

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät
Institut für Geographie

Modul GEO 390 Bachelor-Arbeit
Prüfer: Prof. Dr. Christiane Schmullius
Sommersemester 2008

**Raum-zeitliche Analyse
atmosphärischen Kohlenstoffs in Sibirien
mit ENVISAT-SCIAMACHY-Daten**

Bachelor-Arbeit

vorgelegt von:

Matthias Forkel

Studiengang: B. Sc. Geographie

6. Fachsemester

Matrikel-Nr.: 81792

Stifterstr. 19 D

07743 Jena

matthias.forkel@uni-jena.de

Jena, 28. Juli 2008

Inhalt	
Abbildungen	2
Tabellen	3
Abkürzungen	4
Danksagung	5
1 Einleitung	6
2 Biogeochemie des atmosphärischen Kohlenstoffs	7
2.1 Quellen und Senken des Kohlenstoffdioxids, -monoxids und Methans	7
2.2 Ökosysteme Sibiriens als Kohlenstoffsinken und -quellen	10
3 Fernerkundung atmosphärischer Spurengase mit SCIAMACHY	12
3.1 Inverse Modellierung von Spurengas-Vertikalsäulen mit WFM-DOAS	13
3.2 Gütekriterien und Qualität der XCO ₂ , XCH ₄ und CO-Daten	16
4 Daten und Methoden	18
4.1 Analyse der SCIAMACHY-Daten für Teilregionen	18
4.2 Analyse von Kohlenstoffquellen	19
4.2.1 Waldbrände	20
4.2.2 Feuchtgebiete	21
4.2.3 Anthropogene Regionen	22
5 Ergebnisse und Diskussion	23
5.1 Raum-zeitliche Muster atmosphärischen Kohlenstoffs in Sibirien	23
5.1.1 Kohlenstoffdioxid	23
5.1.2 Methan	28
5.1.3 Kohlenstoffmonoxid	34
5.2 Kohlenstoffquellen	37
5.2.1 Waldbrände	37
5.2.2 Feuchtgebiete	42
5.2.3 Anthropogene Regionen	44
5.3 Kohlenstoffemissionen aus SCIAMACHY und inverse Modellierung	47
6 Zusammenfassung	49
Literatur	52
Anhang	58

Abbildungen

Abb. 1	Atmosphärischer CO ₂ -Anteil an den Beobachtungsorten Mouna Loa (Hawaii) und am Südpol	9
Abb. 2	Beispiel der WFM-DOAS-Anpassung für CO für eine Szene vom 27. Oktober 2003	14
Abb. 3	Karte des Untersuchungsgebiets Sibirien mit Vegetationszonen als Teilregionen	19
Abb. 4	XCO ₂ in Nordeurasien im April und Juni 2003	24
Abb. 5	Zeitreihen des XCO ₂ in verschiedenen Regionen	25
Abb. 6	Mittelwerte des XCO ₂ für 2003, 2004 und 2005 in Nordeurasien	26
Abb. 7	Boxplots für XCO ₂ in den Einzeljahren und für verschiedene Regionen	27
Abb. 8	Mittelwerte des XCO ₂ von 2003 bis 2005 in Nordeurasien	28
Abb. 9	XCH ₄ in Nordeurasien im April, Juni und Juli 2003	29
Abb. 10	Zeitreihen des XCH ₄ in verschiedenen Regionen	30
Abb. 11	Mittelwerte des XCH ₄ für 2003, 2004 und 2005 in Nordeurasien	31
Abb. 12	Boxplots für XCH ₄ in den Einzeljahren und für verschiedene Regionen	33
Abb. 13	Mittelwerte des XCH ₄ von 2003 bis 2005 in Nordeurasien	33
Abb. 14	Zeitreihen des CO in verschiedenen Regionen	34
Abb. 15	Mittelwerte des CO für 2003, 2004 und 2005 in Nordeurasien	35
Abb. 16	Mittelwerte des CO von 2003 bis 2005 in Nordeurasien	36
Abb. 17	Boxplots für CO in den Einzeljahren und für verschiedene Regionen	36
Abb. 18	Zeitreihen des atmosphärischen Kohlenstoffs über verbrannten und unverbrannten Flächen in Sibirien	38
Abb. 19	Mittleres CO und Brandflächen des Jahres 2003 in der Baikalsee-Region	40
Abb. 20	Zeitreihenkorrelation zwischen CO-Verhältnis und der Größe der Brandflächen in Sibirien	40
Abb. 21	Korrelationen zwischen der Größe von Brandflächen bzw. CO-Feuer-Emissionen aus GFED und mittlerem atmosphärischem CO von SCIAMACHY für das Jahr 2003 in der Baikalsee-Region	41
Abb. 22	Feuchtgebiete in Westsibirien und mittleres XCH ₄ von 2003 bis 2005	43
Abb. 23	Zeitreihen des XCH ₄ in Sibirien über Feuchtgebieten	43
Abb. 24	Anthropogene Regionen in Westsibirien und mittleres CO des Jahres 2004	45
Abb. 25	Mittleres CO des Jahres 2004 in der Region Bratsk/Ust-Ilimsk	46

Abb. 26	Anthropogene Regionen im Süden Sibiriens und mittleres XCO ₂ von 2003 bis 2005	46
---------	---	----

Tabellen

Tab. 1	Auswahl von Gütekriterien für die Qualitätsfilterung des mit WFM-DOAS abgeleiteten XCO ₂ und XCH ₄	17
Tab. 2	Übersicht über verwendete Daten	18

Abkürzungen

CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DMSP-OLS	Defence Meteorological Satellite Program Operational Linescan System
ENVISAT	Environmental Satellite
GFED	Global Fire Emissions Database
HRV	High Resolution Visible, Sensor auf SPOT
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Sensor auf Terra
NOAA-AVHRR	National Oceanic and Atmospheric Administration, Advanced Very High Resolution Radiometer, Sensor auf NOAA-Satellit
O ₃	Ozon
OH	Hydroxylradikal
ppb	parts per billion (= 10 ⁻⁹)
ppm	parts per million (= 10 ⁻⁶)
RMS	Root-Mean-Square-Fehler
SCIAMACHY	Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography, Sensor auf ENVISAT
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
TM	Atmosphärisches (chemisches) Transportmodell
VEGETATION	Sensor auf SPOT
WFM-DOAS	Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy, Algorithmus zur Ableitung von XCO ₂ , XCH ₄ und CO
XCH ₄	Abgeleiteter Anteil (Mischungsverhältnis) von CH ₄
XCO ₂	Abgeleiteter Anteil (Mischungsverhältnis) von CO ₂

Danksagung

Ohne die direkte und indirekte Unterstützung einiger Mitmenschen wäre diese Bachelor-Arbeit so nicht möglich gewesen. Daher danke ich ...

... Frau Prof. Dr. Christiane Schmullius, an deren Lehrstuhl für Fernerkundung ich diese Arbeit schreiben durfte, für die Förderung während des Studiums, für die Anregung des Themas und als Gutachterin der Arbeit sowie Herrn Dipl.-Geogr. Roman Gerlach für nützliche Hinweise und für die Bereitstellung und Besorgung von Daten.

... Frau Dr. Kirsten Thonicke (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung) dafür, dass ich während des Praktikums im Frühjahr 2008 bei ihr einen Einblick in die Fernerkundung von Feuern haben und praktische Erfahrungen mit R als Programmierumgebung für die Datenanalyse sammeln konnte.

... Herrn Dr. Michael Buchwitz (Institut für Umweltphysik der Universität Bremen) für die Bereitstellung der SCIAMACHY-Daten und Herrn Dr. Sergey Bartalev (Russian Academy of Sciences, Space Research Institute) für die Bereitstellung der Brandflächen-Daten für Russland.

... Diana Scheler für Hilfestellungen in mathematischen und chemischen Fragen und Thomas Kloß mit Familie für das Korrekturlesen der Arbeit.

... meinen Eltern und Tanti für die familiäre und ideale Unterstützung.

Matthias Forkel, Jena im Juli 2008

1 Einleitung

Die steigende Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre, wie Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) oder Distickstoffmonoxid (N₂O), die aufgrund anthropogener Aktivitäten wie beispielsweise durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Abholzung von Wäldern oder in der Landwirtschaft emittiert werden, ist die Hauptursache des Klimawandels. So nahm der globale Anteil des Kohlenstoffdioxids in der Atmosphäre von 280 ppm in der vorindustriellen Zeit auf 379 ppm im Jahr 2005 und der Anteil des Methans von 715 ppb auf 1774 ppb zu (IPCC 2007:37). Kohlenstoffdioxid nahm im Jahr 2004 einen Anteil von ca. 77 % aller Treibhausgasemissionen ein. Methan hatte einen Anteil von ca. 14 % (IPCC 2007:36). Gleichzeitig stieg die globale Temperatur der Erdoberfläche im Zeitraum von 1956 bis 2005 um 0,13°C pro Jahrzehnt an (IPCC 2007:30). Die Wirkung dieser Treibhausgase beruht auf der Eigenschaft langwellige Thermalstrahlung zu absorbieren, die von der Erdoberfläche ausgestrahlt wird (TAYLOR 2005:14). Emissionen anderer Gase, wie beispielsweise des Kohlenstoffmonoxids (CO), haben bedeutenden Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. So bewirkt Kohlenstoffmonoxid in der Troposphäre einen Aufbau von bodennahem Ozon (O₃), welches als Treibhausgas und Giftstoff wirkt (JAIN & HAYHOE 2003:348).

Seit den 1970er Jahren wird diskutiert, ob die terrestrischen Ökosysteme wie die borealen, tropischen und gemäßigten Wälder zukünftig mehr Kohlenstoff der Atmosphäre durch Photosynthese entziehen oder mehr Kohlenstoff durch Abholzung oder bei Waldbränden emittieren werden (GRACE 2004:191). Von besonderer Bedeutung sind dabei die borealen Wälder der Nordhalbkugel, da diese einerseits 17 % aller Ökosysteme einnehmen und mehr als 30 % des global in der Biomasse gebundenen Kohlenstoffs umfassen (KASISCHKE 2000:19f.). Andererseits werden im Verlauf des Klimawandels in den borealen Wäldern, insbesondere in Sibirien, die global größten Erwärmungen der Erdoberfläche um bis zu 2°C bis zum Jahr 2029 und bis zu 7°C bis zum Jahr 2099 erwartet (IPCC 2007:46). Die Untersuchung der Rolle der borealen Wälder Sibiriens hinsichtlich der Emission von Kohlenstoff oder dessen Speicherung ist damit für das Verständnis des Klimasystems nötig.

Zur Quantifizierung von Kohlenstoffemissionen oder -speichern stehen methodisch In-situ-Messungen, Modellsimulationen oder Verfahren der Fernerkundung zur Verfügung. Das Spektrometer SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography*) (BOVENSMANN et al. 1999), welches auf dem Satelliten ENVISAT (*Environmental Satellite*) geflogen wird, ist der erste Satelliten-

Sensor, der im nahen Infrarot des elektromagnetischen Spektrums CO₂-Absorptionsbänder abdeckt und damit die Erfassung des atmosphärischen CO₂ von einem Satelliten ermöglicht. Neben CO₂ kann er die Anteile verschiedener anderer Gase in der Atmosphäre erfassen (SCHNEISING et al. 2008b:5479f.). Mit einer flächenhaften globalen Abdeckung stellt dies einen Vorteil gegenüber punktuellen und damit spärlichen Bodenmessungen dar.

Ziel dieser Arbeit ist es, die räumliche Verteilung und die zeitliche Dynamik der Anteile des Kohlenstoffdioxids, -monoxids und des Methans in der Atmosphäre in Sibirien mit SCIAMACHY-Daten darzustellen und zu analysieren. Diese sollen dabei auch hinsichtlich der Sensitivität gegenüber regionalen Kohlenstoffquellen (Emissionen) überprüft werden, was nach SCHNEISING et al. (2008b:5507) für SCIAMACHY noch zu bewerten ist. Dazu werden in Anlehnung an BUCHWITZ et al. (2007a) und SCHNEISING et al. (2008a, b) die raum-zeitlichen Anteile (Mischungsverhältnisse) des CO₂, CO und CH₄ sowie ihre Schwankungen zu Siedlungen und darüber hinaus zu regionalen Brandereignissen und Feuchtgebieten in Beziehung gesetzt.

Die Arbeit gliedert sich folgendermaßen: Im zweiten Kapitel wird auf den Kohlenstoffkreislauf, sowie auf Quellen, Speicher und Senken des Kohlenstoffdioxids, -monoxids und des Methans sowie auf die Bedeutung dieser Gase eingegangen. Dabei liegt der Schwerpunkt auch auf Besonderheiten der borealen Zone und Sibiriens, wobei andere Studien zur Quantifizierung von Kohlenstoff in diesem Raum herangezogen werden. Im dritten Kapitel wird in Anlehnung an BUCHWITZ et al. (2007a) und SCHNEISING et al. (2008a, b) erläutert, wie aus den Strahlungsmessungen von SCIAMACHY Spurengas-Anteile abgeleitet werden, welche Gütekriterien an die Ableitungen gestellt werden und welche Qualität diese Daten haben. Weitere Daten und Methoden, die in dieser Arbeit genutzt wurden, werden im vierten Kapitel vorgestellt. Die Ergebnisse dieser Analyse werden im Rückblick auf die Zielstellung im fünften Kapitel dargestellt und diskutiert.

2 Biogeochemie des atmosphärischen Kohlenstoffs

2.1 Quellen und Senken des Kohlenstoffdioxids, -monoxids und Methans

Kohlenstoff als chemisches Element bewegt sich nach dem Konzept der Biogeochemie in einem Kreislauf zwischen Atmosphäre, Landoberfläche, Lithosphäre und Ozean (FRÄNZLE 2001:168). Demnach enthält die Atmosphäre 750 Gt Kohlenstoff, die Landoberfläche ca. 2070 Gt, wovon 1400 Gt in Böden enthalten sind, und die Ozeane enthalten ca. 40000 Gt Kohlenstoff (GRACE 2004:190). Die terrestrischen Ökosysteme

nehmen nach SCHIMEL (1995) 61,4 Gt Kohlenstoff pro Jahr aus der Atmosphäre auf und geben 60 Gt pro Jahr wieder ab. Damit liegt nach SCHIMEL (1995) die Kohlenstoff-Nettoaufnahme der terrestrischen Ökosysteme bei 1,4 Gt pro Jahr. GRACE (2004:190) quantifiziert sie mit $2,3 \pm 1,3 \text{ Gt C a}^{-1}$. Da die terrestrischen Ökosysteme der Atmosphäre also Kohlenstoff entziehen, wirken sie im globalen Kohlenstoffkreislauf als Senken. Durch anthropogene Aktivitäten wie bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe oder der Zementproduktion werden $5,5 \text{ Gt C a}^{-1}$ (SCHIMEL 1995) bzw. $6,3 \text{ Gt C a}^{-1}$ (GRACE 2004:190) in die Atmosphäre freigesetzt. Zusätzlich verursacht die Änderung der Landnutzung, wie z. B. die Abholzung von Wäldern, eine Freisetzung von $1,6 \text{ Gt C a}^{-1}$ (SCHIMEL 1995, GRACE 2004:190). Damit wirken anthropogene Aktivitäten global als Quelle im Kohlenstoffkreislauf. Dieses „Konzept von Quellen, Ausbreitung und Senken [ist] fundamental“ für die Betrachtung von globalen Stoffkreisläufen (STORCH et al. 1999:41).

Da Kohlenstoff in Form verschiedener Moleküle vorkommt, gibt es für diese auch jeweils unterschiedliche Quellen und Senken. Natürliche Senke für Kohlenstoffdioxid ist die Photosynthese (Gleichung 1, Hinreaktion), bei der CO_2 durch autotrophe Organismen in Biomasse umgewandelt wird. Natürliche Quelle für CO_2 ist die Respiration (Gleichung 1, Rückreaktion) der autotrophen und heterotrophen Organismen (HEIMANN & REICHSTEIN 2008:289, HOBBS 2000:5):



Aus der Differenz zwischen Biomasseproduktion durch Photosynthese (Bruttoprimärproduktion) und Biomasseabbau durch Respiration ergibt sich die Nettoprimärproduktion eines Ökosystems. Sie ist die eigentliche Senke für atmosphärisches CO_2 . Da die Photosynthese der Vegetation saisonalen Schwankungen unterworfen ist, weist auch ihre Funktion als CO_2 -Senke eine saisonale Dynamik auf (Abb. 1). So ist die globale CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre im Winter und Frühjahr höher, da die Vegetation auf den Landmassen der Nordhalbkugel nur eingeschränkt Photosynthese leistet. Gleichzeitig zeigen die Kurven in Abbildung 1 (KEELING et al. 1995:667) auch den Anstieg des atmosphärischen CO_2 -Anteils aufgrund anthropogener Kohlenstoffemissionen aus Verbrennungsprozessen. Quellen und Senken auf der Erdoberfläche bewirken, dass die CO_2 -Konzentration in der untersten Schicht der Troposphäre, der planetarischen Grenzschicht, besonders variabel ist, obwohl es global insgesamt ein gut durchmischtes Gas ist (GOODY & YUNG 1989:12).

Kohlenstoffmonoxid entsteht v. a. bei der unvollständigen Verbrennung von fossilen oder regenerativen Brennstoffen oder bei Waldbränden. Es hat in der Atmosphäre eine durchschnittliche Lebenszeit von ca. zwei Monaten (HOBBS 2000:18) und wird dann in einer Reaktion mit dem Hydroxylradikal (OH) abgebaut oder es entsteht bei der Oxidation des CO zu CO₂ Ozon (O₃) (LEVINE & COFER 2000:40f.):



Die vertikale Verteilung von Kohlenstoffmonoxid in der Atmosphäre ist unregelmäßig und von dessen Quellen und Senken abhängig (GOODY & YUNG 1989:13). Obwohl Kohlenstoffmonoxid selbst kein Treibhausgas ist, ist es dennoch im Klimasystem von Bedeutung, da bei seinem Abbau die Treibhausgase CO₂ und O₃ entstehen. Kohlenstoffmonoxid und troposphärisches Ozon wirken zudem toxisch gegenüber Organismen (JAIN & HAYHOE 2003:348).

Quellen für Methan sind v. a. der mikrobielle Abbau organischer Substanz unter anaeroben Bedingungen, wie sie in Feuchtgebieten, beim Reisanbau und in Mülldeponien zu finden sind. Es entsteht außerdem bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material und Treibstoffen (STORCH et al. 1999:46).

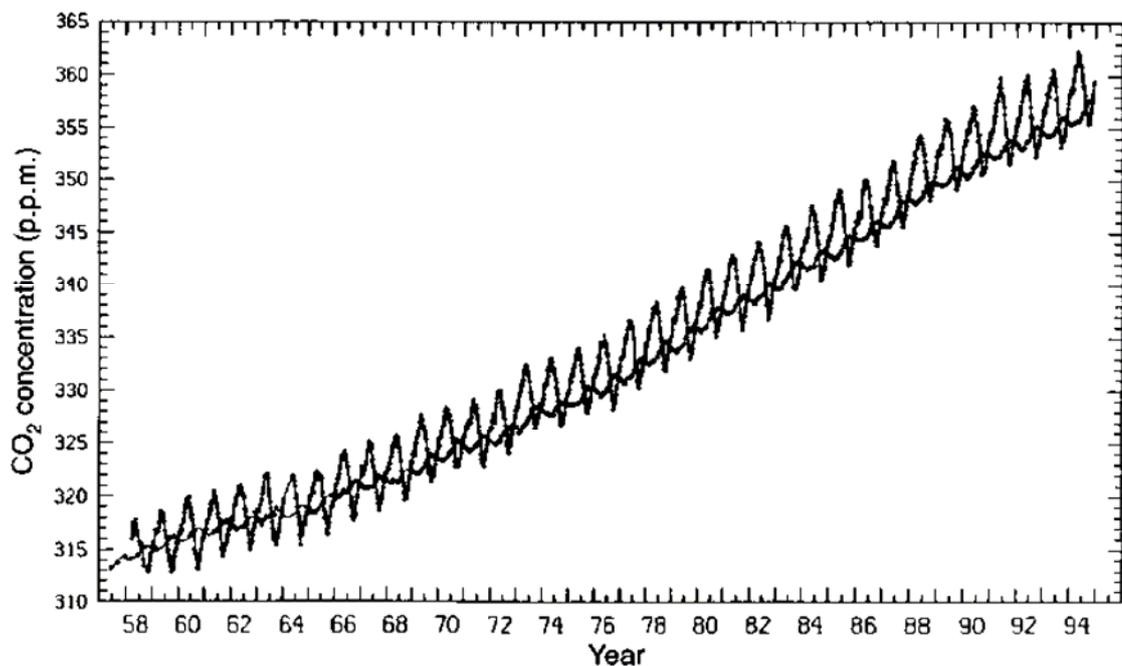
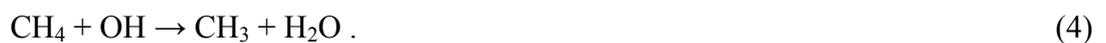


Abb. 1: Atmosphärischer CO₂-Anteil an den Beobachtungsorten Mouna Loa (Hawaii) und am Südpol. Die Zeitreihe vom Mouna Loa zeigt stärkere saisonale Schwankungen (aus KEELING et al. 1995:667).

Methan wirkt im Vergleich zum Kohlenstoffdioxid als stärkeres Treibhausgas. Es hat über einen Zeitraum von 20 Jahren ein *Global Warming Potential* (GWP) von 72, d. h. die Fähigkeit von 1 kg Methan Strahlung zu absorbieren ist 72 mal höher als von 1 kg Kohlenstoffdioxid (FORSTER et al. 2007:210, 213). Methan hat in der Atmosphäre eine Lebenszeit von etwa 12 Jahren, dann wird es in der Reaktion mit dem Hydroxylradikal abgebaut (FORSTER et al. 2007:142, 212, LEVINE & COFER 2000:40):



Für atmosphärisches Kohlenstoffdioxid, -monoxid und Methan sind Quellen natürliche oder anthropogen bedingte Verbrennungsprozesse. Methan entsteht zudem noch aus mikrobiellem Abbau unter anaeroben Bedingungen. Eine wichtige Senke für das Kohlenstoffdioxid sind Ökosysteme, in denen es während der Photosynthese in Biomasse umgewandelt wird. Die Senken für Kohlenstoffmonoxid und Methan sind in der Atmosphäre chemische Reaktionen v. a. mit dem Hydroxylradikal. Nach diesem kurzen Überblick über die Bedeutung, Quellen und Senken atmosphärischen Kohlenstoffs wird im Folgenden die Funktion der Ökosysteme Sibiriens, insbesondere der borealen Wälder, als Kohlenstoffspeicher und -quelle im Hinblick auf die Relevanz für die Analyse der SCIAMACHY-Daten erörtert.

2.2 Ökosysteme Sibiriens als Kohlenstoffsinken und -quellen

Nach allgemeinem Verständnis ist Sibirien der Teil Russlands östlich des Urals. Dabei werden jedoch je nach physisch-geographischen oder politisch-historischen Gesichtspunkten Jakutien und der Ferne Osten oft von Sibirien abgegrenzt (WEIN 1999:15). Hinweise zur Abgrenzung des Untersuchungsgebietes dieser Arbeit befinden sich im vierten Kapitel.

Große Teile Sibiriens sind durch boreale Wälder bedeckt. Im Norden schließt sich die subarktische Tundra und im Süden schließen sich Steppen an (WEIN 1999:26). Nach ALEXEYEV et al. (2000:247) nehmen die borealen Wälder Sibiriens eine Fläche von ca. 392 Mio. ha ein und enthalten 14,3 Gt Kohlenstoff, was etwa $36,5 \text{ t C ha}^{-1}$ entsprechen. BEER et al. (2006) simulierten mittels des Dynamischen Globalen Vegetationsmodells LPJ (Lund-Potsdam-Jena), welches sowohl Feuer als auch Permafrost berücksichtigt und unter Verwendung von Landbedeckungsinformationen aus der Fernerkundung, für russische Wälder eine Kohlenstoffsinke von 74 bis 131 Tg C a⁻¹ im Zeitraum von 1981-1999. Weiterhin simulierten BEER et al. (2006:3), dass der Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre einen positiven Einfluss auf die Nettoprimär-

produktion russischer Wälder hat. Damit wirken die borealen Wälder primär als Senke für Kohlenstoff. KASISCHKE (2000:20) sieht sie jedoch zukünftig mehr als Kohlenstoffquelle an, da durch Abholzung und zunehmenden Anstieg von Störungen wie Bränden oder Insektenbefall mehr Kohlenstoff freigesetzt werden wird.

Brände, entweder in Form von natürlichen Waldbränden (*forest fires*) oder durch anthropogen bedingtes Verbrennen von Biomasse zwecks der Veränderung der Landnutzung (*biomass burning*), emittieren Kohlenstoff. In borealen Wäldern werden Brände v. a. natürlich durch Blitzschlag entzündet (LEVINE & COFER 2000:33). Nach WARD (2001:58, 59) werden bei Bränden je nach Region, Vegetationszusammensetzung und Verbrennungsvollständigkeit (*combustion completeness*) etwa 88 % CO₂, 9,5 % CO und 0,5 % CH₄ emittiert. Ähnliche Werte erzielten auch LEVINE & COFER (2000:37-39) bei einem experimentellen Waldbrand in einem Kiefernwald in Sibirien. Dabei wurden 1475±40 g CO₂ pro kg Biomasse, 180±40 g CO kg⁻¹ und 4,2 g CH₄ kg⁻¹ emittiert. Die letzten beiden Gase werden v. a. bei kälteren, sauerstoffarmen Feuern mit unvollständiger Verbrennung freigesetzt. Insgesamt werden in borealen Wäldern zwischen 10 und 200 t ha⁻¹ Kohlenstoff durch Feuer emittiert (KASISCHKE 2000:24). SHVIDENKO & NILSSON (2000b:305) modellierten für den Zeitraum von 1988 bis 1992 Emissionen aus Bränden in russischen Wäldern. Dabei wurden 127 Tg C a⁻¹ emittiert, was 16,6 t C ha⁻¹ entsprechen. Während das emittierte CO₂ der Atmosphäre durch nachwachsende Vegetation wieder entzogen wird, verbleiben andere Gase vorerst in der Atmosphäre (LEVINE & COFER 2000:31f., 35). Da Brände v. a. unter warmen und trockenen Bedingungen entstehen, die im Zuge des Klimawandels in der borealen Zone zunehmen werden, wird auch die Häufigkeit von Brandereignissen zunehmen. Dies wirkt sich negativ auf den in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoff aus, da insgesamt das Alter der Waldstände abnimmt (KASISCHKE 2000:24).

Eine weitere Kohlenstoffquelle in Sibirien sind Feuchtgebiete, die insbesondere starke Torfschichten aufweisen. So sind nach ALEXEYEV et al. (2000:251) im asiatischen Russland im Torf 93105,8 Mio. t Kohlenstoff enthalten während die Vegetation nur 774,5 Mio. t C enthält. Dabei befinden sich 60 % der Torfgebiete in Westsibirien, insbesondere im Ob-Irtysch-Becken (WALTER 1977:167, 169). Aufgrund der geringen Reliefenergie, der wasserundurchlässigen Horizonte der Podsole und des Wasserstaus im Frühjahr und Sommer konnten sich links des Ob je nach Artenzusammensetzung der Destruenten Torfschichten von bis zu 7 m bilden (WALTER 1977:169). Diese torfigen Moore sind oligotroph und enthalten ihre Nährstoffzufuhr fast ausschließlich über den Niederschlag. Aufgrund des hohen Wasserstandes ist in den Böden der Moore nur ein

anaerober Abbau organischer Substanz durch Mikroorganismen möglich, wobei v. a. Methan aber auch Kohlenstoffdioxid entstehen (NYKÄNEN et al. 1996:325f.). GLAGOLEV et al. (2008) geben einen Überblick über verschiedene Studien, die Methan-Emissionen aus Mooren in Westsibirien quantifizierten. Bodenmessungen in einem Moor im Oblast Tomsk ergaben Methanemissionen bis zu $2400 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (GLAGOLEV et al. 2008:136). Flugzeugmessungen im Kreis Chanty-Mansijsk ergaben mittlere Methanemissionen von $67,2 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (GLAGOLEV et al. 2008:139). TAKEUCHI et al. (2003) schätzen für eine NOAA-AVHRR-Szene des Westsibirischen Tieflandes aus dem August 1994 Methanemissionen. Dazu klassifizierten sie auf einer hochaufgelösten SPOT-HRV-Szene vier Feuchtgebietstypen und maßen Methanemission mittels Flugzeugbefliegungen. Diese Klassifikation und Messungen übertrugen TAKEUCHI et al. (2003:29) auf die größere NOAA-AVHRR-Szene und erhielten mittlere Emissionen von $59,3 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Neben den Methanemissionen aus dem mikrobiellen Abbau, emittieren Feuer in Torfgebieten zusätzlich Kohlenstoff. So tragen nach MORRISSEY et al. (2000:430) Torffeuer mehr als 40 % der gesamten Methanemissionen aus allen borealen Bränden bei. Dies sind aber nur 1,5 % der Methanemissionen, die durch mikrobiellen Abbau entstehen (MORRISSEY et al. 2000:430).

Neben Bränden und Feuchtgebieten als Kohlenstoffquellen sind in Sibirien auch Emissionen aus Siedlungen, die sich z. B. wie die Städte Omsk, Nowosibirsk, Krasnojarsk oder Irkutsk v. a. entlang der Transsibirischen Eisenbahn befinden, und aus Erdöl- bzw. Erdgasförderstätten (v. a. in Westsibirien um Surgut) relevant. Aus diesen Vorüberlegungen sind in den SCIAMACHY-Daten Sibiriens erhöhte atmosphärische Kohlenstoff-Mischungsverhältnisse über Brandflächen, Feuchtgebieten und anthropogen überprägten Regionen zu erwarten.

3 Fernerkundung atmosphärischer Spurengase mit SCIAMACHY

SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography*) ist ein Sensor auf dem Satelliten ENVISAT, der zur Messung von Spurengasen und Aerosolen in der Atmosphäre entwickelt wurde. Seit dem Start von ENVISAT im Jahr 2002 können aus den Strahlungsmessungen von SCIAMACHY Anteile und die Verteilung atmosphärischer Gase wie u. a. Ozon (O_3), Sauerstoff (O_2), Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NO_x), Kohlenstoffmonoxid und -dioxid (CO , CO_2), Methan (CH_4), Wasserdampf (H_2O) und Distickstoffmonoxid (N_2O) abgeleitet werden (BOVENSMANN et al. 1999:127).

Wissenschaftliche Anwendungsbereiche von SCIAMACHY sind nach BOVENSMANN et al. (1999:129-131) die Troposphärenchemie, insbesondere die Zusammensetzung der Troposphäre einschließlich der untersten Grenzschicht sowie die Untersuchung von Transporten zwischen Stratosphäre und Troposphäre, also z. B. der Austausch von Ozon, Methan und Distickstoffmonoxid. Weiterhin ist die Klimaforschung hinsichtlich der Verteilung von Treibhausgasen, Aerosolen sowie des Strahlungshaushaltes ein Anwendungsbereich. Insbesondere ist die Erfassung regionaler Quellen und Senken atmosphärischer Spurengase ein Ziel der Messungen von SCIAMACHY (BUCHWITZ et al. 2007b:4250).

ENVISAT fliegt in einem sonnen-synchronen Orbit und überfliegt den Äquator um 10 Uhr Ortszeit. Die Auflösung der SCIAMACHY-Messungen, auf denen die in dieser Arbeit verwendeten Daten beruhen, beträgt $30 * 60$ km (BUCHWITZ et al. 2005:3314).

SCIAMACHY ist ein Spektrometer, welches transmittierte sowie von der Erdoberfläche bzw. Atmosphäre reflektierte und gestreute Sonnenstrahlung im ultravioletten bis nahen infraroten Spektralbereich erfasst. Es umfasst im Bereich von 214 nm bis 1750 nm sechs Kanäle (Kanal 1-6) sowie zwei Kanäle im nahen Infrarot (1940-2040 nm Kanal 7, 2265-2380 nm Kanal 8). Dabei nimmt es in drei Geometrien auf: senkrecht nach unten (Nadir), vorwärts in Flugrichtung (Limb) und nach oben erfasst es einfallende Sonnen- bzw. vom Mond reflektierte Strahlung (Okkultation) (BOVENSMANN et al. 1999:127, 132).

Um von den gemessenen Spektren mit Absorptionsbanden von Gasen in bestimmten Spektralbereichen auf den Anteil der absorbierenden Gase zu schließen, werden Strahlungstransfermodelle eingesetzt, was auch als inverse Modellierung bezeichnet wird (BOVENSMANN et al. 1999:127). Strahlungstransfermodelle simulieren die Reflexion, Streuung und Absorption einfallender kurzwelliger Sonnenstrahlung und emittierter langwelliger terrestrischer Strahlung in Abhängigkeit chemischer und physikalischer Eigenschaften der Atmosphäre.

3.1 Inverse Modellierung von Spurengas-Vertikalsäulen mit WFM-DOAS

Für die Ableitung von Spurengas-Anteilen aus den von SCIAMACHY gemessenen Spektren werden mehrere Verfahren eingesetzt (z. B. BUCHWITZ et al. 2007b:450, BARKLEY et al. 2007:3599, STRAUME et al. 2005:822). Die in dieser Arbeit verwendeten Daten über Anteile des CO₂, CH₄ und CO wurden mit dem Algorithmus WFM-DOAS (*Weighting Function Modified Differential Optical Absorption Spectroscopy*) abgeleitet. Mathematisch-physikalische Grundlagen des Algorithmus sind in BOVENSMANN et al.

(1999:138-140) erläutert. Für CO₂ wird WFM-DOAS in SCHNEISING et al. (2008b:5484-5488), für CH₄ in SCHNEISING et al. (2008a:8279-8282) und für CO in BUCHWITZ et al. (2007a:2400-2403) beschrieben. Im Folgenden werden Grundzüge von WFM-DOAS skizziert.

Dem von SCIAMACHY gemessenen Spektrum wird ein Referenzspektrum gegenübergestellt. Dieses Referenzspektrum wurde von einem Strahlungstransfermodell simuliert, wobei standardisierte Anteile von Spurengasen eingingen. Das Strahlungstransfermodell wird kalibriert bis das Referenzspektrum möglichst gut auf das gemessene Spektrum angepasst ist (nach SCHNEISING et al. 2008a:5484, b:8280):

$$\sum_{i=1}^m (\ln I_i^{\text{obs}} - \ln I_i^{\text{mod}}(V, a))^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

I^{obs} ist dabei der Quotient des von SCIAMACHY gemessenen Nadir-Spektrums zum gemessenen Sonnenspektrum und I^{mod} ist das modellierte Referenzspektrum in Abhängigkeit angenommener Spurengas-Vertikalsäulen V und der Koeffizienten a eines Polynoms niedriger Ordnung. Das Polynom dient der Quantifizierung niedrigfrequenter Strahlungsabweichungen im Strahlungstransfermodell, die durch Aerosole, Wolkenreste

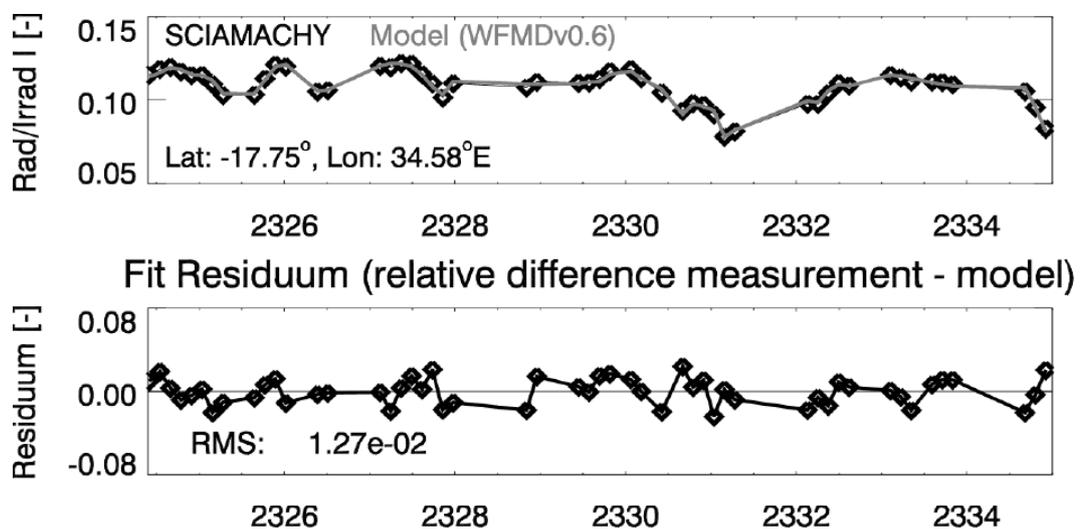


Abb. 2: Beispiel der WFM-DOAS-Anpassung für CO für eine Szene vom 27. Oktober 2003. Die obere Abbildung zeigt die von SCIAMACHY gemessene sonnen-normalisierte Strahlung (schwarze Punkte) und das darauf angepasste Spektrum eines Strahlungstransfer-Modells (durchgezogene Linie). Die untere Abbildung zeigt die relative Abweichung zwischen der gemessenen und angepassten modellierten Strahlung mit dem Root-Mean-Square-Fehler (RMS) der Anpassung (nach BUCHWITZ et al. 2007a:2401).

oder das Albedo der Erdoberfläche verursacht werden (BUCHWITZ et al. 2007b:4250). Der Index i in Gleichung 5 bezieht sich dabei auf die Wellenlänge eines Detektorpixels i . Die angenommenen Spurengas-Vertikalprofile V werden solange kalibriert bis die Summe der quadrierten Differenzen zwischen beobachtetem Spektrum und simuliertem Spektrum minimal ist (Gleichung 5). Der dabei kalibrierte Modellparameter V entspricht dann dem gemessenen Vertikalprofil des Spurengases (nach SCHNEISING et al. 2008b:5485, BUCHWITZ et al. 2007a:2400). Dieses Verfahren verdeutlicht auch Abbildung 2 für eine CO-Messung im Oktober 2003 in Mosambik.

Zur Ableitung von CO₂-Vertikalsäulen wird der Spektralbereich von 1558-1595 nm in Kanal 6 (1000-1750 nm) von SCIAMACHY genutzt (SCHNEISING et al. 2008b:5483, 5486). CH₄ wird im Bereich von 1630-1671 nm ebenfalls aus Kanal 6 (SCHNEISING et al. 2008a:8282) und CO wird im Bereich von 2324-2335 nm im Kanal 8 abgeleitet (BUCHWITZ et al. 2007a:2400f.).

Im Ergebnis von WFM-DOAS wird die Anzahl der Moleküle eines Spurengases in einer Atmosphärensäule bezogen auf ihre Grundfläche erhalten (in molec/cm²). Diese absoluten Werte werden für Methan und Kohlenstoffdioxid noch normalisiert (SCHNEISING et al. 2008a:8283, b:5488):

$$XCH_4 = \frac{CH_4^{col}}{(CO_2^{col} / CO_2^{mf})} \quad (6)$$

$$XCO_2 = \frac{CO_2^{col}}{(O_2^{col} / O_2^{mf})} \quad (7)$$

XCO₂ und XCH₄ sind die abgeleiteten Anteile von Kohlenstoffdioxid (in ppm) bzw. Methan (in ppb), d. h. die gemittelten molaren Anteile an einer Säule trockener Luft (Mischungsverhältnisse). Dabei wurde die gemessene absolute CO₂-Säule CO₂^{col} mit der gleichzeitig gemessenen Sauerstoff-Säule O₂^{col} und dem angenommenen Anteil des Sauerstoffs in der Atmosphäre O₂^{mf} = 0.2095 normalisiert (Gleichung 7). Sauerstoff wird durch WFM-DOAS im Bereich von 755-775 nm im Kanal 4 (605-805 nm) aus den SCIAMACHY-Spektren abgeleitet (SCHNEISING et al. 2008b:5483). Für Methan erfolgte die Normalisierung mit der gleichzeitig gemessenen CO₂-Säule CO₂^{col} und dem angenommenen Mischungsverhältnis CO₂^{mf} von 370 ppm (Gleichung 6, SCHNEISING et al. 2008a:8283).

Diese Normalisierungen sind notwendig, da die absoluten Werte des CO₂ und CH₄ von der vertikalen Höhe ihrer Atmosphärensäule abhängig sind, die durch Relief und Bodenluftdruck beeinflusst wird. CO₂-Quellen und -senken, die nur geringe

Konzentrations-Unterschiede im atmosphärischen CO₂ verursachen, sind ebenfalls nur durch diese Normalisierung erkennbar. Daher werden die absoluten Werte mit der entsprechenden Säule Trockenluft dividiert (SCHNEISING et al. 2008b:5480, 5496). Dies erfolgt durch ein Gas, welches in der Atmosphäre gut durchmischt ist, wie Sauerstoff (Gleichung 7). Für Methan erfolgt die Normalisierung mit CO₂, da damit Fehler reduziert werden können, die sich aus einer möglichen Normalisierung mit Sauerstoff ergeben. Dieses wird im Vergleich zu Methan in einem entfernteren Spektralbereich abgeleitet. Mit der Normalisierung mit CO₂ ergibt sich für XCH₄ ein geringerer Messfehler über Schnee, da dieser aufgrund seines hohen Albedos die Messungen im O₂-Bereich beeinflusst (SCHNEISING et al. 2008a:8286).

3.2 Gütekriterien und Qualität der XCO₂, XCH₄ und CO-Daten

Nicht alle der XCO₂ und XCH₄-Daten, die mit WFM-DOAS aus den gemessenen Spektren von SCIAMACHY abgeleitet wurden, gehen in die unter IUP/IFE (2008) frei verfügbaren Produkte ein, da diese z. T. durch Wolken oder Aerosole fehlerbelastet sind. Daher werden die Daten, mit den in Tabelle 1 dargestellten Gütekriterien überprüft und nicht adäquate Daten ausgefiltert. Insbesondere darf der RMS-Fehler, der sich aus der Anpassung der modellierten Spektren auf die gemessenen Spektren ergibt (Abb. 2) bestimmte Werte nicht überschreiten (Tab. 1). Weiterhin werden Szenen ausgefiltert, die einen flachen Sonneneinfallswinkel und Wolkenbedeckung aufweisen. Die XCO₂-Werte müssen zudem noch über Land sein, da Wasser ein zu starkes Rauschen verursacht. Aerosole sind in ihrer Konzentration variabel und führen zu einer Überschätzung der CO₂-Säule. Daher werden Pixel, die stark aerosol-belastet sind ebenfalls ausgefiltert (SCHNEISING et al. 2008b:5488-5492).

Vergleiche mit Bodenmessungen ergaben für die XCO₂-Daten, die mit WFM-DOAS aus SCIAMACHY abgeleitet wurden, eine Genauigkeit der Einzelmessungen von 5-6 ppm (ca. 1,5 %). Zeitreihen aus monatlichen Mitteln, welche die saisonale Dynamik des XCO₂ zeigen, korrelieren mit Bodenmessungen in Park Falls (USA) mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,88 und in Bremen mit 0,73 (SCHNEISING et al. 2008b:5492). Der Fehler des XCO₂ in Abhängigkeit vom Albedo der Erdoberfläche schwankt zwischen -0,12 % (Nadelwald, Wiese) und 0,28 % (einige Böden). Für Schnee liegt er jedoch bei -1,43 %, d. h. über Schnee wird XCO₂ unterschätzt (SCHNEISING et al. 2008b:5493, 5517). Jedoch werden schneebedeckte Flächen mit dem Wolken-detektions-Algorithmus ausgefiltert. Schnee- und Wolkenbedeckung sowie geringe Sonneneinfallswinkel führen insgesamt zu einer Ausfilterung vieler Messwerte im

Tab. 1: Auswahl von Gütekriterien für die Qualitätsfilterung des mit WFM-DOAS abgeleiteten XCO₂ und XCH₄ (nach SCHNEISING et al. 2008a:8283f., b:5489)

Gütekriterien	XCO ₂	XCH ₄
RMS der Anpassungsresiduen	< 0,25 % (im CO ₂ -Bereich) < 2 % (im O ₂ -Bereich)	< 0,4 % (im CH ₄ -Bereich) < 0,25 % (im CO ₂ -Bereich)
Anpassungsfehler	< 2,5 %	< 4 %
Sonnenzenitwinkel	< 75°	< 75°
sonstige	Szene über Land und wolkenfrei, Aerosolfilterung, Erdoberfläche < 5000 m	Szene wolkenfrei

Winter in hohen Breiten, was für die Analyse dieser XCO₂-Daten für Sibirien nachteilig ist. Insbesondere die Bildung saisonaler und jährlicher Mittel sollte daher zu einer Unterschätzung des CO₂ in mittleren und hohen Breiten der Nordhalbkugel führen (BUCHWITZ et al. 2007b:4251., SCHNEISING et al. 2008b:5496).

Für XCH₄ ergibt sich im Vergleich mit Bodendaten eine Genauigkeit (*precision*) von 25-30 ppb (ca. 1,5-1,7 %) (SCHNEISING et al. 2008a:8285). Fehler aufgrund des Oberflächenalbedos sind durch die Normalisierung des CH₄ mit CO₂ (Gleichung 6) statt mit O₂ vernachlässigbar. Jedoch bewirkt die Normalisierung mit CO₂ wiederum Fehler im XCH₄. So führt der globale saisonale Zyklus des CO₂ mit seinem Maximum im Frühjahr zu einem Fehler bis zu 1 % in den XCH₄-Daten des Frühjahrs. Der globale Anstieg des CO₂ in der Atmosphäre bewirkt durch die Normalisierung (Gleichung 6) über mehrere Jahre ein Absinken des XCH₄ (SCHNEISING et al. 2998a:8291). Im Jahr 2005 zeigt das XCH₄ eine höhere Variabilität als in den Vorjahren, was auf ein stärkeres Rauschen der Messungen in diesem Jahr zurückzuführen ist (SCHNEISING et al. 2008a:8294).

Die CO-Daten wurden durch BUCHWITZ et al. (2007a) mit Messungen des Sensors MOPITT (*Measurements of Pollution in the Troposphere*) auf dem Satelliten Terra (DEETER et al. 2003) verglichen, der ebenfalls CO erfassen kann, jedoch mit geringerer Sensitivität in der bodennahen Grenzschicht als SCIAMACHY. Die CO-Messungen beider Sensoren stimmen zu rund 20 % überein, wobei sich 2004 die beste Übereinstimmung ergab, weil sich 2003 auf Kanal 8 von SCIAMACHY eine starke Eisschicht bildete, die zu einem starken Rauschen der Messungen führte und 2005 Detektorpixel ausfielen (BUCHWITZ et al. 2007a:2406). Die Genauigkeit eines SCIAMACHY-CO-Jahresmittels liegt bei $5 \cdot 10^{16}$ molec/cm² (BUCHWITZ et al. 2007a:2409f.).

Tab. 2: Übersicht über verwendete Daten

Kürzel	Bezeichnung/ Version	Abdeckung	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Bezug	Referenz
XCO ₂	SCIAMACHY Carbon dioxide (XCO ₂) WFM-DOAS Version 1.0, Level 3	global	0,5° Länge * 0,5° Breite	monatlich, 2003-2005	IUP/IFE (2008)	SCHNEISING et al. (2008b)
XCH ₄	SCIAMACHY Methane (XCH ₄) WFM-DOAS Version 1.0, Level 3	global	0,5° Länge * 0,5° Breite	monatlich, 2003-2005	IUP/IFE (2008)	SCHNEISING et al. (2008a)
CO	SCIAMACHY Carbon monoxide (CO) WFM-DOAS Version 0.6, Level 3	global	0,5° Länge * 0,5° Breite	monatlich, 2003-2005	IUP/IFE (2008)	BUCHWITZ et al. (2007a)
Vegetations- zonen	Vegetation Zones, Land Resources of Russia, Version 1.1	Russland	--	--	IIASA (2002)	STOLBOVOI et al. (1998)
Brand- flächen	IKI MODIS Burnt Area	Russland	~ 290 m * ~ 470 m	jährlich (täglich), 2003-2005	BARTALEV et al. (2008)	
GFED	Global Fire Emissions Database, Version 2	global	1° Länge * 1° Breite	monatlich, 1997-2006	VAN DER WERF (2007)	VAN DER WERF et al. (2006)
Feucht- gebiete	Wetland Eco- systems, Land Resources of Russia, Version 1.1	Russland	--	--	IIASA (2002)	STOLBOVOI (2002)
Lichter	DMSP-OLS F152003 Stable Nighttime Lights, Version 2	global, 65°S - 65°N	30'' Länge * 30'' Breite	Jahr 2003	NOAA NGDC (2006)	ELVIDGE et al. (1997)

4 Daten und Methoden

4.1 Analyse der SCIAMACHY-Daten für Teilregionen

Für die Analyse des atmosphärischen Kohlenstoffdioxids, -monoxids und Methans in Sibirien wurden Daten des Sensors SCIAMACHY für die Jahre 2003 bis 2005 verwendet. In dieser Arbeit wurden die mit WFM-DOAS aus den SCIAMACHY-Messungen abgeleiteten, qualitätsgefilterten und für Rasterzellen 0,5° geographischer Breite und Länge gemittelten monatlichen XCO₂, XCH₄ und CO-Daten genutzt (BUCHWITZ et al. 2007a, SCHNEISING et al. 2008a, b). Erläuterungen zur Ableitung von Spurengas-Mischungsverhältnissen aus den spektralen Messungen, zu ihrer Normalisierung sowie zur Datenqualität wurden in Kapitel 3 gegeben.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verwendeten Daten. Für die Darstellung der räumlichen Verteilung und der zeitlichen Dynamik der Anteile des Kohlenstoffdioxids, -monoxids und des Methans in der Atmosphäre in Sibirien wurden die SCIAMACHY-Daten deskriptiv-statistisch ausgewertet sowie Karten und Zeitdiagramme erstellt (Kapitel 5.1). Die kartographische Darstellung und statistische Analyse der

Kohlenstoffdaten sowie ihrer Beziehungen zu regionalen Kohlenstoffquellen ist der methodische Schwerpunkt dieser Arbeit. Zeitreihen und statistische Parameter wurden für verschiedene Teilregionen berechnet, die einen ersten groben Überblick über atmosphärischen Kohlenstoff in Sibirien geben sollen. Sibirien selbst bezieht sich in dieser Arbeit auf eine Region, die von 60 bis 150°E und von 50 bis 80°N reicht (Abb. 3). Die Teilregionen sind die Vegetationszonen innerhalb Sibiriens, die in Abbildung 3 dargestellt sind und STOLBOVOI et al. (1998) entnommen wurden. Sie umfassen die Tundra einschließlich der Polaren Eiswüsten, die nördliche Taiga mit Übergang zur Tundra (N-Taiga, v. a. Kiefer), mittlere Taiga (M-Taiga, v. a. Lärche), die südliche Taiga einschließlich der gemäßigten Wälder (S-Taiga, v. a. Kiefer und Fichte) und die Steppen einschließlich der Wüsten und Halbwüsten (SHVIDENKO & NILSSON 2000a:133). Im Vergleich zum Originaldatensatz von STOLBOVOI et al. (1998) wurden einige dieser Vegetationszonen aggregiert, da sie wegen des geringen Flächenanteils für die statistische Analyse der SCIAMACHY-Daten eine zu kleine Stichprobe darstellen.

4.2 Analyse von Kohlenstoffquellen

Um die SCIAMACHY-Daten im Hinblick auf ihre Sensitivität gegenüber regionalen Kohlenstoffquellen zu bewerten, wurden weitere Produkte über Waldbrände, Feuchtgebiete und mögliche anthropogene Quellen wie Siedlungsgebiete und Erdöl- bzw. Erdgasförderstätten verwendet, die Hinweise auf Emissionen geben können. Tabelle 2 fasst die wichtigsten Eigenschaften dieser Produkte zusammen.

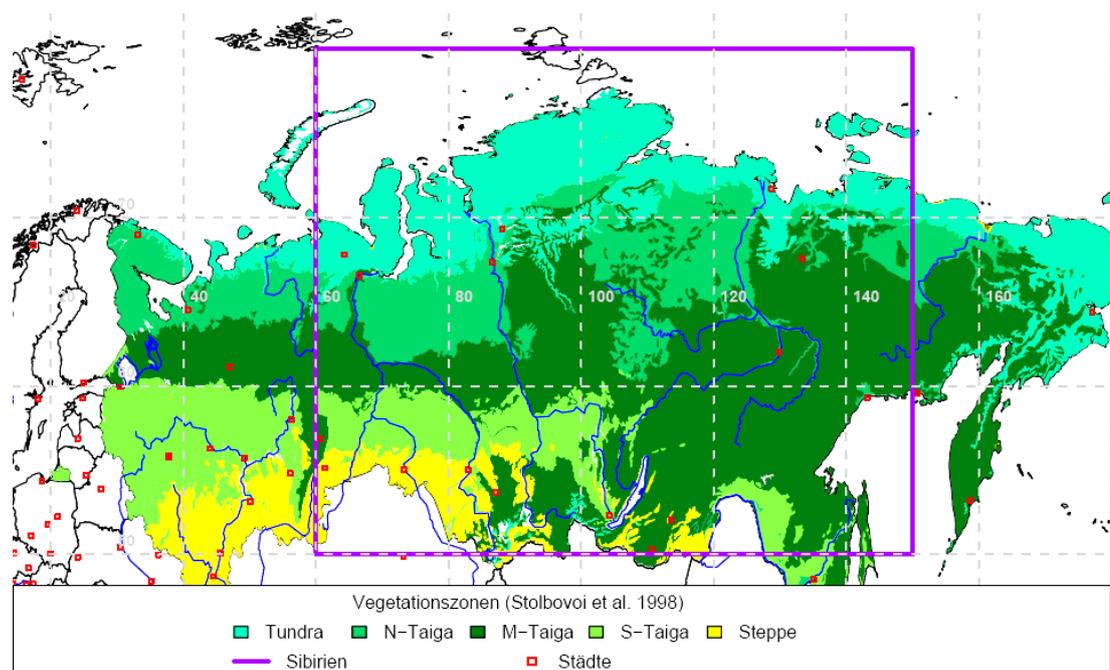


Abb. 3: Karte des Untersuchungsgebiets Sibirien mit Vegetationszonen als Teilregionen

4.2.1 Waldbrände

Aufgrund der Emissionen aus Waldbränden soll überprüft werden, ob sich über Brandflächen erhöhte Anteile des XCO₂, XCH₄ und CO von SCIAMACHY ergeben. Zur Analyse dieser Beziehungen wurden zwei verschiedene Datensätze verwendet: 1) regionale Brandflächen von BARTALEV et al. (2008) und 2) globale Brandflächen und Feuer-Emissionen aus der *Global Fire Emissions Database* (GFED, VAN DER WERF et al. 2006) (Tab. 2).

Der Datensatz von BARTALEV et al. (2008) umfasst Brandflächen in Russland für die Jahre 2003 bis 2005, die mit MODIS-Daten (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) erfasst wurden. Diese Daten enthalten auch den Tag des Jahres, an dem eine Fläche zum ersten Mal brannte. Die Ableitung dieser Brandflächen aus den MODIS-Daten beruht nach BARTALEV et al. (2008) auf einer Methode, die von BARTALEV et al. (2007) auf Daten von SPOT-VEGETATION angewendet wurde. Dementsprechend wurden für einzelne MODIS-Szenen der *Short-Wave-Vegetation-Index* (SWVI) aus den Werten des nahen Infrarots (NIR) und des kurzwelligen Infrarots (SWIR) nach $SWVI = (NIR - SWIR)/(NIR + SWIR)$ berechnet. Aus der Differenz der SWVI-Werte von zwei aufeinander folgenden Jahren lassen sich Veränderungen (Brandflächen) detektieren. Diesen Brandflächen wurde mittels der aktiven Feuer von MODIS (JUSTICE et al. 2002) der Tag zugewiesen, an dem eine Fläche zum ersten Mal in einem Jahr brannte (BARTALEV et al. 2007:1398f.).

Für die Analyse der SCIAMACHY-Daten wurde untersucht, ob über diesen jährlichen Brandflächen das atmosphärische XCO₂, XCH₄ und CO aufgrund von Emissionen aus Feuern erhöht sind. Da die hoch aufgelösten Brandflächen nur wenige 0,5°-SCIAMACHY-Pixel umfassen, wurde um sie jeweils eine Pufferzone (Buffer) von 20 km erstellt und überprüft, ob die SCIAMACHY-Daten innerhalb dieses Buffers erhöht sind. Weiterhin wurden die täglichen Daten zu monatlichen Brandflächen summiert und überprüft, ob es Zusammenhänge zwischen dem monatlichen CO-Gehalt in der Atmosphäre und der Größe der monatlichen Brandflächen gibt.

GFED (VAN DER WERF et al. 2006) enthält globale Daten über die Brandfläche und über Emissionen verschiedener Spurengase aus Feuern in einer Auflösung von 1° geographischer Breite und Länge auf monatlicher Basis für 1997-2006 (Tab. 2). Für GFED wurden aktive Feuer von 2001-2004 mit MODIS, für 1998-2003 mit TRMM VIRS (*Tropical Rainfall Measuring Mission, Visible and Infrared Scanner*) und für 1997-2003 mit ERS ATSR (*European Remote Sensing Satellite, Along Track Scanning Radiometer*) erfasst (VAN DER WERF et al. 2006:3425). Die von MODIS erfassten

aktiven Feuer (JUSTICE et al. 2002) wurden nach GIGLIO et al. (2006:962) mittels des Baumanteils (HANSEN et al. 2003) in einem Pixel in eine Brandfläche umgerechnet. Die Menge an verfügbarem Brennmaterial, die *combustion completeness* und Emissionen wurden für GFED mit dem biogeochemischen Modell CASA (Carnegie-Ames-Stanford-Approach) berechnet. Dabei wurden zur Ermittlung von Emissionen durch VAN DER WERF et al. (2006:3429) die MODIS Vegetationskarte (USGS 2006:o.S.) und Emissionsfaktoren nach ANDREAE & MERLET (2001) verwendet. Emissionsfaktoren geben die Anteile verschiedener Spurengase an, die bei der Verbrennung bestimmter Materialien entstehen.

In dieser Arbeit wurden die Brandflächen sowie die CO₂ und CO-Emissionen aus GFED genutzt, um mögliche statistische Beziehungen zu den entsprechenden SCIAMACHY-Daten zu untersuchen. Es wurde überprüft, ob die Jahresmittel der beiden Datensätze in einzelnen Teilregionen korrelieren. Aufgrund der unterschiedlichen räumlichen Auflösung wurden die GFED-Daten auf eine Auflösung von 0,5° interpoliert, um die Korrelationsanalyse mit SCIAMACHY durchführen zu können. Dazu wurde die GFED-Datenmatrix erst entlang der Breitenkreise und anschließend entlang der Längengrade linear interpoliert (BARTELME 2005:165). GFED wurde in eine höhere Auflösung disaggregiert, um die regionalen Informationen in den SCIAMACHY-Daten zu erhalten, die bei einer Aggregation in eine geringere Auflösung verloren gegangen wären. Da aber bei einer Interpolation der GFED-Daten der Umfang der realen Brandflächen- und Emissionswerte nicht zunimmt, sondern die interpolierten Werte lediglich aus den grob aufgelösten Werten geschätzt werden, ist dieser interpolierte Datensatz mit Unsicherheiten behaftet. Daher können mögliche Korrelationen zwischen den interpolierten GFED-Daten und SCIAMACHY auf einen tatsächlichen empirischen Zusammenhang zwischen der Größe von Brandflächen und Feueremissionen einerseits und atmosphärischem Kohlenstoff andererseits nur hindeuten.

4.2.2 Feuchtgebiete

Feuchtgebiete sind die natürliche Hauptquelle für atmosphärisches Methan (DENMAN et al. 2007:542). Bereits SCHNEISING et al. (2008a:8288) deuten an, dass XCH₄ von SCIAMACHY über weiten Teilen Russlands beispielsweise aufgrund von Feuchtgebieten erhöht ist. Dies soll in dieser Arbeit genauer überprüft werden. Dazu wird der Feuchtgebietsdatensatz für Russland verwendet, der von STOLBOVOI (2002) entwickelt wurde und sechs verschiedene Feuchtgebiets-Ökosysteme umfasst. Darin werden Moore, Sümpfe und allgemein andere Feuchtgebiete unterschieden, die weiterhin

hinsichtlich ihres Vegetationsbewuchses und der Mächtigkeit von Torfschichten differenziert werden. Moore gelten als nährstoffarm, sind vom Niederschlag abhängig und besitzen kaum einen Zufluss von außerhalb. Sümpfe hingegen sind nährstoffreich, daher produktiv und durch starken Wasserfluss gekennzeichnet (MORRISEY et al. 2000:424).

Der Feuchtgebietsdatensatz von STOLBOVOI (2002) beruht auf einer Bodenkarte, mit der verschiedene Böden zu Feuchtgebietsböden aggregiert und diese anschließend nach Wald- bzw. Graslandbedeckung unterschieden wurden. Mit diesem Datensatz wurde überprüft, ob das XCH_4 von SCIAMACHY innerhalb von Feuchtgebieten bzw. verschiedenen Feuchtgebietsökosystemen im Vergleich zu Nicht-Feuchtgebieten erhöht ist.

4.2.3 Anthropogene Regionen

BUCHWITZ et al. (2007a:2408-2410) stellten bereits fest, dass SCIAMACHY erhöhte CO -Werte über dicht bevölkerten Regionen Europas, des mittleren Ostens, Chinas und Indiens erfassen kann und teilweise sogar einzelne Städte identifizierbar sind. SCHNEISING et al. (2008b:5504, 5536) kamen zu dem Ergebnis, dass das XCO_2 von SCIAMACHY mit der Bevölkerungsdichte und anthropogenen Emissionen in Deutschland und den Benelux-Ländern korreliert. In Anlehnung an diese beiden Studien soll eine ähnliche Untersuchung der Sensitivität der SCIAMACHY-Daten gegenüber Kohlenstoffemissionen aus anthropogenen Quellen für Sibirien durchgeführt werden.

Als anthropogene Kohlenstoffquellen sind in Sibirien neben Siedlungen v. a. auch Emissionen aus der Erdöl- und Erdgasförderung relevant. Als Indikator für solche anthropogene Regionen werden in dieser Arbeit die zeitlich konstanten Nachlichter des OLS-Sensors (*Operational Linescan System*) auf dem DMSP-Satellit (*Defence Meteorological Satellite Program*) verwendet. Mit DMSP-OLS ist es möglich, im sichtbaren bis nahen infraroten Bereich nachts Licht von Wolken, die vom Mond beleuchtet werden, von Städten, Industrieanlagen, Gasflammen und Blitzen zu erfassen (ELVIDGE et al. 1997). Mit diesen Nachtaufnahmen können auch aktive Feuer kartiert werden (KIRAN CHAND et al. 2006). Lichter, die im zeitlichen Verlauf ständig existent sind, stammen meist von Siedlungen, Industrieanlagen oder Gasförderstätten. Der in dieser Arbeit verwendete Datensatz stammt von DMSP F15 und ist eine Komposite aus dem Jahr 2003, die stabile Lichter wie von Siedlungen und Gasflammen enthält. Er deckt Sibirien jedoch nur bis $65^\circ N$ ab (NOAA NGDC 2006).

5 Ergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse dieser Arbeit dar und diskutiert sie im Hinblick auf ihre Zielstellung. Dazu werden im Kapitel 5.1 die räumliche Verteilung und die zeitliche Dynamik der Mischungsverhältnisse des Kohlenstoffdioxids, -monoxids und des Methans in der Atmosphäre in Sibirien mit den SCIAMACHY-Daten kartographisch und statistisch beschrieben. Dabei werden auch Vermutungen über die Ursachen dieser raum-zeitlichen Muster angestellt, die im Kapitel 5.2 genauer betrachtet werden, indem die SCIAMACHY-Daten zu regionalen Kohlenstoffquellen in Bezug gesetzt werden.

Es wurde auch überprüft, ob das XCO_2 , XCH_4 und CO untereinander korreliert sind. Mögliche Korrelationen könnten zum einen auf gleiche Prozesse, wie Emissionen aller drei Gase bei Waldbränden, aber auch auf Zusammenhänge der Datenableitung, z. B. auf die Normalisierung des CH_4 mit CO_2 , hindeuten. Es konnten jedoch in keiner Region signifikante Korrelationen zwischen diesen drei SCIAMACHY-Produkten festgestellt werden.

5.1 Raum-zeitliche Muster atmosphärischen Kohlenstoffs in Sibirien

5.1.1 Kohlenstoffdioxid

Das XCO_2 , d. h. der gemittelte molare Anteil des CO_2 an einer Säule trockener Luft, zeigt in Nordeurasien und Sibirien hinsichtlich seiner raum-zeitlichen Verteilung Eigenschaften, die einerseits natürliche Ursachen haben aber andererseits auch in der Methode, mit der diese Daten aus den spektralen Messungen von SCIAMACHY abgeleitet wurden, begründet sind.

Abbildung 4 zeigt das XCO_2 in einem Frühjahrsmonat (April 2003) und im Sommer (Juni 2003). Karten weiterer Monate befinden sich im Anhang dieser Arbeit. Im April sind ca. nördlich von $55^\circ N$ kaum Messwerte vorhanden, hingegen sind im Juni die Datenlücken eher unregelmäßig verteilt. Die Ursache für diese Datenlücken, die großflächig in allen Spätherbst- bis Frühjahr-Daten auftreten, ist das Ausfiltern der Messdaten über schneebedeckten Flächen und bei niedrigem Sonneneinfallswinkel (BUCHWITZ et al. 2007b:4251f). Die Datenlücken im Sommer entstehen durch das Ausfiltern von Messungen, die stark aerosolbelastet oder mit Wolken bedeckt sind oder bei deren Anpassung des simulierten Spektrums an das von SCIAMACHY gemessene Spektrum zu große Fehler auftraten (Tab. 1). Dieser Filter wurde eingesetzt, um eine große Genauigkeit der XCO_2 -Daten zu gewährleisten und um damit das Erkennen regionaler Kohlenstoffquellen zu ermöglichen (SCHNEISING et al. 2008b:5480f.). Der

Qualitätsfilter bewirkt jedoch, dass in den Monaten November bis Februar keine XCO₂-Daten für Sibirien vorhanden sind. Im März treten dann die ersten Messungen in Südsibirien östlich des Baikalsees auf.

Trotz dieser winterlichen Datenlücken sind saisonale Muster des XCO₂ zu erkennen. So ist das XCO₂ in der Baikalsee-Region im April 2003 deutlich höher als im Juni 2003 (Abb. 4). Diese Dynamik zeigt sich auch in den Zeitreihen in Abbildung 5. Ein Maximum an XCO₂ im Frühjahr und ein Absinken zu den Sommermonaten gibt es in allen Regionen, die damit der globalen Dynamik folgen. Die Ursache dafür ist die eingeschränkte Photosynthese der Vegetation im Winter bzw. die höhere Nettoprimärproduktion im Sommer, die als Senke für CO₂ wirkt. Die Zeitreihen der sibirischen Teilregionen verdeutlichen nochmals das Problem der großen Datenlücken im Winterhalbjahr. Weiterhin zeigt Abbildung 5 auch den globalen Anstieg des von SCIAMACHY ge-

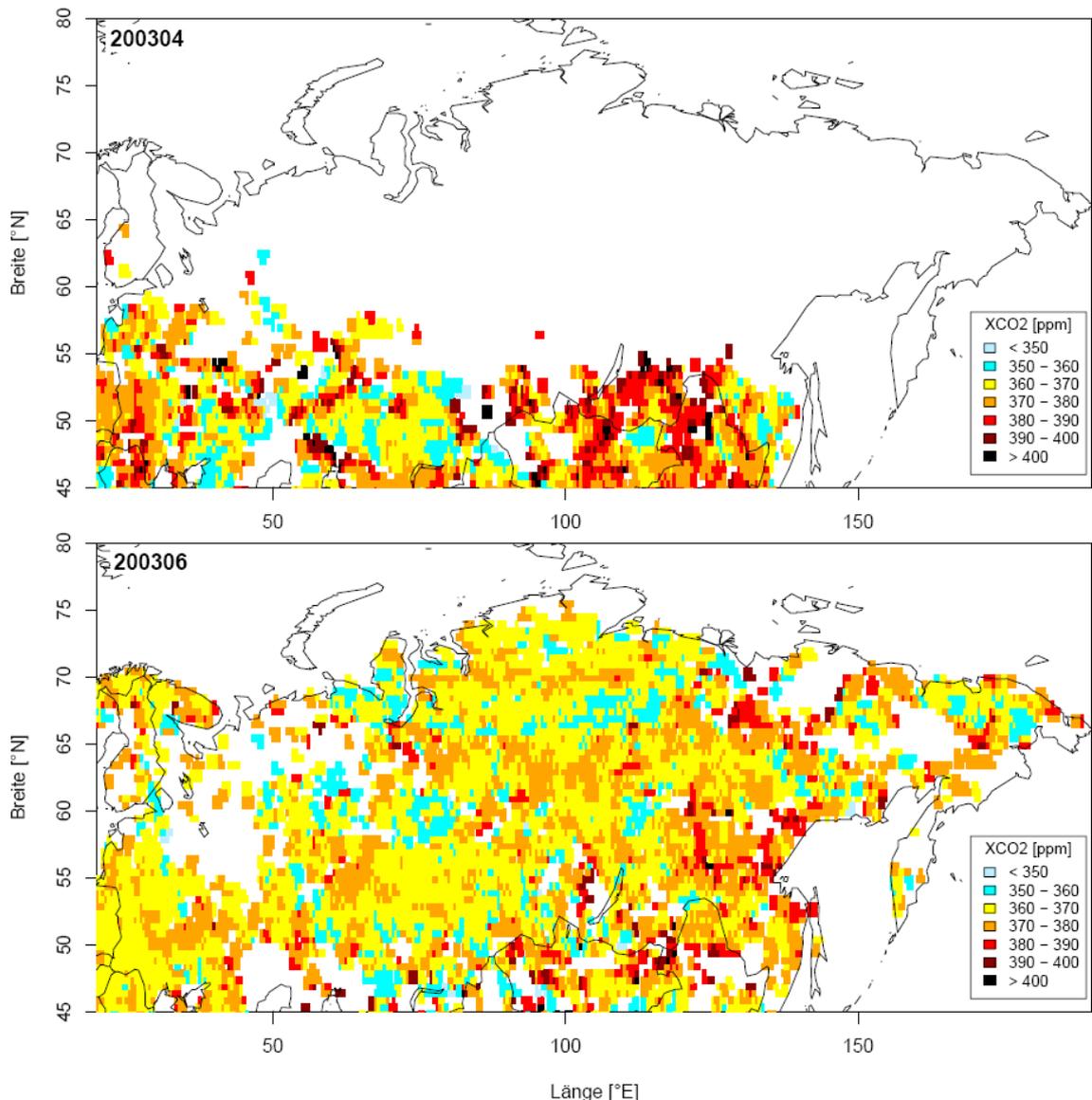


Abb. 4: XCO₂ in Nordeurasien im April (oben) und Juni 2003 (unten)

messenen atmosphärischen XCO₂-Anteils von durchschnittlich 368 ppm im Jahr 2003 auf ca. 372 ppm im Jahr 2005 (BUCHWITZ et al. 2007b:4251). IPCC (2007:37) gibt den CO₂-Anteil im Jahr 2005 mit 379 ppm an. Trotz dieser Abweichung besteht das Potential, mit SCIAMACHY erstmals saisonale Schwankungen und den globalen Anstieg des atmosphärischen CO₂-Anteils mittels eines Satelliten zu beobachten.

Abbildung 6 zeigt Karten Nordeurasiens der XCO₂-Mittelwerte für die Einzeljahre. Insgesamt ist auch darin ein Anstieg des XCO₂ von 2003 bis 2005 zu erkennen. Neben diesem Trend gibt es aber auch in allen drei Jahren Regionen mit besonders erhöhtem XCO₂. Dies sind besonders die Baikalsee-Region, Ostsibirien entlang der Pazifikküste und die Region Jakutsk. Andere Regionen, wie Teile der nördlichen und mittleren Taiga, zeigen jedoch in allen Jahren geringere XCO₂-Werte.

Hinsichtlich statistischer Parameter (Abb. 7) fällt in den Tundra- und Taigaregionen das Jahr 2004 auf, in dem der XCO₂-Anteil im Mittel dieser vier Regionen nur

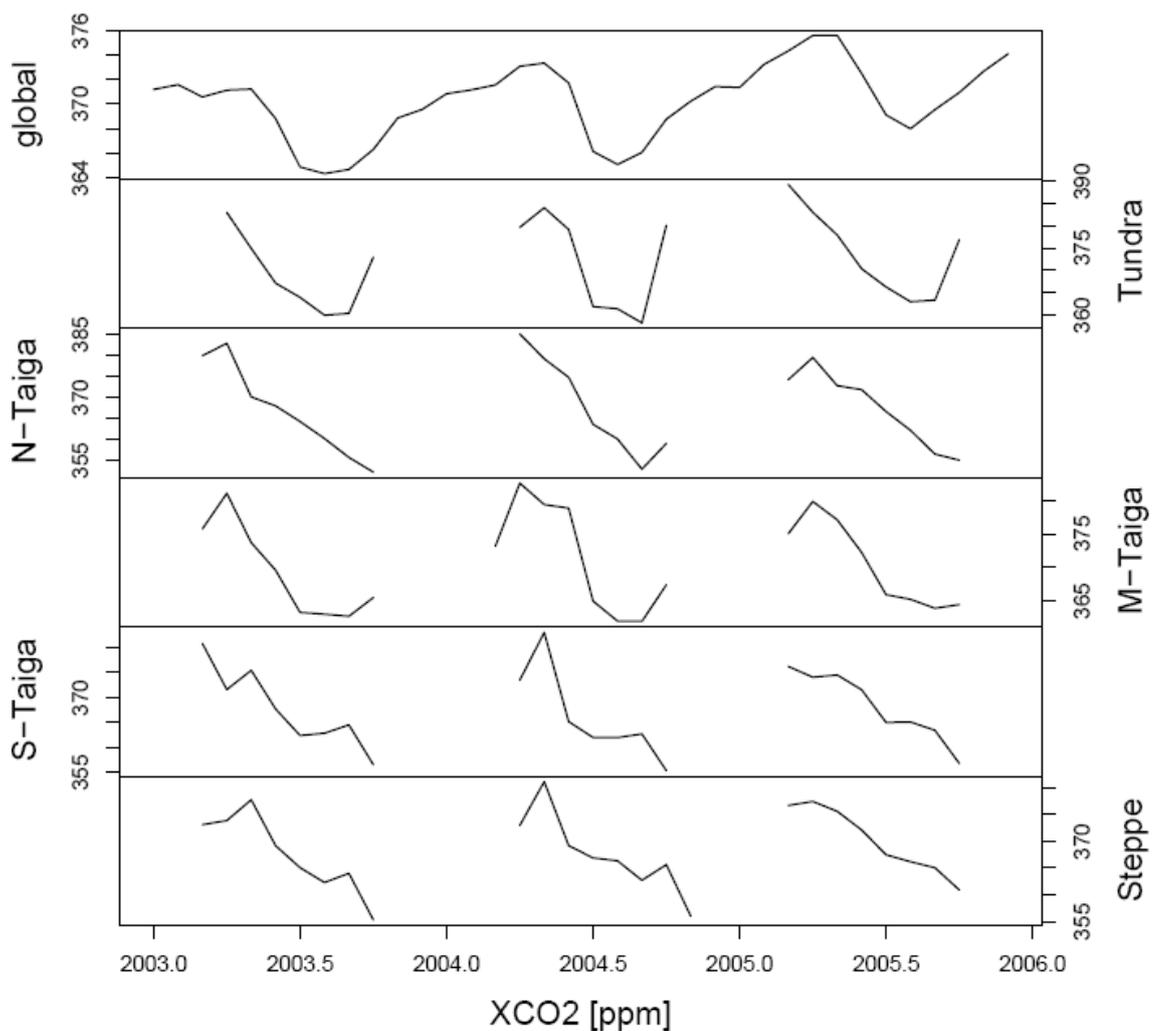


Abb. 5: Zeitreihen des XCO₂ in verschiedenen Regionen (Vegetationszonen). Regionen entsprechend Kapitel 4.1

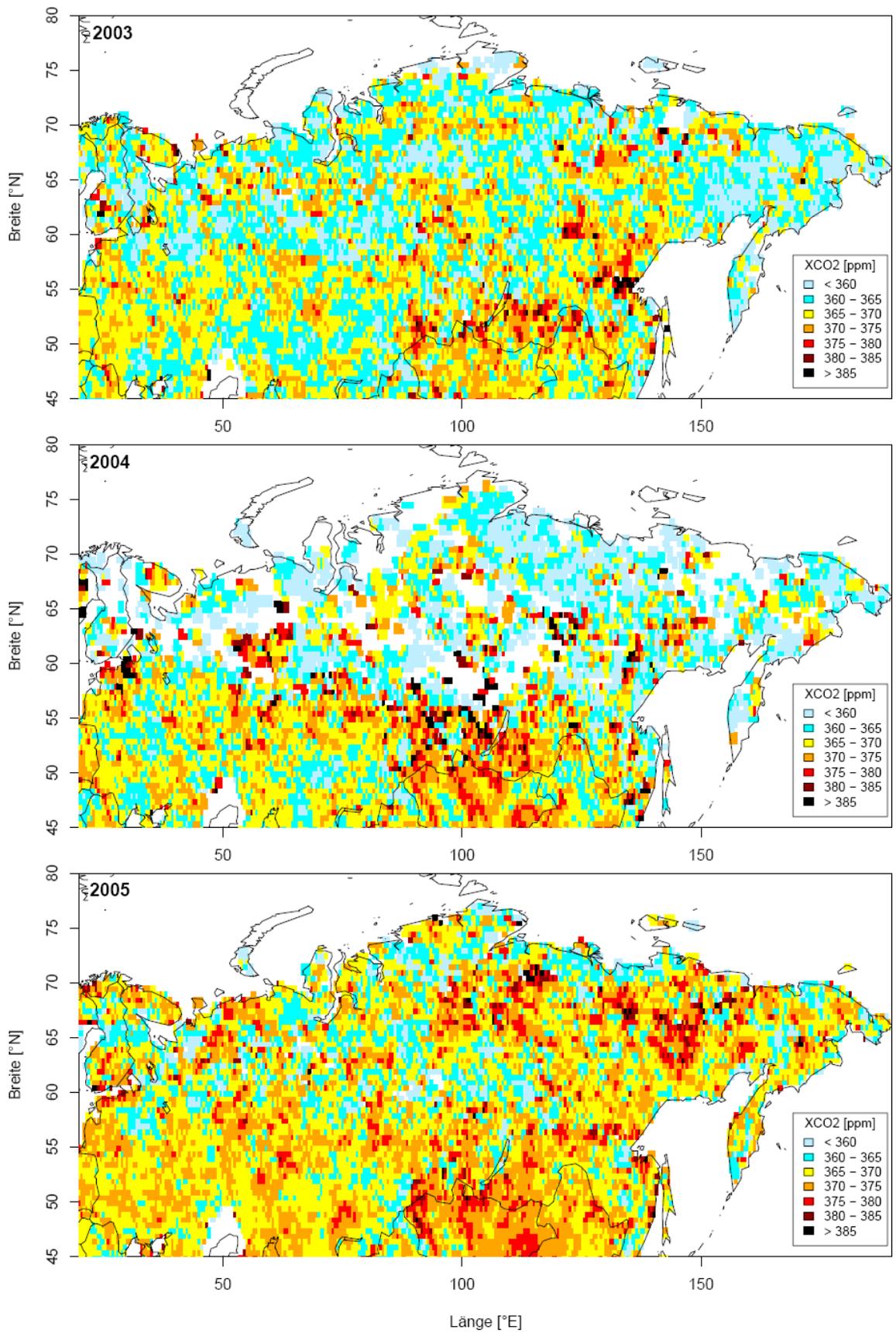


Abb. 6: Mittelwerte des XCO₂ für 2003, 2004 und 2005 in Nordeurasien

365 ppm beträgt während sie global 369 ppm erreicht. Dies kann jedoch nicht eindeutig auf biogeochemische Prozesse zurückgeführt werden, da insbesondere im Sommer 2004 in Sibirien große Datenlücken auftraten, die sich auch im jährlichen Mittel (Abb. 6, 2004) wiederfinden. Insgesamt ist in Sibirien im Mittel das XCO₂ geringer als global. Nur die Steppen entsprechen im dreijährigen Mittel mit 369 ppm etwa dem globalen Durchschnitt. Dies hat vermutlich mehrere Ursachen. Da die Tundra- und Taiga-

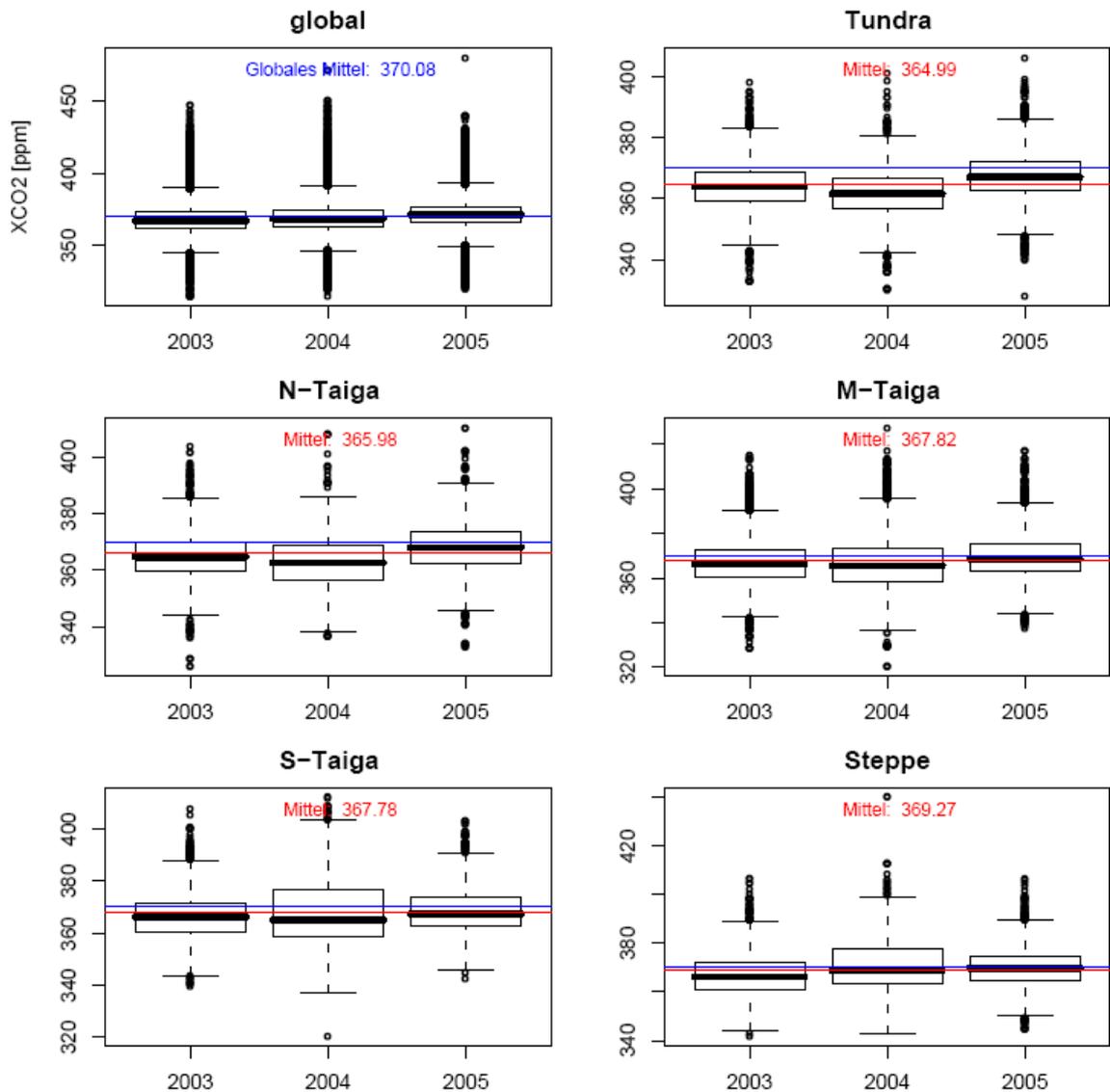


Abb. 7: Boxplots für XCO₂ in den Einzeljahren und für verschiedene Regionen. Die schwarze horizontale Linie kennzeichnet den Median, die Box jeweils den Bereich zwischen 1. und 3. Quartil (Interquartilsabstand), die Striche den 1,5-fachen Interquartilsabstand und die Punkte sind die „Ausreißer“ einschließlich der Extremwerte. Die blaue Linie repräsentiert in allen Diagrammen den globalen Mittelwert des XCO₂ über alle Jahre und die roten Linien sind die Mittelwerte der jeweiligen Region. Die y-Achsen sind gemäß der Verteilung unterschiedlich skaliert.

regionen nur schwach besiedelt sind, könnte es weniger anthropogene CO₂-Emissionen geben. Allerdings gibt es in diesen Regionen auch Erdöl- und Erdgas-Förderstätten, in denen Kohlenstoff emittiert wird. Andererseits wirken die borealen Wälder aber als Kohlenstoffsenke. Die Steppenregion in Südsibirien hingegen umfasst v. a. westlich des Baikalsees einige Großstädte, die als Quelle wirken könnten. Diese regionalen Erhöhungen verdeutlicht auch das dreijährige Mittel des XCO₂, das in Abbildung 8 dargestellt ist. Neben Erhöhungen in der Baikalseeregion und an der Pazifikküste fallen auch einzelne punktuelle Erhöhungen in der Taiga und an der Küste des Nordpolarmeeres auf. In weiten Teilen Sibiriens liegt der mittlere XCO₂-Anteil der drei Jahre jedoch unter dem globalen Durchschnitt von 370 ppm (Abb. 8).

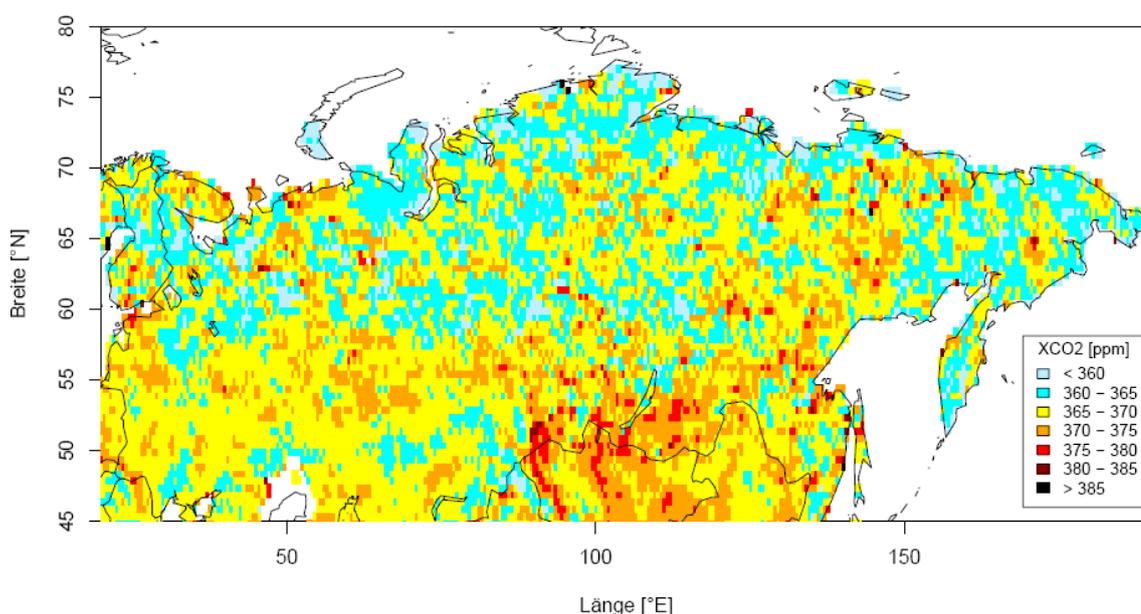


Abb. 8: Mittelwerte des XCO₂ von 2003 bis 2005 in Nordeurasien

5.1.2 Methan

Im Gegensatz zu CO₂ hat atmosphärisches CH₄ eine andere zeitliche Dynamik mit Konzentrationsmaxima im Sommer. Abbildung 9 zeigt die Verteilung von XCH₄ im April, Juni und Juli 2003 in Nordeurasien. Dabei ist ein deutlicher Anstieg der XCH₄-Anteile zum Juli zu erkennen. Wie beim XCO₂ besteht auch beim XCH₄ das Problem, dass viele Messungen von SCIAMACHY vom Herbst bis zum Frühjahr aufgrund des geringen Sonneneinfallswinkels und der Wolkenbedeckung durch den Qualitätsfilter ausgefiltert werden (Tab. 1, SCHNEISING et al. 2008a:8284). Allerdings sind beim XCH₄ auch Messwerte über Wasser vorhanden, weil dies bei der Ableitung des XCH₄ weniger Rauschen in den spektralen Messungen verursacht als beim XCO₂.

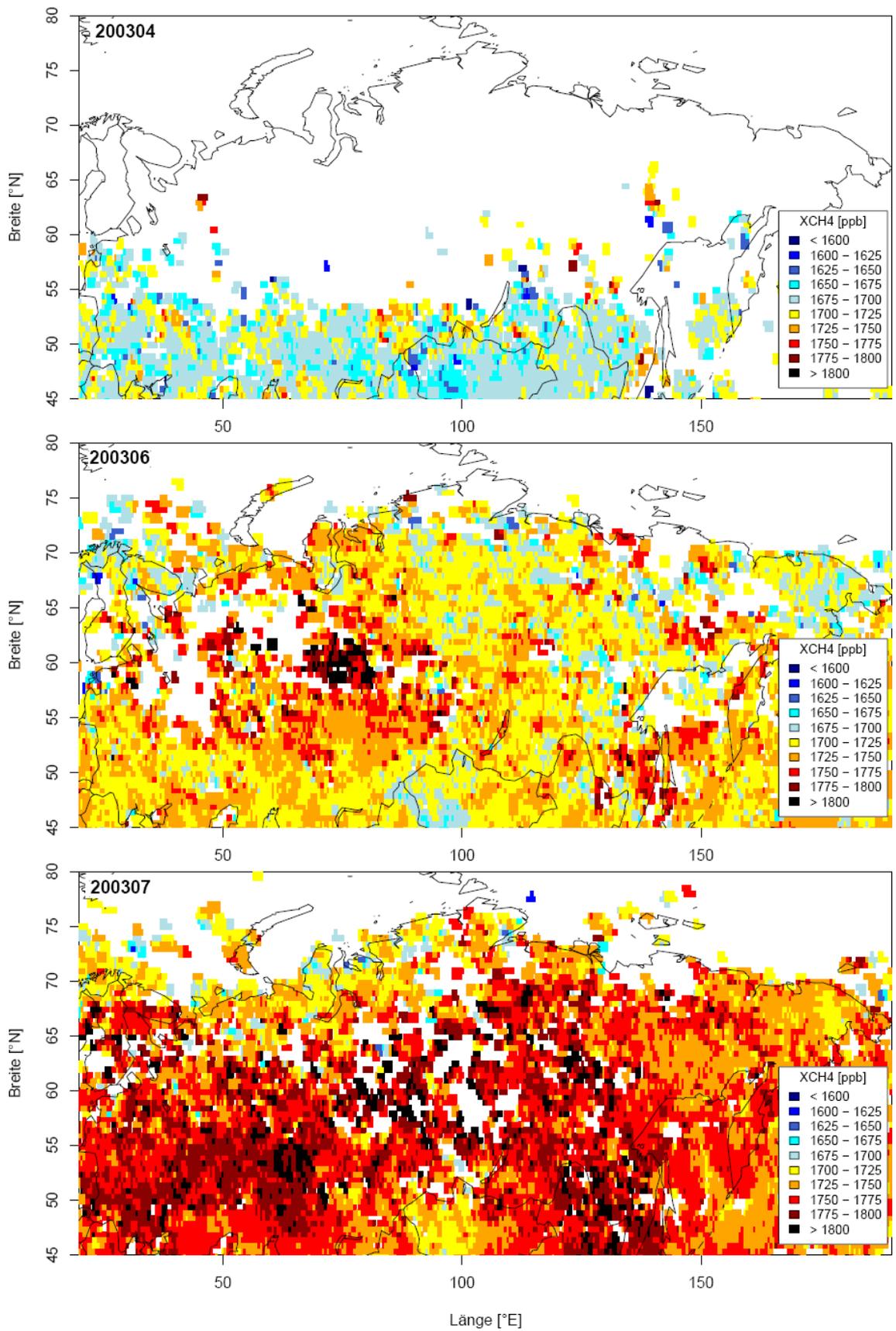


Abb. 9: XCH₄ in Nordeurasien im April (oben), Juni (Mitte) und Juli 2003 (unten)

Die zeitliche Dynamik des XCH_4 mit Maxima im Sommer und Minima im Winter zeigen auch die Zeitreihen in Abbildung 10. Besonders auffällig ist dabei insbesondere in der mittleren Taiga und in den Steppen der sprunghafte Anstieg des XCH_4 vom Mai/Juni zum Juli. Weiterhin zeigen die beiden nördlichen Regionen, Tundra und nördliche Taiga, auch eine Verschiebung des XCH_4 -Maximums um einen Monat im Vergleich zu den anderen Regionen.

Vermutlich kann diese Verschiebung der Maxima auf den Zeitpunkt des Auftauens und die Erwärmung der Aktiven Schicht des Permafrostes zurückgeführt werden, da mit steigender Bodentemperatur auch die Aktivität der methanbildenden Bakterien und damit die Methanemissionen zunehmen (GLAGOLEV et al. 2008:141). Feuchtgebiete werden als die natürliche Hauptquelle für Methanemissionen angesehen (DENMAN et al. 2007:542). Für die Steppen wirkt diese Erklärung unwahrscheinlich. Dort sind eher natürlich oder anthropogen bedingte Verbrennungsprozesse, Viehhaltung, Wälder und Termiten (DENMAN et al. 2007:539) als Gründe für die sommerliche Erhöhung des XCH_4 denkbar.

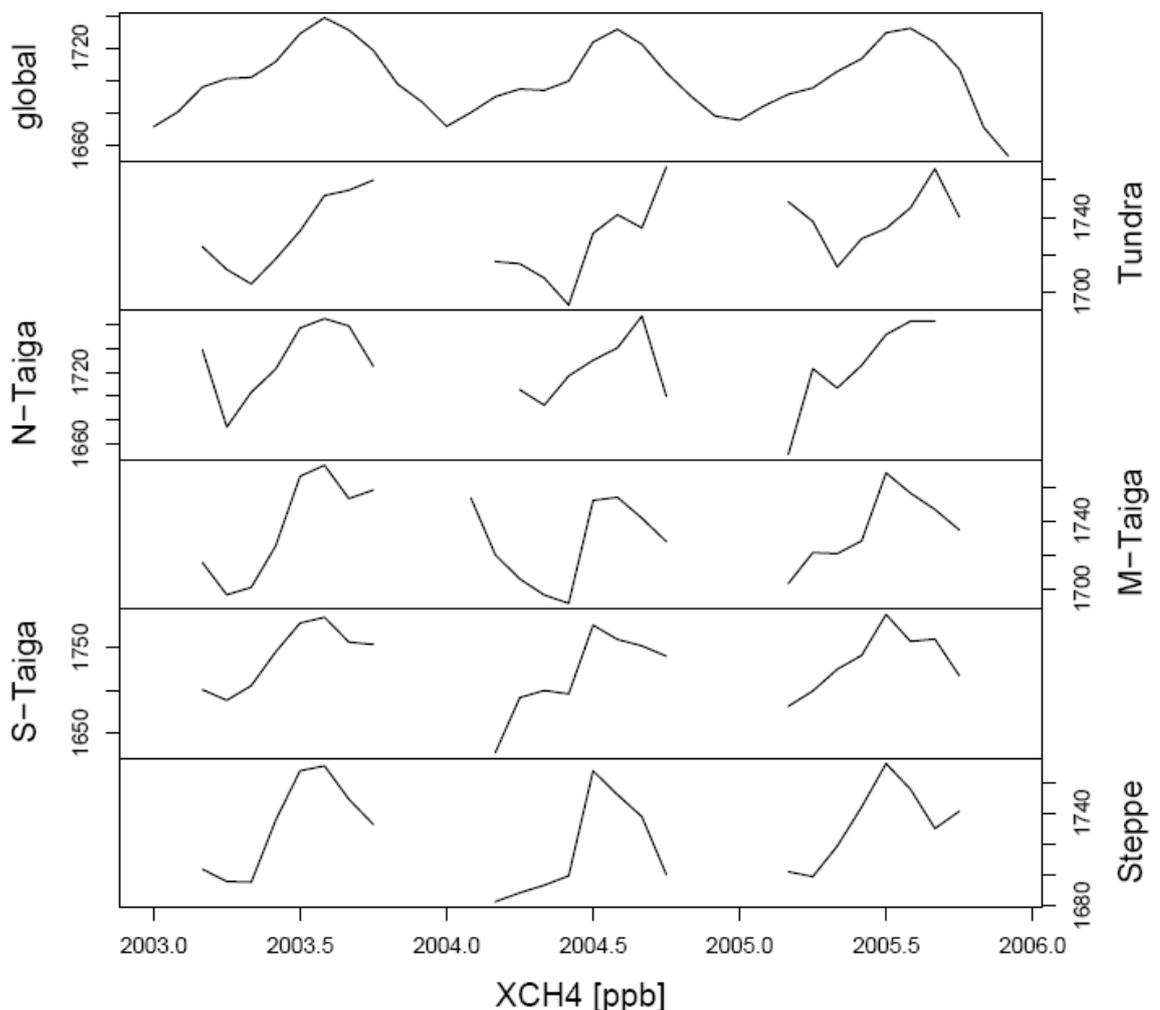


Abb. 10: Zeitreihen des XCH_4 in verschiedenen Regionen

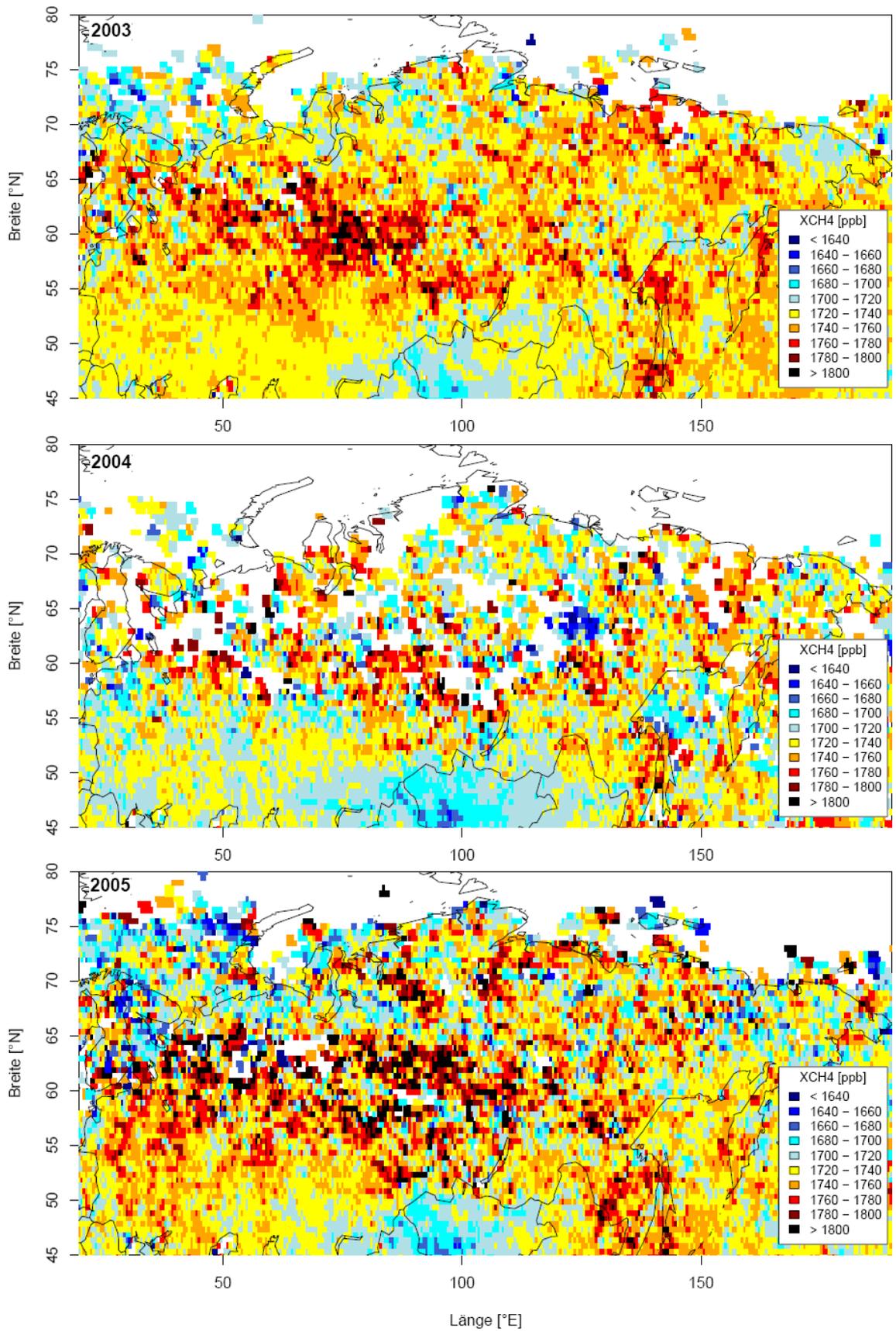


Abb. 11: Mittelwerte des XCH₄ für 2003, 2004 und 2005 in Nordeurasien

Abbildung 11 zeigt die Mittelwerte für das XCH_4 von SCIAMACHY für die Jahre 2003, 2004 und 2005. Dabei fallen in allen Jahren erhöhte Werte im Bereich der mittleren und südlichen Taiga sowie im Westsibirischen Tiefland im Vergleich zu anderen Regionen auf. Geringe Mischungsverhältnisse des XCH_4 gibt es punktuell in Teilen der Tundra und nördlichen Taiga sowie flächenhaft in den südlichen Hochgebirgen und Hochländern. Das Jahr 2005 zeigt insgesamt eine größere räumliche Variabilität der XCH_4 -Werte als die Vorjahre. Dies wird auch in den statistischen Lage- und Streuungsparametern deutlich, die in Abbildung 12 dargestellt sind. Die Ursache für diese größere Streuung des XCH_4 im Jahr 2005 ist ein stärkeres Rauschen der spektralen Messungen im CH_4 -Ableitungsbereich von WFM-DOAS (SCHNEISING et al. 2008a:8294). In den Jahren 2003 und 2004 streuen die XCH_4 -Werte insbesondere in der südlichen Taiga und den Steppen nur gering.

Abbildung 12 verdeutlicht außerdem, dass in allen sibirischen Teilregionen das XCH_4 im Vergleich zum globalen dreijährigen Mittel von ca. 1703 ppm um durchschnittlich ca. 35 ppm signifikant erhöht ist. Dies ist aber auch auf den niedrigeren XCH_4 -Gehalt auf der Südhalbkugel als auf der Nordhalbkugel zurückzuführen (SCHNEISING et al. 2008a:8288), der in die Berechnung des globalen Mittels eingeht.

In der südlichen Taiga ist das XCH_4 im Vergleich zu den anderen Vegetationszonen in Sibirien mit 1747 ppm höher. Große Teile der südlichen Taiga umfassen die Feuchtgebiete des Westsibirischen Tieflandes, die eine starke Quelle für CH_4 sind (Kap. 2.2). Zusammenhänge zwischen Feuchtgebieten und dem atmosphärischen XCH_4 -Anteil werden genauer im Kapitel 5.2.2 untersucht.

In Abbildung 13 werden im dreijährigen Mittel des XCH_4 auch einige andere punktuelle Erhöhungen im Vergleich zur Umgebung in der mittleren und nördlichen Taiga sowie – wie beim XCO_2 – an der Küste zum Nordpolarmeer deutlich. Diese haben aber z. T. auch statistische Ursachen. So bewirkt die Mittelwertbildung aus wenigen hohen XCH_4 -Werten des Sommers insgesamt einen hohen Mittelwert, weil dabei die eigentlich niedrigen Werte aus dem Winterhalbjahr nicht eingehen. Diese wurden durch den Qualitätsfilter ausgefiltert.

Regionen mit geringerem XCH_4 in Sibirien sind insbesondere Gebirge im Süden oder der Ural. Insgesamt liegt jedoch das dreijährige Mittel des XCH_4 in nahezu allen Regionen Sibiriens deutlich über dem globalen Durchschnitt.

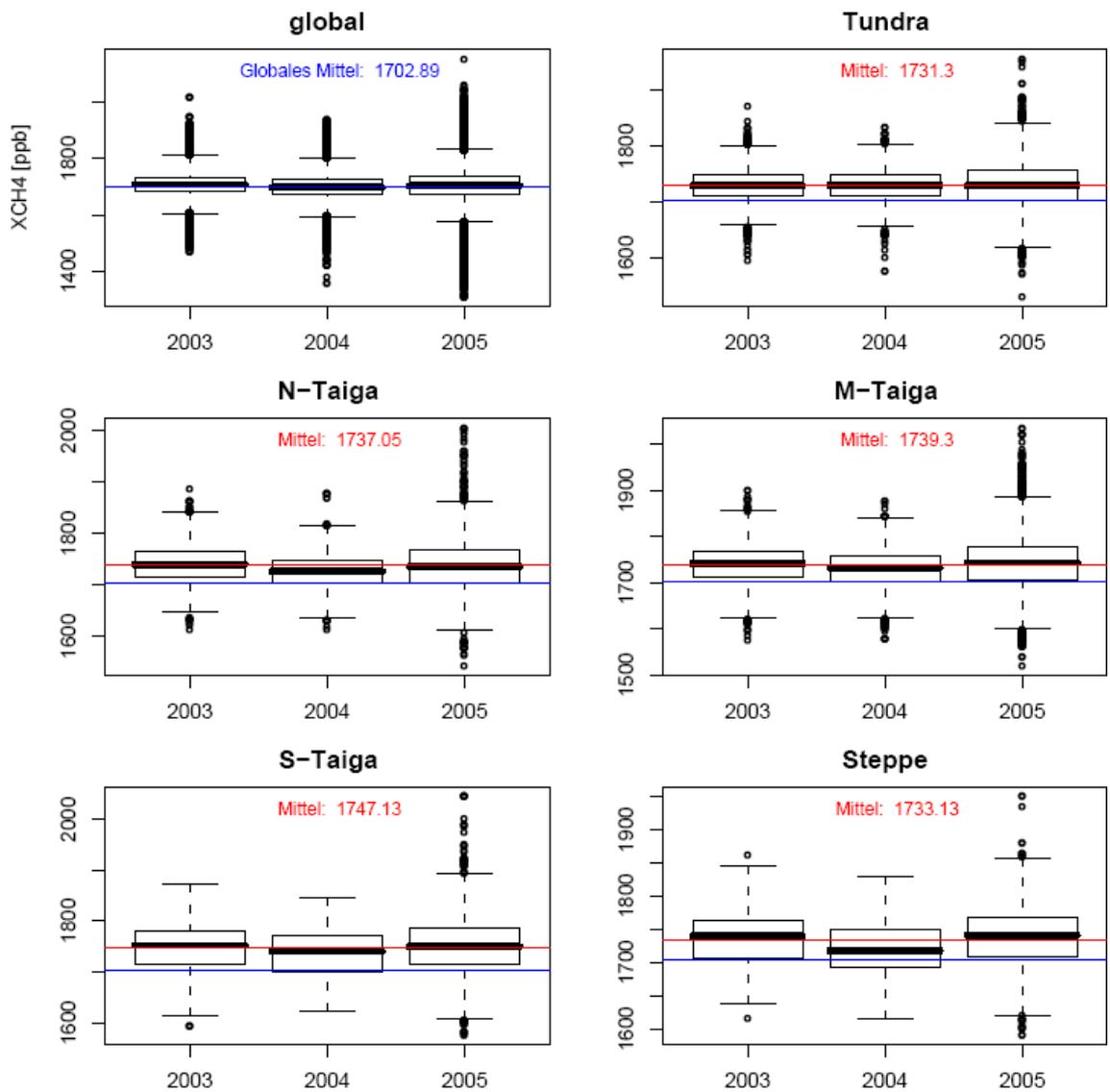


Abb. 12: Boxplots für XCH₄ in den Einzeljahren und für verschiedene Regionen

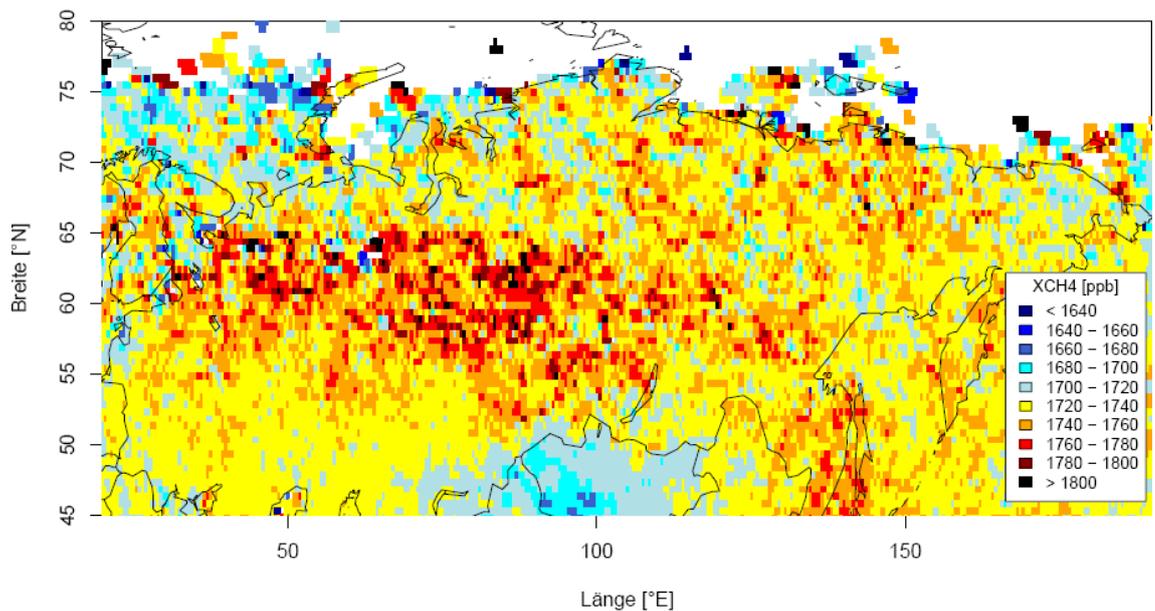


Abb. 13: Mittelwerte des XCH₄ von 2003 bis 2005 in Nordeurasien

5.1.3 Kohlenstoffmonoxid

Das von SCIAMACHY gemessene CO weist keine ausgeprägte saisonale Dynamik wie das XCO_2 oder das XCH_4 auf. Abbildung 14 zeigt die Zeitreihen für atmosphärisches CO global und für verschiedene Vegetationszonen in Sibirien. Zwar wird in den Jahren 2003 und 2004 in allen Regionen das Maxima der CO-Molekülanzahl pro Atmosphärensäule im März erreicht und fällt dann zum Ende des Jahres wieder ab, jedoch ist dieser Trend im Jahr 2005 kaum zu erkennen. Da CO bei natürlich oder anthropogen bedingten Verbrennungsprozessen entsteht und die vertikale Verteilung in der Atmosphäre v. a. von regionalen Quellen und Senken abhängig ist, können die von SCIAMACHY abgeleiteten Säuleninhalte des CO zu regionalen Verbrennungsprozessen in Beziehung gesetzt werden. Damit kann vermutlich das Frühjahrsmaximum des atmosphärischen CO mit der Ansammlung dieses Gases in der Atmosphäre während der winterlichen Heizperiode erklärt werden. Abbildung 15 zeigt die jährlichen Mittelwerte des CO in Nordeurasien. Dabei fällt insbesondere das Jahr 2004 auf, in dem

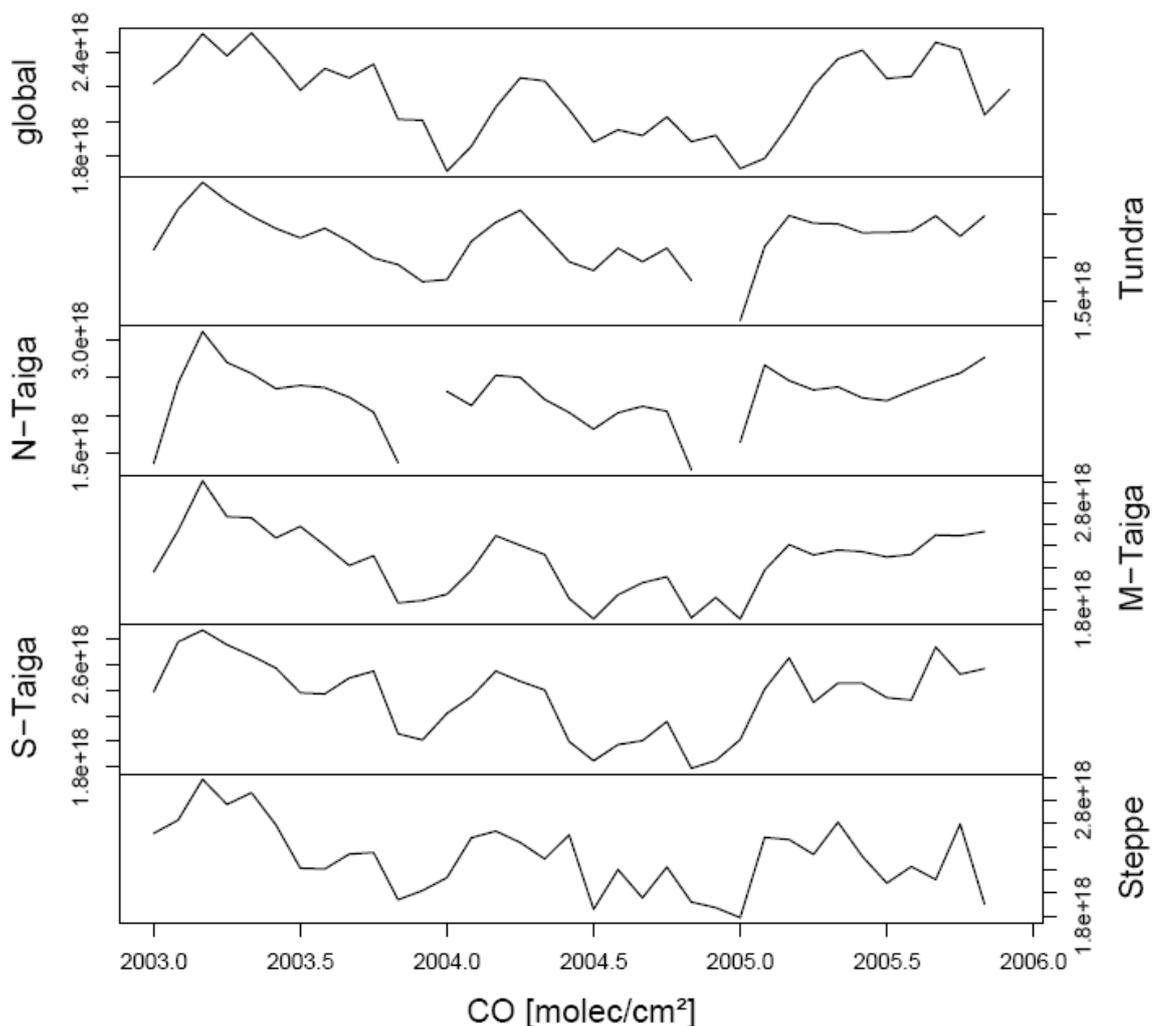


Abb. 14: Zeitreihen des CO in verschiedenen Regionen

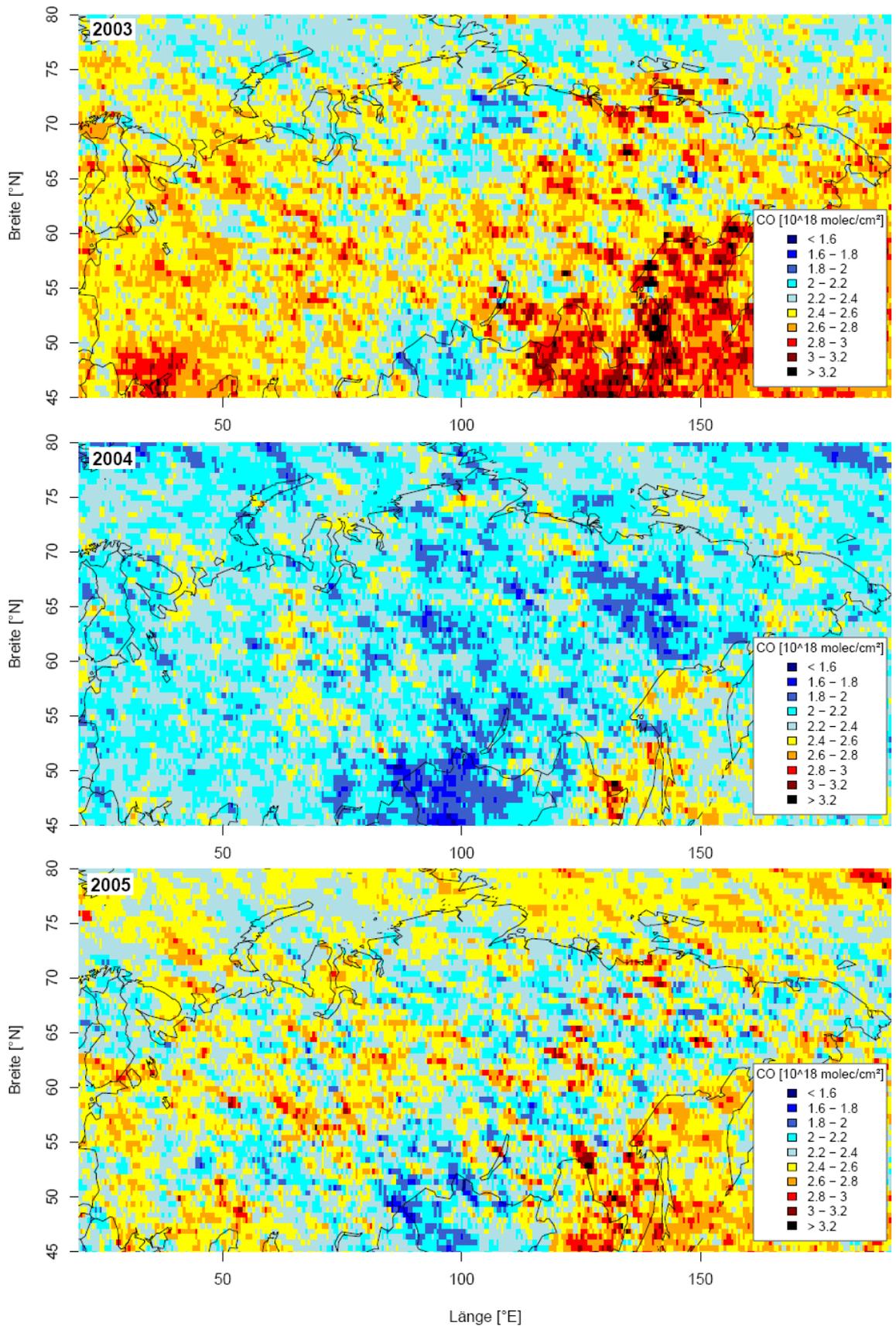


Abb. 15: Mittelwerte des CO für 2003, 2004 und 2005 in Nordeurasien

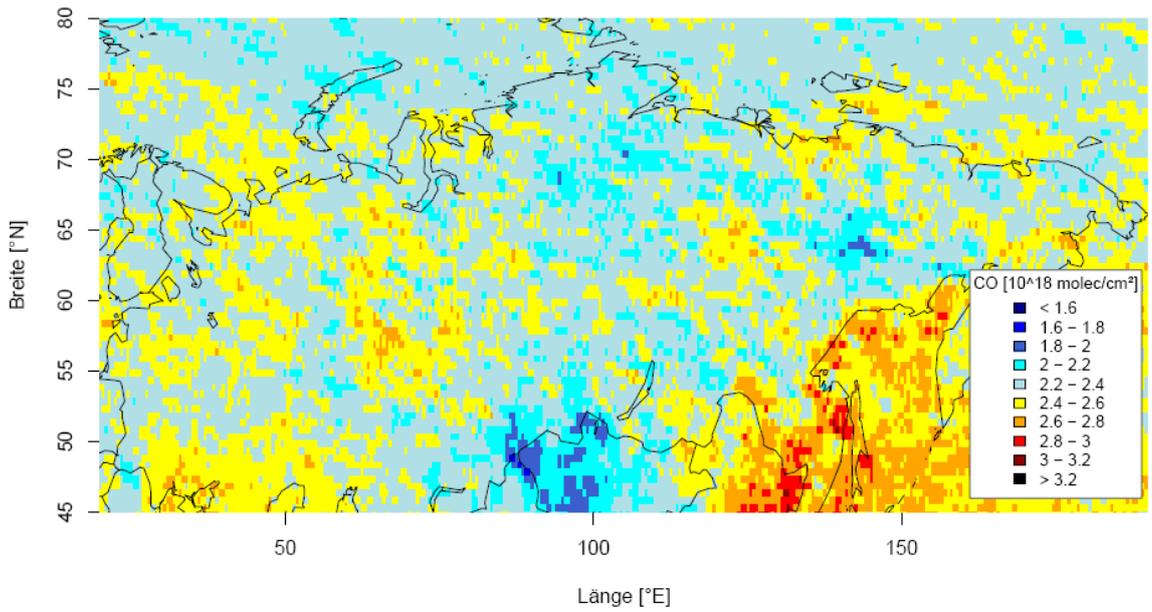


Abb. 16: Mittelwerte des CO von 2003 bis 2005 in Nordeurasien

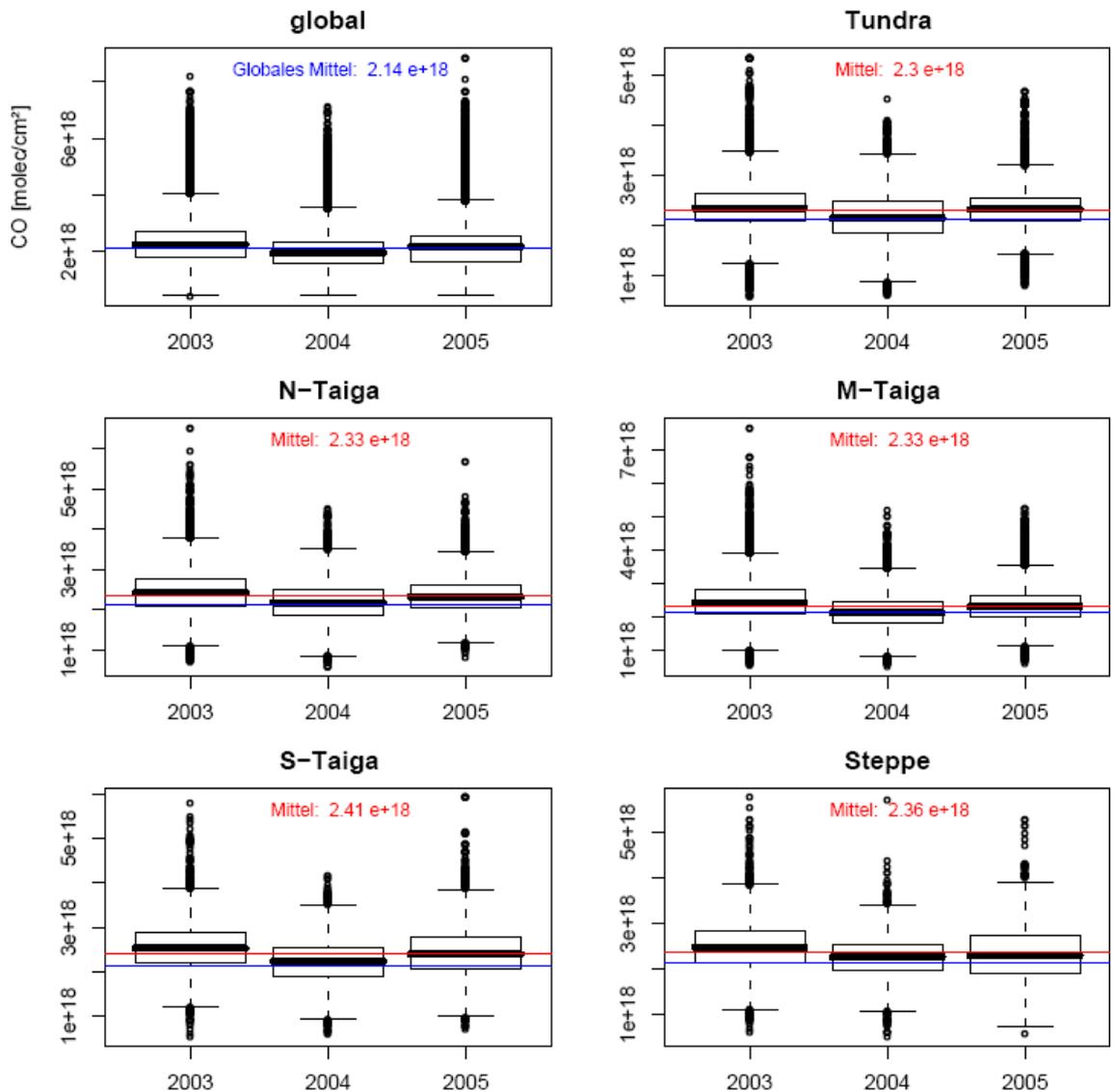


Abb. 17: Boxplots für CO in den Einzeljahren und für verschiedene Regionen

das CO wesentlich geringer als in den anderen beiden Jahren ist. Das Jahr 2004 wird von BUCHWITZ et al. (2007a:2406) als das beste Jahr der SCIAMACHY CO-Messungen angesehen, da im Jahr 2003 sich auf Kanal 8 von SCIAMACHY starke Eisschichten bildeten und so die Messungen durch ein stärkeres Rauschen gestört wurden. Im Jahr 2005 hingegen fielen Detektorzellen aus oder funktionierten nicht ordnungsgemäß (BUCHWITZ et al. 2007a:2406).

Dennoch lassen sich in allen drei Jahren plausible räumliche Muster erkennen. So ist im Südosten Sibiriens an der chinesischen Grenze, entlang von Ob und Irtysh und punktuell in Teilen Mittel- und Ostsibiriens das CO erhöht. Diese Regionen sind dichter besiedelt. Der Zusammenhang zwischen Siedlungen und CO wird genauer in Kapitel 5.2.3 untersucht. Relativ geringere CO-Werte gibt es in den Gebirgen Südsibiriens und der Mongolei sowie in Teilen der Taiga und Tundra Mittel- und Ostsibiriens. Dies ist in den Gebirgen einerseits auf die geringere Höhe der Atmosphäre und damit auf geringere absolute Gasgehalte zurückzuführen und andererseits können auch durch weniger Verbrennungsprozesse die CO-Emissionen in diesen Regionen geringer sein. Diesem räumlichen Muster entspricht auch das dreijährige Mittel des SCIAMACHY CO, wie es in Abbildung 16 dargestellt ist.

Hinsichtlich statistischer Parameter lassen sich zwischen den einzelnen Vegetationszonen kaum Unterschiede erkennen (Abb. 17). So beträgt im Mittel über alle drei Jahre die CO-Anzahl in allen Regionen ca. $2,3e+18$ molec/cm². Nur in der südlichen Taiga liegt dieser Wert etwas höher. Jedoch ist die mittlere CO-Anzahl in allen sibirischen Regionen höher als der globale Durchschnitt. Weiterhin werden die erhöhten Werte mit stärkerer Streuung in den Jahren 2004 und 2005 deutlich (Abb. 17), die durch die Sensorstörungen verursacht wurden.

5.2 Kohlenstoffquellen

5.2.1 Waldbrände

Das Jahr 2003 war in Russland eines der schwersten Feuerjahre (GOLDAMMER et al. 2003:90). Bei Wald- und Buschbränden werden in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Brennmaterials und der *combustion completeness* verschiedene Anteile von CO₂, CO und CH₄ emittiert. Damit müssten über Brandflächen diese Gase in der Atmosphäre in erhöhten Anteilen vorkommen. Inwieweit SCIAMACHY gegenüber diesen höheren Konzentrationen aufgrund von Feuer-Emissionen sensitiv ist, soll in diesem Kapitel präsentiert werden.

Abbildung 18 zeigt Zeitreihen des XCO_2 , XCH_4 und des CO von SCIAMACHY für 2003 bis 2005 über den Brandflächen des jeweiligen Jahres und über unverbrannten Flächen. Die Brandflächen stammen von BARTALEV et al. (2008) (Kap. 4.2.1). Beim XCO_2 treten über Brandflächen keine eindeutig erhöhten Werte auf. Das CO und das XCH_4 zeigen über Brandflächen höhere Werte als über unverbrannten Flächen.

Das XCH_4 ist im dreijährigen Mittel mit ca. 1728 ppb über verbrannten und unverbrannten Flächen etwa gleich. Jedoch ist es in den Sommermonaten über Brandflächen deutlich erhöht (Abb. 18). Diese mittleren erhöhten XCH_4 -Werte im Sommer über Brandflächen stammen überwiegend von relativ kleinen Brandflächen im Westsibirischen Tiefland und in Teilen der Steppen und Südlichen Taiga. Dies sind auch die Regionen, in den das XCH_4 eine hohe räumliche Variabilität aufweist (Abb. 12, 13). Ob diese räumliche Variabilität mit einzelnen erhöhten Werten tatsächlich auf die vielen kleinen Brandflächen zurückzuführen ist oder aber die XCH_4 -Werte über diesen Brandflächen zufällig eben wegen dieser Variabilität erhöht sind, ist unklar, weil bei Feuern insgesamt nur wenig CH_4 emittiert wird und in diesen Regionen auch andere Quellen wie Feuchtgebiete und Siedlungen vorhanden sind.

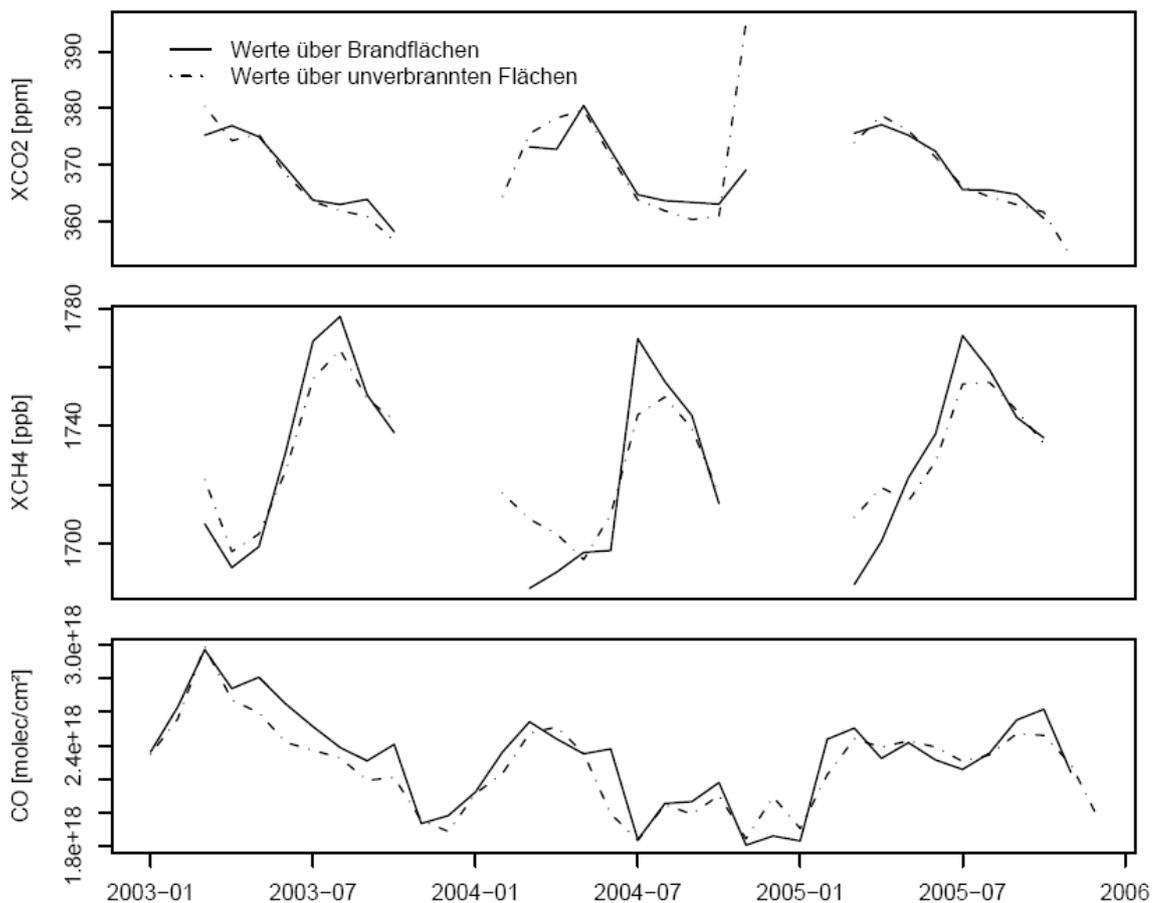


Abb. 18: Zeitreihen des atmosphärischen Kohlenstoffs über verbrannten und unverbrannten Flächen in Sibirien

Die erhöhten CO-Werte über Brandflächen hingegen können tatsächlich auf Emissionen zurückgeführt werden, die bei Feuern entstehen. Im dreijährigen Mittel beträgt das CO über Brandflächen $2,33e+18$ molec/cm² während es über unverbrannten Flächen $2,27e+18$ molec/cm² beträgt. Im Mai 2003 ist das CO über Brandflächen mit $2,81e+18$ molec/cm² deutlich höher als über unverbrannten Flächen mit $2,59e+18$ molec/cm².

Große Brandflächen traten besonders im Mai und Juni 2003 in der Baikalsee-Region auf. Abbildung 19 zeigt die Brandflächen des Jahres 2003 um den Baikalsee. Die Quadrate in Abbildung 19 sind die mittleren CO-Werte des Jahres 2003 von SCIAMACHY und repräsentieren jeweils eine Rasterzelle mit 0,5° Breite bzw. Länge. Es wird deutlich, dass das CO über den Brandflächen im Jahresmittel höher ist als über unverbrannten Flächen und dass die räumlichen Muster der Brandflächen und der CO-Werte gut übereinstimmen. Damit können einzelne regional erhöhte atmosphärische CO-Gehalte in Sibirien auf Brandereignisse zurückgeführt werden.

Die erhöhten CO-Werte über Brandflächen wie sie in der Zeitreihe in Abbildung 18 dargestellt sind, folgen dem saisonalen Trend des CO mit Maxima im Frühjahr und einem Absinken zum Sommer (Abb. 14). Um die zeitliche Dynamik des atmosphärischen CO in Abhängigkeit von Brandereignissen deutlicher darzustellen, wurden CO-Verhältnisse berechnet. Dies ist der Quotient aus dem mittleren CO eines Monats über Brandflächen bzw. unverbrannten Flächen und dem mittleren CO eines Monats in der Gesamtregion. Für das mittlere CO der Gesamtregion wurde das arithmetische Mittel des CO aus der Nördlichen, Mittleren und Südlichen Taiga sowie den Steppen gebildet, da in diesen Regionen die meisten Feuer auftraten. Die CO-Verhältnisse geben damit den Erhöhungs- bzw. Erniedrigungsfaktor des monatlichen CO über Brandflächen im Vergleich zur Gesamtregion an und bewirken, dass aus den Zeitreihen des CO über Brandflächen der saisonale Trend in der Gesamtregion entfernt wird. Die Zeitreihen der CO-Verhältnisse sowie die Größe der Brandflächen (BARTALEV et al. 2008) in den einzelnen Monaten zeigt Abbildung 20. Die Zeitreihe der Brandfläche und der CO-Verhältnisse über Brandflächen korrelieren mit einem Korrelationskoeffizienten nach Spearman von 0,49. Für diese Korrelationsanalyse wurde nicht der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient von Pearson verwendet, da dieser für nicht-normalverteilte Verteilungen (Brandfläche) und „verrauschte“ Zeitreihen weniger geeignet ist (SCHÖNWIESE 2006:232). Abbildung 20 verdeutlicht weiterhin, dass im Juli 2003 das CO über Brandflächen um 5 % gegenüber dem Mittelwert der Gesamtregion und im Juni 2004 um 11 % erhöht ist. Über unverbrannten Flächen hingegen liegt im Juni 2004 das CO 7 % unter dem Mittelwert. Die hohen CO-

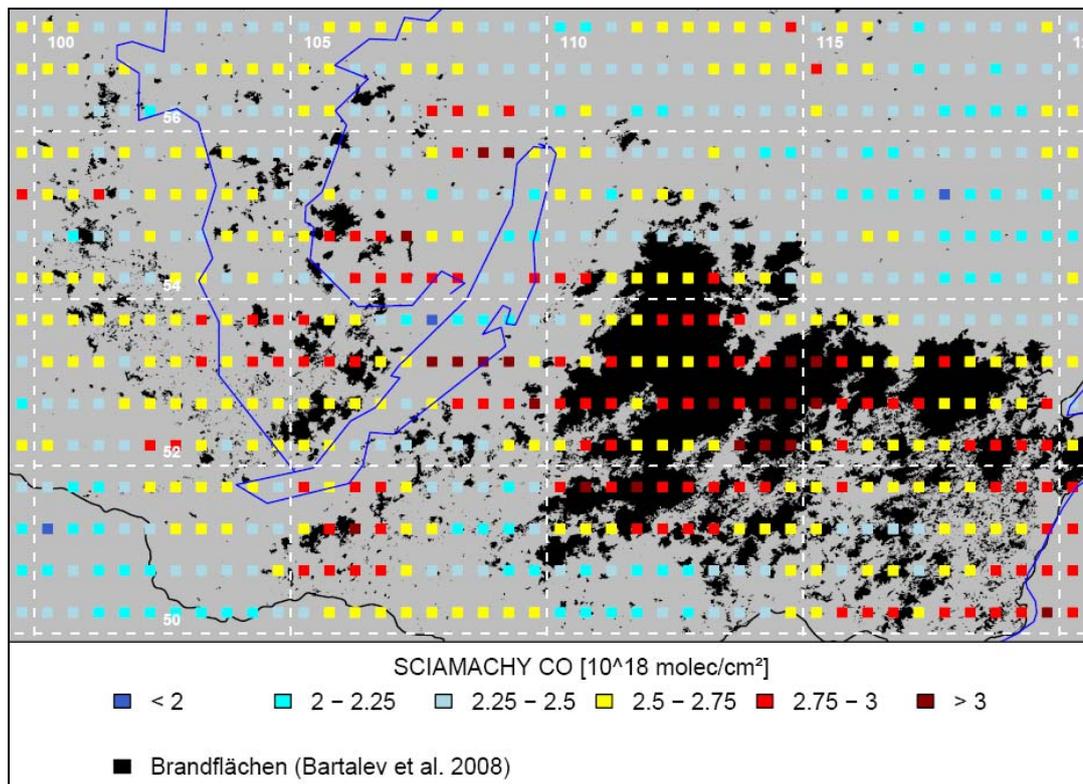


Abb. 19: Mittleres CO und Brandflächen des Jahres 2003 in der Baikalsee-Region

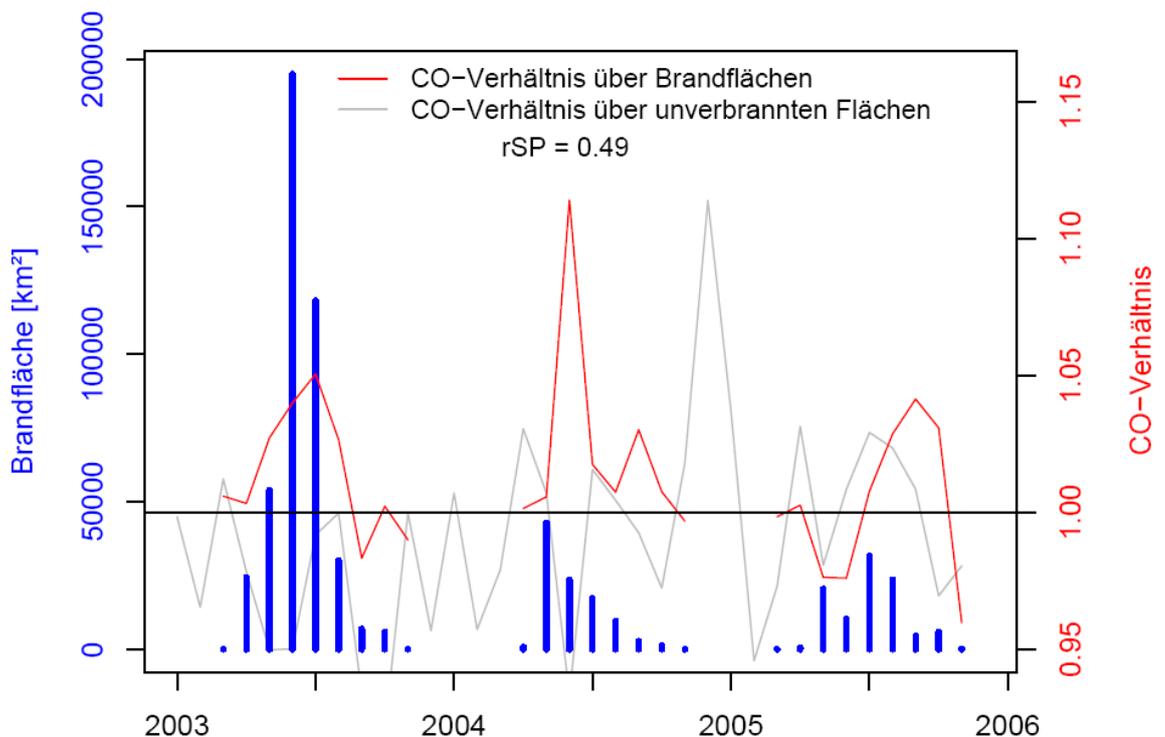


Abb. 20: Zeitreihenkorrelation zwischen CO-Verhältnis und der Größe der Brandflächen in Sibirien. Das CO-Verhältnis gibt den Faktor an, mit dem das mittlere monatliche CO über Brandflächen oder unverbrannten Flächen zum mittleren monatlichen CO in der Gesamtregion erhöht bzw. erniedrigt ist.

Verhältnisse über unverbrannten Flächen – z. B. im Winter 2004/2005 – stammen hingegen aus anderen Quellen wie anthropogen bedingten Verbrennungsprozessen. Diese Untersuchung des CO von SCIAMACHY mit den regionalen Brandflächen von BARTALEV et al. (2008) zeigte, dass das CO über Brandflächen erhöht ist, dass die räumlichen Muster der Brandflächen gut mit den räumlichen Mustern des CO übereinstimmen und dass CO-Verhältnisse über Brandflächen mit dem zeitlichen Auftreten und der Größe von Brandflächen korrelieren.

Es wurde weiterhin überprüft, ob der CO-Gehalt in der Atmosphäre mit der Größe der Brandfläche bzw. mit CO-Emissionen aus Feuern räumlich korreliert. Dazu wurden Daten aus GFED (VAN DER WERF et al. 2006) verwendet und auf die 0,5°-Auflösung der SCIAMACHY-Daten interpoliert. Die Ergebnisse dieser Korrelation für die Baikalsee-Region im Jahr 2003 zeigt Abbildung 21. Es korrelieren im Extrembrandjahr 2003 sowohl die Größe der Brandflächen als auch die CO-Emissionen aus Feuern mit dem Gehalt an CO in der Atmosphäre. In ganz Sibirien korrelieren im Jahr 2003 die GFED-CO-Emissionen mit dem CO von SCIAMACHY mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,22. Angesichts der Tatsache, dass das CO durch atmosphärische Transportprozesse von seinen eigentlichen Quellen verlagert wird und dass die interpolierten GFED-Daten nur eine Annäherung an die realen CO-Feuer-Emissionen darstellen, kann trotz der geringen Korrelationskoeffizienten geschlossen werden, dass CO-Emissionen erhöhte Konzentrationen in der Atmosphäre bewirken und SCIAMACHY in der Lage ist, diese regionalen CO-Quellen zu erfassen.

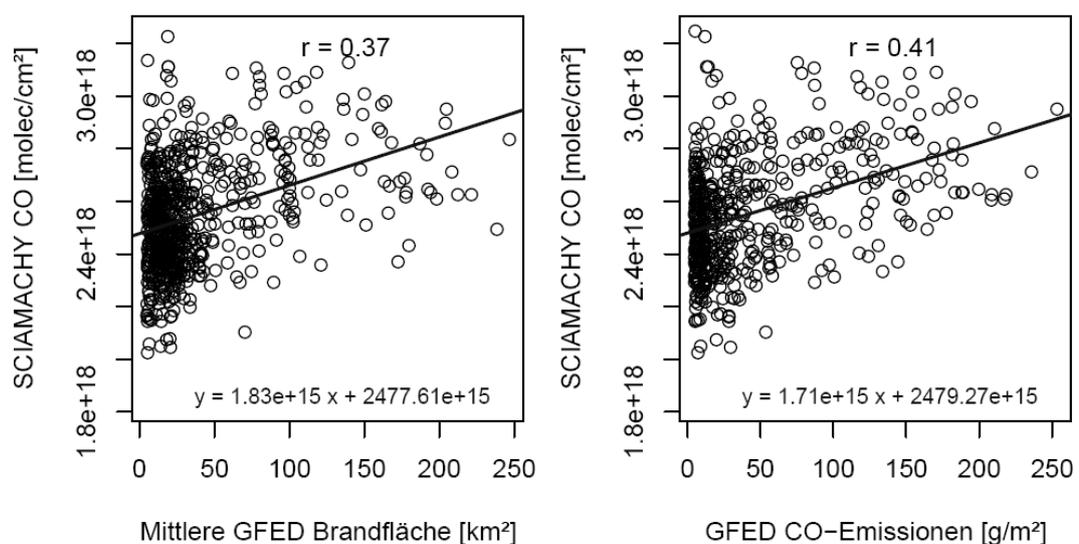


Abb. 21: Korrelationen zwischen der Größe von Brandflächen bzw. CO-Feuer-Emissionen aus GFED und mittlerem atmosphärischem CO von SCIAMACHY für das Jahr 2003 in der Baikalsee-Region (80 – 120°E und 50 – 57°N).

5.2.2 Feuchtgebiete

In dieser Arbeit wurde bereits festgestellt, dass das von SCIAMACHY gemessene XCH_4 über dem Westsibirischen Tiefland höher als in der Umgebung ist (Abb. 13). Das Westsibirische Tiefland zählt zu den größten Feucht- und Torfgebieten der Welt (SOLOMESHCH 2005:11, 39-44) und ist damit potentielle Quelle für Methan.

Abbildung 22 zeigt das mittlere SCIAMACHY XCH_4 über verschiedenen Feuchtgebietstypen des Westsibirischen Tieflandes und benachbarten Regionen. Insbesondere ist das XCH_4 über dem Ob-Irtysch-Becken sowie um den mittleren Jenissej erhöht. In Sibirien insgesamt ergaben sich Unterschiede im atmosphärischen XCH_4 -Mischungsverhältnis in Abhängigkeit vom Feuchtgebietstyp. So beträgt im Mittel der Jahre 2003 bis 2005 das XCH_4 über Mooren mit Torfschichten mächtiger als 50 cm etwa 1744 ppb, über Sümpfen, die mit Wald bedeckt sind, 1736 ppb, über Sümpfen mit Gras- und Buschland 1728 ppb, über Sümpfen mit Torfschichten geringer als 50 cm 1725 ppb, über anderen waldbestandenen Feuchtgebieten 1737 ppb und über anderen gras- und buschbedeckten Feuchtgebieten 1723 ppb. Im Vergleich dazu beträgt das mittlere XCH_4 über Regionen, die keine Feuchtgebiete umfassen, 1728 ppb. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus Kapitel 5.1.2, dass XCH_4 in der südlichen und mittleren Taiga höher als in der waldärmeren nördlichen Taiga und Tundra ist (Abb. 12). TARASOVA et al. (2006:5626) maßen entlang des Ob um ca. 10 % erhöhte CH_4 -Konzentrationen aufgrund von Emissionen aus Feuchtgebieten und natürlichen Gasquellen. Das XCH_4 von SCIAMACHY ist im Mittel über Mooren mit mächtigen Torfschichten, die sich insbesondere im Ob-Irtysch-Becken befinden (Abb. 22), im Vergleich zu den anderen Feuchtgebieten und Nicht-Feuchtgebieten nur um 0,9 %, jedoch mit 1744 ppb signifikant, erhöht.

Dies zeigt sich auch im zeitlichen Verlauf (Abb. 23), wo das XCH_4 über den Mooren insbesondere in den Sommermonaten deutlich höher als über den Nicht-Feuchtgebieten und den anderen Feuchtgebieten ist. Es ist bekannt, dass die Methanbildung in Feuchtgebieten durch methanbildende Bakterien mit der Bodentemperatur ansteigt und das dies einer der Hauptfaktoren für die Methanemissionen aus Feuchtgebieten ist (GLAGOLEV et al. 2008:141). Daher kann insbesondere das Abtauen des Permafrostes und der damit verbundene Anstieg der Bodentemperatur eine verstärkte Emission von Methan bewirken, was im Zuge der globalen Erwärmung eine positive Rückkopplung im Klimasystem bewirkt (HEIMANN & REICHSTEIN 2008:290f.).

Um aus der Erhöhung des XCH_4 in der Atmosphäre über den Mooren jedoch auf deren Emissionen zu schließen, ist der Einsatz atmosphärischer Transportmodelle (TM) nötig

(MEIRINK et al. 2006:1275) (Kap. 5.3), da dabei der Aufbau und chemisch-physikalische Eigenschaften der Atmosphäre berücksichtigt werden müssen.

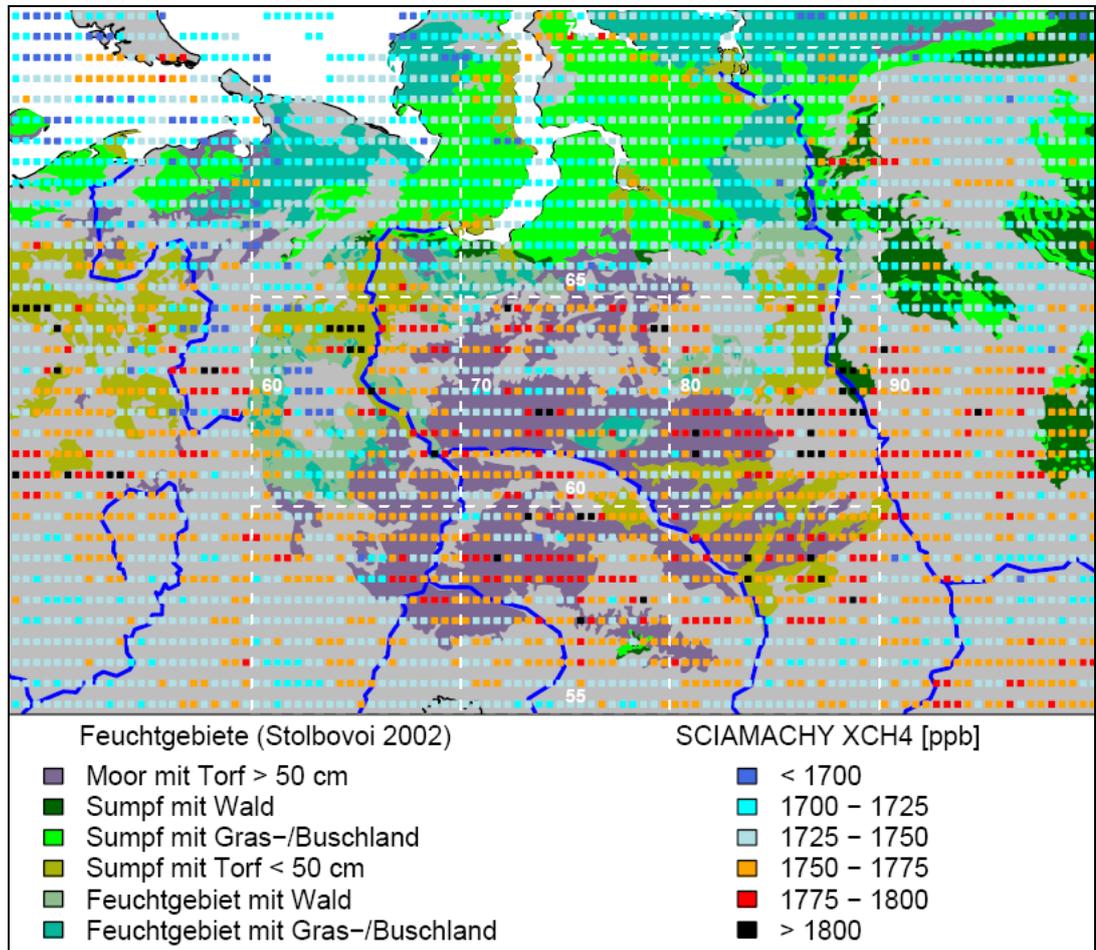


Abb. 22: Feuchtgebiete in Westsibirien und mittleres XCH₄ von 2003 bis 2005

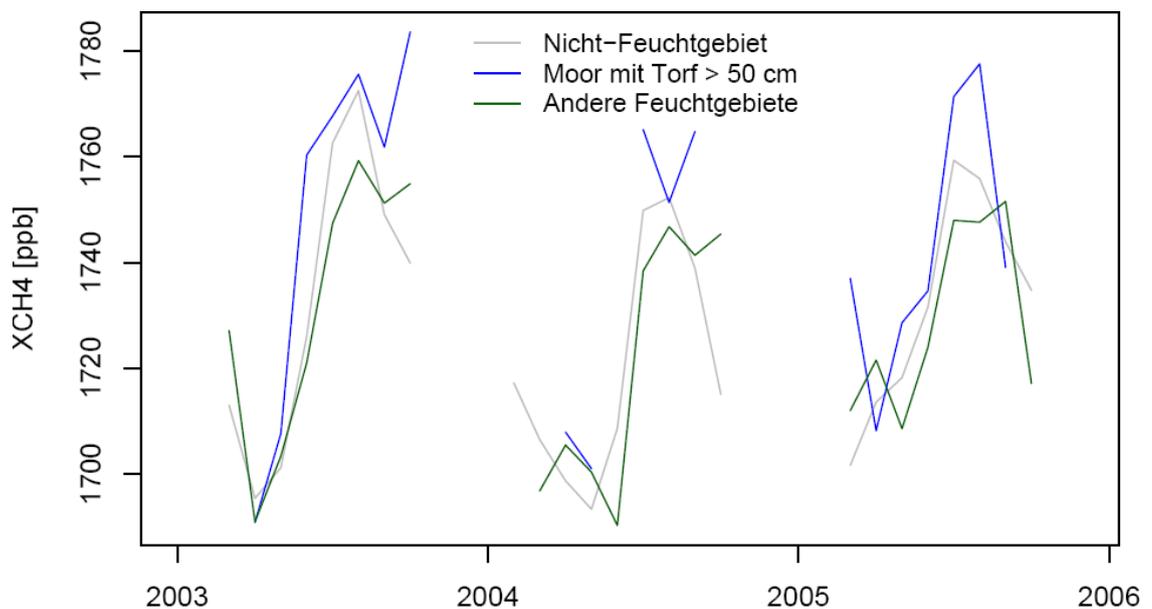


Abb. 23: Zeitreihen des XCH₄ in Sibirien über Feuchtgebieten

5.2.3 Anthropogene Regionen

Anthropogen bedingte Verbrennungsprozesse in Siedlungen, Industrieanlagen oder Erdgas- bzw. Erdölförderstätten sind eine Hauptquelle für atmosphärisches CO₂ und CO. Abbildung 24 zeigt den mittleren CO-Gehalt des Jahres 2004 in Westsibirien sowie anhand der DMSP-OLS-Lichter anthropogene Flächen wie Siedlungen oder Flammen von Erdöl- und Erdgasförderstätten. Insbesondere in der Region Surgut und entlang des Ob stammen die Lichter von Gasflammen, da diese Region nur dünn besiedelt ist. Im Süden hingegen stammen die Lichter eher von Siedlungen und Großstädten wie Jekaterinburg, Tscheljabinsk, Tjumen und Omsk.

Das CO ist insbesondere in den südlichen dichter besiedelten Regionen, nördlich von Surgut und westlich des Irtytsch und unteren Ob erhöht (Abb. 24). Dieses Muster stimmt grob mit den anthropogenen Regionen überein, wenn auch punktuelle Erhöhungen des atmosphärischen CO kaum zu einzelnen Lichtquellen in Beziehung gesetzt werden können. Insgesamt ist jedoch der Anteil des CO in diesen anthropogenen Regionen wesentlich höher als in anthropogen gering beeinflussten Regionen wie im Ural oder in den Feuchtgebieten im Ob-Irtytsch-Becken. Diese Erhöhung ist auf Verbrennungsprozesse bei der Energieerzeugung, Industrie und im Transportwesen zurückzuführen. Jedoch ist das CO in den verstädterten Regionen zwischen Perm und Ufa deutlich geringer als in Siedlungsgebieten östlich des Urals.

Das mittlere CO ist ebenfalls für das Jahr 2004 in der Region zwischen Bratsk und Ust-Ilimsk an der Angara in Abbildung 25 dargestellt. Dabei fallen insbesondere die zwei Rasterzellen mit erhöhten CO-Werten über Ust-Ilimsk auf. Das mittlere CO dieser zwei Ust-Ilimsk-Zellen beträgt im Jahr 2004 $2,42e+18$ molec/cm² und in den zehn Nachbar-Rasterzellen („Umgebung“) nur $2,13e+18$ molec/cm². Bei einer Genauigkeit von $5e+16$ molec/cm² eines CO-Jahresmittels (BUCHWITZ et al. 2007a:2409) ist dieser Unterschied signifikant. Auch im dreijährigen Mittel von 2003 bis 2005 ist das CO über Ust-Ilimsk mit $2,49e+18$ molec/cm² im Vergleich zur Umgebung mit $2,35e+18$ molec/cm² signifikant höher. Damit ist der CO-Gehalt in der Atmosphäre über Ust-Ilimsk um ca. 3 % im Vergleich zur Umgebung erhöht. Eine mögliche Ursache für diese Erhöhung könnten CO-Emissionen aus großen Betrieben der Holzverarbeitenden Industrie sein, welche in der Großstadt Ust-Ilimsk angesiedelt ist (Abb. 25). Dieses Beispiel soll verdeutlichen, dass trotz des großräumigen regionalen Musters des CO, welches aufgrund atmosphärischer Prozesse nicht immer eindeutig zu anthropogenen Punktquellen in Bezug gesetzt werden kann, die SCIAMACHY CO-Daten dennoch sensitiv gegenüber regionalen Emissionen aus einzelnen Städten sind (BUCHWITZ et al. 2007a:2409f.).

Das XCO₂ kann nicht eindeutig zu anthropogenen Kohlenstoffquellen in Beziehung gesetzt werden. In Abbildung 26 ist das mittlere XCO₂ der Jahre 2003 bis 2005 über anthropogenen Regionen im Süden Sibiriens dargestellt. Darin zeigt sich zwar, dass Regionen mit erhöhten XCO₂-Anteilen zwischen 365 und 375 ppm grob mit der Ver-

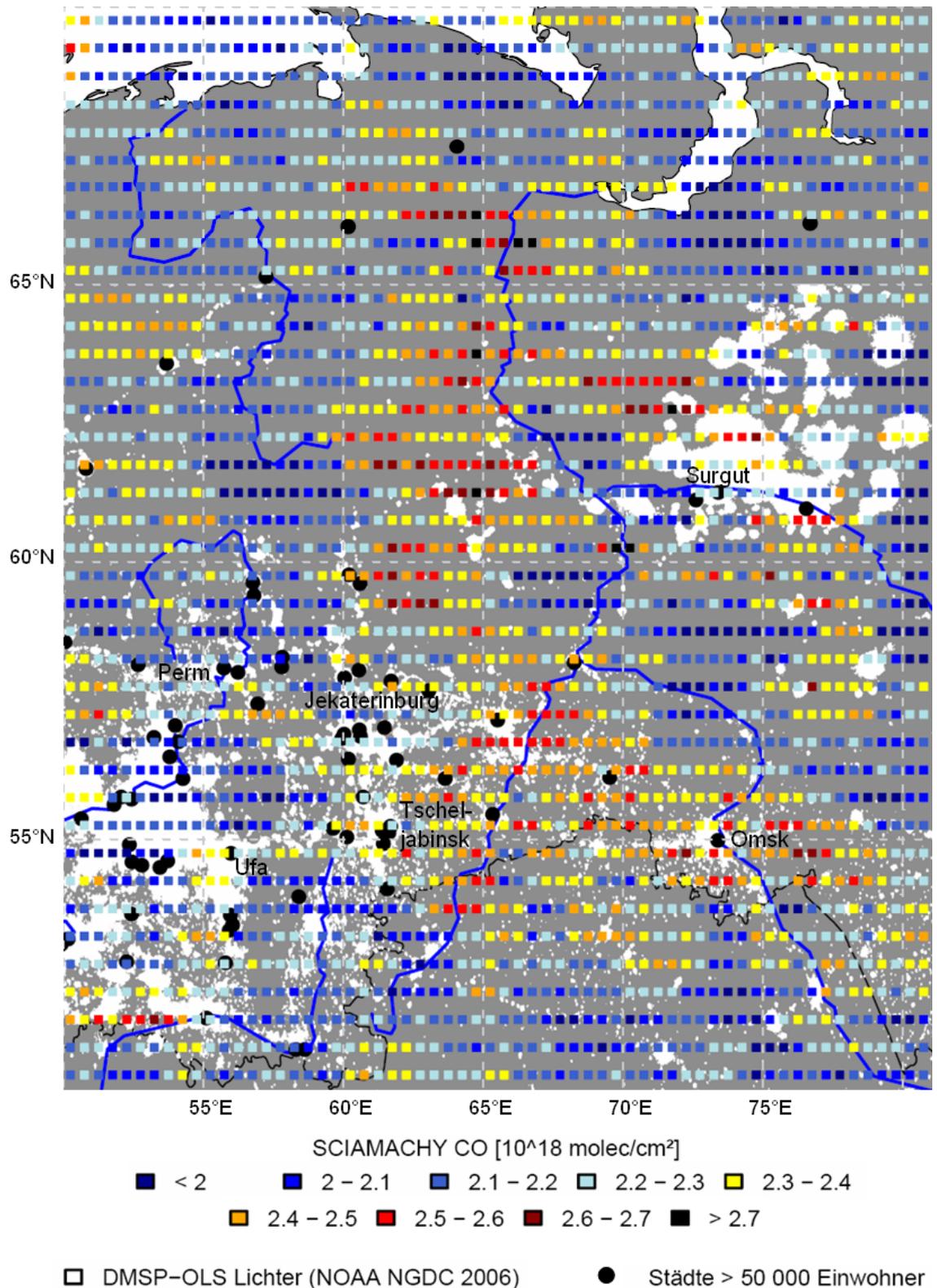


Abb. 24: Anthropogene Regionen in Westsibirien und mittleres CO des Jahres 2004

teilung von Siedlungsgebieten (Nowosibirsk, Kusnezbecken, Krasnojarsk) übereinstimmen. Im Gegensatz dazu werden weniger dicht besiedelte Gebiete wie die Mittlere Taiga oder das Ob-Irtysch-Becken als Regionen mit verringertem atmosphärischem XCO₂-Anteil (meist < 365 ppm) sichtbar. Ob erhöhte XCO₂-Werte von SCIAMACHY über Siedlungsflächen jedoch tatsächlich auf CO₂-Emissionen zu-

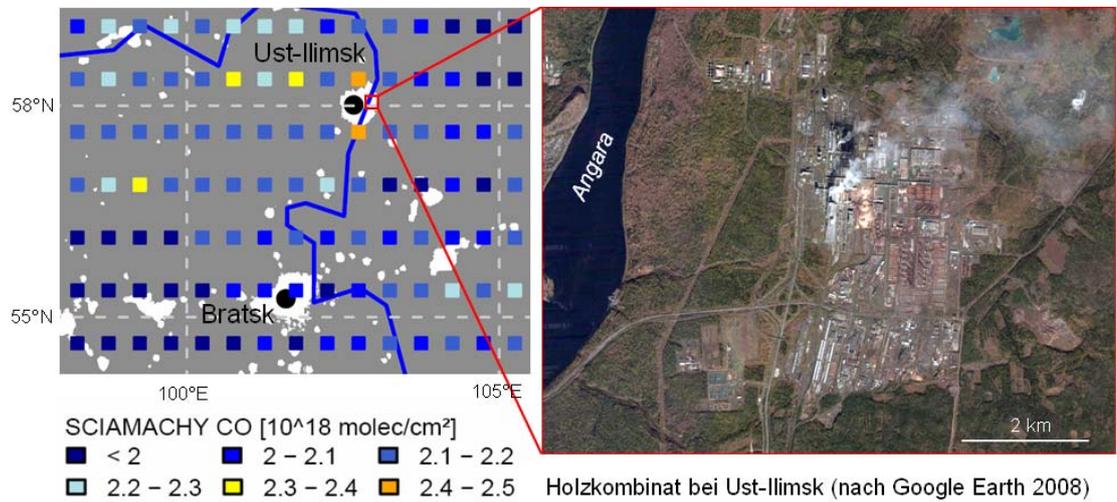


Abb. 25: Mittleres CO des Jahres 2004 in der Region Bratsk/Ust-Ilimsk

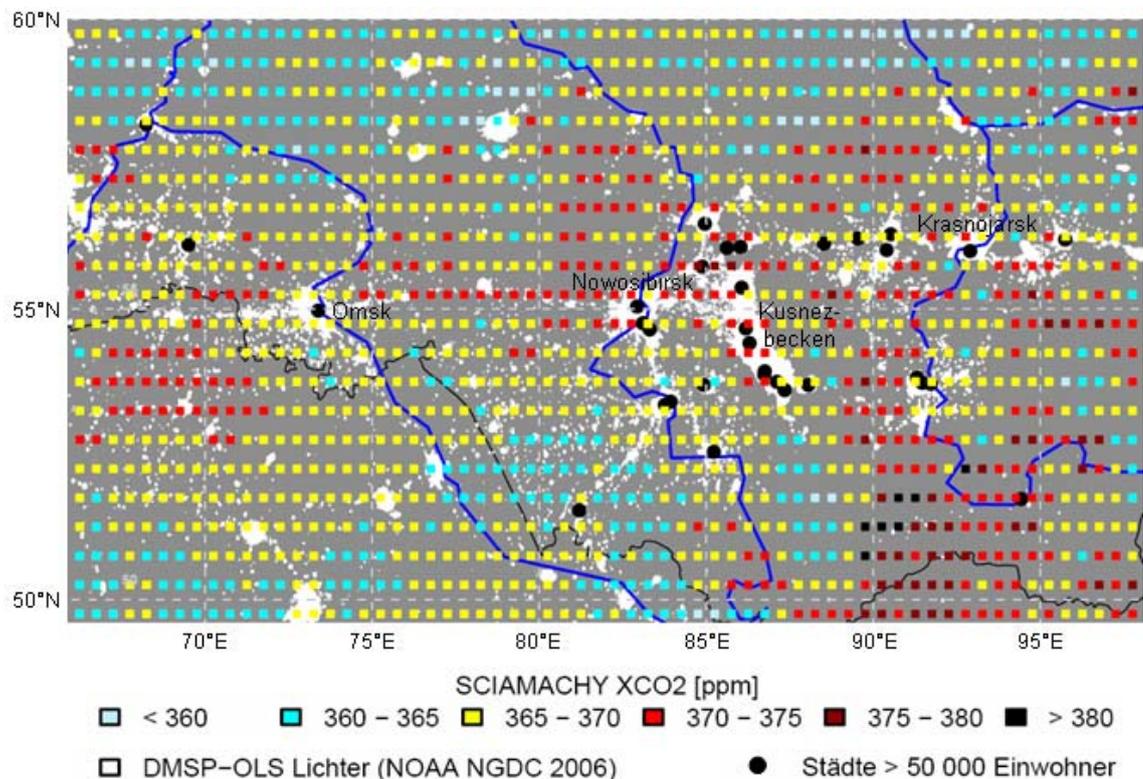


Abb. 26: Anthropogene Regionen im Süden Sibiriens und mittleres XCO₂ von 2003 bis 2005

rückgeführt werden können, wie das SCHNEISING et al. (2008b:5504f., 5536) aus um 4 ppm erhöhten XCO₂-Werten über Köln, den Niederlanden und Luxemburg schlussfolgern, ist umstritten. Nach Modellergebnissen von HOUWELING (2008:S2531f.) können anthropogene Emissionen in dieser Region nur eine maximale Erhöhung von 1 ppm in einer CO₂-Atmosphärensäule bewirken. Er kritisiert weiterhin, dass aufgrund des Qualitätsfilters viele Messungen entfernt werden und bei der Mittelwertbildung der übrigen Messungen Einflüsse der Biosphäre auf die atmosphärische CO₂-Konzentration überwiegen würden. Außerdem führt er diese Erhöhungen auch auf Fehler im WFM-DOAS-Algorithmus zurück, die durch Aerosole verursacht wurden. Die hohe Variabilität von Aerosolen über Siedlungen bewirke fehlerhaft erhöhte XCO₂-Mischungsverhältnisse, da der verwendete Filter gegenüber Aerosolen in der urbanen Grenzschicht nicht sensitiv ist (HOUWELING 2008:S2532f.).

Ausgehend von dieser Argumentation könnten Aerosole auch die Ursache für erhöhte XCO₂-Werte im Süden Sibiriens und im Norden der Mongolei sein (Abb. 26). Diese Regionen haben eine geringe Bevölkerungsdichte, aber aufgrund der geringen Vegetationsbedeckung könnte der Anteil der Aerosole in der Atmosphäre höher sein, was möglicherweise zu erhöhten XCO₂-Werten führt.

5.3 Kohlenstoffemissionen aus SCIAMACHY und inverse Modellierung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde diskutiert, ob der atmosphärische Gehalt des Kohlenstoffdioxids, -monoxids und Methans von SCIAMACHY über Kohlenstoffquellen wie Waldbränden, Feuchtgebieten oder anthropogenen Regionen erhöht ist. Dabei konnte das CO besser zu regionalen Quellen in Beziehung gesetzt werden als das XCH₄ und XCO₂. Die Ursachen dafür liegen vermutlich im Anteil, in der Durchmischung und Lebenszeit dieser Gase in der Atmosphäre. Da CH₄ und CO₂ in der Atmosphäre in größeren Anteilen vorkommen, langlebiger und damit global stärker durchmischt sind als CO, haben regionale Kohlenstoffemissionen nur einen geringen Einfluss auf den Gehalt dieser Gase in der Atmosphäre. Daher wurden durch SCHNEISING et al. (2008a, b) hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Messungen von SCIAMACHY gestellt, um gegenüber geringen regionalen Unterschieden im CO₂ und CH₄-Gehalt der Atmosphäre sensitiv zu sein. CO hingegen mit seinen geringen Anteilen und seiner kurzen Lebenszeit von nur zwei Monaten (HOBBS 2000:18) ist schlechter durchmischt und damit wesentlich von regionalen Emissionen abhängig.

Unsicherheiten im WFM-DOAS-Algorithmus machen es zukünftig nötig, diese Untersuchung mit möglichen neuen Versionen dieses Algorithmus zu wiederholen bzw.

die regionalen Ergebnisse für Sibirien mit Daten aus anderen Ableitungsalgorithmen für SCIAMACHY-Messungen (STRAUME et al. 2005, BARKLEY et al. 2007) zu vergleichen. Dennoch konnten über einigen Kohlenstoffquellen realistische Erhöhungen des atmosphärischen Kohlenstoffgehalts nachgewiesen werden. Daher ist es möglich, aus diesen Kohlenstoffgehalten in der Atmosphäre Emissionen abzuleiten.

In diesem Kapitel wird theoretisch kurz erörtert, wie aus den Kohlenstoffgehalten in der Atmosphäre, die SCIAMACHY erfasst, mit Ansätzen der inversen Modellierung auf Kohlenstoffemissionen aus Prozessen auf der Landoberfläche geschlossen werden kann. Dabei wird auch auf Probleme dieser Methoden eingegangen.

Aus den Mischungsverhältnissen von Gasen in der Atmosphäre, wie sie z. B. von Bodenstationen oder flächendeckend von SCIAMACHY bereitgestellt werden, können Flüsse (Emissionen) von Spurengasen an der Erdoberfläche abgeleitet werden, indem berücksichtigt wird, wie diese in der Atmosphäre transportiert wurden. Dazu werden atmosphärische Transportmodelle (TM oder CTM, *chemical transport model*) eingesetzt, was auch als inverse Modellierung bezeichnet wird (HOUWELING et al. 2004:524). Im Zusammenhang mit SCIAMACHY-Kohlenstoffmessungen sind dafür bisher zwei Studien relevant: HOUWELING et al. (2004) simulierten synthetische CO₂-Messungen von SCIAMACHY, die sie für die inverse Modellierung von CO₂-Flüssen an der Erdoberfläche nutzten. Ziel war dabei die Bewertung des Einflusses der Genauigkeit der SCIAMACHY-Messungen auf die Ergebnisse der inversen Modellierung (HOUWELING et al. 2004:537). In der Studie von MEIRINK et al. (2006) wurden CH₄-Daten von SCIAMACHY in einer inversen Modellierung genutzt, um die Sensitivität der Datengenauigkeit und von Modellparametern auf die Modellergebnisse (Emissionen) zu beurteilen.

Die atmosphärischen Transportmodelle beruhen auf Modellen der numerischen Wettervorhersage, wobei meteorologische Felder über Wind, Bodendruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Gehalt flüssigen und gefrorenen Wassers, Wolkenbedeckung und Niederschlag aus Stations- und Satellitenmessungen eingehen und Prozesse wie Advektion, Konvektion, Diffusion an der atmosphärischen Grenzschicht, trockener und feuchter Niederschlag und die Troposphärenchemie berücksichtigt werden (MEIRINK et al. 2006:1276, 1277). Das von HOUWELING et al. (2004:525) verwendete TM hat eine Auflösung von 8° * 10° mit neun vertikalen Ebenen von der Erdoberfläche bis an die Obergrenze der Atmosphäre. Das von MEIRINK et al. (2006:1277) genutzte TM hat eine Auflösung von 3° * 2° und 25 Ebenen. Neben dem Atmosphärentransport gehen in der inversen Modellierung der (synthetischen) SCIAMACHY-Daten auch A-priori-

Annahmen über Kohlenstoffemissionen ein. Aus diesen Eingangsdaten wird eine objektive Funktion minimiert, wobei das Ergebnis die Kohlenstoffflüsse an der Erdoberfläche sind (HOUWELING et al. 2004:525, MEIRINK et al. 2006:1278).

Problematisch bei diesen Ansätzen der inversen Modellierung sind die Unsicherheiten und teilweise beträchtlichen Fehler (MEIRINK et al. 2004:1289), die das TM in der Simulation atmosphärischer Prozesse aufweist. Andere Unsicherheiten liegen in den SCIAMACHY-Daten. Um Emissionen abzuleiten, müssen diese Genauigkeiten (*precision*) von weniger als 1 % für CO₂ (HOUWELING et al. 2004:537) bzw. 1 bis 2 % für CH₄ (MEIRINK et al. 2006:1289) aufweisen. Dazu werden SCIAMACHY-Pixel ausgefiltert, die beispielsweise durch Wolken bedeckt sind oder beim CO₂ über Wasser liegen. Dies bewirkt aber wiederum Unsicherheiten bzw. Fehler in den abgeleiteten Kohlenstoffemissionen z. B. über Ozeanen, da dort dann Messungen fehlen (HOUWELING et al. 2004:531f., MEIRINK et al. 2006:1289). Ein weiteres Problem insbesondere für die Schätzung regionaler Kohlenstoffemissionen ist die grobe Auflösung der TM. Zwar ist der Einsatz mesoskaliger TM möglich, die Auflösungen bis 500 km erlauben (HOUWELING et al. 2004:535, MEIRINK et al. 2006:1289), jedoch ist diese Auflösung für die Analyse regionaler Kohlenstoffemissionen z. B. aus Waldbränden immer noch gering.

6 Zusammenfassung

Die Ökosysteme Sibiriens wirken sowohl als Kohlenstoffquelle als auch -senke. Über die Nettoprimärproduktion entziehen sie der Atmosphäre Kohlenstoffdioxid, jedoch wird beispielsweise bei Waldbränden oder aus Feuchtgebieten Kohlenstoff emittiert. Die Untersuchung der Ökosysteme Sibiriens, insbesondere der borealen Wälder, bezüglich ihrer Funktion im globalen Kohlenstoffkreislauf ist für das Verständnis des globalen Klimasystems notwendig.

Ziel dieser Arbeit war die Analyse der Gase Kohlenstoffdioxid, -monoxid und Methan in der Atmosphäre in Sibirien, die durch den Sensor SCIAMACHY auf dem Satelliten ENVISAT erfasst werden können, hinsichtlich der räumlichen Muster, zeitlichen Dynamik und möglicher regional erhöhter Konzentrationen aufgrund von Emissionen. Dazu wurden Daten über Anteile dieser Gase für die Jahre 2003 bis 2005 genutzt, die mittels des WFM-DOAS-Algorithmus aus den spektralen Messungen des Sensors SCIAMACHY abgeleitet wurden. Hinsichtlich der raum-zeitlichen Muster ergeben sich folgende Kernaussagen:

- (1) Der atmosphärische CO₂-Anteil ist in Sibirien mit 367,2 ppm geringer als im globalen Durchschnitt von 370,1 ppm. Er stieg jedoch von 365,9 ppm im Jahr 2003 auf 368,7 ppm im Jahr 2005 an. Das CO₂ weist einen Zyklus mit Maxima im Frühjahr und Minima im Sommer auf. Regionen mit erhöhten CO₂-Anteilen in Sibirien sind die Baikalsee-Region, Teile Ostsibiriens und punktuell Regionen im Bereich der Taiga.
- (2) Das atmosphärische CH₄ ist mit 1737,6 ppb in Sibirien deutlich höher als im globalen Mittel mit 1702,9 ppb. Es zeigt eine ausgeprägte saisonale Dynamik mit Maxima im Sommer und Minima im Frühjahr. Insbesondere ist es in der Südlichen Taiga bzw. im Westsibirischen Tiefland erhöht, während die geringsten CH₄-Werte in den Gebirgen Südsibiriens und im Ural auftreten.
- (3) Das CO ist in Sibirien mit 2,35 molec/cm² im Vergleich zum globalen Mittel mit 2,14 molec/cm² höher. Aufgrund seiner kurzen Lebenszeit in der Atmosphäre ist sein Anteil wesentlich von regionalen Quellen abhängig. Regionen mit erhöhten CO-Anteilen sind in Sibirien Gebiete entlang des Ob und Irtysh und dicht besiedelte Regionen im Westen und Süden Sibiriens.

Trotz dieser Aussagen haben die SCIAMACHY-Daten auch einige Probleme, die bei ihrer Analyse für Sibirien berücksichtigt werden müssen:

- (4) Das CO₂ und das CH₄ weisen vom Spätherbst bis zum Frühjahr große Datenlücken auf, die auf der Ausfilterung von Messungen aufgrund von Wolken- und Schneebedeckung, Aerosolen oder einer fehlerhaften Ableitung der Daten aus den spektralen Messungen beruhen. Dies kann zu einer Unterschätzung der Konzentrationen bzw. zu einer Fehlinterpretation zeitlicher Mittelwerte führen.
- (5) Das CH₄ weist im Jahr 2005 eine größere Variabilität der Werte auf, was auf ein stärkeres Rauschen der Messungen zurückzuführen ist.
- (6) Die Messungen des CO sind im Jahr 2003 durch eine Eisschicht auf dem Sensor und im Jahr 2005 durch fehlerhafte und ausgefallene Detektoren beeinflusst.

Die Untersuchung der Sensitivität der SCIAMACHY-Daten gegenüber regionalen Kohlenstoffemissionen ergibt folgende Aussagen:

- (7) Der CO-Gehalt in der Atmosphäre wird in Sibirien wesentlich von Waldbränden beeinflusst. CO-Emissionen aus Waldbränden korrelieren mit dem CO-Gehalt in der Atmosphäre. Die relative Erhöhung des CO korreliert weiterhin mit der Größe und dem zeitlichen Auftreten von Brandflächen. Damit ist SCIAMACHY sehr sensitiv gegenüber CO-Emissionen aus regionalen Brandereignissen.

- (8) Der CH₄-Anteil ist über Feuchtgebieten wesentlich höher als über anderen Regionen. Insbesondere über Mooren mit mächtigen Torfschichten ist das CH₄ mit 1744 ppb deutlich höher als über Regionen ohne Feuchtgebieten (1728 ppb). Die Moore des Westsibirischen Tieflandes sind eine der natürlichen CH₄-Hauptquellen.
- (9) Über Siedlungsgebieten und Erdölförderstätten konnten erhöhte Anteile von CO₂ und CO festgestellt werden. Regionale Erhöhungen des CO können sogar auf einzelne Städte zurückgeführt werden.

Aufgrund der Sensitivität von SCIAMACHY gegenüber regional erhöhten Kohlenstoffkonzentrationen können Emissionen mit Hilfe atmosphärischer Transportmodelle ermittelt werden, deren Anwendung aber noch mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Mit SCIAMACHY ist es möglich, räumliche und zeitliche Muster sowie Trends von Kohlenstoff in der Atmosphäre zu beobachten und damit dieses Element des Klimasystems zu überwachen.

Literatur

- ALEXEYEV, V.A., R.A. BIRDSEY, V.D. STAKANOV & I.A. KOROTKOV (2000): Carbon Storage in the Asian Boreal Forests of Russia. In: KASISCHKE, E.S. & B.J. STOCKS (eds.): Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Ecological Studies 138. New York: Springer, 239-257.
- ANDREAE, M.O. & P. MERLET (2001): Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. – *Global Biogeochemical Cycles* 15, 955-966.
- BARKLEY, M.P., P.S. MONKS, A.J. HEWITT, T. MACHIDA, A. DESAI, N. VINNICHENKO, T. NAKAZAWA, M. YU ARSHINOV, N. FEDOSEEV & T. WATAI (2007): Assessing the near surface sensitivity of SCIAMACHY atmospheric CO₂ retrieved using (FSI) WFM-DOAS. – *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 3597-3619.
- BARTALEV, S.A., V.A. EGOROV & E.A. LOUPIAN (2008): MODIS data derived burnt area for Russia. Russian Academy of Sciences' Space Research Institute. Persönliche Mitteilung (2008-07-14).
- BARTALEV, S.A., V.A. EGOROV, E.A. LOUPIAN & I.A. UVAROV (2007): Multi-year circumpolar assessment of the area burnt in boreal ecosystems using SPOT-VEGETATION. – *International Journal of Remote Sensing* 28, 6, 1397-1404.
- BARTELME, N. (2005⁴): Geoinformatik. Modelle. Strukturen. Funktionen. Berlin: Springer.
- BEER, C, W. LUCHT, C. SCHMULLIUS & A. SHVIDENKO (2006): Small net carbon dioxide uptake by Russian forests during 1981-1999. – *Geophysical Research Letters* 33, L15403.
- BOVENSMANN, H., J.P. BURROWS, M. BUCHWITZ, J. FRERICK, S. NOËL, V.V. ROZANOV, K.V. CHANCE, & A.P.H. GOEDE (1999): SCIAMACHY: Mission Objectives and Measurement Modes. – *Journal of the Atmospheric Sciences* 56, 2, 127-150.
- BUCHWITZ, M., R. DE BEEK, S. NOËL, J.P. BURROWS, H. BOVENSMANN, H. BREMER, P. BERGAMASCHI, S. KÖRNER & M. HEIMANN (2005): Carbon monoxide, methane and carbon dioxide columns retrieved from SCIAMACHY by WFM-DOAS: year 2003 initial data set. – *Atmospheric Chemistry and Physics* 5, 3313-3329.
- BUCHWITZ, M., I. KHLYSTOVA, H. BOVENSMANN & J.P. BURROWS (2007a): Three years of global carbon monoxide from SCIAMACHY: comparison with MOPITT and first results related to the detection of enhanced CO over cities. – *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 2399-2411.

- BUCHWITZ, M., O. SCHNEISING, J.P. BURROWS, H. BOVENSMANN, M. REUTER & J. NOTHOLT (2007b): First direct observations of the atmospheric CO₂ year-to-year increase from space. – *Atmospheric Chemistry and Physics* 7, 4249-4256.
- DEETER, M.N., L.K. EMMONS, G.L. FRANCIS, D.P. EDWARDS, J.C. GILLE, J.X. WARNER, B. KHATTATOV, D. ZISKIN, J.-F. LAMARQUE, S.-P. HO, V. YUDIN, J.-L. ATTÍE, D. PACKMAN, J. CHEN, D. MAO & J.R. DRUMMOND (2003): Operational carbon monoxide retrieval algorithm and selected results for the MOPITT instrument. – *Journal of Geophysical Research* 108, D14, 4399, 1-11.
- DENMAN, K.L., G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P. CIAIS, P.M. COX, R.E. DICKINSON, D. HAUGLUSTAINE, C. HEINZE, E. HOLLAND, D. JACOB, U. LOHMANN, S. RAMACHANDRAN, P.L. DA SILVA DIAS, S.C. WOFSY & X. ZHANG (2007): Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: University Press, 499-588.
- ELVIDGE, C.D., K.E. BAUGH, E.A. KIHN, H.W. KROEHL & E.R. DAVIS (1997): Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system. – *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63, 8, 727-734.
- FORSTER, P., V. RAMASWAMY, P. ARTAXO, T. BERNTSEN, R. BETTS, D.W. FAHEY, J. HAYWOOD, J. LEAN, D.C. LOWE, G. MYHRE, J. NGANGA, R. PRINN, G. RAGA, M. SCHULZ & R. VAN DORLAND (2007): Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: SOLOMON, S., D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR & H.L. MILLER (eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: University Press, 129-234.
- FRÄNZLE, O. (2001): Biogeochemische Kreisläufe. In: BRUNOTTE, E., H. GEBHARDT, M. MEURER, P. MEUSBURGER & J. NIPPER (Hrsg.): *Lexikon der Geographie. Erster Band*. Heidelberg: Spektrum, 168-169.
- GIGLIO, L., G.R. VAN DER WERF, J.T. RANDERSON, G.J. COLLATZ & P. KASIBHATLA (2006a): Global estimation of burned area using MODIS active observations. – *Atmospheric Chemistry and Physics* 6, 957-974.
- GLAGOLEV, M.V., E.A. GOLOVATSKAYA & N.A. SHNYREV (2008): Greenhouse Gas Emission in West Siberia. – *Contemporary Problems of Ecology* 1, 1, 136-146.

- GOLDAMMER, J.G., A. SUKHININ & I. CSISZAR (2003): The Current Fire Situation in the Russian Federation: Implications for Enhancing International and Regional Cooperation in the UN Framework and the Global Programs on Fire Monitoring and Assessment. – International Forest Fire News 29, 89-111.
- GOODY, R.M. & Y.L. YUNG (1989²): Atmospheric Radiation. Theoretical Basis. Oxford: University Press.
- GOOGLE EARTH (2008): Bildausschnitt Ust-Ilimsk. Google Earth 4.2. (Stand: 2008) (Zugriff: 2008-07-07).
- GRACE, J. (2004): Understanding and managing the global carbon cycle. – Journal of Ecology 92, 189-202.
- HANSEN, M.C., R.S. DEFRIES, J.R.G. TOWNSHEND, M. CARROLL, C. DIMICELI & R.A. SOHLBERG (2003): Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. – Earth Interactions 7, 10, 1087-3562.
- HEIMANN, M. & M. REICHSTEIN (2008): Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. – Nature 451, 289-292.
- HOBBS, P.V. (2000): Introduction to Atmospheric Chemistry. Cambridge: University Press.
- HOUWELING, S. (2008): Interactive comment on “Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 1: Carbon dioxide” by O. Schneising et al. – Atmospheric Chemistry and Physics Discussions 8, S2530-S2534, <<http://www.cosis.net/copernicus/EGU/acpd/8/S2530/acpd-8-S2530.pdf>> (Stand: 2008-05-12) (Zugriff: 2008-07-16).
- HOUWELING, S., F.-M. BREON, I. ABEN, C. RÖDENBECK, M. GLOOR, M. HEIMANN & P. CIAIS (2004): Inverse modeling of CO₂ sources and sinks using satellite data: a synthetic inter-comparison of measurement techniques and their performance as a function of space and time. – Atmospheric Chemistry and Physics 4, 523-538.
- IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) (ed.) (2002): Land Ressources of Russia. Version 1.1. <http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/index.htm> (Stand: 2002) (Zugriff: 2008-06-06).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (ed.) (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf: IPCC.
- IUP/IFE (Institut für Umweltphysik/Institut für Fernerkundung der Universität Bremen): SCIAMACHY WFM-DOAS: Main page. <<http://www.iup.uni->

- bremen.de/sciamachy/NIR_NADIR_WFM_DOAS/> (Stand: 2008-05-28) (Zugriff: 2008-06-08).
- JAIN, A.K. & K.A.S. HAYHOE (2003): Global Air Pollution Problems. In: HEWITT, C.N. & A.V. JACKSON (eds.): Handbook of Atmospheric Science. Principles and Applications. Oxford: Blackwell Publishing.
- JUSTICE, C.O., L. GIGLIO, S. KORONTZI, J. OWENS, J.T. MORISETTE, D. ROY, J. DESCLOITRES, S. ALLEAUME, F. PETITCOLIN, Y. KAUFMAN (2002): The MODIS fire products. – Remote Sensing of Environment 83, 244-266.
- KASISCHKE, E.S. (2000): Boreal Ecosystems in the Global Carbon Cycle. In: KASISCHKE, E.S. & B.J. STOCKS (eds.): Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Ecological Studies 138. New York: Springer, 19-30.
- KEELING, C.D., T.P. WHORF, M. WAHLEN & J. VAN DER PLICHT (1995): Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. – Nature 375, 666-670.
- KIRAN CHAND, T.R., K.V.S. BADARINATH, V. KRISHNA PRASAD, M.S.R. MURTHY, C.D. ELVIDGE & B.T. TUTTLE (2006): Monitoring forest fires over the Indian region using Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System nighttime satellite data. – Remote Sensing of Environment 103, 165-178.
- LEVINE, J.S. & W.R. COFER III (2000): Boreal Forest Fire Emissions and the Chemistry of the Atmosphere. In: KASISCHKE, E.S. & B.J. STOCKS (eds.): Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Ecological Studies 138. New York: Springer, 31-48.
- MEIRINK, J.F., H.J. ESKES & A.P.H. GOEDE (2006): Sensitivity analysis of methane emissions derived from SCIAMACHY observations through inverse modelling. – Atmospheric Chemistry and Physics 6, 1275-1292.
- MORRISSEY, L.A., G.P. LIVINGSTON & S.C. ZOLTAI (2000): Influences of Fire and Climate Change on Patterns of Carbon Emissions in Boreal Peatlands. In: KASISCHKE, E.S. & B.J. STOCKS (eds.): Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. Ecological Studies 138. New York: Springer, 423-439.
- NOAA NGDC (National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center) (2006): Version 2 DMSP-OLS Nighttime Lights Time Series. <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/global_composites_v2.html> (Stand: 2007-07-26) (Zugriff: 2008-07-07).
- NYKÄNEN, H., J. SILVOLA, J. ALM & P.J. MARTIKAINEN (1996): The effect of Peatland Forestry on Fluxes of Carbon Dioxide, Methane, and Nitrous Oxide. In: TRETTIN,

- C.C., M.F. JURGENSEN, D.F. GRIGAL, M.R. GALE, J.K. JEGLUM (eds.): Northern Forested Wetlands. Ecology and Management. Boca Raton: CRC, 325-340.
- SCHIMEL, D.S. (1995): Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. – *Global Change Biology* 1, 1 77-91.
- SCHNEISING, O., M. BUCHWITZ, J.P. BURROWS, H. BOVENSMANN, P. BERGAMASCHI & W. PETERS (2008a): Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 2: Methane. – *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 8, 8273-8326.
- SCHNEISING, O., M. BUCHWITZ, J.P. BURROWS, H. BOVENSMANN, M. REUTER, J. NOTHOLT, R. MACATANGAY & T. WARNEKE (2008b): Three years of greenhouse gas column-averaged dry air mole fractions retrieved from satellite – Part 1: Carbon dioxide. – *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 8, 5477-5536.
- SCHÖNWIESE, C.-D. (2006⁴): *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. Berlin: Borntraeger.
- SHVIDENKO, A.Z. & S. NILSSON (2000a): Extent, Distribution, and Ecological Role of Fire in Russian Forests. In: KASISCHKE, E.S. & B.J. STOCKS (eds.): *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Ecological Studies 138. New York: Springer, 132-150.
- SHVIDENKO, A.Z. & S. NILSSON (2000b): Fire and the Carbon Budget of Russian Forests. In: KASISCHKE, E.S. & B.J. STOCKS (eds.): *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Ecological Studies 138. New York: Springer, 289-311.
- SOLOMESHCH, A.I. (2005): The West Siberian Lowland. In: FRASER, L.H. & P.A. KEDDY (eds.) (2005): *The World's Largest Wetlands*. Ecology and Conservation. Cambridge: University Press, 11-62.
- STOLBOVOI, V. (2002): Wetland Ecosystems. In: IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis): *Land Resources of Russia*. Version 1.1. <http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/eco.htm> (Stand: 2002) (Zugriff: 2008-06-06).
- STOLBOVOI, V., G. FISCHER, S. OVECHKIN AND S. ROZHKOVA (1998): *The IIASA-LUC Project Georeferenced Database of the Former U.S.S.R., Vol. 4: Vegetation*. – Interim Report IR-98, International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg: IIASA.
- STORCH, H. VON, S. GÜSS & M. HEIMANN (1999): *Das Klimasystem und seine Modellierung*. Berlin: Springer.

- STRAUME, A.G., H. SCHRIJVER, A.M.S. GLOUDEMANS, S. HOUWELING, I. ABEN, A.N. MAURELLIS, A.T.J. DE LAAT, Q. KLEIPOOL, G. LICHTENBERG, R. VAN HEES, J.F. MEIRINK & M. KROL (2005): The global variation of CH₄ and CO as seen by SCIAMACHY. – *Advances in Space Research* 36, 821–827.
- TAKEUCHI, W., M. TAMURA & Y. YASUOKA (2003): Estimation of methane emission from West Siberian wetland by scaling technique between NOAA AVHRR and SPOT HRV. – *Remote Sensing of Environment* 85, 21-29.
- TARASOVA, O.A., C.A.M. BRENNINKMEIJER, S.S. ASSONOV, N.F. ELANSKY, T. RÖCKMANN & M. BRASS (2006): Atmospheric CH₄ along the Trans-Siberian railroad (TROICA) and river Ob: Source identification using stable isotope analysis. – *Atmospheric Environment* 40, 5617-5628.
- TAYLOR, F.W. (2005): *Elementary Climate Physics*. Oxford: University Press.
- USGS (United States Geological Survey) (2006): MODIS/Terra Land Cover Types Yearly L3 Global 0.05Deg CMG. <<http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod12c1v4.asp>> (Stand: 2006-08-03) (Zugriff: 2008-07-08).
- VAN DER WERF (2007): Global Fire Emissions Database version 2 (GFEDv2). <<http://www.geo.vu.nl/users/gwerf/GFED/data/>> (Stand: 2007-06-18) (Zugriff: 2008-07-19).
- VAN DER WERF, G.R., J.T. RANDERSON, L. GIGLIO, G.J. COLLATZ, P.S. KASIBHATLA & A.F. ARELLANO (2006): Interannual variability in global biomass burning emission from 1997 to 2004. – *Atmospheric Chemistry and Physics* 6, 11, 3423-3441.
- WALTER, H. (1977): The oligotrophic peatlands of Western Siberia – the largest peino-helobiome in the world. – *Vegetatio* 34, 3, 167-178.
- WARD, D. (2001): Combustion Chemistry and Smoke. In: JOHNSON, E.A. & K. MIYANISHI (eds.): *Forest Fires. Behaviour and Ecological Effects*. San Diego: Academic Press, 55-77.
- WEIN, N. (1999): *Sibirien. Perthes Regionalprofile*. Gotha: Klett-Perthes.

Anhang

Die zu dieser Arbeit beigelegte CD enthält neben der Arbeit als pdf-Datei auch den Anhang. Dieser umfasst folgende Daten und Materialien:

1. Daten

- SCIAMACHY-Daten als csv-Dateien für jeden Monat
- modifizierte SCIAMACHY-Daten als Shapefile und als Matrix-Struktur (txt)
- mit Vegetationszonen ausgeschnittene SCIAMACHY-Daten und Vegetationszonen als Shapefile
- mit Brandflächen ausgeschnittene SCIAMACHY-Daten und MODIS Brandflächen für Russland
- GFED Burnt fraction und CO als txt-Dateien
- mit Feuchtgebieten ausgeschnittene SCIAMACHY-Daten und Feuchtgebiete als Shapefile
- DMSP-OLS Lichter als Shapefile
- Weitere Shapefiles (Flüsse, Grenzen, Städte)

2. Skripte

- R-Skripte zur Datenauswertung und zur Erstellung von Abbildungen
- Übersicht über die für jedes Skript nötigen Eingangsdaten und die produzierten Ausgangsdaten

3. Karten

- monatliche Karten des XCO₂, XCH₄ und CO
- Karten der jährlichen Mittelwerte

Nach dem Einlegen startet die CD automatisch. Sollte dies nicht funktionieren, kann die Datei *index.html* im Basisverzeichnis der CD manuell aufgerufen werden.

Selbstständigkeitserklärung

Gemäß §22 Abs. 9 der Prüfungsordnung für den Studiengang Geographie mit dem Abschluss Bachelor of Science an der Friedrich-Schiller-Universität Jena erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate und gedankliche Übernahmen kenntlich gemacht habe.

Jena, 28. Juli 2008