

## HERKUNFTSANALYSE KLIMAWIRKSAMER GASE UND AEROSOLE MITTELS TRAJEKTORIEN-CLUSTERVERFAHREN

ESTHER OSSWALD<sup>1</sup>, JUCUNDUS JACOBET<sup>1</sup>, LUDWIG RIES<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, ESTHER.OSSWALD@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

<sup>2</sup>UMWELTBUNDESAMT, GAW-GLOBALSTATION ZUGSPITZE

Seit vielen Jahrzehnten werden am Standort Zugspitze und seit 2001 an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) die atmosphärischen Konzentrationen von Spurengasen und klimawirksamen Aerosolen mit hochpräzisen Messgeräten entsprechend den Vorgaben des Global Atmosphere Watch (GAW) Programms der Weltorganisation für Meteorologie (World Meteorological Organisation, WMO) aufgezeichnet. Das Ergebnis sind qualitätsgesicherte, lang-jährige Zeitreihen, die Aufschluss über die nordhemisphärische Hintergrundbelastung geben.

### Messstandort

Die exponierte Lage der Messplattform Zugspitze an der 2.650 m hoch gelegenen Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) ist in besonderer Weise repräsentativ für die nordhemisphärische Hintergrundbelastung an Luftschadstoffen.

Den langzeitlichen Klimagas- und Aerosolmessungen an der UFS (vgl. die exemplarische CO<sub>2</sub>-Messzeitreihe in Abb. 1) kommt daher weitreichende Bedeutung zu. Insbesondere im Winter sowie im Frühjahr und im Herbst zwischen 0 und 6 Uhr detektieren die Messungen der klimawirksamen Spurengase und Aerosole den Zustand der unteren freien Troposphäre, während die übrigen Tages- und Jahreszeiten aufgrund der strahlungsangetriebenen Grenzschichtdynamik stärker durch regionale Quellen im (vor-)alpinen Umfeld beeinflusst werden. Neben den mesoskaligen Prozessen wie Föhn, Berg- und Talwindssystemen oder dem sog. „alpinen Pumpen“, die wirkungsvolle vertikale Transportmechanismen der Emissionen der umliegenden Regionen in die höheren Atmosphärenschichten darstellen, ist der Ferntransport auf bis zu interkontinentaler Skala für die Luftzusammensetzung von Bedeutung.



Abb. 1: Monats- und Jahresmittelwerte der an der UFS gemessenen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Blau eingezeichnet ist die zwölfmonatlich übergreifend gemittelte Kurve.

### Emissionsabschätzungen

Die Quantifizierung des Ferntransportanteils an der in Mitteleuropa vorkommenden Hintergrundbelastung bildet gemeinsam mit der Lokalisation der verantwortlichen Quellregionen die wissenschaftliche Grundlage für europäische Emissionsabschätzungen. Nur eine möglichst genaue Identifizierung der Emittenten und ihrer Verursacheranteile an der Luftbelastung ermöglicht der Umweltpolitik, politische Maßnahmen für den Klimaschutz auf ihre Wirksamkeit hin zu überprüfen und zu präzisieren. Dies ist angesichts der für die kommenden Jahrzehnte prognostizierten und bereits stattfindenden globalen Erwärmung, die mit Veränderungen der vorherrschenden Zirkulationsmuster und somit der Transportbedingungen einhergeht, von besonderer Relevanz.

### Trajektorien-Clusteranalyse

Ziel des Projektes ist daher eine vertiefte Analyse der an der UFS gemessenen Zeitreihen von Klimagasen und klimawirksamen Aerosolen in Bezug auf sich ändernde Transportverhältnisse und Emissionen im Einzugsgebiet der Zugspitze. Zur Bestimmung der geographischen Herkunft der an der UFS ankommenden meteorologischen Luftmassen, werden Zugbahnen (Trajektorien) mit Hilfe des *FLEXible PARTicle dispersion model* (FLEX-PART) numerisch berechnet. Die resultierenden Trajektorien werden in eine zuvor definierte Anzahl von Untergruppen, die als Luftmassentypen interpretiert werden können, eingeteilt. Das Kriterium für die Zuordnung zu einem Trajektorien-Cluster ist die maximale clusterinterne Homogenität verbunden mit einer möglichst großen Heterogenität der Luftmassentypen untereinander. Diese Methodik der Trajektorien-Clusteranalyse visualisiert die wesentlichen Herkunftsgebiete der Aerosole und Klimagase.

### Nordhemisphärische Hintergrundbelastung

Die Konzentrationen der klimarelevanten Messgrößen an der UFS werden zu den Ferntransportereignissen und lokalen Emittenten der Trajektorien-Cluster in Beziehung gesetzt und geben Auskunft über die Quellregionen sowie deren raum-zeitliche Relevanz. Für die eindeutige Differenzierung zwischen der nordhemisphärischen Hintergrundbelastung und der grenzschichtbeeinflussten Luftzusammensetzung werden neben den lokalen Wind-, Temperatur- und Feuchteaufzeichnungen die Radon- und Ceilometer-Messungen am Zugspitzgipfel hinzugezogen. Radon fungiert aufgrund seiner Halbwertszeit von 3,8 Tagen als Tracer für bodennahe Luft und verweist wie die aus den Ceilometerdaten abgeleitete Mischungsschichthöhe auf den Einfluss von Grenzschichtluft.

### Netzwerk „Virtuelles Alpenobservatorium“

Das vorgestellte Verfahren zur Herkunftsanalyse der klimawirksamen Spurengase und Aerosole soll auf die Partnerstationen des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO) Hohenpeißenberg (Deutschland), Jungfrauoch (Schweiz) und Sonnblick (Österreich) ausgedehnt werden. Durch die Einbindung kooperierender alpiner Höhenforschungsstationen können genauere Aussagen über die Zusammensetzung und Entwicklung der für die freie Troposphäre Mitteleuropas repräsentativen Hintergrundkonzentrationen von Klimagasen und Aerosolen getroffen werden. Die Ausweitung des Trajektorien-Clusterverfahrens auf die VAO-Partnerstationen gewährleistet eine für den Alpenraum aussagekräftige Herkunftsanalyse der gemessenen Zeitreihen von Spurengasen und klimawirksamen Aerosolen in Bezug auf sich ändernde Transportbedingungen und Immissionen in den Einzugsgebieten. Die Ergebnisse liefern wertvolle Schlüsse für die Umweltpolitik und die Wirksamkeit von Klimaschutzmaßnahmen.