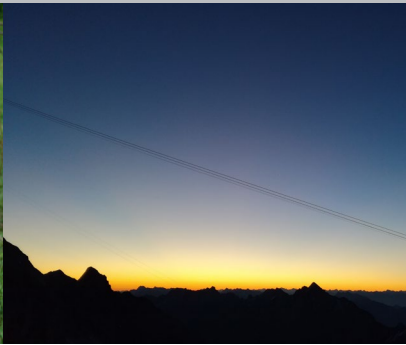


UNIA Universität Augsburg
Wissenschaftszentrum
Umwelt

Jahresbericht 2017



Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

PROJEKTTEAM

- M.Sc. Esther Giemsa
esther.giemsa@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2727
- Prof. Dr. Jucundus Jacobeit
jucundus.jacobeit@geo.uni-augsburg.de
Tel.: 0821 598 2662
- Dr. Ludwig Ries
ludwig.ries@uba.de

PROJEKTPARTNER

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

FINANZIERUNG

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

PROJEKTLAUFZEIT

- Januar 2017 – Juni 2018

Worum geht es?

Das Klima unserer Erde wird von der Sonnenenergie gesteuert, die von der Erdoberfläche und der Atmosphäre absorbiert wird. Die Absorptionsrate der kurzwelligen solaren Ein- und langwelligen terrestrischen Ausstrahlung hängt maßgeblich von der atmosphärischen Konzentration und Zusammensetzung der klimawirksamen Spurengase ab. Durch anthropogene Emissionen werden diese derart verändert, dass sie den für das Leben auf der Erde notwendigen natürlichen Treibhauseffekt verstärken. Prominentester Vertreter der vom Menschen produzierten Treibhausgase ist das Kohlendioxid (CO₂). Als beitragsstärkstes Klimagas ist es der Hauptverursacher der globalen Erwärmung, die seit Beginn der Industrialisierung ab dem Jahr 1750 den natürlichen Treibhauseffekt intensiviert (IPCC 2013).

Neben der anthropogenen Komponente, die insbesondere aus der Verbrennung fossiler Energieträger und Landnutzungsänderungen resultiert und den weltweit ansteigenden CO₂-Trend verursacht, unterliegt der atmosphärische CO₂-Gehalt von mittlerweile über 400 ppm (parts per million) der Saisonalität des biogenen Kohlenstoffkreislaufs. Das Zusammenspiel von Mensch und Biosphäre als Emittenten bzw. Absorber in Verbindung mit der langen atmosphärischen Verweilzeit des Kohlendioxids von durchschnittlich 120 Jahren verhindert, dass atmosphärische Messungen unmittelbar Auskunft über Änderungen

Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

der regionalen Emissionssituation geben können. Erst aber die Kenntnis über regionale Emissionsstrukturen ermöglicht ein fundiertes Verständnis des regionalen CO₂-Haushalts und damit die Abschätzung sich ändernder Quellbeiträge im Einzugsgebiet der Messstation. Um aus den hochpräzisen CO₂-Messzeitreihen diese Größen klimapolitischer Dimension abzuleiten, auf deren Basis effiziente Emissionsminderungsmaßnahmen verifiziert und gegebenenfalls angepasst werden können, bedarf es daher einer differenzierten Aufschlüsselung der Messwerte nach ihrer Herkunft. Dazu werden die gemessenen CO₂-Konzentrationen in Relation zu den synoptisch-skaligen atmosphärischen Transportprozessen gesetzt, wodurch die Detektion von Quellen und Senken im Einzugsgebiet einer Messstation möglich ist. Besonders geeignet für diese Untersuchungen zur Quellherkunft des CO₂ sind hochgelegene Messstandorte hoher Repräsentativität wie etwa die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, die sich rund 300 m unterhalb des Zugspitzgipfels auf der Südseite von Deutschlands höchstem Berg befindet.

Trajektorien der Dispersions- und Transportmodellierung

Detaillierte Einblicke in die Emissionssituation des Einzugsgebiets, die den hochpräzisen CO₂-Konzentrationen der GAW-Globalstation Schneefernerhaus/Zugspitze 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 Bewegung 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. Rückwärts-trajektorien aus der Dispersions- und Transportmodellierung sind daher ein weit verbreitetes Werkzeug zur Quellbestimmung von gemessenen Spurengasen und Luftverunreinigungen.

Das beim norwegischen Institut für Atmosphärenforschung weiter entwickelte Lagrange'sche Partikeldispersionsmodell FLEXPART simuliert den meso- bis großskaligen Transport sowie die Diffusion von kleinen Luftvolumina in der Atmosphäre (Stohl et al. 2005) und dient in seinem Rückwärtsmodus der Zuordnung von Quellregionen. Die Grundlage der Partikeldispersionsrechnungen bilden die meteorologischen Felder eines numerischen Wettermodells. Da sich das Modell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) als genaueste Rechenbasis in der Dispersionsmodellierung für europäische Untersuchungsgebiete etabliert hat, wird FLEXPART über den gesamten Untersuchungszeitraum der Jahre 2000 - 2015 mit den meteorologischen Feldern des ECMWF-Wettervorhersagemodells betrieben. Auf Basis dieser Meteorologiefelder werden die, am Startpunkt Zugspitze alle zwei Stunden entlassenen zehntausend Luftvolumina mit den spezifischen Tracer-eigenschaften des Kohlendioxids über zehn Tage hinweg rückverfolgt. Die zehntägigen Partikeltransportrechnungen bilden zusammen mit den zum jeweiligen Startzeitpunkt gemessenen CO₂-Konzentrationen die Grundlage

Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

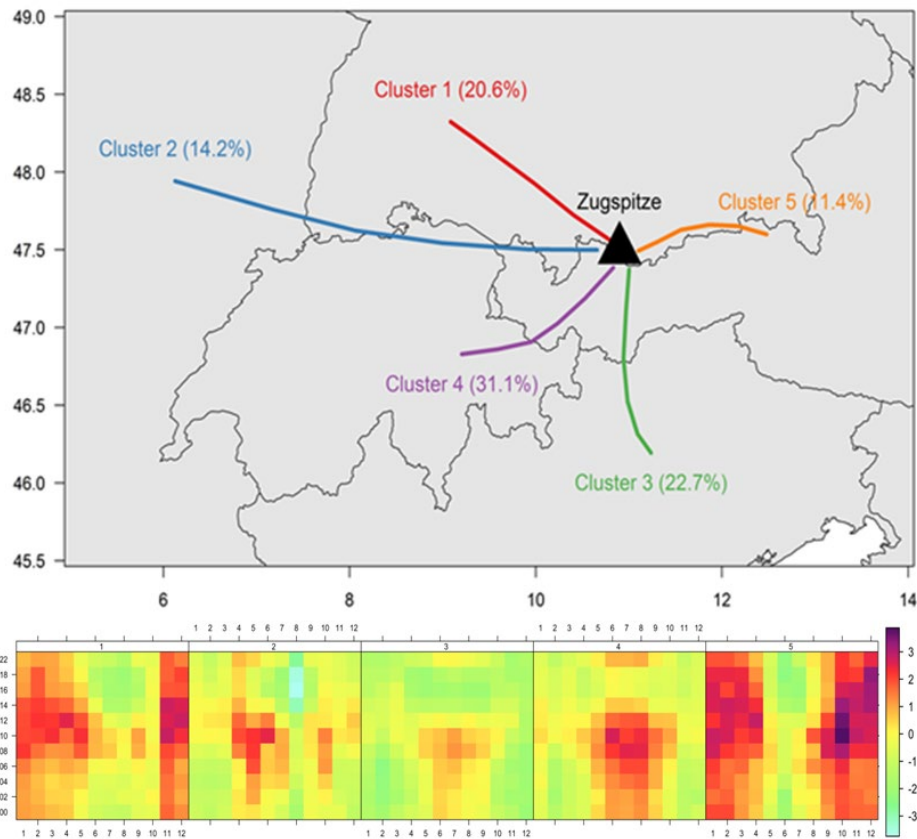


Abb. 1: Zentroidpfade (erste 12 Stunden rückwärts in der Zeit) der Clusteranalyse aller Luftmassen-Trajektorien, die zwischen 2000 und 2015 an der GAW-Globalstation Zugspitze/Schneefernerhaus (schwarzes Dreieck) eingetroffen sind, aus horizontaler Perspektive (oben) (relative Auftretshäufigkeiten der jeweiligen Cluster während des 16-jährigen Untersuchungszeitraums angegeben in %), inkl. des Tages- (Spalten) und Jahrgangs (Zeilen) des clusterspezifischen Einflusses auf die mittleren saison- und trendbereinigten CO₂-Konzentrationen (in ppm) der Jahre 2000 – 2015 am Schneefernerhaus (unten, Teilabb. von links nach rechts für Cluster 1 bis 5)

Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

für die Herkunftsanalysen des klimawirksamen Gases an der Zugspitze.

Die Zuverlässigkeit der Dispersionsrechnungen für ihre Anwendung in Herkunftsanalysen ist jedoch durch Unsicherheitsfaktoren wie etwa die begrenzte Modellauflösung der meteorologischen Felder und die Parametrisierungen des Partikeltransportmodells eingeschränkt. Um diese Unzulänglichkeiten zu minimieren, werden die Rückwärtssimulationen der Partikeldispersion in einem ersten Schritt auf den Pfad ihrer Zentroide zusammengefasst. Unter der Prämisse, dass die Unsicherheiten gleichverteilt sind, bilden die Koordinaten der Zentroide die mittleren und damit am wenigsten fehlerhaften Transportpositionen der Partikelrückverfolgung ab.

Clusteranalyse der Rückwärtstrajektorien

Demselben Prinzip der Reduktion von Modellunsicherheiten, mit denen die einzelnen Trajektorien behaftet sind, folgt das multivariate statistische Verfahren der Clusteranalyse (Brankov et al. 1998). Angewandt auf die zweistündlich berechneten Rückwärtstrajektorien der Jahre 2000 - 2015 identifiziert dieses strukturentdeckende Verfahren bedeutsame atmosphärische Transportmuster und relevante Quell- und Senkenregionen für die Kohlendioxidmessungen an der Zugspitze. Dazu werden die x-, y- und z-Koordinaten der Partikelrückverfolgung eingangs separat standardisiert, um eine gleiche Gewichtung der drei Dimensionen in der anschließenden Clusteranalyse sicherzustellen. Das Ergebnis der aussagekräftigsten Clusterungsvariante bildet schließlich die Pfade der Luftmassen auf ihrem Weg zum Rezeptor Umweltforschungsstation Schneefernerhaus mit größtmöglicher interner

Homogenität und zugleich stärkster Heterogenität zwischen den Clustern ab.

Die Cluster werden anschließend mit den zeitgleich gemessenen und um Saisonalität sowie langjährigen Trend bereinigten CO₂-Konzentrationen der Zugspitze verknüpft, um Auskünfte über das Zustandekommen der Kohlendioxidkonzentrationen an der Globalstation zu erlangen. Die Ergebnisse der Clusterung zeigen, dass die höchsten CO₂-Konzentrationen (unter vorheriger Korrektur des Einflusses von Saisonalität und langjährigem Trend) im Winterhalbjahr bei nördlichen bzw. östlichen 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 CO₂-Messwerte an der Umweltforschungsstation (s. Abb. 1).

Konzentrationsgewichtete Trajektorienfelder

Die zuvor beschriebene Methode der Trajektoriencluster lässt qualitative Rückschlüsse aus der Relation von Clustern der Rückwärtstrajektorien einer Messstation mit den zeitgleich am Startpunkt aufgezeichneten CO₂-Messungen zu, wobei relevante Transportmuster identifiziert, nicht aber einzelne Quellen und Senken des Treibhausgases lokalisiert werden können (Apadula et al. 2003). Die Detektion geographischer Gebiete mit Einfluss auf die CO₂-Konzentrationen eines Standorts erfolgt über konzentrationsgewichtete Trajektorienfelder, welche wie zuvor die Clusteranalyse, die an der Messstation

Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

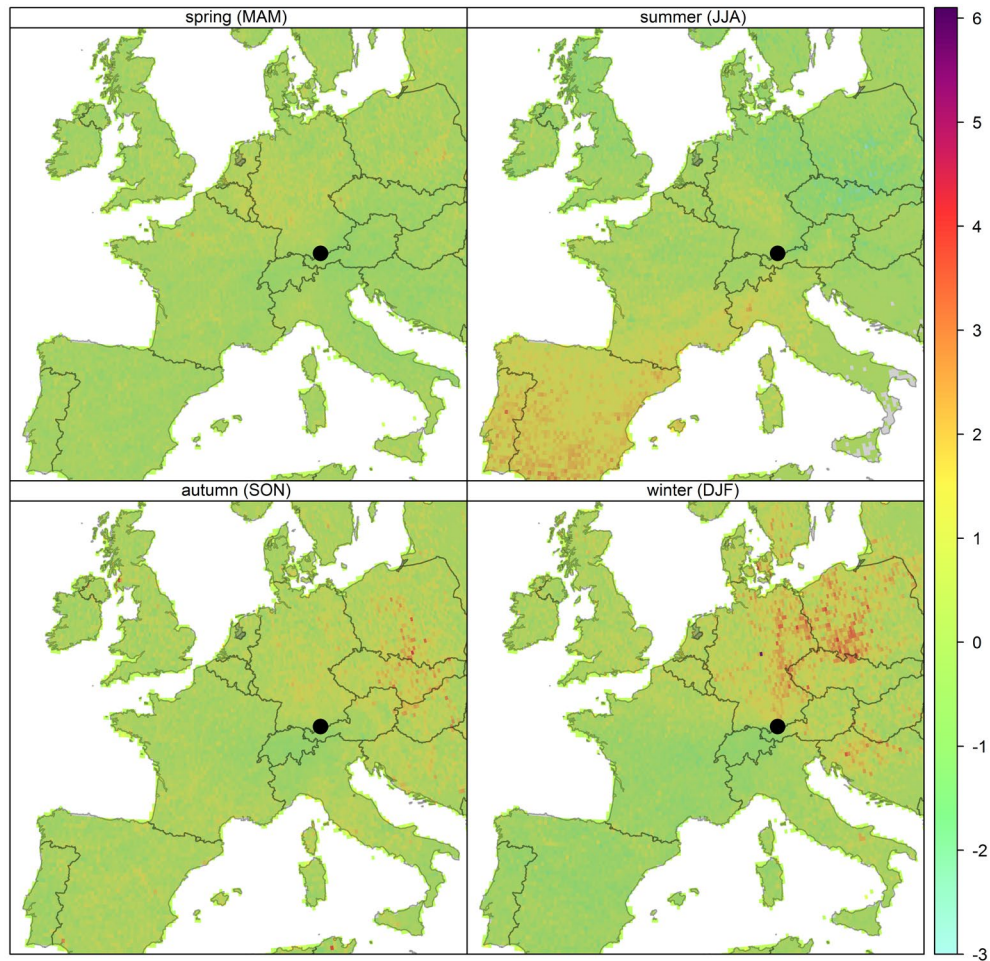


Abb. 2: Jahreszeitlich differenzierte Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trendbereinigten CO₂-Konzentrationen, die während des Untersuchungszeitraums 2000 – 2015 am Schneefernerhaus (schwarzer Punkt) gemessen wurden (in ppm)

Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen

ankommenden Pfade atmosphärischer Luftmassen in Form von Rückwärtstrajektorien mit den zeitgleich gemessenen CO₂-Konzentrationen verknüpfen. In Erweiterung zur Clusterung der Rückwärtstrajektorien berücksichtigen konzentrationsgewichtete Trajektorienfelder die Aufenthaltsdauer der Luftpakete über geographischen Regionen im Vorfeld ihrer Ankunft und Aufzeichnung am Messstandort und fungieren 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 CO₂-Messergebnissen am Rezeptor Schneefernerhaus beiträgt (Carlaw & Ropkins 2012).

In den resultierenden konzentrationsgewichteten Trajektorienkarten für die saisonal separierten CO₂-Konzentrationen der Jahre 2000 - 2015 (s. Abb. 2) 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 Kohlendioxidlenke darstellt, wohingegen potentielle Quellgebiete sowohl nordöstlich der Alpen als auch südwestlich davon verortet werden. Die sommerlichen Erhöhungen des Kohlendioxidlevels an der Zugspitze gehen demnach größtenteils auf die nordwestliche Mittelmeerregion zurück, in der zu dieser Jahreszeit häufig hitzebedingte Feuer entfachen, deren freigesetztes Kohlendioxid eine mögliche Ursache für die um durchschnittlich bis zu 4 ppm höheren CO₂-Werte am Rezeptor der Umweltforschungsstation bei Luftmassentransport aus diesem Gebiet ist. In den Wintermonaten dagegen strömt

CO₂-reiche Luft aus adverser Richtung zur Zugspitze, wonach Holz- und Kohlefeuerung aus Nordost-Europa als Hauptverursacher erhöhter CO₂-Konzentrationen zu dieser kalten Jahreszeit angesehen werden kann. Der Einfluss dieser Emittenten kündigt sich bereits im Herbst an und ist in seinem Beitrag in etwa mit den sommerlichen Quelleinträgen aus der spanischen und südfranzösischen Mittelmeerregion zu vergleichen.

Ausblick

Die vorgestellte Methodik der CO₂-Haushaltsbilanzierung wird im Laufe des Forschungsprojekts auf weitere (hoch-) alpine Messstationen (Jungfraujoch, Sonnblick, Plateau Rosa - s. Abb. 3) ausgeweitet, da jeder zusätzliche Rezeptor die Zuverlässigkeit des Verfahrens signifikant erhöht und sich gerade diese Untersuchungsregion durch hochqualitative wie repräsentative Messstandorte exponierter Lage auszeichnet. Dadurch gewinnt die Aussagekraft der inversen ‚top-down‘-Modellierung mit Hilfe von Trajektorien über dem Alpenraum als Kerngebiet sukzessive an Zuverlässigkeit und gewährleistet schließlich eine fundierte, messreihen-basierte Untersuchung des alpinen CO₂-Haushalts auf der synoptischen Skala.

Betrachtung des regionalen CO₂-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen



Abb. 3: Karte der vier geplanten Rezeptor-Observatorien (blaue Dreiecke) für die messreihen-basierte CO₂-Haushaltsbilanzierung des Alpenraums (definiert durch die Perimeter der Alpenkonvention in rot)

Literatur

- 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, S. 1552.
- 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, S. 2461-2474.
- Apadula, F., Gotti, A., Pignini, A., Longhetto, A., Rocchetti, F., Cassardo, C., Ferrarese, S., Forza, R. (2003): Localization of source and sink regions of carbon dioxide through the method of the synoptic air trajectory statistics, *Atmospheric Environment*, 37, S. 3757-3770.
- Brankov, E., Rao, S. T., Porter, P. S. (1998): A trajectory-clustering-correlation methodology for examining the long-range transport of air pollutants. *Atmospheric Environment*, 32, S. 1525-1534.
- Carslaw, D. C., Ropkins, K. (2012): openair – An R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software*, 27, 28, S. 52-61.