

BETRACHTUNG DES ALPINEN CO₂- UND CH₄-HAUSHALTS AUF BASIS ATMOSPHERISCHER MESSREIHEN

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

¹INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, UNIVERSITÄT AUGSBURG, 86135 AUGSBURG

²UMWELTBUNDESAMT (UBA), UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS (UFS)

³KOLLABORATIONSPARTNER IM ALPINE ENVIRONMENTAL DATA ANALYSIS CENTRE (ALPENDINGAC)

⁴LEIBNIZ-RECHENZENTRUM (LRZ)

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

Zusammenfassung: Für ein fundiertes Verständnis des regional differenzierten CO₂- und CH₄-Haushalts des Alpenraums ist es erforderlich, die an den hochalpinen Observatorien gemessenen Spurengaskonzentrationen in Relation zu den synoptisch-skaligen atmosphärischen Transportprozessen zu setzen. Hierfür werden Trajektorien aus der Dispersionsmodellierung ausgehend von vier hochalpinen Messstandorten rückwärts in der Zeit berechnet, um Auskunft über die Transportwege und potentiellen Herkunftsgebiete der zeitgleich gemessenen Spurengase zu erhalten.

Abstract: For a profound understanding of the regionally differentiated CO₂ and CH₄ budgets of the Alpine region, it is necessary to compare the trace gas concentrations measured at the high-alpine observatories with the synoptic-scale atmospheric transport processes. Therefore, trajectories from dispersion modelling are calculated backwards in time from four high-alpine measuring sites in order to obtain information about the transport routes and potential areas of origin of the trace gases measured simultaneously.

Aufgabenstellung

Atmosphärische Messungen von Spurengasen können keine unmittelbare Auskunft darüber geben, welche Anteile der gemessenen Konzentrationen auf welche unterschiedlichen Herkunftsgebiete zurückgehen. Dies ist jedoch für ein fundiertes Verständnis des regional differenzierten Spurengas-Haushalts erforderlich und bildet auch die Grundlage für gezielte Emissionsminderungsmaßnahmen. Deshalb werden die an den vier hochalpinen Observatorien Schneefernerhaus (Deutschland), Jungfrauojoch (Schweiz), Sonnblick (Österreich) und Plateau Rosa (Italien) gemessenen CO₂- und CH₄-Konzentrationen in Relation zu den synoptisch-skaligen atmosphärischen Transportprozessen gesetzt, wodurch die Detektion von Quellen und Senken im Einzugsgebiet des Alpenraums möglich wird (Abbildung 1).



Abb. 1: Lage der vier Höhenobservatorien im Alpenraum, deren CO₂- und CH₄-Messreihen den folgenden Analysen zugrunde liegen. „Zugspitze“ bezieht sich auf die rund 300 m unterhalb des Gipfels gelegene UFS.

Methodik

Die Zeitreihen der hochpräzisen CO₂- und CH₄-Konzentrationsmessungen an den vier hochalpinen Observatorien sind zunächst einer Herausfilterung ihres biogenen Jahresganges und ihres anthropogenen Anstiegstrends unterworfen worden (Cleveland et al., 1990), um in den Residuen lediglich die variablen Einflussanteile aus Witterungsverhältnissen und Freisetzungintensität zurückzuhalten (Giemsa et al., 2019). Trajektorien aus der Dispersions- und Transportmodellierung werden sodann ausgehend von den hochalpinen Messstationen rückwärts in der Zeit berechnet (alle zwei Stunden für je zehntausend Luftvolumina zehn Tage zurück), um Auskunft über die Transportwege und potentiellen Quellgebiete der gemessenen Spurengase zu erhalten. Im vorliegenden Projekt ist das Lagrange'sche Partikeldispersionsmodell FLEXPART (Stohl et al., 2005) zum Einsatz gelangt, angetrieben mit den meteorologischen Feldern des ECMWF-Wettervorhersagemodells. Zur Minimierung von Modellunsicherheiten werden die Rückwärtsimulationen auf den Pfad ihrer Zentroide zusammengefasst, deren Koordinaten die mittleren und damit am wenigsten fehlerbehafteten Transportpositionen der Spurenstoff-Rückverfolgung abbilden (Giemsa et al., 2019).

Die Detektion geographischer Gebiete mit Einfluss auf die Spurengas-Konzentrationen eines Messstandorts erfolgt schließlich über konzentrationsgewichtete Trajektorienfelder (concentration weighted trajectory fields, CWT), die die dort ankommenden Pfade atmosphärischer Luftmassen aus den Rückwärtstrajektorien mit den zeitgleich gemessenen Spurengas-Konzentrationen verknüpfen. Dabei wird die Aufenthaltsdauer der Luftpakete über geographischen Regionen im Vorfeld ihrer Ankunft am Messstandort, das Konzentrationsniveau des betreffenden Klimagases und die Frequentierung der jeweili-

gen Gitterzellen berücksichtigt (Giemsa et al., 2019). Positive/negative Werte für eine Gitterzelle bedeuten, dass das dortige Passieren von Luftmassen im Mittel eine Konzentrationserhöhung/-erniedrigung an den Rezeptorstandorten verursacht (Carslaw, 2015). In der Zusammenschau aller Gitterzellen ergibt sich eine Karte, die räumlich hochaufgelöst (0,2 x 0,2 Grad) potentielle Quell- und Senkenregionen mit Einfluss auf die Messwerte der Rezeptorstandorte lokalisiert (Cheng et al., 2015).

Einflüsse von Quellen und Senken auf die alpinen CO₂-Konzentrationen 2011 – 2015

Das Ergebnis der Kombination von Zentroid-Pfaden der stationsspezifisch berechneten FLEXPART-Partikeldispersionsimulationen und den zur jeweiligen Ankunftszeit der Rückwärtstrajektorien an den Observatorien gemessenen CO₂-Konzentrationen (nach ihrer Saisonalitäts- und Trendbereinigung) zeigt Abbildung 2 in Form saisonal differenzierter CWT-Karten für den Untersuchungszeitraum 2011 – 2015. Die für die Standorte gemeinsam berechneten konzentrationsgewichteten Trajektorienfelder zeigen die kumulative

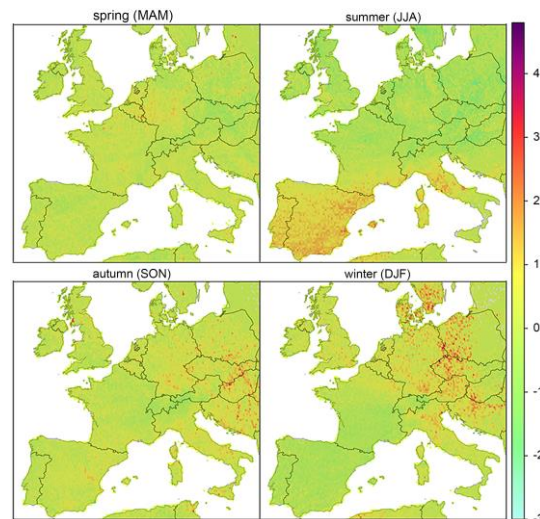


Abb. 2: Gemeinsam für alle vier Höhenstationen berechnete jahreszeitliche Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trend-bereinigten CO₂-Konzentrationen, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 gemessen worden sind (in ppm)

Darstellung der Verknüpfung der CO₂-Konzentrationen und Partikeldispersionsimulationen aller vier hochalpinen Observatorien.

So lassen sich im Winter neben erhöhten Werten aus der industriell geprägten Region Norditaliens, Emissions-Hotspotregionen mit gesteigerten Werten von bis zu vier ppm vor allem nördlich und östlich der Alpen erkennen, die auf CO₂-Emissionen durch Holz- und Kohlefeuerung hindeuten. Dies ist – wenn auch weniger stark – bereits im Herbst festzustellen mit weiter landeinwärts gelegenen Quellregionen Osteuropas. Im Sommer dagegen treten um durchschnittlich zwei ppm erhöhte CO₂-Messwerte hauptsächlich bei Luftmassenadvektion aus der Mittelmeerregion südwestlich der Alpen sowie aus Zentralitalien auf, die auf hitzebedingte Feuer im saisonal trockenen mediterranen Raum schließen lassen. Das Frühjahr weist kaum starke CO₂-Emissions-Hotspots auf und zeigt die jahreszeitlich homogenste Karte potentieller Quell- und Senkenregionen. Allen Jahreszeiten gemeinsam ist die kontinuierliche Einordnung der zentralen Untersuchungsregion um den Alpenhauptkamm als markante Kohlendioxid-Senke.

CH₄-Haushaltsuntersuchungen für den Alpenraum 2011 – 2015

In der Zusammenlegung der für die einzelnen Observatorien berechneten, aber saisonal differenzierten konzentrationsgewichteten Trajektorienfelder für die CH₄-Messwerte (Abbildung 3) ist der Südwesten Europas zu allen Jahreszeiten als großflächiges Herkunftsgebiet methanarmer Luftmassen erkennbar. So führten Luftmassen von der iberischen Halbinsel bei ihrer Erfassung an den Alpenobservatorien zu Reduktionen der dort gemessenen CH₄-Konzentrationen um durchschnittlich rund zehn ppb (gemittelt über den fünfjährigen Untersuchungszeitraum). Dies lässt sich durch das Fehlen größerer Feucht-

gebiete, die vor allem in der warmen Jahreszeit die wichtigste natürliche Methanquelle darstellen, erklären. Anthropogene Quellen sind jedoch ebenfalls in Rechnung zu stellen, teilweise erkennbar an erhöhten Werten im Bereich von Reisfeldern in der Poebene sowie an hohen CH₄-Emissionen aus nördlichen und östlichen Regionen, die neben großen natürlichen Feuchtgebieten auch künstliche wie vor allem geflutete, ehemalige Bergbaugelände beinhalten (bsp. Polen). Der konzentrationssteigernde Einfluss höherer Temperaturen wird dabei in den saisonalen CWT-Karten in Gestalt erhöhter CH₄-Werte im Sommer und Herbst sichtbar.

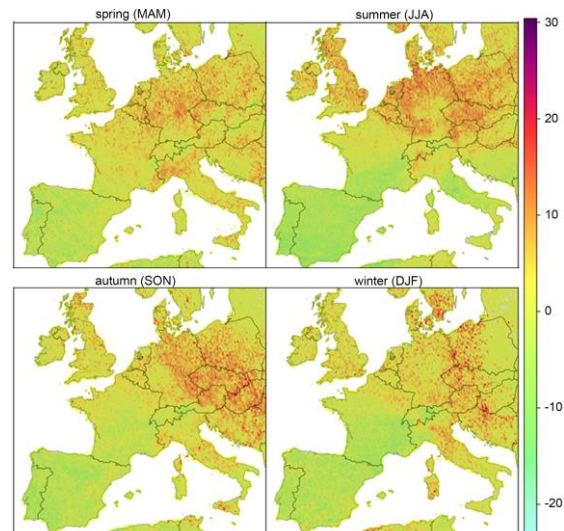


Abb. 3: Gemeinsam für alle vier Höhenstationen berechnete jahreszeitliche Beiträge aus den farblich codierten Gitterzellen zu den saison- und trend-bereinigten CH₄-Konzentrationen, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 gemessen worden sind (in ppb)

Resümee

Der eingesetzten Methodik zur Detektion klimagasspezifischer Quell- und Senkenregionen mit Einfluss auf die Konzentrationsmessungen an hochalpinen Rezeptorstandorten können Funktionsfähigkeit und Verlässlichkeit bescheinigt werden angesichts der deutlichen Parallelen, die sich im Vergleich mit Ergebnissen aus der inversen Modellierung von Klimagasflüssen und -konzentrationen zeigen (wie beispielsweise aus den Projekten

Copernicus Atmosphere Monitoring Service (Chevallier et al., 2017; Segers & Houweling, 2017) und Jena CarboScope (Rödenbeck et al., 2018)). Voraussetzung dafür ist allerdings eine hinreichende Abdeckung der Untersuchungsregion durch die Zentroidpfade der Partikeldispersionsrechnungen. Nur wenn die Frequentierung durch die Rückwärtstrajektorien hoch genug und die Anzahl der involvierten Stationen groß genug für einen entsprechend stark frequentierten Footprint über dem Einzugsgebiet sind, können die CWT-Analysen aussagekräftige Karten hervorbringen. Spezifische Vorteile des Modells bestehen in seiner hohen räumlichen Auflösung, dem Auskommen ohne a-priori Emissionsdaten und der damit gegebenen Möglichkeit, resultierenden Output zur unabhängigen Validierung von Emissionskatastern heranzuziehen.

Inhaltlich bezogen ist die Lokalisierung der höchsten Beiträge zu den alpinen CO₂-Messungen v. a. im Bereich des östlichen Europas hervorzuheben, wo die größten Braunkohle-Abbaugelände gelegen sind. Beim Methan zeigt sich ein markantes Nordost-Südwestgefälle mit erhöhenden/erniedrigenden Konzentrationsbeiträgen in ersterer/letzterer Region. Eine Sonderstellung als Senkenregion bezüglich beider Klimagase nimmt der Alpenraum selbst ein, wodurch seine Bedeutung im Kontext von Klimaschutz-Strategien erneut unterstrichen wird.

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. 287 pp, 2015.
Cheng I., Xu X., 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, 2015.

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 (*submitted*), 2019.

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 Discuss.*, DOI: 10.5194/bg-2018-34, 2018.

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

Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P. und Wotawa, G.: Technical note – The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2461-2474, 2005.

Förderung

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