

**UNIA** Universität Augsburg  
Wissenschaftszentrum  
Umwelt

# Jahresbericht 2018



# Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

## PROJEKTTEAM

- M.Sc. Esther Giemsa  
esther.giemsa@geo.uni-augsburg.de  
Tel.: 0821 598 3578
- Prof. Dr. Jucundus Jacobeit  
jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de  
Tel.: 0821 598 2670
- Dr. Ludwig Ries  
ludwig.ries@uba.de

## PROJEKTPARTNER

- Virtuelles Alpenobservatorium (VAO), Umweltforschungsstation Schneefernerhaus
- Umweltbundesamt (UBA), Global Atmosphere Watch (GAW) – Plattform Zugspitze
- Leibniz Rechenzentrum (LRZ), Distributed Resources Group
- Alpine Environmental Data Analysis Centre (AlpEnDAC)
- Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Abteilung Atmosphäre

## FÖRDERUNG

- Das Forschungsprojekt "Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>-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).

## PROJEKTLAUFZEIT

- Januar 2017 – Juni 2018

## Worum geht es?

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 gemessenen Spurengaskonzentrationen in Relation zu den synoptisch-skaligen atmosphärischen Transportprozessen gesetzt, wodurch die Detektion von Quellen und Senken im Einzugsgebiet einer Messstation möglich wird. Besonders geeignet für derartige Untersuchungen zur Quellherkunft von Spurengasen sind hochgelegene Messstationen hoher Repräsentativität, wie sie etwa im europäischen Alpenraum zu finden sind.

In Erweiterung des letztjährigen Berichts zu diesem Projekt wird nicht mehr nur auf die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (rund 300 m unterhalb des Zugspitzgipfels) Bezug genommen, sondern auch auf die bekannten, jeweils oberhalb von 3.000 Metern gelegenen alpinen Höhenobservatorien Sonnblick (Österreich), Jungfrauoch (Schweiz) und Plateau Rosa (Italien). Wie Abb. 1 verdeutlicht, lassen sich damit die potentiellen Herkunftsgebiete von Spurengasen verlässlicher erfassen als bei Fokussierung auf lediglich eine ausgewählte Messstation.

## Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

Ebenfalls in Erweiterung des letztjährigen Berichts wird im Folgenden nicht nur auf Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), sondern auch auf Methan (CH<sub>4</sub>) eingegangen, womit die beiden wichtigsten Spurengase thematisiert werden, die zur anthropogenen Verstärkung des Treibhauseffekts und damit zur rezenten globalen Erwärmung beitragen (IPCC 2013).

### Methodik

Hier kann weitgehend auf den Jahresbericht 2017 verwiesen werden, so dass an dieser Stelle nur die Grundzüge der Vorgehensweise noch einmal in Erinnerung gerufen werden sollen. Die Zeitreihen der hochpräzisen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-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 Freisetzungsintensität zurückzuhalten (Giemsa et al. 2018). Trajektorien aus der Dispersions- und Transportmodellierung werden sodann ausgehend von den hochalpinen Messstationen rückwärts in der Zeit berechnet (alle zwei Stunden für 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 gekommen, angetrieben mit den meteorologischen Feldern des ECMWF-Wettervorhersagemodells. Zur Minimierung von Modellunsicherheiten werden die Rückwärtssimulationen auf den Pfad ihrer Zentroide zusammengefasst, deren Koordinaten

die mittleren und damit am wenigsten fehlerbehafteten Transportpositionen der Spurenstoff-Rückverfolgung abbilden (Giemsa et al. 2018).

Die Detektion geographischer Gebiete mit Einfluss auf die Spurengas-Konzentrationen eines Messstandorts erfolgt schließlich über konzentrationsgewichtete Trajektorienfelder (concentration weighted trajectory fields, CWT), welche 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



Abb. 1: Lage der vier Höhenobservatorien im Alpenraum, deren CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Messreihen den folgenden Analysen zugrunde liegen. „Zugspitze“ bezieht sich auf die rund 300 m unterhalb des Gipfels gelegene Umweltforschungsstation Schneefernerhaus.

## Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

betreffenden Klimagases und die Frequentierung der jeweiligen Gitterzellen berücksichtigt (Giemsa et al. 2018). 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 (hier 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 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen 2011 – 2015

Das Ergebnis der Kombination von Zentroid-Pfaden der stationsspezifisch berechneten FLEXPART-Partikeldispersionssimulationen und den zur jeweiligen Ankunftszeit

der Rückwärtstrajektorien dort gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (nach ihrer Saisonalitäts- und Trendbereinigung) zeigt Abb. 2 in Form der CWT-Karten für den Untersuchungszeitraum 2011 – 2015, differenziert nach den vier Rezeptor-Observatorien. Demnach sind für hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen am Schneefernerhaus und am Sonnblick-Observatorium insbesondere Regionen Osteuropas sowie Mitteleuropas nördlich der Alpen verantwortlich, während sich hohe CO<sub>2</sub>-Messwerte an den Observatorien Jungfraujoch und Plateau Rosa vor allem auf den Einfluss aus Gebieten südlich der Alpen zurückführen lassen.

Weitere Aufschlüsse liefern die saisonal differenzierten Karten der CO<sub>2</sub>-Beiträge aus den Gitterzellen des Einzugsgebiets, wobei in Abb. 3 die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Partikeldispersionssimulationen aller vier hochalpinen Observatorien kumulativ berücksichtigt worden

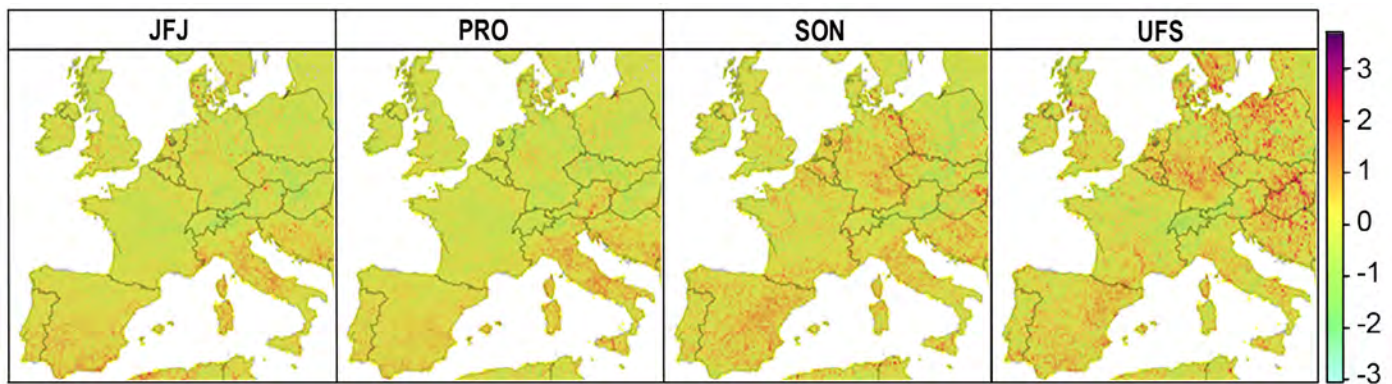


Abb. 2: Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trendbereinigten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 an den Höhenstationen Jungfraujoch (JFJ), Plateau Rosa (PRO), Sonnblick (SON) und Schneefernerhaus (UFS) gemessen worden sind (in ppm)

## Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

sind, also für die Standorte gemeinsam berechnete konzentrationsgewichtete Trajektorienfelder gezeigt werden. 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Holz- und Kohlefeuerung hin-

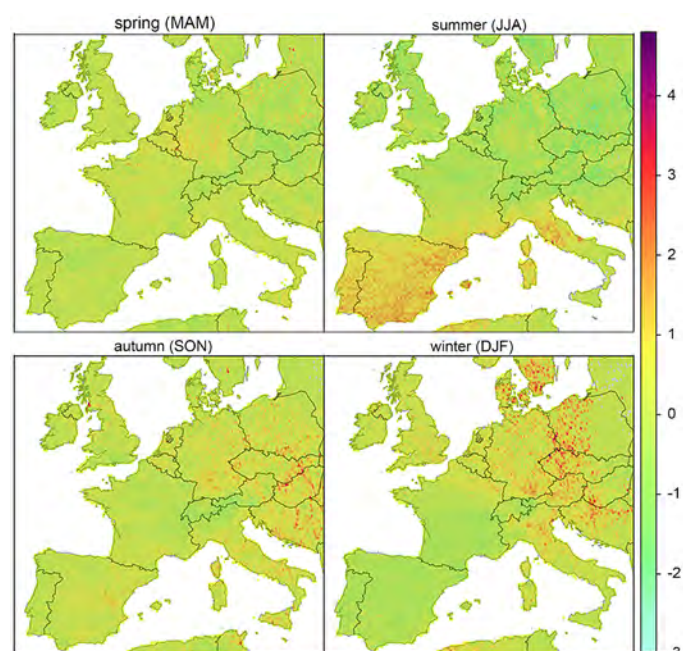


Abb. 3: Gemeinsam für alle vier Höhenstationen berechnete jahreszeitliche Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trend-bereinigten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 gemessen worden sind (in ppm)

deuten. 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 CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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 Kohlenstoffdioxid-Senke.

### CH<sub>4</sub>-Haushaltsuntersuchungen für den Alpenraum 2011 – 2015

Auch in den konzentrationsgewichteten Trajektorienfeldern für die CH<sub>4</sub>-Messwerte zeigen sich die stationspezifischen Frequentierungen des alpinen Untersuchungsgebiets (siehe Abb. 4): während die Observatorien Jungfraujoch und Plateau Rosa Quellregionen des Methans nördlich, aber auch südlich der Alpen lokalisieren, werden Freisetzungen im Norden und Osten Mitteleuropas vor allem von den Höhenstationen Sonnblick und Schneefernerhaus erfasst (mit Erhöhungen der Messwerte um bis zu 20 ppb). Allen vier Karten in Abb. 4 gemeinsam ist die übereinstimmende Identifikation des Südwesten Europas als großflächige CH<sub>4</sub>-Senke. So führten Luftmassen von der iberischen Halbinsel bei ihrer Erfassung an den Alpenobservatorien zu Reduktionen der dort gemessenen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen um durchschnittlich rund zehn ppb

## Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

(gemittelt über den fünfjährigen Untersuchungszeitraum). Dies zeigt sich gleichermaßen in der Zusammenlegung der für die einzelnen Observatorien berechneten, aber saisonal differenzierten konzentrationsgewichteten Trajektorienfelder (Abb. 5): auch hier ist die iberische Halbinsel zu allen Jahreszeiten als großflächiges Herkunftsgebiet methanarmer Luftmassen erkennbar, bedingt durch das Fehlen größerer Feuchtgebiete, die die wichtigste natürliche Methanquelle darstellen. Anthropogene Quellen sind jedoch ebenfalls in Rechnung zu stellen, teilweise erkennbar an erhöhten Werten im Bereich von Reisfeldern in der Poebene sowie an hohen CH<sub>4</sub>-Emissionen aus nördlichen und östlichen Regionen, die neben großen natürlichen Feuchtgebieten auch künstliche wie vor allem geflutete, ehemalige Bergbaugelände beinhalten (bspw. Polen). Der konzentrationssteigernde Einfluss höherer Temperaturen

wird dabei in den saisonalen CWT-Karten in Gestalt erhöhter CH<sub>4</sub>-Werte im Sommer und Herbst sichtbar.

### Zusammenfassung

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 bspw. 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

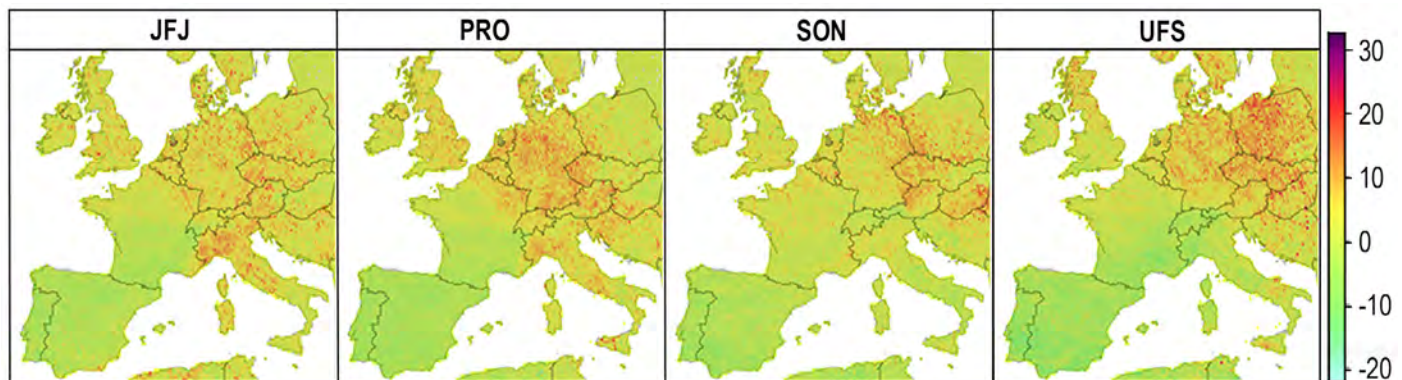


Abb. 4: Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trendbereinigten CH<sub>4</sub>-Konzentrationen, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 an den Höhenstationen Jungfraujoch (JFJ), Plateau Rosa (PRO), Sonnblick (SON) und Schneefernerhaus (UFS) gemessen worden sind (in ppb)

## Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

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 Vor-

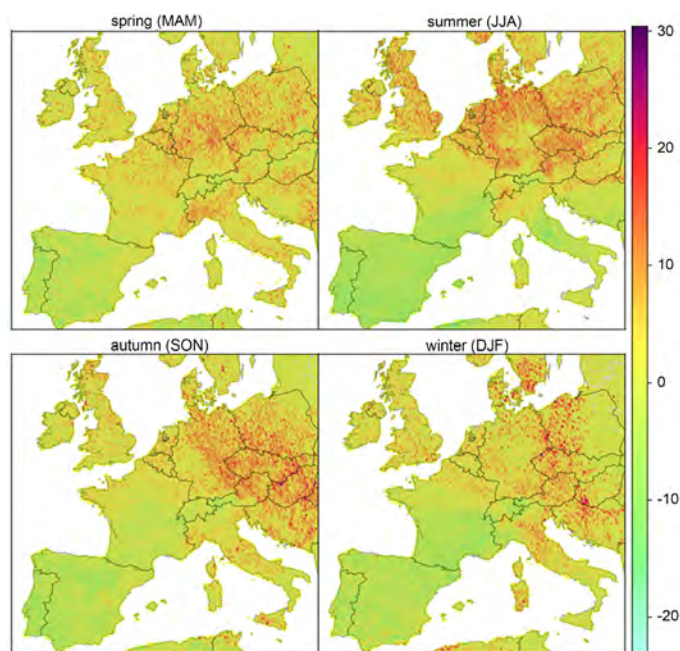


Abb. 5: Gemeinsam für alle vier Höhenstationen berechnete jahreszeitliche Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trend-bereinigten CH<sub>4</sub>-Konzentrationen, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 gemessen worden sind (in ppb)

teile 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 Emissionskatalogen heranzuziehen.

Inhaltlich bezogen ist die Lokalisierung der höchsten Beiträge zu den alpinen CO<sub>2</sub>-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 Klimagasen nimmt der Alpenraum selbst ein, wodurch seine Bedeutung im Kontext von Klimaschutzstrategien erneut unterstrichen wird.

### Literatur

- Carslaw, D. C. (2015): The openair manual – open-source tools for analyzing air pollution data. Manual for version 1.1-4, King's College London. 287 pp.
- Cheng, I., Xu, X., Zhang, L. (2015): Overview of receptor-based source apportionment studies for speciated atmospheric mercury. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 7877-7895.
- Chevallier, F., Broquet, G., Pierangelo, C., Crisp, D. (2017): Probabilistic global maps of the CO<sub>2</sub> column at daily and monthly scales from sparse satellite measurements: Satellite-based probabilistic XCO<sub>2</sub> maps. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, DOI: 10.1002/2017JD026453.
- Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., Terpenning, I. (1990): STL – A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *J. Off. Stat.*, 6, 3-73.

## Betrachtung des regionalen CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

- Giemsa, E., Jacobeit, J., Ries, L., Hachinger, S. (2018): Investigating regional source and sink patterns of Alpine CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> concentrations based on a back trajectory receptor model (*submitted*).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013): Climate Change 2013 – The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, New York, 1552 pp.
- Rödenbeck, C., Zaehle, S., Keeling, R., Heimann, M. (2018): How does the terrestrial carbon exchange respond to interannual climatic variations? A quantification based on atmospheric CO<sub>2</sub> data. *Biogeosciences Discuss.*, DOI: 10.5194/bg-2018-34.
- Segers, A., Houweling, S. (2017): Description of the CH<sub>4</sub> Inversion Production Chain. ECMWF Copernicus Report, 27 pp.
- Stohl, A., Forster, C., Frank, A., Seibert, P., Wotawa, G. (2005): Technical note – The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2461-2474.