

INTERANNUELLE VARIABILITÄT DES HOCHALPINEN CO₂- UND CH₄-HAUSHALTSAUF BASIS ATMOSPHERISCHER MESSREIHEN 2011 - 2015

ESTHER GIEMSA¹, JUCUNDUS JACOBEIT¹, LUDWIG RIES², STEPHAN HACHINGER^{3,4}

¹INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE DER UNIVERSITÄT AUGSBURG (IGUA)

²UMWELTBUNDESAMT (UBA), UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS (UFS)

³KOLLABORATIONSPARTNER IM ALPINE ENVIRONMENTAL DATA ANALYSIS CENTRE (ALPENDING)

⁴LEIBNIZ-RECHENZENTRUM (LRZ)

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

Zusammenfassung: Die Methodik konzentrationsgewichteter Trajektorienfelder verknüpft Dispersionsmodellierungen mit hochalpin gemessenen CO₂- und CH₄-Konzentrationen. Um interannuell variierende Witterungseinflüsse zu identifizieren, wird dieses Verfahren auf die Einzeljahre 2011 – 2015 angewendet. Im Fall von CO₂ zeigen sich deutlich erhöhte/erniedrigte Beiträge aus charakteristischen, durch Holz- und Kohleverfeuerung geprägten Quellregionen in Jahren mit strengen/milden Wintern. Im Fall von CH₄ führen hohe Niederschlagssummen zu erhöhten Beiträgen der Quellregionen an den Konzentrationen im zentralen Alpenraum.

Abstract: The method of concentration weighted trajectory fields links dispersion modelling with high-alpine CO₂- und CH₄-concentration measurements. In order to identify the influence of year-to-year variations in weather conditions, this technique is applied to the individual years of the 2011 – 2015 period. Concerning CO₂, there are distinctly increased/decreased contributions from typical source regions in years with strong/mild winters. Concerning CH₄, high annual rainfall amounts lead to increased contributions from source regions to the high-alpine concentrations.

Zielsetzung

Das Zusammenspiel von Mensch und Biosphäre als Emittenten bzw. Absorber der klimawirksamen Spurengase in Verbindung mit deren langer atmosphärischer Verweilzeit – insbesondere bei CO₂ – verhindert, dass atmosphärische Messzeitreihen der Klimagase unmittelbar Auskunft über Änderungen der regionalen Emissionssituation geben können. Doch erst die Kenntnis über regionale Emissionsstrukturen ermöglicht ein fundiertes Verständnis des regionalen Klimagashaushalts und damit die Abschätzung sich ändernder Quellbeiträge im Einzugsgebiet. Dies ist eine essentiell notwendige Grundlage für gezielte Emissionsminderungsmaßnahmen zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens (Vereinte Nationen 2016). Um aus den hochpräzisen Messzeitreihen der Klimagase im Alpenraum diese Größen klimapolitischer Dimension ableiten zu können, werden die gemessenen Spurengas-Konzentrationen – hier auf CO₂ und CH₄ fokussiert sowie lokalisiert an den vier hochalpinen Observatorien Schneefernerhaus (Deutschland), Jungfrau-joch (Schweiz), Sonnblick (Österreich) und Plateau Rosa (Italien), siehe Abbildung 1 – in Relation zu den synoptischskaligen atmosphärischen Transportprozessen gesetzt. Dadurch können Quellen und Senken im Einzugsgebiet des Alpenraums erkannt werden, wie es in jahreszeitlicher Differenzierung

bereits im Beitrag zu den vorangegangenen Wissenschaftlichen Resultaten der UFS geschehen ist (Giemsa et al., 2019b). Der vorliegende Beitrag wendet sich nun der Frage zu, wie die Ausprägung dieser Quellen- und Senkengebiete durch interannuell variierende Witterungsverhältnisse beeinflusst wird. Dazu werden die Resultate der im folgenden Abschnitt nochmals skizzierten Berechnungen nicht als Gesamtmittelwerte, sondern als zeitlich aufgelöste Produkte für die Einzeljahre des Untersuchungszeitraums 2011-2015 betrachtet.



Abb. 1: Karte der vier Observatorien (blaue Dreiecke) für die messreihenbasierten CO_2 - und CH_4 -Haushaltsbilanzierungen des Alpenraums (definiert durch die Perimeter der Alpenkonvention in rot) – Fotos v.l.n.r. bzw. West nach Ost: Plateau Rosa, Jungfraujoch, Schneesfernerhaus (Zugspitze) und Sonnblick
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis des Google Maps Satellitenbildes und unter Verwendung der Fotos des Internetauftritts der Alpenobservatorien

Methodik

Die Aufbereitung und Auswertung der hochpräzisen CO_2 - und CH_4 -Konzentrationsmessungen an den vier hochalpinen Observatorien ist bereits in den vorangegangenen Wissenschaftlichen Resultaten der UFS ausführlich dargelegt worden (Giemsa et al., 2019b). Hauptelemente dabei waren die Saisonalitäts- und Trendbereinigung der Zeitreihen (Cleveland et al., 1990), der Einsatz des von meteorologischen ECMWF-Feldern angetriebenen

Lagrange'schen Partikeldispersionsmodells FLEXPART (Stohl et al., 2005) zur Rückwärtsimulation von Trajektorien aus potenziellen Quellgebieten der hochalpin gemessenen Spurengase sowie die Bestimmung von konzentrationsgewichteten Trajektorienfeldern (concentration weighted trajectory fields, CWT). Diese verknüpfen die dort ankommenden Pfade atmosphärischer Luftmassen aus den Rückwärtstrajektorien mit den zeitgleich gemessenen Spurengas-Konzentrationen. Die resultierenden positiven bzw. negativen Werte für eine Gitterzelle bedeuten, dass das dortige Passieren von Luftmassen im Mittel zu einer Konzentrationserhöhung bzw. -erniedrigung an den Rezeptorstandorten führt (Carslaw, 2015). Die räumlich hochaufgelösten (0.2×0.2 Grad) CWT-Karten des gesamten europäischen Untersuchungsgebietes indizieren also potenzielle Quell- und Senkenregionen mit Einfluss auf die Spurengas-Messwerte an den Rezeptorstandorten (Cheng et al., 2015).

Interannuell variierende Witterungseinflüsse auf die Quellen und Senken der alpinen CO_2 -Konzentrationen 2011 – 2015

Abbildung 2a zeigt das Ergebnis der Kombination von Partikeldispersionssimulationen und den zur jeweiligen Ankunftszeit der Rückwärtstrajektorien an den Observatorien gemessenen CO_2 -Konzentrationen (nach ihrer Saisonalitäts- und Trendbereinigung), hier in Form von jährlich differenzierten CWT-Karten für den Untersuchungszeitraum 2011 – 2015. Die für die Standorte gemeinsam berechneten konzentrationsgewichteten Trajektorienfelder zeigen die kumulative Darstellung der Verknüpfung der CO_2 -Konzentrationen und Partikeldispersionssimulationen aller vier hochalpinen Observatorien.

Besonders eindrücklich bildet die Methode hier die hohen CO_2 -Emissionen bedingt durch den strengen Winter 2013 ab, der in diesem Jahr erst nach dem gemäß meteorologischer

Unterteilung bereits zu den Frühlingsmonaten zählenden März mit Minustemperaturen von bis zu $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und viel Schnee ein Ende hatte. Die durch diese Witterung bedingten, verstärkten sowie länger andauernden Emissionen aus der Holz- und Kohlefeuerung visualisiert die Methodik für die Schwerpunktregion Mitteleuropa zuverlässig. Ebenso gelingt es dem methodischen Ansatz andererseits auch, den darauffolgenden, besonders milden Winter 2014 mit seinen witterungsbedingt sehr viel niedrigeren CO_2 -Emissionen aus der reduzierten Verbrennung fossiler Energieträger wiederzugeben, wie in der vierten Karte von links in Abbildung 2a zu sehen ist. Die verlässliche Rekonstruktion der Jahr-zu-Jahr-Variationen in den CO_2 -Emissionen anhand der jährlich differenzierten CWT-Analysen von Abbildung 2a unterstreicht anschaulich die Funktionalität der Methodik, die durch Witterung und Emissionsstärke beeinflusst, kurzfristiger variierender Anteile in den Messdaten der hochalpinen Observatorien auf ihre Herkunftsregionen zurückzuführen.

Interannuell variierende Witterungseinflüsse auf die Quellen und Senken der alpinen CH_4 -Konzentrationen 2011 – 2015

Für die CH_4 -Messwerte in der zentralen Alpenregion ist generell der Südwesten Europas ein großflächiges Herkunftsgebiet methanarmer Luftmassen, während emissionsintensive Regionen im Nord(west)en, Osten und Süden Europas zu verorten sind. Die Unterschiede zwischen den Einzeljahren (siehe Abb. 2b) sind dabei durch die variierenden Ausprägungen der Klimaelemente Niederschlag und Temperatur zu erklären. Jahre und Regionen mit hohen Niederschlagssummen meist in Verbindung mit relativ warmen Sommern und milden, nassen Wintern weisen folglich hohe jährliche Beiträge zu den CH_4 -Konzentrationen im Alpenraum auf. Die Größenordnung der jährlichen Unterschiede in den Beiträgen umfasst im Mittel über den

fünfjährigen Untersuchungszeitraum Werte von -20 bis $+20$ ppb. In allen Einzeljahren zeigt sich die zentrale Alpenregion stets als Gebiet negativer Beiträge zu den saisonalitäts- und trendbereinigten CH_4 -Werten an den Alpenobservatorien.

Resümee

Vorausgeschickt sei zunächst der bereits konstatierte Befund, dass die eingesetzte Methodik zur Detektion klimagasspezifischer Quell- und Senkenregionen mit Einfluss auf die Konzentrationsmessungen an hochalpinen Receptorstandorten durch Funktionsfähigkeit und Verlässlichkeit gekennzeichnet ist (Giemsa et al., 2019b), wie es deutliche Parallelen im Vergleich mit Ergebnissen aus der inversen Modellierung von Klimagasflüssen und -konzentrationen zeigen (z. B. Chevallier et al., 2017; Segers & Houweling, 2017; Rödenbeck et al., 2018). Bei der Betrachtung von Einzeljahren des Untersuchungszeitraums 2011-2015 ergeben sich in den Beiträgen großer Teile Europas zu den saisonalitäts- und trendbereinigten Spurengaskonzentrationen im zentralen Alpenraum teils markante Unterschiede (Abb. 2), die auf interannuell variierende Witterungseinflüsse zurückzuführen sind. So führen strenge Winter wie z. B. 2013 zu wesentlich höheren CO_2 -Emissionen in den durch Holz- und Kohleverfeuerung geprägten Quellregionen, während milde Winter wie z. B. 2014 deutlich reduzierte Beiträge zeigen. Im Fall von CH_4 induzieren hohe Niederschlagssummen meist in Verbindung mit erhöhten Temperaturen gestiegene Beiträge zu den Konzentrationen im zentralen Alpenraum.

Literatur

Carslaw D. C.: The openair manual – open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 1.1-4, King’s College London. 2015. 287 p.

Cheng I., Xu X. und Zhang L.: Overview of receptor-based source apportionment studies for speciated atmospheric mercury. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 7877-7895. 2015.

Chevallier F., Broquet G., Pierangelo C. und Crisp D.: Probabilistic global maps of the CO₂ column at daily and monthly scales from sparse satellite measurements: Satellite-based probabilistic XCO₂ maps. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, doi: 10.1002/2017JD026453. 2017.

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E. und Terpenning, I.: STL – A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *J. Off. Stat.*, 6, 3-73. 1990.

Giemsa, E., Jacobeit, J., Ries, L., und Hachinger, S.: Investigating regional source and sink patterns of Alpine CO₂ and CH₄ concentrations based on a back trajectory receptor model. *Environ. Sci. Eur.*, 31:49.

Giemsa, E., Jacobeit, J., Ries, L., und Hachinger, S.:(2019b): Betrachtung des alpinen CO₂- und CH₄-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen.

UFS - Wissenschaftliche Resultate 2017/2018, 48-51. 2019 b.

Rödenbeck, C., Zaehle, S., Keeling, R., und Heimann, M.: How does the terrestrial carbon exchange respond to interannual climatic variations? A quantification based on atmospheric CO₂ data. *Biogeosciences*, 15, 2481-2498. 2018.

Segers, A., und Houweling S.: Description of the CH₄ Inversion Production Chain. ECMWF Copernicus Report, 27 p. 2017.

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. 2015.

Vereinte Nationen: Übereinkommen von Paris – Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen. (verabschiedet am 12. Dezember 2015, in Kraft getreten am 4. November 2016), 2016.

Förderung

Das Forschungsprojekt "Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen" wurde als Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FKZ 3716512040 vom Umweltbundesamt finanziert und nutzte die IT-Infrastruktur des AlpEnDAC (Alpine Environmental Data Analysis Centre).

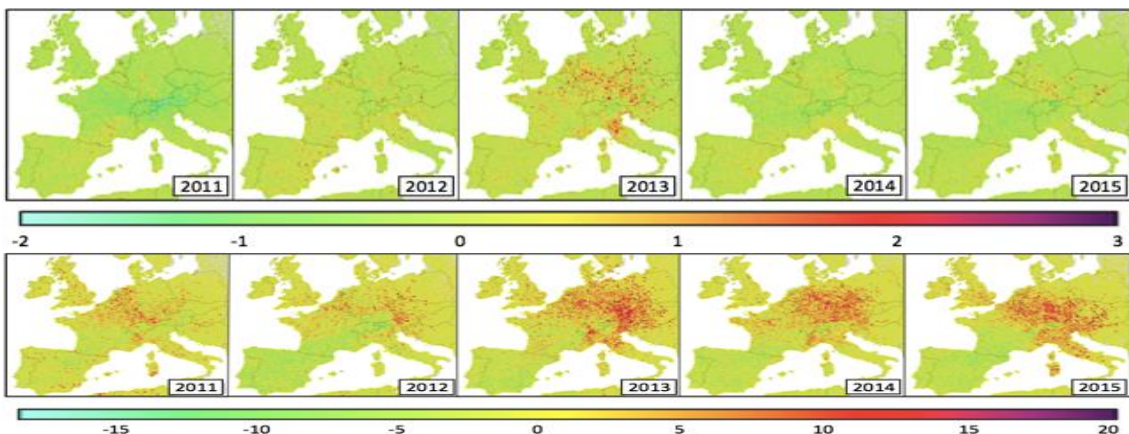


Abb. 2: Jährliche Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trendbereinigten CO₂-Konzentrationen (oben: in ppm) bzw. CH₄-Konzentrationen (unten: in ppb), die während des Untersuchungszeitraums 2011–2015 (v.l.n.r.) an den Stationen Plateau Rosa, Jungfraujoch, Schneefernerhaus und Sonnblick gemessen worden sind (nach Giemsa et al. 2019a)