



HelmholtzZentrum münchen
German Research Center for Environmental Health



Freistaat Bayern



Wissenschaftliche Resultate 2019/ 2020



Umwelt
Forschungsstation
Schneefernerhaus

Nummer 06
Oktober 2021

Herausgeber: Umweltforschungsstation Schneefernerhaus GmbH
Zugspitzstr. 5; 82475 Zugspitze
Internet: www.schneefernerhaus.de
Druck: StMUV
Stand: Oktober 2021

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Druckschrift zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden. Bei publizistischer Verwertung – auch von Teilen – wird die Angabe der Quelle und Übersendung eines Belegexemplars erbeten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos - abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich

Liebe Leserinnen und Leser,

wir betreiben Forschung, weil wir angetrieben sind durch die Neugier, die Prozesse in unserer (Um)welt zu verstehen. Dazu führen wir Messungen durch und stellen uns die Frage, wieso die Beobachtungen gerade so und nicht anders ausfallen. Reicht das bisherige Wissen nicht zur Erklärung des jeweiligen Befundes aus, stellen wir Hypothesen auf, die dann in der Regel einen kleinen Schritt über das bisher Bekannte hinausgehen und so zur Erweiterung unseres Wissens beitragen. Wer sich aber auf den Pfad der Forschung begibt, dem ist immer klar, dass das Wissen unvollständig bleiben wird. Und immer müssen wir damit rechnen, dass unsere Hypothesen irgendwann durch andere Beobachtungen widerlegt oder zumindest revidiert werden. Dieser Weg ist zäh, aber er hat sich in der Forschung bewährt.

In der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus geht es um das Verständnis des alpinen Erdsystems. Zentrale Fragen nach der Natur der jeweils vorherrschenden Prozesse und möglichen Veränderungen werden auf verschiedenen raumzeitlichen Skalen adressiert. Auch geht es um Auswirkungen auf den Menschen und darum, neu erworbenes Wissen in neue Fähigkeiten und Technologien zu übersetzen. Davon erzählen in diesem Buch die in der Umweltforschungsstation aktiven Forscherinnen und Forscher in jeweils kurzen aber allgemein verständlichen Aufsätzen.

Bei der Lektüre wird auch der folgende Aspekt deutlich, der die Forschung in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus zukünftig mehr und mehr charakterisieren wird. Hier wird Forschung betrieben, die das alpine Erdsystem vom Erdboden bis an den Rand zum Weltraum zum Gegenstand hat. Die hier an einem Ort versammelte Expertise zu nahezu allen Bereichen erlaubt es, nun auch fachthemenübergreifend die Vorgänge um uns herum zu studieren und zu verstehen. Es gibt nicht viele andere Orte, an denen Fragen zum Verständnis der gegenseitigen Wechselwirkung zwischen den verschiedenen Bereichen des alpinen Erdsystems besser beantwortet werden können, als die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus.

Im Namen der in der Umweltforschungsstation aktiven Forscherinnen und Forscher wünsche ich Ihnen viel Freude an der Lektüre.

Herzlichst
Ihr



Prof. Dr. Michael Bittner
Wissenschaftlicher Koordinator der UFS

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

1.	Das atmosphärische Luftleuchten: Höhe, Dicke und Variabilität der Hydroxylschicht	8
	<i>Sabine Wüst, Michael Bittner, Jeng-Hwa Yee, Martin G. Mlynyczak, James M. Russell III</i>	
2.	Entwicklung der Mesopausentemperatur über der UFS 2009-2020	11
	<i>Carsten Schmidt, Lisa Küchelbacher, Sabine Wüst, Michael Bittner</i>	
3.	Ändert sich die großräumige Zirkulation und welche Konsequenzen ergeben sich für das Wettergeschehen an der UFS?	13
	<i>Lisa Küchelbacher, Dominik Laux, Sabine Wüst, Michael Bittner</i>	
5.	Joint Bavarian Slovenian Endeavour for Innovative Air Quality Analysis (JOSEFINA)	16
	<i>Michael Bittner, Frank Baier, Ehsan Khorsandi, Jana Handschuh</i>	
6.	Schwerewellen im und nahe des Alpenraums im OH-Nachtleuchten	20
	<i>Patrick Hannawald, Sabine Wüst, Michael Bittner</i>	
7.	Phase 2: AlpEnDAC	23
	<i>Inga Beck, Michael Bittner</i>	
8.	Das Bioklimatische Informationssystem BioClis- Ein Service der UFS	25
	<i>Thilo Erbertseder, Lorenza Gilardi, Jana Handschuh, Michael Bittner</i>	
9.	Atmosphärischer Langstreckentransport von Pollen und Pilzsporen sind alpine Orte sicher für Menschen mit Pollenallergien?	29
	<i>Daniela Bayr, Maria P. Plaza, Franziska Kolek, Stefanie Gilles, Claudia Traidl-Hoffmann, Athanasios Damialis</i>	
10.	Pollen an der UFS	32
	<i>Jeroen Buters, Katharina Heigl, Susanne Kutzora</i>	
11.	Solare UV-Strahlung – Vermessung der spektralen Bestrahlungsstärke am Schneefernerhaus	34
	<i>Sebastian Lorenz, Ingo Mayer, Tetyana Antonova, Daniela Weiskopf</i>	
12.	Simulation der Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung auf dem „Schneefernerhaus“ und auf dem „Sphinx Observatorium“ mit dem Monte Carlo Programm GEANT₄	40
	<i>Thomas Brall, Vladimir Mares, Rolf Bütikofer, Werner Rühm</i>	

13	Interannuelle Variabilität des hochalpinen CO₂- und CH₄-Haushalts auf Basis atmosphärischer Messreihen 2011 - 2015	44
	<i>Esther Giemsa, Jucundus Jacobeit, Ludwig Ries, Stephan Hachinger,</i>	
14	Vergleich der CO₂ und CO Messungen am Schneefernerhaus und dem Zugspitzkamm	48
	<i>Antje Hoheisel, Cedric Couret, Bryan Hellack, Martina Schmidt¹</i>	
15	Comparison of Continuous In-Situ CO₂ Measurements with Co-Located Column-Averaged XCO₂ TCCON/Satellite Observations and Carbon Tracker Model Over the Zugspitze Region	51
	<i>Ye Yuan, Ralf Sussmann, Markus Rettinger, Ludwig Ries, Hannes Petermeier, Annette Menzel</i>	
16	Geringere CO₂-Emissionen durch den Covid-19-Lockdown nicht in der Atmosphäre erkennbar. Zum Erreichen der Pariser Klimaziele sind jahrzehntelange Maßnahmen erforderlich	54
	<i>Ralf Sussmann, Markus Rettinger</i>	
17	Validierung von Lidar-Messungen von Wasserdampf bis 20km und Temperatur bis zur Mesopause (90km)	57
	<i>Hannes Vogelmann, Thomas Trickl, Matthias Perfahl</i>	
18	Langzeitmessungen der Partikelkonzentration am Standort Schneefernerhaus	60
	<i>Harald Flentje, Björn Briel, Werner Thomas</i>	
19	Auswirkungen des Hochgebirgsklimas auf die Lungenfunktion bei mildem saisonalem Asthma bronchiale	62
	<i>Pontus Mertsch, Jeremias Götschke, Rosemarie Kiefe¹, Ulrike Schürmann, Nikolaus Kneidinger, Jürgen Behr, Katrin Milger</i>	
20	Zukunftsprojektionen der Windgeschwindigkeit an der Station Zugspitze	64
	<i>Jucundus Jacobeit, Severin Kaspar, Christoph Beck, Andreas Philipp</i>	
21	Hydrologische Untersuchungen im Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs	69
	<i>Stefan Weishaupt, Karl-Friedrich Wetzel</i>	
22	Feldmessungen der Wolkentröpfchen-Clusterbildung	72
	<i>Jan Moláček, Guus Bertens, Gholamhossein Bagheri, Haitao Xu, Eberhard Bodenschatz</i>	

23	Beobachtung von Insekten mit dem Wolkenradar am Schneefernerhaus	76
	<i>Martin Hagen, Tobias Zinner, Florian Baldes</i>	
24	Verhalten von persistenten Chemikalien im Ökosystem der Alpen – Untersuchung der Bioakkumulation über trophische Ebenen	80
	<i>Patricia Janz, Gabriela Ratz</i>	
25	Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen auf dem Zugspitzplatt	85
	<i>Philipp Stojakowits, Arne Friedmann, Oliver Korch</i>	
26.	Permafrostmonitoring mit der Erdbebenstation im Schneefernerhaus	88
	<i>Fabian Lindner, Joachim Wassermann</i>	
27.	Temperatur und Wasser im Kammstollen: wichtige Zusatzinformatio- nen für das Permafrostmonitoring	92
	<i>Riccardo Scandroglio, Michael Krautblatter</i>	
28.	KlimaAlps – Klimawandel sichtbar machen	96
	<i>Inga Beck, Cornelia Baumann</i>	
29.	Interdisziplinäre Perspektiven auf das Mensch-Umwelt-Verhältnis	98
	<i>Jens Soentgen, Kirsten Twelbeck</i>	

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ACTRIS	Aerosols, Clouds and Trace gases Research Infrastructure
AERO-NET	AErosol RObotic NETwork
AOD	AerosolOptical Depth
ARI	Aggregated Risk Index
BAIER	Bavarian Airglow ImagER
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
CERF	CERN-EU High Energy Reference Field
CERN	Europäische Organisation für Kernforschung
CFAD	contoured-frequency by altitude diagram
CFH	Cryogenic Frost Point Hygrometer
cpu	molacec
CRDS	Cavity-Ring-Down-Spektroskopie
CRHM	Cold Regions Hydrological Model
COMPLETE	Cloud-MicroPhysics-Turbulence-Telemetry
CWT	concentration weighted trajectory fields
DC	Dezelerationskapazität
DDS	dynamical dimension search
DFD	Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNS	Direkte numerische Simulationen
DSCD	differential slant column density
DWD	Deutscher Wetterdienst
EA	East Atlantic Pattern
EAWR	East Atlantic West Russia Pattern
ec	elektrische Leitfähigkeit
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EEA	European Environmental Agency
EEr	Erythem-wirksame Bestrahlungsstärke
EOC	Fernerkundungsdatenzentrum des DLR in Oberpfaffenhofen
ePIN	Elektronisches Polleninformationsnetzwerk Bayern
EZG	Einzugsgebiet
EZMW	Europäischen Zentrum für Mittelfrist-Wettervorhersage
FAIM	Fast Airglow IMager
GAMM	Generalized Additive Mixed Models
GAW	Global Atmosphere Watch
GC	Gaschromatographie
GFZ	Geoforschungszentrum Potsdam
GRIPS	GRound-based Infrared P-branch Spectrometer
HD(CP) ²	High Definition Clouds and Precipitation for advancing Climate Prediction
hFSM	Halognierte Flammschutzmittel
HGS MathComp	Mathematical and Computational Methods for the Sciences
HRU	Hydrological Response Unit
ICAR	Regionales Klimamodell
ICS	Inhalative Kortikosteroiden
IMK-IFU	Institute of Meteorology and Climate Research Atmospheric Environmental Research
IWC	ice water content
IWV	integrated water vapor
JOSEFINA	Joint Bavarian Slovenian Endeavour for Innovative Air Quality Analysis
LRZ	Leipniz- Rechenzentrum
LWC	liquid water content
LWP	liquid water path
MAX-DOAS	Multi-AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy
MIM	Meteorologische Institut an der Universität München
MLT	Mesosphere Lower Thermosphere

MODIS	(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NAO	Nordatlantische Oszillation
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NDMC	Network for the Detection of Mesospheric Change
NDSI	Normalized difference snow index
NUTS	Nomenclature of Territorial Units for Statistics
OH	Hydroxyl
POP	Persistente organische Schadstoffe
PFAS	Polyfluorierte Alkylverbindungen
PFOS	Perfluoroktansulfonsäure
PSCF	potential source contribution function
RDF	Radialverteilungsfunktion
SAR	Synthetic Aperture Radar
SCAND	Scandinavian Pattern
STI	Extratropische stratosphärische Intrusionen
STL	Saison-Trend-Zerlegung von Zeitreihen
StMGP	Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege
SWE	Schnee-Wasser-Äquivalent
SWI	significant wavelet intensity
TCCON	Total Carbon Column Observing Network
TANGOO-Instrument	Tilting-filter spectrometer for Atmospheric Nocturnal Ground-based Oxygen & hydrOxyl emission measurements
THG	Treibhausgase
TIMED-SABER	Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics, Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry
TLS	terrestrischer Laserscanner
TNA	Interkontinentaltransport von Nordafrika
TUS	Interkontinentaltransport von Nordamerika
UFS	Umweltforschungsstation Schneefernerhaus
UTCI	Universelle thermische Klimaindex
UV	Ultraviolett
UVI	UV Index
QBO	Quasi biannual asclation
VAO	Virtual Alpine Observatory
VIS	Sichtbar (visible)
wcb	Warm Conveyor Belt
WMO	World Meteorological Organization
WZU	Environmental Science Center
ZAUM	Wissenschaftszentrum Umwelt
ZUGOG	Zugspitze Geodynamic Observatory Germany

DAS ATMOSPHERISCHE LUFTLEUCHTEN: HÖHE, DICKE UND VARIABILITÄT DER HYDROXYLSCHICHT

SABINE WÜST¹, MICHAEL BITTNER^{1,2}, JENG-HWA YEE³, MARTIN G. MLYNCZAK⁴, JAMES M. RUSSELL III⁵

¹ DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT OBERPFAFFENHOFEN, DEUTSCHLAND

² UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, DEUTSCHLAND

³ APPLIED PHYSICS LABORATORY, THE JOHNS HOPKINS UNIVERSITY, LAUREL, USA

⁴ NASA LANGLEY RESEARCH CENTER, HAMPTON, USA

⁵ CENTER FOR ATMOSPHERIC SCIENCES, HAMPTON, USA

E-MAIL: SABINE.WUEST@DLR.DE

Zusammenfassung: Hydroxyl, im unteren Bereich der Atmosphäre auch als „Waschmittel“ bezeichnet, da es als Radikal effektiv zum Abbau von Spurengasen beiträgt, bildet in etwa 86-87 km Höhe eine Schicht mit einer Halbwertsbreite von etwa 8-9 km. Für das weltweite Netzwerk NDMC (Network for the Detection of Mesospheric Change) ist es hier von besondere Bedeutung, da es Bewegungsprozesse sichtbar macht. Basierend auf 17 Jahren satellitenbasierten Daten wurde die Variation der Höhe und Dicke der Schicht untersucht.

Abstract: Hydroxyl, also called "detergent" in the lower atmospheric region because it effectively contributes to the decomposition of trace gases as a radical, forms a layer with a full width at half maximum of about 8-9 km at an altitude of about 86-87 km. For the worldwide network NDMC (Network for the Detection of Mesospheric Change) it is of special importance here, because it makes dynamical processes visible. Relying on 17 years of satellite-based data, the variation in height and thickness of the layer was studied.

Der Bereich der Atmosphäre oberhalb von ca. 40 km wurde lange Zeit in Fachkreisen scherz-

haft auch als „Ignorosphäre“ bezeichnet. Grund dafür war die schlechte Zugänglichkeit für Messsysteme.

Eine vergleichsweise lange verfügbare und anfangs rein bodengebundene Technik ist die Messung der Infrarotstrahlung des atmosphärischen Luftleuchtens (engl. Airglow), die u. a. von angeregtem Hydroxyl (OH) emittiert wird.

Der OH-Airglow bildet eine Schicht mit einem Schwerpunkt in ca. 86-87 km Höhe und einer Halbwertsbreite von ca. 8-9 km.

Die Intensität dieser Strahlung wird wesentlich durch die atmosphärische Dynamik in diesem Höhenbereich moduliert. Die Messung dieser Modulationen lässt damit Rückschlüsse auf die Bewegungsprozesse in dieser Höhe zu. Unter bestimmten Umständen können auch Informationen über die Temperatur abgeleitet werden.

Ungefähr 85 % aller in der Datenbank des weltweiten Messnetzwerkes NDMC (<https://ndmc.dlr.de>) gelisteten Spektrometer und Photometer adressieren den OH-Airglow (Schmidt et al., 2018). Seit 2005 wird das sog. OH-Nachtleuchten aus der Mesopausenregion auch im Alpen- bzw. Voralpenraum mithilfe sog. GRIPS-Instrumente (GRound based Infra-red P-branch Spectrometer) beobachtet. Mitt-

lerweile verfügt der Alpenraum über das größte NDMC-Subnetzwerk identischer Instrumente, die auch Teil des virtuellen Alpenobservatoriums, VAO, sind (Oberpfaffenhofen (48.09°N, 11.28°O), Hohenpeißenberg (47.8°N, 11.0°E) und Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (47.42°N, 10.98°O) in Deutschland sowie Haute Provence (43.93°N, 5.71°O), Frankreich, Sonnblick (47.05°N, 12.95°O), Österreich und Otlica (45.93°N, 13.91°O), Slowenien). Neben GRIPS messen dort z. T. mittler-

weile auch OH-Kameras (FAIM = Fast Airglow IMager).

Ein Kritikpunkt an dieser Messtechnik ist die Tatsache, dass Informationen über die exakte Höhe, aus der die Signale stammen, nicht ohne weiteres basierend auf den Messungen der Spektrometer, Photometer oder Kameras verfügbar sind. Hierfür sind zusätzliche Messungen nötig.

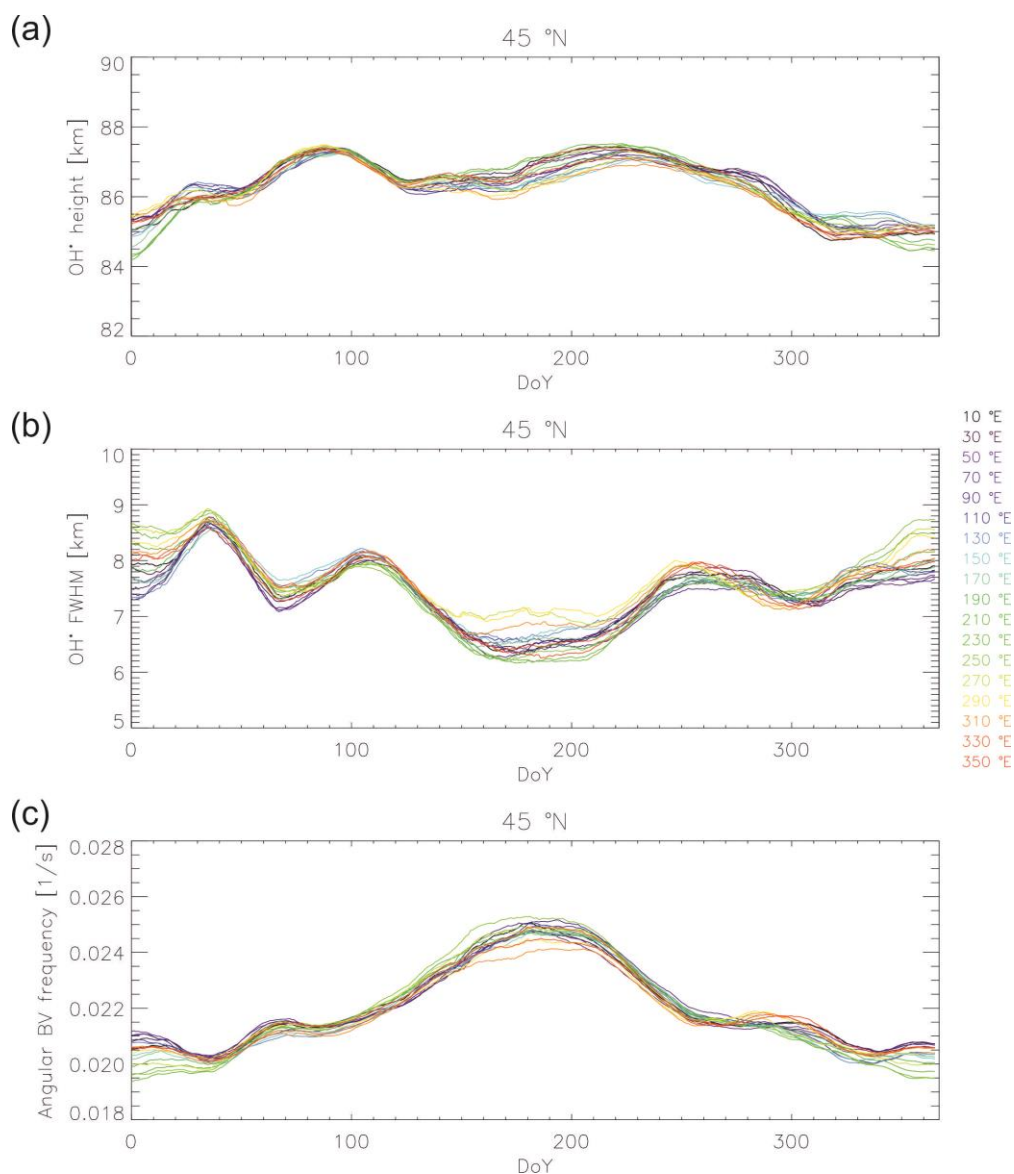


Abb.1: OH*-Schichthöhe (a), Halbwertsbreite (b) und Brunt-Väisälä-Frequenz gemittelt über die OH*-Schicht (c) sind für das Breitenband von $45 \pm 5^\circ$ N in Abhängigkeit von den Längengraden (Längengrad $\pm 10^\circ$, farbcodiert) und Tag des Jahres (DoY) dargestellt. Die Daten wurden für jeden Tag des Jahres über die Jahre 2002 bis 2018 gemittelt. Zusätzlich wurden sie einer gleitenden 31-Punkte-Mittelung unterzogen. Veröffentlicht unter CC BY License 4.0 in Wüst et al. (2020) (<https://amt.copernicus.org/articles/13/6067/2020/amt-13-6067-2020.pdf>).

Eine Möglichkeit stellt die Verwendung von satellitenbasierten Informationen des Instrumentes TIMED-SABER (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics Dynamics, Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) dar, das sich seit Ende 2001 im Orbit befindet. SABER ist ein sog. Limbsounder, d. h. er schaut tangential durch die Atmosphäre und ist so in der Lage, vertikale Profile der OH-Emission abzuleiten. Zwischen 52°N und 52°S ist seine Abdeckung so gut, dass ein jährlicher Verlauf der Höhe und Breite der OH-Schicht abgeleitet werden kann (Abb. 1 a und b). Gut zu erkennen sind ein jährlicher und z. T. ein halbjährlicher Zyklus, die im Wesentlichen der so genannten residuellen Zirkulation, einer globalen Strömung in der oberen Mesosphäre, geschuldet sind. Oszillationen im Bereich von 60 Tagen sind wahrscheinlich dem Zusammenspiel der Beobachtungsgeometrie des Satelliten und atmosphärischer Gezeiten geschuldet, obwohl Schwingungen in diesem Periodenbereich immer wieder in der Atmosphäre auch ohne bekannten physikalischen Grund beobachtet werden.

Die Schwerpunktshöhe der OH-Schicht und ihre Dicke variieren also vergleichsweise wenig während eines Jahres. Dies gilt nicht nur für unsere geographischen Breiten sondern für alle betrachteten.

Ein weiterer interessanter Parameter, der nicht direkt aus den NDMC-Messungen abgeleitet werden kann, ist die so genannte Brunt-Väisälä Frequenz. Sie gibt Aufschluss darüber, ob Luftpakete, die vertikal angestoßen wurden, immer weiter in der Atmosphäre aufsteigen, ob also Konvektion vorliegt, oder ob sich stattdessen atmosphärische Wellen, so genannte Schwerewelle ausbilden können. Diese transportieren Energie und Impuls durch die Atmosphäre und sind in Klima- und Atmosphärenmodelle bis heute noch unzureichend berücksichtigt. Die Brunt-Väisälä Frequenz wird außerdem zur Berechnung verschiede-

ner Wellenparameter benötigt. Ähnlich wie die Schwerpunktshöhe der OH-Schicht und ihre Breite variiert auch die Brunt-Väisälä Frequenz (ebenfalls abgeleitet aus TIMED-SABER-Daten und gewichtet für die OH-Schicht) während des Jahres (Abb. 1c).

Der Verlauf der OH-Schwerpunktshöhe und Breite sowie der Brunt-Väisälä Frequenz wurden mithilfe mathematischer Funktionen genähert. Die Parameter der Funktionen sowie die Funktionsgleichungen wurden der NDMC- und VAO-Community im Rahmen der Publikation Wüst et al. (2020) zur Verfügung gestellt.

Literatur

Schmidt, C., Dunker, T., Lichtenstern, S., Scheer, J., Wüst, S., Hoppe, U. P., und Bittner, M.: Derivation of vertical wavelengths of gravity waves in the MLT-region from multispectral airglow observations. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 173, 119–127, doi: 10.1016/j.jastp.2018.03.002, 2018.

Wüst, S., Bittner, M., Yee, J. H., Mlynchak, M. G., und Russell III, J. M.: Variability of the Brunt-Väisälä frequency at the OH*-airglow layer height at low and midlatitudes. *Atmos. Meas. Tech.*, 13(11), 6067-6093, doi: 10.5194/amt-13-6067-2020, 2020.

Danksagung

Diese Arbeiten sind im Rahmen des Projekts VoCaS-ALP & AlpEnDAC Phase 2 entstanden, welche vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz finanziert werden (Förderkennzeichen: TKP01KPB-70581 und TUS01UFS-72184).

ENTWICKLUNG DER MESOPAUSENTEMPERATUR ÜBER DER UFS 2009-2020

CARSTEN SCHMIDT¹, LISA KÜCHELBACHER¹, SABINE WÜST¹, MICHAEL BITTNER^{1,2}

¹DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, MÜNCHENER STR. 20, 82234 OBERPFAFFENHOFEN

²UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄTSTRASSE 1, 86159 AUGSBURG

E-MAIL: CARSTEN.SCHMIDT@DLR.DE

Zusammenfassung: Seit 2009 erfasst das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) von der Umweltforschungsstation „Schneefernerhaus“ (UFS) unterbrechungsfrei aus das sog. Hydroxyl (OH)-Nachtgleuchten (engl.: *airglow*) aus der Mesopausenregion in ca. 86-87 km Höhe. Nach gut einem Jahrzehnt lassen sich erste Aussagen über die langfristige Entwicklung der Temperaturen ziehen. Augenscheinlich beeinflussen die schwankende solare Einstrahlung und die quasi-zweijährige Oszillation (QBO) die Temperaturen stärker als bislang bekannt.

Abstract: Since 2009 the German Remote Sensing Data Center (DFD) of the German Aerospace Center (DLR) has been observing the OH airglow region from the environmental research station "Schneefernerhaus" (UFS) without any interruption. This faint luminosity originates in the Mesosphere-Lower Thermosphere (MLT) region at approximately 86-87 km height. First conclusions concerning the long-term development of the MLT-temperatures can be drawn after one decade. Apparently, the varying solar flux and the quasi biannual oscillation (QBO) influence the MLT-temperatures to a larger extent than previously known.

Das Leuchten in der Mesopausenregion hat seinen Ursprung in einer exothermen chemischen Reaktion, bei der Ozon (O_3) mit atoma-

rem Wasserstoff (H) reagiert und molekularen Sauerstoff (O_2) sowie Hydroxyl-Moleküle (OH) produziert. Die freigesetzte Energie wird dabei überwiegend auf das Hydroxyl-Molekül übertragen, das diese nach kurzer Zeit in Form sichtbarer und infraroter Strahlung wieder abgibt.

Zur Vermessung dieser Strahlung werden die vom DLR entwickelten GRIPS (GROund-based Infrared P-branch Spectrometer) Instrumente eingesetzt. Aus den so gewonnenen Airglow-

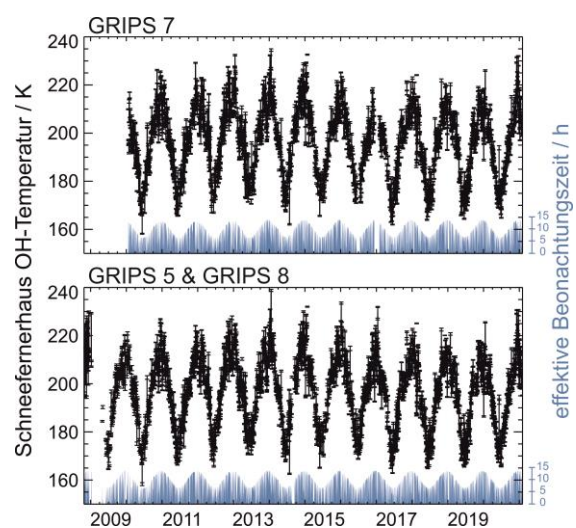


Abb.1: Individuelle Temperaturzeitreihen (schwarz) inklusive der ersten Messungen mit dem Prototyp GRIPS 5 in 2008 (Anfang September 2010 durch GRIPS 8 ersetzt). Das Messkonzept mit zwei Instrumenten verhindert das Auftreten technisch bedingter Ausfälle.

Spektren kann auf die Umgebungstemperatur in 86-87 km Höhe geschlossen werden (vgl. Schmidt et al. (2013) und Wüst et al. (2017)). Dieser Höhenbereich ist von entscheidender Bedeutung beim Verständnis des globalen

Klimawandels. Die prognostizierte Erhöhung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre führt hier nach aktuellem Verständnis zu einer bis zu zehnmal schnelleren Änderung der Temperatur als am Erdboden. Allerdings reagieren die Temperaturen in dieser Höhe auch stärker auf andere Einflüsse wie die Schwankung der solaren Einstrahlung oder die in den Tropen generierte sog. quasi-zweijährige Oszillation (engl.: *quasi-biennial oscillation*, QBO). Deren Einflüsse müssen möglichst präzise erfasst werden, um einen potentiellen Temperaturtrend bestimmen zu können.

Anfang der 2000er Jahre erkannte man, dass viele Temperaturzeitreihen kaum die nötige Datenqualität aufwiesen, um entsprechende Analysen durchführen zu können. Dies führte nicht nur zur Gründung des NDMC (network for the detection of mesospheric change) sondern auch zum Beginn der OH-Messungen am Schneefernerhaus mit den neu entwickelten GRIPS-Instrumenten. Das Ziel, die UFS als Referenzstation des NDMC zu etablieren, wurde dabei von Anfang an konsequent verfolgt, indem die Messungen zur Erhöhung der Datenqualität mit zwei Instrumenten im Parallelbetrieb durchgeführt werden (s. Abb. 1).

Mittlerweile liegen über zehn Jahre an erfolgreichen Messungen vor und diverse natürliche Einflüsse auf die OH-Temperaturen können erstmals präzise abgeschätzt werden. Abbildung 2 zeigt die um den Jahresgang bereinigten OH-Temperaturen von Anfang 2010 bis Mitte 2020 (schwarz). Offenbar reagieren die OH-Temperaturen nach kurzer zeitlicher Verzögerung mit $5,9 \pm 0,6 \text{ K}/100\text{sfu}$ (sfu: *solar flux unit*) auf die Änderung der solaren Einstrahlung (rot). Ein QBO-Signal lässt sich in den Jahresmittelwerten (blaue Dreiecke) mit ca. $\pm 1 \text{ K}$ und einer Periodizität von ca. 24 Monaten (im Gegensatz zu den 28 Monaten der QBO) nur während der Zeiten erhöhter solare Aktivität erkennen. Dieses unerwartete Erkenntnis ist Gegenstand aktueller, weiterer Untersuchungen.

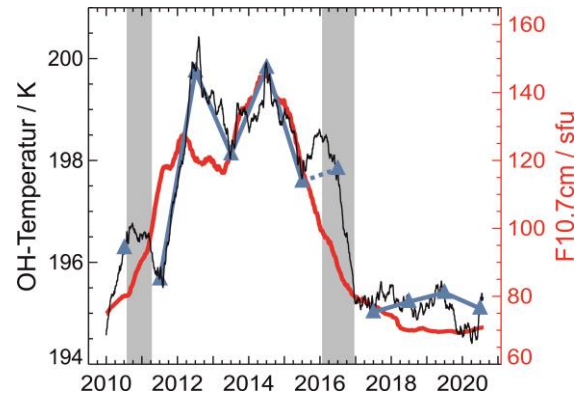


Abb.2: Gleitende Mittel (über 365 Tage) der OH-Temperatur (schwarz) und der solaren Einstrahlung (rot). Die Jahresmittel (blaue Dreiecke) zeigen ein QBO-Signal nur während eines erhöhten F10.7cm Wertes (2011-2015). Die grau schraffierten Bereiche markieren den Übergang von hoher zu niedriger Sonnenaktivität (80-100 sfu).

Literatur

Schmidt, C., Höppner, K., und Bittner, M.: A ground-based spectrometer equipped with an InGaAs array for routine observations of OH(3-1) rotational temperatures in the mesopause region. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 102, 125-139, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.001>.2013.

Wüst, S., Bittner, M., Yee, J.-H., Mlynczak, M.G., Russel, und J.M. III.: Variability of the Brunt-Väisälä frequency at the OH* layer height. *Atmos. Meas. Tech.* 10, 4895-4903, <https://doi.org/10.5194/amt-10-4895-2017>.2017.

Danksagung

Die Messungen wurden in den vergangenen Jahren u.a. im Rahmen von Drittmittelprojekten durch das bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert (Projekte GUDRUN (71b-U8729-2003/125-13), GRIPS3 Back-Up (2009/40051), BHEA (TLK01U-49580), LUDWIG (TUS01UFS-67093), VoCaS (TKP01KPB-70581) and AlpEnDAC (TUS01UFS-72184)).

ÄNDERT SICH DIE GROßRÄUMIGE ZIRKULATION UND WELCHE KONSEQUENZEN ERGEBEN SICH FÜR DAS WETTERGESCHEHEN AN DER UFS?

LISA KÜCHELBACHER¹, DOMINIK LAUX³, SABINE WÜST¹, MICHAEL BITTNER^{1,2}

¹DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, MÜNCHENER STRASSE 20, 82234 OBERPFAFFENHOFEN

²UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄTSSTRASSE 1, 86159 AUGSBURG

³EHEMALS UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄTSSTRASSE 1, 86159 AUGSBURG

E-MAIL: LISA.KUECHELBACHER@DLR.DE

Zusammenfassung: Die Zirkulation an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) wird v. a. durch die Aktivität planetarer Wellen bestimmt. Diese führen zu einer mehr oder weniger periodischen Änderung von Großwetterlagen. Erste Tendenzen zeigen, dass die Zirkulation an der UFS mehr und mehr durch Wellen mit langperiodischen Anteilen dominiert wird. Dies hätte folgende Konsequenzen: der Wetterwechsel wird langsamer, Wetterlagen persistenter, Extremereignisse könnten zunehmen.

Abstract: The circulation at the environmental research station Schneefernerhaus (UFS) is determined by the activity of planetary waves. These lead to a more or less periodic change of large-scale weather situations. First tendencies show that the circulation at the UFS is more and more dominated by waves with long periodic components. This would have the following consequences: the weather change becomes slower, weather patterns more persistent, extreme events could increase.

Die überproportionale Erwärmung der nördlichen polaren Breiten durch den Klimawandel (Sereze et al., 2009) steht im Verdacht, Änderungen der großräumigen Zirkulation der mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel zu

verursachen. Francis & Vavrus (2012) spekulieren, dass die damit verbundenen Änderungen des meridionalen Temperaturgradienten zu einer Abschwächung des zonalen Windes und damit zur Zunahme von Extremwetterereignissen könnten. Diese Hypothese ist recht weit verbreitet, obwohl hier bislang kein wissenschaftlicher Konsens herrscht (Blackport & Screen, 2020, Hoskins & Woollings, 2015).

Das Wetter über der UFS ist geprägt durch einen mehr oder weniger ständigen Wechsel im Bereich von Tagen bis zu wenigen Wochen. Dieser Wechsel ist zurückzuführen auf planetare Wellen. Dabei ist die Großwetterlage stets zusammengesetzt aus einer Summe verschiedener Wellenkomponenten. Die einzelnen Komponenten zeigen, welche typischen Periodendauern das Wettergeschehen hat.

Die Aktivität der planetaren Wellen wird auf Basis von ERA-5 Reanalysen des Europäischen Wetterdienstes, ECMWF, am nächstmöglichen Gitterpunkt des Datensatzes zur Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (47,5°N, 11°O) abgeleitet. Für die Analyse werden tägliche Mittelwerte vom 1.1.1979 bis 31.12.2019 aus stündlicher Auflösung von 2 km bis etwa 50 km Höhe berechnet. Im Zeitabschnitt von 2000 bis 2006 wurden die Temperaturen mit Daten des ERA5.1 Datensatzes

ersetzt. Details zum Datensatz gibt Hersbach et al. (2020).

Mit einer Waveletanalyse werden die Temperaturfluktuationen in einem Periodendauerbereich von drei bis 20 Tagen untersucht. Die Waveletanalyse liefert spektral signifikante Intensitäten der Periodendauern mit der Zeit. Der Anteil des spektral signifikanten Bereichs des Spektrogramms wird als Einfluss planetarer Wellen auf die Temperatur interpretiert, wie ursprünglich von Höppner & Bittner (2007) für die Temperaturdaten der Mesopausenregion entwickelt.

Um erste Anzeichen veränderter planetarer Wellenaktivität zu detektieren wird das Spektrogramm in der Literatur typische Periodendauerbereiche planetarer Wellen aufgeteilt, wie beispielsweise die 5-, sowie etwa 16-Tage-Welle (siehe Madden, 1978). Anschließend wird die Steigung einer mittels Summe der kleinsten quadratischen Abweichungen an den Datensatz angepassten Geraden für den jeweiligen Periodendauerbereich bestimmt. Der Änderung der Wellenaktivität pro Dekade ist in der Einheit % angegeben, da es sich um den Anteil signifikanter Flächenanteile handelt.

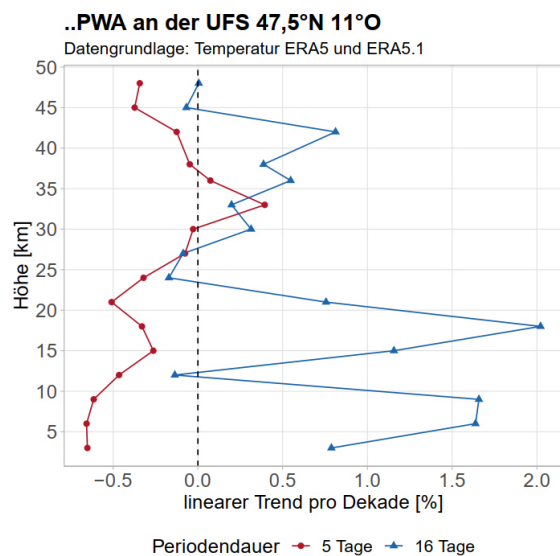


Abb.1: Lineare Änderung der Aktivität der 5-Tage- (rote Kreise) bzw. 16-Tage-Welle (blaue Dreiecke) über der UFS auf Basis der Temperatur des ERA5, bzw. ERA5.1 (2000-2006) Reanalysedatensatzes insgesamt von 1979 bis 2019.

Abbildung 1 zeigt erste Tendenzen einer linearen Änderung der 5- bzw. 16-Tage-Welle pro Dekade von etwa 2 km bis in 50 km Höhe. Die Aktivität der 5-Tage-Welle nimmt bis in etwa 25 km Höhe in der Tendenz ab. Dagegen nimmt die Aktivität der 16-Tage-Welle bis in etwa 25 km Höhe in der Tendenz zu. Im oberen Höhenbereich sind die Änderungen weniger stark. Diese Tendenzen sind noch nicht signifikant; die Variabilität der Aktivität von Jahr zu Jahr ist deutlich stärker als die Steigung der Ausgleichsgeraden.

Der Einfluss der 5-Tage-Welle auf die Zirkulation der unteren Atmosphäre hat in den letzten etwa 40 Jahren etwas abgenommen, während der Einfluss der 16-Tage-Welle eher zugenommen hat. Diese Analyse liefert erste Hinweise darauf, dass das Wetter an der UFS weniger schnell wechselt. Dies könnte zu einer Zunahme von persistenten Wetterereignissen führen. Diese Wetterlagen sind vergleichsweise langanhaltend und führen allein deshalb oftmals zu Extremwetterereignissen.

Literatur

Blackport, R., und Screen, J. A.: Insignificant effect of Arctic amplification on the amplitude of midlatitude atmospheric waves. *Sc. advances*, 6(8), 2020.

Francis, J. A., und Vavrus, S. J.: Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geoph. research letters*, 39(6), 2012.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., und Thépaut, J. N.: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly J. of the Royal Meteo. Society*, 146(730), 1999-2049, 2020.

Höppner, K., und Bittner M.: Evidence for Solar Signals in the Mesopause Temperature Variability?, *J. of Atmosph. and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 431-448, 2007.

Hoskins, B., und Woollings, T.: Persistent extratropical regimes and climate extremes. *Current Climate Change Reports*, 1(3), 115-124, 2015.

Madden, R. A.: Further evidence of traveling planetary waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35(9), 1605-1618, 1978.

Sereze, M. C., et al.: The emergence of surface-based Arctic amplification, *The Cryosphere*, 3, 11–19, 2009.

Danksagung

Diese Arbeit ist im Rahmen des laufenden Projekts WAVE entstanden, welches vom StMUV finanziert wird (Förderkennzeichen TKP01KPB-73893).

JOINT BAVARIAN SLOVENIAN ENDEAVOUR FOR INNOVATIVE AIR QUALITY ANALYSIS (JOSEFINA)

MICHAEL BITTNER^{1,2}, FRANK BAIER¹, EHSAN KHORSANDI^{1,2}, JANA HANDSCHUH^{1,2}

¹DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, OBERPFAFFENHOFEN

²UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄTSSTR. 1, 86135 AUGSBURG

E-MAIL: MICHAEL.BITTNER@DLR.DE

Zusammenfassung: Ziel von JOSEFINA ist die Entwicklung innovativer Verfahren zur flächendeckenden Analyse der Luftqualität in Bayern und Slowenien. Als Grundlage dienen sowohl Messungen (Satellit und in-situ) als auch deterministische Modellprognosen. Für die Kartierung von Luftschadstoffkonzentrationen in Bodennähe wurden Methoden entwickelt, um Messungen und Modellergebnisse vergleichbar zu machen und gegenseitig zu verifizieren. Damit hat das Projekt wesentliche Voraussetzungen für eine Anwendung von Datenassimilationsverfahren erarbeitet. Wir beschreiben die wesentlichen Projektergebnisse und geben einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

Abstract: Main goal of JOSEFINA is the development of innovative methods for a complete assessment of the spatial extent and severity of air pollution in Bavaria and Slovenia. Results are based on both measurements (satellite, in-situ) and physical model forecasts. For mapping near-surface air pollution, methods were developed for allowing consistent comparisons between observations and model results. Thereby, the project provides a basis for data assimilation applications. We summarize the most important results and give an outlook on future developments.

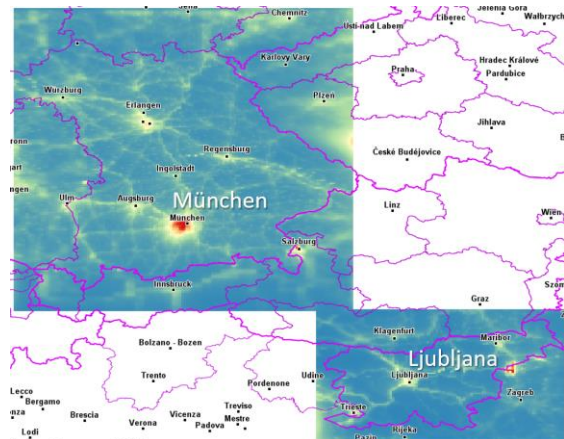


Abb. 1: NO₂-Prognose für Bayern und Slowenien für den 1. Oktober 2011, 12 Uhr. Die Farbkodierung zeigt Werte von 0 (blau) bis 40 µg/m³ (rot). Deutlich erkennbar sind große Städte und Autobahnen.

Einführung

Gegenstand des Josefina Projekt ist die satellitenbasierte Analyse und Kurzfrist-Prognose der Luftqualität in Bayern und Slowenien. Übergeordnetes Ziel ist die Bereitstellung zuverlässiger Informationen über die aktuelle flächenhafte Schadstoffbelastung sowie über regionale Trends für politische Entscheidungsträger und die breite Öffentlichkeit. Zu den wesentlichen Ergebnissen gehören: die Ableitung von Feinstaub aus Satellitendaten, das für Bayern entwickelte Vorhersagesystem zur Luftqualität und die Evaluierung basierend auf Satelliten- und Stationsmessungen. Auf diese Weise verdeutlicht das Projekt die Unterschiede in der Belastung beider Länder mit Luftschadstoffen und bei primären Schadstoffquellen.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine im Rahmen von JOSEFINA durchgeführte Prognose von Stickstoffdioxid (NO_2) für Bayern und Slowenien für den 1. Oktober 2011. Die höchsten Schadstoffkonzentrationen werden in der Nähe von Großstädten und entlang überregionaler Straßen berechnet. NO_2 entsteht insbesondere bei Verbrennungsprozessen im Straßenverkehr. Die Straßennetze sind daher gut erkennbar. In der Nähe der Großstädte tragen außerdem Industrie, Heizungen und Kraftwerke zur Verschmutzung bei. Eine auffallende Ausnahme bildet das ausgedehnte Tagebaugelände an der Grenze nördlich von Zagreb.

Projektergebnisse

JOSEFINA hat wesentliche Fortschritte in den Bereichen satellitenbasierte atmosphärische Schadstoffkartierung sowie der Erfassung und Modellierung der physikalisch-chemischen Prozesse zur Entstehung und Ausbreitung von Luftschadstoffen in Bayern erzielt. Das JOSEFINA-Ausbreitungsmodell basiert auf der Polyphemus-Plattform (Mallet et al., 2007). Ein Vorläufermodell wird erfolgreich seit 2014 für tägliche Prognosen am DLR eingesetzt (Liu et al., 2021; Chan et al., 2021). Im Rahmen von JOSEFINA wurde dieses Modell für Bayern und die Stadtskala erweitert (Khorsandi et al., 2018). Außerdem wurde das Potential für Datenassimilation mit einem Ensemblesystem untersucht. Es konnte dabei gezeigt werden, dass Satellitenmessungen die Prognosefähigkeit deutlich erhöhen.

Feinstaub

Erstmalig wurde die *Aerosolbelastung* mit Hilfe von Satelliten- und Stationsdaten flächenhaft für ganz Bayern erfasst (Handschuh et al., 2020; Abb. 2). Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Belastung Bayerns und Sloweniens durch Feinstaub ($\text{PM}_{2.5}$ und PM_{10}) ist im Mittel im Vergleich zu anderen Bundesländern eher gering. Es gibt aber große Schwankungen im

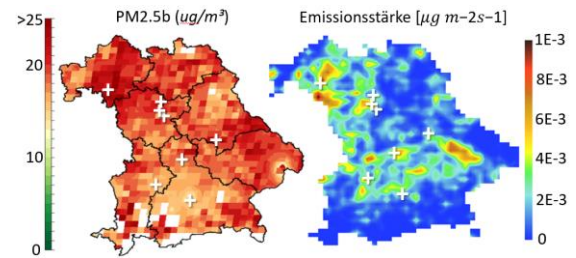


Abb.2: Mittlere $\text{PM}_{2.5}$ -Konzentrationen (links) für die bayrischen Regierungsbezirke im Oktober 2018 basierend auf Daten des SLSTR. Berechnete mittlere Emissionsstärken von Mineralstaub für das Jahr 2018 (rechts). Die weißen Kreuze kennzeichnen Städte mit mindestens 100.000 Einwohnern.

Jahresverlauf auf der Skala von Tagen bis Wochen mit ausgeprägten Feinstaubepisoden.

- Wesentliche Ursachen höherer Feinstaubkonzentrationen sind Schwankungen der Grenzschichthöhe, sowie, v. a. in Slowenien, Ferntransport von Industriestandorten im Osten.
- Die Feinstaubbelastung des Jahres 2018 wurde außerdem eingehend auf Staubemission durch Winderosion mit dem Modell von Parajuli und Zender (2017) untersucht. Besonders agrarische Flächen sowie Flussuferbereiche zeigen ein erhöhtes Potential und korrespondieren teilweise deutlich mit Satellitenbeobachtungen (Abb. 2).

Spurengase

Photochemisch aktive Spurengase wie NO_2 und Ozon treten besonders im Zusammenhang mit Verkehrsemissionen auf. Ein besonderer Schwerpunkt der Arbeiten am JOSEFINA-Ausbreitungsmodell lag daher auf Überprüfung und Verbesserung der Emissionsdatenbasis. Zu den wichtigsten Ergebnissen gehören:

- Im Mittel unterschätzt das JOSEFINA-Modell NO_2 und überschätzt Ozon. Der Einfluss der von NO_2 -Emissionen auf Ozon ist v. a. für München evident. Die in-situ gemessenen NO_2 -Konzentrationen werden bei Verwendung aktueller Emissionsdaten deutlicher unterschätzt. Dies kann als Hinweis auf Unterschät-

zung der Verkehrsemissionen in aktuellen Daten gedeutet werden.

- Die städtische Belastung durch NO₂-hängt in Bayern im Wesentlichen von städtischen Verkehrsemissionen und Einzelanlagen ab. Die kleinräumige Variabilität wird dabei v. a. durch die bodennahe Zirkulation bestimmt.
- Die Modell-Experimente mit Palm4U (basierend auf PALM von Raasch und Schröter, 2001) für München ergaben, dass die NO₂-Konzentrationen auf der Luvseite verkehrsreicher Straßen (Landshuter Allee, Abb. 3) die höchsten Werte erreichen können.

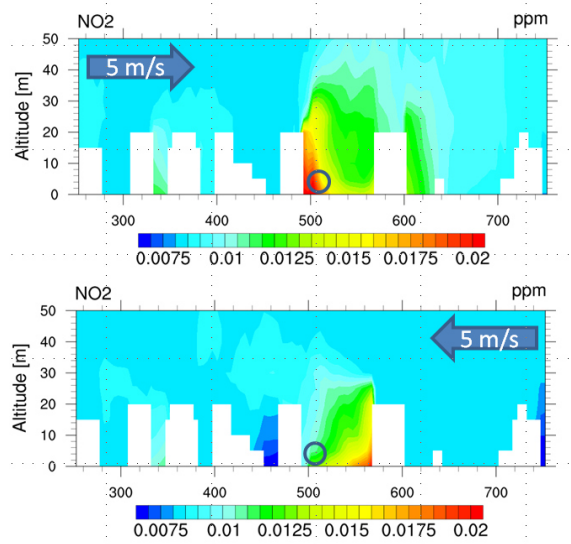


Abb. 3: Vertikaler Schnitt durch die simulierte NO₂-Verteilung in einem Straßenzug (Landshuter Allee) für westliche (oben) und östliche Winde (unten). Eine Messung der NO₂-Belastung an der mit einem Kreis markierten Stelle würde unterschiedliche Werte liefern.

Datenassimilation (DA)

Das im Rahmen von JOSEFINA angewendete DA-Konzept beruht auf dem Ensemble-Ansatz von Bergemann (2012). Ensemble-Methoden werden detailliert u. a. von Bannister (2017) beschrieben. Ziel ist die Optimierung von Kontrollgrößen durch Vergleich mit unabhängigen Beobachtungen, so dass die Differenzen zwischen Prognose X_{fg} und Beobachtungen Y minimiert werden. Die Ensemble-Statistik erlaubt dabei eine Berechnung der Kovarianzmatrix B mit Hilfe weißen Rauschens, das zu

leicht unterschiedlichen Prognosen führt. Allgemein gilt für die Analyse X_a :

$$X_a = X_{fg} + G(B) * (Y - H(X_{fg})), \quad (1)$$

$$B = \Delta C \otimes \Delta X \quad (2)$$

Die Modellwerte werden hier durch den linearen Operator H auf die Beobachtungen abgebildet. Die Berechnung der Wichtungsmatrix G erfolgt aus der Ensemblestatistik B mit Hilfe von Korrelationen zwischen den Zustandsgrößen X der Ensemblemitglieder und einer gestörten Kontrollgrößen C (z. B. Verkehrsemissionen). Das Deltasymbol bezeichnet Abweichung vom Ensemble-Mittelwert.

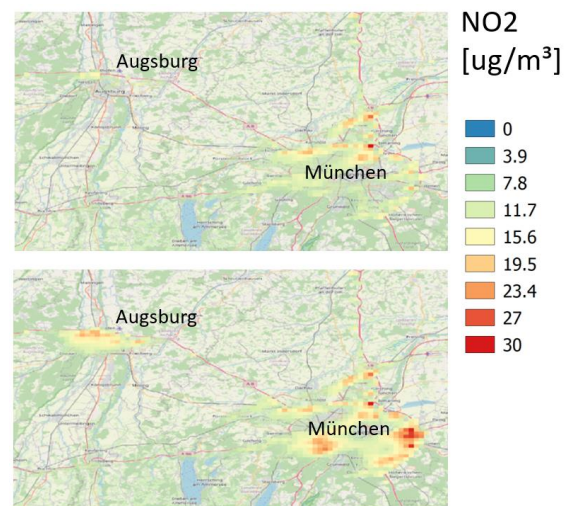


Abb. 4: Prognostizierte Änderung der bodennahen NO₂-Konzentrationen im Raum Augsburg-München am 2. Juli 2018 (11:30 UTC). Obere Teilabbildung: NO₂-Konzentrationen ohne Assimilation. Untere Teilabbildung: Einfluss der Assimilation von Sentinel S5P-TNO₂.

Im Rahmen des Projekts führte die Assimilation von Sentinel S5P troposphärischen Säulendichten durch Anpassung primärer NO₂-Emissionen im JOSEFINA-Modell zu einer deutlichen Verbesserung der bodennahen NO₂-Prognosen. Abb. 4 zeigt z. B. eine deutliche Erhöhung der NO₂-Werte an den städtischen verkehrsnahen Stationen Landshuter Allee, Stachus und Karlstraße. Andererseits werden Konzentrationen an einigen Hintergrundstationen nun überschätzt. Wahrscheinliche Ursache ist, dass der Sensor empfindlicher auf starke Quellen reagiert und das Signal durch

die begrenzte Auflösung „verschmiert“. Für die nicht-gemessene Spezies Ozon ergeben sich keine eindeutigen Verbesserungen.

Ausblick

Die hier gezeigten Beispiele zeigen das große Potential von modernen Satellitenmessungen in Verbindung mit physikalischen Modellen. In den durchgeführten Vergleichen verschiedener Modellkonfigurationen mit Stationsmessungen erweist sich die Erfassung realistischer Emissionswerte als besonders kritisch. Hier können mit Hilfe von Datenassimilationsverfahren zukünftig deutliche Verbesserungen gegenüber bisherigen Bottom-Up Daten erzielt werden. Neuere Studien zeigen, dass statistische Ansätze in Verbindung mit physikalischen Modellen besonders vielversprechend sind (z. B. Chan et al., 2021). Sie könnten zukünftig zu effizienteren Methoden führen, die sogar Anwendungen in naher Echtzeit, z. B. in Verbindung mit Verkehrs- und Umweltmanagement, ermöglichen. Physikalische Modelle liefern eine flächenhafte Datengrundlage, die alleine mit Messungen nicht erreicht wird (Wahid, 2013). Sentinel 4 auf der Meteosat Third Generation Plattform wird aus einem geostationären Orbit ab 2023 stundengenaue Messungen troposphärischer Spurenstoffe liefern. Damit wird der Tagesgang reaktiver Substanzen erstmalig direkt vom Satelliten erfasst. Die Aussichten auf genauere Modellprognosen werden sich deutlich verbessern.

Literatur

Chan, K.L.; Khorsandi, E.; Liu, S.; Baier, F.; Valks, P. Estimation of Surface NO₂ Concentrations over Germany from TROPOMI Satellite Observations Using a Machine Learning Method. *Remote Sens.* 2021, 13, 969. <https://doi.org/10.3390/rs13050969>

Handschuh, J., Baier, F., Erbertseder, Th., Schaap, M. "Deriving ground-level PM_{2.5} concentrations over Germany from satellite column AOD for implementation in a regional air quality model," *Proc.*

SPIE 11531, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXV, 1153104 (9 October 2020); <https://doi.org/10.1117/12.2574020>

Liu, S., Valks, P., Pinardi, G., Xu, J., Chan, K. L., Argyrouli, A., Lutz, R., Beirle, S., Khorsandi, E., Baier, F., Huijnen, V., Bais, A., Donner, S., Dörner, S., Gratsea, M., Hendrick, F., Karagkiozidis, D., Lange, K., PETERS, A. J. M., Remmers, J., Richter, A., Van Roozendaal, M., Wagner, T., Wenig, M., Loyola, D. G.: An improved tropospheric NO₂ column retrieval algorithm for TROPOMI over Europe, *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/amt-2021-39>, in review, 2021.

Khorsandi, E., Baier, F., Erbertseder, T., Bittner, M.: Air quality monitoring and simulation on urban scale over Munich, *SPIE Remote Sensing*, 2018, Berlin, Germany, Proceedings Volume 10793, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments III; 1079303 (2018) <https://doi.org/10.1117/12.2503969>.

Mallet, V., Quélo, D., Sportisse, B., Ahmed de Biasi, M., Debry, E., Korsakissok, I., Wu, L., Roustan, Y., Sartelet, K., Tombette, M., Foudhil, H.: The air quality modeling system Polyphemus, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 5479–5487, 2007

Parajuli, S. P., Zender, C.: Connecting geomorphology to dust emission through high-resolution mapping of global land cover and sediment supply. *Aeolian Research*, 27, 47–65. 2017.

Raasch, S, Schröter, M.: PALM - A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers, *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 10 No. 5 (2001), p. 363 – 372.

Wahid, H., Ha, Q.P., Duc, H., Azzi, M.: Neural network-based meta-modelling approach for estimating spatial distribution of air pollutant levels, *Applied Soft Computing*, Volume 13, Issue 10, 2013, Pages 4087-4096

Danksagung

Wir danken dem Bayerischen Ministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz für die Förderung des JOSEFINA-Projekts.

SCHWEREWELLEN IM UND NAHE DES ALPENRAUMS IM OH-NACHTLEUCHTEN

PATRICK HANNAWALD^{1,2}, SABINE WÜST², MICHAEL BITTNER^{1,2}

¹ DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT OBERPFAFFENHOFEN, DEUTSCHLAND

² UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, DEUTSCHLAND

E-MAIL: PATRICK.HANNAWALD@DLR.DE

Zusammenfassung: Atmosphärische Wellen beeinflussen lokal und global die Dynamik in der Atmosphäre. Sie sind somit von großer Bedeutung für Klima und Wetter. Mit Messungen unserer Kamerasysteme untersuchen wir diese atmosphärischen Wellen in etwa 86 km Höhe, wo sie bevorzugt brechen und ihren Einfluss ausüben. Dies ist eine Aktualisierung der bereits 2017/2018 gezeigten Ergebnisse mit deutlich umfangreicherer Datenbasis.

Abstract: Atmospheric waves influence atmospheric dynamics on local and global scale. They are of substantial relevance for climate and weather. We investigate gravity waves with our camera systems at 86 km altitude where many of the waves break and release their energy and momentum to the environment. This is an update of the results from 2017/2018 with a vastly increased data basis.

Wellen prägen nicht nur die Dynamik im Ozean sondern auch jene der Atmosphäre. Die Dynamik in der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre (80-100 km) ist vorherrschend von sogenannten Schwerewellen geprägt, welche man zum Beispiel auch vom Surfen im Meer kennt. Anders als „Surfwellen“ bewegen sich atmosphärische Schwerewellen allerdings nicht an der Oberfläche des Mediums Wasser sondern durch das Medium Luft.

Häufig in der unteren Atmosphäre angeregt, etwa durch Konvektion oder Überströmen

von Gebirgskämmen, können sich diese Wellen bis in große Höhe ausbreiten und verbinden so die unterschiedlichen Atmosphärenschichten miteinander. Sie können auch weite horizontale Strecken zurücklegen und führen so insgesamt zu einer „Umverteilung“ von Energie und Impuls. Dies beeinflusst Strömungen und Temperatur von lokalen bis zu globalen Skalen.

Unsere Forschung zielt auf ein besseres Verständnis der Schwerewellen und ihrer Effekte in der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre ab. Da diese Höhenschicht für viele gängige Messmethoden unzugänglich ist (z. B. kann nicht vor Ort gemessen werden), nutzen wir passive Fernerkundung mit unseren Nah-infrarotkamerasystemen FAIM (Fast Airglow IMager), um Informationen über die Dynamik zu gewinnen. Denn gerade in dieser Höhe brechen viele der Wellen und geben dort ihre Energie und ihren Impuls an die Atmosphäre ab.

Um die Schwerewellen mit unseren Kamerasystemen beobachten zu können, nutzen wir das sogenannte Airglow (speziell das OH-Airglow). Dabei handelt es sich um eine aufgrund von chemischen Reaktionen leuchtende Schicht in etwa 86 km Höhe, welche nachts mit unseren Kameras beobachtet werden kann. Schwerewellen, die durch diese Schicht propagieren, führen zu Änderungen in der Intensität des Airglows. So erlaubt es die Beobachtung des Airglows, Rückschlüsse auf Schwerewellen in dieser Höhe zu ziehen.

Im Dezember 2013 startete die erste FAIM Kamera mit der operationellen Beobachtung des Airglows. Seitdem kamen einige weitere Kameras hinzu. Die hier gezeigte Auswertung zeigt die Daten dreier Kameras, welche im Zeitraum Dezember 2013 bis Dezember 2020 in fünf verschiedenen Konfigurationen und an insgesamt vier verschiedenen Orten gemessen haben. Die Orte sind Oberpfaffenhofen (Deutschland), einmal mit einem Sichtfeld oberhalb der Zugspitze (Ergebnisse bereits im Bericht von 2017/18 gezeigt) und einmal mit einem Sichtfeld über Bozen, der hohe Sonnblick (Österreich), sowie Otlica (Slowenien) und Panska Ves (Tschechien). Abbildung 1 zeigt die Anzahl der beobachteten Wellenergebnisse aufgeschlüsselt nach Monat. Hierbei ist auch ersichtlich, dass ab 2018 mehrere Systeme zur gleichen Zeit an unterschiedlichen Orten gemessen haben. In die Auswertung gehen insgesamt über 50 Millionen Einzelaufnahmen des Airglows und entsprechend über 8500 h Beobachtung ein.

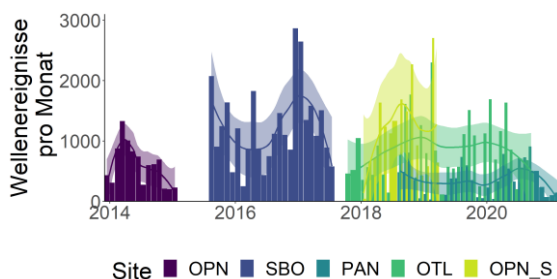


Abb. 1 Anzahl der Wellenergebnisse pro Monat. Gezeigt sind die Daten nach Datensatz/Aufbau. OPN = Oberpfaffenhofen (Deutschland), Sichtfeld über der Zugspitze; SBO = Sonnblick (Österreich) mit Sichtfeld nach Norden, PAN = Panska Ves (Tschechien), mit Sichtfeld nördlich von Prag, OTL = Otlica (Slowenien) mit Sichtfeld über von Bozen, OPN_S = Oberpfaffenhofen mit Sichtfeld ebenfalls über Bozen.

Durch Analyse der Einzelaufnahmen und Aggregation der Daten lassen sich zahlreiche Wellenparameter bestimmen. Hier wird der Fokus auf die horizontale Ausbreitungsrichtung gelegt. Abbildung 2 zeigt die Ausbreitungsrichtung der Schwerewellen für alle fünf Datensätze.

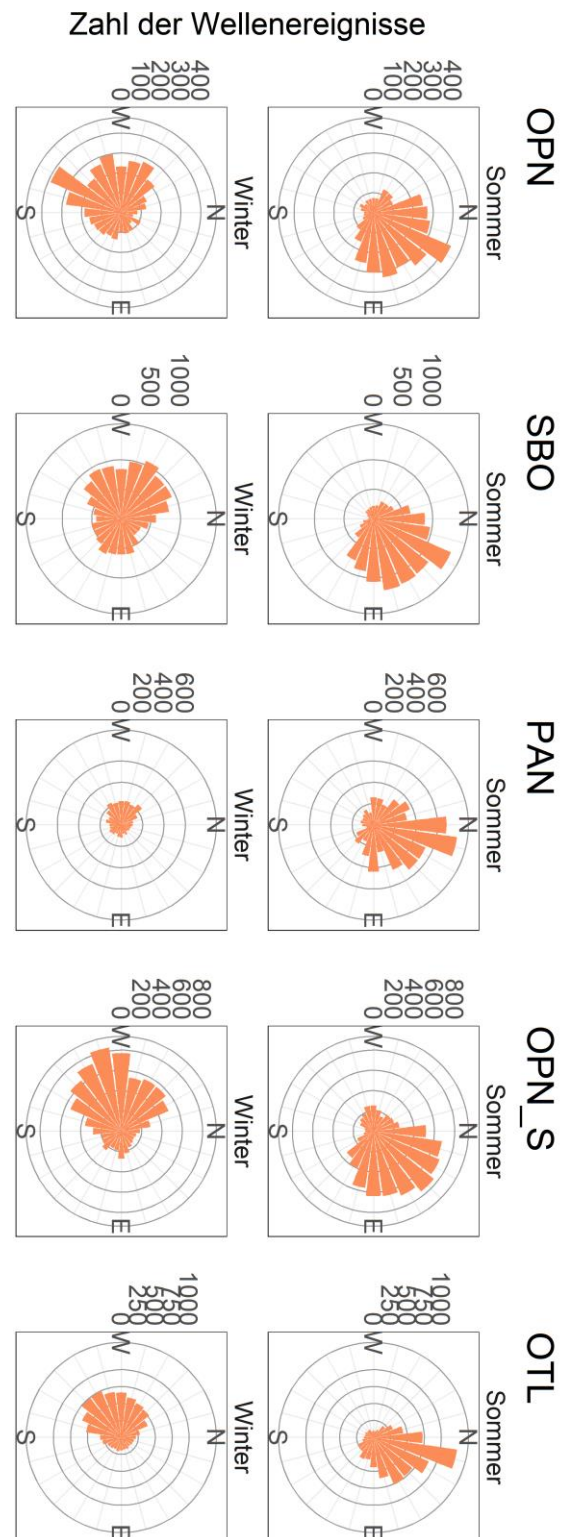


Abb. 2 Horizontale Ausbreitungsrichtung von Schwerewellen in 86 km Höhe für verschiedene Datensätze (siehe Abbildung 1), jeweils für Sommer (April bis September) und Winter (Oktober bis März). Es zeigt sich im Sommer eine systematische Ausbreitungsrichtung nach Nordosten, im Winter nach Westen.

Es ist deutlich eine saisonale Systematik zu erkennen. Im Sommer propagiert ein Großteil der Wellen in Richtung Nordosten, im Winter nach Westen. Die zonale Vorzugsrichtung ist bereits durch zahlreiche Studien weltweit beobachtet worden (siehe z. B. Vargas et al., 2015). Grund hierfür sind der gängigen wissenschaftlichen Meinung nach die zonalen Windfelder in der Stratosphäre, die einen Teil der von der Troposphäre nach oben propagierenden Wellen filtern. Dieser Teil der Wellen bricht in der Stratosphäre, während ein weiterer Teil von Wellen mit gegenteiliger zonaler Richtung weiter bis in die obere Mesosphäre / untere Thermosphäre propagieren und dann von uns beobachtet werden kann. Da sich die zonalen stratosphärischen Windfelder zwischen Sommer und Winter umkehren, gibt es auch bei den in ca. 86 km Höhe beobachteten Schwerewellen eine jahreszeitliche Abhängigkeit.

Der Grund für die meridionale Vorzugsrichtung ist nicht abschließend geklärt, steht aber in engem Zusammenhang mit meridionalen Zirkulationsmustern in der Mesosphäre. Da diese Zirkulation jedoch nur schwach ausgeprägt ist, spielen hier höchstwahrscheinlich auch saisonal abhängige Quellen von Schwerewellen eine wichtige Rolle. In weiteren Auswertungen soll speziell auf diesen Aspekt eingegangen werden.

Weiterführende Informationen zu den Messungen der Datensätze OPN und SBO, sowie der verwendeten Analysemethoden sind in Hannawald et al. (2019) zu finden.

Literatur

Hannawald, P., Schmidt, C., Sedlak, R., Wüst, S., und Bittner, M.: Seasonal and intra-diurnal variability of small-scale gravity waves in OH airglow at two Alpine stations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12: 457-469, doi: 10.5194/amt-12-457-2019.

Vargas, F., Swenson, G., und Liu, A.: Evidence of high frequency gravity wave forcing on the meridional residual circulation at the mesopause region. *Advances in Space Research*, 56(9):1844–1853. doi:10.1016/j.asr.2015.07.040, 2015.

Danksagung

Diese Arbeiten sind im Rahmen der Projekte LUDWIG & VoCaS-ALP entstanden, welche vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz finanziert wurden / werden (Förderkennzeichen: TUS01UFS-67093 und TKP01KPB-70581). Die Aufnahme der Datensätze war nur durch die Mithilfe der Observatorien und deren Mitarbeiter möglich, die uns den Aufbau vor Ort ermöglicht und sich stets um die Wartung der Instrumente gekümmert haben.

PHASE 2: ALPEnDAC

INGA BECK¹, MICHAEL BITTNER^{2,3}

¹ UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS GMBH (UFS), ZUGSPITZE 5, 82475 ZUGSPITZE

² UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK

³ DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT-UND RAUMFAHRT, DLR OBERPFAFFENHOFEN

E-MAIL: I.BECK@SCHNEEFERNERHAUS.DE

Zusammenfassung: AlpEnDAC – Alpine Environmental Data and Analysis Center ist das informationstechnische Rückgrat des virtuellen Alpenobservatoriums (VAO). Im August 2019 startete die zweite Projektphase, in der in den ersten zwei Jahren bereits einige Erweiterungen und Erneuerungen umgesetzt werden konnten.

Abstract: AlpEnDAC - – Alpine Environmental Data and Analysis Center is the technical backbone of the Virtual Alpine Observatory (VAO). In 2019 the second project phase was launched. Since then several new developments and innovative extensions could be implemented, yet.

Einführung

AlpEnDAC – Alpine Environmental Data and Analysis Center wird seit 2015 von der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS), dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), dem Leibniz-Rechenzentrum (LRZ), der Universität Augsburg (UA) und dem bifa Umweltinstitut aufgebaut und betrieben. Gefördert wird das Projekt durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz.

Im August 2019 startete AlpEnDAC in seine zweite Entwicklungsphase mit dem Ziel, insbesondere Services weiter auszubauen und zu verbessern.

Die vier wichtigsten Grundelemente sind:

1. Data-on-Demand (DoD): Zugang zu Daten
2. Computing-on-Demand (CoD): Zugang zu numerischen Modellen
3. Service-on-Demand (SoD): Eine interaktive webbasierte Plattform, die eine Visualisierung von Daten erlaubt.
4. Operating-on-Demand (OoD): Entwickelt werden informationstechnische Schnittstellen und Bedieneroberflächen, die eine Ansteuerung von experimentellen Messinstrumenten an den Stationen per Fernsteuerung erlaubt.

Erreichung der Meilensteine

In dem Berichtszeitraum 2019 / 2020 standen acht Meilensteine an. Diese wurden weitestgehend erreicht. Wichtige Schritte waren dabei die Definition der sogenannten KPIs und die Einrichtung eines „Servicedesks“.

Außerdem wurde vom DLR das numerische Modell HARPA/DLR (inklusive Windmodell HWM und der Klimatologie NRL/MSISE-00) zur Berechnung der Ausbreitung von Infraschallwellen in der Atmosphäre zugänglich gemacht (Pilger und Bittner, 2009; Pilger et al., 2013a, 2013b). Über eine Eingabemaske können Position und Stärke von Infraschallquellen (z.B. Windparks, Städte, Vulkane, Gebiete mit starken Föhn-/Fallwinden, lawinengefährdete Gebiete, Sturmsysteme etc.) eingegeben werden. Das Modell liefert dann

die Ausbreitungswege des Infraschalls der mit diesen Quellen verbunden sind.

2020 wurde auf dem VAO Symposium in Bern ein Workshop zu AlpEnDAC abgehalten.

Bioklimatisches Informationssystem BioClis

Ein weiterer Service, der zwischenzeitlich in das AlpEnDAC integriert wurde, ist das web-basierte „Bioklimatische Informationssystem BioClis“ (Mittelstädt et al. Wissenschaftliche Resultate der UFS, 2017/2018). Es liefert eine tagesaktuelle Abschätzung des Einflusses von Umweltstressoren auf das zusätzliche Gesundheitsrisiko des Menschen (ARI). Daneben gibt es den etablierten sogenannten Universal Thermal Climate Index, UTCI, an. Über AlpEnDAC werden zwei Varianten dieses BioClis-Service angeboten: eine Version, die leicht verständlich auch für Laien ist und die Situation tagesaktuell sowie Prognosen über einige Tage in einer intuitiven und interaktiven Grafikoberfläche auf Landkreisebene angezeigt (Abb.1, <https://alpendac.eu/bioclis>). Daneben bietet AlpEnDAC einen sogenannten „Expertenmodus“ mit höherer räumlicher Auflösung und detaillierteren Informationen an (https://alpendac.eu/spa#!/air-ari_by).

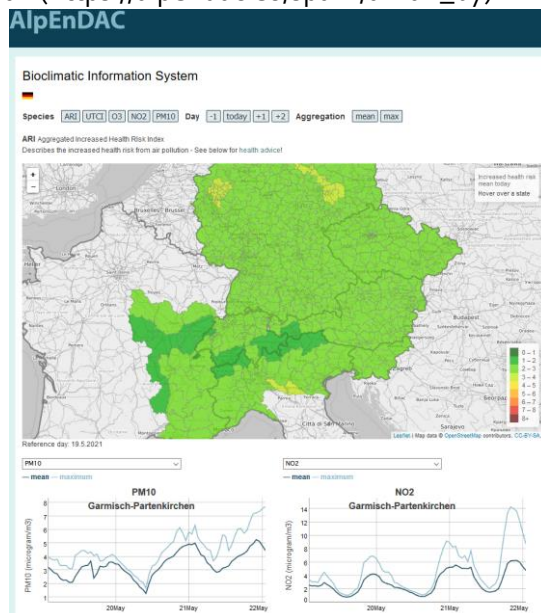


Abb. 1: Screenshot des bioklimatischen Informationssystems, BioClis, als Service des AlpEnDAC (<https://alpendac.eu/bioclis>)

Öffentlichkeitsarbeit

Im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit für AlpEnDAC wurde das Projekt auf verschiedenen Veranstaltungen vorgestellt. Darunter auf der der International Mountains Conference 2022, auf der European Geoscience Union Assembly 2020 und 2021 (beide Mal virtuell), sowie beim VAO Symposium 2020 in Bern.

Des Weiteren wurde ein Logo (Abb. 2) sowie ein Flyer erstellt, der zur Information über AlpEnDAC dienen soll. Die Webseite wurde redaktionell überarbeitet und ein Bereich mit aktuellen Informationen eingefügt.



Abb. 2: Neuerstelltes Logo für AlpEnDAC

Literatur

Mittelstädt, L., Erbertseder, T. und M. Bittner: Das Bioklimatische Informationssystem BioClis – Ein Service der UFS, UFS-Wissenschaftlicher Resultate 2017/2018, Nummer 05, Oktober 2019

Pilger, C. und Bittner, M.: Infrasound from tropospheric sources: Impact on mesopause temperature? Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71 (2009), 816-822,

Pilger, C., Schmidt, C. und Bittner, M.: Statistical analysis of infrasound signatures in airglow observations: Indications for acoustic resonance, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2013a, 70-79, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2013.08.008>

Pilger, C., Schmidt, C., Streicher, F., Wüst, S. und Bittner, M.: Airglow observations of orographic, volcanic and meteorological infrasound signatures, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2013b, 55-56, DOI:

Danksagung

Wir danken dem BayStMUV für die Förderung des AlpEnDAC-Projekts.

DAS BIOKLIMATISCHE INFORMATIONSSYSTEM BIOCLIS- EIN SERVICE DER UFS

THILO ERBERTSEDER¹, LORENZA GILARDI¹, JANA HANDSCHUH¹, MICHAEL BITTNER^{1,2}

¹DLR, DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM, MÜNCHENER STRAßE 20, 82234 WEßLING

²UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄTSTRASSE 1, 86159 AUGSBURG

E-MAIL: THILO.ERBERTSEDER@DLR.DE

Zusammenfassung: Mit BioClis wurde ein Werkzeug geschaffen, das der Bayerischen Regierung und Bevölkerung die flächenhafte Bewertung des aggregierten Gesundheitsrisikos durch Hitze- und Kältestress, sowie Luftschadstoffe ermöglicht. Als web-basiertes Informationssystem liefert BioClis tagesaktuell flächendeckende und farbcoodierte Analysen und Vorhersagen, die als „Service der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)“ angeboten werden (www.alpendac.eu/bioclis).

Abstract: With BioClis, a tool was developed that enables the Bavarian government and the public to assess the aggregate health risk from heat and cold stress as well as air pollutants. As a web-based information system, BioClis provides daily color-coded analyzes and forecasts that are offered as a "Service of the Environmental Research Station Schneefernerhaus (UFS)" (www.alpendac.eu/bioclis).

Einführung

Umweltstressoren wie Luftschadstoffe, Hitze oder Kälte können die menschliche Gesundheit auf vielfältige Weise beeinträchtigen (Patz et al., 2005; Yang et al., 2009). Der Klimawandel und die Zunahme von Extrema (Kan et al., 2012) stellen den menschlichen Organismus vor neue Herausforderungen. Um die Auswirkungen von Klimawandel und Umweltstressoren auf die Gesundheit der bayerischen Bürger*innen bewerten und gezielt Anpassungsmaßnahmen planen zu können,

ist eine Quantifizierungs- und Informationsstrategie erforderlich. Hierzu wurde BioClis entwickelt. Kern ist ein Umweltdatenprozessor, der auf den informationstechnologischen Entwicklungen der AlpEnDAC Plattform aufbaut und verschiedenste Datenquellen aus epidemiologischen Erhebungen, In-situ-Messungen, Satelliten und numerischen Modellen integriert. In BioClis werden somit aus komplexen Informationsebenen zwei Gesundheitsindizes abgeleitet und übersichtlich dargestellt: der aggregierte Risikoindex ARI und der universelle thermische Klimaindex UTCI. Beide Indizes werden durch konkrete Verhaltensempfehlungen zur proaktiven Verbesserung der Lebensqualität ergänzt. Zusätzlich werden Informationen zur Konzentration der Hauptschadstoffe (Ozon, NO₂ und PM₁₀) und die wichtigsten meteorologischen Variablen dargestellt. Zur Steigerung der Identifikation werden die Informationen auch auf Landkreisebene aggregiert. Detaillierte Informationen zu BioClis geben Erbertseder et al. (2020).

Daten und Methoden

Der ARI dient der Quantifizierung der Erhöhung des Gesundheitsrisikos ausgelöst durch eine kurzzeitige Exposition gegenüber einer Mischung an Luftschadstoffen, im Speziellen NO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, SO₂. Diese relativen Risikoerhöhungen können für verschiedene Risikogruppen und verschiedene Gesundheitsendpunkte, nach Sicard et al. (2012), quantifiziert werden.

Die Bestimmung des ARI basiert auf den Luftschadstoffkonzentrationsdaten, die in erster Linie über das Modellsystem Polyphemus/DLR berechnet werden. Als Back-up werden die Modelldaten des CAMS Copernicus Atmosphere Monitoring Service verwendet (Cop, 2021). Bei den CAMS-Daten handelt es sich um ein Ensemble aus 7 Chemietransportmodellen, das von Marecal et al. (2015) näher beschrieben und von Akritidis et al. (2017) validiert wurde. Der Vorteil der Polyphemus-Daten gegenüber den CAMS-Daten ist die deutlich bessere Auflösung (unter 2km statt 10-20km).

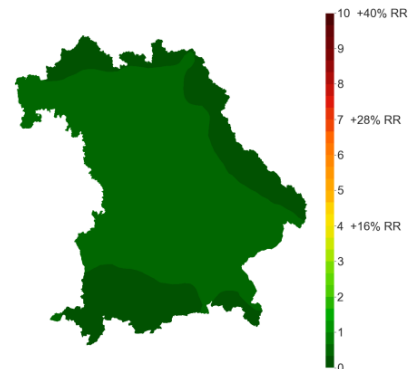
Mit dem etablierten UTCI (Jendritzky et al., 2012) werden die Auswirkungen thermischen Stresses auf den Körper quantitativ bestimmt. Über die Äquivalenttemperatur wird dabei die Thermoregularisierung des menschlichen Organismus berücksichtigt (Fiala et al., 2012). Dafür werden meteorologische Daten wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und mittlere Strahlungstemperatur aus dem operationell betriebenen WRF-Modell verwendet (Weather Research and Forecasting (Wea18)), das sowohl für Wettervorhersagen als auch für Klimamodellierungen in der Forschung verwendet wird.

Ergebnisse

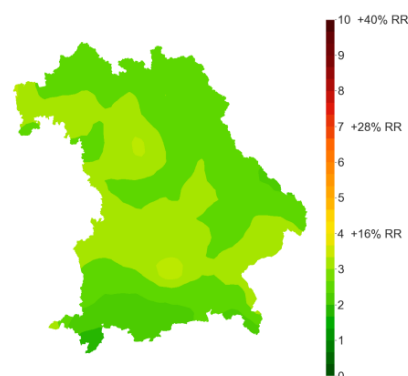
Für eine intuitive Interpretation wird das ARI-Ergebnis als Index von 0 bis 10+ angegeben, (analog dem UV-Index), der mit spezifischen Verhaltensempfehlungen verknüpft ist, die die Bevölkerung anwenden kann, um eine Verschlimmerung von Symptomen zu vermeiden oder die Lebensqualität proaktiv zu verbessern. Die Gesundheitsratschläge, die in Zusammenarbeit mit Umweltmedizinern erstellt wurden, gelten sowohl für allgemeine als auch für schutzbedürftigere Bevölkerungsgruppen (Kinder (<14 Jahre), ältere Menschen (>65 Jahre), Menschen mit Vorerkrankungen). Die Anwendung der Berechnungsmethode für verschiedene Gesund-

heitsendpunkte wurde von 2010 bis 2016 auf Schadstoffdaten angewendet. Das Ergebnis ist eine „7-Jahres-Klimatologie“ des Index von Bayern in verschiedenen Kombinationen. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abbildung 1 dargestellt.

Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisung durch Atemwegserkrankungen Kinder 0 bis 14 Jahre



Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisung durch Herzkrankheiten Personen älter 65 Jahre



Risikoerhöhung für Krankenhauseinweisung durch ischämische Herzkrankheit Personen älter 65 Jahre

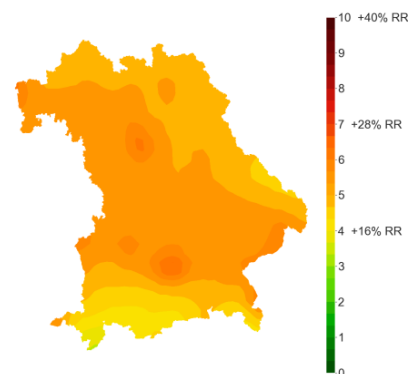


Abb.1: Mittlere Risikoerhöhung durch Luftschadstoffe in Bayern im Zeitraum 2010 bis 2016 für verschiedene Gesundheitsendpunkte. Es muss betont werden, dass die gleiche Exposition zu unterschiedlichen Risiken führt. Die Exposition bezieht sich aber nur auf die Hintergrundbelastung. Vor allem in den Städten werden Hotspots bei dieser räumlichen Auflösung nicht erfasst.

Es wird klar, dass die mittlere Risikoerhöhung je nach Gesundheitsendpunkt unterschiedlich zu bewerten ist. So ist z. B. die Risikoerhöhung für ischämische Herzkrankungen durch Luftschadstoffe bei Personen ab 65 Jahren sehr ernst zu nehmen. Hier treten im siebenjährigen Mittel noch erhöhte Belastungen von 20 bis 24 % (ARI 5 bis 6) auf. Das Risiko für Krankenhauseinweisungen durch Herzkrankheiten für Personen älter 65 Jahre im Großraum München und Nürnberg liegt im Zeitraum 2010 bis 2016 an mehr als 500 Tagen im hohen Bereich. Die Informationen zum UTCI werden in einem Wertebereich zwischen -40 und +46 angegeben. Diese Zahl kann als Äquivalenttemperatur interpretiert werden und gibt die Menge an thermischer Belastung an, der man im Freien ausgesetzt ist.

Das entwickelte Online-Tool besteht aus einer interaktiven Karte, auf der die Benutzer*innen navigieren und die gewünschte Region auswählen können (Abb. 1). Die räumliche Aggregation liegt auf der Ebene 3 der Europäischen Nomenclature of Territorial Units for Statistics (NUTS) (Landkreis). Durch Klicken auf den Bereich können die Mittel- und Maximalwerte der täglichen Gesundheitsindizes, ARI und UTCI sowie anderer oben genannter Parameter angezeigt werden. Prognosen bis zu 72 Stunden sind ebenfalls verfügbar.

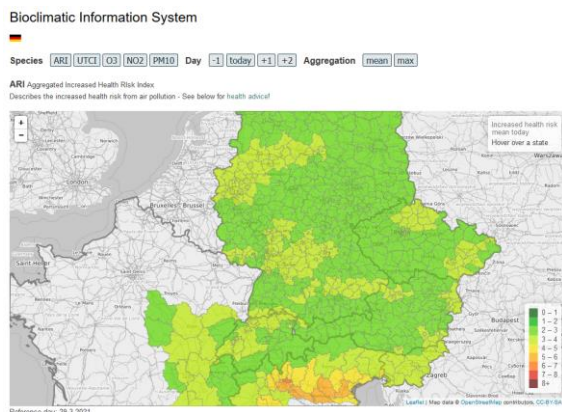


Abb. 1: Beispiel für die Startseite des BioClis-Tools.

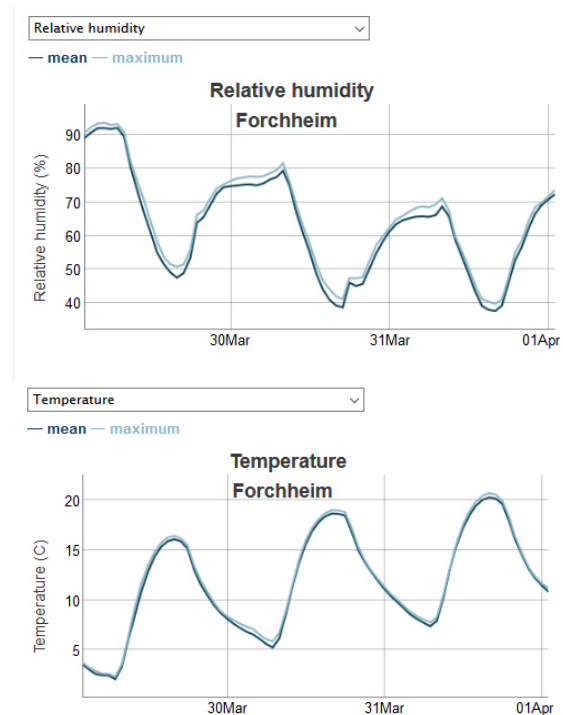


Abb. 2 Beispiel für Zeitreihen von Vorhersagewerten (+72 Stunden) eines Landkreises (Forchheim) basierend auf stündlichen Daten der relativen Luftfeuchte (oben) und der Lufttemperatur (unten).

Detailliertere Verläufe der Parameter finden sich in den zugehörigen Zeitreihen, in denen stündliche Daten (6-Stunden-Daten bei UTCI) angezeigt werden.

Das Bioklimatische Informationssystem BioClis, als Service der UFS, stellt mit seinen methodischen Komponenten, seiner umweltdatentechnischen Umsetzung und seiner Zielsetzung einen Beitrag zur Bayerischen Klimaanpassungsstrategie (BayKLAS). In diesem Rahmen kann das System noch weiterentwickelt und angepasst werden, um verschiedene politische Anforderungen zu erfüllen.

Weiterentwicklungen

1) Erweiterung des Kompetenzbereichs

Die operativen Produkte können für kommunale Anwendungen durch zielgerichtete Fallstudien und Szenarien in hoher räumlicher Auflösung auch im Stadtbereich ergänzt werden. Dies umfasst die Planung von Bau- und Verkehrsmaßnahmen zur Erhaltung und Ver-

besserung des Stadtklimas, zum Klimaschutz und zur Anpassung an den Klimawandel sowie zur Verbesserung der Luftreinhaltung.

Dank der Skalierbarkeit des Tools konnte die Abdeckung von BioClis mittlerweile auf ganz Deutschland, die Tschechische Republik, Österreich, die Schweiz und den Alpenraum Italiens und Frankreichs erweitert werden. Durch Vernetzung mit Medizinern und Krankenkassen soll die Risikobewertung laufend nach dem Stand der Forschung verbessert werden.

2) Synergien mit anderen Projekten

Im Rahmen des ESA-Projekts AlpAirEO (2020-2022) soll die Plattform für den Alpenraum in enger Verzahnung mit dem Virtuellen Alpen Observatorium (VAO) verbessert werden. Dies soll zum einen durch die Integration höher aufgelöster Daten gerade für die Alpentäler und zum anderen durch die Einbindung weiterer Bedarfsträger und Expertengruppen zur Quantifizierung des Gesundheitsrisikos realisiert werden. BioClis ist als Komponente im Rahmen der Alpenkonvention vorgeschlagen worden (Alpenkonvention, 2020).

Im Rahmen des Horizont 2020-Pilotprojekts e-shape (<https://e-shape.eu>), "EO-based pollution-health risks profiling in the urban environment", wird BioClis derzeit für die Metropolregion München um hochauflösende Daten und gesundheitsrelevante Parameter wie bevölkerungsgewichtete Exposition erweitert.

Literatur

Akritidis, D. et al.: Validation of the CAMS regional services: concentrations above the surface.: ECMWF Copernicus Report/ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2017.

Alpenkonvention, 2020 Alpine Convention, 2020: Air Quality in the Alps, Report,

https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Organization/AC/XVI/RSA8_final_draft_ACXVI.pdf

Copernicus Atmosphere Monitoring Service [Online]. -30. 03. 2021.-

<http://www.regional.atmosphere.copernicus.eu>.

Erbertseder, T., Mittelstädt, L., Gilardi, L., Goussev, O., Traidl-Hoffmann, C., Hachinger, S. und Bittner, M.: Bioklimatisches Informationssystem Bayern (BioClis): Schlussbericht des Verbundprojekts Klimawandel und Gesundheit, 2020.

Fiala, D. et al.: UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. International Journal of Biometeorology.56.-S. 429-441.2012

Jendritzky, G., de Dear Richard und Havenith G.: UTCI—Why another thermal index? International Journal of Biometeorology.56.-S. 421-428.2012.

Marecal, V., et al.: A regional air quality forecasting system over Europe: the MACC-II. Geoscientific Model Development.8.-S. 2777-2813.2015.

Patz, J. A., et al.: Impact of regional climate change on human health. Nature.438.-S. 310-317.2005.

Sicard, P., et al.: The Aggregate Risk Index: An intuitive tool providing the health risks of air pollution to health care community and public. Atmospheric Environment.46.-S. 11-16.2012.

Weather Research and Forecasting Model [Online].-30. 03 2021.-

<https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>

Wei, Y., und Omaye, S. T.: Air pollutants, oxidative stress and human health. Elsevier. 674.-S. 45-54.2009.

Danksagung

BioClis wurde im Rahmen des Verbundprojekts Klimawandel und Gesundheit (VKG) durch das StMUV und das StMGP gefördert (Förderkennzeichen: K3-8503-PN 17-13).

Wir bedanken uns bei Prof. Dr. T. Gschlößl (StMUV), Dr. M. Hicke und Dr. J.Kiesel (StMPG), Dr. K. Zink (LfU) und V. Weilnhammer (LGL) für die fachliche Begleitung und die vielen konstruktiven Diskussionen.

ATMOSPHERISCHER LANGSTRECKENTRANSPORT VON POLLEN UND PILZSPOREN SIND ALPINE ORTE SICHER FÜR MENSCHEN MIT POLLENALLERGIEN?

DANIELA BAYR^{1,2}, MARIA P. PLAZA^{1,2}, FRANZISKA KOLEK^{1,2}, STEFANIE GILLES^{1,2}, CLAUDIA TRIDL-
HOFFMANN^{1,2}, ATHANASIOS DAMIALIS^{1,2*}

¹DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL MEDICINE, FACULTY OF MEDICINE, UNIVERSITY OF AUGSBURG, NEUSAESSER STR. 47,
86156 AUGSBURG, GERMANY

²INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL MEDICINE, HELMHOLTZ CENTRE MUNICH, NEUSAESSER STR. 47, 86156 GERMANY

*E-MAIL: THANOS.DAMIALIS@TUM.DE

Zusammenfassung: Vom 13.-24. Juni 2016 untersuchten wir auf dem Schneefernerhaus (2,656 m) den Zusammenhang zwischen Pollenkonzentrationen und allergischen Symptomen. An Tagen mit hoher Pollenkonzentration gaben die Allergiker verstärkt Symptome an. Mittels HYSPLIT-Modells wurden die Pollen als überwiegend aus der Schweiz und Frankreich stammend identifiziert. Auch bei spärlicher lokaler Vegetation scheinen daher Pollen, die aus Tausenden von Kilometern Entfernung stammen, allergische Symptome auslösen zu können.

Abstract: Here we investigate the relationship of airborne pollen and allergic symptoms on an alpine environment. The research was conducted during 13-24 June 2016 on Schneefernerhaus (2,656 m). Pollen and symptom scores of grass pollen allergic human volunteers were monitored daily. On specific days, allergics registered increased symptoms because of large amounts of pollen. By use of HYSPLIT model, we confirmed pollen originating mainly from Switzerland and France. Even with scarce local vegetation, pollen from thousands of kilometres away may still trigger allergic symptoms.

Weltweit sind Aeroallergene, wie Pollen und Pilzsporen, die Hauptursache für allergische Reaktionen und Symptome (Damialis et al. 2019b, Fairweather et al. 2020, Traidl-Hoffmann 2017). In höheren Lagen wie den Alpen ist deren Exposition aufgrund der spärlichen Vegetation deutlich geringer (Gehrig and Peeters 2000). Dennoch können Aeroallergene durch kontinuierliche Winde über weite Strecken in der Atmosphäre transportiert werden und folglich allergische Symptome auch in Regionen mit geringer Vegetation verursachen (Rousseau et al. 2003, Ghasemifard et al. 2020).

Ziel dieser Studie ist es, in einer theoretisch "allergiefreien" Umgebung Aeroallergene in der Außenluft zu identifizieren und deren potentielle atmosphärische Trajektorien zu ermitteln sowie die resultierenden allergischen Symptome einer menschlichen Kohorte zeitgleich zu dokumentieren.

Die Studie wurde vom 13. bis 24. Juni 2016 auf der Zugspitze an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS, Höhe: 2,650 mNN) durchgeführt (Abb. 1).

Eine Kohorte von Personen mit Gräserpollen-Allergie sowie eine Kontrollgruppe ohne Allergien registrierte während ihres Aufenthalts innerhalb des Untersuchungszeitraums am Schneefernerhaus dreimal täglich ihre Symp-

tome (Damialis et al., 2019a). Ebenfalls dreimal täglich wurde die Konzentration von luftgetragenen Pollen und Pilzsporen mit einer tragbaren Hirst-Falle gemessen und die Diversität und Abundanz manuell bestimmt. Die potentielle Herkunft der registrierten Aeroallergene wurde aus dem HYSPLIT-Modell (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) mittels Rückwärtstrajektorien des atmosphärischen Langstreckentransports (long-distance-transport) berechnet (Stein et al. 2015). Zudem wurden die vorherrschenden Wetterlagen aus der Visualisierung der U- und V-Komponente von Windvektoren sowie der geopotentiellen Höhe auf der Geopotentiellen Höhe von 500 hPa (mb) aus den Reanalysedaten des Global Forecasting System (GFS) ermittelt.



Abb.1: Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)

Während des Untersuchungszeitraums traten wechselnde Wetterbedingungen auf, die zeitweise zu höheren Aeroallergenkonzentrationen und wie erwartet auch zu einer erhöhten Intensität der allergischen Symptome führten. Insbesondere in den letzten Tagen wurden die Aeroallergene durch die stabilen vorherrschenden Westwinde über große Distanzen transportiert. Die Rückwärtstrajektorien sowie deren Höhenprofil sind in Abbildung 2 dargestellt und legen einen Transport aus dem Schweizer Norden bis zum Westen Frankreichs nahe. Die Herkunft aus Nordamerika ist allerdings aufgrund nur weniger

Trajektorien ohne Abfall im Höhenprofil eher unwahrscheinlich.

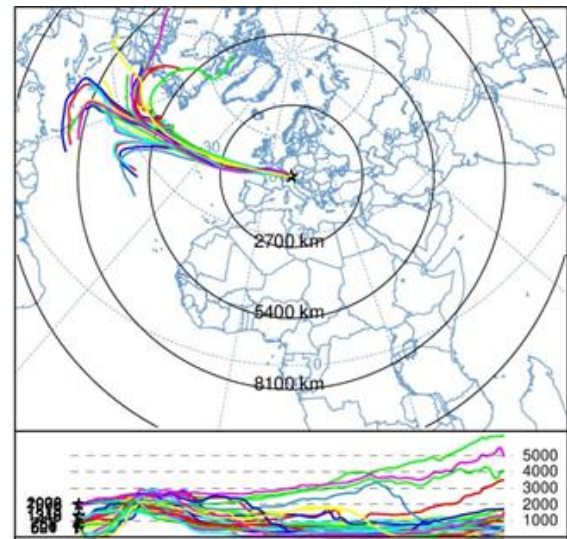


Abb.2: Potenzielle Rückwärtstrajektorie des Ferntransports aus dem HYSPLIT-Modell (oben) und Höhenprofil der Trajektorien am 22. Juni 2016; Dauer: 315 Stunden, Ensembles: 27

Diese Studie zeigt zum einen, dass Symptome durch Langstreckentransport von Pollen und Pilzsporen ausgelöst werden können und folglich auch alpine Regionen nur unter Berücksichtigung der Wetterlage als sichere Orte für Pollenallergiker angesehen werden können. Zum anderen wird deutlich, dass nicht alleine die Vegetation in direkter Umgebung betrachtet werden muss, um das allergische Potential einer Region zu ermitteln, sondern auch die vorherrschenden Windsysteme, Wetterlagen und die daraus resultierenden Trajektorien, die es Aeroallergenen ermöglichen über große Distanzen in der atmosphärischen Zirkulation transportiert zu werden.

Dieser interdisziplinäre Ansatz zeigt zudem, wie wichtig die Analyse von Daten aus verschiedenen Forschungsbereichen ist. Die Zusammenführung medizinischer und umweltbezogener Daten ist besonders wertvoll, um die medizinische Betreuung von Allergikern*innen zu verbessern und um die Auswirkungen des Klimawandels in räumlicher und

zeitlicher Hinsicht für Personen mit allergischen Erkrankungen zu verstehen.

Literatur

Damialis, A., Häring, F., Gökkaya, M., Rauer, D., Reiger, M., Bezold, S., Bounas-Pyrras, N., Eyerich, K., Todorova, A., Hammel, G., Gilles, S. und Traidl-Hoffmann, C.: Human exposure to airborne pollen and relationships with symptoms and immune responses: Indoors versus outdoors, circadian patterns and meteorological effects in alpine and urban environments, *Science of The Total Environment*, 653, 190–199, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.366>, 2019a.

Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C. und Treudler, R.: Climate Change and Pollen Allergies, In M. R. Marselle, J. Stadler, H. Korn, K. N. Irvine, & A. Bonn (Eds.), *Biodiversity and Health in the Face of Climate Change*, pp. 47–66, Springer International Publishing, https://doi.org/10.1007/978-3-030-02318-8_3, 2019b.

Fairweather, V., Hertig, E. und Traidl-Hoffmann, C.: A brief introduction to climate change and health, *Allergy*, 2352–2354, <https://doi.org/10.1111/all.14511>, 2020.

Gehrig, R. und Peeters, A.G.: Pollen distribution at elevations above 1000 m in Switzerland, *Aerobiologia*, 16, 69–74, <https://doi.org/10.1023/A:1007607121614>, 2000.

Ghasemifard, H., Ghada, W., Estrella, N., Lüpke, M., Oteros, J., Traidl-Hoffmann, C., Damialis, A., Buters, J. und Menzel, A.: High post-season *Alnus* pollen loads successfully identified as long-range transport of an alpine species, *Atmospheric Environment*, 231, 117453, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117453>, 2020.

Rousseau, D.-D., Duzer, D., Cambon, G., Jolly, D., Poulsen, U., Ferrier, J., Schevin, P. und Gros, R.: Long distance transport of pollen to Greenland: POLLENS AS A TRACER, *Geophysical Research*

Letters, 30, <https://doi.org/10.1029/2003GL017539>, 2003.

Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D. und Ngan, F.: NOAA's HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 2059–2077, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>, 2015.

Traidl-Hoffmann, C.: Allergie – eine Umwelterkrankung!, *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 60, 584–591, <https://doi.org/10.1007/s00103-017-2547-4>, 2017

POLLEN AN DER UFS

JEROEN BUTERS¹, KATHARINA HEIGL², SUSANNE KUTZORA²

¹ZAUM – ZENTRUM ALLERGIE UND UMWELT, HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN/TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

²LGL - BAYERISCHES LANDESAMT FÜR GESUNDHEIT UND LEBENSMITTELSICHERHEIT

E-MAIL: BUTERS@TUM.DE

Zusammenfassung: Der Betrieb einer Pollenfalle am UFS ist seit 2019 Bestandteil des elektronischen Polleninformationsnetzwerks Bayern ePIN (siehe Abb. 1). Pollen sind ein guter Indikator für das Pflanzenwachstum und eignen sich für die Quantifizierung des Klimawandels, zumal die Alpenvegetation und ihre Pollen besonders vom Klimawandel betroffen sind. Die am Schneefernerhaus gesammelten Daten sind seit 2020 online verfügbar unter www.epin.bayern.de. Dort sind auch Daten zum Pollenflug von anderen Messstationen (bis zu 30 Jahre zurück) vorhanden.

Abstract: A pollen monitoring station at UFS is part of the electronic Pollen Information Network for Bavaria ePIN (Abb. 1). Pollen are a good indicator of plant growth and can quantify the effects of climate change, especially as the Alpine vegetation is more affected. The pollen data of UFS are available online at www.epin.bayern.de. At these websites, data on pollen flight from other measuring stations (up to 30 years back) are available too.

Pollen sind gesundheitlich relevant. Die GEDA 2014-2015 EHIS-Studie zeigt, dass laut Selbsteinschätzung etwa ein Drittel der Erwachsenen im Alter von 18-79 Jahren an einer allergischen Erkrankung leiden (Schmitz et al. 2017), meistens gegen Birke oder Gräserpollen². Gleichzeitig werden Pollen von Pflanzen produziert, die auf den Klimawandel reagieren. Veränderungen in der Natur über die

Jahre können an Hand des Pollenflugs verfolgt werden.

Bayern hat als eins der wenigen Länder der Welt seit 2018 ein flächendeckendes Messnetz für Pollen aufgebaut (Weber, 2017; Oteros et al., 2019; Oteros et al. 2020).



Abb.1: Kontrolle der Pollenfalle am UFS durch Mitarbeiter des ZAUM im Juli 2020

Die Messstation an der UFS ist seit 2019 Teil dieses Messnetzes, womit die bereits vorhandenen Zeitreihen des ZAUM und von Prof. Menzel am UFS weitergeführt werden können. Das Projekt ePIN-Klima ist vorerst auf drei Jahre ausgelegt, mit der Aussicht auf langfristige Weiterführung.

Es wird erwartet, mit den Messungen den Klimawandel, der in den Alpen erhebliche Auswirkungen hat, an Hand von Veränderungen des Pollenflugs zu quantifizieren.

Gleichzeitig ist eine Pollenmessstation in Garmisch bei Prof. Dr. Schmidt am IMK-IFU dauerhaft aufgebaut.

Literatur

Haftenberger, M., Laussmann, D., Ellert, U., et al.: Prevalence of sensitisation to aeroallergens and food allergens: results of the German Health Interview and Examination Survey for Adults (DEGS1). Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz. 2013;56(5-6):687-697

Oteros, J., Sofiev, M., Smith, M., et al.: Building an automatic Pollen Monitoring Network (ePIN): Selection of optimal stations by clustering pollen zones. Science Tot environ. 2019;688:1263-1274.

Oteros, J., Weber, A., Kutzora, S., et al.: An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition. Environ Res. 2020;in press.

Schmitz, R., Kuhnert, R., und Thamm, M.: 12-Monats-Prävalenz von Allergien in Deutschland. J Health Monitor. 2017;2(1):77-82

Weber, A.: Pollenmonitoring – Current Development. Umwelt-Hygiene-Arbeitsmedizin. 2017;22:35-44

Danksagung

Die Station an der UFS wird finanziert durch das Staatsministerium für Gesundheit und Pflege mit Grant ePIN-KLIMA No. TKPo1KPB-73815.

SOLARE UV-STRAHLUNG – VERMESSUNG DER SPEKTRALEN BESTRAHLUNGSSTÄRKE AM SCHNEEFERNERHAUS

SEBASTIAN LORENZ¹, INGO MAYER¹, TETYANA ANTONOVA¹, DANIELA WEISKOPF¹

¹BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, ABT. WIRKUNGEN UND RISIKEN IONISIERENDER UND NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG,
INGOLSTÄDTER LANDSTR. 1, 85764 OBERSCHLEIßHEIM

E-MAIL: SLORENZ@BFS.DE

Zusammenfassung: Das Bundesamt für Strahlenschutz vermisst seit Sommer 2017 die spektrale UV-Bestrahlungsstärke am Schneefernerhaus. Diese UV-Messstation ist Teil der solaren UV-Messnetze in Deutschland und Österreich. In Deutschland treten die höchsten gemessenen Werte der solaren UV-Strahlung im Hochgebirge auf. Wissenschaftliche Auswertungen für 2019 und 2020 zeigen in beiden Jahren eine hohe Anzahl an extremen UV-Index-Werten und einen möglichen "Jahrhundert-Juni", 2019.

Abstract: The Federal Office for Radiation Protection has been measuring the spectral UV irradiance at UFS since summer 2017. The UV measuring station is part of the solar UV measuring networks in Germany and Austria. In Germany, the highest measured values of solar UV radiation occur in the high mountains. Scientific evaluations for 2019 and 2020 shows a high number of extreme UV index values in both years and a possible "June of the century", 2019.

Solare UV-Strahlung

UV-Strahlung kann zu zahlreichen sofortigen sowie später im Leben auftretenden Erkrankungen an Haut und Auge führen. Die schwerwiegendste Folge sind Hautkrebserkrankungen. Klimawandel und der Ozonabbau beeinflussen die am Erdboden ankommende solare UV-Strahlung (Baldermann & Lorenz, 2019). Die Messung und Bewertung der solaren UV-Bestrahlungsstärke sind ein

wichtiges Hilfsmittel, um deren gesundheitliche Auswirkungen abzuschätzen und Veränderungen der solaren UV-Strahlung zu untersuchen.

Solares UV-Messnetz

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) betreibt gemeinsam mit dem Umweltbundesamt, dem deutschen Wetterdienst und weiteren Institutionen das bundesweite solare UV-Messnetz.

Dabei wird in allen Klimazonen Deutschlands die bodennahe solare UV-Strahlung kontinuierlich von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang spektral aufgelöst gemessen und der UV-Index ermittelt (WHO, 2002).

Um die Bevölkerung über die aktuelle sonnenbrandwirksame UV-Bestrahlung zu informieren, publiziert das BfS täglich die ermittelten UV-Index-Werte sowie live-Tagesverläufe der Messdaten im Internet: www.bfs.de/uv-aktuell und www.imis.bfs.de. Seit 2019 kooperiert das BfS mit der Universität Innsbruck (UIBK), sodass die Messdaten vom Schneefernerhaus auch im Rahmen des österreichischen UV-Messnetzes angezeigt werden (www.uv-index.at).

UV-Messstation am Schneefernerhaus

Für die Klimazone Hochgebirge, in der die höchsten gemessenen UV-Bestrahlungsstärken in Deutschland auftreten, betreibt das BfS seit 2017 am Schneefernerhaus ein Spektralradiometer (Abb. 1). Die BfS-Messungen ergänzen dort bisherige Breitbandradiometer

(BRM)-Messungen der Ludwig-Maximilians-Universität München, die in Zusammenarbeit mit der UIBK durchgeführt werden. Im Vergleich zu den BRM messen Spektralradiometer mit einer höheren Genauigkeit und liefern eine erweiterte Datengrundlage für die Analyse der solaren UV-Strahlung und deren wellenlängenabhängigen Wirkungen auf den Menschen.



Abb.1: Messgeräte zur Erfassung der solaren UV-Strahlung: Breitbandradiometer der LMU (rechts) und Dioden-Array-Spektralradiometer des BfS (links)

Daten-Auswertung und Ergebnisse

Die spektrale Bestrahlungsstärke von 290 nm bis 400 nm wird mit einem Dioden-Array-Spektralradiometer (BTS2048-UV-WP, Gigahertz Optik) in 0,1 nm Schritten im Zwei-Minuten-Takt erfasst. Aus den erhaltenen Spektren werden u. a. die Erythem-wirksame Bestrahlungsstärke (EEr) und der UV-Index ermittelt.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft für den 4. Juli 2020 den EEr-Tagesverlauf und die 30-Minuten Mittelwertkurve (blaue Linie), mit der der UV-Index, hier 12, bestimmt wird.

Abbildung 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der UV-Index-Tagesspitzenwerte in den Jahren 2018 (grün), 2019 (rot) und 2020 (blau).

Der Jahresverlauf der UV-Index-Tagesspitzenwerte ist in Abbildung 4 für die Jahre 2018, 2019 und 2020 nebeneinander nach Monaten dargestellt.

An der rechten Achse ist die erythem-wirksame Bestrahlungsstärke aufgetragen und an der linken Achse der jeweilige UV-Index zu den Messwert-Gruppen.

Die statistische Verteilung der Werte des jeweiligen Monats ist als Box-Plot dargestellt. Für einen Vergleich und der Jahre sind die Mittelwerte im jeweiligen Monat mit einer schwarzen Linie verbunden.

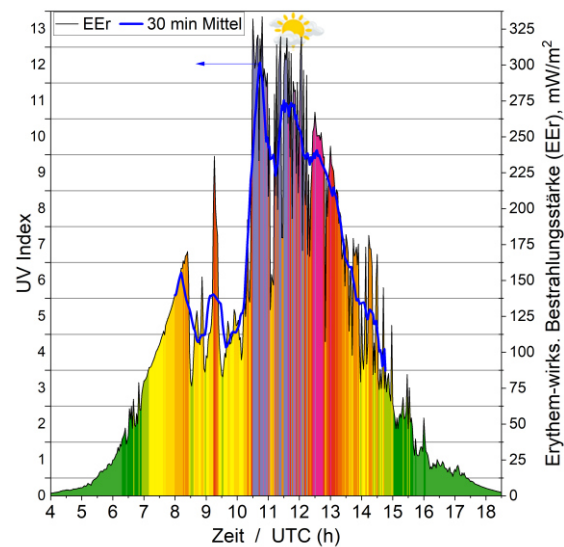


Abb.2: Tagesverlauf der Erythem-wirksamen Bestrahlungsstärke am 4. Juli 2020 und 30-Minuten Mittelwertkurve (blaue Linie).

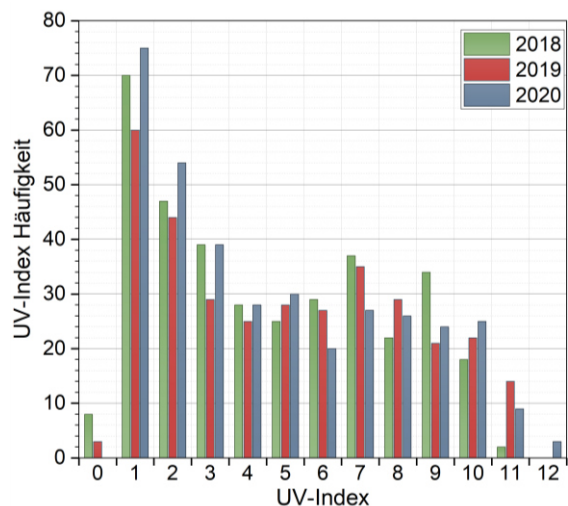


Abb.3: Häufigkeitsverteilung der UV-Index-Tagesspitzenwerte in den Jahren 2018 (grün), 2019 (rot) und 2020 (blau).

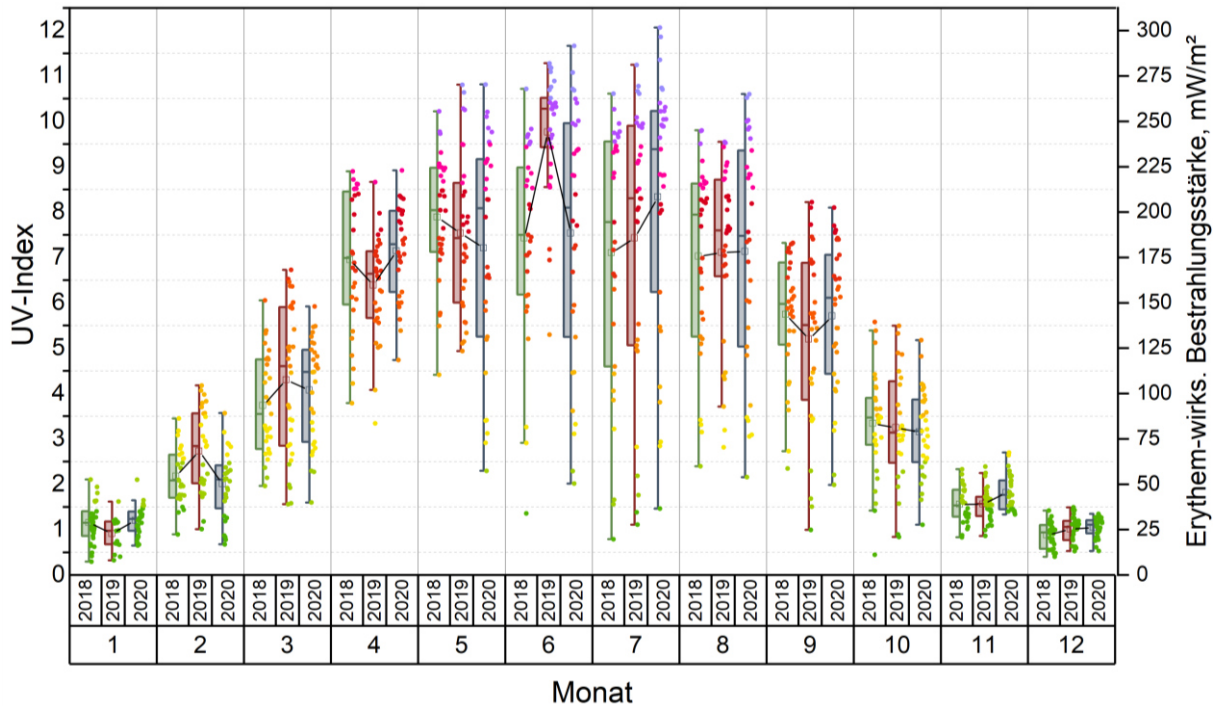


Abb. 4: UV-Index-Tagesspitzenwerte der Jahre 2018, 2019 und 2020 gruppiert in Monate mit als Box-Plots dargestellten statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen. (horizontale Linie: Median, Box: Interquartilsabstand, schwarze Linien: Verbindung Mittelwerte, Whisker: minimale bzw. maximale Messwertverteilung innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes).

Zur Berechnung der EEr-Tagesdosis wird der EEr-Tagesverlauf (z. B. Abb. 2) von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang integriert. Die ermittelten Tagesdosen sind als Standard-Erythem-Dosis (SED) in Abbildung 5 dargestellt.

Eine SED entspricht 100 J/m² der EEr-Tagesdosis. Die Messwertgruppierung und Darstellung der statistischen Verteilung der Monatswerte erfolgte analog zu Abbildung 4. Drei zusätzliche Linien zeigen die über das Jahr kumulierte SED (Abb. 5, rechts).

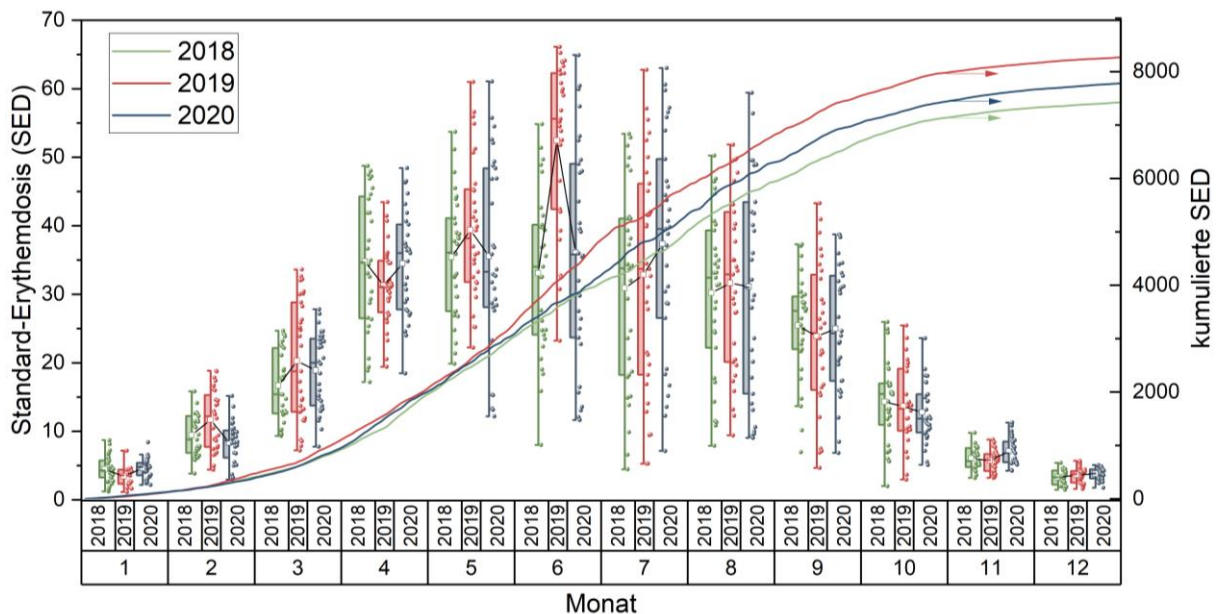


Abb. 5: Standard-Erythemdosis-Werte der Jahre 2018, 2019 und 2020 gruppiert nach Monaten mit als Box-Plots dargestellter statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen (→ linke Achse) und über das Jahr kumulierte SED (durchgezogene Linien, → rechte Achse).

Neben der Erythem-wirksamen Bestrahlungsstärke werden aus den Messdaten u .a. auch ungewichtete Bestrahlungsstärke-Werte und deren Tagesdosis berechnet.

Die Ergebnisse der UVA-Tagesdosis (Abb. 6) und UVB-Tagesdosis (Abb. 7) sind analog zur SED (Abb. 5) aufgetragen.

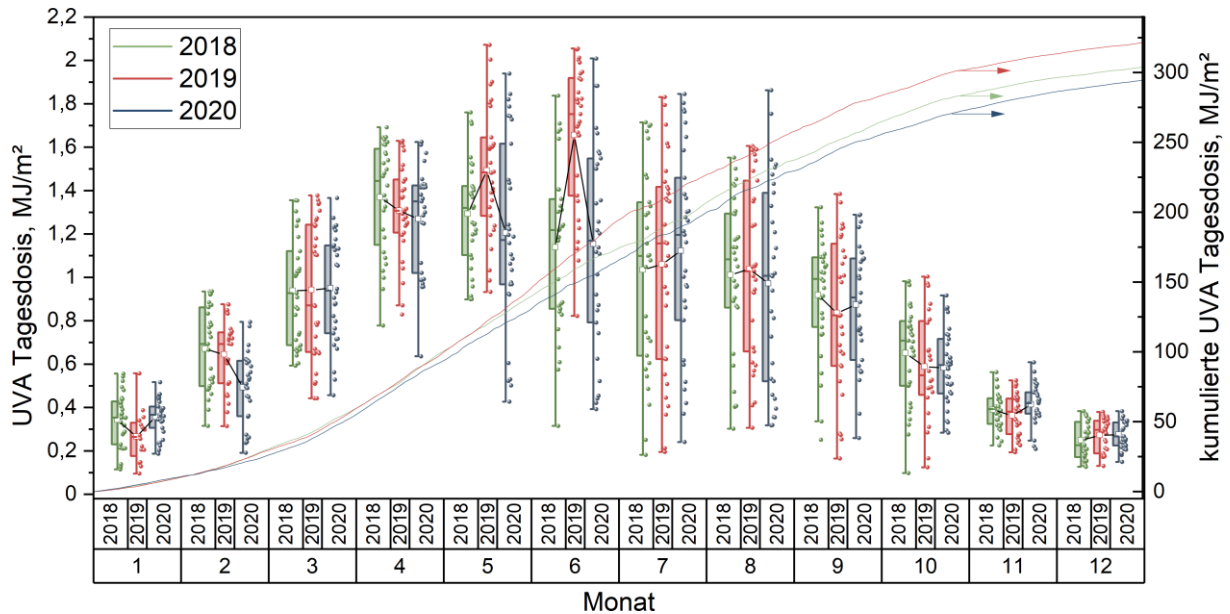


Abb. 6: UVA-Tagesdosis-Werte (315 nm – 400 nm) der Jahre 2018, 2019 und 2020 gruppiert nach Monaten mit als Box-Plots dargestellter statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen (→ linke Achse) und über das Jahr kumulierte UVA-Tagesdosis (durchgezogene Linien, → rechte Achse).

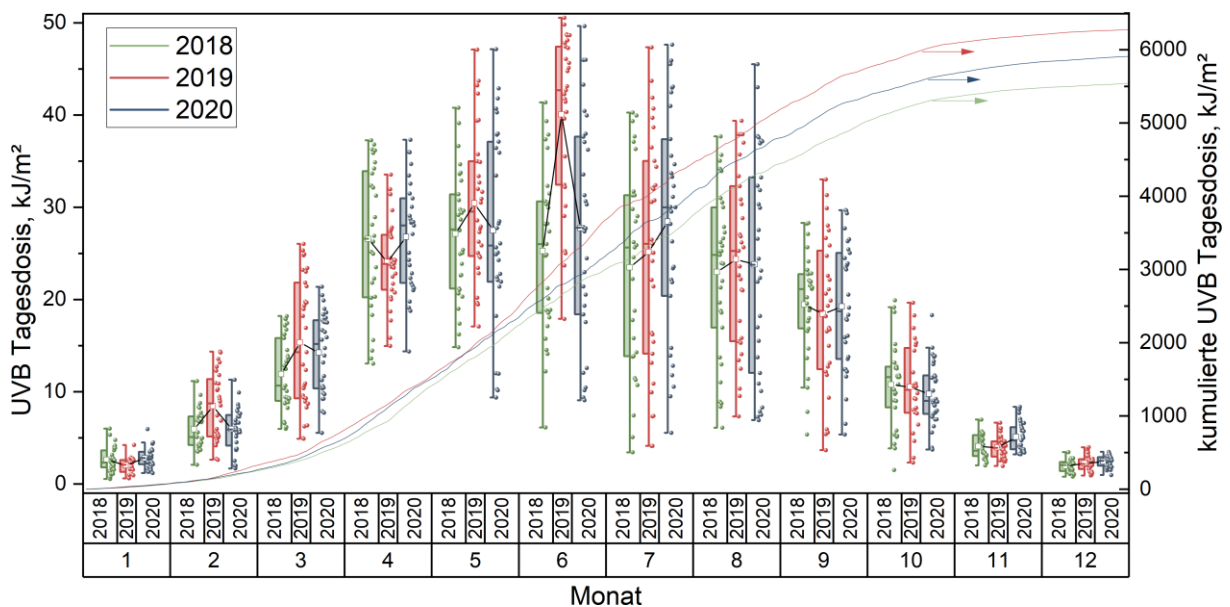


Abb. 7: UVB-Tagesdosis-Werte (290 nm – 315 nm) der Jahre 2018, 2019 und 2020 gruppiert nach Monaten mit als Box-Plots dargestellter statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen (→ linke Achse) und über das Jahr kumulierte UVB-Tagesdosis (durchgezogene Linien, → rechte Achse).

„Jahrhundert-Juni“ 2019

Im Juni 2019 lagen die UV-Index-Werte (Abb. 4), die SED-Werte (Abb. 5), aber auch die UVA- und UVB-Tagesdosis-Werte (Abb. 6 und Abb. 7) deutlich über dem Niveau der Jahre 2018 und 2020. Dies kann auf drei Einflussfaktoren zurückgeführt werden:

- Die Analyse von **Schneehöhen**-Daten des DWD vom Zugspitzgipfel (DWD CDC, 2018; DWD CDC 24.03.2020) ergab für den Juni 2019 eine überdurchschnittliche mittlere monatliche Schneehöhe. Sie betrug nahezu das Doppelte der Juni-Mittelwerte der letzten 20 Jahre und erreichte den dritt-höchsten Wert seit dem Jahr 1900. Eine großflächige Schneebedeckung in der Region kann aufgrund des Albedo-Effektes (Rückreflexionen der solaren Strahlung am Schnee) zu einer Erhöhung der gemessenen Bestrahlungsstärke führen.

- Die BfS-Auswertung von Daten der **Atmosphärischen Ozonkonzentration** (Geffen et al., 2017) für die Zugspitzregion ergab für Juni 2019 den niedrigsten Juni-Durchschnittswert seit dem Jahr 2000 und den zweitniedrigsten Juni-Wert seit mindestens 40 Jahren. Niedrige Atmosphärische Ozonkonzentrationen führen zu einer Erhöhung der UVB-Bestrahlungsstärke und damit der Erythem-wirksamen Bestrahlungsstärke.

- Die **Sonnenscheindauer** ist der Faktor mit dem größten Einfluss auf SED- und Tagesdosis-Werte. Die Auswertung von Sonnenstunden-Daten seit 1900 für den Monat Juni auf der Zugspitze (DWD CDC, 2018; DWD CDC 24.03.2020) ergab für das Jahr 2019 den mit Abstand höchsten Wert seit Beginn der Datenreihe. Die Sonnenstundenzahl lag um den Faktor 2 über dem langjährigen Juni-Mittel.

Aufgrund der deutlichen Überhöhung der UV-Messergebnisse im Juni 2019 und der Analyse wichtiger Einflussfaktoren, kann von einem

„Jahrhundert-Juni“ hinsichtlich UV-Messwerte im Jahr 2019 ausgegangen werden.

Extreme UV-Index-Werte 2019 und 2020

Für die Jahre 2019 und 2020 zeigen die Auswertungen eine hohe Anzahl an extremen UV-Index-Werten 11 und 12 (Abb. 3). Die höchsten UV-Index-Werte im Jahresverlauf treten generell in den Monaten um die Sommersonnenwende auf (Abb. 4). Im Jahr 2019 ist die hohe Anzahl extremer Werte vor allem auf den oben beschriebenen Juni zurückzuführen (siehe Abb. 4). Im Jahr 2020 zeigt die BfS-Auswertung von Ozondaten (Geffen et al., 2017) für die Zugspitzregion unterdurchschnittliche Werte über den gesamten Sommer. Es wird angenommen, dass deren Ursache die Emissionsreduktion in der COVID-19-Pandemie ist (Steinbrecht et al., 2021).

Vor allem bei den Tagen mit UV-Index 12 wurde zudem ein weiterer Einflussfaktor auf die Messwerte identifiziert: die wolkenbedingte Strahlungsüberhöhung. Sie tritt bei teilweiser Bewölkung auf, wenn die Sonne durch die Wolken bricht und sowohl direkte Sonnenstrahlung als auch an Wolken reflektierte Sonnenstrahlung das Messgerät erreichen. Im Tagesverlauf der Messwerte zeigt sich dieser Effekt auch durch kurzfristige Spitzenwerte der zeitliche Verlauf (Abb. 2).

Literatur

Baldermann, C., Lorenz, S. UV-Strahlung in Deutschland: Einflüsse des Ozonabbaus und des Klimawandels sowie Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung. Bundesgesundheitsbl 62, 639–645, <https://doi.org/10.1007/s00103-019-03001-0>, 2019.

DWD Climate Data Center (CDC): Historical daily station observations (temperature, pressure, precipitation, sunshine duration, etc.) for Germany, version v006, 2018.

DWD Climate Data Center (CDC): Recent daily station observations (temperature, pressure, precipitation, sunshine duration, etc.) for Germany, quality control not completed yet, version recent, last accessed: 24.03.2020.

Steinbrecht, W., Kubistin, D., Plass-Dülmer, C., Davies, J., Tarasick, D. W., Gathen, P., et al.: COVID-19 crisis reduces free tropospheric ozone across the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters*, 48, <https://doi.org/10.1029/2020GL091987>, 2021.

Van Geffen, J., Van Weele, M., Allaart, M., Van der A, R.: TEMIS UV index and UV dose MSR-2 data products, version 2. Dataset. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), <https://doi.org/10.21944/temis-uv-msr2-v2>, 2017.

World Health Organization (WHO): Global solar UV index — A practical guide. WHO, Genf, 2002.

SIMULATION DER NEUTRONEN DER SEKUNDÄREN KOSMISCHEN STRAHLUNG AUF DEM „SCHNEEFERNERHAUS“ UND AUF DEM „SPHINX OBSERVATORIUM“ MIT DEM MONTE CARLO PROGRAMM GEANT₄

THOMAS BRALL¹, VLADIMIR MARES¹, ROLF BÜTIKOFER², WERNER RÜHM¹

¹ HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN, INGOLSTÄDTER LANDSTR. 1, 85764 NEUHERBERG

² UNIVERSITÄT BERN, SIDLERSTRASSE 5, 3012 BERN, SCHWEIZ

E-MAIL: MARES@HELMHOLTZ-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Messungen von Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung hat auf der Umwelt-forschungsstation Schneefernerhaus eine lange Tradition. Sie wurden bereits ergänzt durch Messungen auf dem Sphinx Observatorium auf dem Jungfrauoch in der Schweiz. Begleitend dazu wurde für beide Standorte ein Umgebungsmodell entwickelt und in das Monte Carlo Programm GEANT₄ implementiert. Erste Ergebnisse der Simulationen werden hier vorgestellt. Die Simulationen sollen in Zukunft verwendet werden, um den Einfluss von Umweltparametern auf die Neutronenenergieverteilung zu untersuchen.

Abstract: Since many years neutrons from secondary cosmic radiation have been measured at the environmental research station "Schneefernerhaus". Recently, these measurements have been complemented by measurements at the Sphinx observatory on the Jungfrauoch, Switzerland. Here we report on the development of an environmental model developed for both sites, to be used in GEANT₄ Monte Carlo simulations. First results of these simulations are very promising. In the future, such simulations will be used to quantify the influence of environmental parameters on the neutron fluence energy distribution.

Einleitung

Im Bericht der wissenschaftlichen Resultate 2015/2016 hatten wir bereits von Neutronenmessungen der sekundären kosmischen Strahlung auf der Umweltforschungsstation „Schneefernerhaus“ sowie auf dem Sphinx Observatorium auf dem Jungfrauoch in der Schweiz berichtet (Mares et al., 2017; Mares et al., 2020). Im folgenden Bericht 2017/2018 hatten wir beschrieben, wie wir die Produktion von Sekundärneutronen am CERN mit dem Monte Carlo Programm GEANT₄ simulierten und mit begleitenden Messungen validierten (Mares et al., 2019; Brall et al., 2020). Darauf aufbauend führten wir in den letzten beiden Jahren für beide Standorte (Umweltforschungsstation Schneefernerhaus und Jungfrauoch) GEANT₄Simulationen der Neutronenproduktion durch sekundäre kosmische Strahlung durch mit dem Ziel, die Energieverteilung der dort gemessenen Neutronen quantitativ zu verstehen.

Umgebungsmodell des Schneefernerhauses

Abbildung 1 zeigt die Lage des Schneefernerhauses am Hang des Zugspitzmassivs. Basierend auf Satellitendaten und topographischen Karten wurde das Gipfelmassiv als dreieckiges waagrechtes Prisma mit einer Länge von 30 km und einer Breite von 4,39 km modelliert, dessen obere Kante auf einer Höhe von 2.831 m liegt (was in etwa der Höhe des Gipfelkamms der Zugspitze entspricht).

Auf entsprechender Höhe von 2.661,5 m wurde am Hang die Position des Schneefernerhauses angenommen. Als Material des Prismas wurde Kalkstein einer Dichte von 2.8 g/cm^3 gewählt (Abb. 2).

Für die Simulationen wurden in einem ersten Schritt in einer Höhe von 100 km Protonen und Alphateilchen der kosmischen Strahlung mit entsprechender Energieverteilung gestartet und der sich entwickelnde Teilchenschauer in der Atmosphäre simuliert. Für die Zusammensetzung der Atmosphäre wurden Standardbedingungen angenommen (COESA 1976). Alle Sekundärteilchen wurden dann in einer Höhe von 3 km über dem Meeresspiegel beim Durchgang durch eine über der Position des Schneefernerhauses definierten Fläche gespeichert (Abb. 3).

In einem zweiten Simulationsschritt wurden die gespeicherten Teilchen neu gestartet und die Energieverteilung der sekundären Neutronen an der angenommenen Position des Schneefernerhauses bestimmt (Abb. 4).



Abb.1: Schneefernerhaus am Gipfelhang, Gipfelgrat und Zugspitz-Gipfel (Foto: V. Mares)

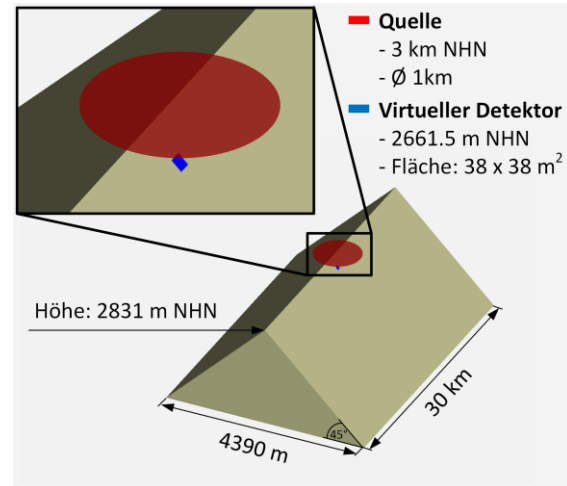


Abb.2: Geometrie in den GEANT4-Simulationen mit Gipflemassiv, Schneefernerhaus (blau), und im zweiten Simulationsschritt verwendete Neutronenquelle (rot); NHN – Normalhöhennull

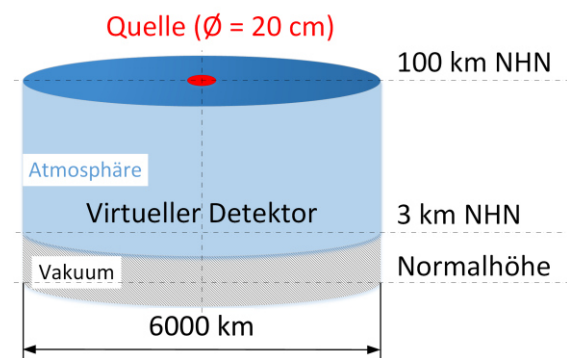


Abb.3: Geometrie der Atmosphäre in den GEANT4-Simulationen - 1. Schritt der Simulationen. Rot – Quelle von Protonen und Alphateilchen der primären kosmischen Strahlung; NHN – Normalhöhennull

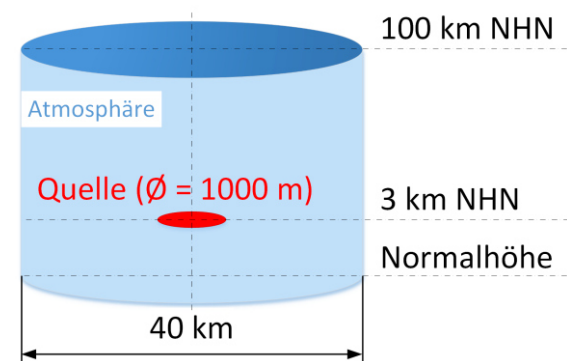


Abb.4: Geometrie der Atmosphäre in den GEANT4-Simulationen – 2. Schritt der Simulationen. Rot – Quelle von Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung; NHN – Normalhöhennull

Umgebungsmodell des Sphinx-Observatorium auf dem Jungfrauojoch

Ganz analog wurde zur Simulation der Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung auf dem Sphinx-Observatorium auf dem Jungfrauojoch vorgegangen. Abbildung 5 zeigt das Sphinx-Observatorium auf dem Jungfrauojoch, Abbildung 6 das entsprechende für die GEANT₄-Simulationen entwickelte Modell der Umgebungsgeometrie. In diesem Fall wurde die Umgebung als vierseitige Pyramide mit einer Grundfläche von 20 x 20 km² (Basis-Höhe über dem Meeresspiegel: 2.135 m) mit einer Neigung von 7° modelliert. Auf diese Pyramide wurde in einer Höhe von 3.387 m als Sphinx-Gipfel eine kleinere Pyramide mit Seitenlängen von 148 m und 320 m aufgesetzt, und auf deren Spitze wurde auf einer Höhe von 3.585 m wurde die Position der Sphinx-Kuppel angenommen (Abb. 6).



Abb.5: Sphinx-Observatorium auf dem Jungfrauojoch. Foto – V. Mares

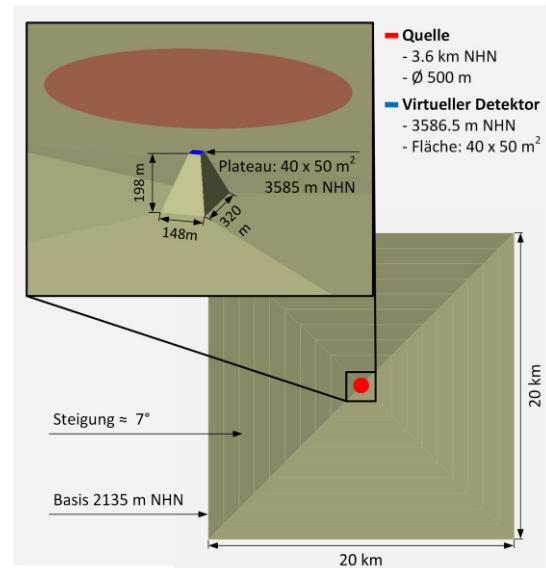


Abb.6: Geometrie in den GEANT₄-Simulationen mit Jungfrauojoch, Sphinx-Observatorium (blau), und im zweiten Simulationsschritt verwendete Neutronenquelle (rot). NHN – Normalhöhennull

Erste Simulationsergebnisse

Erste Simulationen zeigten bereits eine sehr gute Übereinstimmung mit am 3. März 2018 auf dem Schneefernerhaus durchgeführten Messungen (Abb. 7). In den Simulationen wurde dabei eine willkürliche Schneehöhe entsprechend 12,5 cm SWE (Snow Water Equivalent) angenommen, sowie die in GEANT₄ standardmäßig implementierte „Shielding“ Physikliste verwendet.

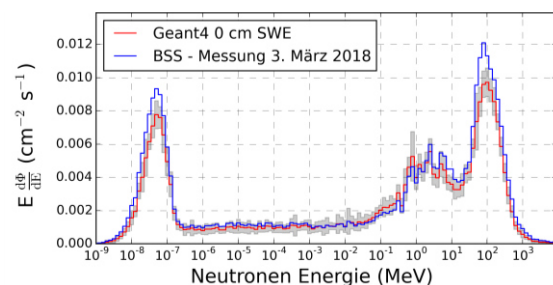


Abb. 7: Auf der Schneefernerhaus mit GEANT₄ simuliertes Neutronenspektrum (rot) mit statistischen Unsicherheiten (graue Schattierung) im Vergleich zu einem am 3. März 2018 gemessenen Neutronenspektrum (blau).

Analog zeigt Abbildung 8 ein Vergleich eines im September 2018 im Sphinx-Observatorium gemessenen Neutronenspektrums mit einem mit GEANT₄ simulierten Neutronenspektrum.

Die Simulation wurde ohne Annahme einer Schneedecke durchgeführt, wieder unter Verwendung der „Shielding“ Physikliste.

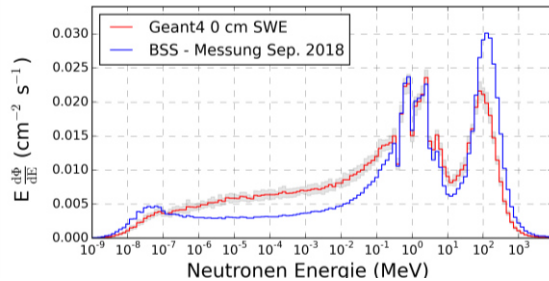


Abb. 8: Auf dem Sphinx-Observatorium auf dem Jungfraujoch mit GEANT4 simuliertes Neutronenspektrum (rot) mit statistischen Unsicherheiten (graue Schattierung) im Vergleich zu einem im September 2018 gemessenen Neutronenspektrum (blau).

Die simulierten Neutronenspektren zeigen die charakteristische und erwartete Abhängigkeit der Neutronenfluenz von der Neutronenenergie: Auf einen Maxwell-Boltzmann-Peak bei thermischen Neutronenenergien folgt ein relativ flacher Verlauf im epithermischen Neutronen-Energiebereich, dann ein Maximum bei Neutronenenergien im MeV-Bereich („Verdampfungsbereich“) sowie ein weiteres Maximum bei etwa 100 MeV („Kaskadenbereich“). Derartige Verläufe haben wir bereits in früheren Berichten beschrieben (Mares et al., 2017, Mares et al., 2019).

Auffällig ist die relativ gute Übereinstimmung bei hohen Neutronenenergien: so sind die simulierten integralen Neutronenfluenzen vom Schneefernerhaus im Kaskadenbereich nur etwa 19 % niedriger als die gemessenen (Abb. 7). Ähnlich sind die simulierten integralen Neutronenfluenzen vom Sphinx-Observatorium etwa 26 % niedriger als die Gemessenen (Abb. 8)). Die bei niedrigeren Neutronenenergien beobachteten Abweichungen sind teilweise deutlicher ausgeprägt. Dies liegt daran, dass die Neutronenfluenzen in diesem Energiebereich wesentlich von dem unbekannten Wassergehalt der näheren Umgebung um die Messposition (Boden-

feuchtigkeit, Schneehöhe, Wassergehalt von Baumaterialien) abhängen.

Ausblick

Das hier beschriebene Verfahren zur Simulation von Neutronen der sekundären kosmischen Strahlung mit GEANT4 soll in Zukunft verwendet werden, um den Einfluss von Umweltparameter wie zum Beispiel Schneehöhe und Bodenfeuchtigkeit auf die Neutronenenergieverteilung im Alpenraum zu quantifizieren.

Literatur

Mares, V., Brall, T., Bütikofer, R., Donth, G., und Rühm, W.: Einfluss von Umweltparametern auf die sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung im Alpenraum. UFS Jahresbericht 2015/2016, 2017.

Mares, V., et al.: Influence of environmental parameters on secondary cosmic ray neutrons at high-altitude research stations at Jungfraujoch, Switzerland, and Zugspitze, Germany. Radiat. Phys. Chem. 168: 108557, 2020.

Mares, V., Brall, T., Dommert, M., Trinkl, S., Wielunski, M., und Rühm, W.: Kalibrierung des UFS-Neutronenspektrometers an einem Teilchenbeschleuniger am CERN. UFS-bericht 2017/2018.

Brall, T., Dommert, M., Rühm, W., Trinkl, S., Wielunski, M., und Mares, V.: Monte Carlo simulation of the CERN-EU High Energy Reference Field (CERF) facility. Radiat. Meas. 133: 106294, 2020. COESA, 1976. U.S. Standard Atmosphere 1976. Technical Report NOAA Document S/T 76-1562, Committee on Extension to the Standard Atmosphere (COESA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the National Aeronautics and Space Administration (NASA), U.S. Air Force.

Danksagung

Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (Bay. StMUV) für die Förderung im Rahmen des Verbundprojektes VAO-II (Az. 71_1d-U8729-2013/193-5).

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

ESTHER GIEMSA¹, JUCUNDUS JACOBET¹, 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 (ALPENDAC)

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), Jungfraujoch (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, Schneefernerhaus (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 Rückwärts-simulation 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°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 beeinflussten, kurzfristiger variierenden 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).

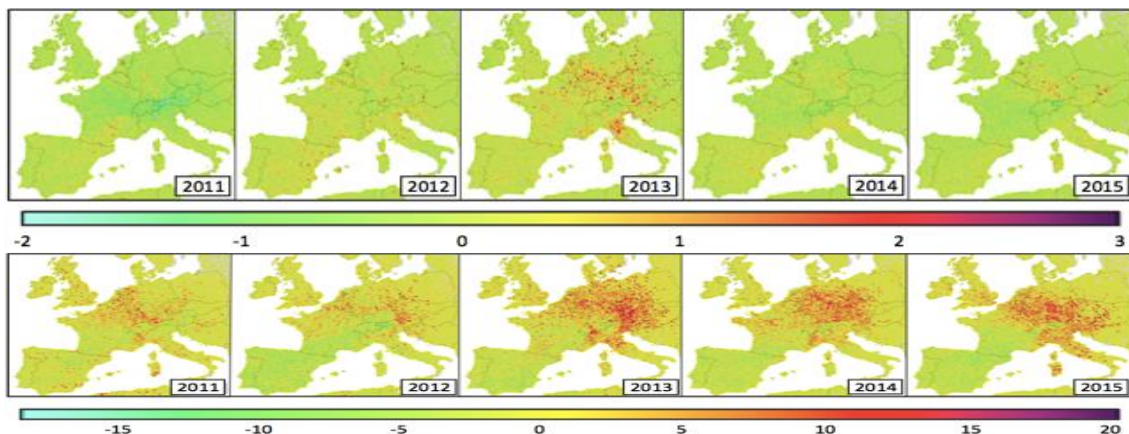


Abb. 2: Jährliche Beiträge aus den farbig codierten Gitterzellen zu den saison- und trendbereinigten CO₂-Konzentrationen (oben: in ppm) bzw. CH₄-Konzentrationen (unten: in ppb), die während des Untersuchungszeitraums 2011–2015 (v.l.n.r.) an den Stationen Plateau Rosa, Jungfraujoch, Schneefernerhaus und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

VERGLEICH DER CO₂ UND CO MESSUNGEN AM SCHNEEFERNERHAUS UND DEM ZUGSPITZKAMM

ANTJE HOHEISEL¹, CEDRIC COURET², BRYAN HELLACK³, MARTINA SCHMIDT¹

¹INSTITUT FÜR UMWELTPHYSIK, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

²UMWELTBUNDESAMT (UBA), UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS

³UMWELTBUNDESAMT (UBA), LANGEN

E-MAIL: ANTJE.HOHEISEL@IUP.UNI-HEIDELBERG.DE, CEDRIC.COURET@UBA.DE

Zusammenfassung: In den hochaufgelöste CO₂ und CO Messungen am Schneefernerhaus sind lokale Emissionen zu beobachten, die besonders zwischen 6 und 18 Uhr und in den Wintermonaten auftreten und hauptsächlich durch die Benutzung von Schneefräsen und Pistenraupen verursacht werden. Seit Oktober 2018 werden CO₂ und CO zusätzlich am Zugspitzkamm gemessen. Die Messungen dort werden wesentlich seltener und weniger stark von lokalen Quellen beeinflusst. Ein Vergleich der beiden Messreihen zeigt zudem, dass eine sorgfältige Qualitätskontrolle die größten Einflüsse der lokalen Quellen identifizieren und entfernen kann.

Abstract: High-resolution CO₂ and CO measurements at Schneefernerhaus show local pollution events especially between 6 and 18 UTC and in winter which are mainly caused by local sources such as snow blowers and snow groomer. Since October 2018, CO₂ and CO are additionally measured at the mountain ridge. These measurements are much less frequent and less strong influenced by local sources. A comparison of both time series also shows that a careful quality control can identify and remove the largest impact of local sources.

Motivation

Auf der Zugspitze werden seit mehreren Jahrzehnten CO₂ und andere Treibhausgase gemessen. Da es sich um eine Hochgebirgsstation handelt, sind die dort durchgeführten Messungen typischerweise weniger von regionalen und lokalen Einflüssen betroffen als Messungen an regionalen oder städtischen Messstationen. Neuere Studien haben jedoch gezeigt, dass selbst an Bergstationen die hochauflösenden Treibhausgasmessungen gelegentlich durch lokale anthropogene Aktivitäten beeinflusst werden können. Am Pic du Midi (Frankreich) wurden lokale CH₄-Peaks festgestellt (El Yazidi et al., 2018) und die CO₂-Messungen am Jungfraujoch deuten auf eine Beeinflussung durch Besucher und Tourismus hin (Afolter et al., 2021).

Eine genaue Analyse der kurzzeitigen lokalen Beeinflussung ist oftmals erst durch neuere Laser Absorption Messgeräte möglich, da diese eine zeitliche Auflösung der Zeitreihen von wenigen Sekunden bis zu einer Minute erlauben.

Diese neuen Messreihen mit hoher Auflösung zeigten in den letzten Jahren den Einfluss lokaler Quellen am Schneefernerhaus, die bei einer Mittelung über 30 oder 60 Minuten schwer zu erkennen wären.

Standort Zugspitzkamm

Um den Einfluss der lokalen Verschmutzung auf die gemessene Zeitreihe zu untersuchen, werden Vergleichsmessungen auf dem Zugspitzkamm (ZGR, 2825m ü. NN), etwa 150 m oberhalb des Schneefernerhauses durchgeführt (Abb. 1). Seit 2014 nutzt der Deutsche Wetterdienst (DWD) diese Ansaugleitung am

Bergrücken für seine Radonmessungen (Frank et al., 2017). In 2018 wurde eine neue 290 m lange Edelstahlrohrleitung vom Schneefernerhaus zum Zugspitzkamm verlegt, die auch die Möglichkeit zur Vergleichsmessung für Treibhausgase bietet.



Abb.1: Messstationen ZSF und Zugspitzkamm.

Vergleichsmessungen

Seit Oktober 2018 werden Vergleichsmessungen von CO und CO₂ am Schneefernerhaus und am Zugspitzkamm durchgeführt.

Abbildung 2 zeigt die CO und CO₂ Konzentrationsmessungen am Zugspitzkamm (ZGR) in rot und am Schneefernerhaus (ZSF) in schwarz und blau.

Lokale Verunreinigungen werden vor allem im Winter von Pistenfahrzeugen und Benzin-Schneefräsen erzeugt, was zu kurzzeitigen Peaks in der Zeitreihe von CO und CO₂ führen kann. Mit Hilfe von Logbüchern werden diese Einflüsse notiert und später per Hand im Datensatz markiert. Diese markierten Daten werden für die weiteren Auswertungen nicht mehr berücksichtigt und sind in der Abbildung 2 blau dargestellt.

Ergebnis: Wie erwartet zeigen die Messungen am Zugspitzkamm keine großen Peaks in der Messreihe und somit eine wesentlich geringere Beeinflussung durch lokale Quellen als die Messungen am Schneefernerhaus.

An ca. 83 % der Tage an denen lokale Einflüsse in CO oder CO₂ am Schneefernerhaus zu sehen sind, können keine Überhöhungen am Zugspitzkamm beobachtet werden.

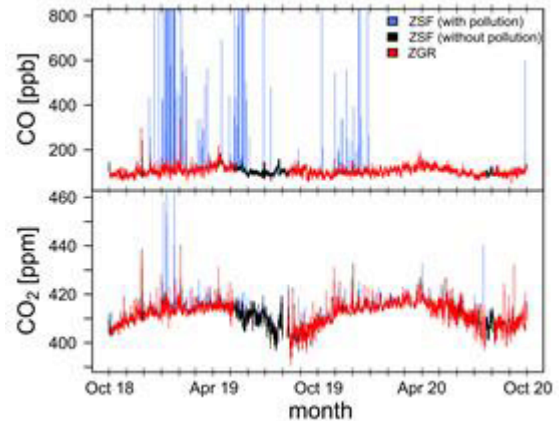


Abb.2: CO und CO₂ Konzentrationen gemessen am Schneefernerhaus (ZSF) und am Zugspitzkamm (ZGR).

Lokale Emissionen in der Nähe des Schneefernerhauses

Durch lokale Emissionen müssen 2 % der gemessenen Minutenwerte per Hand markiert und aus dem Datensatz herausgenommen werden. Diese markierten Daten zeigen eine saisonale und tageszeitliche Abhängigkeit, die in Abbildung 3 dargestellt ist. Besonders häufig werden die Messreihen zwischen Oktober und Mai beeinflusst, da in dieser Zeit mehr Schnee fällt und somit Schneefräsen und Pistenfahrzeuge häufiger zum Einsatz kommen. Weiterhin wird mehr als 90 % des lokalen Einflusses tagsüber zwischen 6 und 18 Uhr (UTC) beobachtet.

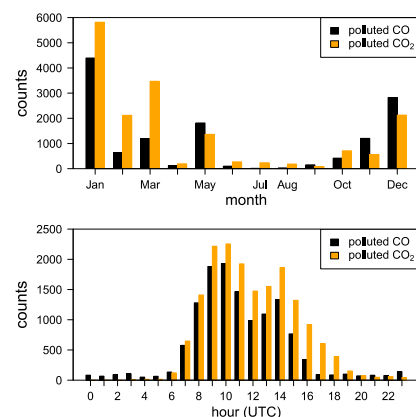


Abb.3: Verteilung der CO und CO₂ Emissionsereignisse am Schneefernerhaus.

Manuelle Markierung von Spikes

Das manuelle Entfernen von Spikes (Emissionsereignisse) in den Messreihen filtert alle größeren Abweichungen zwischen der Messung am Schneefernerhaus und der am Zugspitzkamm. Somit werden erfolgreich alle stärkeren Beeinflussungen der Messdaten durch lokale Quellen entfernt.

Die Stundenmittel der CO und CO₂-Konzentration zwischen Schneefernerhaus (unmarkierte Werte) und Zugspitzkamm zeigen eine mittlere Abweichung von 0.4 ± 2.4 ppb in CO und 0.1 ± 0.4 ppm in CO₂. In Abbildung 4 wird die Verteilung der Differenz der Minutenmittel zwischen den beiden Standorten gezeigt.

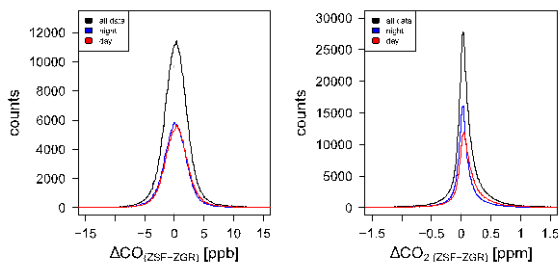


Abb.4: Verteilung der Differenzen der CO und CO₂ Minutenwerte zwischen Schneefernerhaus und Zugspitzkamm

CO zeigt eine symmetrische Kurve und zwischen Tag und Nacht gibt es nur eine kleine Verschiebung zu positiveren Differenzen. Die CO Messungen am Schneefernerhaus und am Zugspitzkamm unterscheiden sich nicht signifikant und die lokale Beeinflussung in der CO Messreihe scheint erfolgreich herausgenommen worden zu sein.

Die Differenzen in CO₂ zeigen hingegen verstärkt höhere CO₂ Konzentrationen am Schneefernerhaus. Dies wird am Tag noch verstärkt. Während in der Nacht die mittlere Differenz zwischen beiden Standorten nur 0.06ppm ist, so ist sie tagsüber mit 0.13 ppm mehr als doppelt so groß. Die CO₂ Messungen am Schneefernerhaus scheinen tagsüber trotz der Entfernung einiger Emissionsereignisse immer noch von lokalen Quellen beeinflusst zu werden.

Schlussfolgerung

Die Vergleichsmessungen zwischen Schneefernerhaus und Zugspitzkamm konnten deutlich die lokale Beeinflussung der CO₂ und CO Messreihe in den Wintermonaten zeigen. Diese Spikes konnten weitgehend durch sorgfältige manuelle Markierung der Messdaten gefiltert werden. Eine dauerhafte Verlegung der Leitung oder Parallelmessung am Zugspitzkamm wäre eine wünschenswerte Verbesserung. Momentan testen wir verschiedene Algorithmen zur automatischen Erkennung von Spikes, die dann zukünftig in die Qualitätskontrolle der Daten eingebaut werden können.

Literatur

Affolter, S., Schibig, S., Berhanu, T., Bukowiecki, N., Steinbacher, M., Nyfeler, P., Hervo, M., Lauper, J. und Leuenberger, M.: Assessing local CO₂ contamination revealed by two near-by high altitude records at Jungfraujoch, Switzerland, Environ. Res. Lett. in press <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab74a>.

El Yazidi, A., Ramonet, M., Ciais, P., Broquet, G., Pison, I., Abbaris, A., Brunner, D., Conil, S., Delmotte, M., Gheusi, F., Guerin, F., Hazan, L., Kachroudi, N., Kouvarakis, G., Mihalopoulos, N., Rivier, L., und Serça, D.: Identification of spikes associated with local sources in continuous time series of atmospheric CO, CO₂ and CH₄, Atmos. Meas. Tech., 11, 1599–1614, <https://doi.org/10.5194/amt-11-1599-2018>, 2018.

Frank, G., Salvamoser, J., Steinkopff, T., und Ries, L.: Radon-222 und Beryllium-7 als natürlicher tracer, UFS-Wissenschaftliche Resultate 2015/2016, 2017.

Danksagung

Die Datenanalyse dieser Studie wurde durch das Projekt 95297 von dem Umweltbundesamt (UBA) gefördert.

COMPARISON OF CONTINUOUS IN-SITU CO₂ MEASUREMENTS WITH CO-LOCATED COLUMN-AVERAGED XCO₂ TCCON/SATELLITE OBSERVATIONS AND CARBONTRACKER MODEL OVER THE ZUGSPITZE REGION

YE YUAN¹, RALF SUSSMANN², MARKUS RETTINGER², LUDWIG RIES³, HANNES PETERMEIER⁴,
ANNETTE MENZEL^{1,5}

¹DEPARTMENT OF LIFE SCIENCE SYSTEMS, TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, 85354 FREISING

²KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY, IMK-IFU, 82467 GARMISCH-PARTENKIRCHEN

³GERMAN ENVIRONMENT AGENCY (UBA), GAW GLOBAL OBSERVATORY ZUGSPITZE-HOHENPEISENBERG, 82475 ZUGSPITZE

⁴DEPARTMENT OF MATHEMATICS, TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, 85748 GARCHING

⁵INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY, TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH, 85748 GARCHING

E-MAIL: YUAN@WZW.TUM.DE

Zusammenfassung: Boden- und satelliten-gestützte Messungen des atmosphärischen Kohlendioxids liefern wichtige Erkenntnisse zum globalen Kohlenstoffkreislauf und seinen lokalen Quellen und Senken. Die zeitliche und räumliche Übereinstimmung dieser Messungen ist noch unzureichend erforscht und eine einheitliche Datenverarbeitungsroutine wäre wünschenswert. Hier vergleichen wir repräsentative oberflächen- und säulengemittelte CO₂-Messreihen für die Zugspitzregion. Durch die konsistente Verwendung geeigneter Algorithmen zur Datengewinnung und -interpolation können der CO₂-Trend und die Saisonalität erfasst und verglichen werden.

Abstract: Ground- and satellite-based measurements of atmospheric carbon dioxide provide important insights into the global carbon cycle and local carbon source and sink on different temporal and spatial scales. However, the compatibility of both measurements is still underexplored and the applicability of a consistent data processing routine remains a challenge. We performed an inter-comparison study among representative surface and column-averaged CO₂ records over the Mount Zugspitze region of Germany. By using proper

data retrieval and gap interpolation algorithms under a consistent data processing routine, the CO₂ trend and seasonality can be well captured from all measurement data sets.

Hintergrund

Atmosphärische CO₂-Messungen werden auf der ganzen Welt mit anerkannten Messverfahren auf einer internationalen Kalibrationskala vergleichbar und hoch präzise durchgeführt. Um CO₂-Konzentrationen so zu erfassen, dass sie repräsentativ für die freie (untere) Troposphäre sind, werden kontinuierliche In-situ-Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung sowohl an repräsentativen Messstellen als auch an hohen Messtürmen durchgeführt. Außerdem werden Fernerkundungstechniken angewandt, um die säulengemittelten CO₂-Molbrüche (d. h. XCO₂) durch bodengestützte FTIR-Messungen im Rahmen des Total Carbon Column Observing Network (TCCON, Toon et al., 2009) zu erfassen. Andererseits können mit Satelliten und Modellen Kohlenstoffsignale über viel größere räumliche Skalen erfasst werden. Wir führen deshalb einen systematischen Vergleich von gemessenen und modellierten CO₂/ XCO₂-Daten aus der Zugspitzregion durch und untersuchen, ob die

verschiedenen Messungen das repräsentative Hintergrundniveau von CO₂ vergleichbar erfassen können.

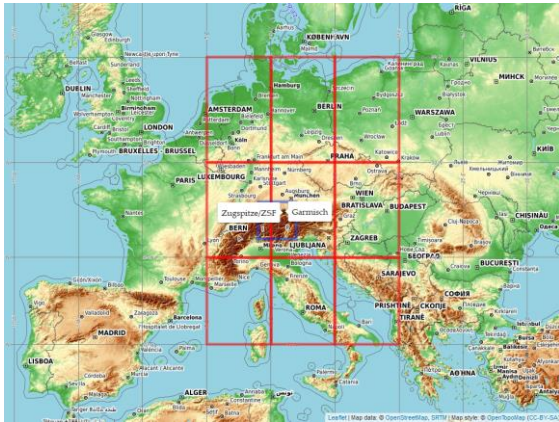


Abb. 1: Lage der Messstandorte Zugspitze und Garmisch.

Datensätze und -verarbeitung

- **In-situ-Messungen:** Lange Zeitreihen der bodennahen CO₂ Konzentrationen wurden an der GAW Globalstation Zugspitze-Schneefernerhaus, Deutschland (ID: ZSF) von 2002 bis 2018 erfasst.

- **TCCON:** Zwei bodengebundene FTS-Messstandorte wurden ausgewählt, die die Zugspitzregion abdecken: Garmisch (seit 2007) und Zugspitze (seit 2015) mit der Datenversion GGG2014 (<https://tccodata.org/>, Sussmann & Rettinger, 2018a; 2018b).

- Satelliten und CarbonTracker Modelle:

Es wurde ein aus SCIAMACHY/ ENVISAT (2002 bis 2012) und TANSO-FTS/GOSAT (seit 2009, Buchwitz et al., 2018) fusioniertes CO₂-Satellitenprodukt verwendet. Für eine bessere zeitliche Abdeckung wurden auch XCO₂-Daten aus dem OCO-2 g lite Produkt einbezogen (seit 2014, Crisp et al., 2017). Zusätzlich wurde CarbonTracker, das globale CO₂-Modellierungssystem von NOAA/ESRL, zur Validierung verwendet (Peters et al., 2007).

Von allen abgeleiteten CO₂/XCO₂-Datensätzen wurden über den gesamten Zeitraum Monatsmittelwerte berechnet. Bodennahe, für die untere freie Troposphäre an Bergstationen repräsentative In-situ-Daten wurden mit dem Adaptive Diurnal minimum Variation Selection (ADVS, Yuan et al., 2018; 2019a)

Verfahren selektiert. Alle Datensätze wurden mit STL (Seasonal and Trend Decomposition using Loess, Cleveland et al., 1990) weiter analysiert.

Kohlendioxid-Trend und Saisonalität

Die mittleren Abweichungen der Satelliten- und TCCON-Messungen von den kontinuierlichen In-situ-Messungen betrugen weniger als 2 ppm und zeigten insgesamt gute Übereinstimmungen. Bei den STL Zeitreihenzerlegungsanalysen stimmten die mittleren jährlichen Wachstumsraten aus den Trendkomponenten mit etwa 2,2 ppm pro Jahr über den 17-jährigen Zeitraum (2002-2018) zwischen allen Datensätzen gut überein. Dagegen gab es deutliche Unterschiede in den mittleren Jahresamplituden aus den saisonalen Komponenten zwischen den in-situ- (11.7 ppm) und den säulengemittelten Messungen (6.6 ppm), die hauptsächlich auf die unterschiedlichen gemessenen Luftmassen zurückzuführen waren. Die auf der Zugspitze gemessenen in-situ Daten stimmten in ihrer Struktur gut mit jenen Satellitendaten überein, die für vergleichbare Höhenstufen bestimmt wurden.

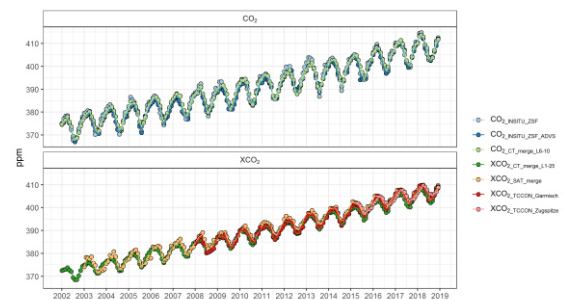


Abb.2 Monatliche Zeitreihen aller CO₂/XCO₂-Datensätze. Abbildung entnommen aus Abbildung 2 in Yuan et al. (2019b).

Diese Vergleichsstudie hat eindeutig gezeigt, dass die verschiedenen CO₂/XCO₂-Datensätze in der Zugspitzregion Deutschlands erfolgreich vergleichbar sind, wenn eine einheitliche Datenaufbereitungsroutine angewendet wird, um eine kohärente Datenqualität zu erreichen. Die aufgezeigten Differenzen

in der saisonalen Komponente sind auf die verschiedenen Messansätze / Messobjekte (bodengebundene In-situ-Messstationen versus Säulenmittel in der Atmosphäre) zurückzuführen. Nichtsdestotrotz sollten die Unstimmigkeiten durch inkonsistente zeitliche und räumliche Auflösungen in den Messdatensätzen immer berücksichtigt werden.

Literatur

Toon, G., Blavier, J., Washenfelder, R., Wunch, D., Keppel-Aleks, G., Wennberg, P., Connor, B., Sherlock, V., Grith, D., Deutscher, N., et al.: Total Column Carbon Observing Network (TCCON). In *Advances in Imaging, OSA Technical Digest* (CD). Opt. Soc. Am. 2009, JMA3.

Sussmann, R., und Rettinger, M.: TCCON data from Garmisch (DE), Release GGG2014.R2 [Data set]. CaltechDATA 2018a, r2.

Sussmann, R., und Rettinger, M.: TCCON Data from Zugspitze (DE), Release GGG2014.R1 [Data set]. CaltechDATA 2018b, r1.

Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Noël, S., Gier, B., Bovensmann, H., Burrows, J.P., Boesch, H., Anand, J., Parker, R.J., et al.: Computation and analysis of atmospheric carbon dioxide annual mean growth rates from satellite observations during 2003–2016. *Atmos. Chem. Phys.* 2018, 18, 17355–17370.

Crisp, D., Pollock, H.R., Rosenberg, R., Chapsky, L., Lee, R.A.M., Oyafo, F.A., Frankenberg, C., O'Dell, C.W., Bruegge, C.J., Doran, G.B., et al. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmos. Meas. Tech.* 2017, 10, 59–81.

Peters, W., Jacobson, A.R., Sweeney, C., Andrews, A.E., Conway, T.J., Masarie, K., Miller, J.B., Bruhwiler, L.M.P., Pétron, G., Hirsch, A.I., et al.: An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2007, 104, 18925–18930.

Cleveland, R.B., Cleveland, W.S., McRae, J.E., Terpenning, I. STL: A seasonal-trend decomposition. *J. O. Stat.* 1990, 6, 3–73.

Yuan, Y., Ries, L., Petermeier, H., Steinbacher, M., Gómez-Peláez, A.J., Leuenberger, M.C., Schumacher, M., Trickl, T., Couret, C., Meinhardt, F., et al.: Adaptive selection of diurnal minimum variation: A statistical strategy to obtain representative atmospheric CO₂ data and its application to European elevated mountain stations. *Atmos. Meas. Tech.* 2018, 11, 1501–1514.

Yuan, Y., Ries, L., Petermeier, H., Trickl, T., Leuchner, M., Couret, C., Sohmer, R., Meinhardt, F., und Menzel, A.: On the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ at Mount Zugspitze, Germany, during 1981–2016. *Atmos. Chem. Phys.* 2019a, 19, 999–1012.

Yuan, Y., Sussmann, R., Rettinger, M., Ries, L., Petermeier, H., und Menzel, A.: Comparison of Continuous In-Situ CO₂ Measurements with Co-Located Column-Averaged XCO₂ TCCON/Satellite Observations and CarbonTracker Model Over the Zugspitze Region. *Remote Sens.* 2019b, 11, 2981. <https://doi.org/10.3390/rs11242981>

Danksagung

Diese Studie wird durch ein Stipendium des China Scholarship Council (CSC, No. 201508080110) unterstützt. Wir bedanken uns für die Unterstützung durch ein MICMoR-Stipendium durch das KIT/IMK-IFU an Ye Yuan. Wir danken der UFS GmbH für die Unterstützung unserer wissenschaftlichen Aktivitäten und dem StMUV für die Förderung der Forschungsstation. Wir danken M. Buchwitz, Universität Bremen, für seine hilfreichen Kommentare. Die Obs4MIPs XCO₂ Satellitendaten wurden vom Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) bezogen. Die OCO-2-Satellitendatenprodukte wurden vom OCO-2-Projekt am Jet Propulsion Laboratory, erstellt und aus dem OCO-2-Datenarchiv des NASA Goddard Earth Science Data and Information Services Center bezogen. CT2017 und CT-NRT.v2018-1 Daten von NOAA ESRL, Boulder, Colorado, USA, wurden von der Website <http://carbontracker.noaa.gov> bezogen.

GERINGERE CO₂-EMISSIONEN DURCH DEN COVID-19-LOCKDOWN NICHT IN DER ATMOSPHÄRE ERKENNBAR. ZUM ERREICHEN DER PARISER KLIMAZIELE SIND JAHRZEHNTELANGE MAßNAHMEN ERFORDERLICH

RALF SUSSMANN¹, MARKUS RETTINGER¹

¹KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, IMK-IFU, GARMISCH-PARTENKIRCHEN, DEUTSCHLAND

E-MAIL: RALF.SUSSMANN@KIT.EDU

Zusammenfassung: Aktuelle Daten aus den Energie-, Industrie- und Mobilitätssektoren prognostizierten für das Jahr 2020 – mit Blick auf die Einschränkungen in der COVID-19-Krise – eine Reduktion der weltweiten Kohlendioxid-Emissionen um bis zu acht Prozent. Laut des Weltklimarats IPCC wären kumulative Einsparungen etwa dieser Größenordnung Jahr für Jahr erforderlich, um die Ziele des Pariser Abkommens bis 2030 zu erreichen. Unsere Studie zeigt, dass sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre durch die geschätzten Emissionsreduzierungen bisher nicht nachweisbar verändert hat.

Abstract: Based on current data measured in the energy, industry, and mobility sectors, restrictions of social life during the COVID-19 pandemic have been predicted to lead to a reduction of worldwide carbon dioxide emissions by up to eight percent in 2020. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), cumulative reductions of about this magnitude would be required every year to reach the goals of the Paris Agreement by 2030. Our study revealed that concentration of carbon dioxide (CO₂) in the atmosphere has not yet changed due to the estimated emission reductions.



Abb.1: Gipfelobservatorium des KIT auf der Zugspitze mit Kuppel für die Langzeit-Infrarot-Vertikalsondierung des atmosphärischen Gesamtgehalts an Kohlendioxid (Foto: KIT).

Fragestellung

Die Einschränkungen des öffentlichen Lebens im Frühjahr 2020 aufgrund der COVID-19-Pandemie haben dazu geführt, dass weniger Autos und Flugzeuge unterwegs waren, viele Menschen zu Hause sowohl gearbeitet als auch ihren Urlaub verbracht haben und weniger Erdöl und Kohle verbraucht wurden. Die gute Nachricht ist: Die weltweiten Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) sanken für das gesamte Jahr 2020 um ca. acht Prozent. Das hat die Internationale Energieagentur (IEA) anhand von Energie-, Industrie- und Verkehrsdaten geschätzt. In der aktuellen Situation stellt sich die Frage, ob sich daraus bereits eine Reduktion der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ergibt.

Studie und Ergebnis

Die ernüchternde Antwort ist jedoch: Eine messbare Reduktion der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ergibt sich daraus noch nicht: Abbildung 2 zeigt die Jahres-Anstiegsraten von CO₂ der letzten Jahre (d. h. das jeweilige CO₂-Jahresmittel relativ zum Vorjahr). Diese wurden abgeleitet aus hochempfindlichen infrarotspektrometrischen Messungen des atmosphärischen CO₂-Gesamt-Säulengehalts über den KIT-Observatorien Zugspitze, Garmisch und Karlsruhe sowie Daten der Station Park Falls in Wisconsin (USA). Diese Standorte gehören zum weltweiten Total Carbon Column Observing Network (TCCON). Wie Abbildung 2 zeigt, ist die Anstiegsrate in 2020 (rot) im Vergleich zu einer Modellvorhersage ohne COVID-19-Restriktionen (blau) zwar geringfügig reduziert (um ca. 0,32 ppm/Jahr). Diese Reduktion ist jedoch nicht signifikant und bewegt sich innerhalb der kombinierten Unsicherheiten von Messung (rot) und Vorhersage ohne COVID-19-Einfluss (blau).

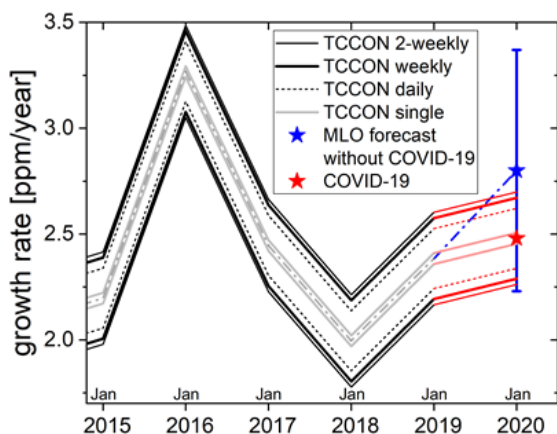


Abb. 2: Hemisphärisch repräsentative Jahres-Anstiegsraten von atmosphärischen CO₂-Säulengehalten aus infrarotspektrometrischen Messungen über der Zugspitze, Garmisch, Karlsruhe und Parkfalls. Rot: Anstiegsrate für 2020, im Vergleich (blau) eine Referenz-Modellvorhersage ohne Effekt durch COVID-19-Lockdown. Das Band der Messunsicherheiten unterscheidet Beiträge der Einzelmessungen (TCCON single) sowie der wetterbedingten Variabilität auf verschiedenen Zeitskalen (TCCON daily, weekly, 2-weekly). Blauer Balken: Unsicherheit der Modellvorhersage (ohne COVID-19-Einfluss).

Diskussion

Um die CO₂-Emissionen spürbar und dauerhaft zu senken, müssten wir jedes Jahr weitere acht Prozent CO₂-Emissionen einsparen – also 16 Prozent in 2021, 24 Prozent in 2022 und so weiter. So lägen in zirka 13 Jahren die Emissionen bei Null. Nur dann gäbe sich in etwa 2,5 Jahren ein messbarer Effekt.

Dass die Atmosphäre noch nicht auf die verringerten Emissionen im Frühjahr 2020 „geantwortet“ hat, liegt zum einen an der Langlebigkeit von CO₂ und der enormen Hintergrundkonzentration, die sich seit der Industrialisierung aufgebaut hat. Ein CO₂-Molekül, das 1880 aus einer Kohlefabrik in die Atmosphäre gelangt ist, hält sich heute noch dort auf. Die Lebensdauer von CO₂ beträgt weit über 100 bis 1000 Jahre. Das bedeutet: Wenn wir jetzt sofort komplett auf erneuerbare Energien umstellen würden, dann bliebe die CO₂-Konzentration noch deutlich länger als 100 Jahre auf dem heutigen Niveau.

Zum anderen erschwert noch etwas anderes die Früherkennung der CO₂-Reduktion in der Atmosphäre: die enorme Jahr-zu-Jahr-Variation der CO₂-Senken durch natürliche Klimavariabilität. Ozeantemperaturen variieren durch das Wetterphänomen „El Nino“ und das Ozeanwasser nimmt in Folge mehr oder weniger CO₂ auf. Auch die Landvegetation unterliegt klimabedingten Schwankungen: In trockenen Jahren gibt es weniger Wachstum, wodurch weniger CO₂ durch die Pflanzenatmung gebunden wird – das Maximum in 2016 (Abb. 2) beruht zum größten Teil auf diesem natürlichen Effekt. Beide Effekte waren in der Vergangenheit stärker als die Jahr-zu-Jahr-Schwankung der anthropogenen CO₂-Emissionen und sind auch deutlich stärker als der Effekt des Lockdowns Anfang 2020.

Schlussfolgerungen

Das Dramatische an unseren Erkenntnissen ist letztlich, dass wir die Klimaziele unmöglich allein durch Selbstbeschränkungen wie etwa weniger Auto und mehr Zug erreichen können. In der Pandemie haben wir mit großer Anstrengung gerade einmal acht Prozent Verringerung der CO₂-Emission in 2020 geschafft. Man muss daher an der Wurzel ansetzen und so schnell wie möglich ausreichende Alternativen zu den fossilen Brennstoffen schaffen. Dafür braucht es einen grundlegenden Umbau der Technologien im Energie-, Industrie und Verkehrssektor und das kann nur durch global politische und gesellschaftliche Maßnahmen erzielt werden.

durch die Helmholtz Gemeinschaft im Rahmen des Forschungsprogramms ATMO.

Literatur

Sussmann, R., und Rettinger, M.: Can We Measure a COVID-19-Related Slowdown in Atmospheric CO₂ Growth? Sensitivity of Total Carbon Column Observations, *Remote Sens.*, 12, 2387, 2020, <https://doi.org/10.3390/rs12152387>

Sussmann, R.: Geringere CO₂-Emissionen durch Corona-Beschränkungen noch nicht in der Atmosphäre erkennbar. Auswirkungen der Pandemie zeigen sich in der Atmosphäre erst spät – Zum Erreichen der Pariser Klimaziele sind jahrzehntelange Maßnahmen erforderlich, KIT Presseinformation 078/2020, https://www.kit.edu/kp/pi_2020_078_geringere-co2-emissionen-durch-corona-beschränkungen-noch-nicht-in-der-atmosphäre-erkennbar.php

Sussmann, R.: „Nur ein Trippelschritt für den Klimaschutz“ - Der Rückgang von CO₂-Emissionen durch die Corona-Pandemie ist noch nicht messbar - Campusreport (Hochschulradiomagazin der badischen Universitäten Freiburg, Heidelberg, Mannheim und Karlsruhe), Feb 2, 2021, <https://doi.org/10.5445/IR/1000129259>

Danksagung

Die TCCON-Stationen Zugspitze, Garmisch und Karlsruhe wurden gefördert von der Europäischen Raumfahrtagentur (ESA) unter dem Kontrakt 4000120088/17/I-EF und vom Deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger DLR unter den Verträgen 50EE1711A & D. Wir danken für Grundfinanzierung

VALIDIERUNG VON LIDAR-MESSUNGEN VON WASSERDAMPF BIS 20KM UND TEMPERATUR BIS ZUR MESOPAUSE (90KM)

HANNES VOGELMANN¹, THOMAS TRICKL¹, MATTHIAS PERFAHL¹

¹KIT IMK-IFU, KREUZECKBAHNSTR. 19, 82467 GARMISCH-PARTENKIRCHEN

E-MAIL: VOGELMANN@KIT.EDU

Zusammenfassung: In Rahmen der FIRMOS-Messkampagne konnten beim Raman-Lidar am Schneefernerhaus die Messung von Wasserdampf und Temperatur mit den angestrebten Spezifikationen validiert werden, bis zu einer Höhe von 20 km bzw. 90 km. Durch den konsequenten Einsatz moderner mechatronischer Optik-Komponenten ist das System bereit für den operationellen Messbetrieb. Es konnten einzelne Messungen ferngesteuert durchgeführt werden.

Abstract: As part of the FIRMOS Campaign in Winter 2019, we were able to validate the final specifications of the Raman-Lidar which means vertical profiles of water vapor up to 25 km and temperature even up to 90 km. By consequently applying motorized opto-mechanical components we are ready to start remotely controlled routine operation.

Zur Vorbereitung einer Satelliten-Mission der ESA zur Beobachtung der thermischen Abstrahlung der Erdatmosphäre mit einem Fern-Infrarot-Spektrometer wurde im Winter 2019 auf der Zugspitze eine Messkampagne durchgeführt. Hierbei kamen neben dem Instrument FIRMOS (Far-Infrared Radiation Mobile Observation System, CNR-INO) weitere Messsysteme zum Einsatz, welche die thermische Strahlung selbst (AERI Spektralradiometer des IMK-IFU) oder die für den Strahlungstransport in der Atmosphäre sehr wichtig Vertikalverteilung von Wasserdampf und

Temperatur messen. Für die Vertikalprofile von Wasserdampf und Temperatur standen einerseits das Raman-Lidar am Schneefernerhaus zur Verfügung, andererseits wurden vom Forschungszentrum Jülich zusätzlich Ballongetragene CFH-Sonden (Cryogenic Frost Point Hygrometer) eingesetzt, die auch unter den kalten und sehr trockenen Bedingungen in der Stratosphäre genaue Messergebnisse liefern. Diese Ballon-Sonden wurden aus technischen Gründen (schwierige Windverhältnisse auf der Zugspitze) jedoch im Tal am IMK-IFU in Garmisch-Partenkirchen gestartet. Aufgrund der teilweise sehr kleinräumigen Variabilität der Wasserdampfverteilung (Vogelmann et al., 2015) ist bei Vergleichen ein geringer Abstand der Messsysteme von Bedeutung. Bei der Kampagne war dies infolge eines annähernd vertikalen Aufstiegs in der Troposphäre der Fall. Dies erlaubte es neben der Validierung auch, das Raman-Lidar am Schneefernerhaus zu kalibrieren.

Lidar Technik

Das Raman-Lidar am Schneefernerhaus zeichnet sich durch einen XeCl-Laser mit einer Durchschnittsleistung von bis zu 180 W bei einer Wellenlänge von 308 nm und ein sehr großes Empfangsteleskop (1,5 m Spiegeldurchmesser) aus. Dadurch ist es möglich, die vergleichsweise kurze Messdauer von nur einer Stunde zu realisieren. Die Messung von Temperaturprofilen in der Stratosphäre erfolgt hingegen mit einem frequenzverdreiften Nd:YAG-Laser mit hoher Puls-Energie von 160 mJ und einer niedrigen Repetitions-

rate von 20 Hz bei einer Wellenlänge von 355 nm. Damit können zuverlässig Rückstreuungssignale aus der Mesosphäre bis über 90 km Höhe gemessen werden.

Die Detektion des Wasserdampf-Mischungsverhältnisses erfolgt über die inelastische Raman-Streuung an Wasser- und Stickstoffmolekülen bei den Wellenlängen 347 nm bzw. 331 nm. Die Messung der Temperatur wird hingegen mithilfe der elastischen Rayleigh-Streuung direkt bei der Laser-Wellenlänge von 355 nm vorgenommen. Die volle Reichweite von etwa 20 km für Wasserdampf und etwa 90 km für Temperaturprofile lässt sich nur bei absoluter Dunkelheit erzielen und erfordert zum einen eine äußerst empfindliche und zum anderen eine gut gegen Hintergrundlicht (z. B. Mondlicht oder Sterne) abgeschirmte Detektionskette. Hierfür wird der Eingangsspalt im Hauptfokus des Teleskops exakt an die Divergenz des Laserstrahls angepasst, wodurch weniger vom Hintergrundlicht des Himmels, in den Lidar-Empfänger eindringen kann. Zusätzlich werden sehr schmalbandige Interferenzfilter eingesetzt, die nur die für den jeweiligen Detektor spezifische Wellenlänge passieren lassen (347 nm: Bandbreite 0,75 nm). Durch diese Maßnahmen wird das Hintergrundrauschen so weit reduziert, dass Zählraten von weniger als einem Photon pro Stunde aus einem Höhenintervall von 7,5 m detektiert werden. Dies entspricht etwa einem Mischungsverhältnis von 1 ppm Wasserdampf in 20 km Höhe bzw. dem Rückstreuungssignal der Temperaturmessungen aus über 90 km Höhe.

Durch Vergleiche im Rahmen der FIRMOS-Messkampagne konnte die Leistungsfähigkeit des Lidar-Messsystems eindrücklich unter Beweis gestellt werden. (Abb. 1 und 2, Klanner et al., 2021). Weil die Temperaturmessung mit dem Lidar auf einer Dichte-Messung beruht, ist es aufgrund der hohen Reichweite von 90 km eine große technische Heraus-

forderung am oberen "Ende" der Messung eine richtige Kalibrierung vorzunehmen, weil ballongetragene Sonden nicht bis in diesen Höhenbereich vordringen. Am Schneefernhaus stellen jedoch die GRIPS-Spektrometer des DLR eine ideale Ergänzung dar. Diese Geräte liefern Temperaturwerte aus dem Mesopausenbereich, die gut als Startwerte für die Berechnung von Temperaturprofilen aus den Lidar-Signalen verwendet werden können.

Literatur

Vogelmann, H., Sussmann, R., Trickl, T., und Reichert, A.: Spatiotemporal variability of water vapor investigated using lidar and FTIR vertical soundings above the Zugspitze, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 3135–3148, <https://doi.org/10.5194/acp-15-3135-2015>, 2015.

Klanner, L., Höveler, K., Khordakova, D., Perfahl, M., Rolf, C., Trickl, T., und Vogelmann, H.: A powerful lidar system capable of 1 h measurements of water vapour in the troposphere and the lower stratosphere as well as the temperature in the upper stratosphere and mesosphere, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 531–555, <https://doi.org/10.5194/amt-14-531-2021>, 2021.

Danksagung:

Förderung durch das bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz in mehreren Projekten.

Tatkräftige Unterstützung durch Mitarbeiter der UFS-Betriebsgesellschaft.

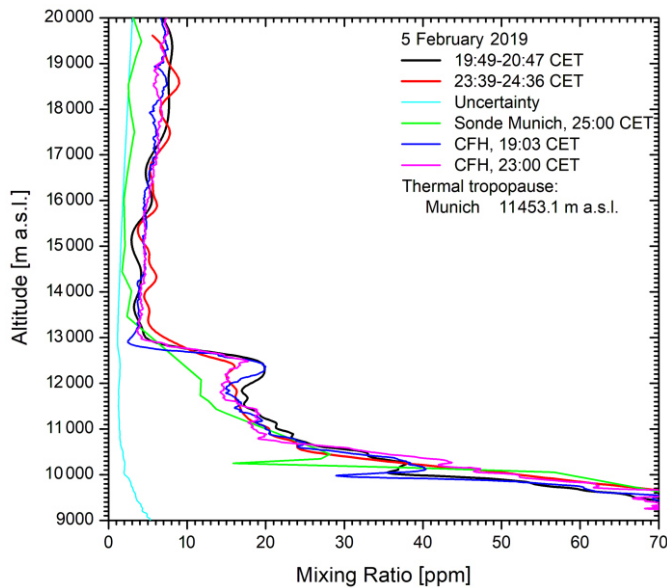


Abb. 1: Der Vergleich der Wasserdampfprofile in oberer Troposphäre und unterer Stratosphäre, gemessen mit dem Lidar am Schneefernerhaus und zeitgleich gestarteter CFH-Sonde zeigen eine auch im Detail gute Übereinstimmung bis in 20 km Höhe.

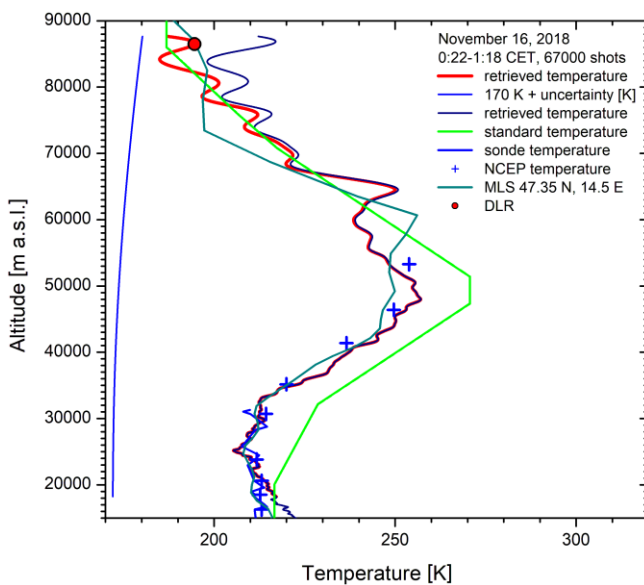


Abb. 2: Temperaturprofil bis 90 km Höhe gemessenen mit dem Lidar am Schneefernerhaus im Vergleich zum Profil der Radiosonde (unten), dem satellitengetragenen Microwave Limb Sounder (MLS), einem NCEP-Temperaturprofilen und Standard Modell. Der rote Kreis markiert den Kalibrierpunkt mit dem Messwert des GRIPS Spektrometers (DLR) am Schneefernerhaus. Nimmt man einen falschen Startwert an, so korrigiert sich das Auswerteverfahren innerhalb von etwa 15 km (blaue Kurve).

LANGZEITMESSUNGEN DER PARTIKELKONZENTRATION AM STANDORT SCHNEEFERNERHAUS

HARALD FLENTJE¹, BJÖRN BRIEL¹, WERNER THOMAS¹

¹DEUTSCHER WETTERDIENST, METEOROLOGISCHES OBSERVATORIUM HOHENPEIßENBERG,

ALBIN-SCHWAIGER-WEG 10, 82383 HOHENPEIßENBERG

E-MAIL: HARALD.FLENTJE@DWD.DE

Zusammenfassung: Der DWD betreibt seit dem Jahr 2001 kontinuierlich Partikelmessungen am Standort Schneefernerhaus. Die Daten zeigen ein ausgeprägtes Maximum der Anzahlkonzentration jeweils im Frühjahr und Sommer, sowie eine Tendenz zu mit der Zeit abnehmenden Partikelzahlen. Da die Daten nicht bzgl. lokaler Emissionen bereinigt sind und demzufolge nicht den atmosphärischen Hintergrund widerspiegeln, kann trotz der mittlerweile 20 Jahre umfassenden Zeitserie kein signifikanter Trend festgestellt werden.

Abstract: Since 2001, DWD performs continuous measurements of the particle number concentration at the Schneefernerhaus. The time series reveals a distinct maximum during the spring and summer months, and a tendency towards lower absolute values of the number concentration. The measurements are not corrected for local emissions, thus the time series does not reflect the atmospheric background conditions. Therefore, there is no significant trend in the data, although the time series comprise already 20 years.

Seit Beginn der Messungen im Jahr 2001 sind verschiedene Messgeräte zur Bestimmung der Anzahlkonzentration am Schneefernerhaus zum Einsatz gekommen. Begonnen wurde mit einem wasserbasierten Partikelzähler vom Typ „CNC 440“, welcher bis Ende 2005 für die Routinemessungen verwendet

wurde. Hiermit konnten Aerosole ab 10 nm Größe erfasst werden. Zu Beginn des Jahres 2006 wurde der Wechsel auf einen butanolbasierten Zähler vom Typ „TSI 3025“ vollzogen, der mit Unterbrechungen (Abb. 1) bis Ende des Jahres 2013 im Einsatz war. Im Jahr 2011 war zwischenzeitlich ein weiterer butanolbasierter Zähler vom Typ „TSI 3762“ im Einsatz, welcher wiederum Partikel ab 10 nm Größe erfasste. Seit dem Jahr 2014 erfolgen die Messungen kontinuierlich mit einem „GRIMM 5420“, ebenfalls butanolbasiert, der Partikel ab etwa 5 nm Größe erfasst.

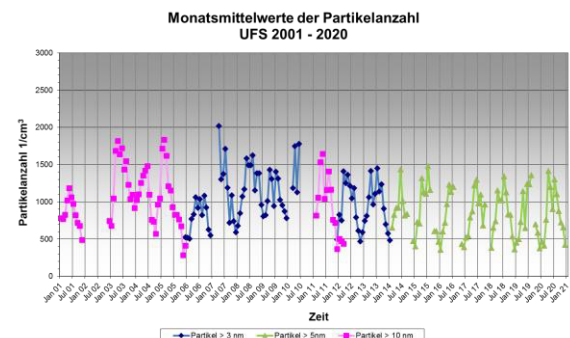


Abb.1: Partikelanzahlkonzentration von 2001 bis 2020 am Schneefernerhaus

Trotz der wechselnden Messgeräte ist die Zeitserie der Partikelzahlen weitgehend homogen und weist an den Übergangszeitpunkten keine offensichtlichen Diskontinuitäten auf. Die Anzahl der mit dem CNC440 und dem GRIMM-Gerät zusätzlich erfassten Partikel unter 10 nm ist offensichtlich gering und lässt auf entsprechend wenige, lokale Nukleationsereignisse schließen. Perioden mit anthropo-

gener Belastung sind vor allem bedingt durch Baumaßnahmen im Umfeld der Liegenschaft in den Jahren vor 2007 und von 2010 bis 2012 zu verzeichnen. Weitere anthropogene Einflüsse durch den Skibetrieb am nahen Schneeferner sind nicht auszuschließen. Vereinzelt hohe Anzahlkonzentrationen im Winterhalbjahr dürften vor allem auf die Abgase der Pistenfahrzeuge zurückgehen.

Die Daten weisen einen charakteristischen Jahresgang auf. Das Maximum der Partikelbelastung liegt typischerweise in den Frühjahrs- und Sommermonaten. Hier wirken sich Einflüsse der höherreichenden Grenzschicht und lokale Beiträge durch Erosion, aber auch vermehrte Ferntransporte (Saharastaubausbrüche) aus. Im Winterhalbjahr hingegen sorgen Schneebedeckung in der Umgebung und die Höhenlage des Schneefernerhauses außerhalb der atmosphärischen Grenzschicht für entsprechend geringere Partikelkonzentrationen.

Episoden unter Einfluss vulkanischer Emissionen gab es im Zeitraum zwischen den Jahren 2001 bis 2020 mehrfach: Die Eruptionen des Eyjafjallajökull/ Island im April 2010, des Bárðarbunga/ Island im September 2014, sowie zwei Ereignisse durch den Ätna/Sizilien im Dezember 2015 im Oktober 2019 sind in den Messdaten erkennbar. Die ersten beiden Ereignisse sind aufgrund der deutlich erhöhten Partikelanzahlkonzentration identifizierbar. Letztere Ereignisse zeigten sich vor allem in zusätzlich durchgeführten Schwefeldioxidmessungen des DWDs.

AUSWIRKUNGEN DES HOCHGEBIRGSKLIMAS AUF DIE LUNGENFUNKTION BEI MILDDEM SAISONALEM ASTHMA BRONCHIALE

PONTUS MERTSCH¹, JEREMIAS GÖTSCHKE¹, ROSEMARIE KIEFEL¹, ULRIKE SCHÜRMANN¹, NIKOLAUS KNEIDINGER¹, JÜRGEN BEHR¹, KATRIN MILGER¹

¹LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT, MEDIZINISCHE KLINIK UND POLIKLINIK V. ZIEMSENSTRASSE 1,
81377 MÜNCHEN

E-MAIL: KATRIN.MILGER@MED.UNI-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Studien zu Asthma im Hochgebirge zeigen, dass unter Therapie mit inhalativen Kortikosteroiden (ICS) ein geringes Risiko für eine Zunahme asthma-typischer Beschwerden besteht. Unklar sind allerdings die Auswirkungen des Hochgebirgsklimas auf leichte, saisonale Asthmatikern mit einer ICS-Therapie bei Bedarf. Wir untersuchten die Auswirkungen verschiedener asthmaauslösender Reize im Flachland und auf dem Schneefernerhaus mit und ohne ICS Inhalation. Belastung in Kälte zur führt bei Asthmatikern zu einer Abnahme der FEV₁, was durch ICS-Inhalation verhindert wird.

Abstract: Studies on asthma at high altitude show that there is a low risk of an increase in asthma-typical symptoms on therapy with inhaled corticosteroids (ICS). However, the effects of the high mountain climate on mild seasonal asthmatics with on-demand ICS therapy are unclear. We investigated the effects of different asthma-specific triggers at lowland conditions and on the Schneefernerhaus with and without ICS inhalation. Exercise in the cold lead to a decrease in FEV₁ in asthmatics, which is prevented by ICS inhalation.

Das Hochgebirgsklima stellt für das menschliche Bronchialsystem aufgrund verschiedener Auslöser (Kälte, Hyperventilation, niedrige

Luftfeuchtigkeit), insbesondere unter Belastung, eine besondere Herausforderung dar. Bisherige Studien bei Asthmatikern im Hochgebirge konnten zeigen, dass Patienten mit gut kontrolliertem Asthma unter regelmäßiger ICS Anwendung ein geringes Risiko für eine Verschlechterung der Erkrankung haben. Unklar ist allerdings wie sich das Hochgebirgsklima auf allergische Asthmatiker mit milder Ausprägung der Erkrankung und nur bedarfsweisem Einsatz von ICS auswirkt und ob ggf. eine präventive ICS-Therapie sinnvoll ist. Diese Fragestellung ist in Studien bisher wenig untersucht.

Zur Klärung diese Fragestellung erfolgte die Untersuchung von insgesamt 21 Probanden (10 Asthmatiker, 11 Kontrollen) im Flachland (521 m ü. NN.) und auf dem Schneefernerhaus (2650 ü. NN.). Im Fokus der Untersuchung standen hierbei die Auswirkungen der Asthmatrigger Kälte, Hyperventilation, erniedrigte Luftfeuchtigkeit und Belastung, sowie die Untersuchung der bronchialen Hyperreagibilität in der Höhe. Die Probanden mit Asthma wurden nach vor und nach Einleitung ihrer regulären saisonalen ICS-Inhalation untersucht.

Bei Asthmatikern zeigte sich ein Abfall der FEV₁ unter Belastung in der Kälte, der für Nicht-Asthmatiker nicht gezeigt werden konnte. Der alleinige Aufenthalt in der Höhe zeigte hatte keinen Effekt auf die Lungen-

funktion. Der Abfall der FEV₁ wurde durch Inhalation eines ICS in der Zeit vor dem Höhengenaufenthalt verhindert. Bezüglich der Bronchialen Hyperreagibilität zeigte sich in beiden Gruppen eine Abnahme in der Höhe.

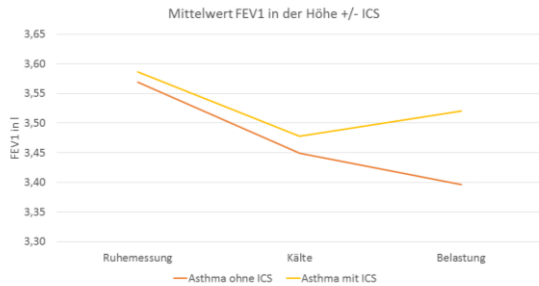


Abb. 1 Veränderung der FEV₁ (l) im Hochgebirge bei

Die Ergebnisse zeigten, dass für Patienten mit saisonalem, gut kontrolliertem Asthma keine präventive ICS Inhalation vor einem Höhengenaufenthalt nötig ist, auch wenn es zu einem geringen Abfall der FEV₁ kommt. Zudem liefert sie Hinweis auf den Nutzen einer ICS-Therapie für Patienten mit Zunahme ihrer Asthmasymptomatik im Hochgebirge bei vorherigen Höhengenaufhalten.

Literatur

Manuskript in Vorbereitung.

Danksagung

Stiftung Atemweg

ZUKUNFTSPROJEKTIONEN DER WINDGESCHWINDIGKEIT AN DER STATION ZUGSPITZE

JUCUNDUS JACOBEIT¹, SEVERIN KASPAR¹, CHRISTOPH BECK¹, ANDREAS PHILIPP¹

¹ *UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, ALTER POSTWEG 118, 86159 AUGSBURG*

E-MAIL: JUCUNDUS.JACOBEIT@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Künftige Änderungen der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit an der Station Zugspitze werden mit verschiedenen statistischen Downscaling-Modellen abgeschätzt. Während bei jährlicher Betrachtung kein langfristiger Trend identifiziert werden kann, ergibt die saisonale Differenzierung eine klare Unterscheidung in die beiden Jahreszeiten Winter und Frühjahr mit zunehmender mittlerer täglicher Windgeschwindigkeit sowie Sommer und Herbst mit abnehmenden Werten, jeweils für zwei Szenarien (RCP4.5, RCP8.5) und zwei Projektionszeiträume (2021-2050, 2071-2100).

Abstract: Future changes in mean daily wind speed at the high-alpine station Zugspitze are assessed by various statistical downscaling techniques. On an annual basis, no long-term trend can be identified, whereas the seasonal distinction leads to a clear contrast between winter/spring with increasing mean daily wind speed and summer/autumn with decreasing values, both for two scenarios (RCP4.5, RCP8.5) and two projection periods (2021-2050, 2071-2100).

Hintergrund

In den vorangegangenen Wissenschaftlichen Resultaten ist bereits über künftige jährliche bzw. saisonale Niederschlagsänderungen u. a. an der Zugspitze berichtet worden (Kaspar et al., 2017; Jacobeit et al., 2019). Da dies immer

auch im Kontext wasserhaushaltlicher Betrachtungen im Zuge des fortschreitenden Klimawandels steht, sind auch weitere Größen mit Einfluss auf die sich ändernde Wasserbilanz von grundsätzlichem Interesse. Dazu gehört auch die Windgeschwindigkeit mit ihrer dynamischen Beeinflussung der Verdunstung. Auch stellt die Intensität von Austauschprozessen generell eine relevante Größe im Klimawandel dar. Mithilfe der Windgeschwindigkeitsmessungen an der Station Zugspitze als Prädiktand lassen sich statistische Downscaling-Modelle erstellen, die bei hinreichender Performanz auch für Zukunftsprojektionen genutzt werden.

Methodik

Die den Abschätzungen zugrundeliegende Methodik ist ausführlich in Kaspar (2020) beschrieben, wesentliche Züge sind auch in den vorangegangenen Wissenschaftlichen Resultaten der UFS bereits dargelegt worden (Kaspar et al. 2017; Jacobeit et al., 2019). Zusammengefasst basieren die Untersuchungen auf verschiedenen statistischen Downscaling-Ansätzen: künstliche neuronale Netze (McCulloch et al., 1947), klassifikationsbasierte Verfahren (Philipp et al., 2016), eine Kombination aus beiden Techniken sowie eine Synthese aus allen diesen Ansätzen.

Kalibriert werden die Downscaling-Modelle mit großskaligen atmosphärischen Prädiktoren aus Reanalyse-Datensätzen (Compo et al., 2011) zuzüglich einer 15-fachen Kreuzvalidierung (Kaspar, 2000). Es werden

zwei Projektionszeiträume (2021-2050, 2071-2100) sowie zwei Szenarien zugrunde gelegt (RCP4.5, RCP8.5, vgl. van Vuuren et al., 2011). Zur Zukunftsabschätzung der Windgeschwindigkeit werden die großskaligen Prädiktorenwerte aus fünf verschiedenen globalen Klimamodellen des CMIP5-Ensembles verwendet (Taylor et al., 2012), im Fall des Hamburger Erdsystemmodells MPI-ESM-LR zusätzlich mit drei Realisationen. Damit ergeben sich unter Berücksichtigung der 15 alternativen Downscaling-Modellkalibrierungen insgesamt 105 Abschätzungen (7×15) für jeden betrachteten Einzelfall. Den Boxplots von Abbildung 2 liegt die Gesamtheit dieser Abschätzungen zugrunde, signifikant positive bzw. negative prozentuale Windgeschwindigkeitsänderungen im Vergleich zur historischen Referenzperiode 1971-2000 (Test nach Mann und Whitney (1947), Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) werden eigens in grünen bzw. roten Zahlen spezifiziert.

Zukunftsprojektionen der Windgeschwindigkeit

Blickt man zunächst auf die jährlich gemittelten Windgeschwindigkeiten (Abb. 1), so ist für die Zugspitze kein langfristiger Trend bis Ende des 21. Jahrhunderts zu erkennen, selbst im stärkeren RCP8.5 Szenario zeigen sich keine deutlichen Signale. Erst bei saisonal differenzierter Betrachtung treten systematische Änderungen in Erscheinung (Abb. 2): so ergeben sich im Winter und im Frühjahr mit nur einer einzigen Ausnahme über alle verschiedenen Downscaling-Ansätze hinweg sowie für beide Szenarien und beide Projektionszeiträume signifikante Zunahmen (bei 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit) in den mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten, während im Sommer und Herbst bei vereinzelt insignifikanten Fällen und einer gegenläufigen Ausnahme eine Abnahme der Windgeschwindigkeiten dominiert. Es existiert also eine

markante halbjährliche Gegensätzlichkeit, wobei jeweils die nachfolgende Übergangs-Jahreszeit noch mit der vorangehenden Solstitial-Jahreszeit korrespondiert. Im Frühjahr nehmen die mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten an der Zugspitze sogar stärker zu als im Winter. Bei Kaspar (2020) werden zusätzlich Indizes erhöhter Windstärken herangezogen: danach deuten alle signifikanten Änderungen auf eine Zunahme im jährlichen Maximum der mittleren täglichen Windgeschwindigkeit hin, und bei der Anzahl der Tage über 12 m/s lässt sich ebenfalls (mit Ausnahme Herbst) ein Anstieg konstatieren.

Resümee

Die klimawandelbedingte Zunahme der mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten im Winter sowie ihre Abnahme im Sommer stehen in Übereinstimmung mit der generellen großräumigen Zirkulationsentwicklung: so zeigen die meisten Klimamodelle im Zuge der künftigen globalen Erwärmung eine winterliche Verschiebung der Nordatlantischen Oszillation (NAO) zu ihrer positiven Phase, womit in Mitteleuropa tendenziell höhere Windgeschwindigkeiten einhergehen. Im Sommer dagegen macht sich im Verlauf des 21. Jahrhunderts wachsender antizyklonaler Einfluss bemerkbar (Riediger & Gratzki, 2014), der tendenziell mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten verbunden ist. Beides lässt sich also mit statistischen Downscaling-Techniken für die Station Zugspitze bestätigen. Bemerkenswert ist allerdings, dass sich in diesem Hochgebirgsraum die gegensätzlichen Änderungen auch noch in die jeweilige Folge-Jahreszeit fortsetzen. Dabei manifestiert sich mutmaßlich ein Fortwirken des antizyklonalen Sommerregimes bis in den Herbst hinein, während die frühjährliche Windstärke-Zunahme mit einer weiter gesteigerten Begünstigung orographisch bedingter Turbulenzen im Übergang vom Winter- zum Sommerregime zusammenhängen könnte.

Literatur

Compo, G.P. et al.: The Twentieth Century Reanalysis Project. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 1-28, 2011.

Jacobeit, J. Kaspar, S., und Philipp, A.: Zukunftsprojektionen saisonaler Niederschläge an den Hochgebirgsstationen Zugspitze und Sonnblick. UFS – Wissenschaftliche Resultate, 2017/2018, 34-38, 2019.

Kaspar, S., Philipp, A., und Jacobeit, J.: Statistisches Downscaling meteorologischer Variablen mit hydrologischer Relevanz an der Station Zugspitze und der Station Hoher Sonnblick. UFS – Wissenschaftliche Resultate, 2015/2016, 57-59, 2017.

Kaspar, S.: Statistical Downscaling of Variables with Hydrological Importance in the Alpine Region via Machine Learning Techniques. Dissertation Universität Augsburg, 258 pp., 2020.

Mann, H.B., und Whitney, R.: On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. The Annals of mathematical statistics, 50-60, 1947.
Europe. Meteorologische Zeitschrift, 23, 231-252, 2014.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., und Meehl, G.A.: An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bulletin of the American Meteorological Society, 93, 485-489, 2012.

McCulloch, W.S. und Pitts, W.: A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. The Bulletin of mathematical biophysics, 5, 115-133, 1943.

Philipp, A., Beck, C., Huth, R., und Jacobeit, J.: Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. International Journal of Climatology, 36, 2673-2691, 2016.

Riediger, U., und Gratzki, A.: Future weather types and their influence on mean and extreme climate indices for precipitation and temperature in Central

Van Vuuren et al.: The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change, 109, 5-31, 2011.

Danksagung

Die Dissertationsstudien von *Severin Kaspar* sind im Rahmen des Teilprojekts „Klimawandel und Wasserbilanz in Hochgebirgsregionen“ durchgeführt worden, das als Bestandteil des Verbundprojekts „Virtuelles Alpenobservatorium“ durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert worden ist.

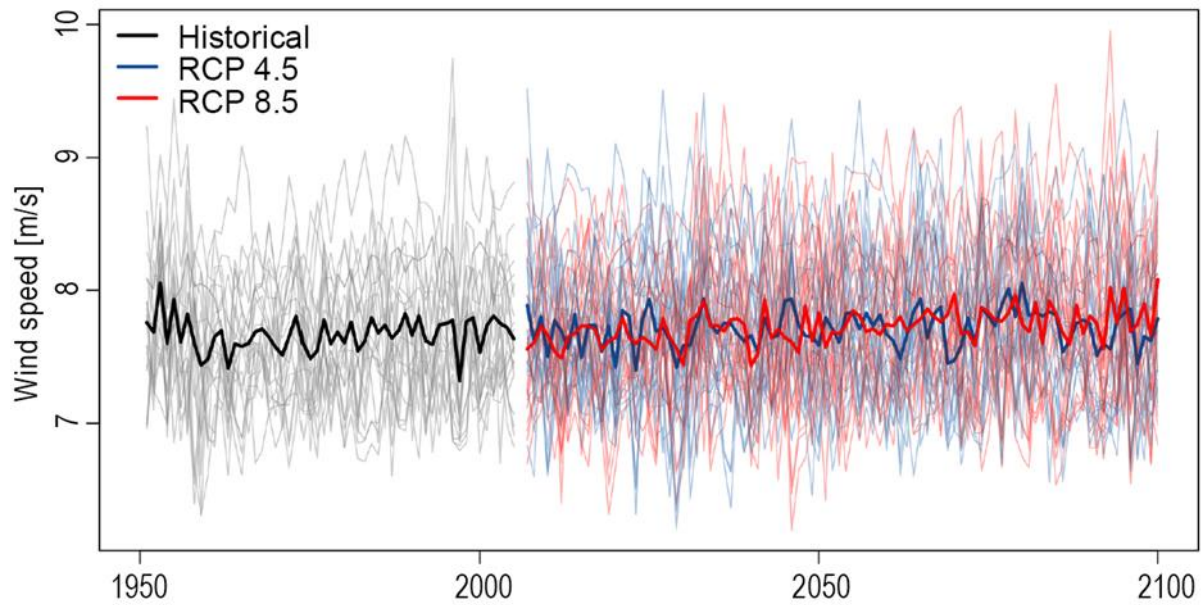


Abb. 1: Jährlich gemittelte tägliche Windgeschwindigkeitsmittel für die Station Zugspitze resultierend aus statistischem Downscaling großskaliger Prädiktoren aus globalen Erdsystemmodellen für den Zeitraum 1950-2100 (historische Simulation sowie projiziert gemäß der Szenarien RCP 4.5 bzw. RCP 8.5). Dicke Linien repräsentieren das übergreifende Mittel der entsprechenden Downscaling Ergebnisse. Dünne Linien zeigen das Mittel der Kreuzvalidierung für eine Kombination eines bestimmten Downscaling-Modells und eines bestimmten Erdsystemmodells (nach Kaspar 2020).

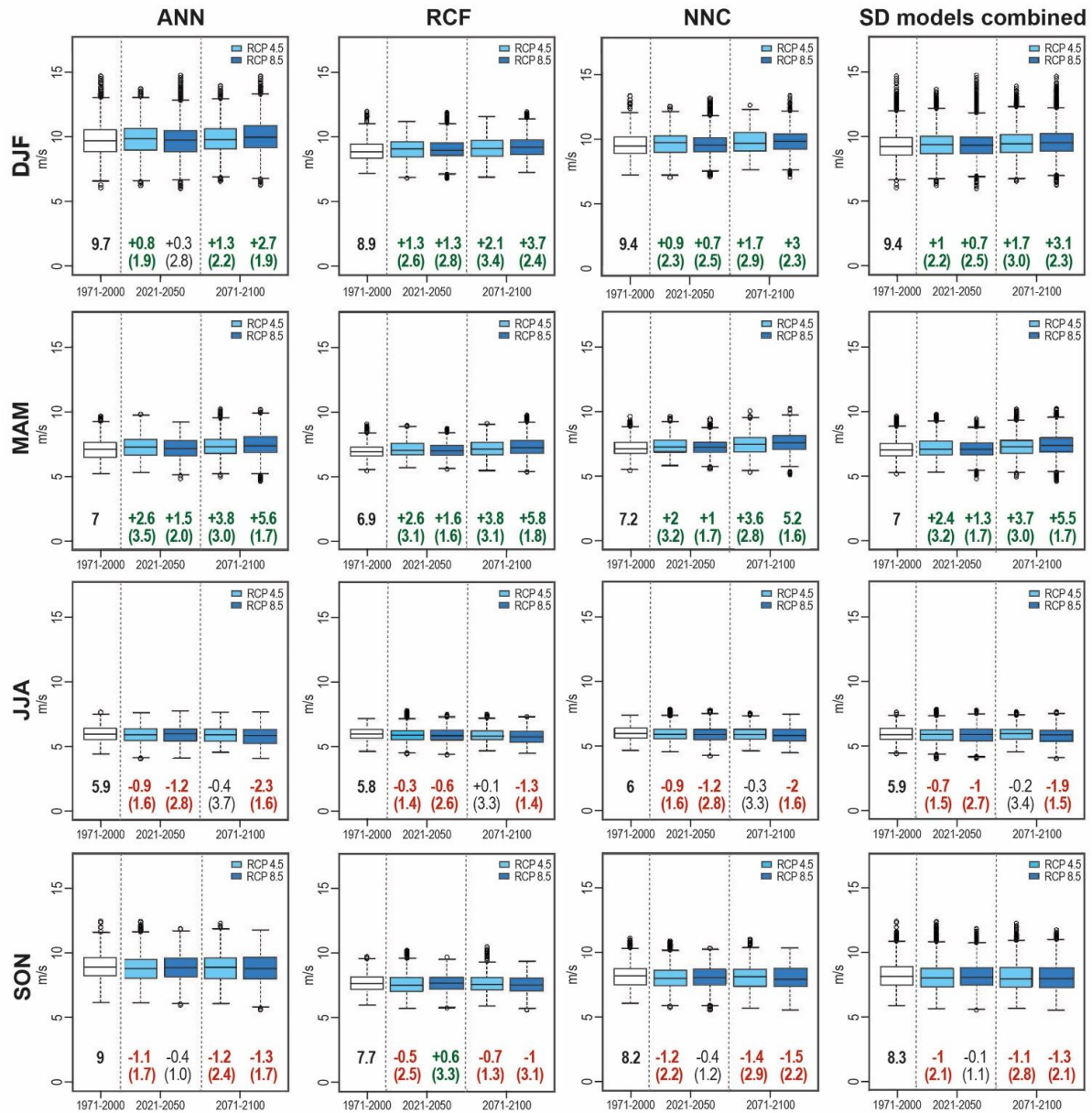


Abb. 2: Boxplots der modellierten saisonalen (DJF: Dez, Jan, Feb) mittleren täglichen Windgeschwindigkeiten (m/s) für die Station Zugspitze nach verschiedenen statistischen Downscaling-Ansätzen (ANN: Artificial neural networks; RCF: Reference class forecast, basierend auf Zirkulationstypklassifizierungen; NNC: Neural networks and classification; SD: Statistical downscaling models combined). Die Boxplots zeigen die Verteilungen aus jeweils 105 Modellläufen (siehe Text). Die fetten schwarzen Zahlen geben den jeweiligen Mittelwert für den historischen Referenzzeitraum 1971-2000 wieder. Die Zukunftsprojektionen werden für zwei Zeiträume (2021-2050, 2071-2100) und zwei Szenarien (RCP4.5, RCP8.5) gezeigt. Grüne/rote Zahlen geben die positiven/negativen Windgeschwindigkeitsänderungen wieder (in Prozent des historischen Mittelwerts), schwarze Zahlen insignifikante Änderungen (0.05 Niveau). Die Werte in Klammern bezeichnen die Standardabweichung aus den Ergebnissen der jeweils 105 Modellläufe (nach Kaspar 2020).

HYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM EINZUGSGEBIET DES PARTNACH-URSPRUNGS

STEFAN WEISHAUP¹, KARL-FRIEDRICH WETZEL¹

¹UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, ALTER POSTWEG 118, 86159 AUGSBURG

E-MAIL: WETZEL@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Die hydrologischen Messungen hatten in den vergangenen Jahren aufgrund der Schneemengen mit besonderen Schwierigkeiten zu kämpfen. Eine Verdriftung von Schnee durch Wind kann zu erheblichen Fehlern bei der Niederschlagserfassung führen und ist nur schwer zu korrigieren. Einen innovativen Ansatz bei der hydrologischen Bilanzierung bietet das Supraleitgravimeter auf der Zugspitze. In einem Verbundprojekt sollen die Möglichkeiten erforscht und eine operationelle Messung etabliert werden.

Abstract: Hydrological research in the Zugspitze area had to face some challenges due to huge amounts of snow during previous years. Wind driven snow transport induces significant errors of precipitation measurement. Correction of such errors is difficult. The superconducting gravimeter on the top of Mount Zugspitze has been used as a novel hydrological sensor system for the direct observation of the integral gravity effect of total water storage variations. In upcoming research projects the potential of this new approach for operational use will be investigated.

Herausforderungen hydrologischer Messungen im Hochgebirge

Der zweijährige Zeitraum vom Winter 2018/19 bis Ende 2019 zeigte die besonderen Herausforderungen von Messungen im Hochgebirge. Insbesondere der Spätwinter 2018/19 erbrachte noch im Mai große Schneemengen (Abb. 1), die zu einer erheblichen Lawinen-

gefahr führten. Auch im Reintal gingen zahlreiche große Lawinen nieder, die den Partnach-Ursprung vollständig bedeckten und auch die Pegelstation mehrere Meter unter sich begruben (Abb. 2).

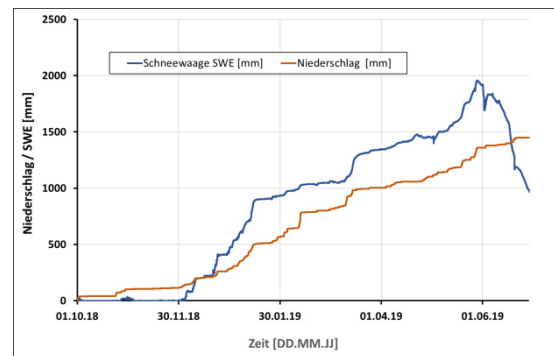


Abb.1: Schneeniederschläge im Spätwinter 2018/19 nach Daten der Schneewaage und der Niederschlagswaage des LWD in 2.417 m NHN.



Abb.2: Lawinenschnee an der Pegelstation Partnach-Ursprung am 27.5.2019.

Der Lawinenschnee verhinderte den Zugang zu den Messanlagen, die durch die extremen Verhältnisse beschädigt wurden. Trotz mehrfacher Versuche konnte die Pegelstation im Jahr 2019 nicht wieder in Betrieb genommen werden. Erst die Installation eines Ersatzpegels sicherte die weitere Datenerfassung für 2020. Aufgrund des engen Zusammen-

hanges zwischen den Abflussdaten mit der tiefer im Tal gelegenen Pegelstation Bockhütte lassen sich die Abflussverhältnisse des Jahres 2019 für den Pegel Partnach-Ursprung näherungsweise rekonstruieren.

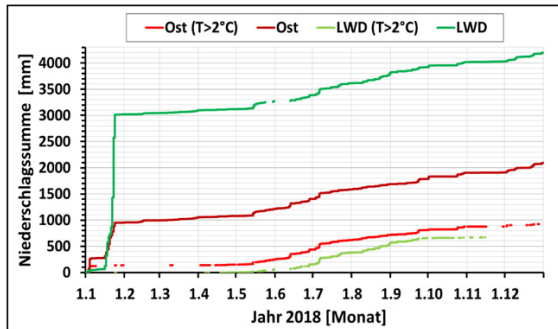


Abb.3: Schneeniederschläge und Gesamtniederschläge im Jahr 2018 nach Daten der Niederschlagswaagen des LWD in 2.417 m NHN und der Station Ost (2.048 m NHN).

Die Analyse und Plausibilitätskontrolle von Niederschlagsdaten der Messstationen auf dem Zugspitzplatt zeigt ein weiteres Problem auf, das bei der Quantifizierung des Wasserhaushalts von Hochgebirgsstandorten zu erheblichen Unsicherheiten führen kann. So zeigen sowohl die Niederschlagswaagen als auch die Schneewaage des LWD in bestimmten Zeiträumen erhebliche Schneeniederschläge an, die sich auf mehrere hundert Millimeter Schneewasseräquivalent in wenigen Tagen belaufen und zeitgleich erfolgen (Abb. 3). Erst eine intensive Analyse der Rahmenbedingungen zeigte, dass es sich jeweils um windbedingte Schneeverlagerungen von Neuschneedecken handelt. Der locker abgelagerte Schnee wird bei stürmischen Winden umgelagert und teilweise auch von den umgebenden Gipfeln in das Gebiet hineintransportiert. Hilfreich bei der Analyse dieser speziellen Situationen waren neben den erfassten Klimaparameter wie Wind und Globalstrahlung vor allem die Webcams, deren Aufnahmen die Schneeverlagerung bei stürmischem Strahlungswetter eindeutig zeigten.

Wie mit diesen Daten umzugehen ist, ist unklar. Bei den Daten handelt es sich um korrekt aufgezeichnete Niederschläge, deren

Herkunft jedoch unbekannt ist. Sie werden zu einem gewissen Teil aus dem Gebiet selbst stammen, bei dem vergleichsweise kleinen Zugspitzplatt können jedoch signifikante Massengewinne durch Eintrag von außen nicht ausgeschlossen werden. Ebenso ist unklar, inwieweit solche Ereignisse auch zu einem Austrag aus dem Gebiet führen. Am Beispiel der Daten wird deutlich, mit welchen Schwierigkeiten bei der Aufstellung von Massenbilanzen im Hochgebirgsräumen gerechnet werden muss. Daher ist die Entwicklung von Methoden wichtig, die den Wasserhaushalt über größere Flächen integrativ erfassen können.

Entwicklung eines gravimeterbasierten hydrologischen Messverfahrens

Im früheren Labor des Max Planck Instituts für Extraterrestrische Physics (MPE) auf dem Zugspitzgipfel wird seit Herbst 2018 vom Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) das „Zugspitze Geodynamic Observatory Germany“ (ZUGOG) betrieben. Mit dem dort installierten Supraleit-Gravimeter OSG 052 (SG) werden seit Dezember 2018 kontinuierliche und hochgenaue Datenreihen von Schwerfeldänderungen gemessen. Das SG gestattet es, zusammen mit Absolutgravimetern kurzfristige, saisonale, interannuelle und langfristige Schwerfeldänderungen zu separieren (Voigt et al., 2021). Nach Abzug aller bekannten Einflüsse auf den Datensatz verbleiben Residuen, die mit dem Auf- und Abbau des Schneedeckenspeichers und den Speicheränderungen im Karstsystem signifikant korrelieren (Abb. 4).

So fallen im Jahr 2019 das Maximum der Schneerücklage auf dem Zugspitzplatt und das Maximum der saisonalen Schwankungen der Schwereresiduen auf den gleichen Tag (29.5.2018).

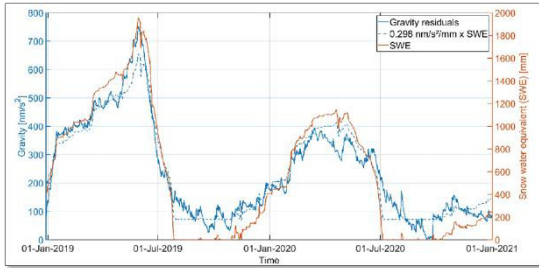


Abb.4: Verlauf der Schwereresiduen der SG-Messungen und der Verlauf des Schneewasseräquivalents nach Daten der Schneewaage des LWD auf dem Zuspitzplatt (Voigt et al. 2021).

Das Gebiet, dessen Massenveränderungen einen Einfluss auf die Messungen des SG hat, umfasst eine Fläche von annähernd 40 km² (Abb. 5). Der mit etwa 70 % größte Beitrag wird dabei vom Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs geleistet (Voigt et al. 2021). Damit hat die Messung mit dem SG das Potential, einen erheblichen Anteil des Wasserhaushalts im Einzugsgebiet des Partnach-Ursprungs flächenhaft zu erfassen.

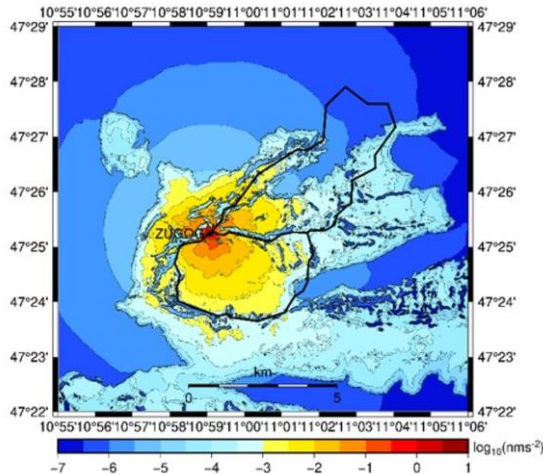


Abb.5: Räumliche Verteilung des Beitrags zu den Residuen der Schwerefeldmessung am ZUZOG am 29.5.2019 (Voigt et al., 2021).

Aktuell ist ein Forschungsvorhaben in Planung, in dem die beteiligten Partner (BOKU Wien, GFZ Potsdam und Uni Augsburg) die Methode genau analysieren und wenn möglich operationalisieren. Der Ansatz, hochgenaue Schwerefeldmessungen im Hochgebirge für Wasserhaushaltsuntersuchungen zu nutzen, ist neu und wurde bislang

noch nicht angewendet. Es besteht daher das Potential eine völlig neue flächenhafte geophysikalische Methode für die Hydrologie zu etablieren.

Literatur

Voigt, C., Schulz, K., Koch, F., Wetzel, K.-F., Timmen, L., Rehm, T., Pflug, H., Stolarczuk, N., Förste, C., und Flechtner, F.: Introduction of a Superconducting Gravimeter as Novel Hydrological Sensor for the Alpine Research Catchment Zugspitze, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2021-78>, 2021, in review.

Danksagung

Wir möchten dem Bayerischen Lawinenwarndienst (LWD), dem Deutschen Alpenverein (DAV), den Bayerischen Staatsforsten (BaySF) und der Bayerischen Zugspitzbahn Bergbahn AG (BZB) für die vielfältige Unterstützung danken. Ein herzlicher Dank geht an die Forschungspartner (GFZ Potsdam, BOKU Wien) für die produktive Forschungsk Kooperation.

FELDMESSUNGEN DER WOLKENTRÖPFCHEN-CLUSTERBILDUNG

JAN MOLÁČEK¹, GUUS BERTENS¹, GHOLAMHOSSEIN BAGHERI¹, HAITAO XU², EBERHARD BODENSCHATZ¹

¹MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR DYNAMIK UND SELBSTORGANISATION, AM FAßBERG 17, 37077 GÖTTINGEN

²TSINGHUA UNIVERSITY, 30 SHUANGQING RD, 100084 BEIJING

E-MAIL: EBERHARD.BODENSCHATZ@DS.MPG.DE

Zusammenfassung: Wir haben eine einzigartige Partikelverfolgungseinrichtung an der Wetterstation aufgebaut, die sich mit der mittleren Windgeschwindigkeit bewegen kann und neben der Messung der Position und Geschwindigkeit jedes Tröpfchens auch dessen Größe misst. Mit diesem Aufbau können wir die Eigenschaften der räumlichen Verteilung der Wolkentröpfchen und ihre relativen Geschwindigkeiten untersuchen, was eine Vorhersage der Geschwindigkeit ermöglicht, mit der sie zu Regentropfen wachsen.

Abstract: The initiation of rain is a process arising via droplet collisions on small scales, but dependent on much larger scales, making it very difficult to simulate or study in a lab. We have built a unique particle tracking setup currently situated on the top platform of the UFS, which is capable of moving with the mean wind speed and besides measuring each droplet's position and velocity, also measuring their size. This setup allows us to study the characteristics of cloud droplet spatial distribution and their relative velocities, which allow one to predict the rate at which they grow into raindrops.

Regen beginnt, wenn Wolkentröpfchen so groß werden, dass sie schneller fallen, als die Geschwindigkeit des Aufwinds innerhalb der Wolke. Es ist unmöglich, dass Wolkentröpfchen innerhalb der typischen Zeiträume allein durch Kondensation auf diese Größe anwachsen - sie müssen auch mit anderen Tröpfchen zusammenstoßen und durch Koagulation

wachsen. Kollisionen zwischen ähnlich großen, kleinen Tröpfchen sind jedoch selten, so dass die so genannte "Größenlücke" entsteht, in der die Tröpfchen zu groß sind, um durch Kondensation schnell zu wachsen, und gleichzeitig aufgrund ihrer fast einheitlichen Größe wegen einer unterschiedlichen Absetzgeschwindigkeit nicht kollidieren können. Das Tröpfchenwachstum über diese Größenlücke bestimmt zu einem großen Teil die Gesamtzeit, die für das Einsetzen von Regen benötigt wird.

Das Tröpfchenwachstum wird durch zwei miteinander verbundene Phänomene beschleunigt, die für träge Partikel in einer turbulenten Strömung typisch sind. Erstens neigen die Tröpfchen dazu, sich in Bereichen mit hoher Dehnung zu sammeln, was ihre Kollisionen aufgrund ihrer höheren lokalen Dichte wahrscheinlicher macht. Zweitens erzeugt eine turbulente Strömung gelegentlich heftige Ereignisse mit hohen Geschwindigkeitsgradienten, die dazu neigen, Tröpfchen aus verschiedenen Teilen der Strömung gegeneinander zu schleudern. Dieser so genannte "Schleudereffekt" kann die Wahrscheinlichkeit von Kollisionen zwischen Tropfen nahezu gleicher Größe stark erhöhen.

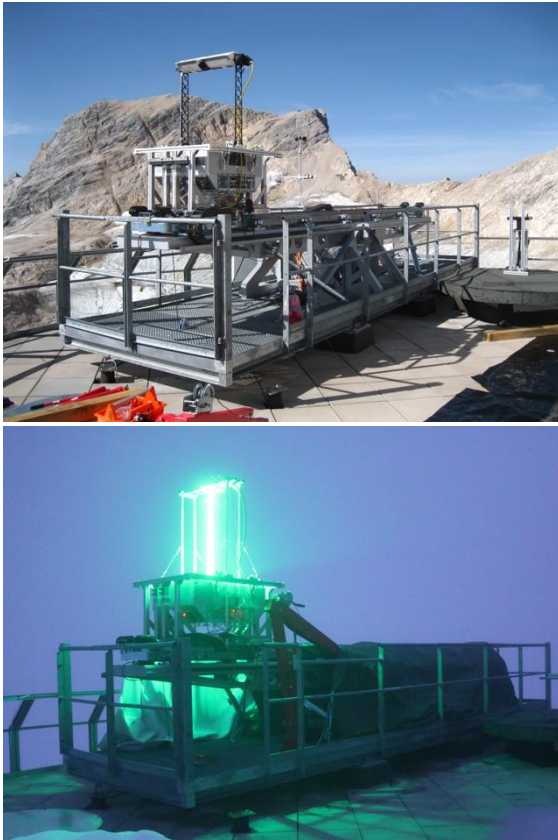


Abb.1: "Wippe" beim Test (oben) und im Betrieb (unten). Das Messvolumen liegt etwa zwei Drittel des Weges entlang des Laserstrahls nach oben.

Das Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation untersucht sowohl die räumliche Ansammlung von Wolkentröpfchen als auch ihre relativen Geschwindigkeitsverteilungen mit Hilfe eines einzigartigen Partikelverfolgungsaufbaus, der sich derzeit auf der obersten Plattform des Schneefernerhauses befindet (Abb.1). Der Aufbau, der wegen seiner Fähigkeit, verschiedene vertikale Komponenten des mittleren Windes durch Kippen zu berücksichtigen, "Wippe" genannt wird, ermöglicht die Verfolgung von Wolkentröpfchen über relativ lange Intervalle, indem ein Kasten mit drei Hochgeschwindigkeitskameras entlang eines Schienenpaares mit Geschwindigkeiten von bis zu 7,5 m/s bewegt wird. Aus den Bildern der Wolkentröpfchen auf den drei Kamerasensoren kann die dreidimensionale Position jedes Tröpfchens mit einer Genauigkeit von bis zu $1\mu\text{m}$ re-

konstruiert werden, und indem man diese Positionen über die Zeit verfolgt, kann man die Tröpfchengeschwindigkeiten und sogar Beschleunigungen rekonstruieren.

Ein weiteres einzigartiges Merkmal unseres Aufbaus ist, dass wir auch die Größe jedes verfolgten Tröpfchens aus der Helligkeit seines Bildes auf jedem Kamerasensor ableiten können. Obwohl wir diese Methode noch perfektionieren, ist die bisher erreichte Genauigkeit bereits gut genug (Abb. 2), um unsere Feldmessungen mit bestehenden Laborergebnissen zu vergleichen.

Da diese bisherigen Versuche zwangsläufig mit niedrigeren Reynoldszahlen und ohne Berücksichtigung einiger potentiell wichtiger physikalischer Effekte durchgeführt wurden, geben unsere Ergebnisse auch einen Hinweis auf die Übertragbarkeit dieser kontrollierten Experimente auf die Bedingungen in realen Wolken.

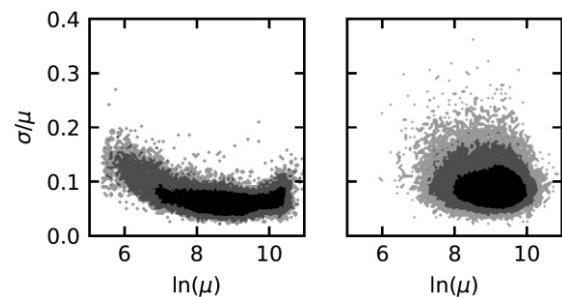


Abb.2: Geschätzte relative Fehler (vertikale Skala) der aus den Tröpfchenbildintensitäten abgeleiteten Tröpfchengrößen, als Funktionen ihrer Bildintensität μ . Gezeigt werden Streudiagramme für ein Experiment mit niedriger (links) und hoher Tröpfchenanzahlkonzentration (rechts).

Um die Tröpfchenbilder auf den Kamerasensoren präzise zu lokalisieren und zeitlich zu verfolgen, haben wir einen ausgeklügelten Partikelverfolgungsalgorithmus namens L³PT (Low-light lagrangian particle tracking) entwickelt. Er basiert auf dem Shake-the-box-Algorithmus (Schanz et al., 2016), wurde aber stark modifiziert und erweitert, um den schwierigen Bedingungen bei den Feldmessungen gerecht zu werden.

Anders als bei den Labormessungen haben wir keine Kontrolle über die Größe der Tröpfchen, und die Größenverteilung ist oft alles andere als monodispers, was die Erkennung der kleineren Tröpfchen erschwert. Außerdem verhalten sich die größeren Tröpfchen oft optisch anders als die kleineren, da ihre Bilder durch Interferenzeffekte stark verzerrt werden. Vor allem aber erfordern die großen fluktuierenden Geschwindigkeiten, die für die Wolkenturbulenz typisch sind, ein großes Messvolumen und damit eine starke Lichtquelle, um es zu beleuchten. Wir verwenden das Licht eines 300-Watt-Grünlasers, aber selbst das reicht nicht aus und zwingt uns, mit großen Kameraaperturen und damit geringer Schärfentiefe zu arbeiten (Abb.3). Trotz dieser ungünstigen Bedingungen funktioniert der Algorithmus unter den für uns interessantesten Bedingungen gut, da die oben genannten Probleme teilweise durch einen höheren Rechenaufwand gelöst werden können.

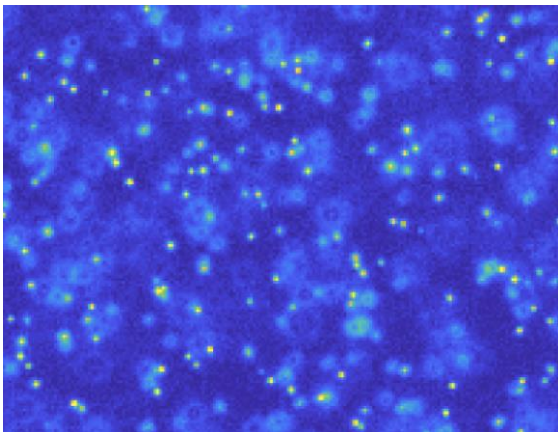


Abb.3: Detailaufnahme eines typischen Bildes der Wolkentröpfchen durch unsere Hochgeschwindigkeitskameras (Farbe hinzugefügt).

Besonderes Augenmerk wurde auf die Identifizierung von nahe beieinander liegenden Tröpfchenpaaren gelegt, da deren Erkennung für die Untersuchung der Tröpfchenhäufung von entscheidender Bedeutung ist. Unser Ziel ist es, zuverlässige Ergebnisse bis zu den kleinstmöglichen Abständen zu erhalten, die mit den optischen Methoden möglich sind. Gleichzeitig müssen wir einen ausreichenden Abstand zum Messvolumen einhalten, damit wir die Tröpfchendynamik dort nicht beein-

flussen. Die Unterscheidung eines echten Tropfenpaares von einem verzerrten Bild eines Einzeltropfens wird bei den kleinsten Trennungsabständen immer schwieriger und erfordert eine sorgfältige Analyse. Die Verwendung einer handelsüblichen Tracking-Software kann bei diesen Abständen zu einer Fehldetektion vieler nahe beieinander liegender Tröpfchenpaare führen und könnte einige der bombastischen Ergebnisse in der Literatur der letzten Jahre erklären.

Eine bequeme Möglichkeit, den Grad der Clusterbildung zu quantifizieren, ist die Radialverteilungsfunktion (RDF), die für ein gegebenes Teilchen und einen Abstand r die Wahrscheinlichkeit angibt, ein anderes Teilchen im Abstand r zu finden, geteilt durch diese Wahrscheinlichkeit ohne Clusterbildung.

Direkte numerische Simulationen (DNS) von trägen Partikeln deuten darauf hin, dass die RDF mit abnehmendem Abstand r gemäß einem Potenzgesetz ansteigt, dessen Exponent vom dimensionslosen Maß der Tröpfchenträgheit - der Stokes-Zahl St - abhängt. DNS können jedoch nicht die für Wolken typischen Werte der Reynolds-Zahl erreichen und berücksichtigen z. B. nicht die Auswirkungen der hydrodynamischen Wechselwirkungen zwischen den Tröpfchen oder die Auswirkungen der elektrischen Ladung, die bei geringen Abständen möglicherweise sehr große Auswirkungen haben könnten.

Jüngste Labormessungen (Yavuz et al., 2018) deuten auf die Möglichkeit hin, dass die RDF für Abstände unter 10 Tropfenradien aufgrund hydrodynamischer Wechselwirkungen drastisch ansteigt. Wir können die RDF bis zu Abständen von etwa 100 μm sicher bestimmen (Abb. 4) und haben Anzeichen für hydrodynamische Effekte unterhalb von 60 μm (Tropfen berühren sich fast) beobachtet.

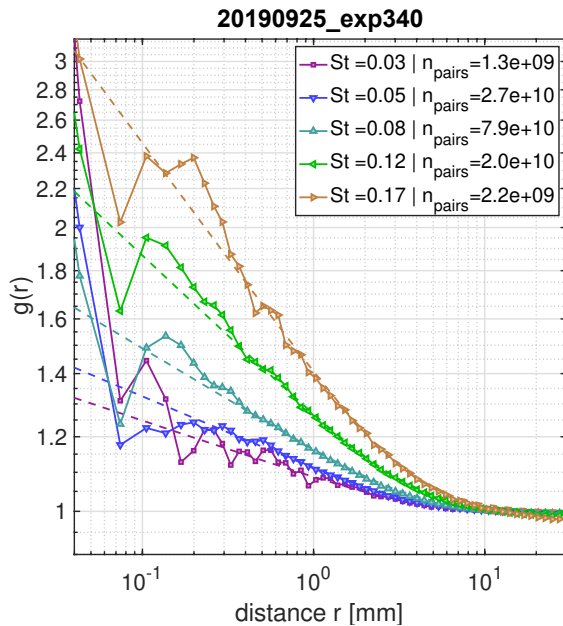


Abb.4: Die radiale Verteilungsfunktion $g(r)$ in Abhängigkeit von des Trennungsabstandes r für r zwischen $40\text{ }\mu\text{m}$ und 30mm , abgeleitet aus 100 Sekunden Video am 25.09.2019. Es werden Daten für fünf verschiedene Stokes-Zahlen gezeigt, die den zunehmenden Grad der Clusterbildung mit zunehmender Tröpfchengröße demonstrieren.

Der Grad der Clusterbildung kann durch den Exponenten in der Potenzgesetz-Anpassung an die RDF erfasst werden, der als Clustering-Exponent c_1 bezeichnet wird. Dank unserer Fähigkeit, die Tröpfchengrößen zu messen, konnten wir bestimmen, wie der Exponent c_1 von der Tröpfchen-Stokes-Zahl St abhängt (Abb. 5).

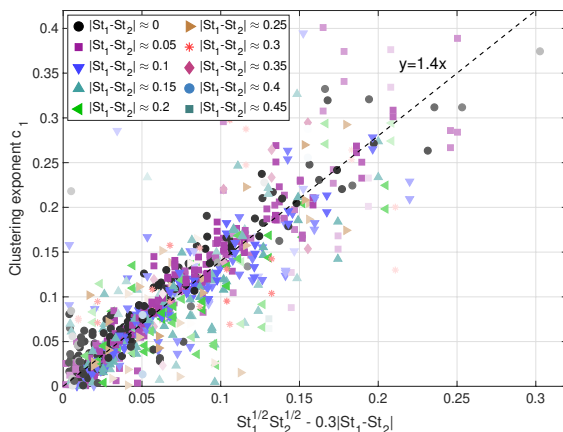


Abb.5: Clustering-Exponent c_1 als Funktion der Wolken-tröpfchen-Stokes-Zahl St für einen einzelnen Versuchstag.

Unsere bisherigen Ergebnisse stellen eine wertvolle Überprüfung der vorhandenen Literatur unter realen Bedingungen dar und zeigen signifikante Unterschiede zwischen Labor- und Feldmessungen, die noch weiter untersucht werden müssen.

Literatur

Yavuz, M.A., Kunnen, R.P.J., van Heijst, G.J.F., und Clercx, H.J.H.: Extreme Small-Scale Clustering of Droplets in Turbulence Driven by Hydrodynamic Interactions."Physical Review Letters 120, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.244504> , 2018.

Saw, E.W., Salazar, J.P.L.C., Collins, L.R., und Shaw, R.A.: Spatial Clustering of Polydisperse Inertial Particles in Turbulence: I. Comparing Simulation with Theory. New Journal of Physics 14, no. 10, 105030. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/10/105030>, 2012

Risius, S., Xu, H., Di Lorenzo, F. Xi, H., Siebert, H., Shaw, R. A., und Bodenschatz, E.: "Schneefernerhaus as a Mountain Research Station for Clouds and Turbulence." Atmospheric Measurement Techniques 8, no. 8 (August 13, 2015): 3209–18. <https://doi.org/10.5194/amt-8-3209-2015>.

Schanz, D., Gesemann, S., und Schröder, A : Shake-The-Box: Lagrangian Particle Tracking at High Particle Image Densities. Experiments in Fluids 57, 2016 <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2157-1>

Danksagung

Wir danken besonders dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (Bay StMUV) für die Förderung des Projektes VAO-II-TPIII/02 (Einfluss von Turbulenz auf Mischwolken im Alpenraum).

Wir danken auch der Europäischen Union für die Förderung des Marie -Skłodowska-Curie ac-tions Innovative Training Network COM-LETE (Cloud-MicroPhysics-Turbulence-Telemetry).

Besonderer Dank gilt der Betriebsmannschaft der UFS Schneefernerhaus.

BEOBACHTUNG VON INSEKTEN MIT DEM WOLKENRADAR AM SCHNEEFERNERHAUS

MARTIN HAGEN¹, TOBIAS ZINNER², FLORIAN BALDES²¹DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, INSTITUT FÜR PHYSIK DER ATMOSPÄRE

MÜNCHENER STR. 20, 82234 WEßLING

²LUDWIG-MAXIMILIANS UNIVERSITÄT, METEOROLOGISCHES INSTITUT

THERESIENSTR. 37, 80333 MÜNCHEN

E-MAIL: MARTIN.HAGEN@DLR.DE

Zusammenfassung: Das Wolkenradar auf dem Schneefernerhaus ist empfindlich genug, um neben Wolken und Niederschlag auch einzelne Insekten erfassen zu können. Die Beobachtungen zeigen, dass in den Monaten April bis September tagsüber in Höhen bis etwa 1,5 km über dem Schneefernerhaus Insekten in wolken- und niederschlagsfreien Regionen beobachtet werden können.

Abstract: Besides clouds and precipitation the high sensitivity of the cloud radar at the Schneefernerhaus allows to observe even single insects. The measurements show that insects can be observed during daytime during the months April through September up to about 1.5 km above the station in cloud and precipitation free regions.

Radargeräte werden schon seit langem zur Erfassung, Erforschung und Verfolgung von Insekten verwendet (z. B. Riley, 1985, 1992). Wurden in der Entomologie früher im Wesentlichen spezielle Radars mit einer Wellenlänge von 3 cm verwendet, die detaillierte Untersuchungen zu der Art der Insekten oder deren Flugverhalten erlaubten, kommen inzwischen auch Radars mit kürzeren Wellenlängen (z. B. 8 mm) zum Einsatz (Riley, 1992; Wood et al., 2009).

Ein solches Radar, normalerweise als Wolkenradars verwendet, hat eine wesentlich höhere

Empfindlichkeit und erlaubt damit auch die Erfassung von kleinsten Insekten.

Wolkenradar Mira-36

Das Wolkenradar am Schneefernerhaus mit einer Wellenlänge von 8 mm (Ka-Band) blickt senkrecht nach oben und hat eine vertikale Auflösung von ca. 29 m und einen Messbereich bis 15 km über dem Schneefernerhaus. Der Öffnungswinkel des Radarstrahls beträgt 0.6°. Die zeitliche Auflösung der Messungen beträgt 10 Sekunden. Weitere technische Details finden sich bei Görsdorf et al. (2015) oder speziell für das Radar auf der UFS bei Hagen et al. (2015).

Detektion von Insekten

Bei dem Wolkenradar Mira-36 wird, basierend auf dem gemessenen Leistungsspektrum der Dopplergeschwindigkeit (Dopplerspektrum),

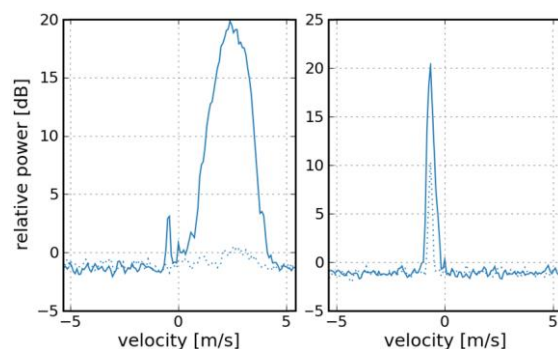


Abb.1: Dopplerspektren von Wolken (links) und Insekten (rechts). Durchgezogene Linie: ko-polare Leistung; gestrichelt: kreuz-polare Leistung. Der absolute Wert der Dopplergeschwindigkeit ist von der Vertikalbewegung der Luft abhängig.

eine Klassifikation der beobachteten Streuer in Hydrometeore (Wolkentröpfchen, Regentropfen, Eiskristalle) und atmosphärisches Plankton unternommen (Bauer-Pfundstein & Görsdorf, 2007). Atmosphärisches Plankton ist in der Regel Insekten, ein wesentliches Indiz ist die starke Depolarisation (Verhältnis kreuz- zu ko-polarem Signal) der zurückgestreuten Welle. In Abbildung 1 sind Beispiele für Dopplerspektren für Insekten und Wolken dargestellt. Die Klassifikation ist für die exponierte und hoch gelegene Station Schneefernerhaus nicht optimiert und somit ist eine weitere Bearbeitung der Daten notwendig. Unter der Annahme, dass Insekten Gebiete mit Wolken und Niederschlag meiden, werden z. B. alle Radarechos die als Insekten klassifiziert wurden, aber gleichzeitig Wolken oder Niederschlag aufweisen, nicht weiter bearbeitet.

Abschätzung der Insektenmasse

In einem nächsten Schritt wird aus der Reflektivität z die Insektenmasse m abgeschätzt. Laut Riley (1985, 1992) kann ein Insekt als Wassertropfen der gleichen Masse repräsentiert werden. Ein Insekt mit einem Durchmesser von 1 mm hat demnach eine Masse von 0,5 mg und einer Reflektivität von $1 \text{ mm}^6 \text{ m}^{-3}$ oder 0 dBz, wobei die Reflektivität z proportional zum Quadrat der Insektenmasse m ist:

$$z = 4 m^2 \quad (1)$$

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass sich immer nur ein Insekt in dem Messvolumen, ein Kegelstumpf mit der Höhe von ca. 29 m und dem Durchmesser entsprechend dem Öffnungswinkel von 0.6° bei der jeweiligen Entfernung, aufhält (Wood et al., 2009). Abbildung 2 zeigt die Klassifikation und die Insektenmasse für den 2. und 3. Juli 2018. Panel a) zeigt die gemessene Reflektivität aller Streuer, b) die Reflektivität von Wolken-, Niederschlags- und Eispartikel und c) die aus der Klassifikation abgeleitete Reflektivität des atmosphärischen Planktons bzw. der

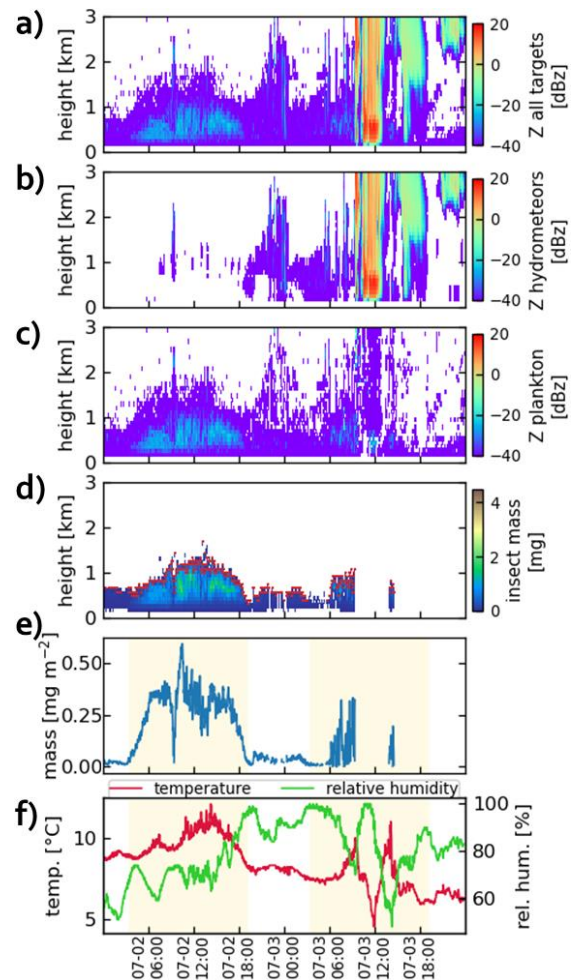


Abb.2: Messungen am 2. und 3.7.2018. Panel a) Reflektivität aller Streuer; b) Reflektivität der Wolken- und Niederschlagspartikel; c) Reflektivität der Insekten; d) Insektenmasse im Messvolumen; e) vertikales Integral über die Insektenmasse; f) Temperatur und relative Feuchte an der UFS. Weitere Details im Text.

Insekten. Für die weitere Verarbeitung wurden Mittelwerte für 5 Minuten und einem Höhenintervall von 87 m gebildet. In Panel d) ist die aus c) mit Gleichung (1) berechnete Insektenmasse im Messvolumen unter der Annahme, dass sich nur ein Insekt pro Messvolumen aufhält (Wood et al., 2009), dargestellt. Die roten Markierungen in d) geben die obere Höhe der Insektenschicht an. Bis zu dieser Höhe sind 99 % der kumulativen Masse erreicht. Die untere Höhe ist durch die minimale Messentfernung von 129 m über dem Radar gegeben. Das vertikale Integral über die Insektenmasse auf einer Säule von 1 m^2 ist in Panel e) gezeigt. In Panel f) sind die

Messungen der Temperatur und Feuchte an der UFS dargestellt.

Am 2.7.2018 ist ein deutlicher Tagesgang bei dem Insektenvorkommen ersichtlich, am 3.7. wird der Tagesgang gegen Mittag durch einsetzenden Niederschlag und Bewölkung am Nachmittag unterbrochen. Auch fällt auf, dass auch im Niederschlag teilweise ein Insekten-signal klassifiziert wird. Dies wird jedoch unter der Annahme, dass Insekten Wolken und Niederschlag meiden, herausgefiltert. Zudem wird durch die starke Depolarisation von schmelzenden Eisteilchen eine fehlerhafte Klassifikation erfolgen.

Verteilung der Insekten

Für die Monate April bis September der Jahre 2015 bis 2020 (ohne 2019) wurden die Insektenbeobachtungen mit dem Wolkenradar ausgewertet. In den anderen Monaten wurden nur noch an einzelnen Tagen einzelne Echos von Insekten beobachtet. Im Jahr 2019 war das Radar im Sommer aus technischen Gründen längere Zeit nicht in Betrieb.

Abbildung 3 zeigt den jahreszeitlichen Verlauf der vertikalen integrierten Insektenmasse und

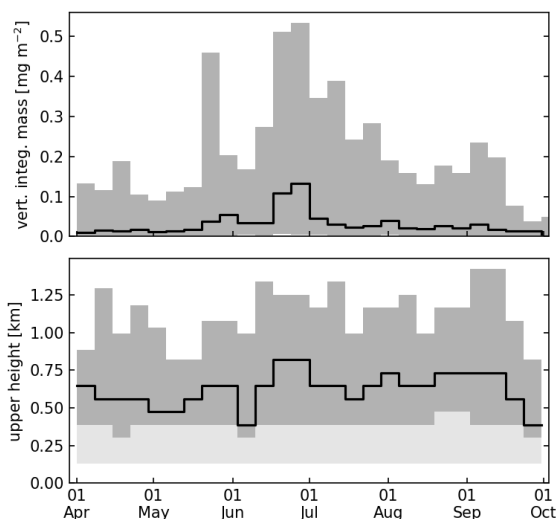


Abb. 3: Jahreszeitlicher Verlauf der vertikal integrierten Insektenmasse (oben) und der Oberkante des Insektenvorkommens (unten). Die grauen Bereiche stellen die 5 bzw. 95 Perzentile eines 7-tägigen Intervalls dar, die schwarzen Linien den Median. Der hellgraue Bereich in dem unteren Panel stellt den Höhenbereich ab der untersten Messhöhe von 129 m dar.

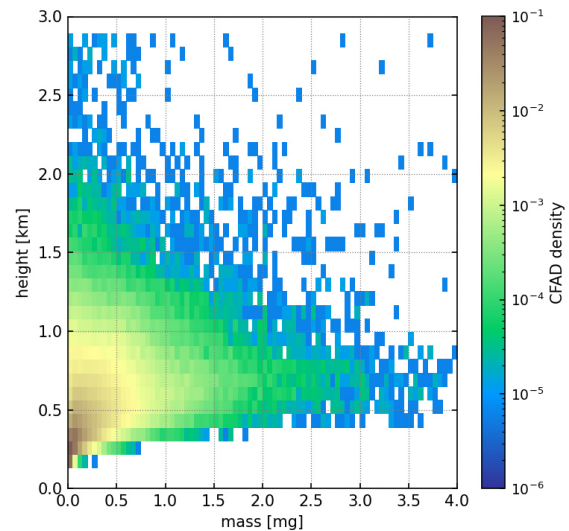


Abb. 4: Häufigkeitsverteilung der Insektenmasse über die Höhe (CFAD: contoured-frequency by altitude diagram).

den Höhenbereich in dem Insekten beobachtet wurden. Ein deutliches Maximum des Insektenvorkommens kann im Juni und Juli beobachtet werden. Der maximale Höhenbereich in dem Insekten vorkommen, beträgt etwa 1,5 km und schwankt gering im Jahresverlauf, ist aber in den Monaten Juni bis August tendenziell höher. Die obere Grenze ergibt sich der Höhe der durchmischten konvektiven Grenzschicht über dem Schneefernerhaus und aus der Höhe der Wolkenunterkante sommerlicher konvektiver Bewölkung.

In Abbildung 4 ist die Häufigkeitsverteilung der Insektenmasse mit der Höhe als *contoured-frequency by altitude diagram* (CFAD) dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass im Wesentlichen kleine Insekten in den unteren Höhen auftreten. Die Abnahme mit der Höhe ab ca. 700 m ist der Höhe der durch Konvektion durchmischten Grenzschicht geschuldet. Die Zunahme in den untersten ca. 500 m ist Folge des mit der Entfernung zunehmenden leistungsgewichteten Messvolumens (ca. 20 m^3 in 140 m Entfernung und ca. 900 m^3 in 1000 m Entfernung). Mit zunehmendem Messvolumen steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich die eher selteneren größeren Insekten im Messvolumen aufhalten.

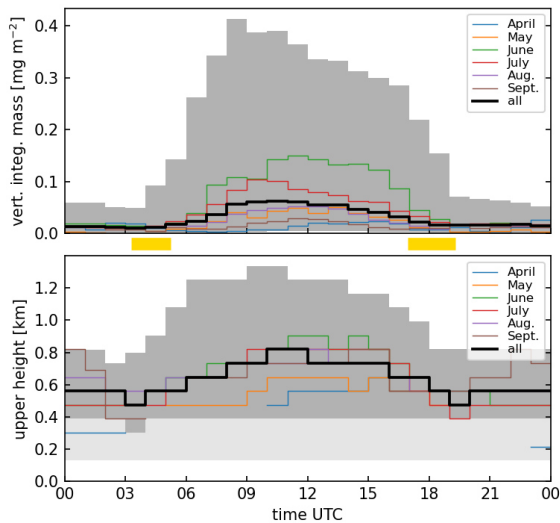


Abb. 5: Tagesgang der vertikal integrierten Insektenmasse (oben) und der Oberkante des Insektenvorkommens (unten). Die grauen Bereiche stellen die 5 bzw. 95 Perzentile eines stündlichen Intervalls dar, die schwarzen Linien den Median für alle Monate. Die farbigen Linien zeigen die Mediane für die einzelnen Monate. Der hellgraue Bereich im unteren Panel stellt den Höhenbereich ab der untersten Messhöhe von 129 m dar. Die gelben Balken markieren die Sonnenauf- bzw. Untergangszeiten im Zeitraum 1. April bis 30. September.

Der Tagesgang des Insektenvorkommens ist in Abbildung 5 dargestellt. Insekten treten im Wesentlichen tagsüber auf, nur ein geringes Signal wird in der Nacht beobachtet. Es kann allerdings nicht vollkommen ausgeschlossen werden, dass es sich hier teilweise um unzureichend entfernte Störschos handelt. Es wird ein Trend zu höheren Insektenmassen am Vormittag beobachtet, der Grund könnte einsetzende konvektive Bewölkung am Nachmittag sein, bei der die Wolkenunterkante auf dem Niveau des Schneefernerhaus oder knapp darüber ist.

Zusammenfassung

Das Wolkenradar auf dem Schneefernerhaus kann den Tages- und Jahresgang von Insekten in einer vertikalen Säule über der UFS erfassen. Insekten treten in den Monaten April bis September tagsüber bis zu ca. 1,5 km über der UFS auf. Im Bereich von Wolken oder in Niederschlag wurden in der Regel keine Insekten beobachtet. Mit einem empirischen Zusam-

menhang lässt sich die Masse der Insekten abschätzen. Die Insektenmasse ist in den Monaten Juni und Juli am höchsten.

Literatur

Bauer-Pfundstein, M. R., und Görsdorf, U.: Target separation and classification using cloud radar Doppler-spectra. 33rd Int. Conf. on Radar Meteorology, Cairns, Australia, Amer. Meteor. Soc., Available online at <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/123456.pdf>, 2007.

Görsdorf, U., Lehmann, V., Bauer-Pfundstein, M. Peters, G., Vavriv, D., Vinogradov, V., und Volkov, V.: A 35-GHz polarimetric Doppler radar for long-term observations of cloud parameters - description of system and data processing. J. Atmos. Oceanic Technol., 32, 675-690, doi:10.1175/JTECH-D-14-00066.1, 2015.

Hagen, M., Li, Q., und Schmidt, K.: Beobachtungen von Wolken mit dem Wolkenradar an der UFS. Wissenschaftliche Resultate 2013/2014, 52-55, 2015.

Riley, J. R.: Radar cross section of insects. Proceedings of the IEEE, 73, 228-232, doi:10.1109/PROC.1985.13135, 1985.

Riley, J. R.: A millimetric radar to study the flight of small insects. Electronics and Communication Engineering Journal, 4, 43-48, doi:10.1049/ecej:19920011, 1992.

Wood, C. R., O'Connor, E. J., Hurley, R. A., Reynolds, D. R., und Illingworth, A. J.: Cloud-radar observations of insects in the UK convective boundary layer. Met. Apps, 16: 491-500. doi:10.1002/met.146, 2009.

Danksagung

Korbinian Freier vom Bayerischen Landesamt für Umwelt gab den Anstoß zu den Arbeiten und stand mit fachkundigem Rat zur Seite. Die Betriebsmannschaft der UFS trägt wesentlich zum reibungslosen Betrieb des Wolkenradars bei. Besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang für die deutliche Verbesserung der Klimatisierung des Radars.

VERHALTEN VON PERSISTENTEN CHEMIKALIEN IM ÖKOSYSTEM DER ALPEN – UNTERSUCHUNG DER BIOAKKUMULATION ÜBER TROPHISCHE EBENEN

PATRICIA JANZ¹, GABRIELA RATZ²

¹ BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, REFERAT FÜR STOFF- UND CHEMIKALIENBEWERTUNG

² BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT, REFERAT FÜR ORGANISCHE ANALYTIK

E-MAIL: PATRICIA.JANZ@LFU.BAYERN.DE

Zusammenfassung: Seit 2005 werden durch PureAlps und Vorgängerprojekte die Luftkonzentrationen von persistenten Chemikalien und deren Einträge über den Niederschlag in die Alpen (repräsentative Standorte Umweltforschungsstation Schneefernerhaus und Sonnblick Observatorium) gemessen. Die entstandenen langjährigen Zeitreihen dokumentieren den Erfolg bzw. Defizite bei der Regulierung persistenter Chemikalien und ermöglichen es frühzeitig neue Stoffe („emerging pollutants“) in den Fokus zu nehmen. Zudem wurden exemplarisch Böden, Sedimente, Gewässer und Biota unterschiedlicher trophischer Ebenen im Alpenraum auf persistente Schadstoffe hin untersucht.

Abstract: Since 2005, PureAlps and predecessor projects have been measuring air concentrations of persistent chemicals and their inputs via precipitation into the Alps (representative sites Environmental Research Station Schneefernerhaus and Sonnblick Observatory). The resulting time series provide evidence of the efficiency of the regulation of persistent chemicals and enable an early focus on emerging pollutants. In addition, soils, sediments, waters, and biota of different trophic levels in the Alpine region were investigated for persistent pollutants.

An der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) nimmt das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) seit 2005 regelmäßig Luft- und Niederschlagsproben um den Gehalt von persistenten Umweltchemikalien zu bestimmen. Der Kooperationspartner in Österreich (Umweltbundesamt Österreich) beprobt Luft und Deposition am Sonnblick Observatorium (SBO) und untersucht ein analoges Stoffspektrum. Im Standard-Programm werden persistente organische Schadstoffe (POPs) überwacht, darunter Organochlorpestizide (OCP), polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F), polychlorierte Biphenyle (PCB) und halogenierte Flammschutzmittel (hFSM).

Persistente Schadstoffe sind problematisch, da sie kaum oder gar nicht abgebaut werden und sich so in Ökosystemen anreichern können. Dadurch können ökotoxikologischen Wirkschwellen überschritten werden, sodass negative Auswirkungen auf Ökosystemebene nicht mehr ausgeschlossen werden können. Durch die Anreicherung der Chemikalien über verschiedene Trophiestufen sind vor allem auch die Endglieder der Nahrungskette, die sogenannten Prädatoren belastet.

In einem Schwerpunktprogramm wurden Quecksilber und per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) an der Zugspitze/UFS, am Sonnblick Observatorium (Österreich), in Garmisch-Partenkirchen und in Augsburg im Niederschlag untersucht. Für diese Substanzen wurde der Niederschlag über ein Trichter-Flasche-System monatlich im Zeitraum von

Februar 2017 bis März 2018 für Quecksilber und von April 2018 bis April 2019 für PFAS gesammelt. Die Ergebnisse zur Depositionsrates von Quecksilber wurden bereits vorgestellt.

Für Dioxine/Furane, PCB, PFAS, hFSM und Quecksilber, die in der Deposition und in der Luft nachgewiesen werden, wurden die Einflüsse der Belastung der Umweltkompartimente auf die Nahrungsketten von aquatischen und terrestrischen Ökosystemen untersucht. Zu den untersuchten Umweltproben zählen Böden des alpinen Raumes um die Zugspitze, Sedimente des Eibsees, Gebirgsbäche (Partnach, Loisach, Hammersbach) und Seen (Eibsee, Seebensee). Die Bandbreite der untersuchten Biotaprobe deckt terrestrische und aquatische Ökosysteme ab, wobei die aquatischen noch einmal zwischen Fließ- und Stillgewässern unterschieden werden. Repräsentativ für das terrestrische Ökosystem wurden Proben von Honigbienen (*Apis mellifera*), Murmeltieren (*Marmota marmota*), Gämsen (*Rupicapra rupicapra*), Füchsen (*Vulpes vulpes*) und Steinadlereiern (*Aquila chrysaetos*) analysiert. Zur Bewertung des aquatischen Bereichs wurden u.a. Makrozoobenthos und Eier von Wasservögeln (Haubentaucher, *Podiceps cristatus*) untersucht.

Per- und Polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS): Die gemessenen PFAS-Depositionsrates an der UFS/Zugspitze zeigen, dass diese Substanzen über die Atmosphäre in die Alpen eingetragen werden. Betrachtet man die PFAS in Summe, unterscheiden sich die Depositionsrates der PFAS in den Alpen unterscheiden nicht signifikant von den Werten im Tiefland.

Unterschiede der PFAS Einträge werden erst deutlich bei Betrachtung der Einzelsubstanzen (Abb. 1). Von den gemessenen PFAS dominierte Perfluorbutansäure (PFBA) in der Gesamtd deposition und machte 46 % der PFAS-Einträge aus. Diese Befunde werden durch

andere Studien in Norddeutschland und Japan bestätigt (Dreyer et al. 2010, Taniyasu et al. 2013). Der Eintrag von Perfluoroktansulfonsäure (PFOS) an den alpinen Standorten Garmisch-Partenkirchen, UFS und SBO über die Gesamtd deposition ($0,22 / 0,49 / 0,26 \mu\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$) liegt über den Depositionsrates, die für Augsburg bestimmt wurden ($0,10$ und $0,08 \mu\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$). Da keine vergleichbaren Immissionsmessungen vorliegen, bleibt die Frage offen, ob dieser Unterschied durch die besonderen meteorologischen Gegebenheiten in den Alpen gegeben ist, oder ob es sich um unterschiedliche Quellen (Ferntransport vs. regionaler Eintrag) handelt.

PFAS konnten in nahezu allen Biotaprobe nachgewiesen werden und zeigen damit ihr ubiquitäres Vorkommen auch in abgelegenen alpinen Ökosystemen. In den Fischproben ($n=7$) aus drei alpinen Bächen und zwei alpinen Seen zeigt PFOS die höchsten Anteile an PFAS. Für PFOS besteht eine UQN für Fischfilet von $9,1 \mu\text{g/kg}$ Frischgewicht, die von den analysierten Proben nicht überschritten wird. Die höchsten PFOS-Gehalte weisen Fischlebern auf. Hier konnten PFOS Konzentrationen zwischen $2,3$ und $43 \mu\text{g/kg}$ Frischgewicht (Median $5,5 \mu\text{g/kg}$ FG) nachgewiesen werden. Zum Vergleich werden bei 10 % der im bayerischen Fischschadstoffmonitoring untersuchten Standorte die UQN-Vorgaben für PFOS überschritten (LfU 2020). Prädatoren aus dem terrestrischen und aquatischen Bereich weisen keine auffälligen PFAS-Gehalte auf. Gleichzeitig ist ein Trend zu erkennen, dass die Konzentrationen mit der trophischen Ebene steigen (Abb. 2)

Überwachung persistenter Schadstoffe: Langlebige Schadstoffe werden über weite Strecken transportiert und auch in den Alpenraum verfrachtet. Bereits regulierte Stoffe wie Dioxine zeigen dabei einen abnehmenden Trend. Für den Schutz der Ökosysteme in den Alpen sind internationale Regulierungen hin-

sichtlich problematischer Chemikalien von hoher Bedeutung. In den Alpen besteht die besondere Situation, dass persistente Schadstoffe über die hohen Niederschlagsraten vermehrt aus der Atmosphäre in aquatische und terrestrische Ökosysteme eingetragen werden. Dort können sich die Stoffe über die Nahrungsketten anreichern, sodass für Spitzenprädatoren ökotoxikologisch relevante Konzentrationen erreicht werden können. Die Überwachung persistenter Schadstoffe an der Zugspitze wird fortgeführt und soll u. a. als Frühwarnsystem für neue Chemikalien („emerging pollutants“) genutzt werden. Die Ergebnisse von PureAlps sind im Abschlussbericht (2021) veröffentlicht worden.

Literatur

Dreyer, A., Matthias, V., Weinberg, I., Ebinghaus, R.: Wet deposition of poly- and perfluorinated compounds in Northern Germany, *Environmental Pollution*, 158(5), pp. 1221–1227, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.01.030>, 2010.

LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt: Bayerisches Fischschadstoffmonitoring: Quecksilber und organische Verbindungen. Bayerisches Fischschadstoffmonitoring - Quecksilber und organische Verbindungen - Publikationsshop der Bayerischen Staatsregierung (bayern.de), 2020.

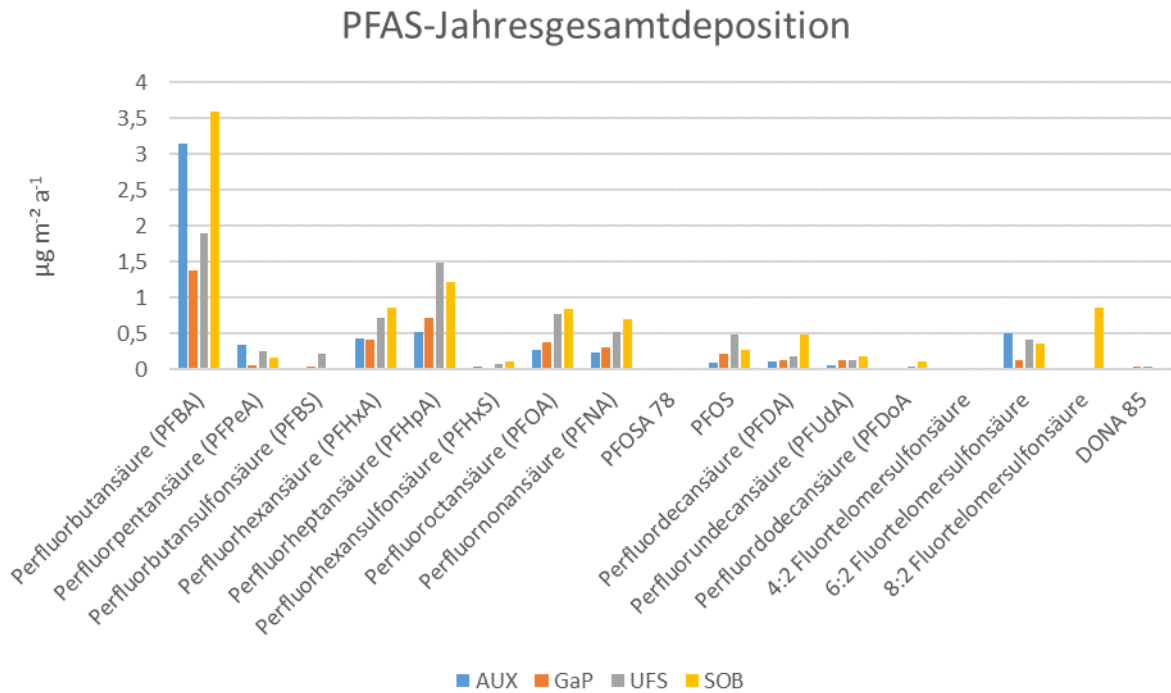


Abb. 1: Mittlere Depositionsraten der einzelnen gemessenen Per- und Polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) an der Umweltforschungsstation Zugspitze, Sonnblick Observatorium, Augsburg und Garmisch-Partenkirchen. Erfasst wurde die Gesamtdeposition über ein Jahr (Mai 2018-Mai 2019). AUX := Augsburg. GaP := Garmisch-Partenkirchen. UFS = Umweltforschungsstation Schneefernerhaus. SOB := Sonnblick Observatorium.

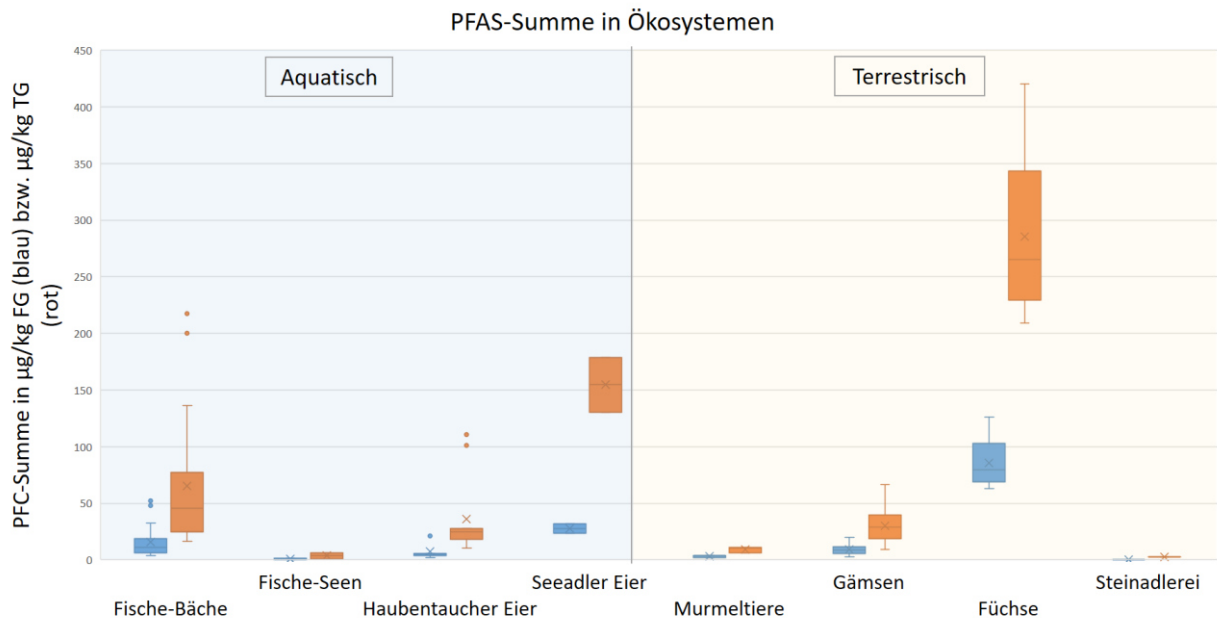


Abb. 2: Summe der gemessenen Per- und Polyfluorierten Verbindungen in unterschiedlichen Biotapuben. In blau dargestellt sind die Werte bezogen auf das Frischgewicht und in orange bezogen auf das Trockengewicht.

Taniyasu S., Yamashita N., Moon H.B., Kwok K.Y., Lam P.K., Horii Y., Petrick G., Kannan K.: Does wet precipitation represent local and regional atmospheric transportation by perfluorinated alkyl substances? *Environ Int.* 55:25-32.

10.1016/j.envint.2013.02.005, 2013.

Van den Berg, M., Birnbaum, L.S., Denison, M., DeVito, M., Farland, W., Feeley, M., Fiedler, H., Hakansson, H., Hanberg, A., Haws, L., Rose, M., Safe, S., Schrenk, D., Tohyama, C., Tritscher, A., Tuomisto, J., Tysklind, M., Walker, N., Peterson, R.E.: The 2005 World Health Organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for dioxins and dioxin-like compounds. *Toxicological Sciences*, vol. 93, no. 2, pp. 223-

241. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kflo55>. 2006.

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen Unterstützern der Projekte PureAlps, insbesondere bei unserem Projektpartner dem Umweltbundesamt Österreich mit Monika Denner, Dr. Peter Weiss und Wolfgang Moche, der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus/Zugspitze mit Dr. Till Rehm, dem Sonnblick Observatorium mit Dr. Elke Ludewig und dem KIT-Campus Alpin mit Dr. Matthias Mauder. Außerdem danken wir herzlich den vielen lokalen Partnern.

PureAlps wurde finanziert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz und vom Österreichischen Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie sowie unterstützt vom Österreichischen Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz.

VEGETATIONSGESCHICHTLICHE UNTERSUCHUNGEN AUF DEM ZUGSPITZPLATT

PHILIPP STOJAKOWITS¹, ARNE FRIEDMANN¹, OLIVER KORCH¹

¹UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, AG BIOGEOGRAPHIE, ALTER POSTWEG 118, 86135 AUGSBURG

E-MAIL: STOJAKOWITS@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Gemäß einer pollenanalytischen Untersuchung vom unteren Zugspitzplatt auf einer Höhenlage von 2030 m ü. NN. setzte dort die Rohhumusbildung im Subboreal ein. Während dieses Abschnitts ist eine Klimaschwankung repräsentiert. Im Subatlantikum besaß vor der anthropo-zoogenen Einflussnahme der Latschengürtel in der oberen subalpinen Stufe eine größere Ausdehnung. Infolge der weidewirtschaftlichen Nutzung wurde in der Neuzeit die Latschengrenze herabgedrückt.

Abstract: A palynological study was performed on a histosol (raw humus) core retrieved from the upper subalpine zone of the Zugspitzplatt at 2030 m asl. The reconstruction shows, that the humus accumulation began in the Subboreal during which a climatic oscillation is recorded. Furthermore, evidence is provided that during Subatlantic times the krummholz zone was extended further upwards than nowadays. Anthropogenic influences like sheep grazing lead to a decreasing upper limit of the krummholz belt in modern times.

Tangelrendzinen gelangten in der subalpinen Stufe des Wettersteingebirges relativ häufig zur Ausbildung (Zöttl, 1965). Unter dem Einfluss saurer Nadelstreu kommt es bei diesem Bodentyp zur Bildung von Rohhumus. Solche Streulieferanten in Gestalt von Latschengebüschen herrschen in der oberen subalpinen Stufe des Zugspitzplatts (bis ca. 2100 m) zusammen mit Zwergstrauchheiden in Vergesellschaftung mit artenreichen Rasen vor. Die

Krummholz-Formation des *Rhododendro hirsuti*-Pinetum mugo mit vielen säureliebenden Arten erreicht ihre höchste Verbreitung bei etwa 2100 m ü. NN. Die alpine Zone des Platts wird von verschiedenen Ausprägungen des Polsterseggenrasens (*Caricetum firmae*) dominiert. Mit der Höhe wird dieser allgemein lückiger und der Artenreichtum der Gesellschaft nimmt ab. Der obere Bereich des Zugspitzplatts sowie die Schutthalden unterhalb der Plattumrahmung werden von der subnivalen Zone der Schutt-, Schneetälchen- und Felsspaltengesellschaften besetzt. Flächenmäßig am weitesten verbreitet ist hier die Täschelkrauthalde (*Thlaspietum rotundifolii*). Besonders spät ausapernde Geländemulden werden vom Gänsekresse-Schneetälchen (*Arabidetum caeruleae*) besiedelt (Korch & Friedmann, 2016).

Zur Rekonstruktion der Vegetationsgeschichte im Gebiet wurde im Jahr 2015 ein 57 cm mächtiges Rohhumusprofil auf einer Höhenlage von rund 2030 m ü. NN geborgen und in Abständen von 2 cm pollenanalytisch nach erfolgter chemischer Aufbereitung gemäß den gängigen Standardverfahren untersucht. Dabei wurde auf eine Baumpollensumme von mindestens 600 Pollenkörnern ausgezählt, um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erzielen. Das Liegende des Profils bildet ladinischer Wettersteinkalk. Grüger und Jerz (2010) publizierten bereits ein Pollendiagramm vom Zugspitzplatt, das aber vorwiegend das Atlantikum (ca. 8500–6250 vor heute) abdeckt. Gemäß deren Studie dürfte zur Zeit des holozänen Klimaoptimums im Atlantikum sogar der tief gelegene östlichste Teil

des Zugspitzplatts mit offenem Fichtenwuchs bewaldet gewesen sein.

Vegetationsgeschichtliche Befunde

Die Pollenüberlieferung bzw. das Aufwachsen des Tangelhumusprofils setzte im Subboreal (ca. 6250–2900 vor heute) ein. Mehrheitlich sind für den Bodentyp charakteristische Taxa der Latschengebüsche repräsentiert. Daneben finden sich auch Elemente der subalpinen Fichtenwälder und alpinen Polsterseggenrasen sowie Taxa des montanen gemischten Bergwaldes (z. B. *Abies alba* und *Fagus sylvatica*) und Baumarten tieferer Lagen (z. B. *Quercus* und *Carpinus betulus*).

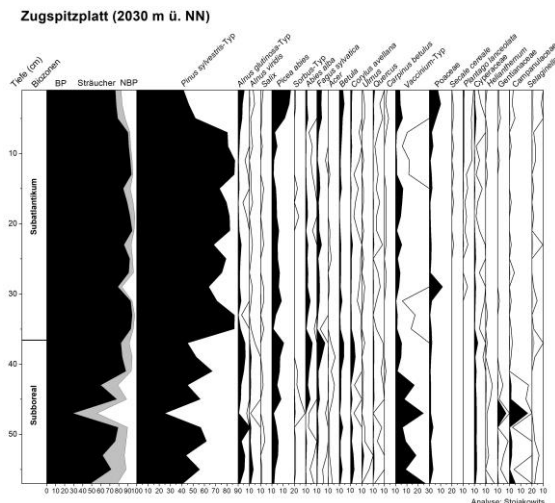


Abb.1: Pollendiagramm Tangelrendzina (ausgewählte Taxa). Abkürzungen: BP = Baumpollen und NBP = Nicht-baumpollen.

In 47 cm Tiefe ist eine Klimaschwankung erfasst, die mit der sogenannten Löss-Schwankung (Bortenschlager & Patzelt, 1969, Patzelt & Bortenschlager, 1973) in Zusammenhang stehen dürfte. Neben Depressionen bei verschiedenen Baumpollenkurven sind erhöhte Vaccinien-Anteile zu verzeichnen sowie verschiedene Nichtbaumpollen (= NBP) wie *Gentianaceae* und *Campanulaceae* häufiger im Polleninhalte vorhanden. Eine in 46 cm Tiefe niedergebrachte ¹⁴C-Datierung mit einem Alter von 3841–3928 cal. BP bzw. vor heute bestätigt diese Zeitstellung. Den durch

die Klimaverschlechterung verursachten Gletschervorstoß zeichnet die Endmoräne des Plattstandes auf einer Höhenlage von rund 2300 m ü. NN nach (Hirtreiter, 1992).

Im Subatlantikum (ca. 2900 vor heute bis Gegenwart) dominiert weiterhin *Pinus* das Pollenspektrum. Jedoch hat sich der Latschengürtel ausgedehnt. Während dieses vegetationsgeschichtlichen Abschnitts lässt sich zunehmend der menschliche Einfluss in den Tallagen und in jüngster Zeit der Beweidungsdruck auf dem Zugspitzplatt selbst detektieren. Außer nahezu kontinuierlichen *Plantago lanceolata*-Nachweisen findet sich auch immer wieder aus den Tallagen (v. a. Inntal) hochgeblasene Getreidepollenkörner in Gestalt von *Secale cereale* und in den beiden oberen Proben auch je ein Einzelfund von *Zea mays*. Die vielerorts in jüngerer Zeit erfolgte Aufforstung mit *Picea abies* ist im Pollendiagramm ebenso ersichtlich wie zurückgehende *Pinus*-Werte, was mit einer anthropozoogen gedrückten Krummholzgrenze zusammenhängen dürfte. Wenige 10er-Höhenmeter über dem untersuchten Standort wurde eine abgestorbene Latsche bzw. ein Zweig mit einem Alter von 1724–1815 cal. AD bzw. nach Christus ¹⁴C-datiert. Weitere Totholzfunde oberhalb des rezenten Latschengürtels zeigen eine Herabdrückung der Latschengrenze infolge weidewirtschaftlicher Nutzung während der Neuzeit an. Die Zunahme der Poaceen-Anteile steht mit der Schafbeweidung in Zusammenhang. Als Resultat der Beweidung haben sich lokal Borstgrasrasen (*Geo montani-Nardetum strictae*) und Lägerispengras-Fluren (*Alchemillo-Poetum supinae*) als Ersatzgesellschaften in der subalpinen und alpinen Stufe des Zugspitzplatts eingestellt (Korch & Friedmann, 2016). Zwei pollenanalytisch bearbeitete Rohhumusprofile von einer Kammlage am Kreuzjoch auf etwa 1700 m ü. NN hingegen verweisen dort auf eine Ausbreitung von Latschengebüschen auf ehemaligen Standor-

ten des gemischten Bergwaldes (Weber, 1999). Für weiterführende Informationen zu der vorliegenden paläobotanischen Untersuchung sei auf Stojakowits et al. (2019) verwiesen.

Literatur

Bortenschlager, S., und Patzelt, G.: Wärmezeitliche Klima- und Gletscherschwankungen im Pollenprofil eines hochgelegenen Moores (2270 m) der Venedigergruppe. *Eiszeitalter und Gegenwart*, 20, 116-122, doi:10.3285/eg.20.1.11, 1969.

Grüger, E., und Jerz, H.: Untersuchung einer Doline auf dem Zugspitzplatt, *E&G Quaternary Science Journal*, 59, 66-75, doi:10.3285/eg.59.1-2.06, 2010.

Hirtleiter, G.: Spät- und postglaziale Gletscherschwankungen im Wettersteingebirge und seiner Umgebung. *Münchner Geographische Abhandlungen*, Reihe B 15, 1–154, 1992

Korch, O. und Friedmann, A.: Vegetation und Vegetationsdynamik auf dem Zugspitzplatt (bayerische Alpen). *Natur- und Kulturlandschaft im hochalpinen Raum als Produkt natürlicher, anthropogener und zoogener Einflüsse*, *Polarforschung* 86, 35-45, doi:10.2312/polarforschung.86.1.35, 2016.

Patzelt, G., und Bortenschlager, S.: Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F., Supplementband, 16, 25-72, 1973.

Stojakowits, P., Korch, O., Grashey-Jansen, S., und Friedmann, A.: CONTRIBUTIONS TO THE EUROPEAN POLLEN DATABASE: 45. Zugspitzplatt, Wetterstein Mountains (Germany), *Grana*, 58, 396-398, doi: 10.1080/00173134.2019.1584239, 2019.

Weber, K.: Vegetations- und Klimageschichte im Werdenfelser Land, *Augsburger Geographische Hefte*, 13, 1-127, 1999.

Zöttl, H.: Zur Entwicklung der Rendzinen in der subalpinen Stufe I. *Profilmorphologie*. *Zeitschrift Pflanzenernähr., Düngung, Bodenkunde* 110 (2), 109-114, doi:10.1002/jpln.19651100204, 1965.

Danksagung

Wir möchten der Bayerischen Zugspitzbahn Bergbahn AG für kostenlosen Seilbahnzugang danken. Ferner gebührt unser allgemeiner Dank dem Team der UFS für die dort immer überaus angenehmen Aufenthalte.

PERMAFROSTMONITORING MIT DER ERDBEBENSTATION IM SCHNEEFERNERHAUS

FABIAN LINDNER¹, JOACHIM WASSERMANN¹

¹LMU MÜNCHEN, DEPARTMENT FÜR GEO- UND UMWELTWISSENSCHAFTEN, GEOPHYSIKALISCHES OBSERVATORIUM, LUDWIGS-

HÖHE 8, 82256 FÜRSTENFELDBRUCK

E-MAIL: FLINDNER@GEOPHYSIK.UNI-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Steigende Temperaturen verursachen den Rückgang des Permafrosts, wodurch Felsinstabilitäten zu erwarten sind. Unter Benutzung der Aufzeichnungen der Erdbebenstation im Schneefernerhaus der letzten 15 Jahre, werden Aussagen über die Dynamik des Permafrost an der Zugspitze möglich. Saisonale und langzeitliche Änderungen der seismischen Geschwindigkeit spiegeln das saisonale Tauen/Gefrieren sowie den Rückgang des Permafrosts wieder und verdeutlichen das Potential passiver Seismologie für das Permafrostmonitoring.

Abstract: Permafrost degradation through rising temperatures is expected to destabilize rock walls. We use the recordings of the earthquake monitoring station in the Schneefernerhaus from the past 15 years to investigate permafrost dynamics at the Zugspitze. Seasonal and long-term changes in the seismic velocity reflect seasonal thaw/freeze and permafrost degradation, respectively, and highlight the potential of permafrost monitoring through passive seismology.

Einleitung

Permafrost beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von Felswänden und somit deren Stabilität. Während die jahreszeitliche Temperaturschwankung ein periodisches Tauen und Gefrieren des Gesteins zur Folge hat, bewirkt die klimatische Erwärmung das Auftauen des Permafrosts. Um dadurch ent-

stehende Felsinstabilitäten und damit einhergehende Gefahren für Mensch und Infrastruktur zu erkennen, ist ein Permafrostmonitoring unabdingbar.

An der Zugspitze ist Permafrost heterogen verteilt im Gipfelkamm anzutreffen (Gude & Barsch, 2005). Die Permafrostvorkommen werden bereits durch Temperaturaufzeichnungen in einem Bohrloch unterhalb des Gipfels (siehe Noetzli et al., 2010) und durch die elektrische Resistivitätstomographie (ERT, Krautblatter et al., 2010) überwacht – beide Methoden sind fest verankert in der Permafrostforschung. Neue Forschungsergebnisse legen nahe, dass auch die seismische Interferometrie gut geeignet für das Permafrostmonitoring ist (James et al., 2019). Dabei werden permanent vorhandene Bodenvibrationen genutzt, um die zeitliche Änderung der seismischen Geschwindigkeit im Untergrund zu überwachen (Curtis et al., 2006). Im Falle von Permafrost wird die seismische Geschwindigkeit durch Tauen, Gefrieren sowie dem Vorhandensein von Eis und Wasser in Klüften beeinflusst. Die seismische Interferometrie erlaubt kontinuierliches und weitgehend autonomes Monitoring. Im Vergleich zur ERT und zu Bohrlochmessungen deckt sie größere räumliche Bereiche ab und ermöglicht somit die Erweiterung des Permafrostmonitorings an der Zugspitze.

Erdbebenstation im Schneefernerhaus – Methodik

Seit 2006 befindet sich eine seismische Messstation im Schneefernerhaus, welche kontinuierlich die drei Komponenten der Bodengeschwindigkeit aufzeichnet (vertikal, Nord, Ost). Abbildung 1 zeigt die seismische spektrale Leistungsdichte als Funktion der Frequenz für den Monat August 2019. Bodenvibrationen werden vor allem tagsüber während der Betriebszeiten an der Zugspitze durch Seilbahnen und andere Infrastruktur angeregt (vertikale Bänder in Abb. 1). Dieses Anregungssignal wird benutzt, um Kreuzkorrelationen zwischen den drei verschiedenen Komponenten der Messstation zu berechnen. Die resultierenden, sogenannten "virtuellen" Seismogramme, geben Einblicke in die Wellenausbreitung des "Hintergrundrauschens" im Bereich der Messstation (Snieder, 2006). Im nächsten Schritt werden die Kreuzkorrelationen, berechnet für verschiedene Zeiten, mit einer Referenzkreuzkorrelation verglichen. Ziel dieses Vergleichs ist eine mögliche zeitliche Veränderung in der Wellenausbreitung und damit eine Geschwindigkeitsänderung zu delektieren. Hierfür berechnen wir wavelet-basierte Kreuzspektren (Mao et al., 2020).

Resultate

Teile der Kreuzkorrelationen weisen klare saisonale Änderungen der seismischen Geschwindigkeit auf. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse aller drei Komponentenpaare (Ost-Nord, Ost-Vertikal, Nord-Vertikal) für den Frequenzbereich 2-8 Hz. Wir beobachten hohe Geschwindigkeiten während der Wintermonate, gefolgt von einer Geschwindigkeitsabnahme ab ca. Mitte April (vertikale, durchgezogene Linien in Abb. 2) bis ca. Mitte September (vertikale, gestrichelte Linien in Abb. 2). In der Folge steigen die Geschwindigkeiten wieder an, wobei die saisonalen Variationen etwa 3 % erreichen. Zusätzlich zur saisonalen Änderung beobachten wir eine generelle Abnahme der Geschwindigkeit, welche im Mittel ca. 0.1 % pro Jahr beträgt.

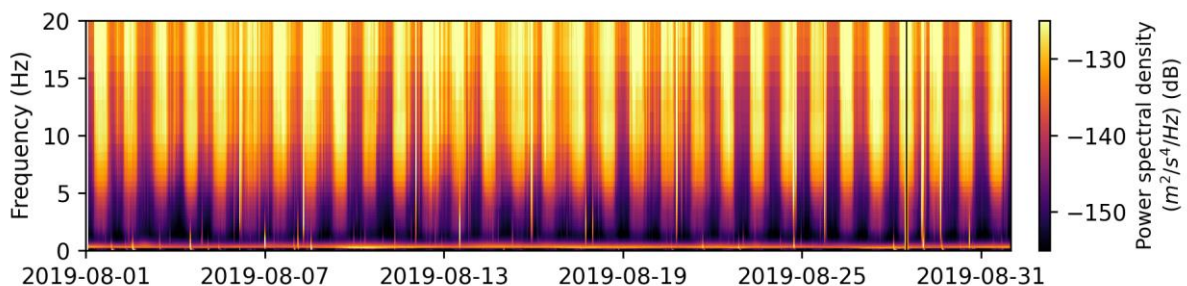


Abb. 1: Spektrale Leistungsdichte der Messstation ZUGS für August 2019. Die hellen vertikalen Bänder zeigen die Anregung von Bodenvibrationen durch den täglichen Betrieb an der Zugspitze.

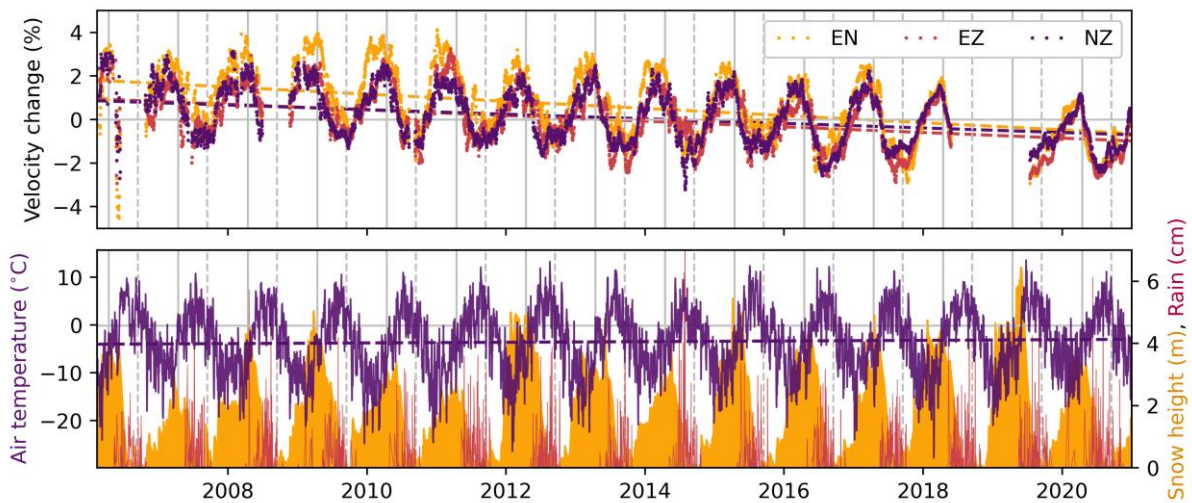


Abb. 2: (oben) Seismische Geschwindigkeitsänderungen bestimmt von der Ost-West (EN), Ost-Vertikal (EZ) und Nord-Vertikal (NZ) Komponente. Die gestrichelten Linien zeigen den linearen Trend an. (unten) Lufttemperatur, Schneehöhe und Regenniederschlag, gemessen am Zugspitzgipfel (Deutscher Wetterdienst). Vertikale durchgezogene (gestrichelte) Linien zeigen jeweils den 15. April (15. September).

Interpretation

Der saisonale Rückgang der seismischen Geschwindigkeit beginnt zeitgleich mit den ersten Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt im Frühling. Der Beginn des Geschwindigkeitsanstiegs im Herbst korreliert mit dem Absinken der mittleren Tagestemperatur in den Frostbereich (Abb. 2). Höhere Geschwindigkeiten sind für gefrorenes Gestein mit eisgefüllten Klüften zu erwarten, wodurch die saisonalen Geschwindigkeitsvariationen mit saisonalem Tauen und Gefrieren erklärt werden können. Zudem spielt der Eintrag von Wasser ins Gestein durch Niederschlag und Schneeschmelze vermutlich eine Rolle. Die Ergebnisse decken sich mit den ERT Resultaten von Krautblatter et al. (2010), welche laterales Tauen der nahegelegenen Permafrostlinse im Bereich des Kammstollens von Mai bis April sowie Wiedergefrieren ab September dokumentieren. Die langfristige Abnahme der Geschwindigkeit lässt sich mit dem Rückgang des Permafrosts durch steigende Umgebungstemperaturen erklären.

Schlussfolgerung

Unsere Messungen zeigen großes Potential für kontinuierliches Permafrost Langzeitmonitoring mit vergleichsweise geringem Aufwand. Zukünftige Forschung wird sich mittels erweiterter Instrumentierung darauf konzentrieren, Geschwindigkeitsänderungen zu lokalisieren.

Literatur

- Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R., und Wapenaar, K.: Seismic interferometry – Turning noise into signal. *The Leading Edge*, 25(9), 1082-1092. <https://doi.org/10.1190/1.2349814>. 2006.
- Gude, M., und Barsch, D.: Assessment of geomorphic hazards in connection with permafrost occurrence in the Zugspitze area (Bavarian Alps, Germany), *Geomorphology*, 66(1-4), 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.03.013>. 2005.
- James, S. R., Knox, H. A., Abbott, R. E., Panning, M. P., und Sreaton, E. J.: Insights into permafrost and seasonal active-layer dynamics from ambient seismic noise monitoring. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(7), 1798-1816. <https://doi.org/10.1029/2019JF005051>. 2019.

Krautblatter, M., Verleysdonk, S., Flores-Orozco, A., und Kemna, A.: Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F2). <https://doi.org/10.1029/2008JF001209>. 2010.

Mao, S., Mordret, A., Campillo, M., Fang, H., und van der Hilst, R. D.: On the measurement of seismic traveltime changes in the time–frequency domain with wavelet cross-spectrum analysis. *Geophysical Journal International*, 221(1), 550-568. <https://doi.org/10.1093/gji/ggz495>. 2020.

Nötzli, J., Gruber, S., und Poschinger, A. V.: Modellierung und Messung von Permafrosttemperaturen im Gipfelgrat der Zugspitze, Deutschland. *Geographica Helvetica*, 65(2), 113-123. <https://doi.org/10.5194/gh-65-113-2010>. 2010.

Snieder, R.: The theory of coda wave interferometry. *Pure and Applied geophysics*, 163(2), 455-473. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-0026-6>. 2006.

Danksagung

Die meteorologische Daten wurden über das Portal des Deutschen Wetterdienst bezogen (<https://cdc.dwd.de/portal/>, Station 5792, Zugspitze). Die seismischen Daten der Messstation ZUGS, Netzwerk code BW, sind ebenfalls frei zugänglich: BayernNetz, <https://doi.org/10.7914/sn/bw>

TEMPERATUR UND WASSER IM KAMMSTOLLEN: WICHTIGE ZUSATZINFORMATIONEN FÜR DAS PERMAFROSTMONITORING

RICCARDO SCANDROGLIO¹, MICHAEL KRAUTBLATTER¹

¹TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, FACHGEBIET HANGBEWEGUNGEN, ARCISTRASSE 21, 80333 MÜNCHEN

E-MAIL: R.SCANDROGLIO@TUM.DE

Zusammenfassung: Das Fachgebiet Hangbewegungen der TUM unterhält ein interdisziplinäres Permafrost-Monitoring im Kammstollen der Zugspitze seit 2007. Dieser einzigartige Standort ermöglicht eine ganzjährige Beobachtung von steilen alpinen Felswänden aus dem Inneren des Berges. Damit kann eine genaue Beurteilung der Permafrostentwicklung im Zuge des Klimawandels und die verbundenen Gefahren erreicht werden. Schlüsselinformationen für diese Interpretation sind die stündlich gemessenen Felstemperaturen und der Wasserabfluss aus Klüften.

Abstract : The Chair of Landslide Research of the TUM developed since 2007 a multi-approach permafrost monitoring at the Zugspitze Kammstollen. This unique location allows all-year-round observation of steep alpine rockwalls from inside the mountain. Thank to this we can accomplish an accurate evaluation of permafrost development in the context of climate change and of the consequent hazards. Key information for this interpretation is provided by the hourly measurements of rock temperatures and water discharge from clefts.

Einleitung

Die Erwärmung der Temperaturen im alpinen Raum in den letzten drei Jahrzehnten und die damit verbundene Verringerung der Permafrostverbreitung ist wissenschaftlich gut dokumentiert (Biskaborn et al., 2019, Scandroglio et al., 2021). Die Folgen für steile alpine

Felshänge wie die Abnahme der Hangstabilität setzen Menschen und Infrastrukturen einem hohen Risiko aus. Insbesondere auf der Zugspitze war 2020 infolge der Messungen des DWDs das wärmste Jahr aller Zeiten, eingebettet in das wärmste Jahrzehnt.

Der Kammstollen, der 850 m lange Verbindungstunnel unter dem westlichen Zugspitzgrat (Abb. 1), wurde seit 2007 für Permafrostmonitoring ausgerüstet (Krautblatter et al., 2010). Danach folgte mehr als ein Jahrzehnt intensiver Ausbau und Messungen, die zur Erfassung einer einzigartigen interdisziplinären Datensammlung geführt haben.

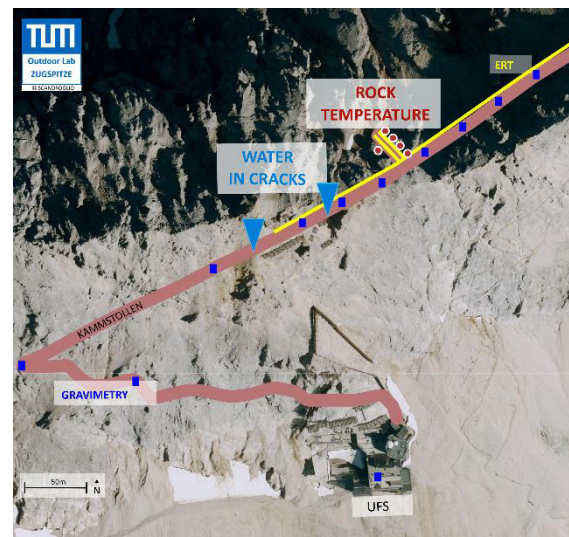


Abb.1: Orthophoto des westlichen Zugspitzkamms zwischen Zugspitze und Zugspitzeck mit UFS und Kammstollen. Die Standorte der Temperaturlogger sind mit roten Kreisen dargestellt und befinden sich in einem Seitenstollen. Die Wasserlogger, mit blauen Pfeilen dargestellt, sind im Haupttunnel. Die Messpunkte der relativen Gravimetrie und die ERT Transekte sind ebenso eingetragen (UFS, 2019). Punkte gemessen bei C. Reith.

Die elektrischen Widerstandstomographie (ERT) hat sich in den vergangenen Jahrzehnten als Standardtechnik für die quantitative Permafrostuntersuchung entwickelt. Diese Methodik, zusammen mit der relativen Gravimetrie, wird im Kammstollen monatlich angewendet um die 2D Entwicklung der gefrorenen Bereich einzuschätzen, wie schon im letzten Wissenschaftlicher Bericht der UFS dargestellt (UFS, 2019). Trotzdem kann die komplexe Dynamik steiler Felshänge durch diese Messtechniken nicht vollständig erklärt werden.

Daher ist ein interdisziplinärer Ansatz erforderlich, um die Wirkung von externen Faktoren aufzuzeichnen und das Verständnis interner Reaktionen zu verbessern. So können beispielsweise thermo-mechanische und thermo-geophysikalische Modelle (Mamot et al., 2018, Mamot et al., 2021, Schröder et al., in review) angewendet werden um weitere Einblicke in die Felsdynamik zu bekommen. Trotzdem ist die punktuelle kontinuierliche Aufzeichnung von Umgebungsparametern wichtig, um geophysikalische Messungen und Modelle korrekt kalibrieren und interpretieren zu können.

Im Folgenden gehen wir im Detail auf Methoden und Ergebnisse zweier punktueller Messungen aus dem Kammstollen ein: die Gesteinstemperaturen und der Abfluss aus Klüften.

Felstemperatur

Im Seitentunnel des Kammstollen (Abb.1 & Abb. 2 oben) wurden im Jahr 2007 vier Temperaturlogger mit Abständen zwischen 5 m und 20 m zur Nordwand installiert. 2019 wurden die alten Logger mit neueren und genaueren Loggern der Firma GeoPrecision GmbH ersetzt.

Diese Sensoren im Fels ermöglichen die punktuelle Validierung für unsere Messungen und Modelle. Mit einer Interpolation der gemessenen Werte, kann darüber hinaus die

Entwicklung der Temperaturen im Jahresverlauf sowie ein Bohrloch dargestellt werden (Abb. 2 unten). Die Auftauschicht erreicht eine Tiefe zwischen 5 und 10 m, während der Fels ab 10 m dauerhaft unten 0°C bleibt. Die Grafik zeigt, dass bei 15 m Tiefe die niedrigsten Temperaturen im Juli erreicht werden und dass dieser Monat im Jahr 2019 deutlich kälter war als der im Jahr 2020. Deutliche Unterschiede sind auch bei 20 m Tiefe zu erkennen. So nahm das Jahresminimum zwischen Juli 2019 und Juli 2020 zu, während auch eine Steigerung des Maximums im März zwischen 2020 und 2021 zu verzeichnen ist. Diese Entwicklungen sind auf den warmen Sommer 2019 zurückzuführen.

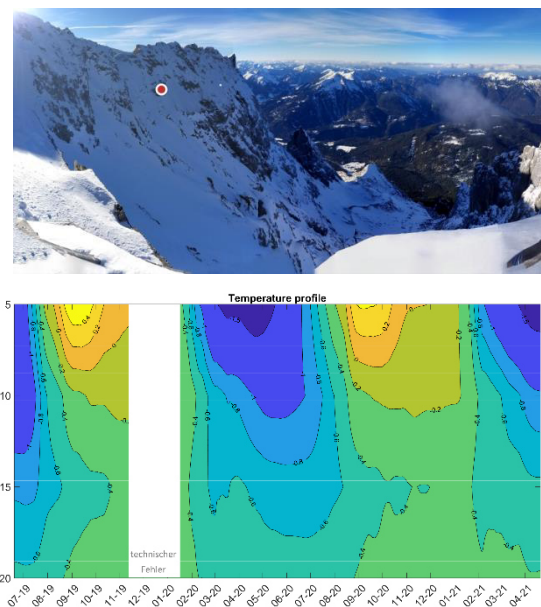


Abb.2: Oben: Nordhang des Zugspitze, zwischen Zugspitze und Schneefarnscharte. Ein roter Kreis markiert den Standort unserer Temperaturlogger. Unten: interpolierte Entwicklung der Felstemperaturen zwischen Juli 2019 und April 2021. Die Tiefe auf der Y-Achse zeigt den Abstand zu Außenwand.

Weitere Temperaturlogger wurden im Jahr 2018 im Haupttunnel installiert, um Fels- und Lufttemperaturen entlang der ERT Messstrecke zu messen.

Wasser aus Klüften

Im Jahr 2012 wurden von Helmholtz Zentrum zwei Wasserzähler für Quellwasseruntersuchungen im Kammstollen installiert. Diese sammeln den Abfluss aus zwei Klüften und zeichnen die Werte stündlich auf. Die Sammler befinden sich in der Mitte des Haupttunnels (Abb.1): der Abstand zwischen den zwei Wassersammlern beträgt ca. 35 m, der Höhenunterschied weniger als 10 m. Die Daten sind auf www.alpendac.eu frei zugänglich. Diese einzigartigen Messungen in steilen alpinen Felswänden können wichtige Informationen über die lokale Dynamik von Wasser liefern. Dieses Element wird immer öfter als destabilisierender Faktor in Zeiten des Permafrostrückgangs angenommen (Walter et al., 2020) aber sein tatsächlicher Beitrag ist immer schwierig abzuschätzen. Messinstrumente wie diese Sammler können diese und weiteren Forschungsfragen beantworten: Welcher Anteil von Schmelz- bzw. Regenwasser erreicht zu welchem Zeitpunkt das Berginnere? Wie lange bleibt Wasser in Klüften und kann das zur Bildung von hydrostatischem Druck führen?

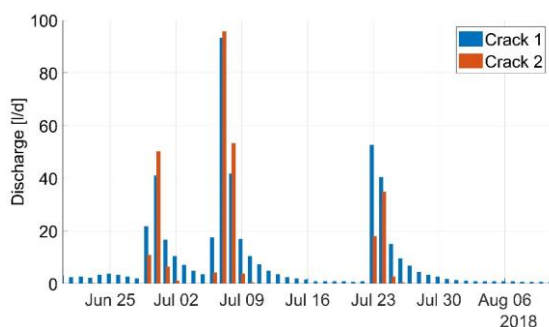


Abb. 3: Abfluss im Juli 2018. Es werden die unterschiedlichen Fließverhalten deutlich. Obwohl die maximalen Werte in Kluft 2 etwas größer sein können als in Kluft 1, fängt der Abfluss aus der ersten früher an, ist stärker und kann bis zu einer Woche länger dauern.

Unterschiedliche Standorte und geomorphologische Eigenschaften der Klüfte, zusammen mit gelegentlichen Loggerausfällen aufgrund von fehlender Stromversorgung oder Blitzeinschlag, führen zu deutlichen Unterschieden in

der Gesamtsumme; sowohl zwischen den zwei Zählern als auch zwischen den Jahren. Nichtsdestotrotz können einzelne Wetterereignisse gut aufgezeichnet werden und somit einen wichtigen Beitrag für die Beantwortung der Forschungsfragen leisten. Weitere wichtige Prozessverständnisse können zum Beispiel aus dem Vergleich zwischen Abfluss und Außenlufttemperaturen (Abb. 4) gewonnen werden. Sobald sich der Tagesmittelwert der Lufttemperatur am Gipfel an 0 °C annähert, beginnt der Abfluss in Kluft 1. Ende Mai 2018 war die Temperaturzunahme beispielsweise so stark, dass für zwei Wochen Abflüsse von mehr als 400 l/d pro m² gemessen wurden, mit Spitzen bis 1000 l/d pro m². Diese außergewöhnlichen Werte sind die höchsten, die seit Beginn der Messungen im Jahr 2013 erfasst worden sind. Obwohl diese Messreihe zu kurz für eine Klimabeurteilung ist, kann sie auf eine Zunahme des Abflusses in der Zukunft hindeuten und vor einer möglichen Erhöhung des Wasserdrucks warnen.

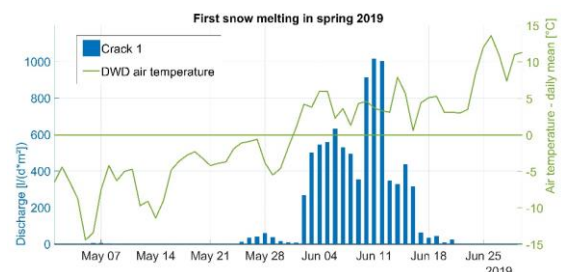


Abb. 4: Außenlufttemperaturen und Abfluss von Kluft 1. Quelle Lufttemperaturen: DWD.

Weitere Analysen mit stündlichen Regendaten oder einer Modellierung der Schneeschmelze mit der Software Snowpack versprechen weitere interessanten Blicke in der hydrologische Dynamik.

Literatur

Biskaborn, B. K., et al.: Permafrost is warming at a global scale, *Nat. Commun.*, 10, 264, doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4, 2019.

Krautblatter, M., Verleysdonk, S., Flores-Orozco, A. und Kemna, A.: Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps), *J. of Geoph. Res.-ES*, 115, 1-15, doi.wiley.com/10.1029/2008JF001209, 2010.

Mamot, P., Weber, S., Schröder, T. und Krautblatter, M.: A temperature-and stress-controlled failure criterion for ice-filled permafrost rock joints, *Cryosphere*, 12(10), 3333-3353, doi.org/10.5194/tc-12-3333-2018, 2018.

Mamot, P., Weber, S., Eppinger, S. und Krautblatter M.: Stability assessment of degrading permafrost rock slopes based on a coupled thermo-mechanical model, *Earth Surf. Dyn. Discuss.*, 1-45, doi.org/10.5194/esurf-2020-70, 2020.

Scandroglio, R., Draebing, D., Offer, M. und Krautblatter, M.: 4D-Quantification of alpine permafrost degradation in steep rock walls using a laboratory-calibrated ERT approach, *Near Surf. Geoph.*, 3 1-20, https://doi.org/10.1002/nsg.12149, 2021.

Schröder, T. und Krautblatter, M.: A high-resolution multi-phase thermo-geophysical model to verify long-term electrical resistivity tomography monitoring in alpine permafrost rock walls (Zugspitze, German/Austrian Alps), *Earth Surf. Process. Landf.*, submitted.

UFS, Umweltforschungsstation Schneefernerhaus GmbH: Wissenschaftliche Resultate 2017/ 2018, StMUV, wissenschaftlicheResultate, 2019.

Walter F., Amann F., Kos A., Kenner R., Phillips M., Preux A. De, Huss M., Tognacca C., Clinton J., Diehl T. und Bonanomi Y.: Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris

flows, *Geomorphology*, 351, 106933, doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106933, 2020.

Danksagung

Besonderer Dank geht an die Umweltstation Schneefernerhaus, die Bayerische Zugspitzbahn AG und das Bayerische Landesamt für Umwelt (LFU) für die freundliche Unterstützung. Weiterer Dank für die finanzielle Unterstützung an das Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, das Elitenetzwerk Bayern (Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst), sowie die International Graduate School of Science and Engineering (IGS-SE) und die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

KLIMAALPS – KLIMAWANDEL SICHTBAR MACHEN

INGA BECK¹, CORNELIA BAUMANN²

¹ UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS GMBH (UFS), ZUGSPITZE 5, 82475 ZUGSPITZE

² BÜRGERSTIFTUNG ENERGIEWENDE OBERLAND, AM ALTEN KRAFTWERK 4, 82377 PENZBERG

E-MAIL: I.BECK@SCHNEEFERNERHAUS.DE

Zusammenfassung: KlimaAlps – den Klimawandel sichtbar machen – ist ein über drei Jahre gefördertes Interreg Projekt. Das grundlegende Ziel dabei ist es, den Klimawandel in der Projektregion für jeden sichtbar zu machen. Somit soll das Bewusstsein jedes Einzelnen für den Klimawandel gestärkt werden und ein nachhaltiges Handeln im Sinne des Umweltschutzes gefördert werden.

Abstract: KlimaAlps – making climate change visible – is an Interreg project that runs for three years. The main mission is to make climate change within the region of the project visible for everybody. Thereby the awareness for climate change should be fostered and people should be motivated to act in a more sustainable way.

Einführung

Das von der Bürgerstiftung Energiewende Oberland (EWO) initiierte und koordinierte Interreg Projekt KlimaAlps wurde im Juni 2019 gestartet. Partner im bayerisch-österreichischen Verbund sind der Naturpark Karwendel, die Universität Innsbruck, der Landkreis Garmisch-Partenkirchen, das Klimabündnis Oberösterreich, sowie die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus.

Mit dem Projekt sollen Potenziale zum Klimaschutz in jedem Einzelnen geweckt und der breiten Bevölkerung Anstöße zum nachhaltigen Nachdenken und Handeln gegeben werden. Die soll primär durch die Einrichtung sogenannter ‚KlimaTope‘ und der Entwick-

lung einer Weiterbildung zum ‚KlimaPädagogen‘ geschehen. Dabei wird großer Wert darauf gelegt, dass der Wissenstransfer auf fundierten und aktuellen Forschungsergebnissen basiert.

Die UFS hat innerhalb des Projektes eine auf drei Jahre befristete Teilzeitstelle bekommen.



Abb. 1 KlimaAlps Logo

KlimaPädagoge, KlimaTop, , KlimaAlps-Netzwerk

KlimaPädagoge: Im Laufe des Projekts wird eine Klimapädagog*Innen-Ausbildung entwickelt. Zielgruppen sind Umwelt-/Naturpädagog*Innen und Multiplikatoren. Nach Abschluss der Ausbildung sollen diese den Klimawandel in ihrer Region erlebbar und sichtbar machen können und Handlungsoptionen aufzeigen. Innerhalb des Projektzeitraums sind dafür zwei Pilotläufe vorgesehen.

KlimaTop: KlimaTope sind Orte, an denen der Klimawandel sichtbar gemacht werden kann. Sie bieten sich als Exkursionsraum für von Klimapädagog*Innen geführte Gruppen ebenso an, wie für das eigenständige Erkunden durch interessierte Besucher*Innen. Ursachen und Folgen des Klimawandels und Anpassungsmaßnahmen an diesen werden

hier mit unterschiedlichen Mitteln aufgezeigt und können aktiv erkundet werden.

KlimaAlps – Netzwerk: Die Vernetzung der relevanten Akteure führt zu einer Stärkung der Wahrnehmung des Themas und des Wissenstransfers Forschung-Bildung. Über das Netzwerk werden Know-How und Erfahrung der Akteure in der Projektregion gebündelt und in die Umsetzung des Projekts eingebracht. Steter Austausch bildet alle Akteure themenspezifisch weiter. Mittlerweile zählt das KlimaAlps Netzwerk 120 Personen und Institutionen.

Status Quo

Die erste Hälfte des Projektes verlief sehr zufriedenstellend. Es wurden sechs thematische Schwerpunkte sowohl die Ausbildung, als auch für die KlimaTope definiert.

Diese sind:

- Alpines Hochgebirge
- Alpine Wiesen, Weiden, Almen und Landwirtschaft
- Bergwald
- Flüsse und Seen
- Moore

Für die KlimaPädagog*innen Ausbildung wurde ein didaktisches Konzept (Uni Innsbruck), sowie ein Forschungsportfolio (UFS) für jeden Schwerpunkt erstellt. Außerdem wurde ein Prüfungskonzept inklusive Zertifizierung (EWO) erarbeitet.

Für die KlimaTope wurden sechs Einrichtungen ausgewählt, welche als Drittanbieter für die Errichtung der KlimaTope für die jeweiligen Schwerpunkte zuständig sind. Die Konzepte zur Umsetzung sind alle ausgearbeitet und geprüft worden.

Eine Webseite mit vielen Informationen zum Projekt, den Projektpartnern und den Schwerpunkten sowie einer interaktiver Karte wurde erstellt.

Es wurden außerdem aus 90 Bewerbungen 30 Teilnehmer für die Pilotläufe ausgesucht.

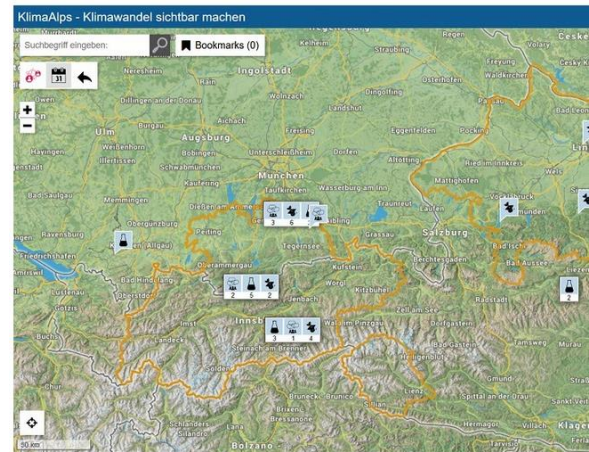


Abb. 2: Interaktive Karte auf der KlimaAlps Webseite (www.klimaalps.eu/interaktive-karte)

Leider müssen nun pandemie-bedingt die Pilotläufe, die für 2021 geplant sind abgesagt bzw. verschoben werden.

Nächste Schritte

Wie bereits erwähnt mussten die für das kommende Jahr geplanten Pilotläufe für die KlimaPädagogen Ausbildung abgesagt werden. Ein wichtiger nächster Schritt ist daher die Entwicklung eines Konzeptes, das eine Durchführung der Pilotläufe im Jahr 2022 ermöglicht. Es muss jedoch auch eine alternatives ‚Produkt‘ für das Jahr 2021 erarbeitet werden. Die Umsetzung der KlimaTope wird in der zweiten Jahreshälfte von 2021 wie geplant stattfinden. Diese werden nach erfolgreicher Einrichtung durch die Uni Innsbruck evaluiert.

Literatur

Parth, S., Kubisch, S., Oberauer, K., Deisenrieder, V., Liebhaber, N., Frick, M., Schickl, M., Keller, L., Stötter, J.; Klimawandel durch Bildung sichtbar machen. In: Bezirksblätter Tirol. 2021.

Baumann, C., und Beck, I: Communicating Climate Change to broad public through Educations - Project KlimaAlps. vEGU 2021.

Danksagung

KlimaAlps bedankt sich bei Interreg Österreich-Bayern und beim Land Tirol und Land Oberösterreich für die (Mit-)finanzierung des Projekts.

INTERDISZIPLINÄRE PERSPEKTIVEN AUF DAS MENSCH-UMWELT-VERHÄLTNIS

JENS SOENTGEN¹, KIRSTEN TWELBECK¹

¹WISSENSCHAFTSZENTRUM UMWELT (WZU), UNIVERSITÄTSSTRAßE 1A, 86159 AUGSBURG
EMAIL: KIRSTEN.TWELBECK@WZU.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Das Wissenschaftszentrum Umwelt (WZU) veranstaltet regelmäßig Tagungen im Schneefernerhaus. Davon ausgehend, dass eine nur naturwissenschaftliche Umweltforschung zu kurz greifen würde, diskutieren hier Geistes-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaftler*innen umweltbezogene Forschungsthemen. Auf der UFS entstand auch die Initiative zur Bewerbung auf ein internationales Doktorand*innenkolleg. Vor kurzem erhielt die Universität Augsburg, im Tandem mit der LMU, den Zuschlag vom Elitenetzwerk Bayern.

Abstract: The Environmental Science Center (WZU) regularly organizes conferences in the Schneefernerhaus. Based on the conviction that the natural sciences alone cannot provide important impulses for dealing with environmental problems, humanities scholars, social scientists and economists discuss environmental topics. The initiative to apply for an international doctoral program also originated at the UFS. The Elite Network or Bavaria recently approved the joint application of Augsburg University and LMU.

Das Wissenschaftszentrum Umwelt ist eine zentrale Einrichtung der Netzwerkuniversität Augsburg. Neben den Forschungsschwerpunkten „Umwelt und Gesundheit“, den „Ressourcenstrategien und Stoffgeschichten“ und den „Lokalen Umwelten“ prägen die „Environmental Humanities“ das Profil des WZU. Dieser noch junge Forschungsbereich fußt auf der Einsicht (die nicht zuletzt im Zusammen-

hang mit der Coronapandemie an Evidenz gewann), dass die angesichts drängender Umweltprobleme dringend notwendigen Veränderungen des Mensch-Umweltverhältnis nicht allein das Gebiet der Natur- und Technikwissenschaften bleiben können, sondern dass es gleichermaßen der Geistes- und Sozialwissenschaften bedarf, um nachhaltige Lösungen zu finden. Wenn die Diagnose vom Anthropozän zutrifft, wenn es stimmt, dass die Biosphäre immer stärker durch menschliche Aktivitäten beeinflusst wird, ist unerlässlich, dass jene Fächer einbezogen werden, die sich mit ihrer eigenen Methodik mit Menschen und mit Menschenwerken beschäftigen. Insbesondere ist auch die verstärkte Zusammenarbeit der Geistes- Sozial- und Kulturwissenschaften mit den Naturwissenschaften im Kontext des Umweltthemas wichtig.

Der Forschungskreis „Environmental Humanities“

Der vom WZU ausgehende Forschungskreis „Environmental Humanities“ trifft sich seit 2016 regelmäßig und in unterschiedlicher Besetzung in der UFS. Zu den Teilnehmenden gehören etablierte Wissenschaftler*innen ebenso wie der wissenschaftliche Nachwuchs; die Teilnehmenden kommen aus Disziplinen wie etwa der Geschichte, der Humangeographie, der Medienwissenschaft, den Nordamerikastudien, der Philosophie, der Theologie, der Umweltethik und den Wirtschaftswissenschaften. Neben Forschenden von der Universität Augsburg finden sich auch Wissenschaftler*innen anderer Hochschulen

und außeruniversitärer Einrichtungen unter den Gästen.

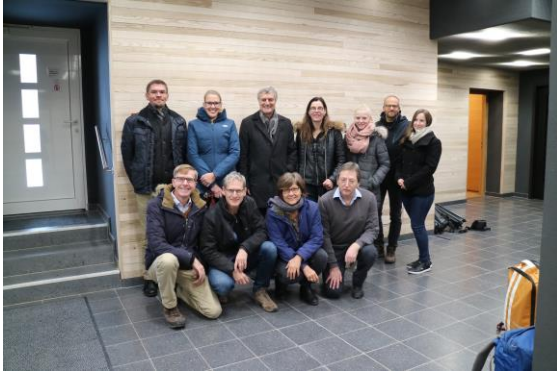


Abb.1: Die Teilnehmenden an der Environmental Humanities Tagung im Oktober 2019

Themenschwerpunkte der Augsburger Environmental Humanities am WZU

Die Abgeschlossenheit der UFS und ihre Einbettung in die atemberaubende Landschaft trugen und tragen entscheidend zum Gelingen der Tagungen bei, bietet dieses Ambiente doch ganz direkte Anknüpfungspunkte zu den Fragen, mit denen sich die Wissenschaftler*innen beschäftigen. Dazu gehören Themen wie „Regenerative Energie“ (2016), „Natur und Narration“ (2017), „Natur- und Kulturlandschaft“ (2018), „Nachhaltigkeit“ (Feb. 2019), aber auch die Landwirtschaft („Weizen“, Okt. 2019). Aus interdisziplinärer Perspektive ergeben sich bei all diesen Themen Fragestellungen, die fernab der Natur- und Technikwissenschaften zu liegen scheinen und doch ohne die Entwicklungen in diesen Bereichen nicht denkbar wären. Dazu gehören beispielsweise die gesellschaftlichen Implikationen der filmischen Darstellung der Energiewende oder die Narrative, welche die Nachhaltigkeitsdebatten begleiten bzw. prägen.

Im für den vorliegenden Beitrag in den Blick genommenen Zeitraum 2019/20 konnten zwei Tagungen realisiert werden; die Coronapandemie verhinderte leider weitere Treffen. Im Februar 2019 stand das Thema „Nachhaltigkeit und weitere umweltpolitische Ideale“

im Fokus. Anknüpfend an das an der Universität Augsburg angesiedelte Leibniz-Projekt (SAW) zur „Geschichte der Nachhaltigkeit(en)“ wurden Diskurse über „Nachhaltigkeit“ und entsprechende soziale Praktiken auf lokaler, nationaler und globaler Ebene untersucht. Im Zentrum standen, neben historischen Perspektiven, vor allem wirtschafts-, medien- und kulturwissenschaftliche Analysen, aber auch ganz konkrete Fallbeispiele aus dem Bereich der Humangeographie. In all diesen Beiträgen wurde deutlich, wie unmittelbar die historischen, kulturellen und lokalen Dimensionen auf das Verständnis und die Umsetzung von „Nachhaltigkeit“ einwirken, und wie wichtig es in Hinblick auf das Erarbeiten von gesellschaftlich dauerhaft akzeptierten Lösungen ist, neben der ökologischen Dimension auch die gesellschaftliche, ökonomische und kulturelle Definition des Terminus „Nachhaltigkeit“ zu berücksichtigen. Die Ergebnisse dieser Tagung werden demnächst in einem Sammelband Environmental Humanities, herausgegeben von Prof. Dr. Matthias Schmidt (Humangeographie) und Prof. Dr. Hubert Zapf (Nordamerikastudien), veröffentlicht. Die transdisziplinäre Zeitschrift Gaia publizierte zudem Ende 2020 ein Schwerpunktheft mit Beiträgen Augsburger Forscher*innen.

Die zweite Tagung fand im Oktober 2019 statt und widmete sich dem Weizen aus kulturwissenschaftlicher (PD Dr. K. Twelbeck), ethnologischer (Dr. S. Hartmann) und stoffgeschichtlicher Perspektive (nach dem Ansatz von PD Dr. J. Soentgen). Als einerseits „historischer“ und andererseits sehr moderner „Stoff“ besitzt der Weizen nicht nur als „Welternährer“ eine enorme Bindungskraft für die Menschheit, sondern auch, in einem sehr konkreten Sinne, für die globale Agrarindustrie. Unter den Mitdiskutierenden war auch die Leiterin des Museums für Brot & Kunst (Ulm), Dr. Isabel Greschat, mit der das

WZU seither in weiteren Projekten zusammenarbeitet.

Der zweite Teil dieser Tagung sondierte die Möglichkeit der Universität Augsburg, sich an einer Ausschreibung des „Elitenetzwerk Bayern“ für ein „Internationales Doktorand*innenkolleg“ zu beteiligen. Die Forschungsgruppe diskutierte den ersten Entwurf für das Thema eines solchen Kollegs, das dann unter dem Titel „Um(Welt)Denken. Die Environmental Humanities und die Transformation der Gesellschaft“ eine Kooperation mit dem Rachel-Carson-Center (LMU) einging. Im Dezember 2020 erhielt der von zwanzig Wissenschaftler*innen an beiden Universitäten getragene Antrag den Zuschlag für ein inter- und transdisziplinäres „Internationales Doktorand*innenkolleg“ (IDK). Im Rahmen des auf vier Jahre angelegten Kollegs werden insgesamt 12 Promotionsstellen (sieben davon an der Trägeruniversität Augsburg) finanziert; die sich, jeweils interdisziplinär, mit Transformationen im Umweltbereich beschäftigen werden. Ganz im Sinne eines Transfers in die breitere Öffentlichkeit hinein arbeiten die Promovierenden eng mit den außeruniversitären Partnern von WZU und LCC zusammen, um konkrete Projekte zu realisieren, die den Mehrwert der Environmental Humanities auch im gelebten Alltag sicht- und nachvollziehbar machen.

Für die ab Oktober 2021 in Augsburg und München angesiedelte Nachwuchsgruppe sind Workshops auf der UFS vorgesehen. Der Ort, an dem das IDK seinen Anfang nahm, soll also auch für die kommende Generation ein Platz sein, an dem „Um(Welt)Denken“ stattfindet.

Literatur

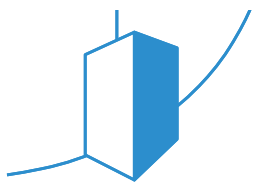
Schmidt, M. und Zapf, H.: Environmental Humanities: Konzepte, Themen, Forschungsperspektiven. Göttingen: V&R Unipress 2021 (in press).

„Environmental Humanities.“ Focus Edition, hrsg. Jens Soentgen, GAIA: Ecological Perspectives for Science and Society, Vol. 29, Nr. 4. 2020 (alle Artikel open access, sie finden sich zum freien Download u.a. auf der Webseite des WZU).

Soentgen, J.: Umweltforschung im Anthropozän. Warum Interdisziplinarität unerlässlich ist. In: Merkur, Heft 860, Januar 2021, 75. Jahrgang, S. 89-95.

Danksagung

Die Tagungen auf der UFS und die Publikationen wurden vom Vorstand des WZU großzügig unterstützt



**Umwelt
Forschungsstation
Schneefernerhaus**

Umweltforschungsstation
Schneefernerhaus GmbH
Zugspitzstraße 5
82475 Zugspitze