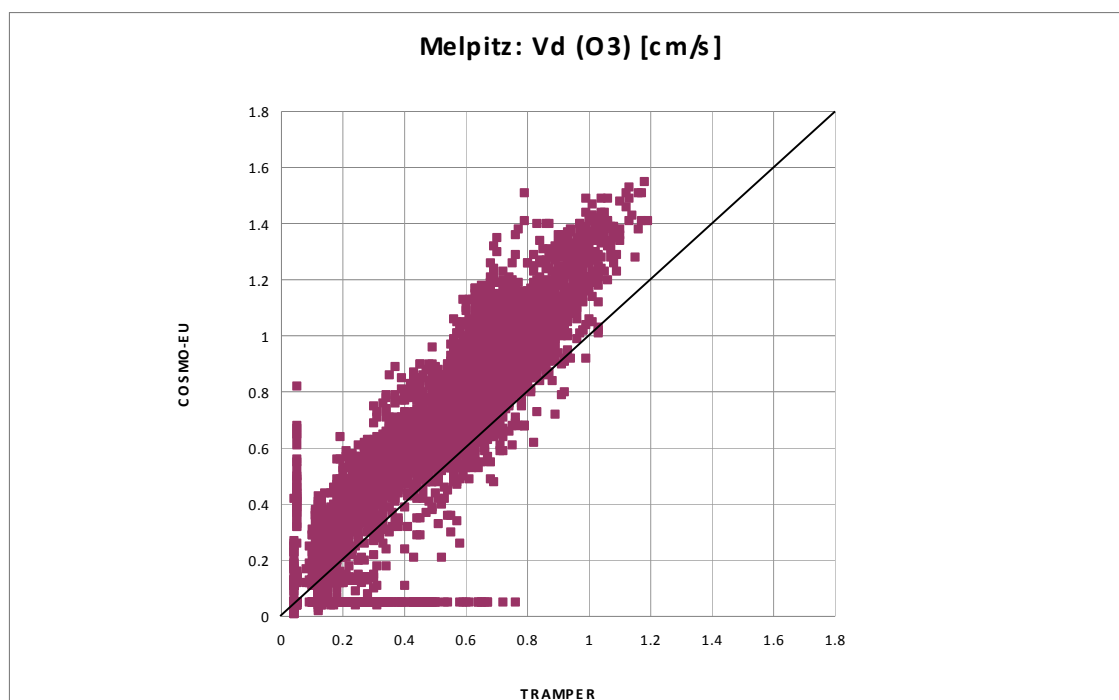


Abbildung 66 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Depositionsgeschwindigkeiten für Ozon für den Standort Melpitz (cm/s)

Abbildung 66 zeigt den Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen trockenen Depositionsgeschwindigkeiten für Ozon über dem Untergrund in Melpitz, berechnet zum einen mit den Eingangsparametern aus TRAMPER (x-Achse), zum anderen aus COSMO-EU (y-Achse). Die Ozonaufnahme hängt sehr stark vom Untergrund ab. Vor allem Pflanzen nehmen Ozon auf. Wie deutlich zu erkennen ist, wird bei Ozon die Depositionsgeschwindigkeit kaum vom benutzten meteorologischen Treiber beeinflusst. Anders ausgedrückt, sind die Stomata-Widerstände und die laminaren Widerstände sehr viel wichtiger als die aerodynamischen Widerstände. Bei sehr hohen Depositionsgeschwindigkeiten lässt sich jedoch eine Tendenz zu höheren Geschwindigkeiten mit COSMO-EU gegenüber mit TRAMPER feststellen.

5.2.5.2: NO₂

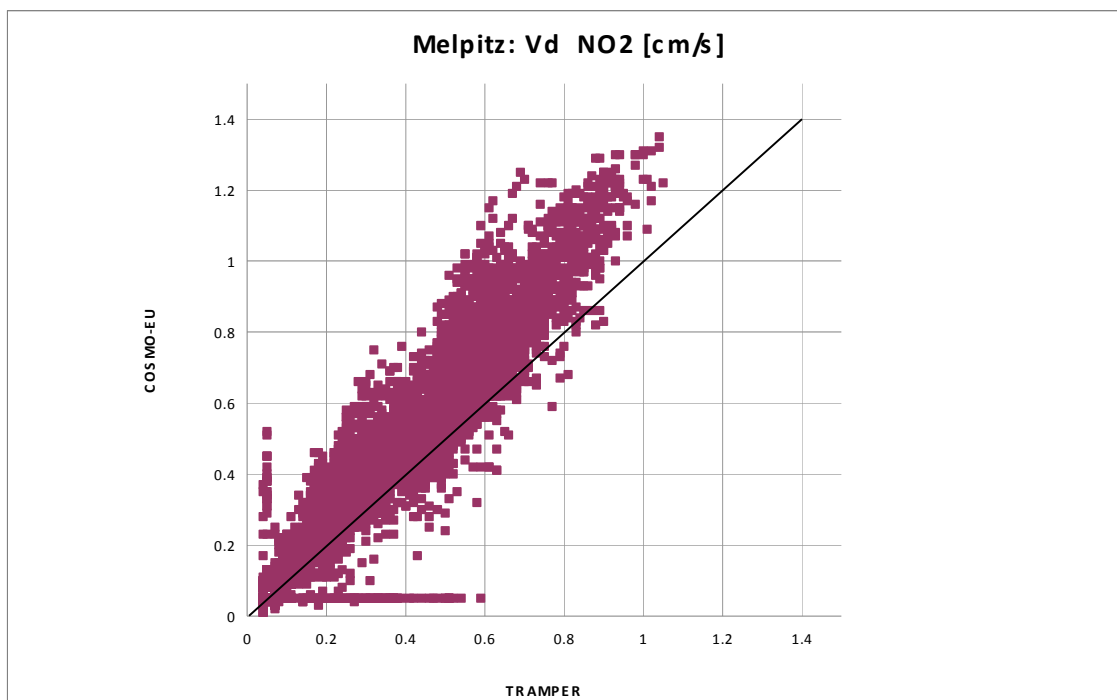


Abbildung 67 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Depositionsgeschwindigkeiten für NO₂ für den Standort Melpitz (cm/s)

Betrachtet man sich die Depositionsgeschwindigkeiten von NO₂, so lässt sich das gleiche wie schon bei den Depositionsgeschwindigkeiten von Ozon beobachten (Abbildung 67). Auch die Aufnahme von NO₂ am Boden bzw. in der Pflanze ist stärker vom Untergrund als von der atmosphärischen Situation abhängig. Da die Landnutzungsdatenbasis in beiden RCG-Varianten die gleiche war, sind die geringen Unterschiede in den Depositionsgeschwindigkeiten für Melpitz für NO₂ ausschließlich atmosphärischer Natur. Diese, wie schon für Ozon bemerkt, sind zweitrangig für NO₂-Depositionsgeschwindigkeiten. Auch andere meteorologische Faktoren, wie beispielsweise die Bodentemperatur, die wichtig ist für die Stomata-Öffnung, oder die Nässe, die wiederum wichtig ist für die Aufnahme oder Nicht-Aufnahme von Ozon, scheinen vernachlässigbar zu sein.

5.2.5.3: Partikel

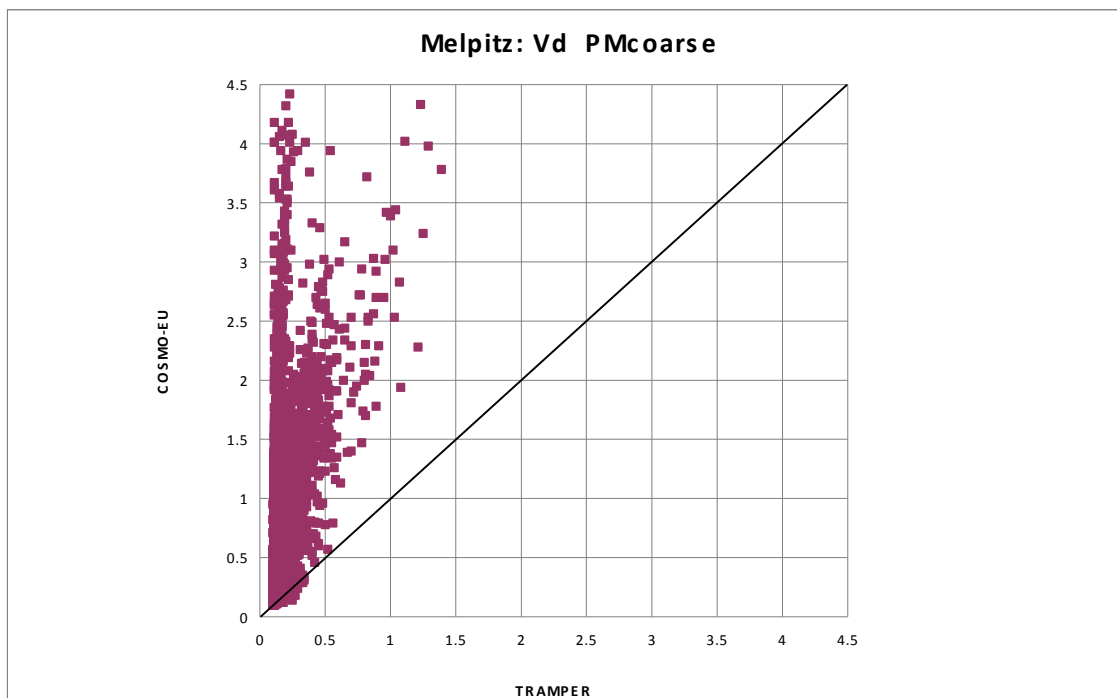


Abbildung 68 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Depositionsgeschwindigkeiten für grobe PM10-Teilchen für den Standort Melpitz (cm/s)

Abbildung 68 zeigt die unterschiedlichen Depositionsgeschwindigkeiten für grobe Aerosolpartikel, zum einen berechnet mit TRAMPER (x-Achse) und zum anderen mit COSMO-EU (y-Achse). Da die trockene Deposition der Aerosole fast ausschließlich von atmosphärischen Widerständen abhängt, wird hier der Einfluss der unterschiedlichen meteorologischen Treiber sehr deutlich. Die mit COSMO-EU-Feldern berechneten Depositionsgeschwindigkeiten sind extrem viel höher als die mit TRAMPER-Feldern. Da die aerodynamischen Widerstände stark von der Schubspannungsgeschwindigkeit, und somit von der mechanischen Turbulenz, abhängen, sind die Unterschiede aufgrund der unterschiedlichen Meteorologie zumindest in der gleichen Größenordnung wie die Unterschiede in den Schubspannungsgeschwindigkeiten über der nord- und ostdeutschen Tiefebene (vergleiche Kapitel 3.1.6). Häufig waren die Schubspannungsgeschwindigkeiten bei COSMO-EU um den Faktor 3 höher als bei TRAMPER. Die Aerosol-Depositionsgeschwindigkeiten sind sogar noch deutlich höher, werden sie von COSMO-EU-Feldern abgeleitet. Dies erklärt natürlich auch die viel niedrigeren PM10-Konzentrationen, vor allem in Ballungsgebieten, in denen kurzlebige primäre Partikel auch wieder schnell zum Boden deponiert werden. Sekundärpartikel werden weiter transportiert, und sind weit weniger abhängig von den enorm hohen Depositionsgeschwindigkeiten als die primären Partikel.

5.2.6: Regen

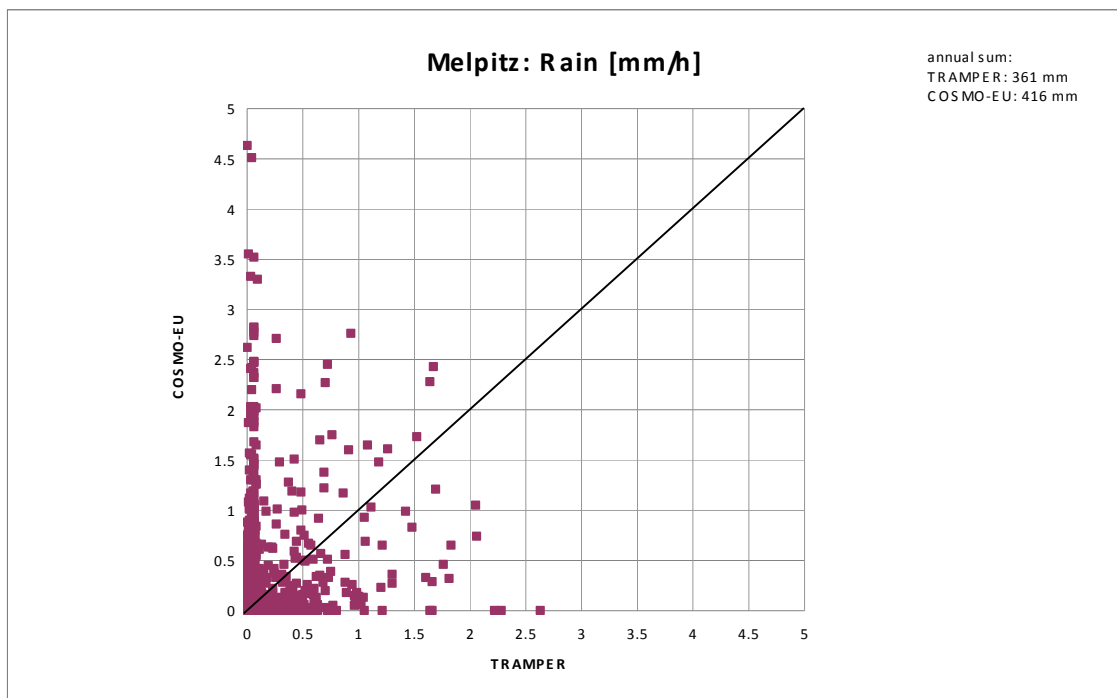


Abbildung 69 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Regenintensitäten für den Standort Melpitz (mm/h)

Abbildung 69 zeigt einen Punkt-zu-Punkt-Vergleich der simulierten Niederschäge an der Messstation Melpitz. TRAMPER simuliert in der Jahressumme 361 l/m², während COSMO-EU 416 l/m² liefert. Diese beiden Werte sind vergleichbar. Jedoch fällt bei COSMO-EU sehr viel mehr Regen in sehr viel kürzeren Zeitintervallen als bei TRAMPER. Nasse Deposition hat einen großen Einfluss auf die Gesamtbilanz der in der Luft sich befindenden Schadstoffe. Die einzelnen Spezies werden dabei unterschiedlich ausgewaschen, was von der Hygrophilie der Stoffe abhängt.

5.3: Nasse Deposition

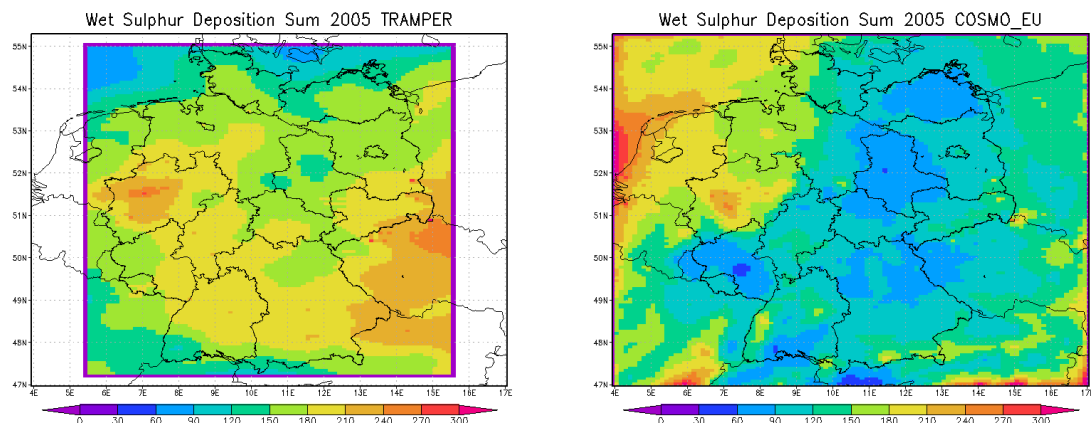


Abbildung 70 Schwefel- Jahresnassdepositionen [mg-S-/m²] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)

Abbildung 70 zeigt die in der Jahressumme ausgewaschenen Gesamtschwefelmengen, einmal mit dem RCG-TRAMPER-System (links) und zum anderen mit dem RCG-COSOM-EU-System (rechts). In beiden Modellversionen zeigen sich über Land ähnliche räumliche Muster, was auf die ähnliche räumliche Verteilung des Niederschlages über Land zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 7). Über Wasser wird mit RCG-COSMO-EU deutlich mehr ausgewaschen als mit RCG-TRAMPER. (siehe Abbildung 71).

Wet Sulphur Deposition Sum 2005 (COSMO_EU - TRAMPER) [%]

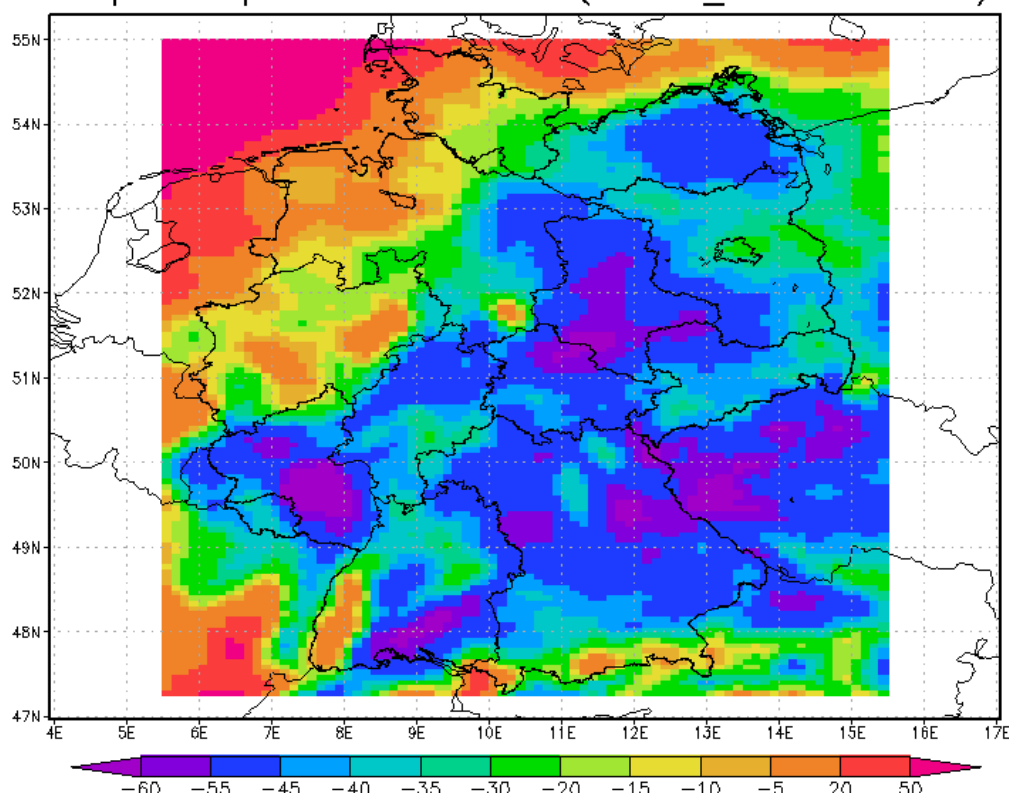


Abbildung 71 Prozentuale Änderung der Schwefel-Jahresnassdepositionen aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber

Betrachtet man sich jedoch die prozentualen Änderungen der ausgewaschenen Schwefelschadstoffe, so wird klar, dass die größten Unterschiede über Land über den Bergen liegen. Dort sind die beiden Modelle am ungleichsten.

Die räumliche Umverteilung der Luftschadstoffe über die Wolken und über die Niederschläge hat natürlich auch eine Auswirkung auf die Luftchemie: Da die einzelnen Spezies mehr oder weniger von feuchten Umgebungen aufgenommen bzw. deponiert werden, kann dies zu einer geänderten Massenbilanz führen, die wiederum zu sehr unterschiedlichen Auf- oder Abbauprozessen sekundärer Stoffe führen kann.

6. Zusammenfassung

Es wurden zwei unterschiedliche meteorologische Datensätze erstellt, mit denen das chemische Transportmodell RCG betrieben worden ist. Es wurden TRAMPER-Analysen, die auf einem isentropen Vertikalsystem in einer räumlichen Auflösung von $15 \times 15 \text{ km}^2$ vorlagen, auf ein ca. $7 \times 8 \text{ km}^2$ - Raster heruntergerechnet und auf boden-folgende Vertikalflächen interpoliert. Die vertikale Ausdehnung lag dabei bei 4000 Metern.

Der zweite Datensatz wurde aus den Analysen des DWD-Modells COSMO-EU erstellt. Diese Daten liegen auf einem gedrehten Längen/Breiten-Gitter vor, das seinen Äquator durch Deutschland laufen lässt, um somit annähernd gleich bleibende metrische Distanzen zu bekommen. Die ursprünglichen Vertikalkoordinaten bei COSMO-EU sind Sigma-Flächen. Die COSMO-EU-Daten wurden auf das gleiche TRAMPER-Gitter interpoliert, sowohl in der Horizontalen als auch in der Vertikalen.

Für die Grenzschichtbeschreibung mussten bei COSMO-EU die Schubspannungsgeschwindigkeit, die Monin-Obukhov-Länge und die Mischungsschichthöhe nachgerechnet werden. Es wurde beschlossen, dass die Grenzschichthöhen nach zwei unterschiedlichen Ansätzen nachgerechnet werden sollte: zum einen nach einem Ansatz nach Fay et al. (1997), zum anderen nach einem Ansatz, beschrieben in Batchvarova-Gryning (1994). Dieser letztere Ansatz ist dem in TRAMPER verwendeten sehr ähnlich.

Die meteorologischen Felder unterschieden sich vor allem in den grenzschichtrelevanten Parametern:

- Schubspannungsgeschwindigkeiten aus COSMO-EU sind im Durchschnitt mindestens doppelt so hoch wie bei TRAMPER,
- nächtliche Grenzschichthöhen in COSMO-EU, nachgerechnet mit dem Ansatz von Fay et al. (1997) sind konstant bei über 300 m,
- windstille Situationen werden bei COSMO-EU über Land deutlich seltener simuliert als bei TRAMPER,
- die Windgeschwindigkeiten über den Meeren werden mit TRAMPER sehr viel niedriger simuliert,
- die Niederschlagssummen über den Meeren sind bei TRAMPER sehr gering.

Die Ergebnisse der RCG-Rechnungen für Ozon, NO_2 und PM_{10} haben gezeigt, dass RCG mit TRAMPER die absoluten Messwerte vor allem an NO_2 und PM_{10} sehr viel genauer simuliert als RCG mit COSMO-EU. Vor allem über emissionsreichen Gebieten werden mit COSMO-EU Spitzenwerte sehr stark unterschätzt. Auffallend ist jedoch auch, dass das Modellsystem RCG-TRAMPER Gesamt- PM_{10} häufig überschätzt. Auch sind die Korrelationskoeffizienten für fast alle Schadstoffe geringer bei RCG-TRAMPER als bei RCG-COSMO-EU. Dies lässt darauf schließen, dass RCG-COSMO-EU die relevanten Transport- und Chemieprozesse gut erfasst. RCG-TRAMPER simuliert vor allem bei sekundären anorganischen Aerosolen teilweise sehr hohe Werte, die sich in den Messungen nicht wieder finden. Diese Ausreißer sind zum Teil für die schlechteren Korrelationskoeffizienten verantwortlich.

Sensitivitätsstudien haben gezeigt, dass die Höhe der Mischungsschicht nicht hauptverantwortlich für die sehr unterschiedlichen Schadstoffsimulationen sein kann. Es wird davon ausgegangen, dass die Schubspannungsgeschwindigkeiten, die teilweise 2 Größenordnungen zwischen TRAMPER und COSMO-EU auseinander liegen, den wesentlichen Beitrag zu den Konzentrationsunterschieden liefern.

7. Bibliographie

- Batchvarova, E., S.-E. Gryning** (1994). "An applied model for the height of the daytime mixed layer and the entrainment zone". *Boundary-Layer Meteorol.* 71, 311-323.
- Blackadar, A. K., and H. Tennekes** (1968). "Asymptotic similarity in neutral barotropic planetary boundary layers". *J. Atmos. Sci.*, 25, 1015-1020.
- Bleck, R.** (1975). "An economical approach to the use of wind data in the optimum interpolation of Geo- and Montgomery potential fields". *Mon. Wea. Rev.*, 103, 807-816.
- Builtjes, P., W. Jörß, W., R. Stern, J. Theloke** (2010) Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung . PAREST-Endbericht, Schlussbericht an das Umweltbundesamt zum Forschungsvorhabens FKZ 206 43 200/01
- Carson, D. J.** (1973). "The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer". *Quart. J. R. Met. Soc.*, 99, 450-467.
- Cressman, G. P.** (1959). "An operational objective analysis system". *Mon. Wea. Rev.*, 87, 37-374.
- Fay, B., R. Schrodin, I. Jacobsen, and D. Engelbart** (1997). "Validation of Mixing Heights Derived from the Operational NWP Models at the German Weather Service", in S.-E. Gryning (ed.), *EURASAP Workshop Proceedings on the Determination of the Mixing Height – Current Progress and Problems*, Riso-R-997 (EN), pp. 55-58.
- Gandin, L. S.** (1963). "Objective Analysis of Meteorological Fields". *Gidrometeorol. Izda.*, Leningrad (Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1965)
- Gryning, S.-E. and E. Batchvarova** (1994). "Parametrization of the Depth of the Entrainment Zone above the Daytime Mixed Layer". *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 120, 47-58.
- Hanna, S. R. and R. J. Paine** (1989). "Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) Development and Evaluation". *J. Appl. Met.*, 28, 206-224.
- Hanna, S. R., L. L. Schulman, R. J. Paine, J. E. Pleim and M. Baer** (1985). "Development and Evaluation of the Offshore and Coastal Dispersion Model". *J. Air Poll. Control Assoc.*, 35, 1039-1047.
- Holtslag, A. A. M. and A. P. van Ulden** (1983). "A simple scheme for daytime estimates of surface fluxes from routine weather data". *J. Cli. Appl. Meteorol.*, 22, 517-529.
- Mellor G.L. and Yamada T.** (1974). "A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers". *J. Atm. Sci.* 31, 1791-1806.
- Paulson, C. A.** (1970). "The Mathematical Representation of Wind Speed and Temperature Profiles in the Unstable Atmospheric-Surface Layer", *J. Appl. Meteorol.*, 9, 857-861.
- Reimer, E.** (1986). "Analysis of ALPEX Data". Workshop on High Resolution Analysis, ECMWF, Reading, UK, June 24-26 1985, p. 155-186.
- Reimer, E. and B. Scherer** (1992). „An operational meteorological diagnostic system for regional air pollution analysis and long term modeling”, in *Air Pollution Modelling and its Application IX*, eds. H. v. Dop and G. Kallos, NATO Challenges of Modern Society, Kluwer Academic/Plenum Publisher, New York.
- Schrodin R.** (1995). "Bestimmung der Grenzschichthöhe in einem Gitterpunktmodell". Description of MH scheme.
- Stern, R., P. Builtjes, M. Schaap, R. Timmermans, R. Vautard, A. Hodzic, M. Memmesheimer, H. Feldmann, E. Renner, R. Wolke, A. Kerschbaumer** (2008). "A model inter-comparison study focussing on episodes with elevated PM10 concentrations", *Atmospheric Environment*, 42, 19, 4567-4588.
- Stull R.B.** (1988). "An introduction to boundary layer meteorology". Kluwer Academic Publishers.
- Venkatram, A.** (1980). "Estimating the Monin-Obukhov Length in the Stable Boundary Layer for Dispersion Calculations". *Boundary-Layer Meteorol.*, 19, 481-485.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Untersuchungsgebiet mit benutzten Benennungen.	9
Abbildung 2. Temperaturdifferenz für das Jahresmittel 2005 in Kelvin zwischen TRAMPER und COSMO-EU	10
Abbildung 3 Absolute Jahresmitteltemperatur in Kelvin, simuliert von COSMO-EU (links) und von TRAMPER (rechts).....	11
Abbildung 4 Tagesmitteltemperaturen, simuliert mit TRAMPER (Punkte) und mit COSMO- EU (Quadrate) für das gesamte Untersuchungsgebiet (oben links), für die Alpen (oben rechts), für die Mittelgebirge (unten links) und für die Ostsee (unten rechts).	11
Abbildung 5 Differenz der mittleren Bodenwindstärken 2005 in m/s zwischen TRAMPER und COSMO-EU	12
Abbildung 6 Tagesmittelwindstärken, simuliert mit TRAMPER (Punkte) und mit COSMO- EU (Quadrate) für die Alpen (oben links), für die Ostsee (oben rechts), für die norddeutsche Tiefebene (unten links) und für die Mittelgebirge (unten rechts).	13
Abbildung 7 Jahresniederschlagsmengen in l/m ² , simuliert mit COSMO-EU (links) und mit TRAMPER (rechts).....	14
Abbildung 8 Jahresmittelwert der Gesamtbedeckung (in Zehntel Grad), simuliert mit COSMO-EU (links) und mit TRAMPER (rechts)	14
Abbildung 9 vertikales Temperaturprofil [in Kelvin] am Standort Lindenberg, simuliert mit COSMO-EU (links) und mit TRAMPER (rechts)	15
Abbildung 10 vertikales Windprofil [in m/s] am Standort Lindenberg, simuliert mit COSMO- EU (links) und mit TRAMPER (rechts).....	16
Abbildung 11 Tagesmittelwerte der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über das gesamte Untersuchungsgebiet, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate).....	16
Abbildung 12 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über den Alpen, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate).....	17
Abbildung 13 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über den Mittelgebirgen, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate).....	18
Abbildung 14 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Schubspannungsgeschwindigkeit, räumlich gemittelt über der Nordsee, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate).....	19
Abbildung 15 Tagesmittelwerte der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über das gesamte Untersuchungsgebiet, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO- EU (Quadrate) nach Fay.....	20
Abbildung 16 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über den Alpen, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay.....	21
Abbildung 17 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über den Mittelgebirgen, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay.	22
Abbildung 18 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und	

7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der nordostdeutschen Tiefebene, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay.....	23
Abbildung 19 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der Nordsee, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay	24
Abbildung 20 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der Ostsee, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Fay.....	25
Abbildung 21 Tagesmittelwerte der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über das gesamte Untersuchungsgebiet, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning.....	26
Abbildung 22 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der nordostdeutschen Tiefebene, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning.....	27
Abbildung 23 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der Ostsee, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning..	28
Abbildung 24 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über der Nordsee, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning.....	29
Abbildung 25 Tagesmittelwerte (oben), Mittelwerte nur für die Tagesstunden zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (unten links) und Mittelwerte für die Nachtstunden zwischen (21:00 und 7:00 Uhr) der Mischungsschichthöhen, räumlich gemittelt über den Alpen, simuliert mit TRAMPER (Rhomben) und mit COSMO-EU (Quadrate) nach Batchvarova-Gryning..	30
Abbildung 26 Ozon-Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)	31
Abbildung 27 Prozentuale Änderung der Ozonjahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber	32
Abbildung 28 Vergleich der mittleren maximalen 8 Stunden Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Waldhof (links) und am Messort Neuglobsow (rechts).	32
Abbildung 29 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) Ozon-Jahresmittelwerten, unterteilt in städtisch/industriell belastete Gebiete (rote Dreiecke), städtische Hintergrundgebiete (blaue Quadrate) und ländliche Hintergrundgebiete (graue Rhomben) für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).	33
Abbildung 30 Korrelationskoeffizienten für Tagesmittelwerte für RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU.....	33
Abbildung 31: Prozentuale Abweichungen vom gemessenen Jahresmittelwert für RCG-TRAMPER und für RCG-COSMO_EU	33
Abbildung 32 NO_2 -Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)	34

Abbildung 33 Absolute Änderung der NO ₂ -Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber	34
Abbildung 34 Vergleich der mittleren Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Neuglobsow (links) und am Messort Duisburg-Bruckhausen (rechts).	35
Abbildung 35 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) NO ₂ -Jahresmittelwerten, unterteilt in städtisch/industriell belastete Gebiete (rote Dreiecke), städtische Hintergrundgebiete (blaue Quadrate) und ländliche Hintergrundgebiete (graue Rhomben) für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).	35
Abbildung 36 Korrelationskoeffizienten für Tagesmittelwerte für RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU	36
Abbildung 37 Prozentuale Abweichungen vom gemessenen Jahresmittelwert für RCG-TRAMPER und für RCG-COSMO_EU	36
Abbildung 38 Varianz (in µg/m ³) der NO ₂ -Werte um den gemessenen (OBS) Mittelwert und um den von den beiden RCG-Konfigurationen mit TRAMPER und mit COSMO-EU durchgeführten simulierten Mittelpunkt für die genannten Messpunkte	36
Abbildung 39 Mittlerer quadratischer Fehler (in µg/m ³) zwischen Beobachtungen und Simulationen, durchgeführt mit RCG-TRAMPER (TRAMPER) und mit RCG-COSMO_EU (COSMO_EU) an den genannten Messpunkten	36
Abbildung 40 PM10- Jahresmittelwert [µg/m ³] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)	38
Abbildung 41 Absolute Änderung der PM10-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber	39
Abbildung 42 Absolute (links) und prozentuale (rechts) Änderung der PM2.5-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber	39
Abbildung 43 Vergleich der mittleren PM10-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Neuglobsow (links) und am Messort Duisburg-Bruckhausen (rechts).	40
Abbildung 44 Vergleich der mittleren Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Melpitz für PM10 (links) und PM2.5 (rechts).	40
Abbildung 45: Korrelationskoeffizienten für PM10-gesamt und für PM2.5 für RCG-TRAMPER und für RCG-COSMO_EU	41
Abbildung 46: Prozentuale Abweichung für PM10-gesamt und für PM2.5 zwischen Beobachtungen und RCG-TRAMPER und RCG-COSMO_EU	41
Abbildung 47 Varianz (in µg/m ³) der PM10-Werte um den gemessenen (OBS) Mittelwert und um den von den beiden RCG-Konfigurationen mit TRAMPER und mit COSMO-EU durchgeführten simulierten Mittelpunkt für die genannten Messpunkte	41
Abbildung 48 Mittlerer quadratischer Fehler (in µg/m ³) zwischen Beobachtungen und Simulationen, durchgeführt mit RCG-TRAMPER (TRAMPER) und mit RCG-COSMO_EU (COSMO_EU) an den genannten Messpunkten	42
Abbildung 49: Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) PM10-Jahresmittelwerten, unterteilt in städtisch/industriell belastete Gebiete (rote Dreiecke), städtische Hintergrundgebiete (blaue Quadrate) und ländliche Hintergrundgebiete (graue Rhomben) für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).	42
Abbildung 50 EC- Jahresmittelwert [µg/m ³] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)	43
Abbildung 51 Absolute Änderung der EC-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber	44

Abbildung 52 Vergleich der mittleren PM10-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Melpitz	44
Abbildung 53 Sulfat- Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts)	45
Abbildung 54 Prozentuale Änderung der Sulfat-Jahresmittelwerte aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber	45
Abbildung 55 Vergleich der mittleren Sulfat-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Deuselbach (links) und Melpitz (rechts)	46
Abbildung 56 Vergleich der mittleren Nitrat-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-TRAMPER (rote Linie) und RCG-COSMO-EU (grüne Linie) am Messort Deuselbach (links) und Melpitz (rechts)	46
Abbildung 57 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen beobachteten (x-Achse) und simulierten (y-Achse) Sulfat- (oben)- und Nitrat (unten)-Tagesmittelwerten, für RCG-TRAMPER (links) und RCG-COSMO-EU (rechts).....	47
Abbildung 58: Vergleich der mittleren O_3 -Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $7 \times 8 \text{ km}^2$) (grüne Linie), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (blaue Linie) und RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Barbara Fay, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (rote Linie) am Messort Berlin-Nansenstraße. (x-Achse: Julianischer Tag 2005, y-Achse: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	48
Abbildung 59: Vergleich der mittleren NO_2 -Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $7 \times 8 \text{ km}^2$) (grüne Linie), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (blaue Linie) und RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Barbara Fay, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (rote Linie) am Messort Berlin-Nansenstraße (x-Achse: Julianischer Tag 2005, y-Achse: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).	49
Abbildung 60: Vergleich der mittleren PM10-Tageswerte zwischen Beobachtungen (graue Balken), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $7 \times 8 \text{ km}^2$) (grüne Linie), RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Batchvarova-Gryning, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (blaue Linie) und RCG-COSMO-EU (Mischungsschicht nach Barbara Fay, Auflösung $15 \times 15 \text{ km}^2$) (rote Linie) am Messort Berlin-Nansenstraße (x-Achse: Julianischer Tag 2005, y-Achse: $\mu\text{g}/\text{m}^3$).	50
Abbildung 61 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Bodenwindgeschwindigkeiten (links) und Bodenwindrichtungen (rechts) für Melpitz (m/s).....	51
Abbildung 62 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Mischungsschichthöhen für den Standort Melpitz ($\text{m} \cdot 10$).....	52
Abbildung 63 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Schubspannungsgeschwindigkeiten für den Standort Melpitz (cm/s).....	53
Abbildung 64 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) inversen Monin-Obukhov-Längen für den Standort Melpitz (m^{-1}).....	54
Abbildung 65 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Diffusionskoeffizienten zwischen erster und zweiter RCG-Vertikalschicht für den Standort Melpitz (m^2/s).....	55

Abbildung 66 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Depositionsgeschwindigkeiten für Ozon für den Standort Melpitz (cm/s).....	56
Abbildung 67 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Depositionsgeschwindigkeiten für NO ₂ für den Standort Melpitz (cm/s).....	57
Abbildung 68 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Depositionsgeschwindigkeiten für grobe PM10-Teilchen für den Standort Melpitz (cm/s)	58
Abbildung 69 Punkt-zu-Punkt-Vergleich zwischen mit TRAMPER simulierten (x-Achse) und mit COSMO-EU-simulierten (y-Achse) Regenintensitäten für den Standort Melpitz (mm/h).....	59
Abbildung 70 Schwefel- Jahresnassdepositionen [mg-S-/m ²] 2005, berechnet mit RCG-TRAMPER (links) und mit RCG-COSMO_EU (rechts).....	59
Abbildung 71 Prozentuale Änderung der Schwefel-Jahresnassdepositionen aufgrund unterschiedlicher meteorologischer Treiber.....	60