

## TRAJEKTORIEN-BASIERTE CLUSTER- UND HERKUNFTSANALYSEN DER CO<sub>2</sub>-KONZENTRATIONEN AM SCHNEEFERNERHAUS

ESTHER GIEMSA<sup>1</sup>, JUCUNDUS JACOBEIT<sup>1</sup>, LUDWIG RIES<sup>2</sup>, GABRIELE FRANK<sup>3</sup>, STEPHAN HACHINGER<sup>4,5</sup>,

JULIAN MEYER-ARNEK<sup>4,6</sup>

<sup>1</sup>UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, ALTER POSTWEG 118, 86159 AUGSBURG

<sup>2</sup>UMWELTBUNDESAMT, UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS

<sup>3</sup>DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), RADIOAKTIVITÄTSÜBERWACHUNG

<sup>4</sup>KOLLABORATIONSPARTNER IM ALPINE ENVIRONMENTAL DATA ANALYSIS CENTRE (ALPENDING)

<sup>5</sup>LEIBNIZ-RECHENZENTRUM (LRZ)

<sup>6</sup>DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E. V. (DLR), DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM

E-MAIL: ESTHER.GIEMSA@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

**Zusammenfassung:** Das komplexe Zusammenspiel von Biosphäre und Mensch als Absorber bzw. Emittenten in Verbindung mit der langen atmosphärischen Verweilzeit des Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) verhindert, dass atmosphärische CO<sub>2</sub>-Messungen unmittelbar Auskunft über Änderungen der regionalen Emissionssituation geben können. Für die Charakterisierung des CO<sub>2</sub>-Haushalts im Einzugsgebiet der UFS, verbunden mit der Detektion von Quellen und Senken des stärksten anthropogen beeinflussten Treibhausgases, bedarf es der Relation der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu synoptischskaligen atmosphärischen Transportprozessen.

**Abstract:** Due to the complex interaction of biosphere and mankind as absorber or emitters in conjunction with the long atmospheric lifetime of CO<sub>2</sub>, the atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations are not able to directly provide information about the changing regional emission situation. Therefore, the characterization of the CO<sub>2</sub> budget covering the catchment area of the UFS together with the detection of sources and sinks of this most important contributor to increased radiative forcing requires the relation of the CO<sub>2</sub> measurements to atmos-

pheric transport patterns on the synoptic scale.

### Radon-Filterverfahren

Der erste Schritt hin zu einer differenzierten Herkunftsanalyse von Luftmassen und den mit ihnen transportierten Gasen basiert auf Filtermethoden, die über die Identifizierung von lokalen Kontaminationen der Messgröße hinaus eine Klassifizierung in die Kategorien großräumige Hintergrundkonzentration und regionale Beeinflussung erlauben. Um eine fundierte Entscheidung für die standortspezifisch zuverlässigste Filtertechnik sicherzustellen, wird ein breites Spektrum verschiedenartiger Filteransätze (meteorologische, statistische, tageszeitliche, tracer- und trajektorienbasierte sowie kombinierte) auf die Klimagas-konzentrationen der Umweltforschungsstation angewandt.

Die endgültige Entscheidung für die stations-spezifisch beste Filtermethode erfolgt zusammen mit der Validierung der einzelnen Verfahren in der Gegenüberstellung der unterschiedlich gefilterten Hintergrundkonzentrationen mit den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der marinen Grenzschicht der Atmosphäre der National Oceanic and Atmospheric Administ-

ration (NOAA) (Dlugokencky et al., 2016). In diesem Vergleich mit den NOAA-Referenzwerten unbeeinflusster Luftmassen des entsprechenden Breitengrads, auf dem sich die Umweltforschungsstation befindet, erzielen die CO<sub>2</sub>-Hintergrundkonzentrationen des Radon-Filterverfahrens (Griffiths et al., 2014) die stärkste Übereinstimmung mit Korrelationskoeffizienten der Monatsmittelwerte von über 0,95. Demzufolge können 43 % der CO<sub>2</sub>-Messwerte, die während der Jahre 2011 - 2015 am Schneefernerhaus aufgezeichnet wurden, als repräsentativ für den großräumigen Hintergrund angesehen werden, während die restlichen 57 % regional beeinflusst sind. Schließlich lassen sich aus den Resultaten der Filterung die Wachstumsraten der nach ihrer (über-)regionalen Herkunft getrennten CO<sub>2</sub>-Messwerte ableiten. Gemittelt über den knapp fünfjährigen Untersuchungszeitraum weisen Messungen grenschichtbeeinflusster Luftmassen eine 6 % stärkere Wachstumsrate verglichen mit dem Trend der unteren freien Troposphäre auf. Letzterer beläuft sich an Deutschlands höchstgelegener Messstation im Zeitraum 2011 – 2015 auf 1,86 ppm/Jahr, wohingegen die Kohlendioxidkonzentration regionaler Herkunft Jahr für Jahr im Mittel um 1,98 ppm zugenommen hat. Dieses Ergebnis stimmt exakt mit vergleichbaren Studien andernorts überein (Tsutsumi et al., 2006) und belegt damit einmal mehr die Funktionalität des Radon-basierten Filterverfahrens.

### Trajektoriencluster

Detaillierte Einblicke in die Emissionssituation, die den genannten Wachstumsraten zugrunde liegt, können Trajektorien geben. Trajektorien aus der Dispersions- und Transportmodellierung haben sich als zuverlässiges Werkzeug zur Untersuchung dynamischer Prozesse in der Atmosphäre auf der synoptischen Skala etabliert. Auf der Grundlage von meteorologischen Feldern numerischer Wettervorhersagemodelle verfolgen sie die Be-

wegung eines Luftpakets in Raum und Zeit und lassen über die entstehenden Zugbahnen Strömungsmuster erkennen. Werden die Trajektorien ausgehend von einer Messstation rückwärts in der Zeit berechnet, geben sie Auskunft über die Transportwege und potentiellen Quellgebiete der detektierten Luftmassen (Stohl et al., 2005).

Um der eingeschränkten Zuverlässigkeit der Dispersionsrechnungen aufgrund von Unsicherheitsfaktoren wie der begrenzten Modellauflösung der meteorologischen Felder und den Parametrisierungen des Partikeltransportmodells Rechnung zu tragen, werden die Rückwärtssimulationen der Partikeldispersion zunächst auf den Pfad ihrer Zentroide zusammengefasst und anschließend dem multivariaten statistischen Verfahren der Clusteranalyse (Brankov et al., 1998) unterworfen. Angewandt auf die Zentroide der zweistündlich berechneten Rückwärtstrajektorien des knapp fünfjährigen Untersuchungszeitraums ermöglicht dieses strukturerdeckende Verfahren die Identifikation bedeutsamer atmosphärischer Transportmuster und relevanter Quell- und Senkenregionen für die CO<sub>2</sub>-Messungen an der Zugspitze. Auf Basis der zuvor durchgeführten Filterung können einflussreiche Luftmassenströme separat für den regionalen Beitrag und denjenigen der nordhemisphärischen Hintergrundkonzentration ermittelt werden, indem zwei voneinander unabhängige Clusteranalysen für beide Filterresultate erstellt werden.

Die resultierenden Cluster, die Luftmassenströme zur Zugspitze mit größtmöglicher interner Homogenität und zugleich stärkster Heterogenität untereinander zusammenfassen, werden schließlich mit den zugehörigen, um Saisonalität und langjährigen Trend bereinigten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen der Zugspitze in Relation gesetzt, um Auskünfte über die Zusammensetzung der Messwerte hinsicht-

lich ihres ferntransportierten bzw. regional emittierten Anteils zu erlangen.

Die Ergebnisse der Clusterung zeigen, dass die höchsten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (unter vorheriger Korrektur des Einflusses von Saisonalität und langjährigem Trend) im Winterhalbjahr bei nördlichen bzw. nordöstlichen Anströmungsrichtungen detektiert werden. Im Sommer hingegen übernehmen Luftmassentransporte aus südwestlicher Richtung (aus der industriell geprägten Po-Ebene Italiens und der nordwestlichen Mittelmeerregion, die für ihre hitzebedingten Feuer zu dieser Jahreszeit bekannt ist) maßgeblich die Verursacherrolle hoher CO<sub>2</sub>-Messwerte an der Umweltforschungsstation, bleiben jedoch in ihrer Einflussstärke hinter der des oben skizzierten Winter-Clusters zurück.

### Potentielle Quellbeitragsfunktion

Die Detektion geographischer Gebiete mit Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen eines Standorts erfolgt über die potentielle Quellbeitragsfunktion (Potential Source Contribution Function, PSCF), die in bisherigen Studien zur Quellzuordnung von Spurengasen an der Untersuchungsstation Zugspitze als bestes statistisches Verfahren aus dem Vergleich unterschiedlicher Methoden hervorgegangen ist (Kaiser et al., 2007). Wie zuvor die Clusteranalyse verknüpft auch die PSCF die an der Messstation ankommenden Pfade atmosphärischer Luftmassen in Form von Rückwärtstrajektorien mit den zeitgleich gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. In Erweiterung zur Clusterung der Rückwärtstrajektorien berücksichtigt die PSCF die Aufenthaltsdauer der Luftpakete über geographischen Regionen im Vorfeld ihrer Ankunft und Aufzeichnung am Messstandort (Begum et al. 2005) und fungiert nach Berücksichtigung der geringeren Aussagekraft schwach frequentierter Gitterzellen und einer zusätzlichen Korrektur entsprechend des Konzentrationsniveaus der

Messwerte als zuverlässiger Indikator für die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Region zu besonders hohen bzw. niedrigen CO<sub>2</sub>-Messergebnissen am Rezeptor Schneefernerhaus beiträgt (Carslaw & Ropkins, 2012).

In der resultierenden konzentrationsgewichteten PSCF-Karte für die CO<sub>2</sub>-Konzentration über die Jahre 2011 - 2015 (Abb. 1) präzisieren sich die Ergebnisse der vorangegangenen Clusteranalyse, indem sich die zentrale Alpenregion - trotz der höchsten Trajektorienfrequentierung im Zuge einer alpinen Station als Rezeptor - über den gesamten Untersuchungszeitraum gemittelt als Kohlendioxidsenke darstellt, wohingegen potentielle Quellgebiete sowohl nördlich der Alpen als auch südwestlich davon verortet werden.

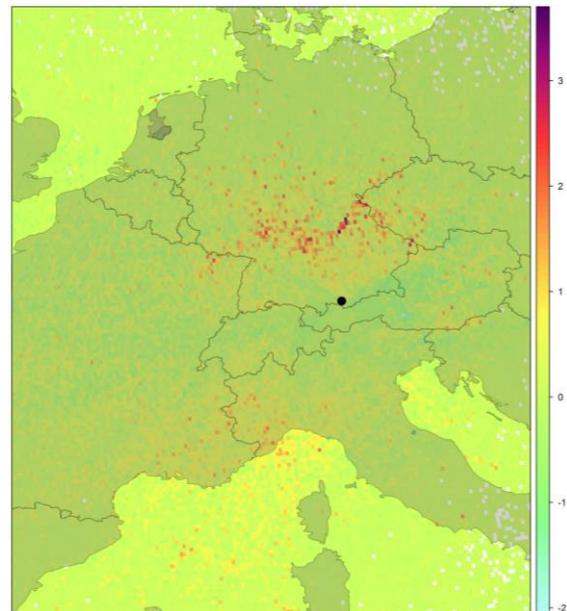


Abb.1: Konzentrationsgewichtete Potentielle Quellbeitragsfunktion aller Rückwärtstrajektorien, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 an der UFS ankamen, für die dortigen saison- und trendbereinigten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (in ppm)

Ergänzend wird die Potentielle Quellbeitragsfunktion explizit für die höchsten Messwerte während der knapp fünfjährigen Analyseperiode berechnet. Das Ergebnis der PSCF für CO<sub>2</sub>-Messwerte oberhalb des 95%-Perzentils (Abb. 2) verweist auf eine Region, in der die mitteleuropäischen Braunkohlereviere Lausitz, Most und Sokolov liegen, als Hauptverursacher höchster CO<sub>2</sub>-Konzentrationen selbst an Deutschlands höchstgelegener Messstation auf über 2650m Höhe und in mehr als 350km Entfernung.

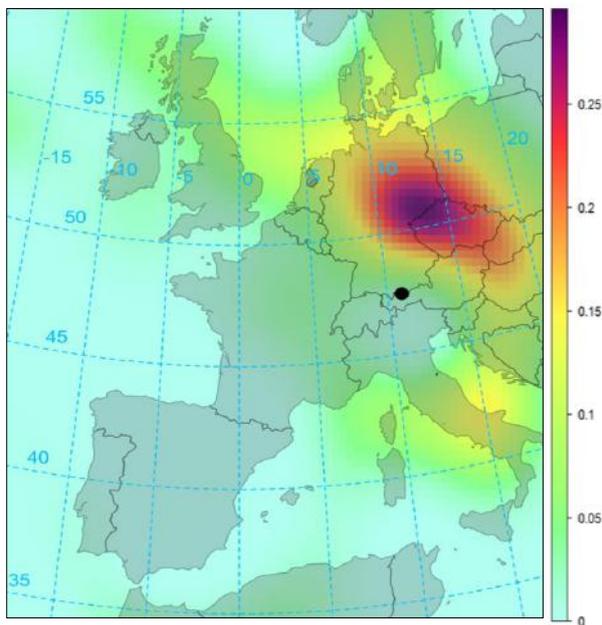


Abb.2: Konzentrationsgewichtete Potentielle Quellbeitragsfunktion aller Rückwärtstrajektorien, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 an der UFS ankamen, für die dortigen saison- und trendbereinigten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (in ppm) oberhalb des 95%-Perzentils

Diese Forschungsarbeit ist Teil des Projekts "Virtuelles Alpenobservatorium (VAO): Ausbau und Internationalisierung des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO II) an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)" und wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert. Die Trajektorienrechnungen nutzen das AlpEnDAC (Alpine Environmental Data Analysis Centre).

## Literatur

Begum B. A., Kim E., Jeong C.-H., Lee D.-W. und Hopke P. K.: Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode. *Atmos. Environ.*, 39, 3719-3724, 2005.

Brankov E., Rao S. T. und Porter P. S.: A trajectory-clustering-correlation methodology for examining the long-range transport of air pollutants. *Atmos. Environ.*, 32, 1525-1534, 1998.

Carslaw D. C. und Ropkins K.: openair – An R package for air quality data analysis. *Environ. Model. Softw.*, 27-28, 52-61, 2012.

Dlugokencky, E. J., Lang, P. M., Masarie, K. A., Crotwell, A. M. und Crotwell, M. J.: Atmospheric carbon dioxide dry air mole fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1968-2015, 2016.

Griffiths A. D., Conen F., Weingartner E., Zimmermann L., Chambers S. D., Williams A. G. und Steinbacher M.: Surface-to-mountaintop transport characterized by radon observations at the Jungfraujoch. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 12763-12779, 2014.

Kaiser A., Scheifinger H., Spangl W., Weiss A., Gilge S., Fricke W., Ries L., Cemas D. und Jesenovec B.: Transport of nitrogen oxides, carbon monoxide and ozone to the Alpine Global Atmosphere Watch stations Jungfraujoch (Switzerland), Zugspitze and Hohenpeissenberg (Germany), Sonnblick (Austria) and Mt. Kravac (Slovenia). *Atmos. Environ.*, 41, 9273-9287, 2007.

Stohl A., Forster C., Frank A., Seibert P. und Wotawa G.: Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2461-2474, 2005.

Tsutsumi Y., Mori K., Ikegami M., Tashiro T. und Tsuboi K.: Long-term trends of greenhouse gases in regional and background events observed during 1998-2004 at Yonagunijima located to the east of the Asian continent. *Atmos. Environ.*, 40, 2868-5879, 2006.