



HelmholtzZentrum münchen
German Research Center for Environmental Health



TUM
Technische Universität München



UNA
Universität
Augsburg
University

Freistaat Bayern

WISSENSCHAFTLICHE RESULTATE 2015/2016



Foto: Copyright DLR



Umwelt
Forschungsstation
Schneefernerhaus

NUMMER 04
NOVEMBER 2017

Herausgeber: Umweltforschungsstation Schneefernerhaus GmbH
Zugspitzstr. 5; 82475 Zugspitze
Internet: www.schneefernerhaus.de
Druck: StMUV
Stand: November 2017

Diese Druckschrift wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbenden 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,

die in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, UFS, engagierten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler legen mit diesem Dokument ausgewählte Arbeitsergebnisse vor, die in den Jahren 2015 und 2016 erzielt wurden. In kurzen Beiträgen werden Resultate aus verschiedenen Disziplinen der Umweltwissenschaften sowie der Entwicklung von Technologie und Forschungsinfrastruktur in einer Form dargestellt, die auch von Kolleginnen und Kollegen jeweils benachbarter Disziplinen verstanden werden kann.

Diese Weise der Wissenschaftskommunikation spiegelt eines der strukturgebende Elemente der UFS-Forschung wider: die Untersuchung des Erdsystems erfordert die Betrachtung vieler Prozesse auch aus unterschiedlichen fachlichen Blickwinkeln. Die Zusammenarbeit verschiedener Forschergruppen bei der Beantwortung wissenschaftlicher Fragestellungen ist hier angezeigt. Sie erfordert es, dass fachwissenschaftliche Resultate auch in einer allgemeiner verständlichen Form der Kollegenschaft aus benachbarten Disziplinen präsentiert werden.

Das Spektrum der in den Aufsätzen behandelten Themen umfasst Aspekte der atmosphärischen Spurengase und Aerosole, der Wolken, der Meteorologie und der atmosphärischen Dynamik genauso wie Betrachtungen des Wasserhaushalts, der Bio-, Kryo- und Geosphäre über einen ausgedehnten Skalenbereich in Raum und Zeit.

Stellvertretend für das UFS-Science Team wünsche ich Ihnen viel Freude bei der Lektüre.

Herzlichst
Ihr



Prof. Dr. Michael Bittner
Wissenschaftlicher Koordinator der UFS

INHALTSVERZEICHNIS

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1. Variabilität der planetaren Wellen in der Mesopause <i>L. Küchelbacher, C. Schmidt, S. Wüst, M. Bittner</i>	9
2. Untersuchung der atmosphärischen Dynamik über den Alpen <i>S. Wüst, V. Wendt, C. Schmidt, M. Bittner</i>	14
3. Charakterisierung der Schwerewellenaktivität in der mittleren Atmosphäre über dem Alpenraum <i>P. Hannawald, C. Schmidt, S. Wüst, M. Bittner</i>	17
4. Wasserdampf in der freien Troposphäre und in der unteren Stratosphäre bis in 20 km Höhe <i>T. Trickl, H. Vogelmann</i>	21
5. Räumliche und zeitliche Variabilität der Wasserdampfverteilung in der freien Troposphäre <i>H. Vogelmann, R. Sussmann, T. Trickl</i>	24
6. Erklärung des neuerlichen Methananstiegs durch Atmosphärensondierung auf dem Zugspitze Gipfel <i>R. Sussmann, P. Hausmann, D. Samle</i>	28
7. Vergleich der Partikel-Größenverteilung von APS, OPS und MPSS an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus <i>H. Flentje, W. Thomas, B. Briel, L. Ries</i>	32
8. ^{239}Pu, ^{240}Pu und ^{241}Pu in Neuschnee und akkumuliertem Schnee von der Zugspitze aus den Wintern 2014/2015 und 2015/2016 <i>K. Gückel, T. Shinonaga, M. Christl, J. Tschiersch</i>	36
9. Stabile wasserisotope und Umweltradionuklide als Tracer für Transportprozesse im Schnee – Studie auf Zugspitze, Sonnblick und Jungfraujoch <i>K. Hürkamp, N. Zentner, E.-M. Schiestl, A. Reckerth</i>	39
10. Einfluss von Umweltparametern auf die sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung im Alpenraum <i>V. Mares, T. Brall, R. Bütikofer, G. Donth, W. Rühm</i>	45

11.	AlpEnDAC - Saharastaub über Süddeutschland: Ein Beispiel für „computing-on-demand“ <i>C. Harsch, G. Gesell, J. Meyer-Arneke, S. Hachinger, M. Bittner</i>	50
12.	Monitoring und tracer-basierte hydrologische Untersuchungen im Einzugsgebiet der Partnach <i>S. Weishaupt, K.-F. Wetzel</i>	53
13.	Statistisches Downscaling meteorologischer Variablen mit hydrologischer Relevanz an der Station Zugspitze und der Station Hoher Sonnblick <i>S. Kaspar, A. Philipp, J. Jacobeit</i>	57
14.	Auswirkungen des Klimawandels auf den Bergwald im Werdenfelser Land <i>A. Menzel, N. Kern, C. Schunk</i>	60
15.	Pollenkonzentrationen an der UFS und in Gebäuden <i>A. Menzel, S. Jung, N. Estrella</i>	63
16.	Flora, Vegetation und Vegetationsdynamik auf dem Zugspitzplatt vegetationsökologische Forschung auf dem Zugspitzplatt 2015 & 2016 <i>O. Korch, A. Friedmann</i>	65
17.	Ableitung von Wolkeneigenschaften aus Radar- und Satellitenmessungen <i>M. Hagen, A. Häring</i>	70
18.	Trajektorien-basierte Cluster- und Herkunftsanalysen der CO₂-Konzentrationen am Schneefernerhaus <i>E. Giemsa, J. Jacobeit, L. Ries, G. Frank, S. Hachinger, J. Meyer-Arneke</i>	74
19.	Unterkühltes Flüssigwasser – Langzeitliche Messungen an der UFS liefern die Basis für verbesserte globale Messmethoden <i>S. Kneifel, U. Löhnert, B. Pospichal, S. Crewell</i>	78
20.	Radon-222 und Beryllium-7 als natürliche Tracer <i>G. Frank, J. Salvamoser, T. Steinkopff, L. Ries</i>	81
21.	Messungen von Aerosol- und Spurengasprofilen mit dem MAX-DOAS Instrument an der UFS <i>Z. Wang et al., K.-P. Heue, N. Hao, R. Holla</i>	85

22. **Machbarkeitsstudie "Aerosol Supersite" – UAV-Einsatz zur innovativen Validierung von satellitengestützter Aerosolbestimmung** 91
M. Neumann, M. Hank, T. Popp, T. Trickl, A. Philipp, W. Junkermann, H. Vogelmann, F. Seibel, D. Schmidt, V. Ziegler
23. **Sondierung meteorologischer Parameter mit unbemannten Luftfahrtsystemen** 95
A. Philipp, E. Petersen, J. Jacobeit
24. **Schneehydrologische Modellierung und Schneedeckenmonitoring im Einzugsgebiet des Partnach Ursprungs** 100
M. Weber, M. Bernhardt, R. Ludwig
25. **Langzeit-Monitoring der Permafrost-Dynamik in der Zugspitznordwand (TUM Landslides)** 106
M. Krautblatter, M. Wittmann, P. Mamot, T. Schröder, S. Eppinger
26. **Untersuchungen zur Hochgebirgspedosphäre auf dem Zugspitzplatt** 111
S. Grashey-Jansen, S. Dötterl
27. **Auswirkungen der täglichen chronisch intermittierenden hypobaren Hypoxie auf den Lungenkreislauf** 115
J. Götschke, P. Mertsch, N. Kneidinger, D. Kauffmann-Guerrero, J. Behr, R. M. Huber, F. Reichenberger, K. Milger
28. **Wahrnehmung des Klimawandels bei Patienten mit chronischen Lungenerkrankungen** 117
J. Götschke, P. Mertsch, M. Bischof, N. Kneidinger, S. Matthes, E. D. Renner, K. Schultz, C. Traidl-Hoffmann, H.-W. Duchna, J. Behr, J. Schmude, R. M. Huber, K. Milger

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	Österreich
AlpEnDAC	Alpine Environmental Data Analysis Center accelerator mass spectrometry
AMS	/Beschleunigermassenspektrometrie
AMS	Aerosol-Mess-Station
ANOVA	englisch analysis of variance
AOD	Aerosol optische Dicke
APS	Aerodynamisches Partikel-Spektrometer
ASWE	Akkumuliertes Schneewasseräquivalent
Be-7	Beryllium
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOKU Wien	Universität für Bodenkultur Wien
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CAT	Assessment Test
CH	Schweiz
CIHH	Chronisch Intermittierende hypobare Hypoxie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COPD	Chronisch obstructive Lungenerkrankung
CRHM	Cold Regions Hydrological Model
CTC	Zirkulationstyp-Klassifikationsverfahren
CTM	Chemische Transportmodelle
D	Deutschland
DO	Mittlerer Tröpfchendurchmesser
DAI	Dynamischer Aktivitätsindex
dBz	Dezibel
DIAL	Differentielles Absorptions-Lidar
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DPR	Dual Polarization Radiometer
DSCD	Differentielle schräge Säulendichte
DWD	Deutscher Wetterdienst
ECMW	Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage
EMD	Empirical Mode Decomposition
ENAC	Ecole Nationale de l'Aviation Civile
ENSO	El Niño Southern Oscillation
EPP	Expanded Polypropylen Bonner Vielkugelspektrometer / extended-range Bonner
ERBSS	sphere spectrometer
EZG	Einzugsgebiet
FAIM	Fast Airglow Imager
FTIR	Infrarot-Fourier-Transform-Spektrometer
GAW	Global Atmosphere Watch
GCM	Globale Klimamodelle
GFS	Global Forecast System
GHz	Gigahertz

GOME-2	Global Ozone Monitoring Experiment - 2
GPS	Global Positioning System
GRIPS	GROund-based Infrared P-branch Spectrometer
H	Wasserstoff
HATPRO	Humidity and Temperature Profiler
HCHO	Formaldehyd
He	Helium
HMGU	Helmholtz Zentrum München
HONO	Salpetrige Säure
HRU	Hydrological Response Units
HSRL	high-spectral-resolution lidar
IMK-IFU	Institut für Meteorologie und Klimaforschung
IWC	Eiswassergehalt
IWP	Eiswasserpfad
IWV	Vertikal integrierter Wasserdampfgehalt
KIT	Karlsruher Institute of Technology
KNN/ ANN	Künstliche Neuronale Netze
kPa	Kilo Pascal
Lidar	Light Detection And Ranging
LMU	Ludwig-Maximilians Universität
LUDWIG Pro- jekt	Länderübergreifende Untersuchung der atmosphärischen Dynamik von Wellen im Gebirge
LWD	Lawinenwarndienst
m ü. NN	Meter über Normal Null
MAX-DOAS	Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy
MC	Monte Carlos
MESZ	Mitteuropäische Sommerzeit
MetOp-A	Meteorological Operational Satellite - A
MeV; GeV; keV; eV	Mega; Giga; Kilo, Elektronen Volt
MgCO ₃	Magnesiumcarbonat
MPSS	Mobilitäts Partikel Größen Spektrometer
MSL	Mean sea level
MWR	Mikrowellenradiometer
NCEP	National Centers for Environmental Prediction Network for the Detection of Atmospheric Composition Change
NDACC	Change
NDMC	Network of the Detection of Mesospheric Change
NM N	neutronenmonitor
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
nSv/h	Nanosievert pro Stunde
OPN	Oberpfaffenhofen
OPS	Optisches Partikel-Spektrometer
PCA	Hauptkomponentenanalyse
pCO ₂	Kohlendioxidpartialdruck
PE	Polyethylen
PGV	Partikelgrößenverteilung

Po-218; Po-214	Polonium
ppm	Parts per million
PSCF	Potential Source Contribution Function
QBO	Quasi Biennalen Oszillation
RCF	reference class forecast
Rn-222	Radon
SBO	Sonnblick Observatorium
sPAP	systolische Pulmonalarteriendruck
SpO ₂	Sauerstoffsättigung
SOC-Gehalt	Schwefelsulfid-Gehalt
SWE	Schneewasseräquivalent
TAPSE	Tricuspid annular plane systolic excursion
TKC	Turner-Kneifel-Cadeddu Modell
UAS	Unmanned aerial systems
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UBA	Umweltbundesamt
	Umweltforschungsstation Schneefernerhaus
UFS	Environmental Research Station Schneefernerhaus
UFW	Unterkühltes Flüssigwasser
UTC	Coordinated Universal Time
UV	Ultraviolettes Licht
VAO	Virtuelles Alpenobservatorium
VEL	Dopplergeschwindigkeit
VIS	Sichtbares Licht
WMO	World Meteorological Organization
XC ₂ H ₆	Ethan
XCH ₄	Methan
Z	Reflektivität
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

VARIABILITÄT DER PLANETAREN WELLEN IN DER MESOPAUSE

LISA KÜCHELBACHER^{1,2}, CARSTEN SCHMIDT², SABINE WÜST², MICHAEL BITTNER^{1,2}

¹UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, AFE-UNIVERSITÄTSSTRASSE 1, 86159 AUGSBURG

²DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, DLR-DFD - MÜNCHENER STRASSE 20, 82234 WESSLING

E-MAIL: LISA.KUECHELBACHER@DLR.DE

Zusammenfassung: Der stetige Wechsel der Großwetterlage in den mittleren Breiten ist zurückzuführen auf großräumige atmosphärische Wellen. Diese „planetare Wellen“ steuern nicht nur unser Wetter, sie beeinflussen maßgeblich die Dynamik der Atmosphäre bis in etwa 100 km Höhe. Um die langzeitliche Aktivität planetarer Wellen in der Mesopausenregion (ca. 80 bis 100 km) charakterisieren zu können, wurde der dynamische Aktivitätsindex (DAI) berechnet. Die Daten basieren auf „airglow“-Messungen. Die Daten weisen darauf hin, dass die Aktivität der planetaren Wellen auf unterschiedlichen Zeitskalen variiert.

Abstract: The steady change of weather patterns in the middle latitudes is characterized by large scale, atmospheric waves. The so called “planetary waves” influence not only our weather patterns, but also the whole dynamic of the atmosphere up to an altitude of about 100 km. To characterize the long term variability of planetary waves in the Mesopause region (ca. 80 to 100 km), we calculated a measure for their activity, called dynamical activity index (DAI) based on airglow-measurements. The data indicate, that the activity of those waves varies on different time scales.

Die Großwetterlage der mittleren Breiten ist durch einen ständigen Wechsel zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten geprägt. Dieser Wechsel entlang eines Breitenkreises lässt sich auf die Wirkung planetarer Wellen zu-

rückführen. Hoch- und Tiefdruckgebiete werden durch sie entlang der Breitenkreise verschoben. Planetare Wellen breiten sich insbesondere im Winter über die Troposphäre hinaus bis in die Strato- und Mesosphäre aus (Madden, 2007). Besonders in der Mesosphäre lassen sich vergleichsweise kleine Änderungen in der Wellenaktivität deutlicher nachweisen, da hier der Luftdruck nur noch etwa ein Millionstel des Luftdrucks an der Erdoberfläche beträgt. Da für die Wellen aber die Energie- und Impulserhaltung gilt, wachsen ihre Amplituden entsprechend an. Die Atmosphäre wirkt damit wie ein natürliches Vergrößerungsglas (Smith, 2012).

In etwa 87 km werden die Emissionen des Hydroxyl-Moleküls mit dem Infrarot-Spektrometer GRIPS (GROund-based Infrared P-branch Spectrometer) berührungslos aufgenommen (Schmidt et al. 2013, Bittner et al. 2002). Die Langzeitmessungen der Mesopausentemperatur in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) dienen als Kontrollelement im NDMC (Network for the Detection of Mesospheric Change; Abb. 1). Auf Basis von nächtlichen Temperaturmessungen kann mit dem GRIPS-Instrument die Aktivität planetarer Wellen, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist, abgeschätzt werden. Dabei repräsentiert die rote Kurve die Wellenaktivität für die Messungen über Wuppertal, die blaue Kurve die Verhältnisse über Oberpfaffenhofen. Details des Berechnungsverfahrens der Aktivität planetarer Wellen geben (Küchelbacher et al., 2015; Höppner, 2007).

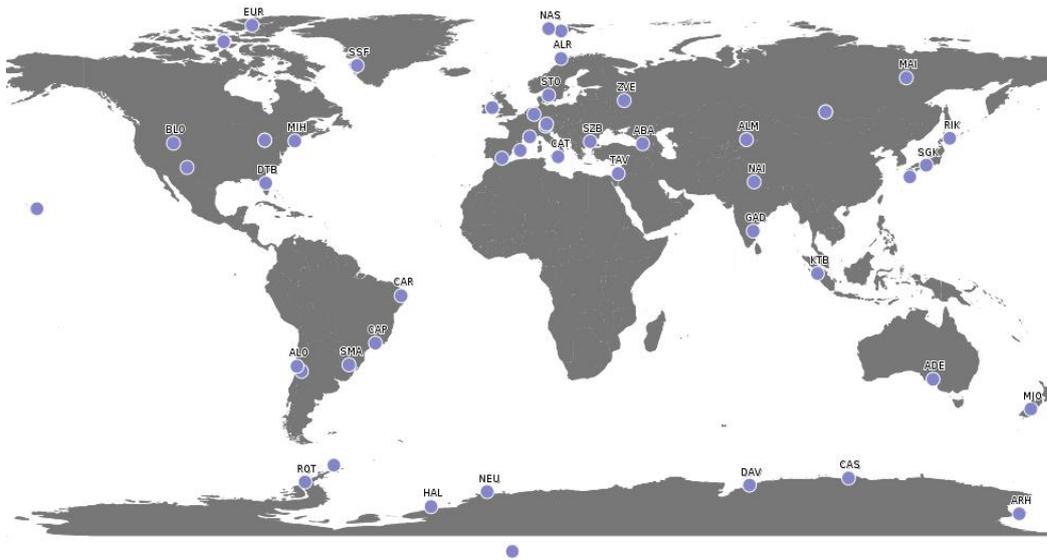


Abb. 1: Weltkarte der Messstationen des Network for the Detection of Mesospheric Change (NDMC) (<https://www.wdc.dlr.de/ndmc>)

Der Verlauf der Wellenaktivität ist geprägt von unterschiedlichen Modulationen. Diese Modulationen können mittels Spektralanalysemethoden identifiziert werden. Das bedeutet, ganz vereinfacht, dass das ursprüngliche Signal als eine Linearkombination einzelner Schwingungen mit unterschiedlichen Periodendauern aufgespalten wird. Fast alle gängigen Spektralanalysemethoden (z. B. Fourieranalyse) setzen dabei Stationarität voraus. Das bedeutet, dass alle statistischen Momente der Zeitreihe (z. B. Mittelwert, Varianz, Schiefe, etc.) zu jedem Zeitpunkt identisch sind. Übertragen auf die Wellenaktivität bedeutet dies, dass sowohl Amplitude und Periode einer Schwingung über die gesamte Zeitreihe konstant sind. Gerade klimatologische Zeitreihen zeichnen sich durch hohe nichtstationäre Variabilität aus. Damit werden Ergebnisse, die durch Anwendung herkömmlicher Spektralverfahren erzielt wurden, angreifbar. Häufig werden daher solche Verfahren auf zeitlich verkürzte Abschnitte der Zeitreihe angewendet, in der Hoffnung, dass zumindest abschnittsweise Stationarität angenommen werden darf. Ein recht verbreitetes Verfahren hierzu stellen etwa die Waveletana-

lyse (Torrence & Compo, 1998; Bittner, 1994 2000).

Eine leistungsfähige Methode, die nichtstationäre Signale entfalten kann, ist die sogenannte "Empirical Mode Decomposition" (EMD) Analyse, wie sie von Huang et al. (1998) entwickelt wurde. Sie zerlegt ein Signal in einzelne Komponenten bzw. Moden, wobei sowohl Amplitude als auch Frequenz des zu analysierenden Signals zeitlich variieren.

Die Extraktion eines Modus aus dem Datensatz nennt sich „sifting“: Zunächst werden alle lokalen Extrema des Datensatzes identifiziert. Anschließend werden die Maxima bzw. Minima mittels je eines kubischen Splines verbunden. Die Fläche zwischen den beiden Splines deckt alle Datenpunkte der Zeitreihe ab. Aus beiden Splines wird für alle Orte der Abszisse ein Mittelwert berechnet. Diese Mittelwerte werden vom ursprünglichen Datensatz subtrahiert. Mit den Residuen wird analog vorgegangen usw. Die Funktionswerte nähern sich schließlich null bis eine definierte Abbruchbedingung greift, da ein weiterer Durchgang kaum eine Verbesserung mehr bringt. Die ermittelte Zeitreihe kann als erster Modus

bezeichnet werden. Auf diese Weise wird das Signal, welches den größten Anteil an der Variabilität der zu untersuchenden Zeitreihe ausmacht, als erstes beschrieben. Im zweiten Schritt wird der erste Modus vom Rohdatensatz extrahiert. Anschließend wird auf diese neue Zeitreihe wiederum die Sifting-Prozedur angewandt, um den nächsten Modus zu extrahieren. So wird das Ausgangssignal also in nicht notwendigerweise stationäre

wärtswandernde Änderung von West- zu Ostwinden in der Stratosphäre. Obwohl die QBO grundsätzlich eine tropische Oszillation ist, hat sie dennoch einen signifikanten Einfluss auf die gesamte atmosphärische Dynamik (Baldwin et al., 2001).

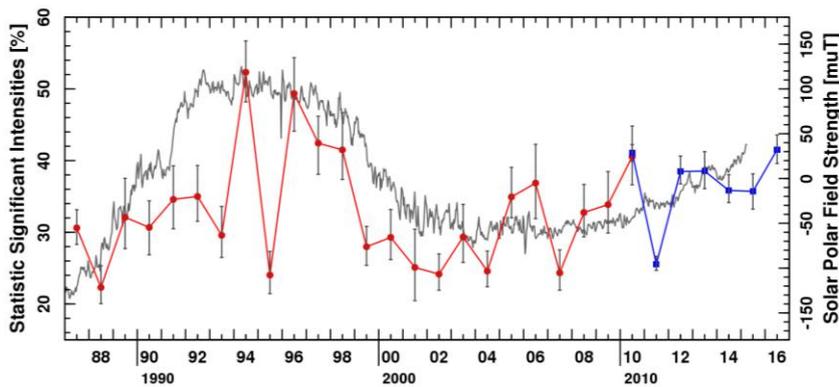


Abb. 2: Verlauf der planetaren Wellenaktivität in der Mesopause abgeleitet aus Messungen von GRIPS II (rot) und GRIPS 6 (blau) von 1987 bis 2015. Die schwarzen Balken stellen den Unsicherheitsbereich des Index dar. In grau dargestellt ist die solare Magnetfeldstärke der Sonne (Hale-Zyklus).

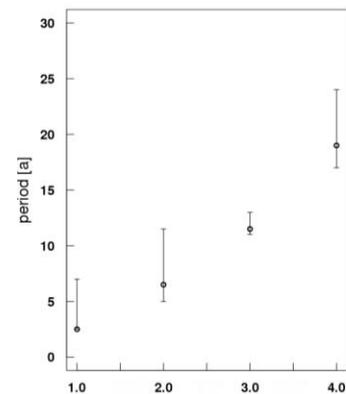


Abb. 3: Mittels der Empirical Mode Decomposition Methode extrahierte Moden der planetaren Wellenaktivität (Abb. 2) inkl. Unsicherheitsbereiche.

Moden aufgeteilt, die in ihrer Summe das Ausgangssignal ergeben.

Die EMD-Analyse der in Abbildung 2 gezeigten planetaren Wellenaktivität zerlegt das Signal in vier Moden. Die typischen Periodendauern der Moden sowie deren Schwankungsbreite im Verlauf der Zeitreihe lassen sich sodann durch eine waveletbasierte Analyse ermitteln. Sie sind in Abbildung 3 dargestellt.

Der erste Modus hat eine Periodendauer von etwa 2,5 Jahren. Diese hat eine sehr große Ähnlichkeit mit der Quasi Biennalen Oszillation (QBO), die typischerweise eine Periodizität von etwa 28 Monaten aufweist (Baldwin et al. 2001). Diese Variabilität beschreibt die ab-

Der zweite Modus weist eine Periodendauer von etwa sechs Jahren auf. Zurückzuführen ist dies möglicherweise auf die El Niño Southern Oscillation (ENSO), die typischerweise zwischen zwei und zehn Jahren schwankt (Philander, 1983). Hierbei handelt es sich um eine Kopplung zwischen Ozean und Atmosphäre. Dabei schwanken die Temperaturen des Pazifiks vor der Westküste Lateinamerikas zwischen besonders kalt (La Niña) und warm (El Niño). Damit einher geht eine Änderung in der zonalen äquatorialen Zirkulation. Auch das ENSO-Signal breitet sich vertikal in der Atmosphäre aus. So konnten beispielsweise Li et al. (2013) das ENSO-Signal in Temperaturen der Mesopause nachweisen. Der dritte Modus hat eine Periodendauer von etwa elf Jahren mit vergleichsweise kleinem

Unsicherheitsbereich. Die Intensität der Sonnenstrahlung (Sonnenfleckenzyklus, bzw. Schwabe Zyklus) schwankt bekanntermaßen mit einer Periodendauer von elf Jahren und legt einen ursächlichen Zusammenhang mit der solaren Aktivität nahe. Der Zusammenhang von atmosphärischen Parametern mit dem Sonnenfleckenzyklus ist seit langem bekannt und wurde auch in der Mesopausenregion bereits beschrieben (z. B. Beig, 2011, 2008).

Der vierte Modus hat eine Periodendauer von etwa 22 Jahren. Der Ursprung dieses Signals ist derzeit nicht bekannt. Wir gehen vorläufig davon aus, dass dieses Signal dem Magnetfeldzyklus (Hale-Zyklus) der Sonne zugeordnet werden könnte (Höppner & Bittner, 2007). Die Zeitreihe umfasst 29 Jahre und deckt den Zyklus einmal ab. Die Länge der Zeitreihe lässt hier also vorerst nur eine spekulative Zuordnung zu. In Abbildung 2 ist der Hale-Zyklus in dunkelgrau dargestellt. Der Zusammenhang ist für das Auge deutlich zu erkennen. Eine Kreuzkorrelation zeigt die eine Übereinstimmung (0,8) beider mittels EMD analysierter Kurven, Der Hale-Zyklus könnte damit eine Erklärung für den übergeordneten Verlauf der planetaren Wellenaktivität sein. Eine Analyse der planetaren Wellenaktivität, basierend auf Temperaturen der ERA-Interim Reanalysen, zeigt diesen vierten Modus auch in den Höhenbereichen der Tropo- und der Stratosphäre sowohl bei stationärer als auch bei globaler Betrachtung. Die Aufdeckung des genannten Wirkungsmechanismus ist Gegenstand fortlaufender Forschung und geht über den Rahmen dieses Aufsatzes hinaus.

Insgesamt zeigt sich, dass die Aktivität planetarer Wellen in 87 km Höhe während der letzten 30 Jahre nachweislich variiert. Mittels der beschriebenen EMD lässt sich das Signal der planetaren Wellenaktivität in vier nicht-stationäre Moden aufspalten, deren mittlere

Periodizität große Ähnlichkeit mit in der Atmosphäre bekannten, natürlichen Prozessen (QBO, NSO, solare Einflüsse) hat. Gerade der 22-jährige Modus ist aufgrund seiner hohen Korrelation mit dem Hale-Zyklus der Sonne interessant. Aufgrund der Kürze der Zeitreihe und dem noch fehlenden physikalischen Mechanismus kann hierzu gegenwärtig aber nur spekuliert werden.

Literatur

Beig, G.: Long-term trends in the temperature of the mesosphere/lower thermosphere region: 2. Solar response. *J. Geophys. Res.*, 116, A00H12, 2011.

Beig, G., Scheer, J., Mlynczak, M. G., und Keckhut, P. (): Overview of the temperature response in the mesosphere and lower thermosphere to solar activity. *Rev. Geophys.*, 46, RG3002, 2008.

Baldwin M. P., Gray, L. J., Dunkerton, T. J., Hamilton, K., Haynes, P. H., Randel, W. J., Holton, J. R., Alexander, M. J., Hirota, I., Hironouchi, T., Jones, D. B. A., Kinnnersley, J. S., Marquardt, C., Sato, K. und Takahashi, M.: The quasi-biennial oscillation. *Rev. Geophys.* 30(2), S. 179-229, 2001.

Bittner, M., Offermann, D., Bugaeva, I.A., Kokin, G.A., Koshelkov, J.P., Krivolutsky, A., Tarasenko, D.A., Gil-Ojeda, M., Hauchecorne, A., Lübken, F.-J., de la Morena, B.A., Mourier, A., Nakane, H., Oyama, K.I., Schmidlin, F.J., Soule, I., Thomas, L. und Tsuda, T.: Long period/large scale oscillations of temperature during the DYANA campaign, *J. Atm. Terr. Phys.*, 56, 1675-1700, 1994.

Bittner, M., Offermann, D., und Graef, H.-H. : Mesopause temperature variability above a midlatitude station in Europe. In: *JGR* 105. S. 2045-2058, 2000.

Bittner, M., Offermann D., Graef H.H. und Hamilton K.: An 18-year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations, *J. Atm. Sol. Terr. Phys.*, 64, 1147-1166, 2002.

Höppner, K. und Bittner, M.: Evidence for Solar Signals in the Mesopause Temperature Variability? *JASTP* 69, 431-448, 2007.

Huang N., Shen Z., Long, S. R., Wu, M.C., , Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C. und Liu, H.H.: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proc. R. Soc. Lond. A.*, 454, 903 – 995, 1998.

Küchelbacher L., Schmidt, C., Wüst, S., und Bittner, M.: Aktivitätsindex der planetaren Wellen in der Mesopause (ca. 87 km Höhe). *Wissenschaftliche Resultate Schneefernhaus*, 2015.

Küchelbacher, L.: Die Stratosphärenwärmungen 2012/2013: Einfluss der großräumigen Dynamik auf die Stratosphäre und Mesosphäre. Bachelorarbeit, 2014.

Li T., Calvo, N., Yue, J., Dou, X., Ill, J. M. R., Mlynczak, M. G., She, C.-Y, Xue, X.: Influence of El Nino-Southern Oscillation in the mesosphere. *Geophys. Res Let.* 40 (12), 3292-3296, 2013.

Madden, R.A.: Large-scale, free Rossby waves in the atmosphere – an update, *Tellus*, 59A, 571-590, doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00257.x, 2007.

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,doi:10.1016/j.jastp.2013.05.001, 2013.

Smith, A.K.: Global Dynamics of the MLT, *Surv. Geophys.*, 33, 1177-1230, doi: 10.1007/s10712-012-9196-9, 2012.

Torrence C. und Compo G. P.: A Practical Guide to Wavelet Analysis. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 79. S. 61 – 78, 1998.

UNTERSUCHUNG DER ATMOSPHÄRISCHEN DYNAMIK ÜBER DEN ALPEN

SABINE WÜST¹, VERENA WENDT², CARSTEN SCHMIDT¹, MICHAEL BITTNER^{1,3}

¹DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT OBERPFAFFENHOFEN,
OBERPFAFFENHOFEN, 82234 WEßLING

²EHEMALS UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS

³UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK

E-MAIL: SABINE.WUEST@DLR.DE

Zusammenfassung: Schwerewellen transportieren Energie und Impuls über weite Strecken in der Atmosphäre und übertragen sie an die Umgebung. So können sie z. B. atmosphärische Strömungssysteme oder das Temperaturgefüge signifikant beeinflussen. Um Schwerewellen in Klima- und Atmosphärenmodellen adäquat zu berücksichtigen, ist es deswegen wichtig, die Menge an Energie, die sie transportieren, zu kennen.

Eine der prominentesten Entstehungsorte von Schwerewellen sind Gebirgszüge wie die Alpen. Die dortigen NDMC¹-Stationen können genutzt werden, um die Schwerewellenenergie zu quantifizieren.

Abstract: Gravity waves transport energy and momentum over large distances in the atmosphere and influence for example wind and temperature of the surrounding atmosphere. In order to consider gravity waves adequately in climate and atmosphere models, it is important to gain knowledge about the amount of energy they transport. One of the most prominent gravity wave "sources" are mountain ridges like the Alps. The data of the alpine NDMC¹ stations can help quantifying the amount of gravity wave energy.

Die Dynamik der Atmosphäre ist durch Wellen auf unterschiedlichen raum-zeitlichen Skalen geprägt. Dabei gehören Schwerewellen mit horizontalen Wellenlängen von wenigen Kilometern bis zu mehreren tausend Kilometern zu den eher kleinskaligen atmosphärischen Wellen. Dennoch transportieren Schwerewellen große Mengen von Impuls und Energie über weite Strecken in der Atmosphäre und haben daher signifikanten Einfluss auf die globale Zirkulation (Fritts & Alexander, 2003). Eine der prominentesten Entstehungsorte von Schwerewellen sind Gebirgszüge wie z. B. die Alpen.

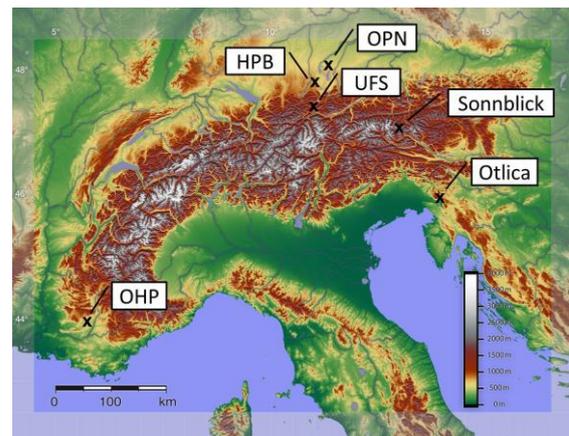


Abb.1: Die NDMC-Stationen im Alpenraum umfassen sechs baugleiche GRIPS-Geräte (Oberpfaffenhofen, UFS, Haute-Provence, Sonnblick und Otlica) und ein GRIPS-Gerät der alten Generation (Hohenpeißenberg). Karte: CC some rights re-served
https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Alpenrelief_01.jpg, User: Perconte, Based on SRTM data.

¹ Network for the Detection of Mesospheric Change, <https://www.wdc.dlr.de/ndmc/>

Um konsistente Informationen über die globale Wellenaktivität zu erhalten, ist eine ho-

mogene, globale Datenbasis notwendig. Hier sind Satellitendaten die erste Wahl. Allerdings sind satellitenbasierte Instrumente für kleinskalige Prozesse häufig nicht empfindlich genug (siehe hierzu auch Wüst et al., 2015). Eine Alternative stellen Messungen globaler bodenbasierter Netzwerke dar, die Daten bekannter Qualität mit möglichst ähnlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung erheben. Letzteres ist häufig eine große Herausforderung, wenn unterschiedliche Gruppen die Geräte betreiben.

Um Schwerewellen zu untersuchen, sind vertikale oder horizontale Profile bestimmter Parameter, wie z. B. der Temperatur, der Windgeschwindigkeit, der Dichte usw. erforderlich. Zwei Messnetzwerke, die u. a. Temperaturen im Bereich der mittleren Atmosphäre (10 – 100 km Höhe) erfassen, sind das „Network for the Detection of Mesospheric Change“ (NDMC,

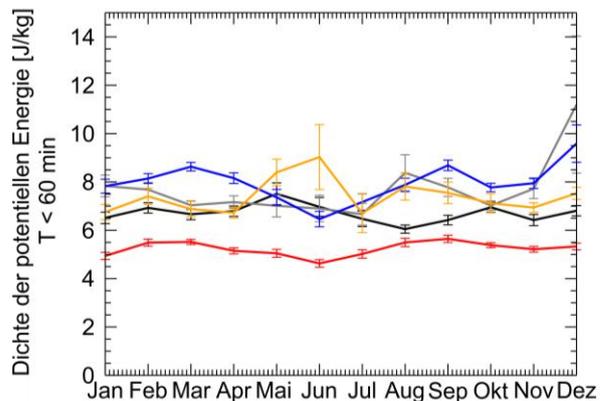
<https://www.wdc.dlr.de/ndmc/>) und das „Network for the Detection of Atmospheric Composition Change“ (NDACC, <http://www.ndsc.ncep.noaa.gov/>).

Das NDMC betreibt mittlerweile sechs baugleiche Infrarotspektrometer GRIPS (GROund based Infrared P-branch Spectrometer, Schmidt et al., 2013 oder Hannawald et al., 2017) im Bereich der Alpen (Abb. 1): in Deutschland in Oberpfaffenhofen (GRIPS 6) und in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) (GRIPS 7 und 8), in Österreich am Sonnblick (GRIPS 16), in Frankreich am Observatorium Haute-Provence (GRIPS 12) und in Slowenien, in Otlica (GRIPS 9). Mithilfe dieser Geräte ist es möglich, die Temperatur in ca. 90 km Höhe berührungslos vom Boden aus zu messen.

Wie oben erwähnt transportieren Schwerewellen Energie in der Atmosphäre. Eine Energieform ist die so genannte potentielle Energie, die mithilfe der GRIPS-Messungen abgeleitet werden kann. Abbildung 2 zeigt den Verlauf der potentiellen Energiedichte, also in

diesem Fall der potentiellen Energie pro kg Luft, im Jahresverlauf für die alpinen / alpennahen Stationen Oberpfaffenhofen, Haute-Provence, UFS und Sonnblick. Zum Vergleich mit einem anderen Gebirge sind ebenfalls die Ergebnisse für Abastumani im kleinen Kaukasus dargestellt. Die Messungen zeigen ein klares Wintermaximum und z. T. auch ein Sommermaximum für Perioden länger als 60 min. Das Ergebnis für kurzperiodische Schwerewellen ist weniger eindeutig. Im Allgemeinen transportieren die kurzperiodischen Schwerewellen circa eine Größenordnung weniger Energie als die langperiodischen.

a)



b)

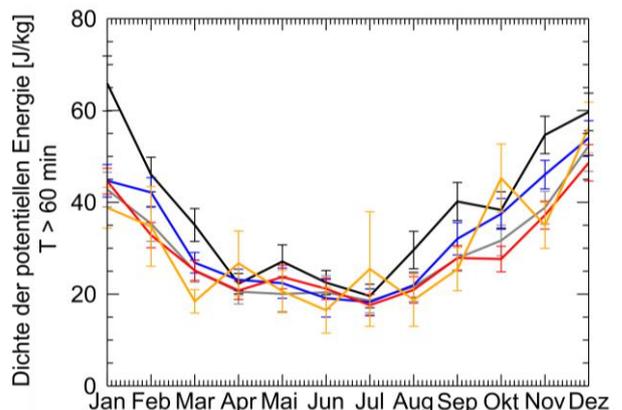


Abb.2:Dichte der potentiellen Energie: a) für Periodendauern kleiner als 60 min, b) für Periodendauern größer als 60 min (schwarz: Abastumani, grau: Oberpfaffenhofen, blau: UFS, rot: Haute-Provence, orange: Sonnblick) berechnet für den Zeitraum ab 2011 (bzw. Beginn der Messungen am jeweiligen Observatorium) bis Mitte 2017.

Die bemerkenswertesten Ergebnisse sind an der UFS zu beobachten, wo für einige Zeit

zwei GRIPS-Systeme unter verschiedenen Zenitwinkeln (ca. 60° und 45°) und daher mit zwei unterschiedlich großen Gesichtsfeldern gemessen haben (hier nicht gezeigt, siehe Wüst et al., 2016). Signifikante Differenzen existieren sowohl was die absoluten Energiewerte als auch was die jahreszeitliche Variabilität betrifft. Dies macht deutlich, dass die Ergebnisse z. T. stark von der Größe des Gesichtsfeldes des jeweiligen Messgerätes abhängen. Aus dem Verhältnis der Energiedichten für die unterschiedlichen Zenitwinkel lässt sich schließen, welche horizontalen Wellenlängen der Schwerewellen, die von der UFS aus vermessen werden, im Durchschnitt dominieren: ca. 70 km bis ca. 200 km für Perioden kürzer als 60 min und ca. 120 km und mehr für Perioden länger als 60 min. Daraus ergibt sich für Wellen mit Periodendauern kürzer als 60 min, eine minimale horizontale Phasengeschwindigkeit von ca. 19 m/s.

Weitere Informationen und Details zu diesem Thema sind in Wüst et al. (2016) zu finden.

Literatur

Fritts, D. C. und Alexander, M. J.: Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, 41, 3-1-3-64 10.1029/2001RG000106, 2003.

Hannawald, P., Schmidt, C., Wüst, S. und Bittner, M.: Charakterisierung der Schwerewellenaktivität in der mittleren Atmosphäre über dem Alpenraum –UFS Wissenschaftliche Resultate 2015/2016, 2017.

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. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 102, 125-139, 2013.

Wüst, S., Wendt, V., Schmidt, C. und Bittner, M.: Bedeutung von Hochgebirgszüge für den Energie-transport in der Atmosphäre, UFS Wissenschaftliche Resultate 2014/2015, 2015.

Wüst, S., Wendt, V., Schmidt, C., Lichtenstern, S., Bittner, M., Yee, J.-H., Mlynczak, M. G. und Russell III, J. M.: Derivation of gravity wave potential energy density from NDMC measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 138-139: 32-46, 10.1016/j.jastp.2015.12.003, 2016.

Danksagung

Wir danken besonders dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (BayStMUV) und der europäischen Union für Ihre Unterstützung im Rahmen der Projekte LUDWIG (BayStMUV, Projektnummer TUSo1 UFS-67093, 2014 - 2017), BHEA (BayStMUV, Projektnummer TLK01U-49580, 2010 - 2013) und ARISE (EU, Grant agreement No: 284387, 2012-2014).

Außerdem danken wir den Betriebsmannschaften der Observatorien Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, Sonnblick und Haute-Provence.

Die verwendeten GRIPS-Daten sind im Weltdatenzentrum für Fernerkundung der Atmosphäre (<https://www.wdc.dlr.de/ndmc/>) archiviert. Sie sind zudem auch über das VAO-Alpine Environmental Data Analysis Center, AlpEnDAC, (<http://alpendac.eu>) zugreifbar.

CHARAKTERISIERUNG DER SCHWEREWELLENAKTIVITÄT IN DER MITTLEREN ATMOSPHERE ÜBER DEM ALPENRAUM

PATRICK HANNAWALD¹, CARSTEN SCHMIDT², SABINE WÜST², MICHAEL BITTNER^{1,2}

¹UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄTSSTRAßE 1, 86159 AUGSBURG

²DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT OBERPFAFFENHOFEN

E-MAIL: PATRICK.HANNAWALD@DLR.DE

Zusammenfassung: Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) betreibt in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) Instrumente zur Vermessung des OH-Nachtleuchtens (engl.: airglow) aus der Mesopausenregion in ca. 87 km Höhe. Für eine bessere raumzeitliche Abdeckung im Alpenraum wurde im Zuge der Etablierung des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO) die Beobachtungskapazität um weitere Instrumente am Sonnblick-Observatorium in Österreich ausgebaut. So können erstmals detaillierte Statistiken über die Charakteristika von Schwerewellen in diesem Gebiet des Alpenraums erstellt werden.

Abstract: The German Aerospace Center (DLR) has been operating several instruments for the observation of the mesospheric OH-airglow (ca. 87 km height) at the Environmental Research Station Schneefernerhaus (UFS) since 2005. For a better coverage above the Alps in both space and time the observational capacity was increased in the frame of the Virtual Alpine Observatory (VAO) by further instruments placed at the Sonnblick Observatory in Austria. For the first time detailed statistics of the propagation characteristics of gravity waves in a selected part of the Alpine region can now be provided.

Zur Charakterisierung der atmosphärischen Dynamik in der mittleren Atmosphäre betreibt das DLR im Alpenraum im Moment sechs Instrumente vom Typ GRIPS (GROund-based Infrared P-branch Spectrometer) und drei vom Typ FAIM (Fast Airglow IMager). Die Geräte messen die raumzeitliche Variabilität des Airglows in etwa 87 km Höhe, die Informationen über die Dynamik der Atmosphäre in weiten Skalenbereichen von Raum und Zeit liefert. So werden Rückschlüsse möglich z.B. über die Veränderung der globalen residuellen Zirkulation, die in diesem Höhenbereich durch kalte Sommer und warme Winter charakterisiert ist; ein Phänomen, welches nur durch dynamische Prozesse erklärt werden kann und eindrucksvoll die Bedeutung insbesondere von atmosphärischen Schwerewellen aufzeigt.

Schwerewellen werden unter anderem durch Luftströmungen über den Alpen angeregt. Die Verfolgung des Lebenszyklus von Schwerewellen, von ihrer Anregung über ihre Ausbreitung bis in die Höhen der oberen Mesosphäre und unteren Thermosphäre, kann in den Alpen also gut studiert werden. Gerade auf Höhe der oberen Mesosphäre brechen die Wellen häufig und übertragen Energie und Impuls auf die umgebende Atmosphäre. Die Beobachtung dieses Höhenbereichs ist mit der Vermessung des Airglows besonders gut möglich.

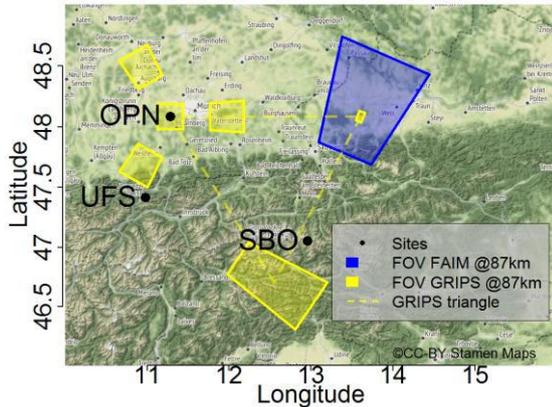


Abb.1: Ausgewählte Gesichtsfelder der GRIPS-Instrumente (gelb) und der FAIM-Systeme (blau) in der Mesopausenregion über den Alpen.

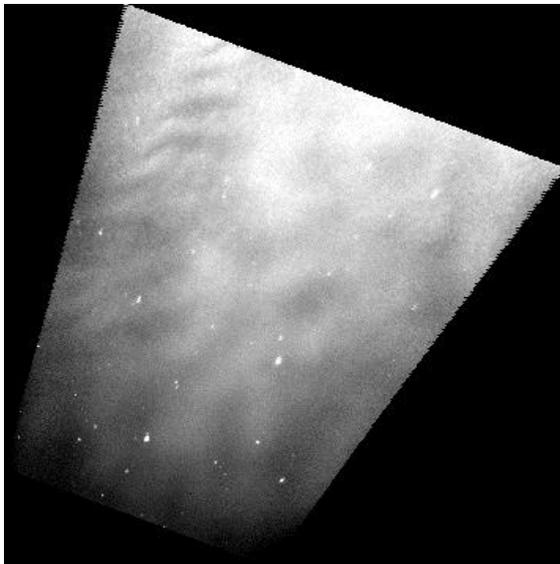


Abb.2: FAIM 1 Aufnahme der Intensität des Airglows vom 21.1.2016, 22.16 UTC. Es sind mehrere Wellenstrukturen mit unterschiedlichen Wellenlängen und Strukturen zu erkennen. Die hellen Punkte sind durch Sterne bedingt.

Abbildung 1 zeigt die Gesichtsfelder von drei GRIPS Instrumenten, die sich in der UFS und den Partnerstandorten Oberpfaffenhofen (OPN, mit mehreren Gesichtsfeldern) und Sonnblick Observatorium (SBO) befinden (gelb); zusätzlich ist das Gesichtsfeld des im Rahmen des Projekts LUDWIG (Länderübergreifende Untersuchung der atmosphärischen Dynamik von Wellen im Gebirge) am Sonnblick installierten FAIM Instruments dargestellt (blau).

Mit diesem Nahinfrarotkamarasystem können die Strukturen von Schwerewellen im

Luftleuchten aufgenommen werden (Hannawald et al., 2016). Dadurch ist unter anderem die direkte Ableitung ihrer Ausbreitungsrichtungen und horizontalen Wellenlängen möglich. Abbildung 2 zeigt beispielhaft eine Aufnahme des Airglows aus der Nacht vom 21. Januar 2016. Bis zu vier verschiedene Wellen können im Bild erkannt werden. Ihre Wellenlängen liegen zwischen 6 und 15 km.

Typischerweise können Wellenlängen von 1 bis etwa 80 km detektiert werden, in Ausnahmefällen auch größere Wellen.

Für die systematische Untersuchung solcher Wellenstrukturen wurde im Projekt LUDWIG ein Algorithmus entwickelt, der die Wellenparameter (Wellenlänge, Periodendauer, Ausbreitungsrichtung und-geschwindigkeit, etc.) automatisch aus den Bildern extrahiert. Das Ergebnis der systematischen Auswertung ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Windrosendiagramme zeigen jeweils für Sommer und Winter die Ausbreitungsrichtungen der gefundenen Wellen aus knapp zwei Jahren Daten, welche vom Sonnblick Observatorium aufgenommen wurden. Es ist demnach eine Vorzugsrichtung der Ausbreitung nach Nordosten im Sommer zu erkennen. Im Winter bewegen sich die Wellen hauptsächlich nach Westen. Diese Vorzugsrichtungen sind wesentlich auf die Struktur der globalen Windströmungen zurückzuführen. So entscheiden die Richtung und die Stärke des Windfeldes ganz maßgeblich darüber, ob Schwerewellen diese Windfelder passieren können oder aber absorbiert oder reflektiert werden. Die in den Messungen gefundene West-Ost-Vorzugsrichtung ist daher vornehmlich auf die Struktur der jahreszeitabhängigen zonalen Winde in der Stratosphäre zurückzuführen. So können im Sommer hauptsächlich ostwärts propagierende Schwerewellen auf ihrem Weg von den unteren Schichten der Atmosphäre hinauf in den Höhenbereich der Mesopause

passieren, während im Winter vornehmlich solche in Richtung Westen passieren können.

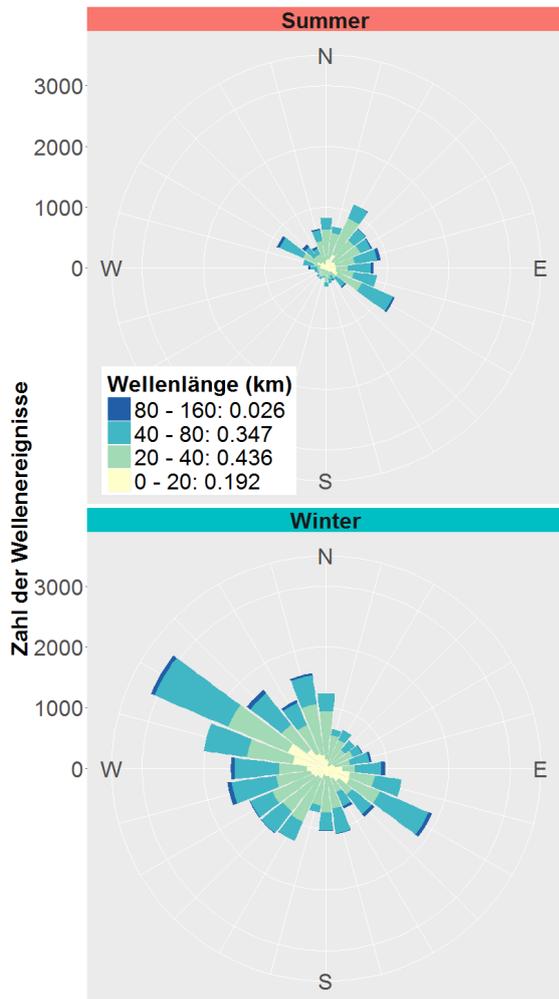


Abb.3: Windrosendiagramme, welche die horizontalen Ausbreitungsrichtungen von Schwerewellen im Sommer und Winter für den Standort Sonnblick zeigen. Im Sommer ist eine Vorzugsrichtung nach Nordosten zu erkennen, im Winter in Richtung Westen. Dies ist auf Windsysteme in tiefer liegenden Höhenschichten zurückzuführen.

Abbildung 3 gibt auch Aufschluss über die beobachteten horizontalen Wellenlängen. Der Großteil der detektierten Wellenlängen liegt demnach unterhalb etwa 40 km. Dieser Befund ist dabei natürlich auch durch die endliche Größe des Sichtfeldes bedingt. Schwerewellen können horizontale Wellenlängen von wenigen Kilometern bis über 1000 km aufweisen. Um nun auch größere horizontale Wellenlängen im Alpenraum erfassen zu können als es durch die Gesichtsfeldbeschränkung des Instruments begrenzt ist, wurden

drei GRIPS Instrumente so angeordnet, dass deren Sichtfelder ein großes gleichseitiges Dreieck aufspannen (Wachter et al., 2015). Damit sind nun auch Wellen mit sehr großer horizontaler Wellenlänge nachweisbar. Sie ermöglichen zudem die Bestimmung der Temperatur in 87 km Höhe (Schmidt et al. 2013). Insbesondere stellt sich heraus, dass die langperiodischen Oszillationen mit den größten Amplituden in der Temperaturvariation auf besonders großskalige Wellen zurückzuführen sind, die aufgrund ihrer räumlichen Dimension mit mehreren hundert Kilometern horizontaler Wellenlänge im Kamerasystem in der Regel nicht als Wellen erkannt werden können.

Im Rahmen des Projekts LUDWIG wurde die Messgeometrie eines gleichseitigen Dreiecks verwendet, dessen Eckpunkte aus den Messungen mehrerer simultan betriebener Instrumente gebildet werden. Die Messungen wurden dabei in Kooperation mit verschiedenen Observatorien im Virtuellen Alpenobservatorium, VAO, durchgeführt.

Die in Abbildung 1 dargestellte Messkonfiguration nahm nach der Installation des GRIPS 16 am Sonnblick Observatorium im August 2015 zusammen mit der Neuausrichtung des GRIPS 7 in der UFS am 1. Oktober desselben Jahres den Messbetrieb auf. Dieses „virtuelle“ Dreieck (gestrichelte gelbe Linie in der Abbildung 1) verfügt über eine Kantenlänge von etwa 174 km und erlaubt somit die Detektion auch großskaliger Wellen.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Messungen in der Nacht vom 21. auf den 22. Januar 2016, aufgenommen am Sonnblick Observatorium. Diese prominente Oszillation, die in der zweiten Nachthälfte eine Temperaturamplitude von über 15 K erreicht, wurde an allen drei Stationen registriert.

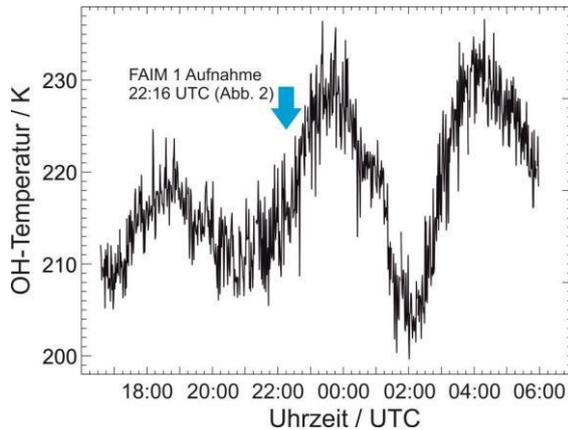


Abb.4: Mit GRIPS gemessene OH-Temperaturen vom 21.1.2016 am Sonnblick Observatorium. Diese Messungen decken andere Zeit- und Raumskalen ab als die Aufnahmen von FAIM (vgl. Abb. 1 und 2).

Aus dem zeitlichen Versatz lässt sich sowohl die Ausbreitungsrichtung von 110° (Richtung Ost-südost) als auch die horizontale Wellenlänge der zugehörigen Welle zu etwa 4000 km abschätzen.

Für eine zuverlässige Abschätzung der Wellenparameter ist es erforderlich, dass an allen Stationen gleichzeitig genügend gute Beobachtungsbedingungen, vor allem hinsichtlich der Bewölkungssituation, herrschen. Daher wurden die Messungen über einen Zeitraum von fast zwei Jahren bis zum 20. Juni 2017 durchgeführt.

Erstmalig konnten nun Informationen über einen Großteil des raumzeitlichen Schwerewellenspektrums mit hoher Präzision abgeleitet werden. Der gewonnene Datensatz bildet eine einmalige und hervorragende Grundlage für eine Vielzahl weiterer wissenschaftlicher Auswertungen, die ohne diese Messungen nicht möglich wären.

Literatur

Hannawald, P., Schmidt, C., Wüst, S. und Bittner, M.: A fast SWIR imager for observations of transient features in OH airglow, *Atmospheric Measurement Techniques* 9, 1461-1472, doi: 10.5194/amt-9-1461-2016. 2016

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. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 102, 125-139, doi: 10.1016/j.jastp.2013.05.001, 2013

Wachter P., Schmidt, C., Wüst S. und Bittner M.: Spatial gravity wave characteristics obtained from multiple OH (3-1) airglow temperature time series, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 135, 192-201, doi: 10.1016/j.jastp.2015.11.008, 2015

Danksagung

Wir danken besonders dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (Bay StMUV) für die Förderung des Projektes LUDWIG (Projektnummer TUSo1 UFS-67093). Verwendet wurden ergänzend Arbeiten, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projektes GW-LCYCLE (Fördernummer o1LG1206A) gefördert wurden.

Besonderer Dank gilt den Betriebsmannschaften der UFS Schneefernerhaus und des Sonnblick-Observatoriums.

Die Daten der FAIM- und GRIPS-Instrumente werden am Weltdatenzentrum für Fernerkundung der Atmosphäre (<https://www.wdc.dlr.de/ndmc/>) archiviert. Sie sind zudem auch über das VAO-Alpine Environmental Data Analysis Center, AlpEnDAC, (<http://alpendac.eu>) zugreifbar.

WASSERDAMPF IN DER FREIEN TROPOSPHÄRE UND IN DER UNTEREN STRATOSPHERÄ BIS IN 20 KM HÖHE

THOMAS TRICKL¹, HANNES VOGELMANN¹

¹KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, IMK-IFU, KREUZECKBAHNSTR. 19, 82467 GARMISCH-PARTENKIRCHEN

EMAIL: THOMAS.TRICKL@KIT.EDU

Zusammenfassung: Das Hochleistungs-Raman-Lidar an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) lieferte im Berichtszeitraum erstmals Wasserdampf-Messungen bis in über 20 km Höhe. Dies gelang bei einer Akquisitionsdauer von nur einer Stunde, zu vergleichen mit neun Stunden andernorts. Darüber hinaus gelangen Temperatúrauswertungen bis in über 50 km Höhe. Nach Unterdrückung des extrem starken Nahbereichssignals für 308 nm und nach Optimierung der 353-nm-Emission sind klar Temperaturmessungen bis in die Mesosphäre möglich.

Abstract: During the reporting period, the high-power Raman lidar at UFS has, for the first time, delivered water-vapour measurements up to 20 km. This was achieved for a data-acquisition time of just one hour, which must be compared with nine hours elsewhere. In addition, temperature retrievals were demonstrated up to altitudes of more than 50 km. After suppressing the extremely strong near-field return at 308 nm and after optimizing the 353-nm stimulated Raman emission will yield a range covering the mesosphere.

Wasserdampf

Die Verteilung von Wasserdampf im Bereich der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre spielt eine entscheidende Rolle für die Strahlungsbilanz der Atmosphäre. Daher ist ihre Bestimmung in diesem Höhenbereich eine wichtige Aufgabe, an der weltweit intensiv gearbeitet wird. Die dort niedrige Kon-

zentration und die generell außerordentlich hohe Variabilität von Wasserdampf stellen einen extremen Anspruch an die Nachweisttechnik.

Um die kurzzeitige räumliche und zeitliche Variabilität zu erfassen, werden an der UFS in 2675 m ü. NN. zwei Wasserdampf-Lidar-Systeme betrieben. Mit dem differentiellen Absorptions-Lidar (DIAL) wurden seit 2007 Routinemessungen durchgeführt (Trickl et al., 2014; 2015; 2016; Vogelmann et al., 2015), zur Zeit unterbrochen durch einen Laser-Schaden. Mit dem DIAL können unabhängig von der Tageszeit innerhalb von einer Viertelstunde vertikal hochaufgelöste Vertikalprofile der Wasserdampfverteilung zwischen 3 und 12 km Höhe aufgezeichnet werden. Um die Lidar-Messungen zumindestens nachts bis in die Stratosphäre auszudehnen, wurde direkt neben dem DIAL zusätzlich ein Hochleistungs-Raman-Lidar aufgebaut. Hierfür wurde ein starker XeCl-Industrie-Laser mit einer Wellenlänge von 308 nm auf Einzellinienbetrieb mit bis zu 180 W Durchschnittsleistung umgebaut. Gleichzeitig wird ein Empfangsteleskop für das Rückstreulicht mit 1,5 m Hauptspiegeldurchmesser verwendet. Das Raman-Lidar kann mit dem hochgenauen (Trickl et al., 2016) DIAL kalibriert werden, eine weltweit einmalige Konfiguration.

Über stimulierte Raman-Streuung in H₂ wird zusätzlich Emission von in Ozon nicht absorberter Strahlung bei 353 nm erzielt, mit der zusätzlich zu einer Ozon-Korrektur die Atmosphärendichte und -temperatur bis in über 80 km Höhe bestimmt werden soll. Bei der Ra-

man-Konversion gibt es derzeit bei Laser-Pulsfolgefrequenzen ab 100 Hz immer noch Probleme.

Nach deutlich verbesserter Abdichtung gegen Hintergrundlichts bis auf nur 150 Photonen pro 15-m-Höhenintervall und Stunde (umgerechnet 1,5 nV Analogsignal) gelang 2015 ein Durchbruch bei den Wasserdampfmessungen. Abbildung 1 zeigt eine Wasserdampfverteilung vom 1.7.2015, zwischen ca. 2 und 3 Uhr MEZ. Das Rohsignal weist eine Dynamik von über sechs Dekaden auf, wodurch die Wasserdampfdynamik immerhin fast vier Dekaden erreicht. Diese Dynamik ist vergleichbar mit derjenigen bei Raman-Lidar-Systemen in den USA, welche allerdings anstelle von einer Stunde neun Stunden lang messen. Zum Vergleich sind die Feuchteprofile der zeitnahen, aber räumlich entfernten Radiosonden-Aufstiege am Hohenpeißenberg und in Oberschleißheim („München“) eingezeichnet. Die Unterschiede sind lokal sehr stark und belegen die hohe Variabilität der Wasserdampfkonzentration (Vogelmann et al., 2015 und siehe Vogelmann et al., Kapitel 5, Seite 24).

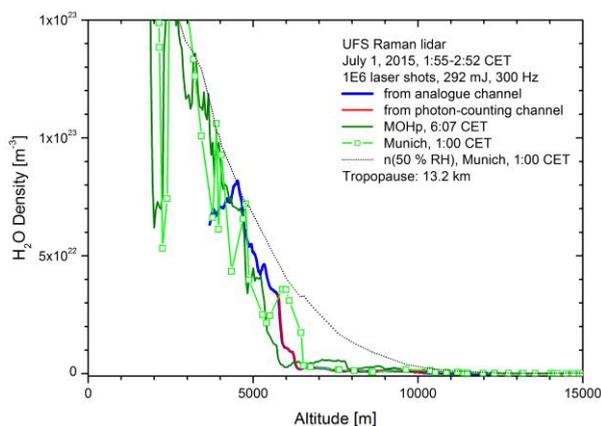


Abb. 1: Wasserdampf-Dichte für eine Messung vom 1.7.2015 im Vergleich zu Sondendaten vom Hohenpeißenberg und aus Oberschleißheim („München“)

In Abb. 2 ist der unterste Teil von Abb. 1 vertikal stark gespreizt dargestellt. Ferner wurde der Lidar-Wasserdampf mit einer Höhenauflösung von 375 m geglättet. Der Wasserdampf ist bis in über 20 km Höhe positiv. Allerdings

legt ein Vergleich mit der gestrichelt eingezeichneten Dichte für 10 ppm Mischungsverhältnis realistische Verhältnisse nur bis 20 km nahe. Ab 13 km ist die Übereinstimmung mit dem Hohenpeißenberg gut. Somit kann man von der Echtheit des stark ausgeprägten Feuchteminimums zwischen 15 und 16 km ausgehen. In der Tat kam die Luft aus niedrigeren geographischen Breiten, für die ein Feuchteverlust durch Ausfrieren in Zirren postuliert wird.

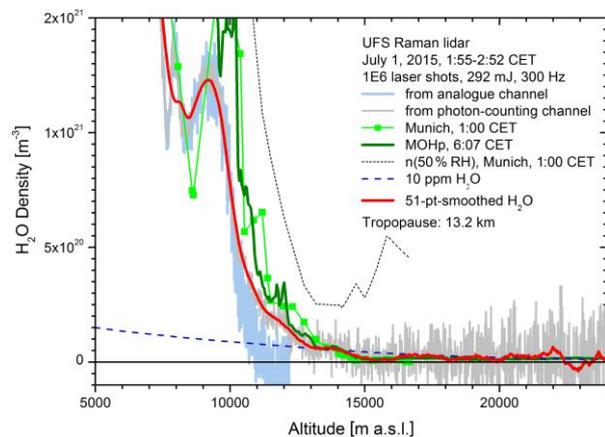


Abb. 2: Ausschnitt von Abb. 1 für niedrige Feuchten: Die Dichte aus der Messung des Raman-Lidars (hellgraue Kurve) rauscht noch etwas, was auf ein Rest-Lichtleck zurückzuführen ist. Mit einer Vertikal-Auflösung von 375 m geglättet (rot) zeigt sich eine Dichte, die bis in etwa 20 km Höhe einigermaßen mit dem bekannten Mischungsverhältnis von stratosphärischem Wasserdampf (ca. 5 ppm) in Einklang ist.

Auch in den folgenden Messungen konnte Wasserdampf bis in etwa 20 km Höhe nachgewiesen werden. Das Mischungsverhältnis lag fast konstant bei 5 ppm, dem typischen Wert in der unteren Stratosphäre. Nach finaler Optimierung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses erwarten wir eine hohe Datenqualität und eine Reichweite bis ca. 25 km.

Temperatur

Für die Temperaturmessungen kommen zwei Verfahren zum Einsatz, die Rotations-Raman-Methode und die Temperaturbestimmung aus der Luftdichte. Die Rotations-Raman-Methode wurde erfolgreich im Nahbereich demons-

triert. In der Stratosphäre gelangen etliche Auswertungen mit Hilfe der Dichte-Methode sowohl für 308 nm als auch für 353 nm Wellenlänge (Beispiele: Abb. 3 und 4; Quelle: L. Klanner). Beschränkt werden die Ergebnisse noch auf ca. 50 km wegen der Notwendigkeit zur Abschwächung des Rückstreusignals um 10^3 (308 nm) bzw. wegen der erwähnten Probleme bei der Raman-Konversion nach 353 nm. An der technischen Lösung aller Einschränkungen bei der Temperaturmessung wird gearbeitet. Für die Verbesserung der Rotations-Raman-Methode wurden bereits deutlich bessere Filter geliefert, die Bestellung eines hochpräzisen, schnell rotierenden „Choppers“ zur Unterdrückung des Nahbereichssignals bei 308 nm bis 10 km Entfernung erfolgt demnächst.

Literatur

Trickl, T., Vogelmann, H., Giehl, H., Scheel, H. E., Sprenger, M. und Stohl, A.: How stratospheric are deep stratospheric intrusions? *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 9941-9961, 2014.

Trickl, T., Vogelmann, H., Flentje, H. und Ries, L.: Stratospheric ozone in boreal fire plumes – the 2013 smoke season over Central Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9631-9649, 2015.

Trickl, T., Vogelmann, H., Fix, A., Schäfler, A., Wirth, M., Calpini, B., Levrat, G., Romanens, G., Apituley, A., Wilson, K. M., Begbie, R., Reichardt, J., Vömel, H. und Sprenger, M.: How Stratospheric Are Deep Stratospheric Intrusions into the Troposphere? LUAMI 2008, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 8791-8815, 2016.

Vogelmann, H., Sussmann, R., Trickl und Reichert, A.: Spatiotemporal variability of water vapor investigated using lidar and FTIR vertical soundings above the Zugspitze, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 3135-3148, 2015.

Danksagung

Die Autoren danken für die großartige Unterstützung durch das UFS-Team. Die Arbeiten in diesem Projekt wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert.

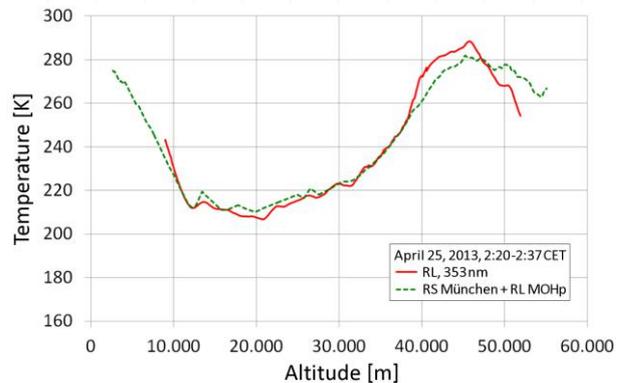


Abb. 3: Temperaturprofil aus einer Testmessung vom 25.4.2013 bei 353 nm: Trotz sehr geringer Raman-Konversion nach 353 nm, trotz kurzer Mittelungszeit von nur 6 min, zu hohem Störlicht-Untergrund und vor allem trotz Messung ohne das rauscharme Photonenzählen gelang eine Auswertung bis über 50 km hinaus. Das Resultat wird mit Temperaturdaten der Münchener Radiosonde und vom Ozonlidar am Hohenpeißenberg verglichen.

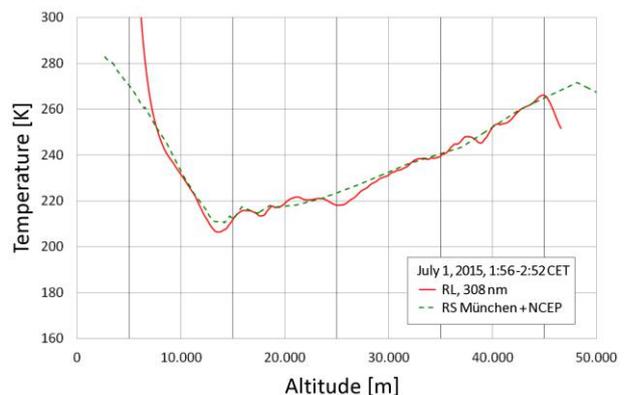


Abb. 4: Temperaturprofil aus einer Testmessung vom 1.7.2015 bei 308 nm unter extrem rauscharmen Bedingungen und bei Mittelung über 1 h: Das zugrundeliegende Rückstreusignal ist ozonkorrigiert. Dieses Resultat ist bemerkenswert, da das Signal um einen Faktor 1000 abgeschwächt wurde, um den Detektor nicht zu überlasten. Das Resultat wird bis 16.7 km mit Temperaturdaten der Münchener Radiosonde und darüber mit der amerikanischen NCEP-Analyse verglichen.

RÄUMLICHE UND ZEITLICHE VARIABILITÄT DER WASSERDAMPFVERTEILUNG IN DER FREIEN TROPOSPHÄRE

HANNES VOGELMANN¹, RALF SUSSMANN¹, THOMAS TRICKL¹

¹KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, IMK-IFU, KREUZECKBAHNSTR. 19, 82467 GARMISCH-PARTENKIRCHEN

E MAIL: HANNES.VOGELMANN@KIT.EDU

Zusammenfassung: Wasserdampf ist das weitaus wichtigste Treibhausgas und zugleich dasjenige mit der größten Variabilität. Besonders empfindlich reagiert das Klima bereits auf geringe Änderungen der Konzentration in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre. Mit Hilfe der Lidar-Technik war es dem KIT am Schneefernerhaus erstmals möglich, die räumlich-zeitliche Variabilität der Wasserdampfverteilung der freien Troposphäre quantitativ zu beschreiben. Die konsequente Weiterentwicklung dieser Technik erlaubt derartige Studien jetzt auch bis weit in die Stratosphäre.

Abstract: Water vapor is by far the most important greenhouse gas and the most variable as well. The climate is particularly sensitive to little variations of its concentration in the upper troposphere and lower stratosphere. Using the lidar technique, the KIT team was able to determine the spatio-temporal variability of the water-vapor distribution in the free troposphere quantitatively for the first time. The subsequent extension of this technique allows for investigations of water vapor far into the stratosphere.

Instrumentierung:

Für die genaue Messung der Vertikalverteilung von Wasserdampf im besonders klima-

sensitiven Höhenbereich oberhalb von 5 km werden international große Anstrengungen unternommen. Besondere Herausforderungen sind die dort niedrige Konzentration und die generell außerordentlich hohe Variabilität von Wasserdampf.

An der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) in 2675 m Höhe wird die räumliche und zeitliche Variabilität der Wasserdampfverteilung mit zwei Wasserdampf-Lidar-Systemen untersucht. Mit dem differentiellen Absorptions-Lidar (DIAL) werden seit 2007 Routinemessungen durchgeführt. Mit diesem System können unabhängig von der Tageszeit innerhalb von einer Viertelstunde vertikal hochaufgelöste Vertikalprofile der Wasserdampfverteilung zwischen 3 und 12 km Höhe und Aerosolverteilungen bis etwa 25 km Höhe erfasst werden. Darüber hinaus dient das hochpräzise DIAL (Vogelmann et al., 2011) der Kalibrierung des Raman-Lidars, mit welchem seit 2015 Wasserdampf bis weit in die Stratosphäre (25 km) und Temperaturprofile bis in über 80 km Höhe bestimmt werden sollen.

Am Gipfel der Zugspitze betreibt das KIT außerdem seit 1995 ein solares Infrarot-Fourier-Transform-Spektrometer (FTIR), welches hochpräzise Säulenwerte atmosphärischer Spurengase liefert, darunter auch Wasserdampf. Das FTIR befindet sich in etwa 700 m horizontaler Entfernung nordwestlich vom Schneefernerhaus.

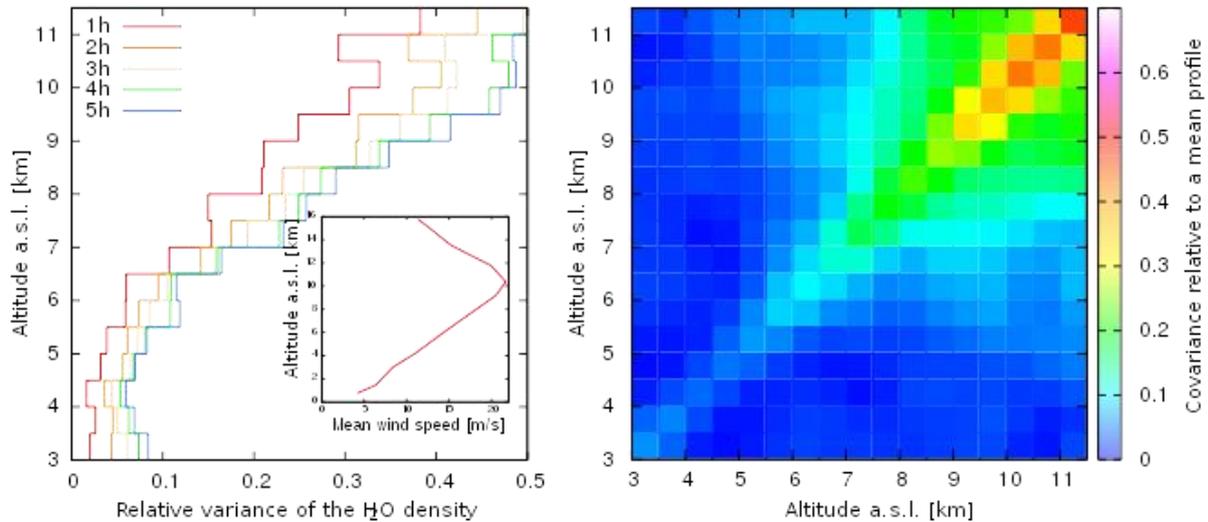


Abb. 1: Die relative Varianz der Wasserdampfkonzentration als Funktion der Höhe (links) für Zeitintervalle 1 bis 5 Stunden zeigt einen überraschend starken Anstieg in großen Höhen und steht im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit des Höhenwindes (kleine Grafik), welcher heterogene Luftmassen transportiert. Die Kovarianzmatrix (rechts) zeigt, dass die Variabilität der Wasserdampfkonzentration unterhalb von 6 bis 7 km eher kleinskaliger Natur ist (inhomogenes Windfeld) und erst oberhalb von 7 km von einem weite Höhenbereiche überstreichenden Windfeld angetrieben wird.

Variabilität von Wasserdampf

Eine Studie zum Vergleich des vertikal integrierten Wasserdampfgehalts (IWV) aus den Daten des FTIR und des DIAL zeigte, dass die große Inhomogenität und Kurzzeitvariabilität der Wasserdampfverteilung bereits auf der Zeitskala von Minuten und der räumlichen Skala von wenigen Kilometern die Messergebnisse signifikant beeinflussen können, und die Abweichungen zwischen einzelnen Messungen gegenüber Messunsicherheiten dominieren (Vogelmann et al., 2011). Daher wurde die Kurzzeitvariabilität der Wasserdampfverteilung in der freien Troposphäre über der Zugspitze gezielt im Detail erforscht, um den Einfluss der Variabilität auf die Bestimmung der langzeitigen Entwicklung aus Einzelmessungen zu quantifizieren und die für die Variabilität verantwortlichen Prozesse zu verstehen (Vogelmann et al., 2015).

Die spezielle räumliche Anordnung des DIAL am Schneefernerhaus und des FTIR am Gipfel der Zugspitze, sowie der Umstand, dass das FTIR stets eine von der Tages und Jahreszeit abhängige Sichtlinie in Richtung des jeweiligen Sonnenstands aufweist, ermöglichten eine Studie der räumlichen und zeitlichen Kurzzeit-variabilität des IWV der freien Tro-

posphäre über der Zugspitze. Die beiden Instrumente sehen dadurch abhängig von Tages- und Jahreszeit verschieden voneinander entfernte Luftpakete.

So wurde gezeigt, dass die horizontale Variabilität der IWV-Werte nur während der warmen Jahreszeit (Konvektion) eine ausgeprägte räumliche Struktur ab einer horizontalen Skala von etwa 2 km aufweist. Überraschenderweise ist die relative räumliche Variabilität des IWV der freien Troposphäre im Winter um fast eine Größenordnung größer, weist jedoch kaum räumliche Struktur auf. Dies wird als deutlicher Beleg dafür gesehen, dass in der kalten Saison der Transport sehr heterogener Luftmassen die IWV-Variabilität bereits ab 3 km Höhe stark dominiert. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die zeitliche Variabilität des IWV der Troposphäre bereits auf der Minutenskala eine signifikante Rolle spielt. Diese Erkenntnis erklärt die großen Schwierigkeiten, bei Instrumentenvergleichen gute Übereinstimmung zu erzielen, und hat große Bedeutung für die Verwendung von Messdaten in Wetter- und Klimamodellen und auch umgekehrt für die Interpretation von Modellrechnungen.

Als weiteres wissenschaftliches Ergebnis konnte erstmalig eine Höhenverteilung der Variabilität und die zugehörigen Kovarianzen ermittelt werden (Vogelmann et al., 2015). Diese zeigen zum einen, dass die lokale Konvektion die Variabilität nur bis zu einer Höhe von etwa 4 km beeinflusst, und dass oberhalb von 4,5 km bereits der Antransport heterogener Luftmassen die Variabilität auf der Stundenskala dominiert. Oberhalb von 4,5 km Höhe nimmt die Variabilität der Wasserdampfkonzentration stark mit der Höhe zu, bis etwa zur Tropopause in 12 km Höhe und korreliert stark mit der nach oben hin zunehmenden Windgeschwindigkeit (Abb. 1). Zudem übersteigt die relative Variabilität in der oberen Troposphäre diejenige des von lokaler Konvektion beeinflussten Höhenbereiches bis 4,5 km etwa um eine Größenordnung. Damit ist wissenschaftlich belegt, dass die Durchmischung von Luftmassen unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung selbst in großen Höhen und bei starkem Wind viel langsamer erfolgt als bisher allgemein angenommen. In logischer Konsequenz gilt dies nicht nur für Wasserdampf sondern auch für andere Spurengase wie Ozon sowie für viele Komponenten der Luftverschmutzung wie z.B. Aerosole. So bleiben Luftmassen in ihrer ursprünglichen spezifischen Kontamination über weite Transportwege von vielen tausend Kilometern häufig unverändert erhalten, allerdings in unerwartet kleinräumigen und filamentartigen Strukturen, die teilweise eine Höhenausdehnung von nur 100 m aufweisen und sich horizontal auf weniger als 100 km erstrecken können. Als typische Entstehungsprozesse heterogener Wasserdampfverteilungen über der Zugspitze konnten neben der lokalen Konvektion vor allem Stratosphärenluft-Intrusionen arktischen Ursprungs und der aufsteigende Transport feuchter Luft in der Umgebung großer Tiefdruckgebiete (sogenannte warm conveyor belts) vom Ostpazifik

über Nordamerika, der Karibik und dem Nordatlantik identifiziert werden.

Eine besondere Stellung nimmt der über der Zugspitze häufig beobachtete Transport von Sahara-Staub ein. Mit Hilfe des DIAL konnte gezeigt werden, dass der Wasserdampfgehalt dieser staubhaltigen Schichten fast immer sehr hoch ist. Dies kann erklärt werden durch die Tatsache, dass die beteiligten Luftmassen die Sahara meistens schon mit hoher Feuchtigkeit vom Nordatlantik oder Mittelmeer erreichen, es aufgrund der starken Aufheizung über Nordafrika aber nicht zu einem Ausregnen der Feuchtigkeit beim anschließenden Aufstieg kommt. So erreichen mit Saharastaub kontaminierte Luftmassen regelmäßig Höhen von 5 km und sind dabei nahezu mit Wasserdampf gesättigt. Eine Veröffentlichung hierzu ist in Arbeit.



Abb. 2: Die Kontamination einer Stratosphärenluft-Intrusion mit Waldbrand-Aerosolen über Kanada macht ihre schlanke, nur etwa 200 m dicke Struktur auch für das bloße Auge sichtbar. Waldbrand-Aerosole aus Kanada reduzieren die Sichtweite auf der Zugspitze am Vormittag des 16. Juli 2013 auf etwa 10 km.

Feuchte Luft bodennahen (Landoberfläche) Ursprungs ist häufig mit Aerosolen verschmutzt, auch wenn sie aus der Sahara kommt, z.B. aus Ballungsgebieten (Industrieanlagen, Kraftwerke, Verkehr, Heizung), aber auch von Waldbränden, z.B. in Nordamerika. So kam es im Sommer 2013 zu einem spektakulären Ereignis, als Rauch eines Waldbrandes in Nordkanada die Sichtweite auf der Zug-

spitze kurzzeitig auf etwa 10 km reduzierte (Trickl et al., 2015) (Abb. 2). Die Lidar-Messungen an der UFS zeigten eine unerwartet große Trockenheit (RH < 5 %) in dieser Luftschicht an, die entgegen des hohen Verschmutzungsgrades eher auf einen stratosphärischen Ursprung schließen ließ. Mit Hilfe eines Trajektorien-Modells basierend auf Reanalyse-Daten konnte gezeigt werden, dass die Rauchfahne des Waldbrands in eine bereits im Abstieg befindliche Stratosphärenluft-Intrusion, welche die Arktis bereits fast komplett umrundet hatte, eingedrungen war und von dieser in einem sehr schmalen Filament bis nach Mitteleuropa transportiert wurde, ein sehr ungewöhnlicher und bemerkenswerter Fall, weil die filamentartige Struktur des Ferntransports so im wahrsten Sinne des Wortes augenscheinlich wurde.

Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert.

Literatur

Vogelmann, H., Sussmann, R., Trickl, T. und Borsdorff, T.: Intercomparison of atmospheric water vapor soundings from the differential absorption lidar (DIAL) and the solar FTIR system on Mt. Zugspitze, *Atmos. Meas. Tech.*, 4, 835–841, doi:10.5194/amt-4-835-2011, 2011.

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.*, 14, 3135–3148, doi:10.5194/acp-14-3135-2014, 2014.

Trickl, T., Vogelmann, H., Flentje, H. und Ries, L.: Stratospheric ozone in boreal fire plumes – the 2013 smoke season over Central Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 9631–9649, doi:10.5194/acp-15-9631-2015, 2015.

Danksagung

Die Autoren danken für die großartige Unterstützung durch das UFS-Team. Die Arbeiten in diesem Projekt wurden vom Bayerischen

ERKLÄRUNG DES NEUERLICHEN METHANANSTIEGS DURCH ATMOSPÄREN- SONDIERUNG AUF DEM ZUGSPITZE GIPFEL

RALF SUSSMANN¹, PETRA HAUSMANN¹, DAN SAMLE²

¹KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, IMK-IFU, KREUZECKBAHNSTR. 19, 82467 GARMISCH-PARTENKIRCHEN

²NATIONAL INSTITUTE OF WATER AND ATMOSPHERIC RESEARCH, LAUDER, NEUSEELAND

E-MAIL: RALF.SUSSMANN@KIT.EDU

Zusammenfassung: Methan ist wie Kohlendioxid eines der wesentlichen Treibhausgase. Während die Konzentration von Methan in der Atmosphäre um die Jahrtausendwende stagnierte, steigt sie seit 2007 wieder stark an. Die Ursache hierfür war bislang nicht bekannt. Eine aktuelle Studie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zeigt nun, dass mindestens 40 % dieses Anstiegs auf die Zunahme der Erdöl- und Erdgasproduktion auf der Nordhalbkugel zurückzuführen sind. Die Ergebnisse wurden im Journal „Atmospheric Chemistry and Physics“ veröffentlicht. (DOI:10.5194/acp-16-3227-2016).

Abstract: Like carbon dioxide, methane is one of the most important greenhouse gases. After a period of stagnation around 2000, atmospheric methane concentrations started to rise again in 2007. So far, the causes have been unknown. According to the recent study of climate scientists of Karlsruhe Institute of Technology (KIT), at least 40% of this increase result from the growing production of oil and natural gas in the northern hemisphere. The results are now published in the “Atmospheric Chemistry and Physics” journal. (DOI:10.5194/acp-16-3227-2016).



Abb.1: Gipfelobservatorium des KIT auf der Zugspitze mit Kuppel für die optische Vertikalsondierung von Methan und Ethan (Foto: Gabi Zachmann, KIT)

Zugang

Gelungen ist die Zuordnung zum Öl- und Gassektor über eine vertikale Vermessung der Ethan- und Methangehalte zwischen Boden und den obersten Schichten der Erdatmosphäre. Neben den Emissionen von thermogenem Methan, das in tiefgelegenen Gesteinsschichten bei hohen Temperaturen entstanden ist und bei der Öl- und Gasproduktion in die Atmosphäre entweichen kann, sind verstärkte biogene Emissionen durch Fäulnisprozesse eine weitere Quelle. Der entsprechende Beitrag etwa aus Feuchtegebieten oder der Tierhaltung wird derzeit parallel von anderen Forschergruppen untersucht. Wesentlich für die Quantifizierung von thermogenen Quellen ist Ethan – wie Methan eine Kohlenwasserstoffverbindung und einer der Hauptbestandteile von Erdgas. Bei biogenen Methanquellen fällt Ethan dagegen nicht an.

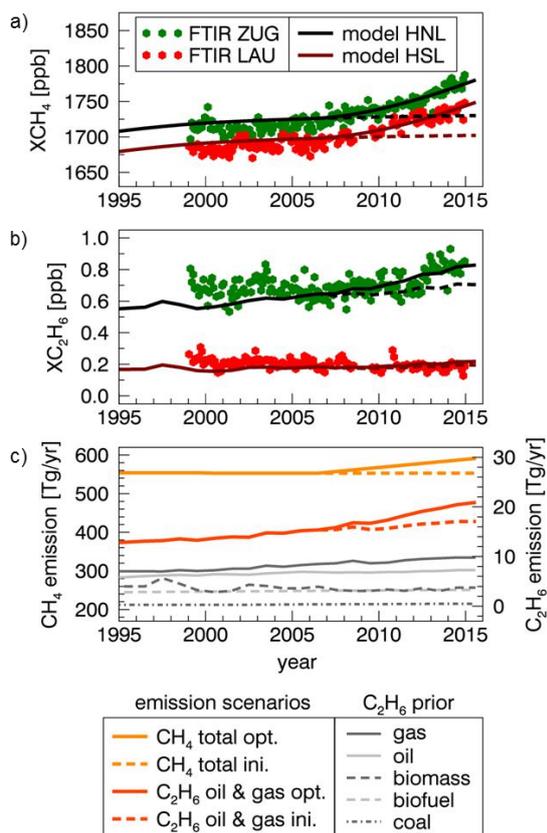


Abb.2: Methan- und Ethan-Zweiboxmodell: (a) Monatsmittel von säulengemitteltem Methan (XCH_4) und (b) Ethan (XC_2H_6) aus solaren FTIR-Messungen von Zugspitze und Lauder. Modellierte Jahresmittel von XCH_4 und XC_2H_6 sind für hohe nördl. bzw. südl. Breiten (HNL, HSL) gezeigt – nach Emissionsoptimierung (durchgezogene Linien) bzw. Apriori-Emissionen (gestrichelte Linien). (c) Emissionsszenario 2007–2014: optimierte globale Emissionen von Methan (CH_4 total opt., linke y-Achse) und Ethan aus Öl- und natürlichen Gasquellen (C_2H_6 oil & gas opt., rechte y-Achse). Zum Vergleich sind die entsprechenden anfänglichen Emissionsentwicklungen dargestellt zusammen mit den Apriori-Ethanemissionen von allen betrachteten Quellkategorien.

Der aktuellen KIT-Studie liegen Langzeitmessungen sowohl des Observatoriums des KIT auf der Zugspitze (Abb. 1) als auch von Klimaforschern des National Institute of Water and Atmospheric Research im neuseeländischen Lauder zugrunde. Die Messungen sind repräsentativ für die Hintergrundkonzentration von Methan und Ethan in beiden Hemisphären der Erde.

Ergebnis

Während die Messungen auf der Zugspitze eine signifikante Korrelation zwischen Ethan und Methan zeigen, das heißt einen gemeinsamen plötzlichen Anstieg beider Spurengase ab 2007, ist in Lauder ein vergleichbarer Neuanstieg nur für Methan zu beobachten (Punkte in Abb. 2). Aus der quantitativen Analyse dieser Messergebnisse anhand eines sogenannten Zweiboxmodells für die Emissionen der beiden Hemisphären (Linien in Abb. 2), konnte in der KIT-Studie gefolgert werden, dass zum einen ein mindestens 40-prozentiger Beitrag zum weltweiten Methananstieg seit 2007 dem Öl- und Gas-Sektor zuzuschreiben ist und die beobachteten Emissionen zum anderen in der nördlichen Hemisphäre erfolgt sein müssen.

Aktuelle Untersuchungen biogener Quellen von anderen Forschergruppen mit komplementären Methoden ergaben Hinweise darauf, dass der Hauptbeitrag zum neuerlichen Methananstieg seit 2007 biogenen Ursprungs ist (Schaefer et al., 2016). Das ist jedoch in Übereinstimmung mit dem hier vorgestellten Ergebnis des mindestens 40-prozentigen thermogenen Beitrags. Insgesamt zeichnet sich ab, dass ansteigende Emissionen aus dem Erdöl- und Erdgas-Sektor in Kombination mit Emissionen aus Feuchtegebieten und möglicherweise aus der Tierhaltung den neuerlichen Methananstieg im letzten Jahrzehnt verursacht haben.

Diskussion

Für den Zeitraum bis zum vollständigen Umstieg auf erneuerbare Energien gilt bislang Erdgas als die klimafreundlichere Alternative zur Kohle, da bei seiner Verbrennung nur etwa halb so viel Kohlendioxid entsteht. Das hydraulische Aufbrechen von Gesteinsschichten („Fracking“) zur unkonventionellen Gewinnung von Erdgas wird daher als Brückentechnologie diskutiert.

Das Ergebnis der vorliegenden Studie hat politische Relevanz, weil es einen Zusammenhang mit dem nordamerikanischen Öl- und Gas-Boom nahelegt, der etwa zeitgleich vor rund zehn Jahren einsetzte. Unter der Annahme, dass der Öl- und Gasboom hauptsächlich in den USA stattgefunden hat, widersprechen die aktuellen Ergebnisse den offiziellen Schätzungen der U.S. Environmental Protection Agency (EPA), die für die USA von konstant niedrigen beziehungsweise sogar abnehmenden Methanemissionen aus dem Öl- und Gassektor in den vergangenen zehn Jahren berichtet. Eine verwandte Studie aus den USA zeigte kürzlich anhand von Satellitendaten, dass die amerikanischen Methanemissionen zwischen 2002 und 2014 um mehr als 30 % zugenommen hatten (Turner et al., 2016). Auch dieses Ergebnis widerspricht den EPA-Angaben, die in den USA keinen Anstieg der menschengemachten Methanemissionen ausweisen.

Eine mögliche Erklärung zumindest für einen Teil dieser Unstimmigkeiten ist eine zu niedrige Berechnung der Leckraten bei der Produktion und dem Verbrauch von Erdöl und Erdgas. Während die EPA hierfür Hochrechnungen aus Stichproben zum Beispiel an einzelnen Bohrtürmen und Kraftwerken verwendet („Bottom-up“-Schätzung), greift die Studie des KIT auf repräsentative atmosphärische Hintergrundmessungen zurück („Top-down“-Verfahren).

Auf langfristigen Zeitskalen von vielen Jahrzehnten ist generell mit einem Klimavorteil durch Erdgas zu rechnen. Auf kürzeren Zeitskalen kommt dieser Vorteil jedoch bereits dann nicht zum Tragen, wenn die Leckraten der Erdgasproduktion einen relativ geringen Schwellwert von nur einigen wenigen Prozent überschreiten. Der Grund: Das durch Lecks in die Atmosphäre entweichende Methan ist zwar kurzlebiger, aber, bei gleichen Mengen, ein wesentlich stärkeres Treibhausgas als Kohlendioxid.

Es gibt also weiteren Forschungsbedarf, um die Unstimmigkeit zwischen amtlichen Hochrechnungen und wissenschaftlichen Messungen zu klären. Zudem existieren bereits weitreichende technische Entwicklungskonzepte, um die Erdgas-Leckraten zu senken. Von der schnellen und lückenlosen Realisierung dieser Minderungsmaßnahmen wird es abhängen, ob die unkonventionelle Erdgasproduktion auf kurzen Brücken-Zeitskalen als klimafreundliche Alternative zur Kohleverbrennung zum Tragen kommen kann – hier ist eine einsichtige und entschlossene Politik weltweit gefragt.

Literatur

Hausmann, P., Sussmann, R. und Smale, D.: Contribution of oil and natural gas production to renewed increase in atmospheric methane (2007–2014): top-down estimate from ethane and methane column observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3227–3244, doi:10.5194/acp-16-3227-2016, 2016.

Schaefer, H. et al.: A 21st century shift from fossil fuel to biogenic methane emissions indicated by $^{13}\text{CH}_4$, *Science*, 352, 80–84, doi:10.1126/science.aad2705, 2016.

Sussmann, R.: Interview zu Methananstieg und Fracking in den USA, ProSieben, Reportage von der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus im Rahmen der Themenwoche bei SAT1/Pro7 zur Nachhaltigkeit „Grüne Woche“, 6. Juli 2017 (<http://www.imkifu.kit.edu/downloads/institute/Hoehne,%20Juri-Schneefernerhaus-23724595-Zuspieler.wmv>).

Turner, A. J. et al.: A large increase in U.S. methane emissions over the past decade inferred from satellite data and surface observations. *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2218–2224, doi:10.1002/2016GL067987, 2016.

Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert im Rahmen des ESA GHG-cci-Projekts sowie des EU-Projekts INGOS.

Wir danken dem StMUV für die Förderung des Aufbaus einer Kalibriereinheit für das solare FTIR-System auf dem Zugspitze Gipfel im Projekt TLK01U-49581 sowie der UFS-GmbH für die gute Zusammenarbeit im Rahmen von Vergleichsmessungen zwischen Zugspitze Gipfel und UFS.

VERGLEICH DER PARTIKEL-GRÖßENVERTEILUNG VON APS, OPS UND MPSS AN DER UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS

HARALD FLENTJE¹, WERNER THOMAS¹, BJÖRN BRIEL¹, LUDWIG RIES²

¹DEUTSCHER WETTERDIENST, ALBIN-SCHWAIGER WEG 10, 82383 HOHENPEIßENBERG

²UMWELTBUNDESAMT, ZUGSPITZE 5, 82475 ZUGSPITZE

E-MAIL: HARALD.FLENTJE@DWD.DE

Zusammenfassung: An der Umweltforschungsstation/Schneefernerhaus (UFS) wird die Partikel-Größenverteilung (PGV) mit einem optischen Partikel-Spektrometer (OPS), einem aerodynamischen Partikel-Spektrometer (APS) und einem Mobilitäts Partikel Größen Spektrometer (MPSS) gemessen. Die Geräte decken geometrische Größenbereiche zwischen 0,25 – 30 µm, 0,5 – 20 µm und 0,01 – 0,7 µm ab. Zur Qualitätssicherung und Massenschließung wird die Konsistenz der PGV hinsichtlich der unterschiedlichen Messprinzipien und Artefakten bei der Probennahme untersucht.

Abstract: At the Environmental Research Station Schneefernerhaus the particle size distribution (PSD) is measured with an optical particle sizer (OPS), an aerodynamical particle sizer (APS) and a mobility particle size spectrometer (MPSS). The instruments cover size ranges between 0,25 – 30 µm, 0,5 – 20 µm and 0,01 – 0,7 µm, respectively. For quality assurance and mass closure, the agreement of these PSD is investigated and the deviations are discussed with respect to the different measurement principles and possible sampling artifacts.

Die (Anzahl)-Größenverteilung PGV atmosphärischer Partikel wird an GAW Stationen gemessen, weil verschiedene Partikel-Größenklassen wichtig für Strahlungsantrieb, Gesundheitseinfluss (Lungengängigkeit), Partikeltransport und heterogene chemische Prozesse sind. Ihre Größe bestimmt dabei, welchen charakteristischen Prozessen Partikel unterliegen. Darum werden Größenspektren vom Nukleationsmode bis hin zu groben Par-

tikeln an der UFS Schneefernerhaus mit einem Mobility Particle Size Spectrometer (MPSS, TROPOS, 0,01-0,8 µm), einem Optischen Partikel-Spektrometer (OPS, Grimm-Aerosol, 0,25-30 µm) und einem Aerodynamischen Partikel-Spektrometer (APS, TSI, 0,5 – 20 µm) gemessen. Prinzipiell misst das OPS optische Durchmesser, das MPSS Mobilitätsdurchmesser, die beide als äquivalent zu geometrischen Durchmessern angesehen werden können. Das APS misst aerodynamische Durchmesser, die näherungsweise über $d_g \approx d_{ae}/\sqrt{\rho}$ ($\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$) in geometrische Durchmesser umgerechnet werden. Die Größenbereiche der Geräte überlappen zwischen 0,25/0,5 – 0,7 µm und weisen aufgrund unterschiedlicher Einlässe und Probeleitungen, Zeitauflösung und Kalibrations-Prozeduren Unterschiede in den Spektren auf.

OPS und MPSS durchlaufen ein QA/QC System mit jährlichen Kalibrationen. Die MPSS Daten werden invertiert und qualitätsgecheckt entsprechend Wiedensohler et al. (2012). Die OPS Spektren werden zuerst in den beiden unteren Kanälen mit festen Faktoren korrigiert, danach bzgl. Ausreißern und fehlerhaften spektralen Verläufen gefiltert. Zur Berechnung integraler Größen werden nur OPS Daten mit $D_p > 0,8 \text{ µm}$ verwendet. Wiedensohler et al. (2012) geben für Langzeitmessungen Unsicherheiten von $\pm 10 \%$ / $\pm 20 \%$ für Anzahlkonzentrationen $< 200 \text{ nm}$ / $> 200 \text{ nm}$, $\pm 3 \%$ für Partikelgröße, und $\pm 10 \%$ für die Anzahlkonzentration N_t aus Kondensa-

tionskernzählern an. OPS und APS Unsicherheiten sind größer (Peters et al., 2006).

Konsistenz der PGV

Abbildung 1 und 2 zeigen Tagesmittel $dN/d\log D_p$ und $dV/d\log D_p$ (Anzahl, Volumen) der MPSS-OPS und APS-Spektren, exemplarisch für Juni 2016. Abbildung 1 zeigt MPSS und OPS, Abbildung 2 MPSS und APS. Der

Farbverlauf von blau nach rot entspricht dem 1 bis 30 Juni 2016. Die Mediane der MPSS, OPS und APS Spektren werden durch dicke schwarze, rote bzw. blaue Linien wiedergegeben. Dies illustriert die Konsistenz der Teilspektren innerhalb der Tag-zu-Tag Variabilität. Die feine bzw. grobe Mode tragen hauptsächlich zu Anzahl bzw. Volumen bei. Aufgrund der Höhenlage wird die grobe Mode

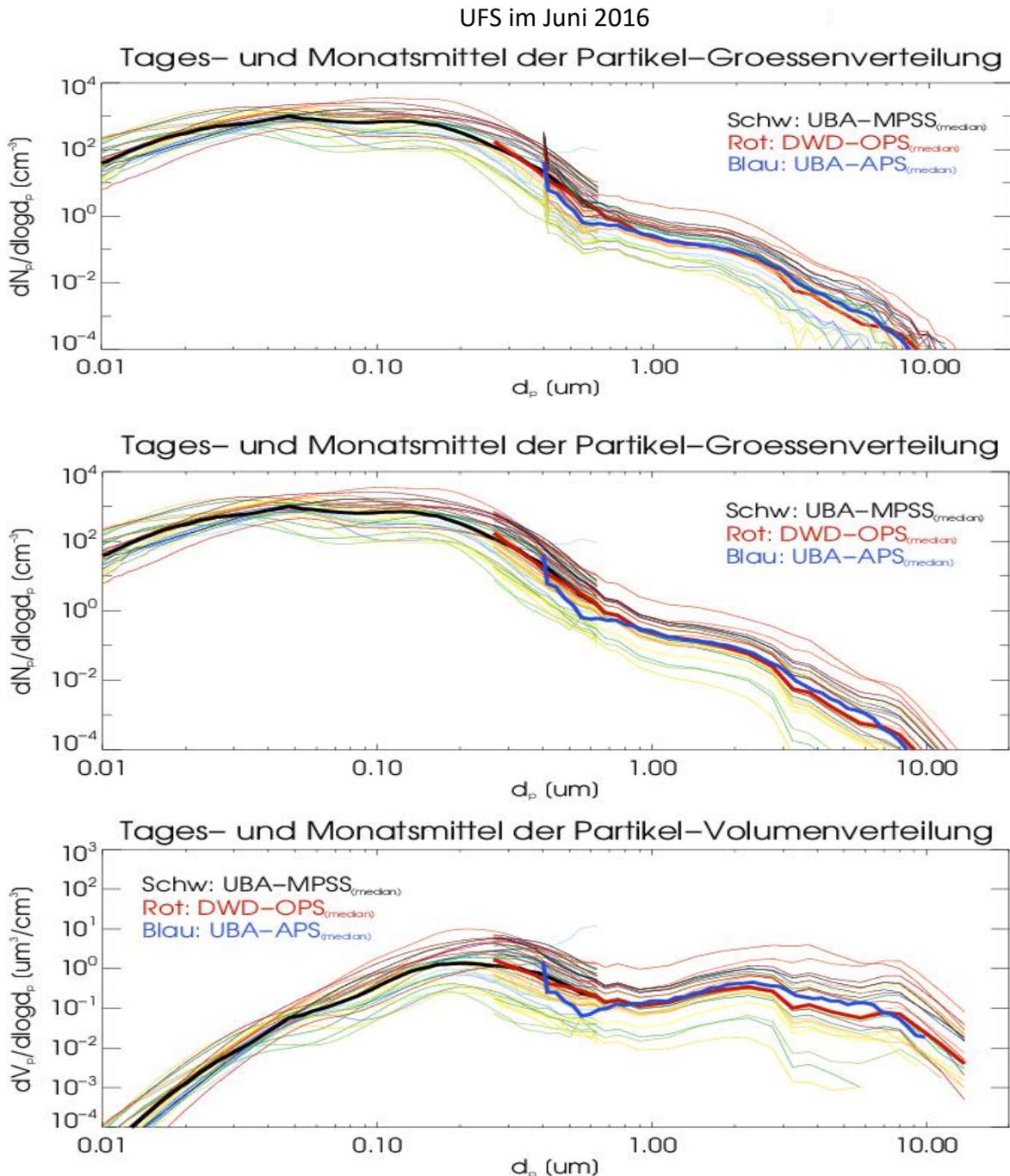


Abb.1: Tagesmittel der Partikel-Größenspektren $dN/d\log D_p$ -MPSS-APS (oben), $dN/d\log D_p$ -MPSS-OPS (Mitte) und $dV/d\log D_p$ -MPSS-OPS, jeweils mit (fett) Monatsmedianen aus MPSS (schwarz), OPS (rot) und APS (blau) im Juni 2016.

durch Sedimentation im Vergleich zu Flachland-Stationen verringert. Die Variabilität der groben Partikel ist größer, insbesondere bei Saharastaub-Ereignissen. Generell sind die Anzahlkonzentrationen MPSS/OPS im Überlappbereich etwa gleich aber die Spektren des OPS fallen zu größeren Durchmessern tendenziell stärker ab (im Jahresmittel $N_{OPS}/N_{MPSS}=1,1$ bei 325 nm und 0,91 bei 650nm). Das APS weist unterhalb 0,8 μm geringere Zählraten auf als MPSS und OPS. Relativ zum OPS nimmt die Zählrate des APS bei allen Durchmessern im Jahresverlauf 2016 etwas zu (Abb.3). Welche Ursachen dafür bei OPS oder APS in Frage kommen, ist noch zu klären.

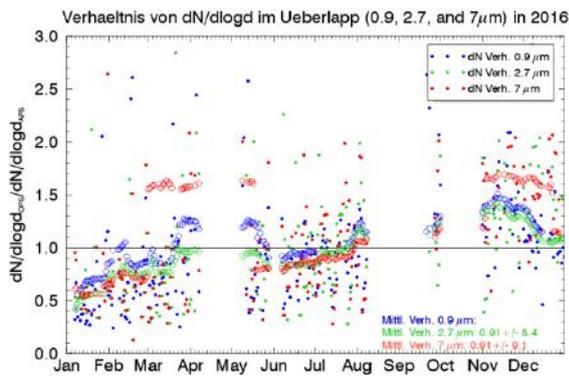


Abb. 2: Verhältnisse der Zählraten $dN/dlogd_p$ zwischen OPS und APS bei 0,9 μm (blau), 2,7 μm (grün) und 7 μm (rot) sowie gleitende Monatsmittel (ungefüllte Symbole) in 2016.

Integrale Aerosolparameter

Wie in Abbildung 3a dargestellt, sind die Anzahlkonzentrationen N_t , abgeleitet aus MPSS + OPS ($OPS > 0,8 \mu\text{m}$) und der CPC-Messung (GRIMM 5420), auf Stundenbasis hoch korreliert (Pearson's $r = 0,88$ in 2016). Die Steigung der linearen fits $N_{t,PGS}$ vs $N_{t,CPC}$ liegt bei 0,79 (mit allerdings nicht final invertierten und qualitätsgeprüften SMPS Daten). Angesichts

der ähnlichen Unsicherheiten von CPC und MPSS bestätigt dies die spezifizierten Datenqualitäten (s. auch GAW report 227). Auch die unter Annahme eines abgeschätzten Partikelgrößen-abhängigen Dichtevektors (1,6...2,6 g/cm^3) berechneten Massenkonzentrationen stimmen in der Größe und im zeitlichen Verlauf recht gut mit den Werten überein, die mit einem SHARP β -Absorptions-Monitor gemessen wurden (Abb. 3b). Hier beträgt Pearson's $r = 0,88$ in 2016 und die Steigung der linearen fits $M_{t,PGS}$ vs $M_{t,SHARP}$ je nach Beschränkung des Datensatzes auf $<10/20/40 \mu\text{g/m}^3$ 1.2/1.3/1.4, was auf Überschätzung der Dichten großer Partikel (Staub) hinweist.

Diese Unterschiede können durch verschiedene Faktoren ausgelöst sein, zu denen unterschiedliche Kalibrationen, unterschiedliche Durchmessertypen, Nichtberücksichtigung der Absorption im OPS und verschiedener Partikelformen gehören, oder durch Verluste an volatilen Partikeln verursacht werden können. Eine denkbare Anpassung des Überlapps würde aber voraussichtlich keine Messfehler bei kleinen oder großen Partikeln beseitigen, da eventuelle Artefakte in verschiedenen Größenbereichen voneinander unabhängig sind. Das beim APS unterhalb 0,8 μm auftretende Artefakt scheint aufgrund seiner Regelmäßigkeit weitgehend korrigierbar und liegt vermutlich weniger an Näherungen bei der Umrechnung der Durchmesser sondern weist evtl. auf Korrekturen zum Stokes-Algorithmus hin, die wegen der stark von den Kalibrierbedingungen abweichenden Stationshöhe (2650 m ü. NN) notwendig werden.

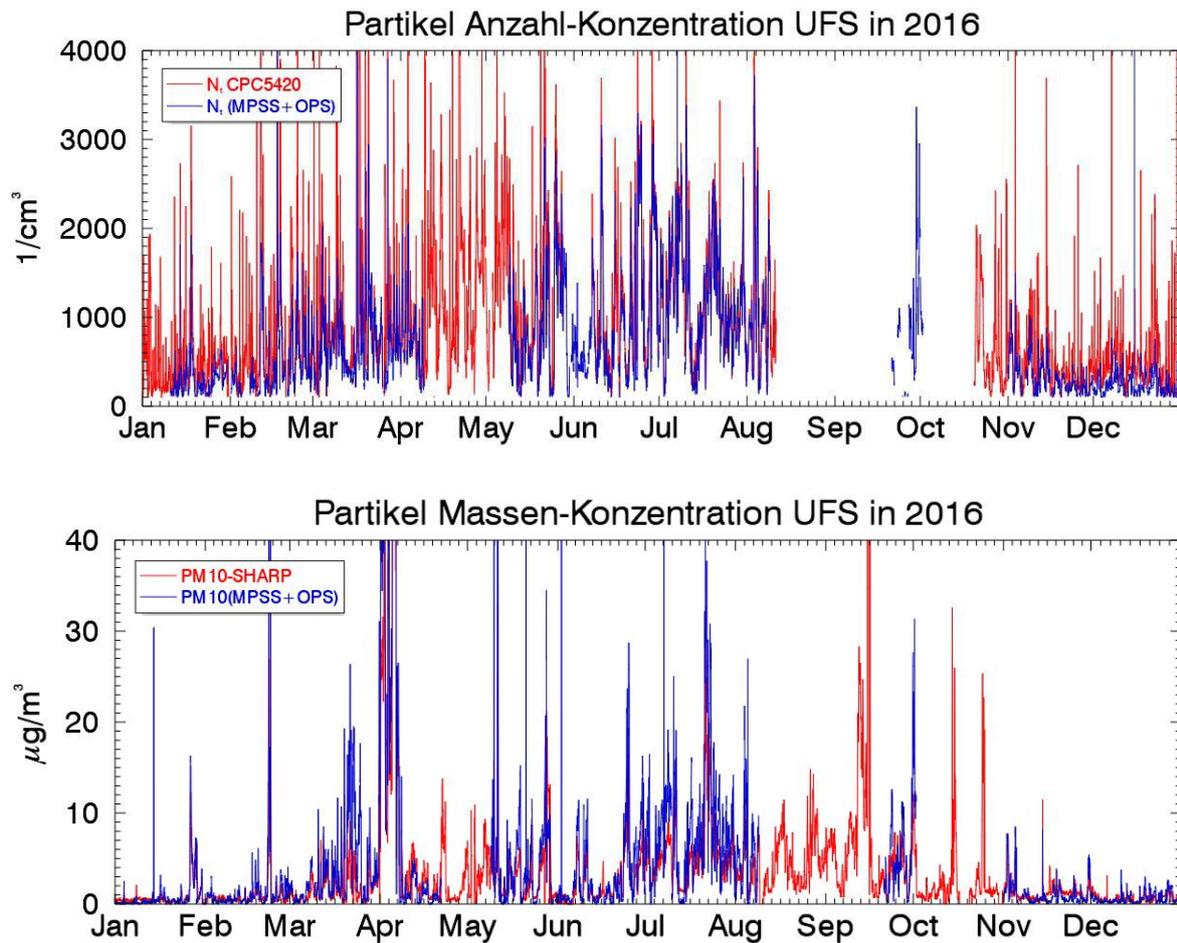


Abb.3: Aus MPSS und OPS für 2016 abgeleitete (a) Partikel-Anzahl- (oben) und (b) Partikel-Massen-Konzentration (unten) im Vergleich mit GRIMM 5420 (Anzahl) bzw. SHARP (Masse über β -Absorption) Messung.

Literatur

Wiedensohler et al: Mobility particle size spectrometers: harmonization of technical standards and data structure to facilitate high quality long-term observations of atmospheric particle number size distributions, *Atmos. Meas. Tech.*, 5, 657–685, doi: 10.5194/amt-5-657-2012, 2012.

Peters, Th. M., Ott, D. und O'Shaughnessy, P. T.: Comparison of the Grimm 1.108 and 1.109 Portable Aerosol Spectrometer to the TSI 3321 Aerodynamic Particle Sizer for Dry Particles *Ann. Occup. Hyg.*, 50, 8, 843 – 850, doi: 10.1093/annhyg/melo67, 2006. GAW report 227, 2016. <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw-reports.html>

^{239}Pu , ^{240}Pu UND ^{241}Pu IN NEUSCHNEE UND AKKUMULIERTEM SCHNEE VON DER ZUGSPITZE AUS DEN WINTERN 2014/2015 UND 2015/2016

KATHARINA GÜCKEL¹, TAEKO SHINONAGA^{1,2}, MARCUS CHRISTL³, JOCHEN TSCHIERSCH¹

¹ HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN, GERMAN RESEARCH CENTER FOR ENVIRONMENTAL HEALTH, INSTITUTE OF RADIATION PROTECTION, INGOLSTÄDTER LANDSTR. 1, 85764 NEUHERBERG, GERMANY

² PRESENT ADDRESS: DEPARTMENT OF RADIATION CHEMISTRY, HIROSAKI UNIVERSITY

³ LABORATORY OF ION BEAM PHYSICS, ETH ZÜRICH

E-MAIL: KATHARINA.GUECKEL@HELMHOLTZ-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Die Abschätzung der Mengen und Herkunft von gesundheitsschädlichem Plutonium (Pu) in der Schnee-Hydrosphäre der Zugspitze ist Aufgabe dieser Studie. Dazu wurden in den Wintern 2014/2015 und 2015/2016 Neuschneeproben und akkumulierter Schnee an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) und dem Zugspitzplatt gesammelt und nach chemischer Trennung der Nuklide mittels Beschleunigermassenspektrometrie (AMS) analysiert.

Abstract: Concentrations of ^{239}Pu , ^{240}Pu , and ^{241}Pu in freshly fallen snow and naturally accumulated snow on Mt. Zugspitze collected at the Environmental Station Schneefernerhaus (UFS) and the Zugspitzplatt in 2014, 2015 and 2016 were determined by accelerator mass spectrometry (AMS) after a chemical separation.

Pu ist ein künstliches Radionuklide, das durch Atomwaffentests, nukleare Unfälle und Ableitungen bei der Wiederaufarbeitung in die Atmosphäre gelangt ist und dort weltweit verteilt wurde. Pu stellt für den menschlichen Körper eine besondere Gefahr dar, da es in den Knochen und in der Leber angereichert wird und keine essentielle Bedeutung für den Menschen hat. Daher ist es wichtig, Erkenntnisse über die Gehalte und das Verhalten dieses Radionuklides in der Umwelt zu erhalten

und mögliche Kontaminations-pfade in den menschlichen Körper zu identifizieren. Bisher weitgehend unbekannte Isotopenverhältnisse von $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ in der Schnee-Hydrosphäre können Auskunft über mögliche Pu-Quellen liefern.

Tab. 1: Probenahmedatum und –masse.

Name und Datum	Masse [kg]
SZ 23.10.14	69,7
SZ 12.01.15	109,3
SZ 29.01.15	72,8
SZ 27.11.15	60,6
SZ 24.02.16	104,2
SZ 26.02.16	101,0
SZ 01.03.16	73,2
SZ 24.03.16	66,2
SZ 14.04.16	85,9
^a JZP 14/15	143,6
^b JZP 15/16	103,0

^a akkumulierter Schnee aus 2014/2015 und ^b 2015/2016.

Die Probenahme von Neuschneeproben erfolgte auf den Terrassen der UFS in Abhängigkeit von Schneefallereignissen in acht HDPE-Weithalsflaschen. Über jeweils einen

Winter akkumulierter Schnee wurde am Zugspitzplatt gesammelt. In Tabelle 1 sind das entsprechende Probenahmedatum und Gewicht der Proben aufgelistet.

Nach erfolgter Probenaufbereitung und chemischer Trennung von Pu von der Matrix, die speziell für diese Studie entwickelt wurden, erfolgte die Analyse der Gehalte mittels Beschleunigermassenspektrometrie (AMS) an der ETH Zürich. In Abbildung 1 sind die Gehalte der Pu-Isotope dargestellt.

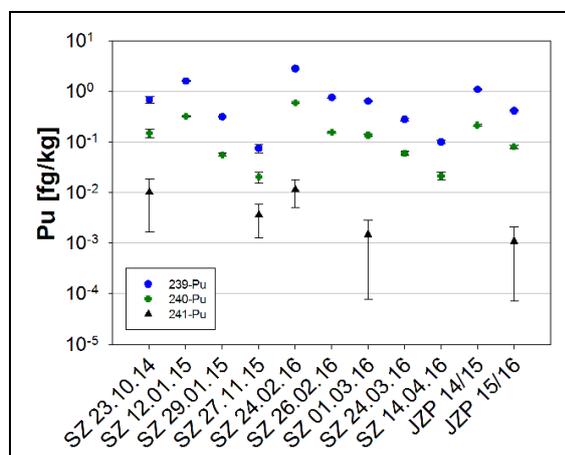


Abb. 1: Gehalte der Pu-Isotope in Schnee

Die Konzentration im Neuschnee an ^{239}Pu reichen von $75 \pm 14 \text{ ag/kg}$ bis $2800 \pm 84 \text{ ag/kg}$ ($0,17 - 6,4 \text{ }\mu\text{Bq/kg}$), an ^{240}Pu von $20,6 \pm 5,2$ bis $600 \pm 21 \text{ ag/kg}$ ($0,18 - 5,1 \text{ }\mu\text{Bq/kg}$), an ^{241}Pu von $1,5 \pm 1,4$ bis $11,5 \pm 6,5 \text{ ag/kg}$ ($4,2 - 43,9 \text{ }\mu\text{Bq/kg}$). Die berechnete $^{239+240}\text{Pu}$ -Aktivität liegt im Bereich von $0,35 - 11,54 \text{ }\mu\text{Bq/kg}$ und ist damit vergleichbar mit Aktivitäten in anderen Umweltproben.

Die Isotopenverhältnisse von $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ in fast allen Proben sind ähnlich dem Globalen Fallout in Mitteleuropa ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} = 0,17 - 0,19$ (Quinto et al., 2013)). Für eine Probe (SZ 24.02.16), die ein höheres Verhältnis aufweist ($0,21$), wurde ein Einfluss von eingetragenem Staub aus der Sahara vermutet. Die Probe enthielt mit $38 \text{ }\mu\text{g/kg}$ Partikelmasse verhältnismäßig viel Staub im Vergleich zu den anderen Proben mit $< 1 \text{ }\mu\text{g/kg}$ Partikelmasse. Am

23.2.16 wurde eine PM_{10} Konzentration von $40 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ an der UFS gemessen (Durchschnitt: $< 5 \text{ }\mu\text{g/m}^3$) (Ries, 2016). Die anhand von Trajektorien (Abb. 2) bestimmten südlichen Windrichtungen bestärken die Vermutung eines luftgetragenen Einflusses von Pu-reichen Partikeln aus der Sahara. Das $^{239+240}\text{Pu}/^{137}\text{Cs}$ -Aktivitätsverhältnis der Probe liegt mit $0,0443 \pm 0,0038$ ebenfalls im Bereich der Werte die für Saharastaub bestimmt wurden (Lee et al., 2003; Pham et al., 2005).

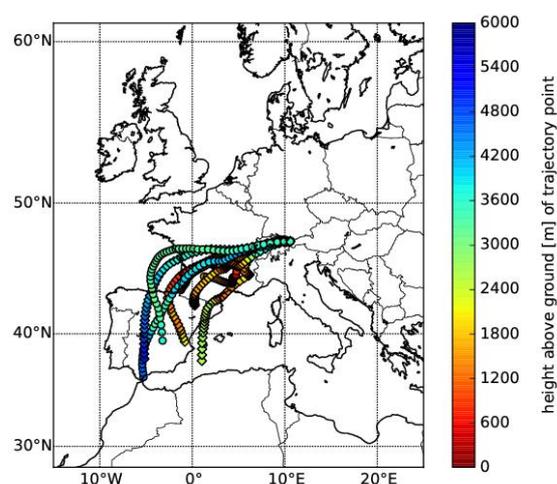


Abb. 2: „Backward trajectories“ die am 23.02.2016 zwischen 0:00 und 10:00 Uhr an der UFS eintrafen, berechnet unter Verwendung des FLEXTRA Codes. Meteorological driver: Global Forecast Model (NOAA). Zur Verfügung gestellt von: Alpine Environmental Data Analysis Center (<http://www.alpendac.eu/>).

Die erhaltenen Ergebnisse liefern einen ersten Einblick in die Gehalte an Pu im Schnee auf der Zugspitze. Für das vollständige Verständnis des Transportes und des Verhaltens von Plutonium im System Atmosphäre-Hydrosphäre werden weiterführende Messungen von Schnee- und Regenproben von der Zugspitze und Vergleichsorten benötigt. Zusätzlich sollten für einen Gesamtüberblick die Luftkonzentrationen und die Trocken-deposition untersucht werden. (Siehe Harsch et al., Kapitel 12., Seite 50).

Literatur

Lee, S. H., La Rosa, J. J., Levy-Palomo, I., Oregioni, B., Pham, M. K., Povinec, P. P. und Wyse, E.: Recent inputs and budgets of Sr-90, Cs-137, Pu-239, Pu-240 and Am-241 in the northwest Mediterranean Sea. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(17-21), 2817-2834. doi: 10.1016/S0967-0645(03)00144-9, 2003.

Pham, M. K., La Rosa, J. J., Lee, S. H., Oregioni, B. und Povinec, P. P.: Deposition of Saharan dust in Monaco rain 2001-2002: Radionuclides and elemental composition. *Physica Scripta*, T118, 14-17, 2005.

Quinto, F., Hrncsek, E., Krachler, M., Shotyk, W., Steier, P. und Winkler, S. R.: Determination of Pu-239, Pu-240, Pu-241 and Pu-242 at femtogram and attogram levels - evidence for the migration of fallout plutonium in an ombrotrophic peat bog profile. *Environmental Science-Processes & Impacts*, 15(4), 839-847. doi: 10.1039/c3em30910j, 2013.

Ries, L.: persönliche Mitteilung bzgl. PM-10: Saharastaub an der UFS, 2016.

Danksagung

Für die Entwicklung des Probenahmeverfahrens und die Probenahme an der UFS wurde eng mit der Betriebsmannschaft der UFS GmbH zusammen gearbeitet. Vielen Dank dafür.

Die Studie wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 02NUK030A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Die verwendeten Trajektorien (Abb. 2) wurden im Rahmen des Projektes Virtuelles Alpenobservatorium (VAO), gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz) in Kooperation mit dem Team des Alpine Environmental Data Analysis Center (AlpEnDAC) erstellt.

STABILE WASSERISOTOPE UND UMWELTRADIONUKLIDE ALS TRACER FÜR TRANSPORT-PROZESSE IM SCHNEE – STUDIE AUF ZUGSPITZE, SONNBLICK UND JUNGFRAUJOCH

KERSTIN HÜRKAMP¹, NADINE ZENTNER^{1,2}, EVA-MARIA SCHIESTL¹, ANNE RECKERTH¹,

JOCHEN TSCHIERSCH¹, CHRISTINE STUMPP²

HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN, INGOLSTÄDTER LANDSTRASSE 1, 85764 NEUHERBERG

¹INSTITUT FÜR STRAHLENSCHUTZ, ²INSTITUT FÜR GRUNDWASSERÖKOLOGIE

E-MAIL: KERSTIN.HUERKAMP@HELMHOLTZ-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung

Am Ende der Schneesaisonen 2015 und 2016 wurden auf Zugspitze, Sonnblick und Jungfraujoch Schneeprofile für die Analyse der stabilen Wasserisotope und der Umweltradionuklide beprobt, um mit diesen Tracern Stofftransportprozesse für die Prognose der räumlich-zeitlichen Freisetzung mit dem Schmelzwasser abzuleiten. An hochalpinen Standorten reichern sich Radionuklide im Schnee an und können hochkonzentriert mit der ersten Schneeschmelze in kurzer Zeit in Böden oder Oberflächenwässer abgegeben werden, wo sie über Grund- und Trinkwasser eine Strahlenexposition für die Bevölkerung darstellen.

Abstract

At the end of the snow seasons 2015 and 2016, snow profiles at Mt. Zugspitze, Sonnblick and Jungfraujoch were sampled and analysed for stable water isotopes and environmental radionuclides. By means of these tracers, mass transport processes can be deduced in the snow for predicting their spatiotemporal release with meltwater. At high-alpine sites, radionuclides accumulate in the snowpack during the winter. They can be short-term released to soils and surface waters with the snowmelt runoff and provide an additional human radiation exposure via ground and drinking water.

Einführung

Schnee wäscht sehr effizient aerosolgebundene Radionuklide aus der Atmosphäre aus (Hürkamp et al., 2015). Je nach meteorologischen Bedingungen werden sie über lange Zeit in der Schneedecke gespeichert und durch Sublimation und Evaporation aufkonzentriert. Während der Schneeschmelze können sie daher in kürzester Zeit in relativ hohen Konzentrationen an das Schmelzwasser und in die Böden abgegeben werden und eine Strahlenexposition über Oberflächen-, Grund- und Trinkwasser darstellen.

Im Rahmen des VAO-Teilprojekts III/03 (Virtuelles Alpenobservatorium) wurden jeweils zum Ende der Schneeakkumulationsperiode im Mai/Juni 2015 und 2016 auf den europäischen Alpengipfeln der Zugspitze unterhalb der Umweltforschungsstation Schneefernhaus am Zugspitzplatt (D, 2420 m ü. NN), des Hohen Sonnblicks am Sonnblick Observatorium (A, 3110 m ü. NN) und des Jungfraujochs unterhalb der dortigen Höhenforschungsstation (CH, 3400 m ü. NN) Schneeprofile bis auf die Tiefe der letzten Sommeroberfläche gegraben (Abb. 1). Diese Standorte zeichnen sich dadurch aus, dass unter aktuellen klimatischen Bedingungen kein Schmelzwasserabfluss an der Schneebasis während der Akkumulationsperiode (mindestens November bis April) stattfindet. Dadurch kann in einem Profil am Saisonende das gesamtdeponierte Inventar der Umweltradionuklide ⁷Be, ²¹⁰Pb und ¹³⁷Cs in der Schneedecke beprobt werden.



Abb.1: Aufnahme eines Schneeprofiles 2016 am Jungfrau-joch (Foto: N. Weber).

Methoden

Die Radionuklide wurden schichtweise im Schnee beprobt. Die Proben von mindestens 5-15 l Schnee-Wasser-Äquivalent (SWE) wurden eingedampft, dadurch aufkonzentriert und die enthaltenen Aktivitätskonzentrationen von ^7Be , ^{210}Pb und ^{137}Cs mit Reinst-Germanium Gamma-Spektrometern am Helmholtz Zentrum München (HMGU) gemessen.

Schneeproben für die Bestimmung der stabilen Wasserisotope $\delta^{18}\text{O}$ und $\delta^2\text{H}$ wurden in 10 cm-Intervallen (10-20 ml SWE) genommen, luftdicht verpackt und nach der Schmelze mittels Laser-Spektrometrie (Picarro L2120-i) am HMGU gemessen. Die Isotopenverhältnisse werden durch den Vergleich mit einem Meerwasserstandard ermittelt (Leibundgut et al., 2009) und mit der Isotopie in frischem Niederschlag verglichen. Dazu wurden vom Deutschen Wetterdienst zweiwöchentlich Proben von frischem Niederschlag vom Zugspitz-Gipfel aus den gleichen Akkumulationszeiträumen zur Verfügung gestellt. Für Sonn-

blick und Jungfrau-joch wurde auf bereits gemessene Isotopendaten in monatlichen Niederschlagsproben vom Feuerkogel (UBA, 2016; höhenkorrigiert zur Verwendung im Vergleich zum Sonnblick) bzw. Jungfrau-joch (per e-mail von M. Leuenberger) zurückgegriffen.

Zum Vergleich der Daten im Schnee und im Niederschlag sowie in den Schneeprofilen der drei Standorte untereinander wurden die Schneehöhen mit Hilfe der bei der Profilaufnahme in situ ermittelten Schneedichten in SWE umgerechnet und normiert.

Ergebnisse und Diskussion – Umweltrationuklide

Tiefenverteilungen der Aktivitätskonzentrationen der Umweltrationuklide im Schnee zeigen, dass insgesamt die Konzentrationen sehr gering sind und für ^{210}Pb und ^{137}Cs auch in einigen Proben die Nachweisgrenzen nicht erreichten (Abb. 2). Insgesamt liegt $^7\text{Be} > ^{210}\text{Pb} \gg ^{137}\text{Cs}$. Ein schwacher Tiefengradient für das ^7Be ist ausgeprägt, der auf die kurze Halbwertszeit des Nuklids (53,2 d) und damit dessen Zerfall in tieferen, älteren Schichten zurückzuführen ist. Höhere Konzentrationen aller Nuklide sind generell in sedimentangereicherten Schichten zu finden, wie z.B. in der Schneeschicht zwischen 63-75 cm des Sonnblick-Profils 2015. Diese Schicht wurde im Feld als alte Sommeroberfläche 2014 interpretiert und führte eine hohe Sediment- und Fracht an organischer Substanz, die als bevorzugte Sorptionspartner für die partikelgebundenen Radionuklide, insbesondere das ^{210}Pb und ^{137}Cs fungieren. In allen Profilen von 2016 wurde eine mineralisch angereicherte Schicht in ähnlichen Tiefenlagen beprobt, die alle auf dasselbe Sahara-Staub-Ereignis von Anfang

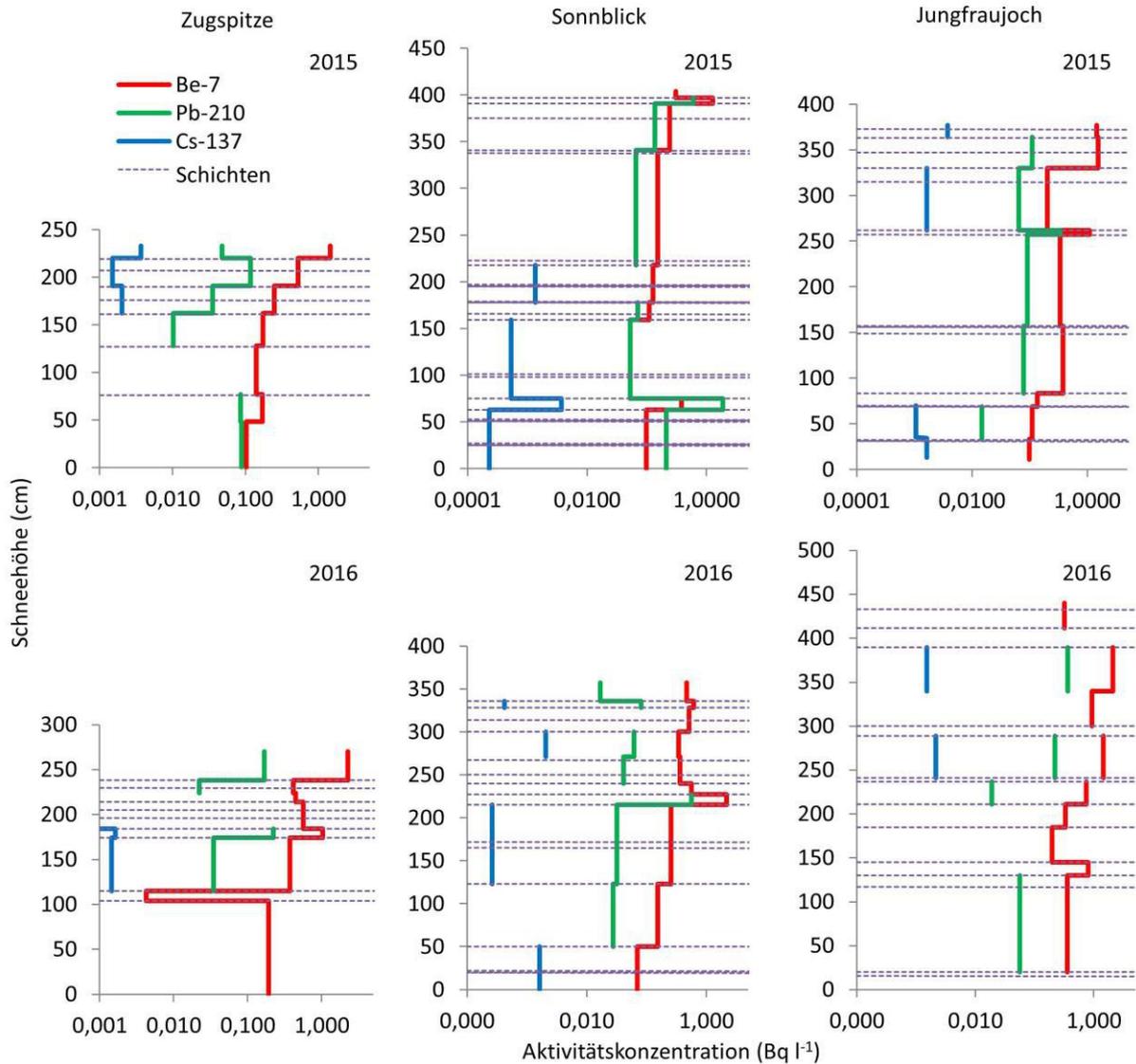


Abb.2: Tiefenverteilung der Aktivitätskonzentrationen der Umweltradioisotope ⁷Be, ²¹⁰Pb und ¹³⁷Cs in Schneeprofilen am Ende der Schneeakkumulationsperioden 2014/2015 und 2015/2016 auf der Zugspitze (D), am Sonnblick (A) und am Jungfrauoch (CH).

April 2016 zurückzuführen sind (5./6. April 2016, freundliche mündliche Mitteilung von L. Ries, UBA sowie der Kollegen von der ZAMG am Sonnblick und der Betriebsmannschaft der Forschungsstation Jungfrauoch) und ebenfalls erhöhte Aktivitätskonzentrationen der Umweltradioisotope aufweisen. 2015 konnte eine im Jungfrauoch-Profil sichtbare Sahara-Staub-Schicht bei 260 cm an den anderen Standorten nicht gefunden werden. Generell kann festgestellt werden, dass im Vergleich der drei Standorte die ⁷Be-Konzentrationen auf dem Jungfrauoch und die ²¹⁰Pb-Aktivitäten im Sonnblick-Profil 2015

am höchsten sind. ⁷Be wird als kosmogenes Radionuklid kontinuierlich durch Spaltungsprozesse in der oberen Atmosphäre gebildet. Seine Konzentrationen steigen daher mit der Höhe an, womit die doppelt so hohen Aktivitäten am Standort Jungfrauoch in 3400 m ü. NN erklärt werden können. Das ²¹⁰Pb ist terrestrischen Ursprungs aus der natürlichen Uran- Radium-Zerfallsreihe und liegt in höheren Konzentrationen in Regionen mit anstehenden kristallinen Gesteinen vor, in denen die Mutterisotope stark konzentriert sind. Ein Beispiel dafür sind die metamorphen Gesteine des Zentralalpin, die auch den Hohen

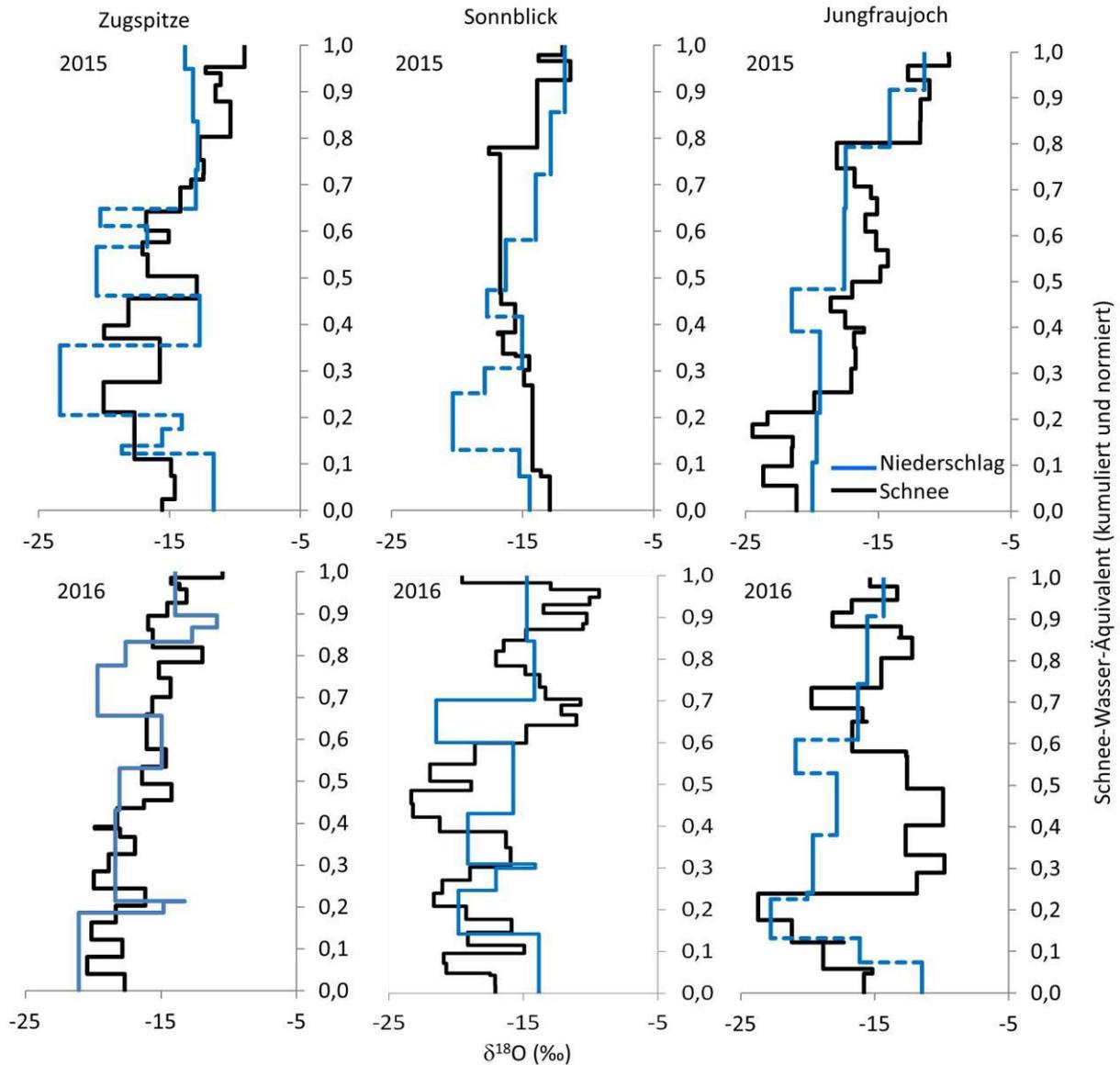


Abb.3: Tiefenverteilung der Isotopenverhältnisse des $\delta^{18}\text{O}$ in Schneeprofilen und korrelierten Proben frischen Niederschlags am Ende der Schneeakkumulationsperioden 2014/2015 und 2015/2016 von der Zugspitze (D), Sonnblick (A) und Jungfraujoch (CH). Zum Vergleich der Profile und der Daten in Schnee und Niederschlag wurden die Schneehöhen in Schnee-Wasser-Äquivalente umgerechnet und normiert.

Sonnblick umgeben, und könnten die des Zentralalpin, die auch den Hohen Sonnblick umgeben, und könnten die Quellen für die hohen ^{210}Pb -Konzentrationen im Schneeprofil von 2015 sein.

Ergebnisse und Diskussion – Stabile Wasserisotope

Der Vergleich der Isotopenverhältnisse im Schnee mit den Werten im frischen Niederschlag liefert Informationen über den Einfluss meteorologischer Parameter auf Alterationsprozesse im Schnee, hervorgerufen durch

Evaporation, Sublimation und Schmelze. Höhere $\delta^{18}\text{O}$ im Schnee gegenüber dem frischen Niederschlag in den obersten Schichten im Schnee am Saisonende sind auf solche Prozesse zurückzuführen (z.B. im Zugspitz-Profil 2015, Abb. 3). Isotopisch leichteres Schmelzwasser ist in diesem Fall bereits in tiefere Schichten abgeflossen und schwere Isotope bleiben im Restschnee angereichert. Mit der Perkolatation des ersten Flüssigwassers im Schnee geht auch der Stofftransport einher. Ein Großteil der Radionuklide wird bereits mit den ersten 10-20 % des Schmelzwassers aus

der Schneesäule heraustransportiert (Hürkamp et al., 2017a). Ein weiteres Indiz für die bereits begonnene Schneeschmelze ist eine Homogenisierung der Verteilung der Isotopenverhältnisse durch perkolierendes Schmelzwasser (geringere Amplitude), wie sie z.B. im Sonnblick-Profil 2015 zu sehen ist. Dieses Profil wurde erst am 02.07.2015 gegraben, als die Schneeschmelze bereits eingesetzt hatte, was auch durch Isothermie und Wassersättigung des Schnees in situ beobachtet werden konnte. Wenn die Isotopenverhältnisse im Schnee und im Niederschlag einen ähnlichen Tiefenverlauf zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass keine Alterationsprozesse im Schnee stattgefunden haben und initiale Schneetexturen noch erhalten sind (z.B. untere Hälfte des Zugspitz-Profiles 2016). Starke Unterschiede der beiden Isotopie-Kurven sind allerdings auch auf äußere Einflüsse, v.a. Winddrift des Schnees zurückzuführen, insbesondere während Perioden mit niedrigen Temperaturen, in denen sehr trockener und feinkörniger Schnee deponiert wird.

Die Ergebnisse und Interpretation der Daten zu den stabilen Wasserisotopen wurden zudem in einer das Projekt begleitenden Masterarbeit von Nadine Zentner (Zentner, 2016) beschrieben sowie die räumlich-zeitliche Verteilung der Isotope am Zugspitzplatt in Hürkamp et al. (2017b) publiziert. In einem nächsten Schritt fließen sie als Input-Parameter in eine hydrologische Verweilzeitmodellierung des Wassers im Zugspitz-Karstaquifer ein.

Schlussfolgerungen

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Schneeprofilen auf Zugspitze, Sonnblick und Jungfrauojoch gezogen werden:

- Kontinuierliche Akkumulation der Schneedecke und der enthaltenen Radionuklide während des Winters (November bis April)

an allen drei Standorten unter den aktuellen klimatischen Bedingungen;

- kurzfristige und hochkonzentrierte Freisetzung der Radionuklide mit dem ersten Schmelzwasserabfluss;
- Umweltradionuklide und stabilen Wasserisotope geeignet als Tracer für Stofftransporte in der Schneedecke;
- Konzentrationen der Umweltradionuklide an den drei Standorten abhängig von lokalen Einflüssen (Höhe, Geologie);
- Ausblick: Nutzung der stabilen Wasserisotope als konservative Tracer für die hydrologische Verweilzeit-Modellierung des Wassers im Zugspitzplatt-Karstaquifer.

Literatur

Hürkamp, K., Bernauer, F. und Tschiersch, J.: Washout von aerosolgebundenen Radionukliden mit Schnee, UFS Scientific Results 2013/2014, (http://www.schneefernerhaus.de/fileadmin/web_data/bilder/pdf/Wissenschaftliche_Resultate.pdf), 2015.

Hürkamp, K., Tafelmeier, S. und Tschiersch, J.: Influence of melt-freeze-cycles on the radionuclide transport in homogeneous laboratory snowpack, *Hydrological Processes*, 31, 1360–1370, 10.1002/hyp.11110, 2017a.

Hürkamp, K., Zentner, N., Reckerth, A., Weishaupt, S., Wetzel, K.-F., Tschiersch, J. und Stumpp, C.: Spatiotemporal variations of high alpine isotopic snow composition – Implications for mass transport and snowmelt runoff, *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2017b (in review).

Leibundgut, C., Maloszewski P. und Külls C.: Tracers in Hydrology, John Wiley & Sons Ltd., 2009.

UBA (Umweltbundesamt Österreich): Österreichisches Messnetz für Isotope im Niederschlag und in Oberflächengewässern (ANIP) (http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/wasser/isotopen/isotopen_anip/), 2016).

Zentner, N.: Temporal dynamics of isotopic composition in snow – from snow melt to catchment runoff, Master Thesis, Technische Universität Dresden und Helmholtz Zentrum München, 2016.

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). Weiterhin danken wir den Betriebsmannschaften der Höhenforschungsstationen Schneefernerhaus (Markus Neumann et al.), Sonnblick (Bernhard Niedermoser, Elke Ludewig et al.) und Jungfraujoch (Markus Leuenberger et al.) sowie den assoziierten Partnern (Henry Schmölz (Bayerischer Lawinenwarndienst), Bernhard Hynek (ZAMG), Andreas Bauder (ETHZ), Margit Schwikowski (PSI)) für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Kampagnen. Rainer Lindner, Jan Ruhland, Nina Weber, Aleksandra Kiecak, Katharina Gückel, Edith Bachmayer (alle HMGU) und den Mitarbeitern der Bayerischen Zugspitzbahn sei für die Unterstützung bei der Grabung der Profile, Probenahme bzw. -transport gedankt. Für die Messung der stabilen Wasserisotope danken wir Petra Seibel (HMGU).

EINFLUSS VON UMWELTPARAMETERN AUF DIE SEKUNDÄREN NEUTRONEN DER KOSMISCHEN STRAHLUNG IM ALPENRAUM

VLADIMIR MARES¹, THOMAS BRALL¹, ROLF BÜTIKOFER², GERHARD DONTH¹, WERNER RÜHM¹

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

² UNI BERN

E-MAIL: MARES@HELMHOLTZ-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung; Das mobile Neutronenspektrometer des Helmholtz Zentrums München (HMGU) wurde verwendet, um auf dem Jungfrauoch, Schweiz; im Sphinx Observatorium und in der nahegelegenen Forschungsstation erstmals die Energieverteilung der sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung zu messen. Es zeigten sich deutliche Unterschiede zur an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) im selben Monat (Juni 2016) gemessenen Energieverteilung. Dies liegt an der an beiden Standorten unterschiedlichen Höhe, Topographie und Schneebedeckung.

Abstract: By means of the mobile Bonner neutron spectrometer of the Helmholtz Center Munich (HMGU), Germany, the energy distribution of secondary neutrons from cosmic radiation was measured for the first time at the Jungfrauoch, Switzerland, in the Sphinx observatory and at the research station close by. For June 2016, significant differences were observed if compared to the energy distribution measured at the Environmental Research Station (UFS). These differences are due to different altitudes, topography and snow cover at both locations.

Seit den 1950er Jahren existiert ein weltweites Netz von Neutronenmonitoren (NM), die kontinuierlich die sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung auf dem Erdboden überwachen (www.nmdb.eu). Die zwei auf

dem Jungfrauoch in der Schweiz vorhandenen Monitore spielen dabei eine wichtige Rolle (Flückiger et al., 2009). Der erste vom Typ IGY-NM, der 1958 in Betrieb ging, wurde 1966 auf insgesamt 18 Zählrohre erweitert (18-IGY-NM) und auf der Terrasse des Sphinx Observatoriums aufgebaut (3570 m ü. NN). Der zweite, ein Neutronenmonitor vom Typ 3-NM64 mit drei Zählrohren, ging 1985 auf dem Dachgeschoss der Forschungsstation in Betrieb (3,475 m ü. NN.). Generell sind Neutronenmonitore auf Nukleonen der sekundären kosmischen Strahlung (Neutronen, Protonen) empfindlich, sie können jedoch keine Information zur Energieverteilung der sekundären Neutronen liefern. Dies wäre nötig, wenn man neben der Neutronenfluenz (d.h. die Zahl der Neutronen pro cm²) auch die durch diese Neutronen verursachte Strahlungsdosis bestimmen möchte. Um die Energieverteilung der sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung über den relevanten Energiebereich bis zu einigen GeV experimentell zu bestimmen, muss ein spezielles Bonner Vielkugelspektrometer verwendet werden (extended-range Bonner sphere spectrometer (ERBSS)). Im Jahre 2005 installierte das HMGU in der Nähe des Zugspitzgipfels auf der UFS ein derartiges ERBSS System (2650 m ü. NN), um kontinuierlich die Energieverteilung der sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung zu messen (Leuthold et al., 2007).



Abb. 1.: Typ 3-NM64 Neutronenmonitor auf der Jungfrau-
joch Forschungsstation (3475 m ü. NN). (R. Bütikofer,
<http://cosray.unibe.ch>)

Messungen mit diesem ERBSS-System sowie mit Neutronenmonitoren haben gezeigt, dass zum Beispiel eine Schneebedeckung des Bodens die Fluenzrate der sekundären Neutronen beeinflussen kann. Dies liegt daran, dass die Fluenz der Neutronen, die vom Boden reflektiert werden (Albedo-Neutronen mit Energien zwischen meV und einigen MeV), vom Wasser- und Schneegehalt in der Umgebung der Messgeräte abhängt (Rühm et al., 2012). Das hier vorgestellte Projekt hat das Ziel, die an der UFS mit dem ERBSS-System zu verschiedenen Jahreszeiten erzielten Messergebnisse mit den auf dem Jungfrau-
joch während dieser Jahreszeiten zu vergleichen, und auch die Daten der dortigen Neutronenmonitore zu berücksichtigen (Mares et al., 2017).

Das ERBSS Bonner Vielkugel Spektrometer

Das mobile ERBSS System des HMGU besteht aus vier sphärischen ^3He Proportionalzähler (Durchmesser: 3,3 cm; Partialdruck 172 kPa; Version SP9, Centronic Ltd.), und 15 verschiedenen Polyethylen (PE) Moderator-Kugeln mit unterschiedlichem Neutronenansprechvermögen befinden (Durchmesser: 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15 inch). Zwei weitere PE-Kugeln (Durchmesser: 9 inch) enthalten zusätzlich Bleischalen (Dicke:

0,5 bzw. 1 inch), um das Neutronenansprechvermögen bei hohen Energien ($E > 20$ MeV) zu erhöhen (Mares et al., 1998a). Ein ^3He -Zähler ohne Moderator-Kugel ist besonders sensitiv für thermische Neutronen. Alle Detektorsignale werden mit Vorverstärkern (ACHEM7E) und einem Mulltiport II (Canberra Industries Inc.) verstärkt. Die Ansprechfunktionen der Detektoren und der Moderator-Kugeln wurden mit Monte Carlo (MC) Methoden simuliert (Mares et al., 1991, 1998b), sowie in einem Energieintervall zwischen thermischen Energien und 14,8 MeV bei 13 Neutronenenergien (Alevra et al., 1992; Thomas et al., 1994) und in quasi-mono-energetischen Neutronenfeldern mit Peak-Energien bei 244 MeV und 387 MeV experimentell validiert (Mares et al., 2013).

Messpositionen

Das HMGU ERBSS-System wurde auf dem Jungfrau-
joch so nah wie möglich an den Neutronenmonitoren aufgebaut (Abb.2 und 3).

Neutronen-Energieverteilung auf dem Jungfrau- joch

Im Juni 2016 wurden die sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung mit dem HMGU ERBSS-System auf dem Jungfrau-
joch sowohl im Sphinx Observatorium als auch in der Forschungsstation unter Winterbedingungen gemessen. Abbildung 4 zeigt die gemessenen entfalteten Neutronen-Energieverteilungen (Neutronenspektren).

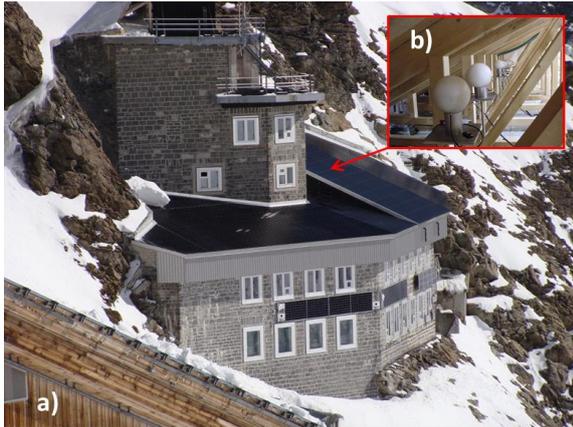


Abb. 2; Messposition in der Forschungsstation auf dem Jungfrauoch, nahe der Position des 3-NM64 Neutronenmonitors (Fotos: a) M. Fischer; b) V. Mares)



Abb. 3: Messposition im Sphinx Observatorium, nahe des 18-IGY Neutronenmonitors (Fotos: c), d) V. Mares)

Deutlich sind die vier Hauptbereiche der Spektren zu sehen: a) die Maxwell-Boltzmann Verteilung bei thermischen Energien, b) der flache epithermische Bereich, c) ein Maximum durch Verdampfungsneutronen, die bei der Abregung von durch Teilchen der kosmischen Strahlung hochangeregten Reaktionskernen entstehen, und d) ein Maximum bei etwa 100 MeV, das wegen eines Minimums in den Neutronen-Wirkungsquerschnitten in Luft zustande kommt. Die in Abbildung 4 gezeigten Unterschiede der beiden Neutronenspek-

tren können durch Unterschiede in der Topographie und der Schneebedeckung an den beiden Standorten erklärt werden: Das Sphinx Observatorium befindet sich auf dem Gipfel des Jungfrauochs, während die Forschungsstation an einem Hang etwa 100 m unterhalb des Gipfels gelegen ist. Beispielsweise wurden auf der Forschungsstation etwa 3,5-mal weniger Verdampfungsneutronen gemessen als im Sphinx Observatorium, während sich die hochenergetischen Neutronen bei etwa 100 MeV nur um etwa einen Faktor 1,3 unterscheiden. Im Gegensatz dazu wurden auf der Forschungsstation deutlich mehr thermische Neutronen gemessen, vermutlich wegen der 20 – 30 cm dicken Schneeschicht auf dem Dach der Station.

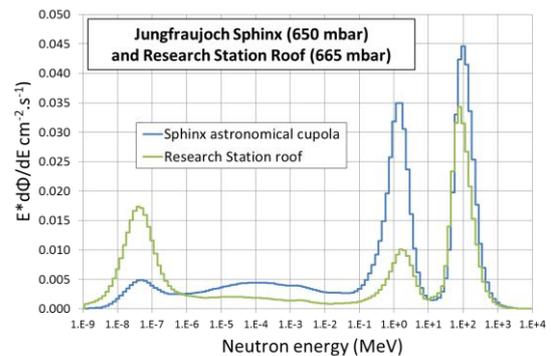


Abb. 4: Neutronenspektren im Juni 2016 im Sphinx Observatorium und auf dem Dach der Forschungsstation auf dem Jungfrauoch.

Abbildung 5 zeigt zum Vergleich die an der UFS und auf der Forschungsstation Jungfrauoch gemessenen Neutronenspektren. Unterschiede sind insbesondere bei thermischen und bei den hochenergetischen Neutronen zu erkennen, die auf der Forschungsstation Jungfrauoch (3475 m ü. NN) etwa um den Faktor 2 häufiger sind als an der UFS (2650 m ü. NN). Im Gegensatz dazu zeigen die Verdampfungsneutronen, die eine isotrope Richtungsverteilung aufweisen, kaum Unterschiede in der Häufigkeit, was durch die an beiden Standorten ähnliche Topographie (beide Forschungsstationen liegen an einem steilen Hang) erklärt werden könnte.

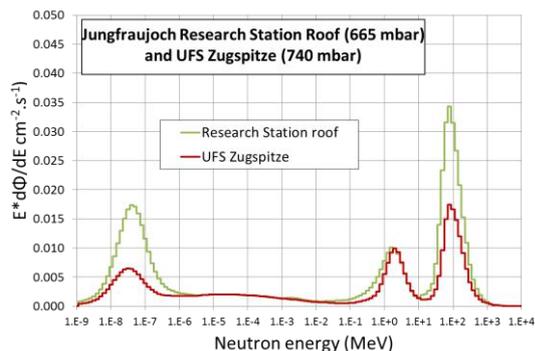


Abb. 5: Neutronenspektren im Juni 2016 an der UFS und auf dem Dach der Forschungsstation Jungfrauoch.

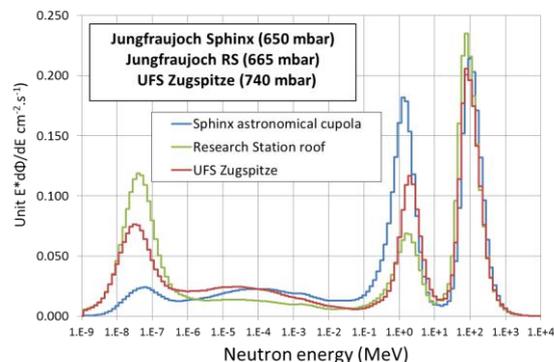


Abb. 7: Neutronenspektren im Juni 2016 auf der Zugspitze und dem Jungfrauoch, normiert auf die totale Neutronenflussdichte.

Die an den drei Standorten im Juni 2016 gemessenen Neutronenflussdichten im gesamten Energiebereich sowie in den vier Teil-Energiebereichen sind in Abbildung 6 zusammengefasst.

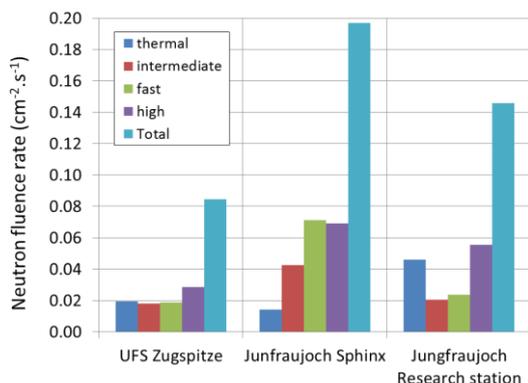


Abb. 6: Neutronenflussdichten im Juni 2016 in Abhängigkeit von der Neutronenenergie: thermal ($1 \text{ meV} \leq E < 0.4 \text{ eV}$), intermediate ($0.4 \text{ eV} \leq E < 100 \text{ keV}$), fast ($100 \text{ keV} \leq E < 20 \text{ MeV}$) and high ($E \geq 20 \text{ MeV}$).

Um die Ortsdosis $H^*(10)$ zu berechnen, wurden schließlich für beide Standorte die Neutronenspektren jeweils mit den Fluenz-zu-Dosis Konversionskoeffizienten (ICRP, 1997) gefaltet, wobei für große Energien die Erweiterung von Pelliccioni (Pelliccioni, 2000) verwendet wurde. Die so berechneten Ortsdosisleistungen waren im Juni 2016 auf dem Sphinx Observatorium mit 176 nSv/h etwa 2,8 mal höher als an der UFS (62 nSv/h). Für die Forschungsstation Jungfrauoch betrug die Ortsdosisleistung 103 nSv/h.

Zusammenfassung

Während einer Messkampagne im Juni 2016 wurden mit dem HMGU ERBSS-System erstmals die Energieverteilung der sekundären Neutronen der kosmischen Strahlung auf dem Sphinx Observatorium und auf der Forschungsstation Jungfrauoch gemessen. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass Umweltparameter die Neutronenspektren beeinflussen können. Eine zweite Messkampagne zu einer Jahreszeit ohne Schnee ist für August/September 2018 geplant.

Literatur

Alevra, A.V., Cosack, M., Hunt, J. B., Thomas; D. J. und Schraube, H.: Experimental determination of the response of four Bonner sphere sets to monoenergetic neutrons (II) Radiat. Prot. Dosim. 40, 91-10,1992.

E. O. Flückiger, E.O. und Bütikofer, R.: Swiss neutron monitors and cosmic ray research at Jungfrauoch, Advances in Space Research 44, 1155-1159, 2009.

ICRP, International Commission on Radiological Protection (ICRP), Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, ICRP Publication 74. Pergmon, 1997.

G. Leuthold, G., Mares, V., Rühm, W., Weitzenegger, E. und Paretzke, H.G.: Long-term measurements of cosmic ray neutrons by means of a Bonner spectrometer at mountain altitudes – first results, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 126, No. 1-4, pp. 506-511, 2007.

Mares, V., Schraube, G. und Schraube, H.: Calculated neutron response of a Bonner sphere spectrometer with ^3He counter Nucl. Instr. Meth. A 307, 398–412, 1991.

Mares, V. und Schraube, V.: Proceedings, The IRPA Regional Symposium on Radiation Protection in Neighbouring Countries of Central Europe, Prague, Czech Republic, September 1997, 543-547, 1998a
http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/031/30031466.pdf

Mares, V., Sannikov, A. und Schraube, H.: The response functions of a ^3He -Bonner spectrometer and their experimental verification in high energy neutron fields, SATIF-3 Proceedings, Sendai, Japan, 237-248, 1998b.

Mares, V., Pioch, C., Rühm, W., Iwase, H., Iwamoto, Y., Hagiwara, M., Satoh, D., Yashima, H., Itoga, T., Sato, T., Nakane, Y., Nakashima, H., Sakamoto, Y., Matsumoto, T., Masuda, A., Harano, H., Nishiyama, J., Theis, C., Feldbaumer, E., Jaegerhofer, L., Tamii, A., Hatanaka, K. und Nakamura, T.: Neutron dosimetry in quasi-monoenergetic fields of 244 and 387 MeV, IEEE Trans. Nucl. Sc. 60, 299-304, 2013.

Mares, V., Brall, T., Bütikofer, R. und Rühm, W.: Influence of environmental parameters on secondary neutrons from cosmic rays at high altitudes in Alpine region, HFSJG High Altitude Research Stations Jungfraujoch and Gornergrat, International Foundation, Activity Report 2016, 2017.

Pelliccioni, M.: Overview of fluence-to-effective dose and fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients for high energy radiation calculated using the FLUKA code. Radiat. Prot. Dosim. 88, 279–297, 2000.

Rühm, W., Ackermann, U., Pioch, C. und Mares, V.: Spectral neutron flux oscillations of cosmic radiation on the Earth's surface, Journal of Geophysical Research, VOL. 117, A08309, 2012.

Thomas, D.J., Alevra, A.V., Hunt, J.B. und Schraube, H.: Experimental determination of the response of four Bonner sphere sets to thermal neutrons, Radiat. Prot. Dosim. 54, 25-31, 1994.

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).

ALPENDAC - SAHARASTAUB ÜBER SÜDDEUTSCHLAND: EIN BEISPIEL FÜR „COMPUTING-ON-DEMAND“

CHRISTOPH HARSCH¹, GERHARD GESELL², JULIAN MEYER-ARNEK², STEPHAN HACHINGER³,

MICHAEL BITTNER^{1,2}

¹UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, UNIVERSITÄTSSTRAßE 1, 86159 AUGSBURG

²DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT

³LEIBNIZ-RECHENZENTRUM DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

E-MAIL: CHRISTOPH.HARSCH@PHYSIK.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Im Frühjahr 2016 konnten Staubmassen über Südbayern (in situ) und über der iberischen Halbinsel und Frankreich (vom Satellit aus) beobachtet werden. Mithilfe des Luftausbreitungsmodells Flextra, wie es im Rahmen des AlpEnDAC (Alpine Environmental Data Analysis Center; www.alpendac.eu) zur Verfügung gestellt wird, konnte die Sahara als Herkunftsgebiet der Staubmassen identifiziert werden.

Abstract: Early in 2016, dust was observed over the south of Bavaria (in situ) and over the Iberic peninsula and France (from satellite). By using the Flextra model in a setup made accessible via the AlpEnDAC (Alpine Environmental Data Analysis Center; www.alpendac.eu), we were able to identify the Sahara as the origin of the air masses with the observed dust load.

Am 22. Februar 2016 zeigte der Himmel an einigen Orten Süddeutschlands eine gelblich-trübe Farbe und Windschutzscheiben einen feinen, staubigen Niederschlag. Ursache hierfür war Wüstensand aus der Sahara, der mit Höhenwinden nach Europa gelangt war. Die Verfrachtung von Saharastaub konnte mit Satellitendaten beobachtet werden.

Zur Lokalisierung des Ursprungs wurde das Transportmodell FLEXTRA (Stohl et al., 1995;

Stohl & Seibert, 1998) eingesetzt, das maßgeblich am Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Wien, entwickelt wurde. Im Rahmen des Projekts VAO-AlpEnDAC (Virtual Alpine Observatory - Alpine Environmental Data Analysis Center) wurde FLEXTRA speziell konfiguriert und optimiert, um mit ihm bei Bedarf - „on demand“ - die Herkunft von Luftmassen und ihrer Fracht abzuschätzen. Initialisiert werden die Berechnungen mit dem Global Forecast System (GFS), das in einem Raster von $0,25^\circ$ (ca. 28 km) meteorologische Modelldaten bereitstellt.

Das Modell kann im AlpEnDAC über ein einfaches Webformular konfiguriert (z.B. Angabe eines gewünschten Zeitraums, geografische Koordinaten) und gestartet werden. Dabei ist es nicht erforderlich, dass der Benutzer Fachkenntnisse zu dem verwendeten Modell besitzt. Es wird sodann automatisch ein Modellensemble über mehrere Höhenbereiche gerechnet. Dafür wird innerhalb der AlpEnDAC-Cloud eine sogenannte virtuelle Maschine gestartet, die nach erfolgter Modellierung die Ergebnisse in die AlpEnDAC-Datenbank zurückspeilt. Der Nutzer wird per Email informiert, wenn die Resultate vorliegen und er kann dann die Ergebnisse abrufen bzw. über eine interaktive Visualisierung im AlpEnDAC-Webportal betrachten (Abb. 2).

Staubausbrüche aus der Sahara kommen immer wieder vor. Der größte Teil des Staubtransports aus der Sahara erfolgt dabei zu meist nach Westen, Süden und Osten vor allem im Sommer und Herbst. Die Passatzirkulation trägt die Fracht im Westen hinaus auf den Atlantik und im Süden am Rande der inner-tropischen Konvergenzzone in die Sahelzone. Im Osten ist vor allem der asiatische Sommermonsun für die Verwehungen verantwortlich. Allerdings bilden sich im Spätwinter und Frühjahr häufig Tiefdruckgebiete über dem zentralen und westlichen Mittelmeer, deren Einflussbereich bis in die zentrale Sahara reicht. Durch diese Tiefdruckwirbel werden Luftmassen aus der Sahara nach Europa geführt. Oft tritt dann über dem zentralen Mittelmeer der heiße Wüstenwind Scirocco auf. Mit diesen Luftmassen gelangt der Saharastaub häufig auch bis in den süddeutschen Raum oder sogar noch weiter nach Norden.

Bei der hier exemplarisch untersuchten Situation wurde am 21. Februar, bedingt durch ein Tief vor der marokkanischen Küste, Staub aus der Sahara zunächst nach Nordwesten, am 22. dann auch nach Nordosten in Richtung Alpen und Alpenvorland transportiert.

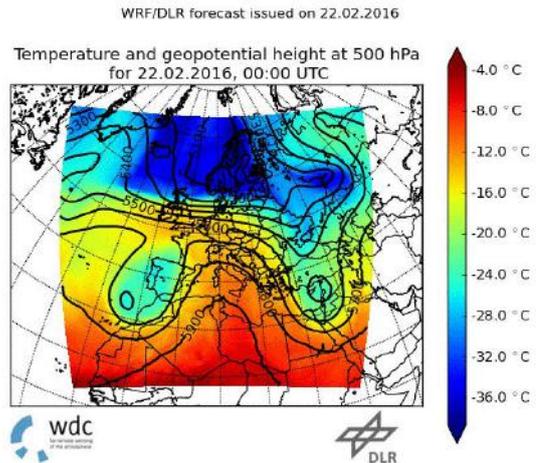
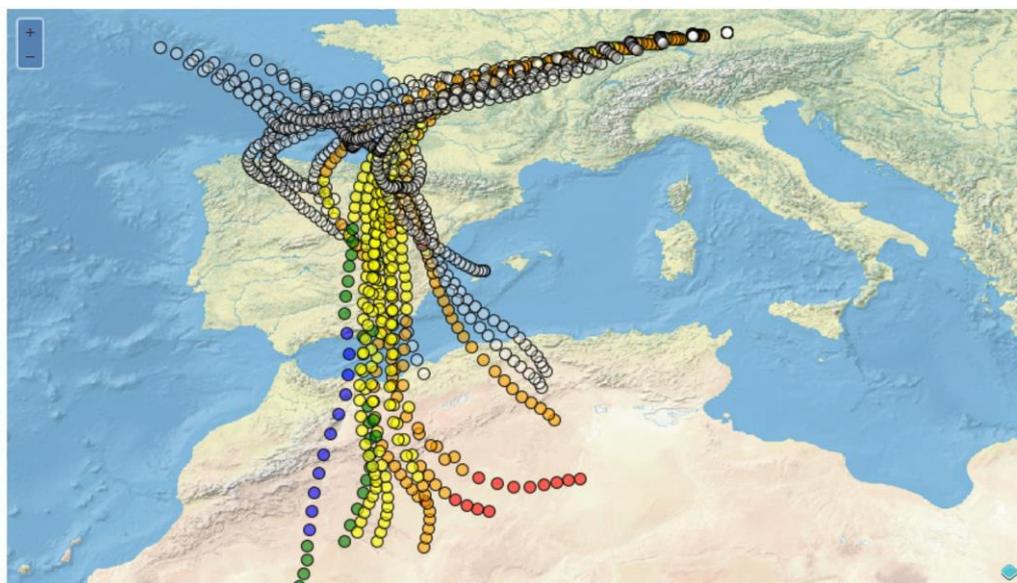


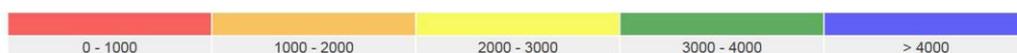
Abb.1: Höhenwetterlage am 22. Februar 2016, 00:00 UTC

Die Wetterkarte der 500 hPa-Fläche (ca. 5500 m ü. NN) zeigt dieses Tief (Abb. 1). Die schwarzen Linien gleicher geopotentieller Höhe auf dieser Druckfläche können in erster Näherung als Strömungslinien angesehen werden. Auf der Ostseite des Tiefs weht der Wind von Süd nach Nord über Spanien und Frankreich und dreht dann nach Osten.

Abb.2: Flextra- Rückwärtstrajektorien für den Raum Südbayern; Luftpakete die sich entlang der farbig gezeichneten Trajektorien bewegen kommen zwischen 10 und 20 Uhr UTC in Süddeutschland an



Trajectory heights above ground in metres:



Coloured air parcels start/arrive at 2016-02-22 between 10:00 and 20:00 UTC 1500 m above ground.

Die am 22. Februar im Großraum München vorhandenen Luftmassen wurden nun unter Verwendung des Trajektorienmodells FLEXT-RA zurückverfolgt.

Betrachtet man die Zugbahnen der Luftmassen aus der Sahara in Verbindung mit den jeweiligen Ankunftszeiten im süddeutschen Raum, so wird sichtbar, dass diese Luftmassen in der zweiten Tageshälfte des 22. Februars ankommen. Die Flughöhe der Luftpakete ist farbig kodiert. Die Karte zeigt, dass diese zum großen Teil aus einem Bereich südlich des Atlasgebirges stammten und der einge-tragene Staub offenbar von dort stammte.



Abb.3: Satellitenbild des VIRS Instruments auf dem amerikanischen Suomi-NPP Satelliten vom 22. Februar 2016.
©NASA

Auch auf dem Satellitenbild des amerikanischen Satelliten Suomi-NPP kann der Weg des Staubs aus der Sahara über die Iberische Halbinsel und Frankreich nachvollzogen werden (Abb. 3). Dieser Staub wurde an der Vorderseite des frontalen Wolkenbandes, das von Nordwestspanien über Frankreich und Deutschland reicht, in den süddeutschen Raum transportiert.

Das AlpEnDAC wird kontinuierlich um weitere numerische Modelle und Analysewerkzeuge ergänzt werden.

Literatur

Stohl, A., G. Wotawa, P. Seibert und Kromp-Kolb, H.: Interpolation errors in wind fields as a function of spatial and temporal resolution and their impact on different types of kinematic trajectories. *J. Appl. Meteor.* 34, p. 2149-2165, 1995

Stohl, A. und Seibert, P.: Accuracy of trajectories as determined from the conservation of meteorological tracers. *Q. J. Roy. Met. Soc.* 124, p. 1465-1484, 1998.

Danksagung

Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, BayStMUV, für die Förderung des Projektes AlpEnDAC im Rahmen des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO).

Projektpartner sind die Universität Augsburg (Institut für Physik, Projektleitung), das Leibniz-Rechenzentrum (LRZ), das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR-DFD), die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) und das bifa Umweltinstitut.

MONITORING UND TRACER-BASIERTE HYDROLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN IM EINZUGSGEBIET DER PARTNACH

STEFAN WEISHAUPT¹, KARL-FRIEDRICH WETZEL¹

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

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

Zusammenfassung: Die alpinen Regionen sind besonders für die Vorländer von sehr hoher hydrologischer Bedeutung, jedoch sind die verschiedenen Wasserflüsse und deren Bilanzierung im Gebirgsraum nur schwierig zu erfassen und zu modellieren. Hydrochemische Untersuchungen mittels der elektrischen Leitfähigkeit liefern den Beleg für unterschiedliche Abflussprozesse im Karstsystem und ermöglichen die Trennung von Abflusskomponenten wie den Schmelzwasserabfluss.

Abstract: The alpine region represents areas with a high hydrological significance especially for its forelands, but the different fluxes of water and the overall water balance are difficult to measure and to compute. Hydro chemical investigations based on electric conductivity provided evidence of different runoff processes in the karst system and allow a separation of runoff components such as snowmelt runoff.

Messnetzwerk und Monitoring im Zugspitzgebiet

Im Gebiet befinden sich seit 2013 zusammen mit den Messstationen des DWD und des Bayerischen Lawinenwarndienstes (LWD) insgesamt sechs meteorologische Stationen sowie eine Pegelstation in der Nähe des Partnach-Ursprungs (Abb. 1). Die Pegelstation registriert Wasserstand, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit (EL) und Niederschlag in hoher zeitlicher Auflösung während der Sommersaison. Im Winter fällt das Gerin-

ne trocken oder ist durch Schnee und Eis blockiert. Das Messnetzwerk wurde 2016 durch eine Niederschlagskippswaage an der Blauen Gumppe und einen weiteren Pegel an der Bockhütte in das Reintal ausgeweitet.

Langjährige hydrologische Zeitreihe

Die mehrjährigen Abflusszeitreihen wurden in den vergangenen Jahren erfolgreich fortgeführt und die homogenisierte Abflussreihe mit aktuellen Daten (bis Juli 2017) ergänzt. Somit liegen Pegeldata eines Hilfspegels an der Partnach mit einzelnen Unterbrechungen seit dem Sommerhalbjahr 1996 vor. Jedes weitere Jahr mit einem lückenlos erfassten Abfluss steigert den wissenschaftlichen Wert und die Aussagekraft dieser konsistenten Datenreihe, welche die unersetzliche Basis des angestrebten langjährigen Monitorings im Zugspitzgebiet bildet.

Die gut funktionierende technische Erfassung und die sehr gute Pegelschlüsselkurve liefern valide Ergebnisse für niedrige und mittlere Abflüsse. Extremere Wasserstände, wie das jährliche Hochwasser, werden aufgrund des nicht befestigten Messquerschnitts jedoch nicht mit der gleichen Genauigkeit erfasst. Hier ist für die Zukunft eine Ertüchtigung der Pegelanlage notwendig! Diskrepanzen zwischen Radarsensor und Drucksonde im Gewässer treten insbesondere durch die unterschiedliche Erfassungsmethode auf, da bei bestimmten Abflüssen stehende Wellen unter

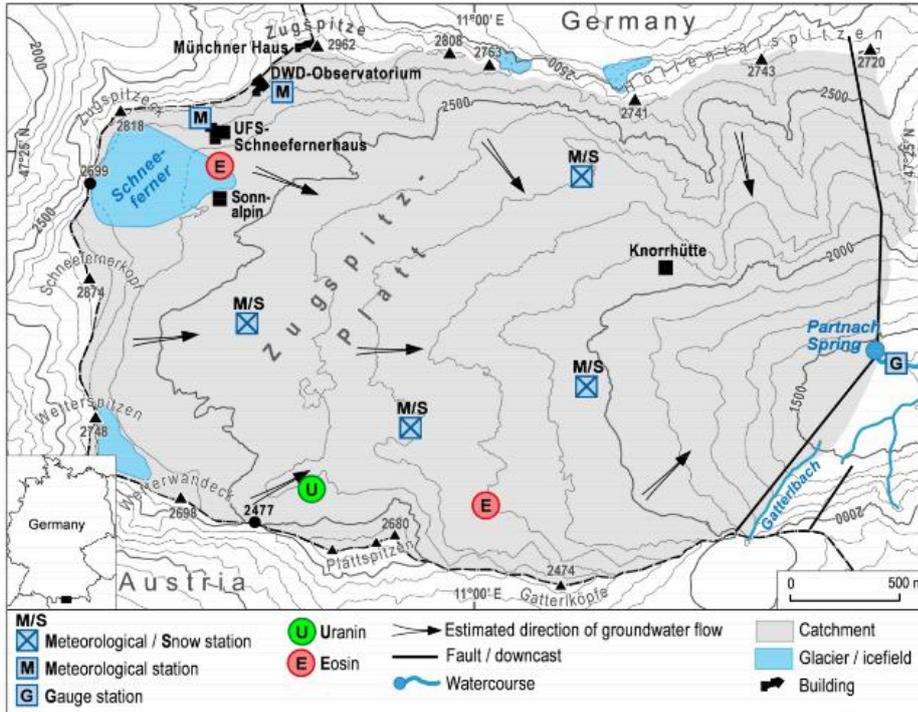


Abb. 1: Messnetzwerk am Zugspitzplatt mit den meteorologischen Stationen, der Pegelstation am Partnach-Ursprung, den Eingabeorten der Markierungsversuche und der vermuteten Grundwasserfließrichtung (nach Rappl et al., 2010).

dem Sensor die flächige Wasserstandsmessung des Radarsystems verfälschen. Ein neu konstruiertes Gerinne mit optimierter Anströmung und befestigter Sohle könnte diese Messunterschiede bereinigen.

Untersuchungen zur Abtrennung von Abflusskomponenten

Die hydrologischen Verhältnisse der Partnach im Untersuchungsgebiet sind durch ein nivales alpines Abflussregime geprägt, welches durch hohe schmelzwasserbedingte sommerliche Abflüsse und niedrige Abflüsse im Herbst und im Frühling charakterisiert wird. Während in der kalten Jahreszeit flüssige Niederschläge nahezu ausbleiben, wird die sommerliche Quellschüttung aus der Schneeschmelze und im Spätsommer vor allem aus andauernden zum Teil heftigen konvektiven Niederschlägen gespeist. Das Quellwasser stammt allerdings zu Beginn der Schmelze nicht direkt aus der Schneedecke, sondern hauptsächlich aus dem tiefen Karstspeicher in der phreatischen Zone. Dieses aufgrund langer Verweildauer höher mineralisierte „Karstwasser“ wird im Laufe der Schneeschmelze durch das weniger mineralisierte

Schmelzwasser nach und nach verdrängt und ausgetauscht, was durch den Verlauf der EL nachzuweisen ist. Diese nimmt während der Schneeschmelze an der Partnach so lange ab, wie durch die Schneeschmelze schwach mineralisiertes Wasser zu einer Verdünnung des tiefen Karstwassers führt. Die maximale Verdünnung mit der niedrigsten EL wird meistens Anfang Juli erreicht. Danach geht der kontinuierliche Zufluss aus der Schmelze zurück und die EL im Abfluss steigt bis zum Ende des Jahres wieder an.

Der Abflussbeitrag des tiefen Karstwassers hat eine EL von ca. 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, wie Messungen am Partnach-Ursprung im späten Herbst zeigen. Studien von Hüttl (1999) belegen, dass neues Schmelzwasser mit einer EL von ca. 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in das Karstsystem infiltriert. Zusammen mit der kontinuierlich am Partnach-Ursprung erfassten EL sind somit die geochemischen Signaturen der am Abfluss beteiligten Komponenten bekannt, so dass mit einer 2-Komponenten Mischungsrechnung die Menge des Direktabflusses bestimmt werden kann. Abbildung 2 zeigt für das Abflussjahr 2016 exemplarisch den Verlauf der EL und der Abflusskomponenten Di-

rektabfluss sowie den Anteil des tiefen Karstwassers. Dabei wird der Anteil des Direktabflusses aus Schmelzwasser und Niederschlägen bis zum Höhepunkt der Schneeschmelze mit maximal ca. 80 % immer größer.

Das Karstspeichervolumen in der phreatischen Zone konnte nach dieser Methode auf ca. $12 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ geschätzt werden, während das Volumen des austauschbaren Wassers in der vadosen Zone mittels einer Rezessionsanalyse des Trockenwetterabflusses (Rapp et al., 2010) auf $2,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ berechnet wurde. Weitere Untersuchungen und Validierungen der bisherigen Ergebnisse durch Einbezug der stabilen Isotope befinden sich derzeit in Bearbeitung.

Die Methode der Komponentenseparation lässt sich auch auf einzelne Ereignisse anwenden. Der in Abbildung 3 erkennbare starke Abfall der EL von $125 \text{ } \mu\text{S/cm}$ auf $93 \text{ } \mu\text{S/cm}$ ist die Folge des zu Ereignisbeginn oberflächlich einfließenden Wassers aus dem Kirchturmgebiet mit einer EL von ca. $60 \text{ } \mu\text{S/cm}$. Der Anteil des Oberflächenabflusses kann mit dem Mischungsansatz auf ca. 8,3 mm oder ca. 25 % des Niederschlags von 34,3 mm abgeschätzt werden. Mit dem Anstieg der EL setzt die eigentliche Quellschüttung der Partnach etwa 30 Minuten nach Niederschlagsbeginn ein. Die schnelle Reaktion der Quelle ist durch den Anstieg des Karstwasserspiegels und damit einhergehender Druckerhöhung im System zu

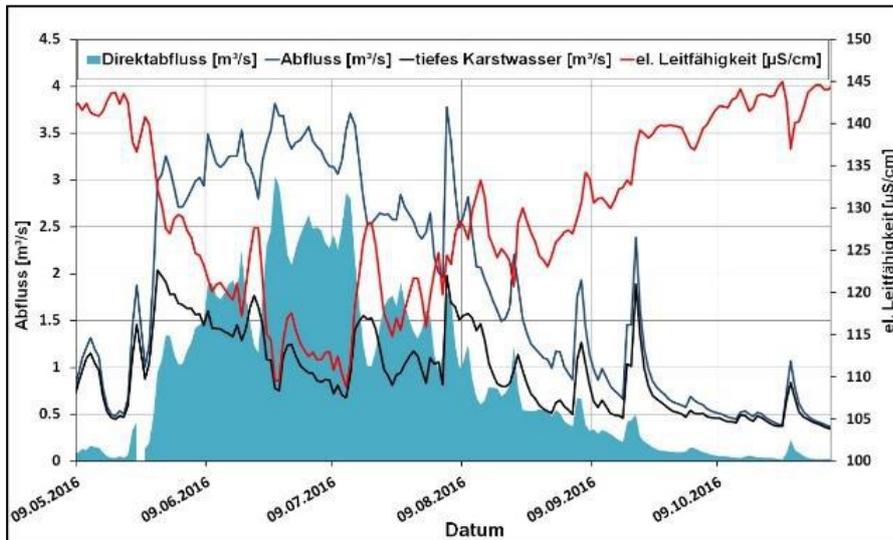


Abb. 2: Separation des tiefen Karstwassers vom Direktabfluss im hydrologischen Sommerhalbjahr 2016 mit Hilfe der elektrischen Leitfähigkeit (EL) als geochemischem Tracer.

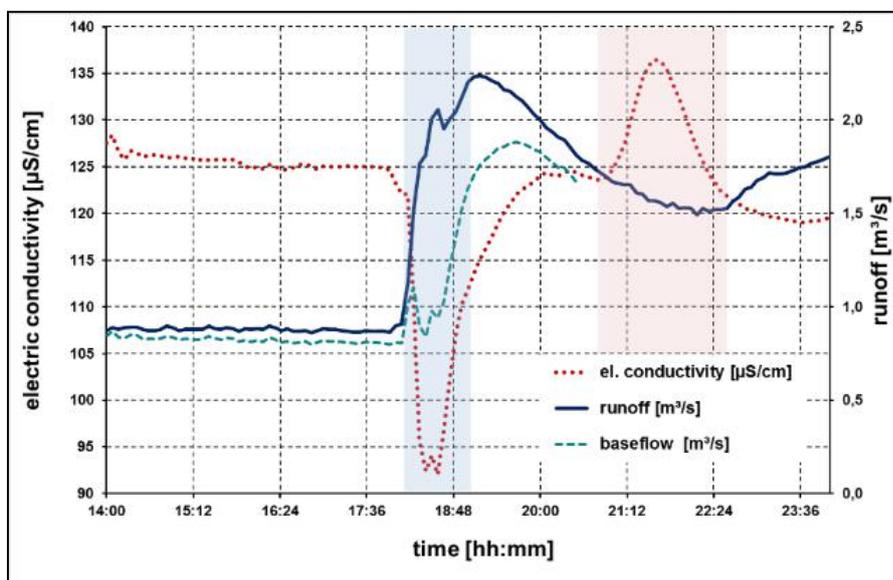


Abb. 3: Abfluss, elektrische Leitfähigkeit (EL) und Karstwasserabfluss am Partnach-Ursprung am 1.9.2015

Später erreicht mobilisiertes altes Karstwasser aus der vadosen Zone mit vergleichsweise hoher EL den Quelltopf und führt zu einem Anstieg der EL über das Ausgangsniveau hinaus.

Die EL als Umwelttracer ist somit ein wichtiger Parameter sowohl zur Trennung von Abflusskomponenten wie z. B. Schneeschmelzabfluss, als auch Indikator zur Abschätzung hydrogeologischer Größen wie mittlerer Verweilzeit und Karstwasservolumina. Aktuell wird an einer Ergänzung des EL basierten Ansatzes durch isopenhydrologische Methoden gearbeitet.

Trockenwetterabflüsse und Rezessionsverhalten

Zur Ermittlung des Trockenwetterabflusses wurden alle verfügbaren Jahre mit Abflussdaten nach dem Verfahren von Richter und Lillich (Mattheß & Ubell, 2003) einer Rezessionsanalyse unterzogen. Dabei stellte sich heraus, dass sich das Auslaufverhalten über die Jahre ändert. Abbildung 4 zeigt den modellierten Speicherauslauf ausgehend von einem Abfluss von 1 m³/s.

Die starke Variabilität des Rezessionsverhaltens ist ungewöhnlich. In der Regel ist die Rezession eine gebietsspezifische Eigenschaft, die durch die Rezessionskonstante „ α “ beschrieben werden kann.

Im Partnachgebiet stören offenbar Prozesse, wie Einsturz von Höhlen bzw. Tunneln oder Einschwemmen von Moränensedimenten von der Oberfläche, dieses Rezessionsverhalten.

Literatur

Mattheß, G. und Ubell, K.: Allgemeine Hydrogeologie – Grundwasserhaushalt. – Lehrbuch der Hydrogeologie Bd. 1, Borntäger, 575 S., Stuttgart, 2003.

Rappl, A., Wetzel, K.-F., Büttner, G. und Scholz, M.: Tracerhydrologische Untersuchungen am Partnach-Ursprung. In: Hydrologie und Wasserwirtschaft 54, S. 220-230, 2010.

Danksagung

Unser Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) für die Förderung des Forschungsvorhabens im Rahmen des Verbundprojekts Virtuelles Alpenobservatorium (VAO-II).

Ebenfalls möchten wir dem Bayerischen Lawinenwarndienst (LWD), dem Deutschen Alpenverein (DAV), den Bayerischen Staatsforsten (BaySF) und der Bayerischen Zugspitzbahn Bergbahn AG (BZB) für die Unterstützung danken. Ein herzlicher Dank geht an Herrn Dr. David Morche (Universität Halle) für die Bereitstellung von Abflussdaten sowie an andere Konsortialpartnern (Helmholtzzentrum München, LMU, TUM) für die produktiven Forschungsk Kooperationen.

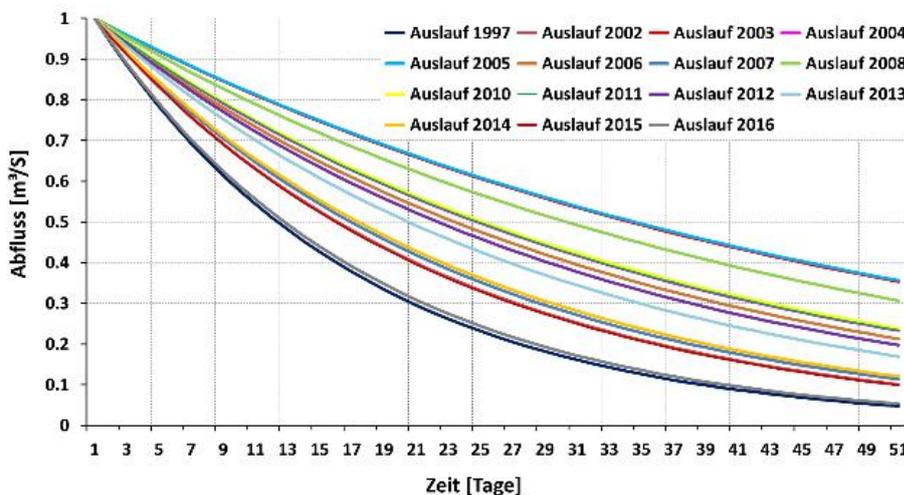


Abb.4: Modellierter Speicherauslauf auf Basis der ermittelten unterschiedlichen Rezessionskoeffizienten.

STATISTISCHES DOWNSCALING METEOROLOGISCHER VARIABLEN MIT HYDROLOGISCHER RELEVANZ AN DER STATION ZUGSPITZE UND DER STATION HOHER SONNBLICK

SEVERIN KASPAR¹, ANDREAS PHILIPP¹, JUCUNDUS JACOBET¹

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

E-MAIL: SEVERIN.KASPAR@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Es werden drei nicht lineare statistische Downscaling-Modellansätze vorgestellt mit dem Ziel, meteorologische Variablen, welche Bezug zum Wasserhaushalt aufweisen, aus großskaligen Eingangsdaten ableiten zu können. Die kalibrierten Modelle können auf Szenarien globaler Klimamodelle übertragen werden und bieten damit einen Einblick in die Projektionen für das 21. Jahrhundert.

Abstract: In the context of the current study, three non-linear statistical downscaling models were developed, with the goal to reproduce local meteorological variables with hydrological background from large scale predictor variables. These models can also use datasets from general circulation models as input, which gives an insight into the model projections for the 21st century.

Ziele und Methoden

Im Rahmen des Projektes Virtuelles Alpenobservatorium (VAO) wurden statistische Downscaling-Modelle entwickelt, um potentielle zukünftige Änderungen in lokalen Größen mit hydrologischer Relevanz abschätzen zu können. Es wurde dabei auf drei nicht lineare Methoden zur Modellbildung zurückgegriffen, welche jeweils auf Basis täglicher Daten erstellt worden sind. Als erstes ist der reference class forecast (RCF) zu nennen, welcher auf Zirkulationstyp-Klassifikationsverfahren (CTC) basiert (Philipp et al., 2010). Als zweites wurden Künstliche Neuronale Netze (KNN oder engl. ANN) kalibriert, ein

nicht lineares Regressionsverfahren (McCulloch & Pitts, 1943). Das dritte Verfahren stellt eine Kombination aus Klassifikation und ANNs dar (CTC + ANN).

Datensätze

Zunächst werden die Modelle kalibriert. Als lokale Zielgrößen (Prädiktanden) dienen die Messzeitreihen der Variablen Niederschlag, relative Feuchte, Temperatur und Windgeschwindigkeit der DWD-Station Zugspitze sowie Temperatur und Niederschlag der Station Hoher Sonnblick. Zur Kalibrierung werden Reanalyse-Daten als großskalige Eingangsdaten (Prädiktoren) verwendet. Später können die Modelle auf Datensätze globaler Klimamodelle (GCMs) übertragen werden. In diesem Projekt sind insgesamt sieben verschiedene Modelle und Realisationen verwendet worden, als Zukunftsszenarien sind RCP 4.5 und RCP 8.5 ausgewählt worden, wobei die Zahl den zusätzlichen Strahlungsantrieb des jeweiligen Szenarios in W/m^2 darstellt. (Van Vuuren et al., 2011).

Ergebnis der Modellkalibrierung

Zusammenfassend dargestellt werden die Ergebnisse der Modellkalibrierung in Abbildung 1. Jeder Punkt entspricht dem mittleren Ergebnis einer 15fachen Kreuzvalidierung. In allen Fällen zeigt die alleinige Anwendung der ANNs die beste Modellperformance in der

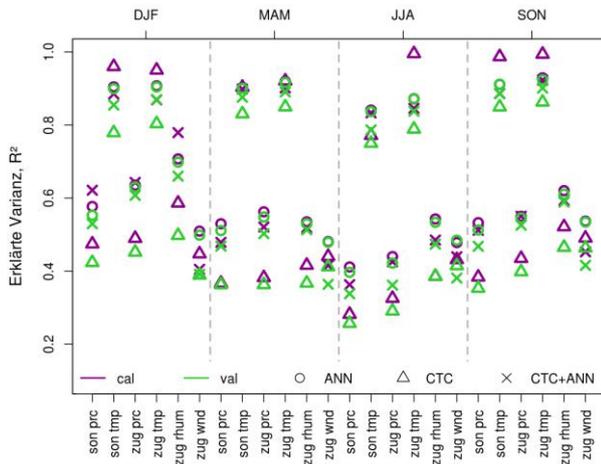


Abb.1: Gegenüberstellung der verschiedenen Modellsätze unter Berücksichtigung der erzielten Modellperformance (R^2 zwischen modellierten und beobachteten Werten) im Kalibrierungs- (cal) und Validierungszeitraum (val), saisonal differenziert für die Prädiktanden Niederschlag (prc), Temperatur (tmp), relative Feuchte (rhum) und Windgeschwindigkeit (wnd) an den Stationen Zugspitze (zug) und Hoher Sonnblick (son).

Validierung, dicht gefolgt von dem kombinierten Ansatz aus CTC + ANN. Die niedrigste Modellgüte erreichen die CTC-Ansätze.

Ergebnisse der Zukunftsprojektionen

Abbildung 2 zeigt das Resultat der Übertragung der kalibrierten Modelle auf die Prädiktor-GCM-Datensätze inklusive Zukunftsprojektion bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Die dünnen Linien repräsentieren jeweils die zentrale Tendenz einer spezifischen Kombination aus GCM und statistischem Modell, wohingegen die dicken Linien den Ensemblemittelwerten aller modellierten Zeitreihen entsprechen. Diese wurden auf einen möglichen Trend mittels Trend-Rausch-Verhältnis (Schönwiese, 2006) unter Berücksichtigung einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % überprüft, wobei nur die beiden Szenarien der zukünftigen Temperaturentwicklung bei beiden Stationen einen signifikanten positiven Trend aufweisen (Abb. 2a und b). Zwischen den beiden Szenarien nimmt erwartungsgemäß der Unterschied gegen Ende des 21. Jahrhunderts zu, der höhere Strahlungsantrieb des RCP 8.5 resultiert dabei in einer höheren Jahresmitteltemperatur. Die jährlichen

Niederschlagssummen beider Stationen unterliegen im Laufe des 21. Jahrhunderts keinen starken Änderungen, was jedoch saisonale Änderungen nicht ausschließt. Betrachtet man die Entwicklung der relativen Feuchte an der Zugspitze, so ist visuell mit einem leichten (insignifikanten) Rückgang im Jahresmittel zu rechnen, während im Verlauf des 21. Jahrhunderts in der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit visuell eine leichte (insignifikante) Zunahme zu verzeichnen ist. Es zeigt sich zudem, dass der Effekt des erhöhten Strahlungsantriebs des RCP 8.5 im Vergleich zu RCP 4.5 nur bei der Temperatur beider Stationen und der relativen Feuchte der Zugspitze zu signifikanten Unterschieden im projiziertem Verlauf führt (Mann & Whitney, 1947: U-Test, Sicherheitswahrscheinlichkeit 95 %).

Ausblick

In Kooperation mit der LMU-München (Department für Geographie) werden die erstellten Zeitreihen als Input zur schneehydrologischen Modellierung in der Region Zugspitze verwendet (siehe Weber et al., Kapitel 25, Seite 100), um unter anderem zukünftige Änderungen der jährlichen Schneedynamik sowie der Gletschermassenbilanz abschätzen zu können.

Literatur

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.

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., Bartholy, J., Beck, C., Ericum, M., Esteban, P., Fettweis, X., Huth, R., James, P., Jourdain, S., Kreienkamp, F., Krennert, T., Lykoudis, S., Michalides, S.C., Pianko-Kluczynska, K.,

Post, P., Álvarez, D.R., Schiemann, R., Spekat, A. und Tymvios, F.S. : COST733CAT - a database of weather and circulation type classifications, Physics and Chemistry of the Earth, 35, 360-373, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2009.12.010>, 2010.

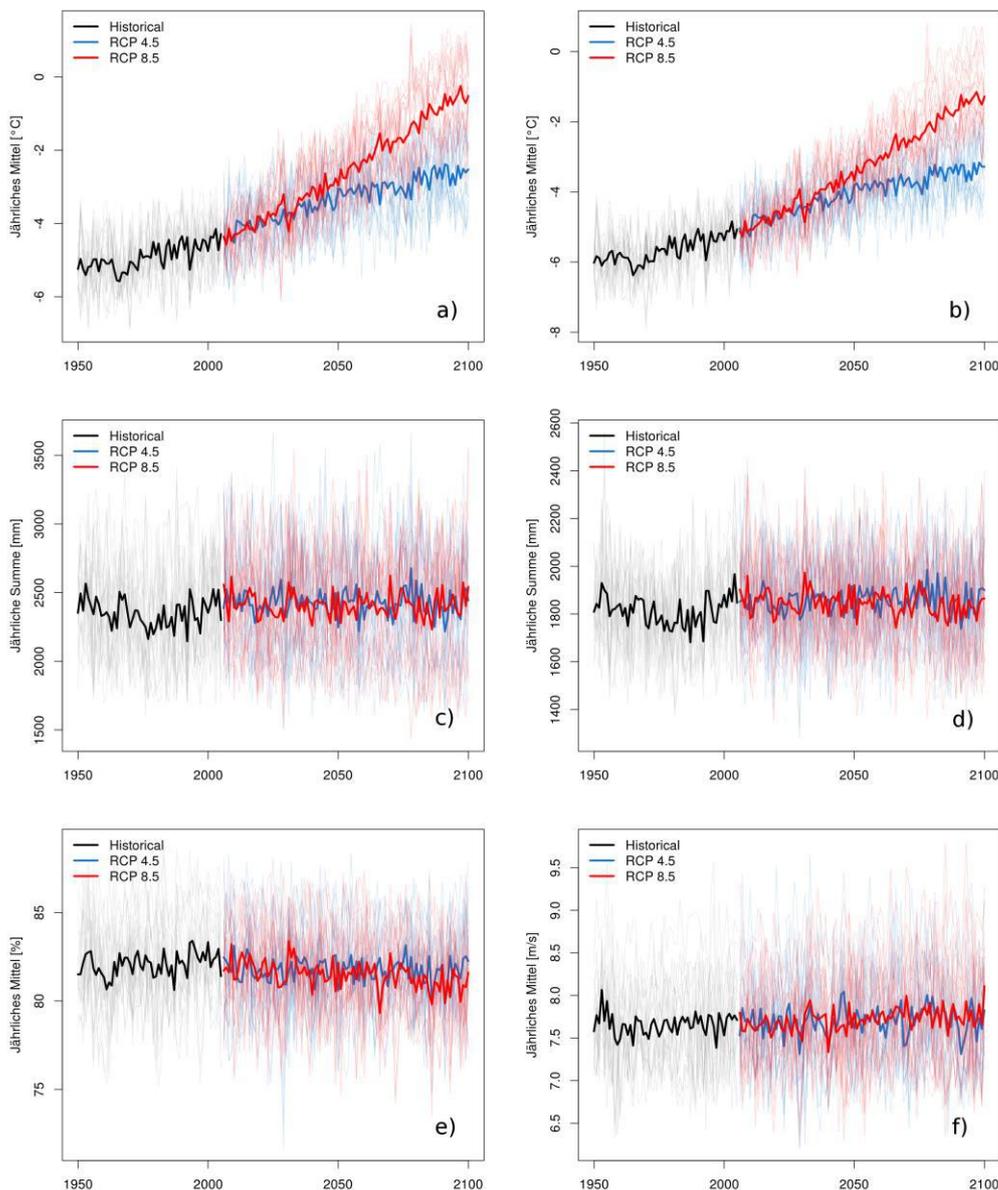
Schönwiese C.D.: Praktische Methoden für Meteorologen und Geowissenschaftler, Stuttgart, 2006.

Van Vuuren, D., Edmonds, J.A., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, Allison M., Hibbard, K.A., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinhausen, M., Nakicenovic, N., Smith, Steven J. und Rose, S.K. : The representative concentration pathways: an overview, Climatic Change, 109, 5-31, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>, 2011.

Danksagung

Das Projekt Virtuelles Alpenobservatorium wurde finanziert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.

Abb.2: Ergebnisse der Projektionsrechnung für die Station Zugspitze: a) Temperatur, c) Niederschlag, e) relative Feuchte und f) Windgeschwindigkeit sowie der Station Hoher Sonnblick: b) Temperatur und c) Niederschlag



AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF DEN BERGWALD IM WERDENFELSER LAND

ANNETTE MENZEL^{1,2}, NILS KERN¹, CHRISTIAN SCHUNK¹

¹PROFESSUR FÜR ÖKOKLIMATOLOGIE, TU MÜNCHEN, HANS-CARL-VON-CARLOWITZ-PLATZ 2, 85354 FREISING

²INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY, TU MÜNCHEN

E-MAIL: ANNETTE.MENZEL@TUM.DE

Zusammenfassung: An vier Höhengradienten im Raum Garmisch-Partenkirchen geht die Professur für Ökoklimatologie der Frage nach, wie sich der rezente Klimawandel auf die Phänologie und den Zuwachs von verschiedenen Baumarten im Bergmischwald sowie die Waldbrandgefährdung auswirken wird. Herzstück des Projektes sind vier voll ausgestattete Klimastationen und ein Netzwerk von 50 Hobo-Lufttemperatur- und Luftfeuchtesensoren in Waldbeständen an zwei Nord- und zwei Südhängen zwischen dem Kramer und dem Königshaus am Schachen, das Höhenlagen zwischen 700 und 1800 m ü. NN abdeckt.

Abstract: Based on four altitudinal gradients in the region of Garmisch-Partenkirchen the Professorship of Ecoclimatology studies impacts of recent climate change on the phenology and the growth of different tree species in mixed mountain forests as well as on the forest fire danger. Centerpiece of the project are four fully equipped climate stations and a network of 50 Hobo air temperature- and air humidity loggers in forest stands at two north and two south facing gradients between the Kramer and the Königshaus am Schachen, covering an altitudinal range of 700 to 1800 m a.s.l.

Unterhalb der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) erstreckt sich mit alpinen Wiesen, Latschenfeldern und dem montanen Bergmischwald eine Zone mit Ve-

getation, die sehr sensibel auf den rezenten Klimawandel und den damit verbundenen Anstieg von Häufigkeit und Intensität von Extremwerten reagiert. Dieser Vegetationsgürtel ist nicht nur die wirtschaftliche Grundlage der alpinen Land- und Forstwirtschaft, sondern er schützt auch den Siedlungsraum vor Muren, Lawinen und Steinschlägen, reguliert den alpinen Wasserhaushalt, beherbergt eine Vielfalt an geschützten Tier- und Pflanzenarten und dient als Erholungs- und Tourismusraum.

Klimainformationen aus der Bergwaldzone

Im Werdenfelser Land stehen mit den Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes in Garmisch (719 m ü. NN) und auf der Zugspitze (2960,2 m ü. NN) sowie mit Messungen an der UFS (2650 m ü. NN) zwar Klimainformationen zur Verfügung, da die Erwärmung im Alpenraum aber größer vorausgesagt wird als im übrigen Deutschland werden Messwerte aus möglichst vielen Höhenlagen benötigt, v. a. um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels und die notwendigen Anpassungsmaßnahmen besser abschätzen zu können.



Abb.1: Klimastationen des KLIMAGRAD Messnetzes am Schachen, auf der Brandwiese, am Kreuzeck sowie an der Felsenkanzel (von links oben im Uhrzeigersinn)

Ein Beispiel dafür ist die Waldbrandgefährdung in den Hanglagen, die sich teilweise dramatisch - z.B. während herbsterlicher und winterlicher Inversionslagen - von der Situation im Tal unterscheiden kann (Schunk et al., 2013). Gleichermäßen unterscheidet sich die Phänologie in der wärmebegünstigten Hangzone von den Tallagen (Schuster et al., 2014). Die vier Klimastationen (Abb. 1) liefern seit Frühjahr 2010 Messwerte zu Temperatur, relativer Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Globalstrahlung, Niederschlag, Boden- und Oberflächentemperatur sowie teilweise Schneehöhe. Zusätzlich zu den Hobo-Loggern wurden in den letzten Jahren noch phänologische Kameras an allen Klimastationen und am Schachen/ Kälbersteig und Osterfelderkopf, sowie ein Brennstofffeuchtemonitoring am Kramer installiert.

Phänologische Aufnahmen

In den Jahren 2015 und 2016 wurden jeweils an ~ 70 Tagen phänologische Aufnahmen in wöchentlichen Abständen durchgeführt. Während bei der Fichte die Nadelentwicklung in den Tieflagen deutlich schneller ist, zeigte sich bei der Buche ein späterer Knospenauf-

bruch in den Tallagen, möglicherweise bedingt durch Spätfröste und Absinken kalter Luftmassen. Abbildung 2 zeigt Aufnahmen vor, zu sowie nach dem Spätfrostergebnis am 27.4.2016.



Abb.2: Blattaustrieb (22.4.2016), Spätfrost am 27.4.2016 sowie Schäden am 9.5.2016 auf der Brandwiese (Garmisch-Partenkirchen)

Zuwachsuntersuchungen

An die 3000 Microcore-Proben wurden in den letzten zwei Jahren in wöchentlichen Abständen gesammelt. Nach der aufwändigen Vorbereitung der Proben wird nun an den fertigen Dünnschnitten ausgezählt, wie viele Zellen sich in welchem Entwicklungsstadium zu einem bestimmten Zeitpunkt im Jahr befinden. In Abbildung 3 ist erkennbar, dass sich in höheren Lagen nicht nur weniger Zellen bilden, sondern auch dass die Zellreifung später beginnt. In Kombination mit den automatischen und manuellen Dendrometern lassen sich die intraannuelle Variation des Wachstums und sein Zusammenhang mit Witterung für verschiedene Baumarten studieren.

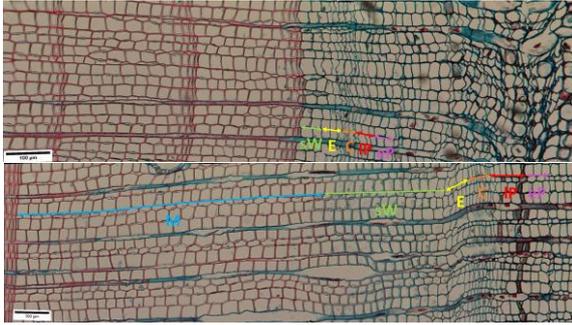


Abb.3: Microcore-Dünnschnitte von Fichten auf 1600 m (oben) und 800 m (unten) vom 20 Juli 2016. Farblich markiert sind verschiedene Zellstadien: Holz: ausgereifte Xylem –Zellen (blau), Bildung der sekundären Zellwand (grün), Expansion (gelb), Kambium/Zellteilung (orange), Rinde: Spät-Phloem (rot), Früh-Phloem (pink).

Literatur

Schunk C., Wastl, C., Leuchner, M., Schuster, C. und Menzel A: Forest fire danger rating in complex topography – results from a case study in the Bavarian Alps in autumn 2011. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13(9), 2157–2167 (doi: 10.5194/nhess-13-2157-2013), 2013.

Schuster, C., Jakobi, G., Kirchner, M. und Menzel, A.: Frequency of inversions affects senescence phenology of *Acer pseudoplatanus* and *Fagus sylvatica*. *International Journal of Biometeorology* 58(4), 485-498 (doi: 10.1007/s00484-013-0709-0), 2014.

Danksagung

Die Forschungsarbeiten sind Teil des Projekts KLIMAGRAD II, das dankenswerterweise durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert wird.

POLLENKONZENTRATIONEN AN DER UFS UND IN GEBÄUDEN

ANNETTE MENZEL^{1,2}, STEPHAN JUNG¹, NICOLE ESTRELLA¹

¹PROFESSUR FÜR ÖKOLOGIE, TU MÜNCHEN, HANS-CARL-VON-CARLOWITZ-PLATZ 2, 85354 FREISING

²INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY, TU MÜNCHEN

E-MAIL: ANNETTE.MENZEL@TUM.DE

Zusammenfassung: Pollenallergikern wird für den Urlaub empfohlen, durch Höhenluft oder Seewind hohen Belastungen von allergenem Pollen zu entfliehen. In einem Langzeitmonitoring wird an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) untersucht, wie sich die Pollensaison auf 2650 m ü. NN in Dauer und Intensität von der im Flachland unterscheidet. Neuere Studien in Gebäuden zeigen, dass bei angepassten Lüftungsstrategien die Pollenkonzentration auf mindestens 20 % der Außenwerte reduziert werden kann.

Abstract: People allergic against pollen are recommended to spend their holidays either at the seaside or in high mountainous areas in order to reduce their personal pollen exposure. Based on long-term monitoring at the Environmental Station Schneefernerhaus (UFS), we study differences in length and intensity of the pollen season at 2650 m a.s.l. and in the lowlands. New studies in office buildings suggest that with provident ventilation schemes reductions in pollen concentrations to 20% and lower are possible.

Für Pollenallergiker gibt es, neben der Hypo-sensibilisierung oder rechtzeitigen Einnahme von Medikamenten, nur die Möglichkeit, hohen Belastungen mit allergenem Pollen durch einen Aufenthalt am Meer oder im Gebirge zu entgehen. Darüber hinaus sind Pollenkonzentrationen in Gebäuden so weit reduziert,

dass dort möglicherweise keine allergologisch relevanten Konzentrationen mehr auftreten.

Pollenmessung an der UFS

An der UFS in 2650 m ü. NN betreibt die Professur für Ökologie dank der tatkräftigen Unterstützung der Betriebsgesellschaft UFS eine Burkard-Pollenfalle (Abb. 1). Zum Vergleich werden atmosphärische Pollenkonzentrationen im Tal in Garmisch-Partenkirchen sowie in Freising erfasst. Mit portablen volumetrischen Luftsammlern werden episodische Pollenkonzentrationen in bzw. außerhalb von Räumen gemessen. Phänologische Beobachtungen im Gelände sowie meteorologische Daten helfen, lokale Quellen von Ferntransport zu trennen. An der UFS werden nur 10 bis 30 % der Pollenmenge vom Tal erreicht und die Pollensaison ist kürzer.



Abb.1: Burkard Pollenfalle an der UFS beim wöchentlichen Austausch der Pollentrommel

Birkenpollen Indoor an der TUM / Freising

Mit 10 portablen volumetrischen Partikelsammlern wurde während der Birkenpollensaison 2015 in Freising in 5 Büroräumen jeweils auf dem Schreibtisch und auf dem Fensterbrett stündliche Konzentrationen an Birkenpollen gemessen. Direkt vor den Fenstern wurden Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck sowie Windrichtung und -geschwindigkeit erfasst (Abb. 2, siehe Menzel et al., 2016).

Die Indoor-Pollenkonzentrationen waren gegenüber den entsprechenden Outdoor-Konzentrationen reduziert. Durch entsprechende Lüftungsstrategien waren Reduktionen auf bis zu 7 % der Außenkonzentration möglich. Die Indoor/Outdoor-Konzentrationsverhältnisse variierten stark mit Lüftungsstrategie, Verhältnis Raumgröße / Fenstergröße, Stockwerk und Exposition des untersuchten Raums (Menzel et al., 2016). Da sich die Bevölkerung zu 80 bis 90 % in Innenräumen aufhält, ist diese Untersuchung von großer Bedeutung, zeigt sie doch auf, dass die atmosphärischen Hintergrundkonzentrationen mit Burkard-Pollenfallen auf Flachdächern in 10 m Höhe gemessen, keinesfalls die individuelle Exposition von Allergikern widerspiegeln.

16.4.2015 – Peak der Birkenpollensaison

Am 16.4.2015 wurden in Freising bzw. in Augsburg mit 1722 bzw. 1249 Pollenkörner / m³ jährliche Maximalwerte gemessen; der Hund-Pollenmonitor in München war nicht in Betrieb. Die jährlichen Maxima für Garmisch und die UFS wurden erst am 22.4. mit 191 / 29 und 23.4. mit 96 / 60 Pollenkörner / m³ erreicht, an diesen zwei Tagen wurden in Freising 321 (22.4.) bzw. 59 (23.4.) Pollenkörner / m³ mit der Burkard Pollenfalle erfasst. Vor den Fenstern der Büroräume war zwischen 8:00 und 19:00 mit 175 (22.4.) bzw. 24 (23.4.) die Pollenkonzentration auf ~ 50 % des Dachwertes, in den Räumen dann noch einmal auf ~ 30 % des Außenwertes abgesenkt.



Abb.2: Portabler volumetrischer Partikelsammler vor Bürofenster mit Kestrel Weather Tracker an der TUM

Fazit

Konzentrationen von allergenem Pollen sind in den Hochlagen der Alpen, z.B. an der UFS, und in Räumen, je nach Lüftungsstrategie, deutlich geringer und können in beiden Fällen bis auf 10 % zurückgehen (Hochlage / Tallage, Indoor / Outdoor). Im Fall des Gebirges ist es vorteilhaft, dass die gesamte Pollensaison kürzer ist. Im Fall der untersuchten Büroräume zeigte sich, dass vor den Räumen im ersten und zweiten Stock die Birkenpollenkonzentration bereits auf 50 % des Wertes auf der Dachplattform abgesenkt war.

Literatur

Menzel, A., Matiu, M., Michaelis, R. und Jochner, S.: Indoor birch pollen concentrations differ with ventilation scheme, room location and meteorological factors. *Indoor Air* 27(3), 539-550 (doi: 10.1111/ina.12351), 2016.

Danksagung

Die Anschaffung der drei Burkard-Pollenfallen wurde durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert.

FLORA, VEGETATION UND VEGETATIONS-DYNAMIK AUF DEM ZUGSPITZPLATT VEGETATIONSÖKOLOGISCHE FORSCHUNG AUF DEM ZUGSPITZPLATT 2015 & 2016

OLIVER KORCH¹, ARNE FRIEDMANN¹

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

EMAIL: oliver.korch@geo.uni-augsburg.de

Zusammenfassung: Die in den wissenschaftlichen Resultaten 2013/2014 vorgestellten vegetationsökologischen Forschungsarbeiten auf dem Zugspitzplatt wurden im Rahmen des KLIMAGRAD II-Projekts in den Jahren 2015/2016 fortgesetzt. Fortgeführt wurden dabei das Dauermonitoring der Plattvegetation sowie die Erhebung von Daten zum Geländeklima. Neu hinzugekommen sind pflanzensoziologische Detailuntersuchungen zum südöstlichen Untersuchungsgebiet, ein Monitoring der auf dem Platt weidenden Schafe mittels GPS-Halsbänder und die Befragung von Touristen zu ihrer Wahrnehmung des Zugspitzplatts sowie ihres Verhaltens im Gelände.

Abstract: The KLIMAGRAD II work on vegetation ecology on the Zugspitzplatt portrayed in the Scientific Results 2013/2014 was continued during 2015/2016. The monitoring of the vegetation on permanent sample plots was continued and additional data on site climate conditions were recorded. In addition, a detailed phytosociological study of the south-eastern Zugspitzplatt, a monitoring of the grazing sheep with GPS-collars and a survey among tourists concerning their view and behavior on the Zugspitzplatt were completed.

Fortführung der Dauerbeobachtung

2015 und 2016 wurden die Vegetationsdauerbeobachtungsflächen innerhalb des Untersuchungsgebiets erneut aufgenommen und das seit 2010 laufende Langzeit-Monitoring der

Vegetation fortgeführt. Abbildung 1 zeigt die Zusammenfassung der Entwicklung der Summe der Artmächtigkeit aller erfassten Arten sowie die absolute Artenanzahl auf acht Flächen innerhalb der alpinen und subnivalen Zone in zwei-Jahres-Intervallen.

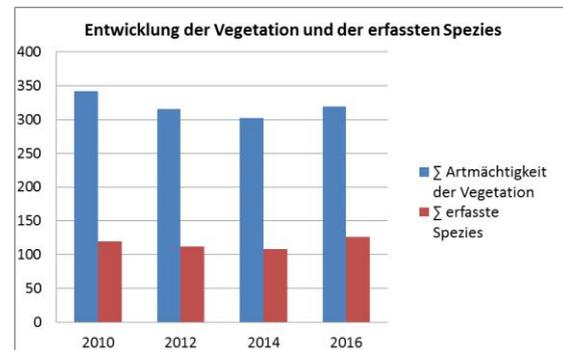


Abb. 1: Entwicklung der Vegetation sowie der erfassten Spezies von 2010 bis 2016.

Diese bisherigen Ergebnisse bestärken die Beobachtung, dass zwischen den einzelnen Zeiträumen zwar Schwankungen feststellbar sind, sich aber ein eindeutiger Trend aufgrund der Persistenz von etablierten Gesellschaften innerhalb des vorliegenden Beobachtungszeitraums bisher nur schwer nachweisen lässt. Es ist hierbei zu vermuten, dass sich verschiedene Einflussgrößen auf die Vegetation (Witterung, Schneedeckendauer, Beweidung, Tourismus) gegenseitig überlagern und beeinflussen.

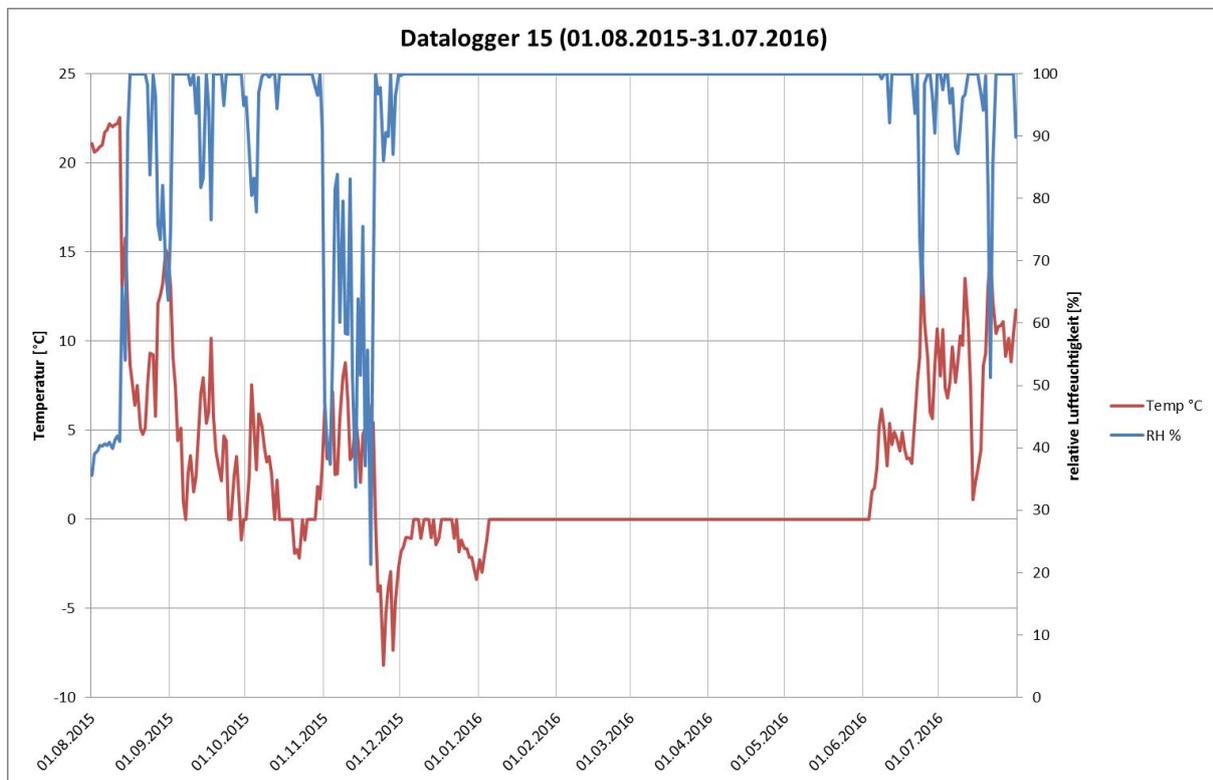
Ausbau der geländeklimatologischen Daten

Das geländeklimatologische Messnetz (Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Bodennähe, um die unmittelbar auf die Vegetation einwirkenden Parameter zu erfassen) wurde 2015 und 2016 weiter ausgebaut und vervoll-

ständig. So konnten beispielweise nun auch in der subalpinen Latschenzone Daten zum Kleinklima dieser Pflanzengesellschaften aufgezeichnet werden (Abb. 2-3).



Abb. 2-3: Datalogger zur Aufzeichnung geländeklimatischer Parameter innerhalb eines Latschenbestandes sowie Darstellung der aufgezeichneten Daten während des Messzeitraums 2015-2016. Foto: Korch



Kennzeichnend hierbei ist eine lange Schneebedeckung und damit einhergehend eine gute thermische Isolierung gegenüber den winterlichen Extrema. Diese im Vergleich zur Lage auf dem unteren Zugspitzplatt lange Schneedeckendauer dürfte sowohl der Abschattung des Standortes nach Süden durch die Plattumrahmung als auch dem Schutz des Schnees durch die Latschen an sich geschuldet sein.

Pflanzensoziologie des südöstlichen Untersuchungsgebiets

Im Kontext einer 2016 abgeschlossenen Bachelorarbeit (Korbacher, 2016) wurde der südöstliche Bereich des Zugspitzplatts nahe des Gatterls 2015 detailliert pflanzensoziologisch untersucht. Hier befindet sich auf einem alten Bergsturzgelände eine sehr heterogene, kleingekammerte Vegetation, welche einen standortbedingten Mikrokosmos aller ande-

ren Höhenstufen und Pflanzengesellschaften des Untersuchungsgebietes darstellt. Interessant ist dabei auch das vermehrte Aufkommen von jungen Latschen, was im Zusammenhang mit einer in den letzten Jahrzehnten nachlassenden Beweidung des Gebietes stehen dürfte. Es konnten in diesem Geländeabschnitt auch eine Reihe von Arten erstmals im Untersuchungsgebiet nachgewiesen werden (Abb.4).



Abb. 4: Die Silberdistel (*Carlina acaulis*) als seltene Art auf dem südöstlichen Zugspitzplatt. Foto: Korch

Monitoring der Schafe mittels GPS-Halsbänder

In den Sommern 2015 und 2016 wurde ein Monitoring der auf dem Zugspitzplatt weidenden Schafe mittels GPS-Halsbänder durchgeführt. Ziel dieses Monitorings war es, die Wanderungen der sich weitestgehend frei im Gebiet bewegenden Tiere während der sommerlichen Weideperiode nachvollziehen zu können. Die dadurch gewonnenen Daten sollen es wiederum ermöglichen, Rückschlüsse auf den unterschiedlichen Beweidungsdruck sowie Nährstoffeinträge und –Austräge ziehen zu lassen. Von den etwa 350-400 Tieren wurden hierfür drei mit GPS-Halsbändern ausgestattet (Abb. 5). Im 20-Minuten-Rhythmus zeichneten diese Halsbänder sowohl Positions- als auch Aktivitätsdaten der Tiere im Zeitraum Ende Juni-Anfang September auf.



Abb. 5: Besendertes Schaf auf dem Zugspitzplatt im August 2015. Foto: Korbacher

In Abbildung 6-7 sind die Höhen der Standorte der besenderten Individuen dargestellt für die Zeiträume 06.07.-13.07.2015 (Schönwetterperiode zu Beginn des Almsommers) sowie 03.08.-09.08.2015 (hochsommerliche Wetterlage nach völliger Ausaperung des gesamten Zugspitzplatts.) Besonders letzterer Abschnitt lässt erkennen, dass die Tiere bei schneefreiem Gelände und gutem Wetter bis in die höchsten Bereiche des Untersuchungsgebiets vordringen. Es ist zu vermuten, dass bei einem künftig immer früheren Ausapern des oberen Untersuchungsgebiets dieses Verhaltensmuster zunehmen wird und dies somit zu einer Umgewichtung des Beweidungsdruckes auf dem Zugspitzplatt führen kann.

Befragung von Touristen auf dem Zugspitzplatt

Die im Rahmen einer abgeschlossenen Masterarbeit (Wagner, 2017) im Sommer 2016 sowie im Winter 2016/2017 durchgeführten Befragungen von Touristen ergaben, dass von den 154 Befragten Sommertouristen eine knappe Mehrheit (51,9 %) zu Fuß (überwiegend über das Reintal) auf das Zugspitzplatt geht. Dies unterstreicht die bereits beobachtete starke Frequentierung und damit

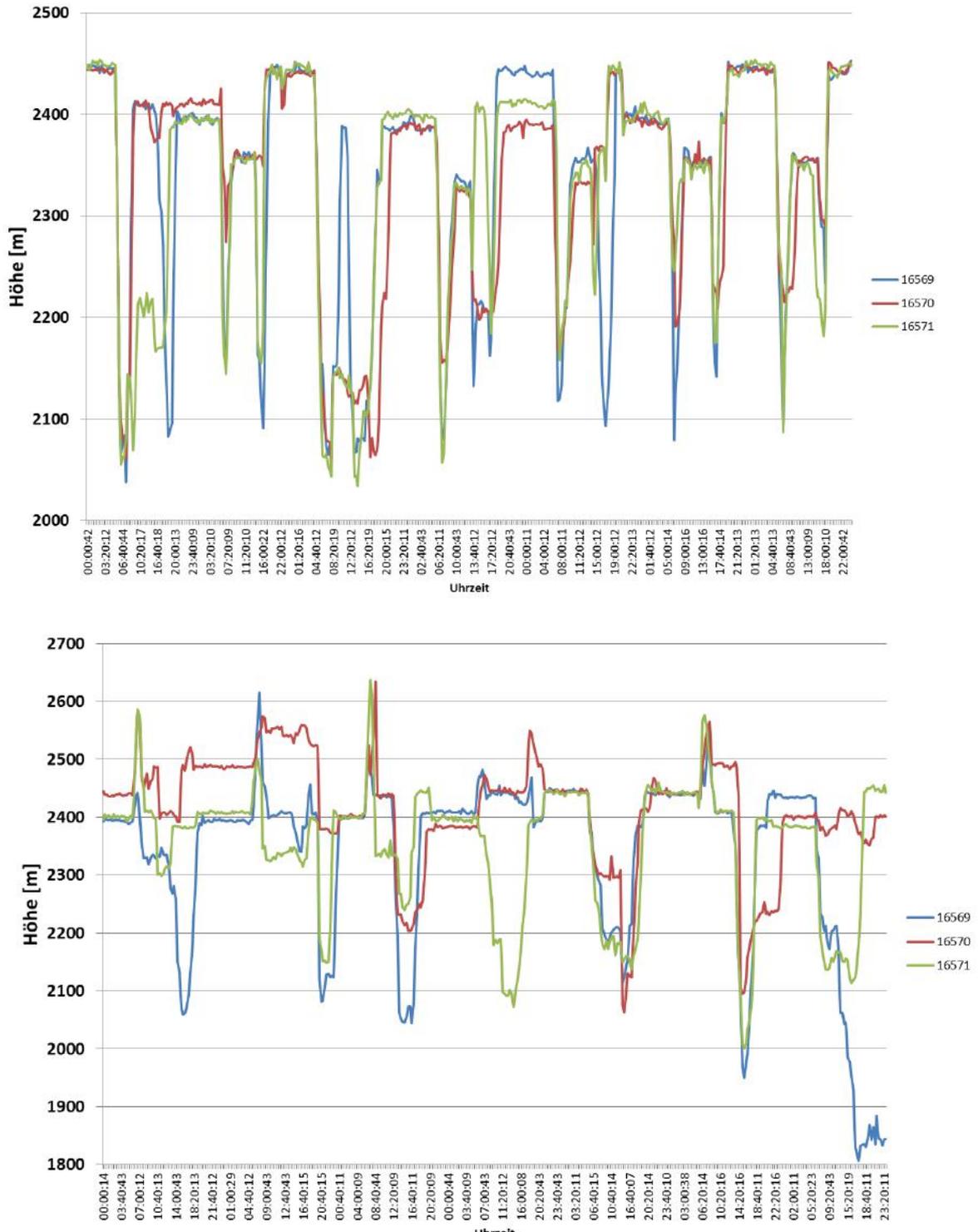


Abb. 6-7: Höhe der Aufenthaltsorte der Schafe mit GPS-Halsband während der Zeiträume 06.07.-13.07.2015 bzw. 03.08.-09.08.2015.

verbunden die Trittbelastung des Plattsteigs bei gutem Wetter.

Es zeigte sich weiter, dass sich die Touristen der Problematik von Alpentourismus und Naturschutz bewusst sind. Das gegenwärtige Netz an Wanderwegen wird als ausreichend erachtet und eine Mehrheit nimmt ihren Müll

wieder mit (70 %) oder entsorgt ihn in den bereitgestellten Mülleimern. Dennoch wird vereinzelt noch Biomüll im Gelände entsorgt, was zu einer Eutrophierung des Untersuchungsgebiets beiträgt.

Bezüglich des wahrnehmbaren Klimawandels, machten 51,7 % der Befragten die subjektive

Angabe, dass im Vergleich zu früher heute weniger Eis und Schnee auf dem Zugspitzplatt erkennbar sei.

Literatur

Korbacher, L.-N. : Detailuntersuchungen zu Flora und Vegetation auf dem südöstlichen Zugspitzplatt. Unveröffentlichte Bachelorarbeit. Universität Augsburg. 59 S. Augsburg, 2016.

Wagner, E.2017: Alpentourismus - Umweltbewusstsein – Auswirkungen und daran angepasste Schutzprojekte in den deutschen und österreichischen Alpen. Unveröffentlichte Masterarbeit. Universität Augsburg. 74 S. Augsburg, 2017.

Danksagung

Unser Dank gilt dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (bis 2014 Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit) für die Finanzierung der Forschung im Rahmen der Forschungsvorhaben KLIMAGRAD I (2009-2013) und KLIMAGRAD II (seit 02.2015).

Ebenfalls möchten wir der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus für die logistische Hilfe, der Bayerischen Zugspitzbahn Bergbahn AG für die Unterstützung durch Freifahrten auf das Zugspitzplatt sowie der Weidegenossenschaft Partenkirchen für Ihre freundliche Bereitschaft am GPS-Monitoring der Schafe mitzuwirken danken.

ABLEITUNG VON WOLKENEIGENSCHAFTEN AUS RADAR- UND SATELLITENMESSUNGEN

MARTIN HAGEN¹, AXEL HÄRING¹

¹DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, INSTITUT FÜR PHYSIK DER ATMOSPHERE,

MÜNCHENER STR. 20, 82234 WEßLING

E-MAIL: MARTIN.HAGEN@DLR.DE

Zusammenfassung: Erste Untersuchungen zeigen, dass das Wolkenradar an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) geeignet ist Wolkeneigenschaften wie sie auch von Satellitenmessungen verfügbar sind, zu erfassen. Eine gegenseitige Validierung und Entwicklung komplementärer Verfahren ist damit möglich, allerdings müssen räumliche und zeitliche Varianzen zwischen den Systemen beachtet werden.

Abstract: First assessments show that the cloud radar at the Environmental Research Station (UFS) can be used to measure cloud properties similar to those observed from satellites. An interdependent validation and development of complementary methods is now possible. However, spatial and temporal variances between the systems have to be considered.

Einleitung

In dem Klimasystem der Erde spielen Wolken eine vielfältige und komplexe Rolle auf den unterschiedlichsten räumlichen und zeitlichen



Abb. 1: Antenne des Wolkenradar MIRA-36 an der UFS auf dem Dach des Wechselnutzerlabors.

Skalen. Je nach Höhe und Dicke der Wolken können sie unterschiedlich zur Erwärmung oder Abkühlung der Erdoberfläche beitragen. Mit dem auf dem Schneefernerhaus vorhandenen Instrumentarium lassen sich vielfältige Wolkeneigenschaften bestimmen. Die Mikrowellenradiometern HATPRO (Humidity and Temperature Profiler) und DPR (Dual Polarization Radiometer) erfassen integrale Eigenschaften wie Flüssigwasserpfad oder Eiswasserpfad. Das Ceilometer misst die Höhe der Untergrenze der Wolken. Das an der UFS installierte Wolkenradar MIRA-36 (Ka-Band, Frequenz 35,2 GHz, Wellenlänge 8 mm, Abb.1) hingegen erlaubt die gesamte vertikale Struktur hochaufgelöst zu erfassen (ca. 30 m räumlich vertikal, 10 Sekunden zeitlich).

Alle genannten Instrumente können zwar detailliert die vertikale Säule über dem Schneefernerhaus erfassen, es fehlt jedoch die Information über die horizontale Verteilung sowohl auf einer kleineren (wenige Meter bis einige 100 Meter) als auch auf einer größeren (ein Kilometer bis 10 oder mehr Kilometer) Skala. Für die größeren Skalen sind Messungen mit scannenden Radars oder Satellitenbeobachtungen notwendig.

Im Folgenden werden exemplarische Vergleiche zwischen dem Wolkenradar an der UFS und äquivalenten Satellitenmessungen dargestellt. Hierbei wird der Zeitraum 2012 – 2015 betrachtet.

Wolkenobergrenze – Satellit CALIPSO

Aus den vertikalen Profilen der Radarreflektivität lassen sich Eigenschaften wie Wolkenuntergrenze, Dicke und Oberkante ableiten (z.B.

Häring, 2014). Der Lidarsatellit CALIPSO leitet aus dem Rückstreuungssignal ebenfalls die Höhe der Wolkenoberkante ab (Vaughan et al., 2009). Der Vergleich der beiden Messungen ist in Abbildung 2 dargestellt. Da CALIPSO ein polarumlaufender Satellit ist, sind Vergleiche nur möglich, wenn ein Überflug in der Nähe der UFS stattfindet. Hier wurden alle Überflüge mit Bewölkung oberhalb 3000 m MSL innerhalb einer Entfernung von 15 km um die UFS ausgewertet. Im Allgemeinen ist eine gute Übereinstimmung zu beobachten, auch wenn an einzelnen Tagen nur eins der beiden Systeme überhaupt Wolken beobachtet.

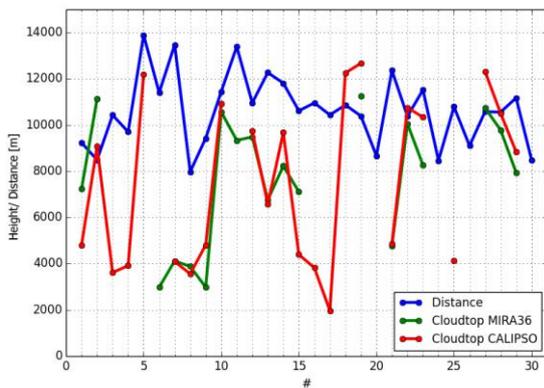


Abb. 2: Höhe der Wolkenobergrenze gemessen mit CALIPSO (rot) und MIRA-36 (grün). Die minimale Entfernung vom Satellitenpfad zur UFS ist blau dargestellt.

Wolkenprofile – Satellit CloudSat

Im Gegensatz zu dem Lidar des Satelliten CALIPSO kann das Wolkenradar auf CloudSat (W-Band, Frequenz 94 GHz, Wellenlänge 3,2 mm) Wolken durchdringen und somit auch die vertikale Erstreckung von Wolken erfassen. Beide Satelliten fliegen im sogenannten *A-Train* auf demselben Orbit kurz hintereinander. Darüber hinaus kann mit dem Radar von CloudSat auch das UFS Wolkenradar kalibriert werden (Protat et al., 2009; Görsdorf et al., 2015). Für das UFS Radar gibt es kaum eine andere Möglichkeit der Kalibrierung aus dem laufenden Betrieb heraus. Abbildung 3 zeigt die Vergleiche zwischen dem UFS Wolkenradar und dem Radar auf CloudSat (CPR). Es wurden ebenfalls nur Wolken oberhalb 3000 m MSL und die Daten von Satelliten-

überflügen im Umkreis von 15 km um die UFS betrachtet. Der Mittelwert der Reflektivitäts-häufigverteilung zeigt mit einer Abweichung von 0,8 dB dass das UFS Radar ausreichend gut kalibriert ist. Die Verteilungen der Wolkenuntergrenzen, Dicken und Obergrenzen zeigen Abweichungen die sich im Wesentlichen auf die geringere Empfindlichkeit des CloudSat-Radars zurückführen lassen. Das UFS-Wolkenradar kann Reflektivitäten bis -45 dBz detektieren, das CloudSat-Radar nur bis -29 dBz. Das rechts dargestellte Profil der Reflektivität zeigt eine deutliche Abweichung unterhalb von ca. 3800 m MSL. Dies ist auf die stärkere Dämpfung der höherfrequenten Wellen des CloudSat-Radars in schmelzendem Schnee und Regen zurückzuführen.

Wolkeneigenschaften – Meteosat SEVIRI

Aus den Messungen des Wolkenradars lassen sich Wolkeneigenschaften wie mittlerer Tröpfchendurchmesser D_0 oder Eiswassergehalt (IWC) ableiten (Matrosov et al., 2002 oder Protat et al., 2007). Für den Vergleich mit den Messungen des Meteosat SEVIRI Sensors wurden drei verschiedene Beziehungen zwischen den Radarmessgrößen Reflektivität Z , Dopplergeschwindigkeit VEL und des integrierten IWC, dem Eiswasserpfad (IWP), verwendet. Zusätzlich wird auch noch die Lufttemperatur (T) verwendet. Aus den Meteosat SEVIRI Daten lässt sich ebenfalls der IWP berechnen (Bugliaro et al., 2011).

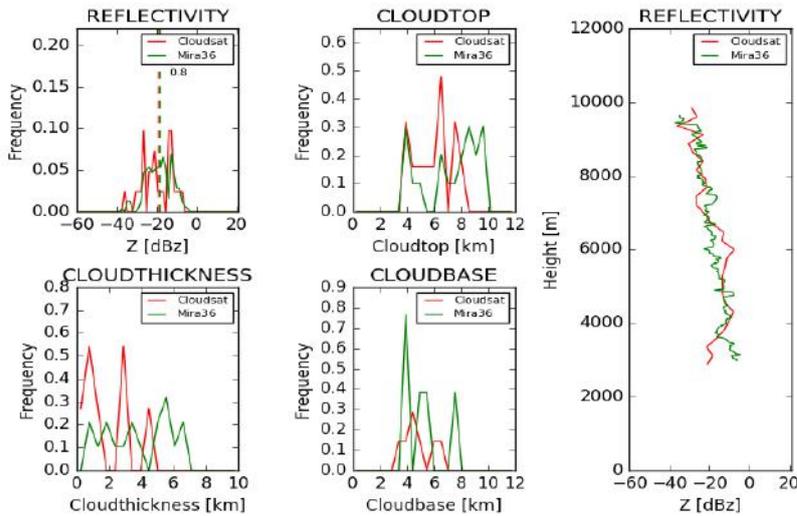


Abb. 3: Vergleich zwischen Wolkeneigenschaften gemessen von MIRA-36 (grün) und CPR (rot) für Überflüge von CloudSat innerhalb

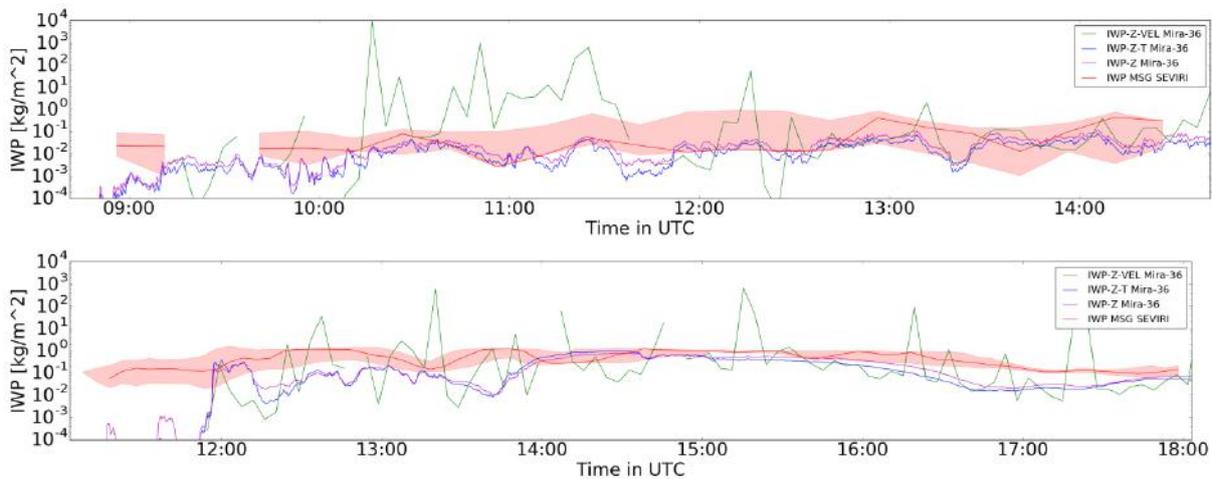


Abb.4: Eiswasserpfad IWP aus Radarmessungen (grün – Z-VEL; blau – Z-T; lila – Z) und MSG SEVIRI (rote Linie Pixel direkt über UFS, roter Bereich 8 umliegende Pixel), unten 11.06.2014; oben 16.01.2015.

Abbildung 4 zeigt die Zeitreihen des IWP an zwei verschiedenen Tage (unten 11.06.2014; oben 16.01.2015). Bei den Auswertungen für den 16.01. 2015 zeigt sich, dass die Radarmessungen besser zu den SEVIRI-Messungen passen als jene am 11.06.2014. Dies liegt zum einen an der geringeren räumlichen Varianz innerhalb des SEVIRI Pixel ($3 \times 5 \text{ km}^2$) bei vorwiegend stratiformem Niederschlag, während bei den sommerlichen konvektiven Ereignissen eine größere Varianz zu erwarten ist. Es zeigt sich, dass bei dem Radaralgorithmus, der die Dopplergeschwindigkeit berücksichtigt große Fehler auftreten können. Dies ist mit den starken Vertikalbewegungen bedingt durch die Überströmung des Wettersteinmassivs zu erklären, da das Radar die Fallge-

schwindigkeit der Eisteilchen nicht von der Vertikalbewegung der umgebenden Luft nicht getrennt betrachten kann.

Zusammenfassung

Das UFS Wolkenradar ermöglicht es, Satellitenmessungen von Wolkeneigenschaften zu vergleichen. Aus der Literatur bekannte Algorithmen müssen jedoch teilweise an die geographischen Eigenheiten des Schneefernerhauses angepasst werden. Durch die hohe räumliche Variabilität von Wolken und die Struktur des Geländes sind die Vergleiche erschwert, da die Satellitenmessungen nicht am gleichen Ort stattfinden (CALIPSO, CloudSat) oder über größere Gebiete mitteln (SEVIRI).

Literatur

Bugliaro, L., Mannstein, H. und Kox, S.: Atmospheric Physics: Background – Methods –Trends. Chapter 25: Ice cloud properties from space, 417-432, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.

Görsdorf, U., et al.: 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, 2015.

Häring, A.: Vergleich von Messungen der Wolkenhöhen mit RADAR und LIDAR. Bachelor's thesis, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2014.

Matrosov, S. Y., et al.: Profiling cloud ice mass and particle characteristic size from Doppler radar measurements. J. Atmos. Oceanic Technol., 19, 1003-1018, 2007.

Protat, A., et al.: Evaluation of ice water content retrievals from cloud radar reflectivity and temperature using a large airborne in situ microphysical database. J. Appl. Meteor. Climatol., 46, 557-572, 2007

Protat, A., et al.: Assessment of Cloudsat reflectivity measurements and ice cloud properties using ground-based and airborne cloud radar observations. J. Atmos. Oceanic Technol., 26 (9), 1717-1741, 2009.

Vaughan, M. A., et al.: Fully automated detection of cloud and aerosol layers in the CALIPSO lidar measurements. J. Atmos. Oceanic Technol., 26, 2034-2050, 2009

TRAJEKTORIEN-BASIERTE CLUSTER- UND HERKUNFTSANALYSEN DER CO₂-KONZENTRATIONEN AM SCHNEEFERNERHAUS

ESTHER GIEMSA¹, JUCUNDUS JACOBEIT¹, LUDWIG RIES², GABRIELE FRANK³, STEPHAN HACHINGER^{4,5},

JULIAN MEYER-ARNEK^{4,6}

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

²UMWELTBUNDESAMT, UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS

³DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), RADIOAKTIVITÄTSÜBERWACHUNG

⁴KOLLABORATIONSPARTNER IM ALPINE ENVIRONMENTAL DATA ANALYSIS CENTRE (ALPENDING)

⁵LEIBNIZ-RECHENZENTRUM (LRZ)

⁶DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E. V. (DLR), DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM

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

Zusammenfassung: Das komplexe Zusammenspiel von Biosphäre und Mensch als Absorber bzw. Emittenten in Verbindung mit der langen atmosphärischen Verweilzeit des Kohlendioxids (CO₂) verhindert, dass atmosphärische CO₂-Messungen unmittelbar Auskunft über Änderungen der regionalen Emissionssituation geben können. Für die Charakterisierung des CO₂-Haushalts im Einzugsgebiet der UFS, verbunden mit der Detektion von Quellen und Senken des stärksten anthropogen beeinflussten Treibhausgases, bedarf es der Relation der CO₂-Konzentrationen zu synoptischskaligen atmosphärischen Transportprozessen.

Abstract: Due to the complex interaction of biosphere and mankind as absorber or emitters in conjunction with the long atmospheric lifetime of CO₂, the atmospheric CO₂ concentrations are not able to directly provide information about the changing regional emission situation. Therefore, the characterization of the CO₂ budget covering the catchment area of the UFS together with the detection of sources and sinks of this most important contributor to increased radiative forcing requires the relation of the CO₂ measurements to atmos-

pheric transport patterns on the synoptic scale.

Radon-Filterverfahren

Der erste Schritt hin zu einer differenzierten Herkunftsanalyse von Luftmassen und den mit ihnen transportierten Gasen basiert auf Filtermethoden, die über die Identifizierung von lokalen Kontaminationen der Messgröße hinaus eine Klassifizierung in die Kategorien großräumige Hintergrundkonzentration und regionale Beeinflussung erlauben. Um eine fundierte Entscheidung für die standortspezifisch zuverlässigste Filtertechnik sicherzustellen, wird ein breites Spektrum verschiedenartiger Filteransätze (meteorologische, statistische, tageszeitliche, tracer- und trajektorienbasierte sowie kombinierte) auf die Klimagaskonzentrationen der Umweltforschungsstation angewandt.

Die endgültige Entscheidung für die stationspezifisch beste Filtermethode erfolgt zusammen mit der Validierung der einzelnen Verfahren in der Gegenüberstellung der unterschiedlich gefilterten Hintergrundkonzentrationen mit den CO₂-Konzentrationen der marinen Grenzschicht der Atmosphäre der National Oceanic and Atmospheric Administ-

ration (NOAA) (Dlugokencky et al., 2016). In diesem Vergleich mit den NOAA-Referenzwerten unbeeinflusster Luftmassen des entsprechenden Breitengrads, auf dem sich die Umweltforschungsstation befindet, erzielen die CO₂-Hintergrundkonzentrationen des Radon-Filterverfahrens (Griffiths et al., 2014) die stärkste Übereinstimmung mit Korrelationskoeffizienten der Monatsmittelwerte von über 0,95. Demzufolge können 43 % der CO₂-Messwerte, die während der Jahre 2011 - 2015 am Schneefernerhaus aufgezeichnet wurden, als repräsentativ für den großräumigen Hintergrund angesehen werden, während die restlichen 57 % regional beeinflusst sind. Schließlich lassen sich aus den Resultaten der Filterung die Wachstumsraten der nach ihrer (über-)regionalen Herkunft getrennten CO₂-Messwerte ableiten. Gemittelt über den knapp fünfjährigen Untersuchungszeitraum weisen Messungen grenschichtbeeinflusster Luftmassen eine 6 % stärkere Wachstumsrate verglichen mit dem Trend der unteren freien Troposphäre auf. Letzterer beläuft sich an Deutschlands höchstgelegener Messstation im Zeitraum 2011 – 2015 auf 1,86 ppm/Jahr, wohingegen die Kohlendioxidkonzentration regionaler Herkunft Jahr für Jahr im Mittel um 1,98 ppm zugenommen hat. Dieses Ergebnis stimmt exakt mit vergleichbaren Studien andernorts überein (Tsutsumi et al., 2006) und belegt damit einmal mehr die Funktionalität des Radon-basierten Filterverfahrens.

Trajektoriencluster

Detaillierte Einblicke in die Emissionssituation, die den genannten Wachstumsraten zugrunde liegt, können Trajektorien geben. Trajektorien aus der Dispersions- und Transportmodellierung haben sich als zuverlässiges Werkzeug zur Untersuchung dynamischer Prozesse in der Atmosphäre auf der synoptischen Skala etabliert. Auf der Grundlage von meteorologischen Feldern numerischer Wettervorhersagemodelle verfolgen sie die Be-

wegung eines Luftpakets in Raum und Zeit und lassen über die entstehenden Zugbahnen Strömungsmuster erkennen. Werden die Trajektorien ausgehend von einer Messstation rückwärts in der Zeit berechnet, geben sie Auskunft über die Transportwege und potentiellen Quellgebiete der detektierten Luftmassen (Stohl et al., 2005).

Um der eingeschränkten Zuverlässigkeit der Dispersionsrechnungen aufgrund von Unsicherheitsfaktoren wie der begrenzten Modelldetaillierung der meteorologischen Felder und den Parametrisierungen des Partikeltransportmodells Rechnung zu tragen, werden die Rückwärtssimulationen der Partikeldispersion zunächst auf den Pfad ihrer Zentroide zusammengefasst und anschließend dem multivariaten statistischen Verfahren der Clusteranalyse (Brankov et al., 1998) unterworfen. Angewandt auf die Zentroide der zweistündlich berechneten Rückwärtstrajektorien des knapp fünfjährigen Untersuchungszeitraums ermöglicht dieses strukturerdeckende Verfahren die Identifikation bedeutsamer atmosphärischer Transportmuster und relevanter Quell- und Senkenregionen für die CO₂-Messungen an der Zugspitze. Auf Basis der zuvor durchgeführten Filterung können einflussreiche Luftmassenströme separat für den regionalen Beitrag und denjenigen der nordhemisphärischen Hintergrundkonzentration ermittelt werden, indem zwei voneinander unabhängige Clusteranalysen für beide Filterresultate erstellt werden.

Die resultierenden Cluster, die Luftmassenströme zur Zugspitze mit größtmöglicher interner Homogenität und zugleich stärkster Heterogenität untereinander zusammenfassen, werden schließlich mit den zugehörigen, um Saisonalität und langjährigen Trend bereinigten CO₂-Konzentrationen der Zugspitze in Relation gesetzt, um Auskünfte über die Zusammensetzung der Messwerte hinsicht-

lich ihres ferntransportierten bzw. regional emittierten Anteils zu erlangen.

Die Ergebnisse der Clusterung zeigen, dass die höchsten CO₂-Konzentrationen (unter vorheriger Korrektur des Einflusses von Saisonalität und langjährigem Trend) im Winterhalbjahr bei nördlichen bzw. nordöstlichen Anströmungsrichtungen detektiert werden. Im Sommer hingegen übernehmen Luftmassentransporte aus südwestlicher Richtung (aus der industriell geprägten Po-Ebene Italiens und der nordwestlichen Mittelmeerregion, die für ihre hitzebedingten Feuer zu dieser Jahreszeit bekannt ist) maßgeblich die Verursacherrolle hoher CO₂-Messwerte an der Umweltforschungsstation, bleiben jedoch in ihrer Einflussstärke hinter der des oben skizzierten Winter-Clusters zurück.

Potentielle Quellbeitragsfunktion

Die Detektion geographischer Gebiete mit Einfluss auf die CO₂-Konzentrationen eines Standorts erfolgt über die potentielle Quellbeitragsfunktion (Potential Source Contribution Function, PSCF), die in bisherigen Studien zur Quellzuordnung von Spurengasen an der Untersuchungsstation Zugspitze als bestes statistisches Verfahren aus dem Vergleich unterschiedlicher Methoden hervorgegangen ist (Kaiser et al., 2007). Wie zuvor die Clusteranalyse verknüpft auch die PSCF die an der Messstation ankommenden Pfade atmosphärischer Luftmassen in Form von Rückwärtstrajektorien mit den zeitgleich gemessenen CO₂-Konzentrationen. In Erweiterung zur Clusterung der Rückwärtstrajektorien berücksichtigt die PSCF die Aufenthaltsdauer der Luftpakete über geographischen Regionen im Vorfeld ihrer Ankunft und Aufzeichnung am Messstandort (Begum et al. 2005) und fungiert nach Berücksichtigung der geringeren Aussagekraft schwach frequentierter Gitterzellen und einer zusätzlichen Korrektur entsprechend des Konzentrationsniveaus der

Messwerte als zuverlässiger Indikator für die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Region zu besonders hohen bzw. niedrigen CO₂-Messergebnissen am Rezeptor Schneefenerhaus beiträgt (Carslaw & Ropkins, 2012).

In der resultierenden konzentrationsgewichteten PSCF-Karte für die CO₂-Konzentration über die Jahre 2011 - 2015 (Abb. 1) präzisieren sich die Ergebnisse der vorangegangenen Clusteranalyse, indem sich die zentrale Alpenregion - trotz der höchsten Trajektorienfrequentierung im Zuge einer alpinen Station als Rezeptor - über den gesamten Untersuchungszeitraum gemittelt als Kohlendioxidsenke darstellt, wohingegen potentielle Quellgebiete sowohl nördlich der Alpen als auch südwestlich davon verortet werden.

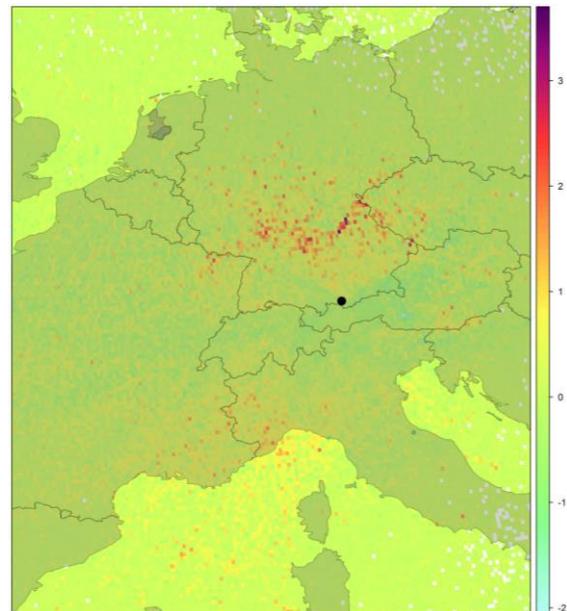


Abb.1: Konzentrationsgewichtete Potentielle Quellbeitragsfunktion aller Rückwärtstrajektorien, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 an der UFS ankamen, für die dortigen saison- und trendbereinigten CO₂-Konzentrationen (in ppm)

Ergänzend wird die Potentielle Quellbeitragsfunktion explizit für die höchsten Messwerte während der knapp fünfjährigen Analyseperiode berechnet. Das Ergebnis der PSCF für CO₂-Messwerte oberhalb des 95%-Perzentils (Abb. 2) verweist auf eine Region, in der die mitteleuropäischen Braunkohlereviere Lausitz, Most und Sokolov liegen, als Hauptverursacher höchster CO₂-Konzentrationen selbst an Deutschlands höchstgelegener Messstation auf über 2650m Höhe und in mehr als 350km Entfernung.

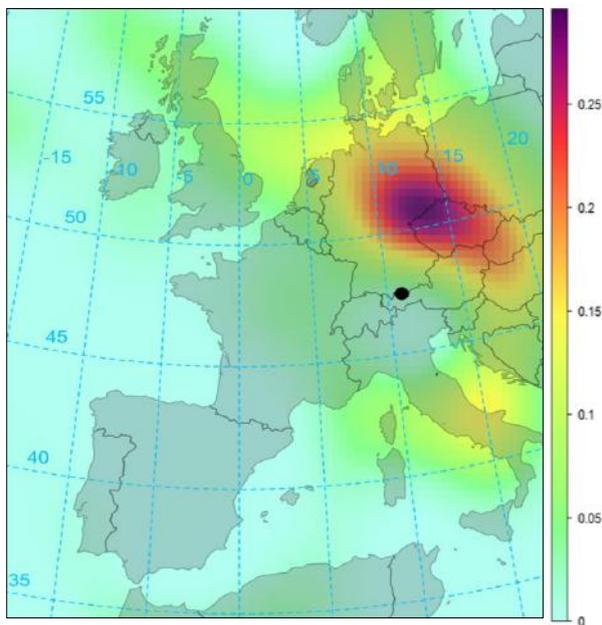


Abb.2: Konzentrationsgewichtete Potentielle Quellbeitragsfunktion aller Rückwärtstrajektorien, die während des Untersuchungszeitraums 2011 – 2015 an der UFS ankamen, für die dortigen saison- und trendbereinigten CO₂-Konzentrationen (in ppm) oberhalb des 95%-Perzentils

Diese Forschungsarbeit ist Teil des Projekts "Virtuelles Alpenobservatorium (VAO): Ausbau und Internationalisierung des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO II) an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS)" und wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert. Die Trajektorienrechnungen nutzen das AlpEnDAC (Alpine Environmental Data Analysis Centre).

Literatur

Begum B. A., Kim E., Jeong C.-H., Lee D.-W. und Hopke P. K.: Evaluation of the potential source contribution function using the 2002 Quebec forest fire episode. *Atmos. Environ.*, 39, 3719-3724, 2005.

Brankov E., Rao S. T. und Porter P. S.: A trajectory-clustering-correlation methodology for examining the long-range transport of air pollutants. *Atmos. Environ.*, 32, 1525-1534, 1998.

Carslaw D. C. und Ropkins K.: openair – An R package for air quality data analysis. *Environ. Model. Softw.*, 27-28, 52-61, 2012.

Dlugokencky, E. J., Lang, P. M., Masarie, K. A., Crotwell, A. M. und Crotwell, M. J.: Atmospheric carbon dioxide dry air mole fractions from the NOAA ESRL Carbon Cycle Cooperative Global Air Sampling Network, 1968-2015, 2016.

Griffiths A. D., Conen F., Weingartner E., Zimmermann L., Chambers S. D., Williams A. G. und Steinbacher M.: Surface-to-mountaintop transport characterized by radon observations at the Jungfraujoch. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 12763-12779, 2014.

Kaiser A., Scheifinger H., Spangl W., Weiss A., Gilge S., Fricke W., Ries L., Cemas D. und Jesenovec B.: Transport of nitrogen oxides, carbon monoxide and ozone to the Alpine Global Atmosphere Watch stations Jungfraujoch (Switzerland), Zugspitze and Hohenpeissenberg (Germany), Sonnblick (Austria) and Mt. Kravac (Slovenia). *Atmos. Environ.*, 41, 9273-9287, 2007.

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, 2005.

Tsutsumi Y., Mori K., Ikegami M., Tashiro T. und Tsuboi K.: Long-term trends of greenhouse gases in regional and background events observed during 1998-2004 at Yonagunijima located to the east of the Asian continent. *Atmos. Environ.*, 40, 2868-5879, 2006.

UNTERKÜHLTES FLÜSSIGWASSER – LANGZEITLICHE MESSUNGEN AN DER UFS LIEFERN DIE BASIS FÜR VERBESSERTE GLOBALE MESSMETHODEN

STEFAN KNEIFEL¹, ULRICH LÖHNERT¹, BERNHARD POSPICHAL¹, SUSANNE CREWELL¹

¹INSTITUT FÜR GEOPHYSIK UND METEOROLOGIE, UNIVERSITÄT ZU KÖLN, POHLIGSTRAßE 3, 50969 KÖLN

E-MAIL: SKNEIFEL@METEO.UNI-KOELN.DE

Zusammenfassung: Die langjährigen Messungen von Mikrowellenradiometern, Lidar-Ceilometer und Wolkenradar an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) lieferten die Basis für die Entwicklung eines neuen Modells für die Absorptionseigenschaften von unterkühltem Flüssigwasser (UFW). Solche Modelle sind essentiell um globale Abschätzungen des UFW zu erstellen und waren in der Vergangenheit mit großen Unsicherheiten behaftet. Eine Verbesserung in der Ableitung von UFW ist besonders bedeutsam, da UFW enorme Auswirkungen auf die Strahlungseigenschaften von Wolken, aber auch auf die mikrophysikalischen Prozesse in Eis- und Schneewolken und nicht zuletzt auf den Schneefall am Boden hat.

Abstract: The long-term observations at Environmental Research Station (UFS) of microwave radiometers, lidar-ceilometer, and cloud radar have been used to develop a new absorption model of supercooled liquid water (UFW). These models are essential for global retrievals of UFW and suffered from large uncertainties in the past. More accurate retrievals of UFW are of high importance considering its effects on the radiative properties of clouds, ice and snow cloud microphysics, as well as the characteristics of snowfall on the ground.



Abb.1: Mikrowellenradiometer HATPRO (rechts, 22-60 GHz) und DPR (links, 90+150 GHz) auf der Messterrasse der UFS. Die Kombination beider Geräte liefert seit über einem Jahrzehnt kontinuierliche Messungen des Flüssigwasser- und Wasserdampfgehalts der Atmosphäre über der UFS, sowie Informationen über Temperatur-, Luftfeuchteverteilung und Schneefalleigenschaften (Quicklooks zu allen Daten und Produkten frei zugänglich auf: <http://gop.meteo.uni-koeln.de/~hatpro/dataBrowser>).

Bedeutung von unterkühltem Flüssigwasser
Flüssiges Wasser mit einer Temperatur unterhalb des Gefrierpunktes - sogenanntes unterkühltes Flüssigwasser (UFW) - spielt eine herausragende Rolle für die Prozesse in Wolken und für die Niederschlagsentstehung. Jeder der schon einmal eine Mineralwasserflasche im Gefrierfach vergessen hat weiß, wie instabil Wasser in diesem unterkühlten Zustand ist. Öffnet man die Flasche schnell, oder stellt sie mit einem Ruck auf den Tisch, gefriert das instabile flüssige Wasser innerhalb von Sekunden zu Eis. Umso erstaunlicher ist es, dass man kleine flüssige Wassertröpfchen in Wolken bis zu einer Temperatur von -38 °C finden kann. Aus langjährigen Satellitendaten wissen wir, dass 50 % der Wolken, welche bis zu -30 °C kalt sind, noch UFW enthalten. Das UFW hat einen enormen Effekt auf die Strahlungs-

eigenschaften der Wolken, also ob Sie netto einen kühlenden oder wärmenden Effekt am Boden haben. Erst vor kurzem, zeigte eine Studie (Bennartz et al., 2013), dass niedrige Wolken mit UFW maßgeblich dafür verantwortlich sind, dass fast der gesamte grönländische Eispanzer für einige Tage im Sommer 2012 anschmolz. Daher verwundert es kaum, dass arktische Wolken und deren Wechselwirkung mit UFW eine besondere Rolle in der Diskussion um die sich rapide erwärmende Arktisregion spielen. Aber auch in den Alpen spielt UFW eine enorme Rolle für die Art und Menge des Schneefalls, welcher am Boden ankommt. Studien aus der Schweiz zeigen, dass die Schneeakkumulation am Boden mit dem Grad der Bereifung – eine direkte Folge des UFW – korreliert (Grazioli et al., 2015).

Messung von unterkühltem Flüssigwasser mit Mikrowellenradiometern

In der Regel wird der Gehalt an Flüssigwasser aus Messungen von Mikrowellenradiometern (MWR) (sowohl global von Satelliten, oder vom Boden wie mit den MWR an der UFS) abgeleitet. Grundlage für die Ableitungsalgorithmen ist ein Modell des Absorptionsverhaltens des UFW im Mikrowellenbereich. Normalerweise basieren diese Modelle auf Labormessungen. Jedoch sind solche Messungen, wie weiter oben bereits erwähnt, äußerst anspruchsvoll, da UFW leider auch im Labor gerade bei sehr tiefen Temperaturen äußerst instabil ist. Die momentan verfügbaren Modelle extrapolieren das Absorptionsverhalten ausgehend von Labormessungen bei wärmeren Temperaturen in den unterkühlten Bereich. Naturgemäß ist dieses Vorgehen mit hohen Unsicherheiten behaftet, welche sich direkt in hohe Unsicherheiten in der Ableitung des Flüssigwassergehalts widerspiegeln (Abb. 2). Das heißt, gerade für die Messkanäle mit hoher Sensitivität gegenüber UFW (hohe Frequenzen) und für besonders kalte Wolken,

wo UFW gerade besonders relevant ist, sind die Absorptionsmodelle am ungenauesten.

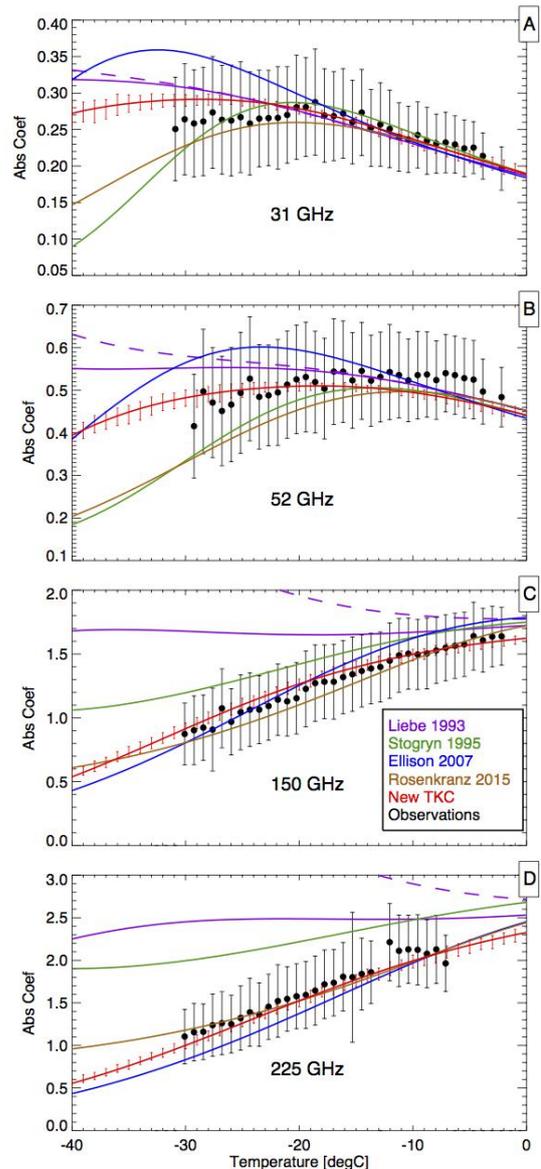


Abb.2: Absorptionskoeffizient von UFW in Abhängigkeit der Temperatur und verschiedenen Frequenzen, welche von MWR am Boden und auf Satelliten genutzt werden. Die verschiedenfarbigen Linien zeigen verschiedene Absorptionsmodelle und deren zunehmende Abweichungen bei höheren Frequenzen und tieferen Temperaturen. Die schwarzen Punkte wurden u.a. mit Hilfe der langjährigen MWR Messungen an der UFS abgeleitet (Kneifel et al., 2014). Damit konnte schließlich ein verbessertes Absorptionsmodell (rot) entwickelt werden (nach Turner et al., 2015).

Die UFS als natürliches Labor für unterkühltes Flüssigwasser

Glücklicherweise gibt es bereits ein natürliches Labor für UFW: die UFS bzw. die Zugspitze. Durch die häufige Hangüberströmung wird die Luft oft rapide abgekühlt und dabei große Mengen an UFW erzeugt, welches mit der Strömung über die Messgeräte an der UFS driftet. An der UFS werden seit über einem Jahrzehnt kontinuierliche Messungen mit zwei MWR (Humidity and Temperature Profiler HATPRO: 22-60 GHz, Dual-Polarization Radiometer DPR: 90+150 GHz, Abb. 1) in Kooperation mit der Universität zu Köln aufbereitet und ausgewertet (z. B. Löhnert et al., 2011). Diese Beobachtungen werden ergänzt durch die ebenfalls über einem Jahrzehnt andauernden Lidar-Ceilometer-Beobachtungen und die mittlerweile sechsjährigen Messungen eines hochempfindlichen Wolkenradars. Dieser langjährige Datensatz von verschiedenen Wolken-Fernerkundungssensoren an einer Bergstation ist weltweit einzigartig. In einer internationalen Kollaboration wurden diese Messdaten von der UFS mit ähnlichen Daten von Summit Station, Grönland kombiniert und nach einem speziellen Verfahren ausgewertet, um die bestehenden Absorptionsmodelle zu validieren (Kneifel et al., 2014). Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnte in einer Folgestudie (Turner et al., 2015) ein verbessertes Absorptionsmodell für UFW entwickelt werden. In ersten Anwendungstests zeigte sich, dass das neue Turner-Kneifel-Cadeddu Modell (TKC) deutlich geringeren Bias für den Flüssigwassergehalt liefert. Gerade die Reduktion des Bias ist von großer Bedeutung für die globale Assimilation von Mikrowellendaten, wie sie beispielsweise vom Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage (ECMW) durchgeführt werden. Auch wenn für spezielle Fragestellungen weitere „echte“ Laborstudien wünschenswert sind, belegen diese Studien eindrucksvoll die große Bedeutung und den

großen Nutzen von langen Datenreihen besonders in Hinblick auf die besonderen Bedingungen (z. B. niedriger Wasserdampfgehalt, häufiges Auftreten von UFW) und der UFS.

Literatur

Bennartz, R. und Coauthors: July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds, *Nature*, 496, 83-86, doi: 10.1038/nature12002, 2013.

Grazioli, J. und Coauthors: Polarimetric radar and in situ observations of riming and snowfall microphysics during CLACE 2014, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 13787–13802, doi:10.5194/acp-15-13787-2015, 2015.

Kneifel, S. und Coauthors: Absorption Properties of Supercooled Liquid Water between 31 and 225 GHz: Evaluation of Absorption Models Using Ground-based Observations, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 53, 1028-1045, doi:10.1175/JAMC-D-13-0214.1, 2014.

Löhnert, U., S. Kneifel, A. Battaglia, M. Hagen, L. Hirsch, und S. Crewell: A multi-sensor approach towards a better understanding of snowfall microphysics: The TOSCA project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92, 613–628, doi: 10.1175/2010BAMS2909.1, 2011.

Turner, D. D., S. Kneifel und Cadeddu, M. P.: An Improved Liquid Water Absorption Model in the Microwave for Supercooled Liquid Water Clouds, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 33, 33-44, doi: 10.1175/JTECH-D-15-0074.1, 2016.

Danksagung

Wir möchten uns an dieser Stelle für die langjährige gute Zusammenarbeit mit dem DLR (insb. Dr. Martin Hagen), dem Meteorologischen Institut der LMU München und natürlich dem Team der UFS bedanken, ohne die es unmöglich wäre, eine so lange Datenreihe hochqualitativer Messdaten aufzuzeichnen. Ein ganz besonderer Dank gilt Rainer Haseneder-Lind von der Universität zu Köln und Dr. Till Rehm vom Team der UFS für die technische Betreuung der Fernerkundungsmessgeräte.

RADON-222 UND BERYLLIUM-7 ALS NATÜRLICHE TRACER

GABRIELE FRANK¹, JOSEF SALVAMOSER², THOMAS STEINKOPFF¹, LUDWIG RIES³

¹ DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD), FRANKFURTERSTR. 135, 63067 OFFENBACH

² IGU, WÖRTHSEESTRAßE 34A, 82237 WÖRTHSEE

³ UMWELTBUNDESAMT (UBA), UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS

E-MAIL: GABRIELE.FRANK@DWD.DE

Zusammenfassung: Zur Untersuchung der atmosphärischen Transportvorgänge werden an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) und auf der Zugspitze vom DWD die natürlichen Radionuklide Rn-222, Be-7 quasikontinuierlich gemessen. Die Messungen liefern in Kombination mit meteorologischen Daten eine Datenbasis zur Klassifizierung von Luftmassen und eine Ergänzung für Ausbreitungsrechnungen gasförmiger und aerosolgebundener Spurenstoffe.

Rn-222 ist ein Tracer für bodennahe, zu meist belastete Luft, während Be-7 auf Stratosphärenluft hinweist.

Abstract: For the study of atmospheric transports the natural radionuclides Rn-222, Be-7 is continuously measured at the Environment Research Station Schneefernerhaus (UFS) and at the Zugspitze by the DWD. The measurements support the classification of atmospheric transport, atmospheric dilution and dispersion models of gaseous and aerosol bound micro pollutants. Results are carried out in combination with meteorological data.

While Rn-222 is a tracer for mostly polluted air from the ground, Be-7 is significant for stratospheric air.

Beschreibung des Radon-Messverfahrens

Die Messung von Rn-222 wird mit einer Zeitauflösung von 2 h betrieben. Es wird dabei eine Nachweisgrenze von $< 50 \text{ mBq/m}^3$ er-

reicht. Die Funktionsweise des Messsystems beruht auf der elektrostatischen Abscheidung der Rn-222-Töchter Polonium-218 (Po-218) und Polonium-214 (Po-214). Abbildung 1 zeigt das Prinzip der Probeentnahme, Probenvorbehandlung und der Messung.

Die Luft wird durch ein Aerosolfilter gesaugt und damit die am Aerosol gebundenen Radonfolgeprodukte abgetrennt. Über Kühler und Peltier-Elemente wird der in der Probenluft enthaltene Wasserdampf entfernt, wodurch konstante Messbedingungen erreicht werden. Ein zweiter Aerosolfilter trennt die in der Zwischenzeit neu entstandenen Radonfolgeprodukte ab, so dass sichergestellt werden kann, dass nur gasförmiges Rn-222 mit einem Durchfluss von $2\text{-}10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ in die Messkammer ($V=270 \text{ L}$) geleitet wird.

Das, nach dem Radonzerfall positiv geladene Radonzerfallsprodukt Po-218, wird in einem starken elektrischen Feld (Spannung von 30 kV zwischen Detektorkammer und Oberfläche des Detektors) auf der Detektoroberfläche abgeschieden. Gemessen wird dann der Alphazerfall des Po-218 und des Tochternuklids Po-214.

Die alphaspektrometrische Analyse erlaubt die getrennte Bestimmung von Po-218 und Po-214. Die Auswertung der Spektren erfolgt über einen Vielkanalanalysator mit kommerziell erhältlicher Software. Die Energiekalibrierung wird mittels eines Alpha-Aktivitätsnormals mit mehreren Radionukliden regelmäßig überprüft. Das Gesamtsystem wird mit Rn-222 aus einer zertifizierten Radium-226

(Ra-226) Quelle kalibriert. Rn-222 entsteht im radioaktiven Zerfall des Mutternuklids Ra-226. Für die Berechnung werden nur die Daten des Po-218 herangezogen.

Das Messsystem befindet sich seit ca. fünf Jahren im automatischen Betrieb.

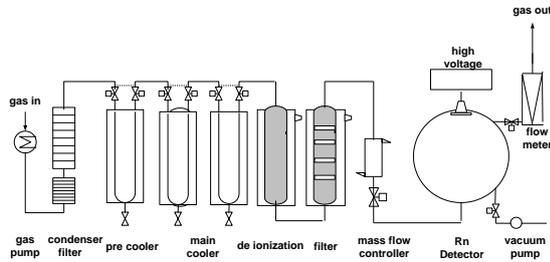


Abb.1: Schematische Darstellung des Radonmessverfahrens

Kontrolle der Repräsentativität durch neue Messungen am Gipfelgrat

Langzeitmessungen zeigten wiederholt leicht erhöhte Messwerte, die auf lokale Einflüsse zurückgeführt werden konnten. Am Entnahmepunkt auf der Terrasse im 7. OG des Schneefernerhauses war zudem keine freie Anströmung gewährleistet.

Durch jahreszeitlich bedingte, immer wiederkehrende Störungen, werden Aussagen über den atmosphärischen Transport von Radon erschwert. Um optimale Voraussetzungen für das GAW Programm zu erreichen, wurde die Probeentnahme für Rn-222 auf den Zugspitzkamm verlegt, einem ungestört von lokalen Einflüssen frei umströmten Standort.

Mit einem integrierten Konzept, dass Vergleichsmessungen von Radon-222 durch den Deutschen Wetterdienst (auf dem Zugspitzkamm) und durch das Umweltbundesamt (am Schneefernerhaus, 7. OG) kombiniert, wird die Zuverlässigkeit und Repräsentativität der Messungen im Schneefernerhaus gewährleistet.

Die Firma IGU hat in Kooperation mit der Betriebsgesellschaft Umweltforschungsstation GmbH die Planung und die Installation der 270 m langen Ansaugleitung vom Schneefernerhaus zum Zugspitzkamm durchgeführt.

Die Materialauswahl und Materialprüfung erfolgte in Hinblick auf Hochgebirgstauglichkeit, Steinschlag, Eis und Schneedruck, UV Strahlung, Winddruck, Blitzschutz und Gewicht der einzelnen Komponenten.

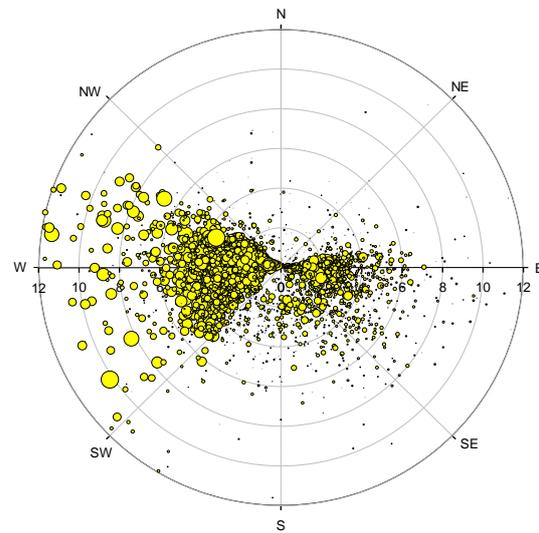


Abb.2: Rn-222-Konzentration in Abhängigkeit der Windrichtung, 7. OG Schneefernerhaus 2013

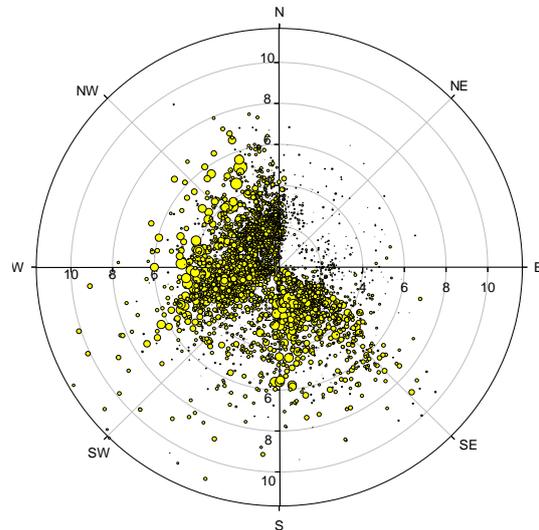


Abb.3: Rn-222-Konzentration in Abhängigkeit der Windrichtung, Zugspitzkamm 2015

Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen deutlich die veränderte Windsituation und Rn-222-Konzentration durch die neue Entnahmeleitung.

Korrelation der Radonmessungen mit meteorologischen Bedingungen

Die bekannten, tageszeitlich periodischen Verläufe der Rn-222-Konzentration der bodennahen Luft in Garmisch, sind auf der Zugspitze nicht mehr erkennbar (Abb. 4). Erhöhte Rn-222-Konzentrationen im Tal sind mit den Konzentrationen auf der Zugspitze nur gering korrelierbar. Die Rn-222-Konzentrationen auf dem Zugspitzkamm (2900 m über Meeresspiegel) sind etwa um den Faktor 10 geringer als in Garmisch (Tallage 708 m über Meeresspiegel).

Die Schwankungen der Rn-222-Konzentrationen lassen erkennen, dass eine Verbindung zur Variation der atmosphärischen Grenzschicht besteht.

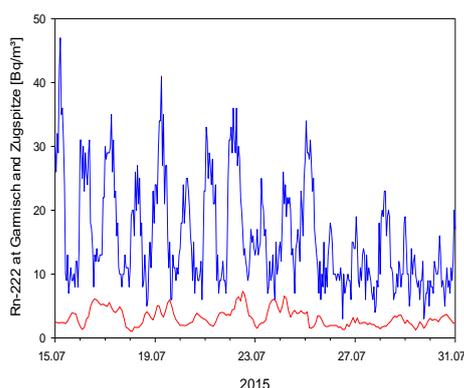


Abb. 4: Rn-222-Konzentration in Garmisch und auf dem Zugspitzkamm im Zeitraum vom 15.07.2015 bis 31.07.2015

Die Rn-222-Konzentrationen in Garmisch zeigen eine ausgeprägte tageszeitliche Variation (Abb. 4) mit einem Maximum in den frühen Morgenstunden und einem Minimum im Tagesverlauf.

Die 2-Stunden Messergebnisse der Rn-222-Konzentrationen auf der Zugspitze wurden zeitlich über einen Monat gemittelt und aufgetragen, z. B. Mittelwerte der Rn-222-Messergebnisse jeweils von 08:00-10:00 für jeden Tag im Monat (Abb. 5 und 6).

Einen gegensätzlichen Verlauf hingegen zeigen die Rn-222-Konzentrationen auf der Zug-

spitze in den Sommermonaten, wenn die zeitlichen Mittelwerte zu Grunde gelegt werden.

Ansteigende Temperaturen und damit verbunden, ein Eintrag der unteren Atmosphäre in die obere Atmosphäre (Durchmischung in der Grenzschicht) sind ein plausibler Grund für die erhöhten Radonkonzentrationen in den Nachmittagsstunden an der Umweltforschungsstation.

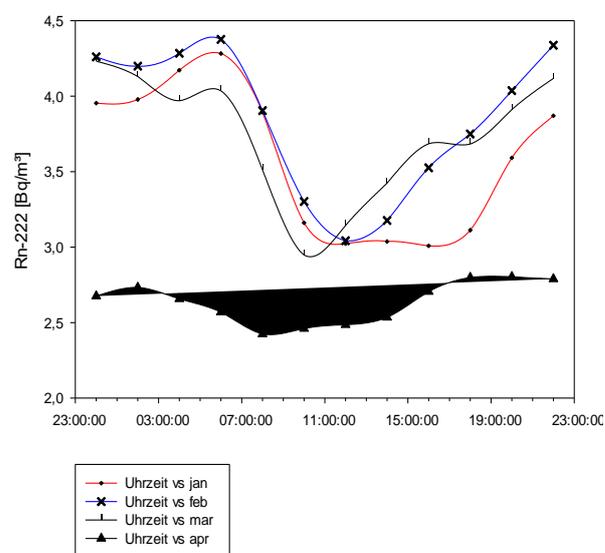


Abb. 5: Zwei-Stunden Mittelwerte der Rn-222 Konzentrationen auf der Zugspitze von Januar - April 2015

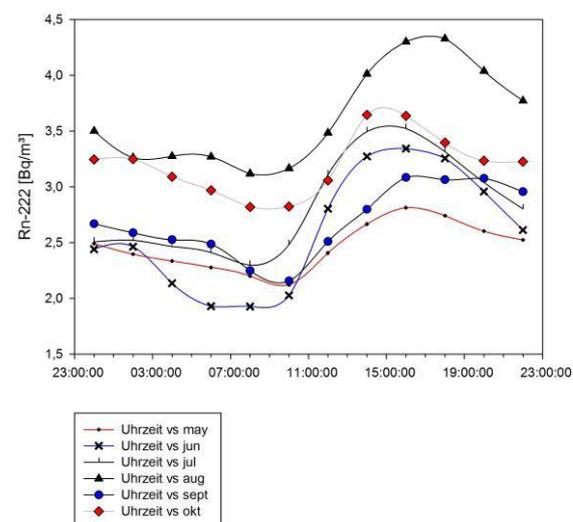
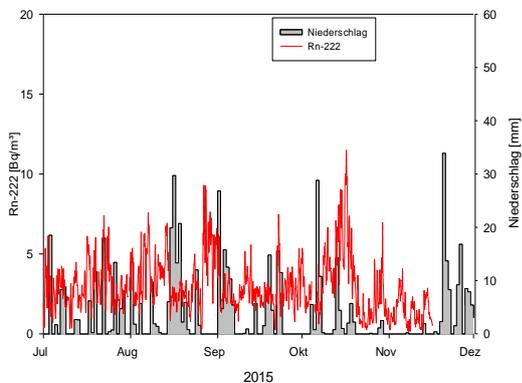


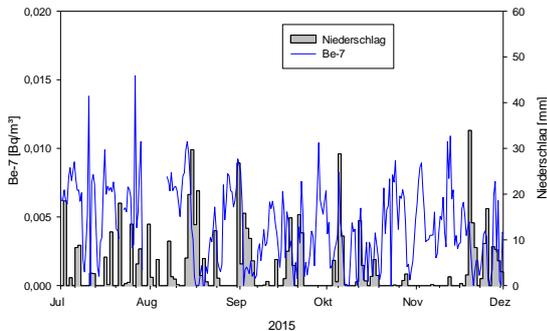
Abb. 6: Zwei-Stunden Mittelwerte der Rn-222 Konzentrationen auf der Zugspitze von Mai - Oktober 2015

Einfluss von Niederschlag auf den Transport von gasförmigem Rn-222 und aerosolgebundenem Be-7

Rn-222 und Be-7 eignen sich hervorragend zur Analyse atmosphärischer Transportprozesse. Die Abbildungen 7a) und 7b) zeigen den Einfluss von Niederschlägen auf die Rn-222- und die Be-7-Konzentrationen. Auswascheffekte bewirken, wie zu erwarten, eine deutliche Abnahme des aerosolgebundenen Be-7 während die Rn-222-Konzentration weitgehend unbeeinflusst bleibt.



a) Rn-222- Konzentration



b) Be-7-Konzentration

Abb. 7: Einfluss von Niederschlag, Juli-Dezember 2015
a) auf die Rn-222-Konzentration, b) auf die Be-7-Konzentration

Diese Auswascheffekte haben keinen Einfluss auf das oben beschriebene Messverfahren zur Direktmessung des gasförmigen Rn-222, so dass die Kontinuität der Messdaten gewährleistet ist.

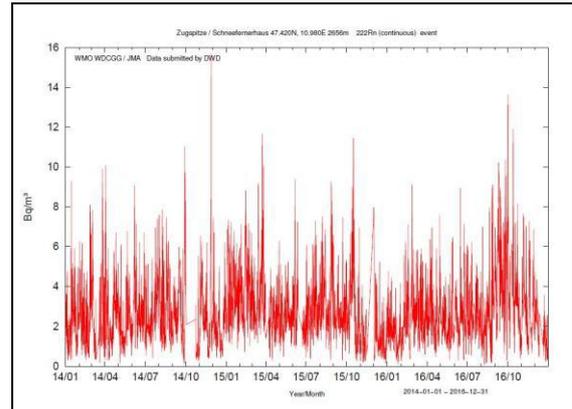


Abb.8: Rn-222-Konzentrationen von 2014-2016

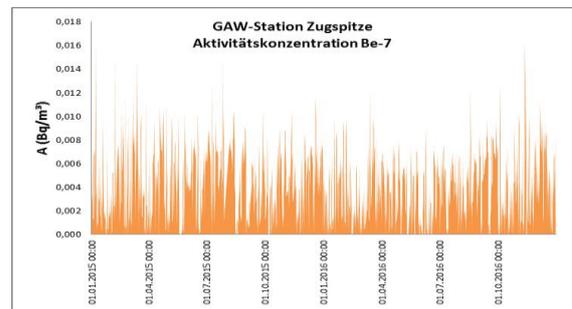


Abb.9: Be-7 Konzentrationen von 2015-2016

Die Daten der Rn-222-Messungen sind im World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) verfügbar.

Literatur

World Meteorological Organization (WMO) Global Atmosphere Watch, 1st International Expert Meeting on Sources and Measurements of Natural Radionuclides Applied to Climate and Air Quality Studies, Gif sur Yvette, France, 3 – 5 June 2003, No. 155, April 2004

Technical Meeting on sources and measurements of radon and radon progeny applied to climate studies, 22 – 24 June 2009, IAEA 2009.

Messung radioaktiver Spurenstoffe in der Atmosphäre im Rahmen des Global Atmosphere Watch Programms der WMO, G. Frank, J. Salvamoser, T. Steinkopff, 42. Jahrestagung des Fachverbands für Strahlenschutz, 26.-30. September 2010, Borkum.

MESSUNGEN VON AEROSOL- UND SPURENGASPROFILIEN MIT DEM MAX-DOAS INSTRUMENT AN DER UFS

ZHUORU WANG¹, KLAUS-PETER HEUE¹, NAN HAO^{1,3}, ROBERT HOLLA²

¹DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR), MÜNCHENER STR. 20, 82234 WEßLING

²DEUTSCHER WETTERDIENST, ALBIN-SCHWAIGER-WEG 10, 82383 HOHENPEIßENBERG

³JETZT BEI: EUMETSAT, EUMETSAT ALLEE 1, 64295 DARMSTADT

E-MAIL: ZHUORU.WANG@DLR.DE

Zusammenfassung: Seit 2011 betreibt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) ein MAX-DOAS Instrument (Multi-Axis Differential Optical Absorption Spectroscopy). Differentielle schräge Säulendichten (DSCD) der Spurengase O₄, O₃, NO₂, HCHO, HONO und SO₂ werden gemessen. Daraus werden auch Vertikalprofile der aerosol-optischen Extinktion und der Spurengase NO₂ und HCHO berechnet. In den Zeitreihen seit 2012 zeigt sich ein klares Sommermaximum in der Aerosolextinktion und in den HCHO und NO₂ Säulendichten.

Abstract: The German Aerospace Centre (DLR) operates a MAX-DOAS Instrument at Environmental Research Station Schneefernerhaus (UFS) since 2011. Based on the observed Differential Slant Column Densities (DSCDs) of the trace gases O₄, O₃, NO₂, HCHO, HONO and SO₂, aerosol extinction profiles and trace gas profiles can be retrieved. The time series since 2012 show clear summer maxima in the aerosol extinction and HCHO and NO₂ column densities.

Mit der MAX-DOAS Methode können stratosphärische und troposphärische Spurengase gemessen werden. Dazu gehören stratosphärisches Ozon (O₃) und Stickstoffdioxid (NO₂), das auch in der Troposphäre eine wichtige Rolle spielt, sowie die troposphärischen Spu-

rengase Formaldehyd (HCHO), Salpetrige Säure (HONO) und Schwefeldioxid (SO₂, Thomas et al., 2015).

Das Instrument beobachtet mittels eines schwenkbaren Teleskops gestreutes Sonnenlicht, das über ein Glasfaserbündel zu zwei Spektrographen für sichtbares (VIS) bzw. für ultraviolettes (UV) Licht geleitet wird (Seitz et al., 2012). Dabei wird das Teleskop nacheinander auf unterschiedliche Winkel über dem Horizont (Elevationen) ausgerichtet. Die Kombination aus den Beobachtungen im Zenit (90°) und in mehrere Richtungen knapp über dem Horizont ermöglicht es für die unteren 1-2 km Aerosol- und Spurengasprofile zu berechnen.

DOAS Analyse

Die gemessenen Spektren werden mittels der DOAS Methode (Differenzielle Optische Absorptionsspektroskopie, Platt & Stutz, 2008) ausgewertet. Für die Analyse der troposphärischen Spurengase wird das Zenitspektrum des aktuellen Messzyklus als Referenz verwendet.

Aerosol Profile

Der Sauerstoff Stoßkomplex O₄ weist im UV und VIS starke Absorptionslinien auf, außerdem ist seine Konzentration proportional zum Quadrat des Sauerstoffgehalts und somit nahezu konstant. Mit der Höhe nimmt die Konzentration exponentiell ab, mit einer Skalenhöhe von 4 km. Die gemessene DSCD

hängt deshalb alleine vom Lichtweg und nicht von der Konzentration ab. Somit kann man umgekehrt auch aus der O_4 DSCD auf die

mungen verschmutzte Luftmassen bis hinauf zur Zugspitze transportieren als im Winter, kann ein solcher Jahresgang erwartet werden.

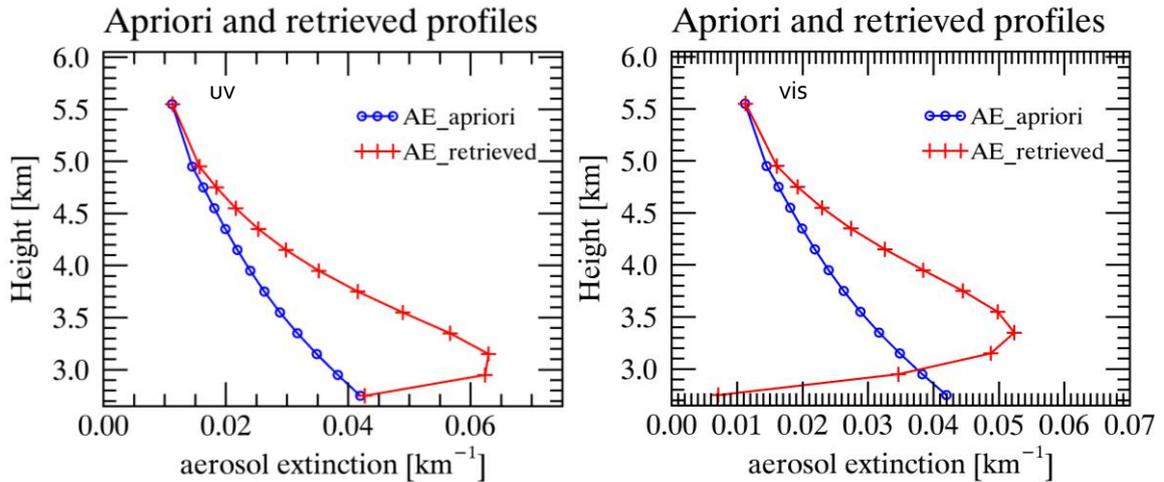


Abb. 1: Berechnete Aerosol Extinktion für einen Messzyklus (30.8.2015 08:57 UTC), links für UV, und rechts für den sichtbaren Spektralbereich.

optischen Aerosoleigenschaften zurück-schließen (Wagner et al., 2004; Frieß et al., 2006). Für die Bestimmung des Aerosol Profils verwenden wir die Software bePRO der belgischen Kollegen (Clémer et al., 2010). Der zugrunde liegende Algorithmus (optimal estimation method (Rodgers, 2000)) erfordert die Vorgabe eines Anfangsprofils (a priori). Beispiele für die berechneten Profile für einen Messzyklus sind in Abb. 1 dargestellt. Man kann gut erkennen dass in den unteren Hö-henschichten das Profil von dem Anfangsprofil abweicht. Abb. zeigt das Profil der aerosol-optischen Extinktion für den kompletten Tag (30.08.2015). Am späten Nachmittag entwickelten sich Wolken über den Alpen, was dann auch zu größeren Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Spektral-bereiche führt.

Die Aerosol Extinktionen wurden vertikal integriert und monatlich gemittelt (Abb. 3). Basierend auf der Zeitreihe 2012 bis 2016 zeigt sich an der UFS ein klares Sommermaximum der aerosol-optischen Dicke (AOD). Da im Sommer öfter konvektive Luftströ-

Spurengasprofile

Zur Berechnung der Spurengasprofile benötigt man außer den DSCD der Spurengase auch das Aerosol-Extinktionsprofil (vorheriger Abschnitt). Die bePRO Software kann nach der Berechnung der Aerosol Extinktion auch die Spurengasprofile berechnen.

Wie für die Aerosole wurden auch für die Spurengase über das Profil integriert. Für die Jahre 2012 – 2016 sind die Monatsmittelwerte in Abb. dargestellt. Bedingt durch stärkere biogene Quellen und höhere photochemische Aktivität ist die HCHO Konzentration im Sommer höher als im Winter. Natürlich könnte auch der verstärkte vertikale Transport die Messungen an der UFS beeinflussen. Für NO_2 ist ebenfalls ein Sommermaximum zu beobachten. Im Winter hingegen ist das Bild nicht ganz so eindeutig wie bei HCHO, so werden in manchen Jahren nahezu die gleichen Werte wie im Sommer erreicht und in anderen deutlich niedrigere.

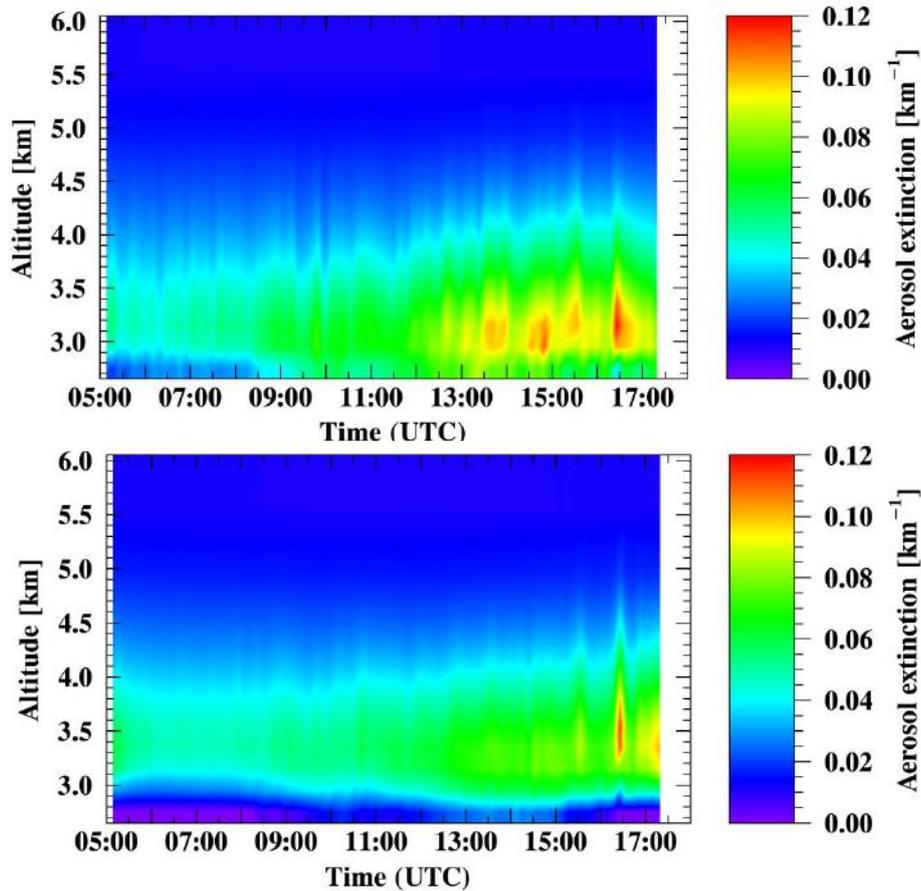


Abb. 2: Aerosol Extinktion am 30.08.2015 als Funktion von Zeit und Höhe.

Die Spurengasprofile beinhalten die Mischungsverhältnisse in Bodennähe. NO₂- und HCHO-Mischungsverhältnisse werden an der UFS auch mit In situ Instrumenten gemessen – Aero Laser für HCHO (Leuchner et al., 2015) und CRANOXII für NO₂ (McKarns & Kutter, 2012). Für die folgenden Vergleiche wurden die DOAS Daten für die Höhenschichten 2,65 km (Boden) bis 2,85 km für HCHO und bis 3,05 km für NO₂ berücksichtigt. Ein Ausschnitt aus den Zeitreihen des Jahres 2013 ist in Abb. 5 zu sehen. Das Sommermaximum in den HCHO Mischungsverhältnissen ist in beiden Zeitreihen gut zu erkennen.

Gegen Ende des Jahres (Tage 320-350, siehe auch Nov 2013 in Abb. 4) wurden erhöhte NO₂

Werte beobachtet, die vermutlich auch auf lokale Quellen zurückgeführt werden können. In Anbetracht der Tatsache, dass das DOAS Instrument über ein größeres Volumen mittelt, zeigt die Korrelationsgrafik (Abb. 6) eine gute Übereinstimmung.

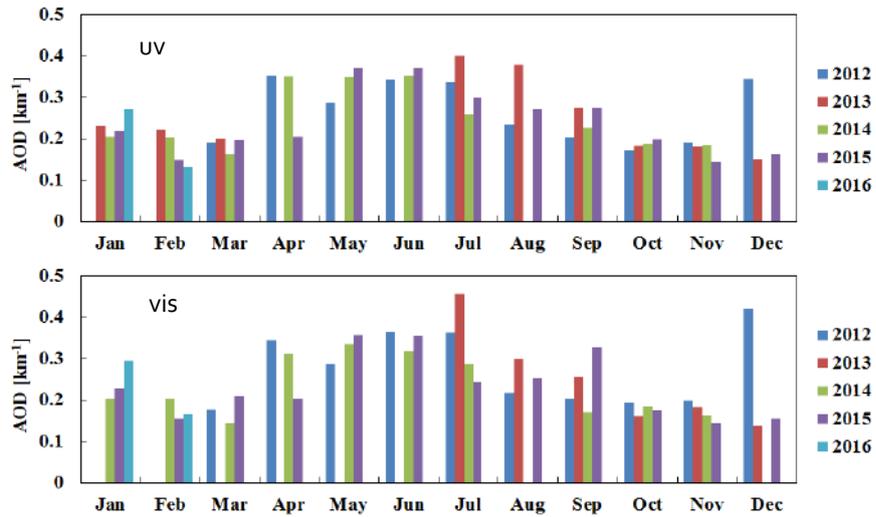


Abb. 3: Monatlich gemittelte Aerosol Optische Dichte, basierend auf den UV oder VIS Spektren.

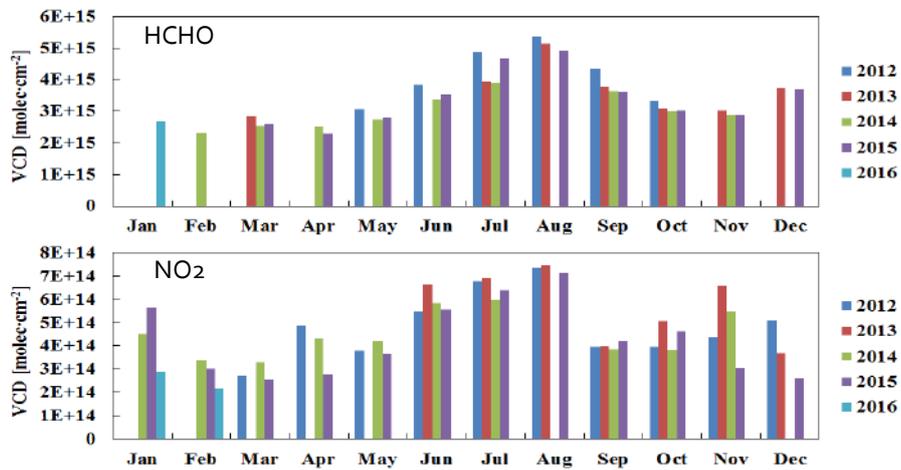


Abb. 4: Monatliche Mittelwerte der vertikalen Säulendichten für HCHO (oben) und NO₂ (unten) für die Jahre 2012 bis 2016.

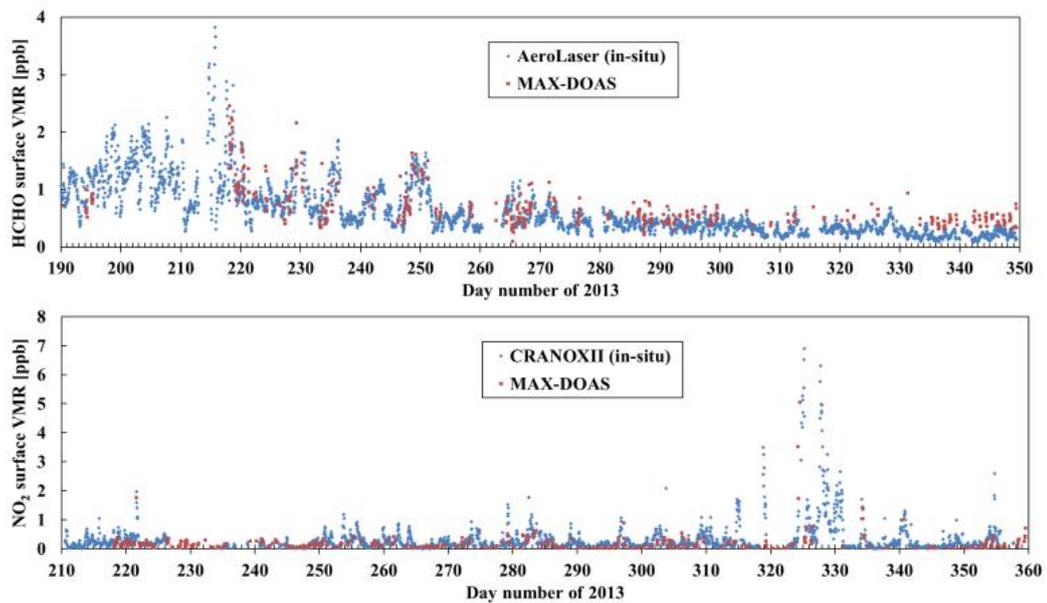


Abb. 5: HCHO und NO₂ Konzentration an der UFS In situ Messungen und MAX-DOAS.

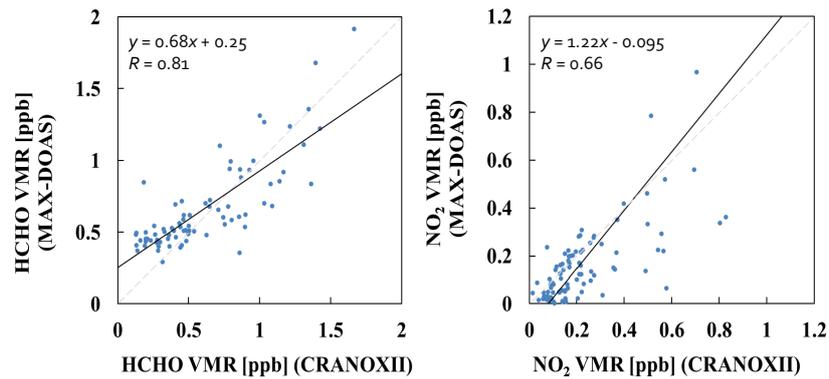


Abb. 6: Korrelation zwischen In situ Messungen (Tageswerte) und DOAS. links: HCHO, rechts: NO₂.

Totale -Säulendichten

Ein Vorteil der MAX-DOAS Messungen ist, dass man gleichzeitig auch die stratosphärischen Spurenstoffe O₃ und NO₂ messen kann. Dazu betrachtet man die Zenitmessungen in der Morgen- und Abenddämmerung (Sonnzenit Winkel zwischen 86° und 90°). Ein Vergleich mit den Daten des Europäischen Satelliteninstruments GOME-2 auf MetOp-A zeigt eine gute Übereinstimmung für O₃ für die morgendlichen und die abendlichen

Messungen an der UFS. Bedingt durch den Tagesgang des stratosphärischen NO₂ und MetOp-As Überflugzeit gegen 9:30 kann für NO₂ eine gute Übereinstimmung nur für die Messungen während des Sonnenaufgangs erwartet werden (Abb. 7).

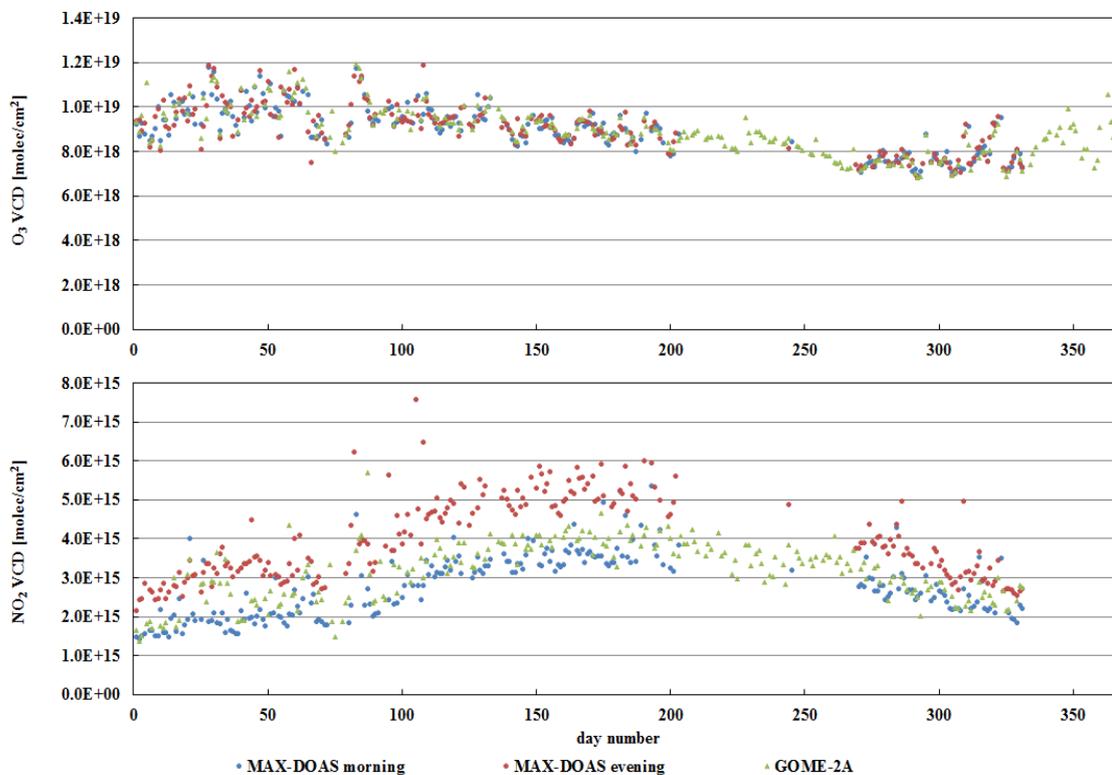


Abb. 7: Zeitreihen für O₃ (oben) und NO₂ (unten) totale vertikale Säulen aus dem Jahr 2014. Zusätzlich zu den Daten des UFS MAX-DOAS sind noch die des GOME-2 Satelliteninstruments gezeigt.

Literatur:

Clémer, K., Van Roozendaal, M., Fayt, C., Hendrick, F., Hermans, C., Pinardi, G., Spurr, R., Wang, P., und De Mazière, M.: Multiple wavelength retrieval of tropospheric aerosol optical properties from MAXDOAS measurements in Beijing, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 863–878, doi:10.5194/amt-3-863-2010, 2010.

Frieß, U., Monks, P. S., Remedios, J. J., Rozanov, A., Sinreich, R., Wagner, T., und Platt, U. : MAX-DOAS O₄ measurements: A new technique to derive information on atmospheric aerosols: 2. Modeling studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 111(D14), 2006.

Leuchner, M., Schunk, C., Lüpke, M., Ghasemifard, H., Ries, L. und Menzel A.: Messung von Formaldehyd, flüchtigen organischen Verbindungen und Isotopenverhältnissen im Kohlendioxid und Wasserdampf auf der UFS. in *Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) Wissenschaftliche Resultate 2013 / 2014*.
<http://www.schneefernerhaus.de/forschung/resultate.html>

McKarns, T. A. und Kutter, M. F. : Background corrected ambient NO₂ measurements, *Air quality measurement methods and technology conference 2012*, Durham, North Carolina, USA. <https://communities.acs.org/docs/DOC-11601>, 2012.

Platt, U. und Stutz, J. : *Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS): Principles and applications*, ISBN-978-3-540-21193-8, Springer, Berlin-Heidelberg, 2008.

Rodgers, C. D. : *Inverse methods for atmospheric sounding: theory and practice*, Ser. Atmos. Oceanic Planet. Phys, vol. 2, F. W. Taylor, World, Sci., Hackensack, N.Y., 2000.

Seitz, K., Lampel, J., Jurgschat, M., Frieß, U., Valks, P., Hao, N. und Platt, U.: Messung von Spurengasen in der freien Troposphäre mit der Max-Doas Methode auf dem Schneefernerhaus in: *Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) Wissenschaftliche Resultate 2011 / 2012*

<http://www.schneefernerhaus.de/forschung/resultate.html>

Thomas W., Gilge S., Elsasser M., Elste T., Flentje H., Holla, R., Köhler, U. und Plass-Dülmer, C. : Messungen der Vulkanemissionen des Bárðarbunga im September 2014 in: *Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) Wissenschaftliche Resultate 2013 / 2014*.
<http://www.schneefernerhaus.de/forschung/resultate.html>

Wagner, T., Dix, B. V., Friedeburg, C. V., Frieß, U., Sanghavi, S., Sinreich, R. und Platt, U. : MAX-DOAS O₄ measurements: A new technique to derive information on atmospheric aerosols—Principles and information content. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D22), 2014

Danksagung

Wir danken dem Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg und dem Deutschen Wetterdienst für die Hilfe bei Aufbau und Betrieb des MAX-DOAS Instruments. Bei den Kollegen vom Koninklijk Belgisch Instituut voor Ruimte-Aeronomie (BIRA-IASB) bedanken wir uns für die Hilfe beim Profil Retrieval mittels ihrer bePRO Software.

Diese Arbeiten wurden im Rahmen eines DAAD-Stipendiums durchgeführt.

MACHBARKEITSSTUDIE "AEROSOL SUPERSITE" – UAV-EINSATZ ZUR INNOVATIVEN VALIDIERUNG VON SATELLITENGESTÜTZTER AEROSOLBESTIMMUNG

MARKUS NEUMANN¹, MARCUS HANK², THOMAS POPP³, THOMAS TRICKL⁴, ANDREAS PHILIPP⁵, WOLFGANG JUNKERMANN⁴, HANNES VOGELMANN⁴, FLORIAN SEIBEL⁶, DIRK SCHMIDT⁷, VOLKER ZIEGLER⁸

¹UFS GMBH, ZUGSPITZE 5, 82475 ZUGSPITZE

²AEROSOL AKADEMIE (BIS 2016)

³DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT OBERPFAFFENHOFEN, DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM

⁴KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, IMK-IFU

⁵UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE

⁶QUANTUM SYSTEMS

⁷DIALOGIS

⁸GRIMM AEROSOL TECHNIK GMBH & CO. KG

E-MAIL: M.NEUMANN@SCHNEEFERNERHAUS.DE

Zusammenfassung: Der innovative Einsatz von In-situ-Messungen auf „Unmanned Aerial Vehicles“ (UAV) an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) und die Weiterentwicklung bestehender bodengestützter Fernsondierung (Lidar) schaffen neue Möglichkeiten zur Validierung satellitengestützter Aerosolbestimmung und den Ausbau der Mess-Infrastruktur der UFS für den Forschungsschwerpunkt Aerosole. In einer sechsmonatigen Machbarkeitsstudie wurden hierfür die nötigen Voraussetzungen identifiziert.

Abstract: Innovative application of in-situ monitoring of aerosols using unmanned Aerial Vehicles (UAV) at the Environmental Research Station Schneefernerhaus (UFS) in combination with further development of ground-based remote sensing (Lidar) could form the basis for new approaches to validate satellite based aerosol determination. In a feasibility study (six months period) requirements have been identified to install such an infrastructure that would be adequate to foster the research topic aerosols at UFS.

Die Validierung der standardisierten Erfassung des Aerosolgehaltes in der Atmosphäre, durch Satelliten basierend auf AOD (Aerosol Optische Dicke) und weiteren Parametern erfolgt primär durch bodengestützte Fernerkundung mit Sonnenphotometern und Lidar (Light detection and ranging) im Rahmen des Messnetzes AERONET. Präzise In-situ-Messungen in den verschiedenen Höhenstufen der Luftsäule, die zu einer genaueren Validierung notwendig sind, sind bislang nur von zeitlich limitierten Kampagnen mit Flugzeugen verfügbar. Aktuelle Weiterentwicklungen haben in den letzten Jahren Grundlagen für neue unbemannte Fluggeräte (UAV) geschaffen, mit deren Hilfe die In-situ-Messung von Aerosolen (Vertikal- und Horizontalsondierung) auch über mittlere Entfernungen möglich ist.

Solche UAV's könnten damit für Routinemessungen auch ohne den Einsatz von bemannten Flugzeugen die erforderlichen Messdaten liefern. Im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Partnern eines UFS-Konsortiums, des DLR, des KIT, der Universität Augsburg sowie mehrerer Technologieunternehmen wurden hierfür in drei Teilprojek-

ten die nötigen Messparameter identifiziert und technologische Entwicklungsziele auf Basis neuer rechtlicher UAV-Standards (Frühjahr 2017) definiert. Sie sollen den Aufbau eines regelmäßigen, UAV-basierten Messbetriebs an der UFS etablieren. Zur Erfüllung der Anforderungen zur Satellitendatenvalidierung am Standort Zugspitze muss in der UFS ein Zwischenschritt zum Aufbau der Infrastruktur und Technologie erfolgen. Er wurde mit dem Projekttitel Aerosol-Mess-Station 4.0 (AMS 4.0) gefasst.

Teilprojekt 1: Anforderungskatalog Satellitenvalidierung

Es wurde zunächst ein Anforderungskatalog für die Nutzung von kombinierten boden- und luftgestützten In-situ-Messungen und Lidar-Extinktionsmessungen zur Aerosol-Satellitenvalidierung erstellt. Für eine solche Validierung müssen die optischen und physikalischen Eigenschaften der Aerosole über die relevante Luftsäule sowie in einem Gebiet in der horizontalen Skala von Satellitenpixeln (ca 10*10 km) charakterisiert werden. Bestimmt werden müssen auch Parameter einer Klimatologie in verschiedenen Luftmassen. Dafür sollen regelmäßig UAV-Flüge im Gebiet zwischen der Zugspitze und dem Loisachtal bei Farchant über einen längeren Zeitraum durchgeführt werden. Dafür sind wegen der geringen Zuladung der UAV's zunächst existierende Messgeräte zu miniaturisieren, und für schnell variierende Umgebungsbedingungen zu modifizieren. Ein weiterer Aspekt bei der Zusammenstellung des Messgerätepaketes ist die kontinuierliche und automatische Datenübertragung ins AlpEnDAC (Abb. 2). Weitere Werkzeuge (Chemie-Transport-Modelle (CTM), Modelle der richtungsabhängigen Bodenreflexion) sollen zur Integration der Messungen herangezogen werden. Daraus kann für die Validierung und Algorithmenentwicklung eine statistisch signifikante Datengrundlage erzeugt werden. Die Nut-

zung dieser Daten ist relevant für z.B. das GAW-Stationsnetzwerk (Global Atmosphere Watch) der WMO oder die COPERNICUS Klima- und Atmosphärendienste der EU.



Abb.1: Luftaufnahmen vom Zugspitzplatt (UFS) durch UAV im Rahmen der Machbarkeitsstudie

Teilprojekt 2: Lidar-Detektion

Die dreidimensionale Verteilung von Rückstreu- und Extinktionskoeffizienten des Aerosols am Standort UFS/Garmisch-Partenkirchen, über die Reichweite von In-situ-Messverfahren hinaus, soll mit Lidar-Technik bestimmt werden.

Es wurden Messungen und Planungen zur Optimierung der Lidar-Systeme in der UFS und am Garmisch-Partenkirchener Teilinstitut IMK-IFU des Karlsruher Instituts für Technologie durchgeführt.

Dabei wurde bestätigt, dass die im Vorfeld benannten Ziele realistisch erreichbar sind. Die Maßnahmen zur technischen Verbesserungen des schwenkbaren Dreiwellenlängen-Lidars (HSRL, „high-spectral-resolution lidar“) und die Weiterentwicklung für einen regulären Standardbetrieb wurden umrissen: Es

sollen Extinktionsmessungen bis in Entfernungen von > 10 km möglich werden. Die Aerosol-Messungen in der freien Troposphäre und in der Stratosphäre sollten bis in 45 km Höhe erweitert werden können. Dies ist eine Grundvoraussetzung für eine quantitative Bestimmung von Rückstreuoeffizienten der zum Teil bis in über 35 km hochreichenden stratosphärischen Aerosolschicht.

der Einsatzbedingungen auf der UFS (Wetter, Start-/Landeplatz, Sichtweite) und der Anwendung von bestehender Messtechnik (GRIMM OPC 11-C, Meteorologie-Paket, Sammler für Pollen und organische Stoffe) getestet.

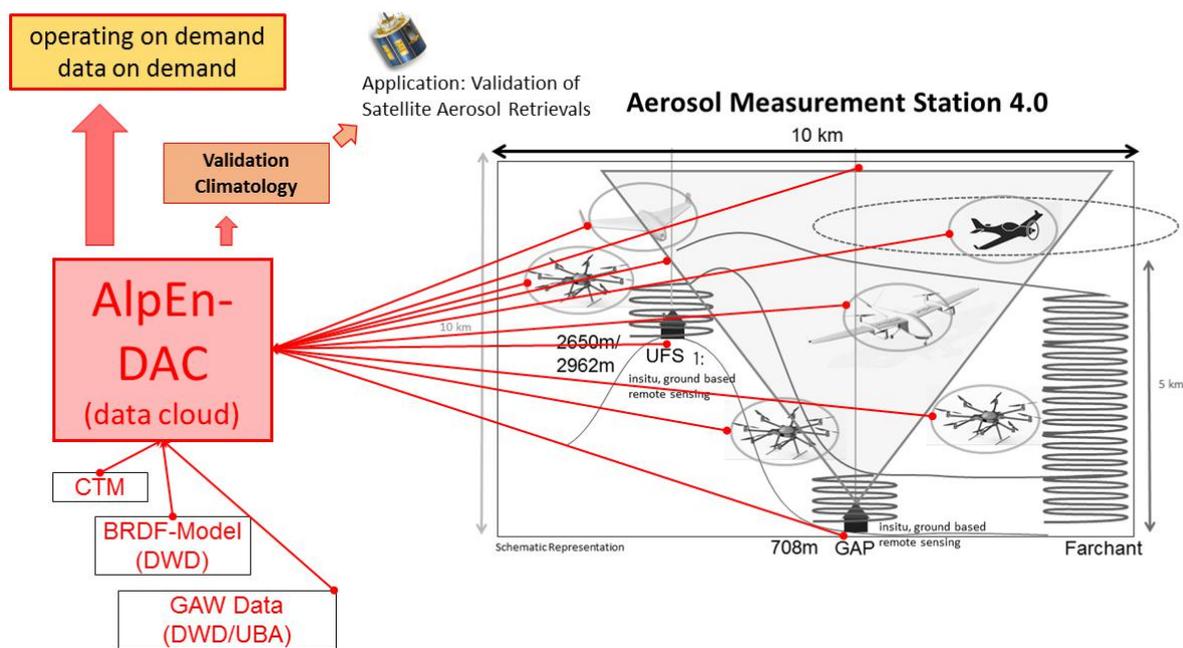


Abb. 2: Projektskizze der Funktionsweise einer AMS 4.0 im Zusammenwirken aller Messungen und einer direkten Dateneinspeisung ins AlpEnDAC.

Teilprojekt 3: Einsatz und Adaption von UAV in der UFS

Das Teilprojekt umfasste die Prüfung der bestehenden Voraussetzungen für einen standardisierten UAV-Betrieb und die hierfür realistischen Entwicklungen. Im Hinblick auf den Anforderungskatalog aber auch hinsichtlich allgemeiner wissenschaftlicher Bedürfnisse der UFS-Nutzer wurden wirtschaftlich sinnvolle und technisch wie rechtlich einsetzbare UAV-Systeme identifiziert.

In Testflugkampagnen (1./2.12.2015 und 30./31.3.2016 an der UFS und 6.4.2016 in Oberheining/Obb.) wurde der Einsatz von drei verschiedenen UAV-Systemen hinsichtlich

Die UAV-Systeme unterscheiden sich im Wesentlichen in ihrer Reichweite, der Zuladung, ihrem Einsatzverhalten (z.B. Windanfälligkeit) und in ihrer Handhabung (Start-/Landeverhalten).

Eine Festlegung auf ein bestehendes System ist zurzeit wirtschaftlich und wissenschaftlich nicht möglich, da je nach Einsatz verschiedene Anforderungen an das System gestellt werden. Ungeklärt ist auch noch, ob mit „Low-Cost“-Messgeräten, die im Gewichtsbereich unter 500 g verfügbar sind, die geforderte Datenqualität erreicht werden kann.

Aufgrund weiterer Wünsche anderer UFS-Nutzer ist es sinnvoll, perspektivisch den Ein-

satz verschiedener UAV-Systeme offen zu halten.

Die Anforderungsanalyse (DLR) definierte die Flugzeiten der UAV-Messungen in Abhängigkeit von den Überflugzeiten der Satelliten.

Witterungsbedingt können Daten von Satelliten nur erhoben werden wenn der Erdboden vom Satelliten sichtbar ist. Wolken im Satellitenpixel verhindern eine genaue Auswertung. Bei solchen Wetterlagen ist entsprechend keine Datenerhebung durch UAV In-situ-Messungen im Sinne einer Validierung sinnvoll. So bedeutet ein kontinuierlicher Messbetrieb mit den UAV neben der erwünschten hohen Regelmäßigkeit (z.B. einmal pro Woche) eine höhere Messfrequenz bei „golden day“-Zeiträumen oder bei besonderen Aerosolereignissen wie beispielsweise Saharastaub-Advektion. Nur so kann eine hohe Anzahl an aussagekräftigen Validierungseinsätzen erreicht werden.

Die Flugwege sollen eine möglichst geringe Variabilität aufweisen und trotzdem einen großen Bereich des Messgebietes abdecken. Zur Festlegung der Flugwege bei der Implementierung und zur Charakterisierung der für die UAV's notwendigen kleinen Geräte im Vergleich zur ‚Standard‘ Instrumentierung sollen Vergleichs-Flüge mit einem instrumentierten Ultraleichtflugzeug und einem Motorsegler (KIT/IMK-IFU) durchgeführt werden.

Die weitere Entwicklung von miniaturisierter und automatisierter Messtechnik folgt den Vorgaben einer Einsetzbarkeit durch Mitarbeiter der BG UFS GmbH (einfache Inbetriebnahme, automatisierter Datentransfer), den Vorgaben zu den nötigen Messpaketen (Lieferung der erforderlichen Größenverteilung/Streu- und Absorptionskoeffizienten) sowie einer Einsetzbarkeit auf den vorhandenen UAV-Systemen (Nutzlast, Witterung). Hierzu hat die Fa. Grimm eigene Zielsetzungen (Pflichtenheft) definiert.

Der Projektumsetzung AMS 4.0 und der damit verbundenen Zielsetzung wurde in dem UFS Strategiepapier die höchste Priorität eingeräumt. Sie soll mit den Projektpartnern unter Leitung der Betriebsgesellschaft in den kommenden Jahren realisiert werden.

- **Folgeschritt 1:** Fundraising zur Finanzierung des Infrastruktur- und Technologieentwicklungsprojekts AMS 4.0 und Umsetzung unter Leitung der BG UFS GmbH.

- **Folgeschritt 2:** Umsetzung der Algorithmenentwicklung für die Satellitenvalidierung bzw. der Entwicklung einer Aerosol-Klimatologie für ein Auswerteverfahren für Satellitenmessungen.

Literatur

Abschlussbericht "Machbarkeitsstudie Aerosol Supersite", Hg.: BG UFS GmbH. Garmisch-Partenkirchen: 2016.

Danksagung

Projektpartner: KIT/IMK-IFU, Institut für Geographie der Universität Augsburg, DLR-DFD, Aerosol Akademie, BG UFS GmbH

Technologiepartner: QUANTUM SYSTEMS, DIALOGIS, GRIMM Aerosol Technik

Assoziierte Partner: DWD, UBA

Vielen Dank an alle geförderten und assoziierten Projektpartner der Machbarkeitsstudie. Die Finanzierung erfolgte durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.

SONDIERUNG METEOROLOGISCHER PARAMETER MIT UNBEMANNTEN LUFTFAHRTSYSTEMEN

ANDREAS PHILIPP¹, ERIK PETERSEN¹, JUCUNDUS JACOBEIT¹

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

E-MAIL: A.PHILIPP@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Atmosphärische In-situ-Messungen mit unbemannten Luftfahrtsystemen stellen eine zunehmend wichtige Alternative und Ergänzung zu Fernerkundungsverfahren dar. Am Institut für Geographie der Universität Augsburg wurde hierzu ein leichtgewichtiges Starrflüglersystem für meteorologische Sensorik entwickelt, das sich mittlerweile im produktiven Einsatz bei verschiedenen Umweltmesskampagnen befindet und auch an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) erfolgreich getestet wurde.

Abstract: Atmospheric measurements using unmanned aerial systems are an increasingly important alternative and supplement to remote sensing methods. At the Institute for Geography at the University of Augsburg a light weight fixed wing system has been developed, which is already in operational use for several environmental measurement campaigns and has also been tested successfully at the Environmental Station Schneefernerhaus (UFS).

Einführung

Unbemannte Luftfahrtsysteme (engl. Unmanned aerial systems / UAS) erleben durch die fortschreitende Miniaturisierung leistungsfähiger Steuerkomponenten und Sensoren in den vergangenen Jahren eine rasante Weiterentwicklung, welche auch für umweltwissenschaftliche Anwendungen nutzbar ist (z. B. Reuder et al., 2009). Der entscheidende Vorteil der Verwendung von UAS ist hierbei

die In-situ-Messung, die Umweltparameter direkt am Ort der Datenerhebung erfasst und somit Unsicherheiten aus der Prozessierung indirekter Daten vermeiden kann.



Abb.1: Rumpf und Sensorträger des am Institut für Geographie der Universität Augsburg entwickelten unbemannten Luftfahrtsystems.

Weitere Vorteile ergeben sich aus der Mobilität der Fluggeräte, die eine dreidimensionale Sondierung der unteren Atmosphärenschichten erlaubt. Und schließlich kann bei geringen Material- und Fertigungskosten eine Vielzahl von Geräten im Paralleleinsatz an verschiedenen Standorten betrieben werden, um eine größere räumliche Abdeckung zu erzielen. Ein gezielt klein dimensioniertes System wurde an der Universität Augsburg entwickelt und befindet sich in verschiedenen Projekten seit einigen Jahren erfolgreich im Einsatz.

System-Setup

Während Drehflügler oder Multicopter sich insbesondere für den Schwebflug eignen, zeichnen sich Flächenflugzeuge durch höhere Energieeffizienz und damit längere Flugzeiten aus. Zudem ist die Sichtbarkeit und damit die Aufstiegshöhe von Starrflüglern deutlich höher, was die Entscheidung für letzteren Typ begründet. Das System besteht aus einem Rumpf aus EPP (Expanded Polypropylen) von

160 cm Spannweite und einem Abfluggewicht von ca. 1800 g. Der Antrieb besteht aus einem Elektromotor mit Klappluftschrauben der als Pusher am Heck montiert von einem Lithium-Polymer-Akkumulator mit Strom versorgt wird.

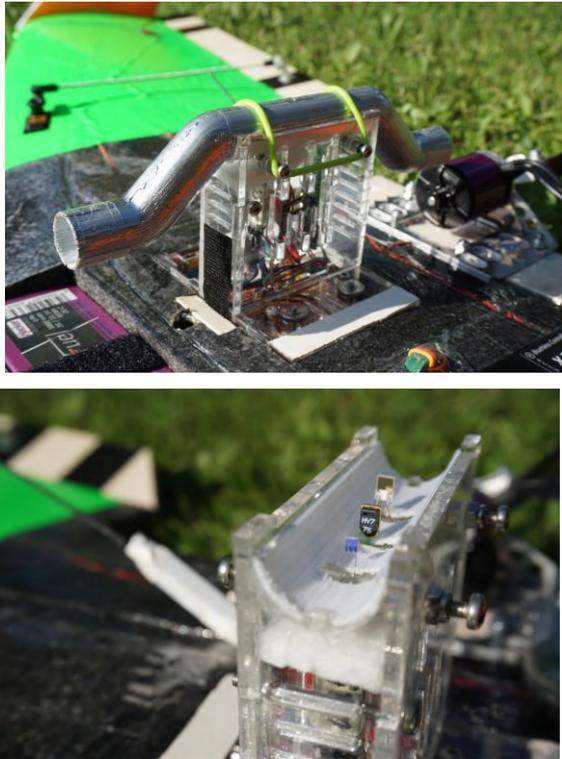


Abb.2: Oben: 3D-gedrucktes Strahlungsschutzrohr (passiv ventiliert). Unten: von vorne nach hinten: der Temod Pt-1000 Widerstands-Temperatursensor (Hersteller B&B), der SHT75-Sensor (Hersteller Sensirion) für Temperatur und Feuchte sowie der P14rapid-Sensor (Hersteller IST) für relative Luftfeuchte bei geringer Ansprechzeit.

Die Steuerung erfolgt in der Regel vollautomatisch über das Open-Source Autopilot-System PPRZ, welches insbesondere von der ENAC (Ecole Nationale de l'Aviation Civile) in Toulouse entwickelt wird (Reuder et al., 2009). Als Funkverbindung während des Fluges stehen sowohl eine Funkfernsteuerung via Handsender als auch eine separate Telemetrie-Verbindung zu einem Groundstation-Computer zur Verfügung. Über beide Verbindungen kann das Gerät gesteuert werden, als auch Flug- bzw.- Sensordaten online abgerufen werden. In der Regel ist ein Eingreifen

durch den Steuerer nur bei der Landung erforderlich. Der Start und Flug erfolgt sonst vollautomatisch nach vorprogrammiertem Flugplan.

Sensorik

In der Grundkonfiguration sind Sensoren für Temperatur und Luftfeuchte zusammen mit dem Autopilotcontroller und dem Telemetriemodem in eine modulare Trägerbox integriert (Abb. 2 und Tab. 1). Die Aufzeichnung erfolgt, neben Telemetriefunk, onboard auf SD-Karte mit 4 Hz. Die Windgeschwindigkeit und -richtung wird berechnet aus der Groundspeeddifferenz zwischen Gegen- und Rückenwind in einem Kreisflug bei konstantem Schub (Bonin et al., 2013)

Tab. 1: Verwendete Standardsensoren für Temperatur und Feuchte. Die Ansprechzeit bezieht sich auf 63 % eines Änderungssignals, ausgenommen bei Temod, hier gibt der Hersteller die Zeit für 50 % Änderung an.

Typ	Variable	Methode	Auflösung	Genauigkeit	Ansprechzeit
SHT75	Temperatur	Bandgap	0,01°	± 0,3	5 s
SHT75	Feuchte	kapazitiv	0,05%	± 1,8%	8 s
Temod	Temperatur	Widerstand	0,008°	± 0,15	3 s
P14r	Feuchte	kapazitiv	0,25%	±1%	1,5 s

Einsatzbereiche

Das vorgestellte System eignet sich insbesondere zur dreidimensionalen Sondierung der meteorologischen Grundparameter Lufttemperatur, Feuchte und Wind. Somit können die wesentlichen Bedingungen der planetaren Grenzschicht der Atmosphäre z. B. für Schadstoffverteilung erfasst werden. Die Eignung für Projekte mit jeweils spezifischen Anforderungen soll im Folgenden anhand einiger ausgewählter Messkampagnen veranschaulicht werden.

- **Operationelle Sondierung an der Universität Augsburg:** In einer Pilotstudie mit über ein Jahr Laufzeit wurde die Eignung des Systems für regulären Einsatz im Dauerbetrieb erfolg-

reich getestet. Ca. zweimal pro Woche wurde jeweils vor Sonnenaufgang ein Spiralförmiges Vertikalprofil bis 300 Meter über Grund sondiert. Der jeweilige Einsatz dauerte ca. 30 Minuten, was die Alltagstauglichkeit des Systems unter Beweis stellt. Die erhobenen Temperatur- und Feuchtedaten der ca. 80 Tage werden zurzeit in einer Abschlussarbeit statistisch ausgewertet.

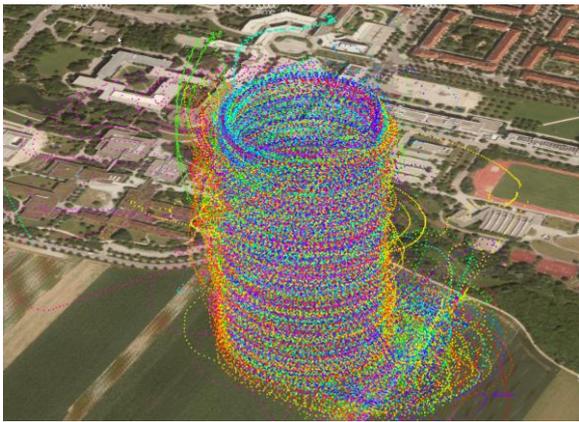


Abb.3: Messpunkte der Spiralförmigen UAS-Aufstiege an ca. 80 Tagen zwischen August 2015 und September 2016 in 3D-Darstellung.

- **Machbarkeitsstudie Aerosol-Supersite an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS):** Eine besondere Herausforderung ergibt sich mit Einsatz von UAS im Hochgebirge durch hohe Windgeschwindigkeiten und reliefbedingte Böen sowie das geringe Platzangebot für ebene Landflächen. Erschwerend kommen Abschattungseffekte in Hinblick auf Navigationssatelliten hinzu. Am 2.12.2015 wurden zusammen mit Projektpartnern der Machbarkeitsstudie „Aerosol Supersite“ (siehe) zur Aerosolsondierung sechs Flüge mit Start und Landung auf dem 12x9 m großem Dach der Forschungsseilbahn erfolgreich absolviert und damit die Hochgebirgstauglichkeit gezeigt. (Siehe Neumann et al., Kapitel 23, Seite 91).



Abb.4: UAS-Start vom Dach der Forschungsseilbahn der UFS am 2.12.2015.

- **ScaleX-Kampagne des IMK-IFU:** Parallelaufstiege mehrerer UAS gleichzeitig an räumlich verteilten Standorten erlauben die Bestimmung räumlicher Gradienten auch über größere Distanzen hinweg. Im Rahmen einer breit angelegten Messkampagne zur Bestimmung von klimatischen Haushaltsgrößen auf verschiedenen räumlichen Skalen (Wolf et al., 2016) wurden an fünf Standorten parallel stündliche Aufstiege über einen Tagesgangzyklus hinweg bis 1000 Meter über Grund durchgeführt. In dieser Höhe sind die Fluggeräte noch ausreichend sicher visuell in Position und Lage zu beurteilen, was jedoch in etwa die maximale Aufstiegshöhe darstellen sollte. Damit wird jedoch schon ein Großteil der üblichen Ausdehnung der planetaren Grenzschicht der Atmosphäre abgedeckt, wie in Abbildung 5 deutlich wird. Neben einem Beispiel für advektive Schichtung (Abb. 5 Mitte) ist hier ein kompletter Tagesgang, beginnend mit der Mischungsschicht im ersten Drittel, einer folgenden einsetzenden Inversion unter einem Residuallayer im Zentrum und mit deren Auflösung am rechten Rand, dargestellt (Abb. 5 unten).

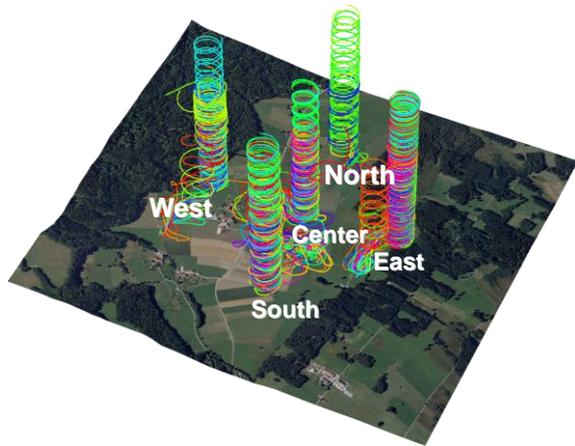
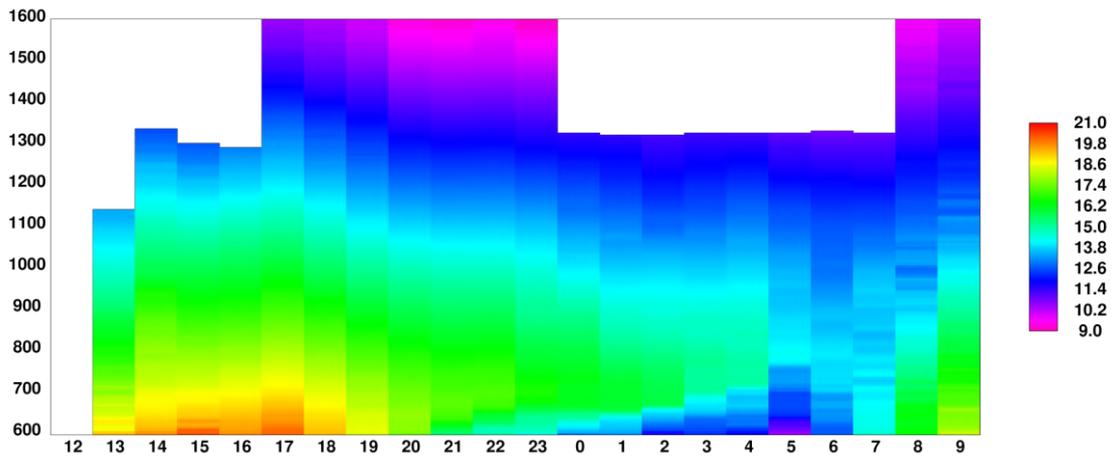
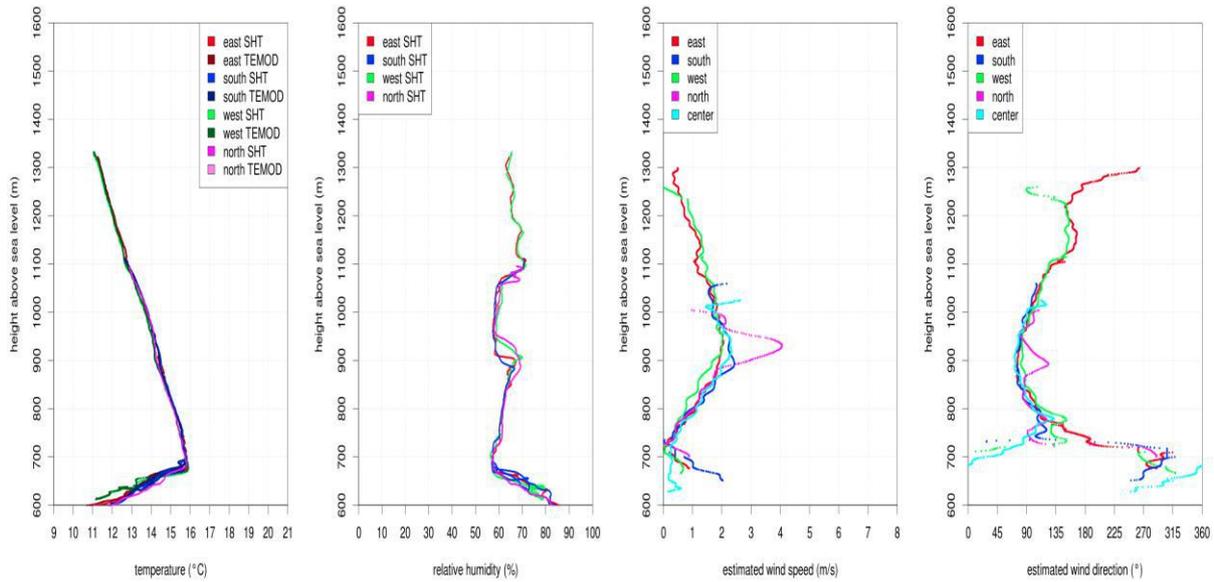


Abb.5: Oben: Aufstiegs spiralen vom 6./7.7.2016 bei Fendt bei Peissenberg. Die Standorte befinden sich auf der Kante bzw. im Zentrum einer 1x1 km großen Modellgitternetzzelle. Mitte: Temperatur und Feuchteprofil für den 7.7.2016 3:00 Uhr MESZ für die verschiedenen Standorte. Unten: Tagesgang der Lufttemperatur für den Standort Ost. Die Abszisse kennzeichnet den Zeitverlauf mit stündlichen Aufstiegen, die Ordinate die Aufstiegs höhe.



- **Stadtklimasondierung Berlin:** Der Einsatz von Fixedwing-UAS auch im städtischen Umfeld konnte bisher in zwei Kampagnen in Berlin gezeigt werden. Im BMBF-finanzierten Projekt „Urban Climate under Change“ zur Entwicklung eines neuen leistungsfähigen Stadtklimamodells werden 2017 und 2018 vier Intensivmesskampagnen zur Erhebung dreidimensionaler Validierungsdaten durchgeführt. Obwohl der Genehmigungsaufwand sowie die Logistik einen erheblichen Aufwand darstellen, konnte der UAS-Einsatz auch an den innenstädtischen Standorten Charlottenburg und Tempelhofer Feld durchgeführt werden, während ein dritter Standort im Grunewald gelegen als ruraler Referenzstandort dient. Die Daten hierzu befinden sich noch in der Auswertung.

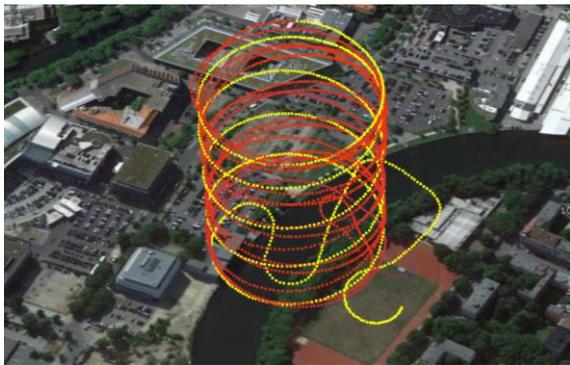


Abb.6: Messpunkte einer Aufstiegsspirale bis 250 Meter über Grund in Moabit/Charlottenburg Berlin.

Ausblick

Das vorgestellte UAS ist, wie gezeigt wurde, für vielfältige Zwecke mit Bedarf an Vertikalprofilen für Temperatur, Luftfeuchte und Wind einsetzbar. In einem im August 2017 angelaufenen Projekt zur Untersuchung der Aerosolverteilung im Bereich der Stadt Augsburg (Smart Air Quality Network) werden in einem neuen Typ zusätzlich optische Partikelzähler integriert. Dies soll dann künftig den direkten Zusammenhang zwischen Schichtungseigenschaften der planetaren Grenzschicht und Umweltparametern wie Feinstaubbelastung erkennen lassen.

Literatur

Bonin, T.A., P.B. Chilson, B.S. Zielke, P.M. Klein und Leeman, J.R. : Comparison and application of wind retrieval algorithms for small unmanned aerial systems. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, 177–187, 2013.

Reuder, J., P. Brisset, M. Jonassen, M. Müller und Mayer, S. : The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Open Access Article Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 18, No. 2, 141-147, 2009.

Wolf B., C. Chwala, B. Fersch, J. Garvelmann, W. Junkermann, M. J. Zeeman, A. Angerer, B. Adler, C. Beck, C. Brosy, P. Brugger, S. Emeis, M. Dannenmann, F. De Roo, E. Diaz-Pines, E. Haas, M. Hagen, . Hajnsek, J. Jacobeit, T. Jadhuger, N. Kalthoff, R. Kiese, H. Kunstmann, O. Kosak, R. Krieg, C. Malchow, M. Mauder, R. Merz, C. Notarnicola, A. Philipp, W. Reif, S. Reineke, T. Rödiger, N. Ruehr, K. Schäfer, M. Schrön, A. Senatore, H. Shupe, I. Voelksch, C. Wanninger, S. Zacharias, und Schmid, H. P.: The ScaleX campaign: scale-crossing land-surface and boundary layer processes in the TERENO-preAlpine observatory. *BAMS* doi:10.1175/BAMS-D-15-00277, 2016.

Danksagung

Unterstützt wird die Entwicklung des Systems in Projekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (Stadtklima im Wandel) sowie des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (Smart Air Quality Network).

SCHNEEHYDROLOGISCHE MODELLIERUNG UND SCHNEEDECKENMONITORING IM EINZUGSGEBIET DES PARTNACH URSPRUNGS

MICHAEL WEBER¹, MATTHIAS BERNHARDT², RALF LUDWIG¹

¹DEPARTMENT FÜR GEOGRAPHIE, LMU MÜNCHEN, LUISENSTRASSE 37, 80333 MÜNCHEN

²INSTITUT FÜR WASSERWIRTSCHAFT, HYDROLOGIE UND KONSTRUKTIVEN WASSERBAU, BOKU WIEN,

MUTHGASSE 18, 1190 WIEN

E-MAIL: M.WEBER@IGGF.GEO.UNI-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Zur Untersuchung der Schneedeckendynamik werden auf dem Zugspitzplatt, neben den Schneehöhenmessungen an den automatischen Wetterstationen, Schneehöhenkarten mit Hilfe eines terrestrischen Lidar erstellt. Diese erlauben die Identifizierung und räumliche Einordnung der dominanten Schneeprozesse. Somit ist erstmals eine prozessbasierte räumliche Diskretisierung des bisher verwendeten und validen schneehydrologischen Modells möglich. Darüber hinaus geben die Lidar Aufnahmen detailliert Aufschluss über die Abschmelzdynamik des Nördlichen Schneeferners.

Abstract: In order to investigate snow cover dynamics on the Zugspitzplatt, snow depth is recorded by automatic weather stations. In addition, snow depth maps are produced by means of terrestrial lidar. This allows for identification and spatial attribution of dominant snow processes. Based on this, it is possible to improve the spatial discretization of the applied snow hydrological model with regard to dominant snow processes. Moreover, lidar recordings give detailed information on melt dynamics of the Nördlicher Schneeferner.

Einleitung

Der in den Alpen generierte Niederschlag ist von herausragender Bedeutung für die Wasserversorgung der Vorländer. Dies kann durch die Betrachtung der Abflussverhältnisse des Rheins verdeutlicht werden, von dessen Einzugsgebiet sich nur 23 % in der Schweiz befinden. Jedoch trägt dieser Anteil im Mittel 50 % zu seinem Gesamtabfluss bei (Liniger et al., 1998). Trotz der Bedeutung der Alpen als „Wassertürme“ (Viviroli et al., 2007; Liniger et al., 1998; Meybeck et al., 2001) ist das Verständnis der hydrologischen Verhältnisse v.a. im hochalpinen Bereich bis heute unzureichend (Klemes, 1990). Aufgrund des komplexen Terrains der Alpen und der daraus resultierenden kleinräumigen Unterschiede, stellen meteorologische und hydrologische Messungen eine große wissenschaftliche und logistische Herausforderung dar und sind häufig mit großen Fehlern behaftet. Eine Besonderheit des alpinen Wasserkreislaufs ist die Entkopplung von Niederschlag und Abfluss durch die winterliche Schneedecke. Um fundierte Aussagen zum Wasserkreislauf im Hochgebirge zu treffen sowie diesen mit hydrologischen Modellen valide abzubilden, ist es daher unabdingbar, die Prozesse und Faktoren, die zur beobachteten Schneeverteilung führen zu identifizieren und zu verstehen. Um dies zu erreichen wird im Forschungseinzugsgebiet (EZG) Zugspitzplatt (Bernhardt et al., 2014), mit Hilfe der aus VAO Mitteln finanzierten Messinfrastruktur der Umweltfor-

sungstation Schneefernerhaus (UFS), die Schneedecke kontinuierlich mit automatischen Wetterstationen gemessen. Ergänzend zu diesen punktuellen Messungen erfolgen diskontinuierliche, flächenverteilte Messungen der Schneehöhe mit Hilfe eines terrestrischen Lidar. Die, aus den Lidar Aufnahmen errechneten, hochaufgelösten Schneehöhenkarten dienen dazu, die steuernden Prozesse und Faktoren für die Schneedeckenverteilung, wie Windverteilung, Lawinen oder anthropogene Einflüsse, zu bestimmen und räumlich zuzuordnen. Die daraus gewonnenen Informationen stellen die Grundlage für eine prozessbasierte räumliche Diskretisierung des Cold Regions Hydrological Model (CRHM) dar. Darüber hinaus ermöglichen die Lidar Aufnahmen die detaillierte Berechnung der Massenbilanz des Nördlichen Schneeferners.

Methoden

Die modelltechnische Beschreibung des Wasserkreislaufs im EZG erfolgt mit dem prozessbasierten Cold Regions Hydrological Model (CRHM) (Pomeroy et al., 2007).

Das EZG wird in CRHM mit Hydrological Response Units (HRUs) aufgelöst, Raumeinheiten, von denen angenommen wird, dass sie sich aufgrund ihrer naturräumlichen Ausstattung hydrologisch gleich verhalten. Bisher orientierte sich die HRU Einteilung an den Vegetationsstufen und unter der Vorgabe einer optimalen Repräsentation der Schneemessstationen um eine korrekte Modellvalidierung zu gewährleisten (Abb. 1). Auf Basis dieses Modell Setups werden Projektionen für die zukünftige Schneedeckenentwicklung unter verschiedenen WETTREG Szenarien gerechnet. Um die Modellgüte weiter zu verbessern ist es notwendig die HRU Einteilung so zu verbessern, dass die dominanten

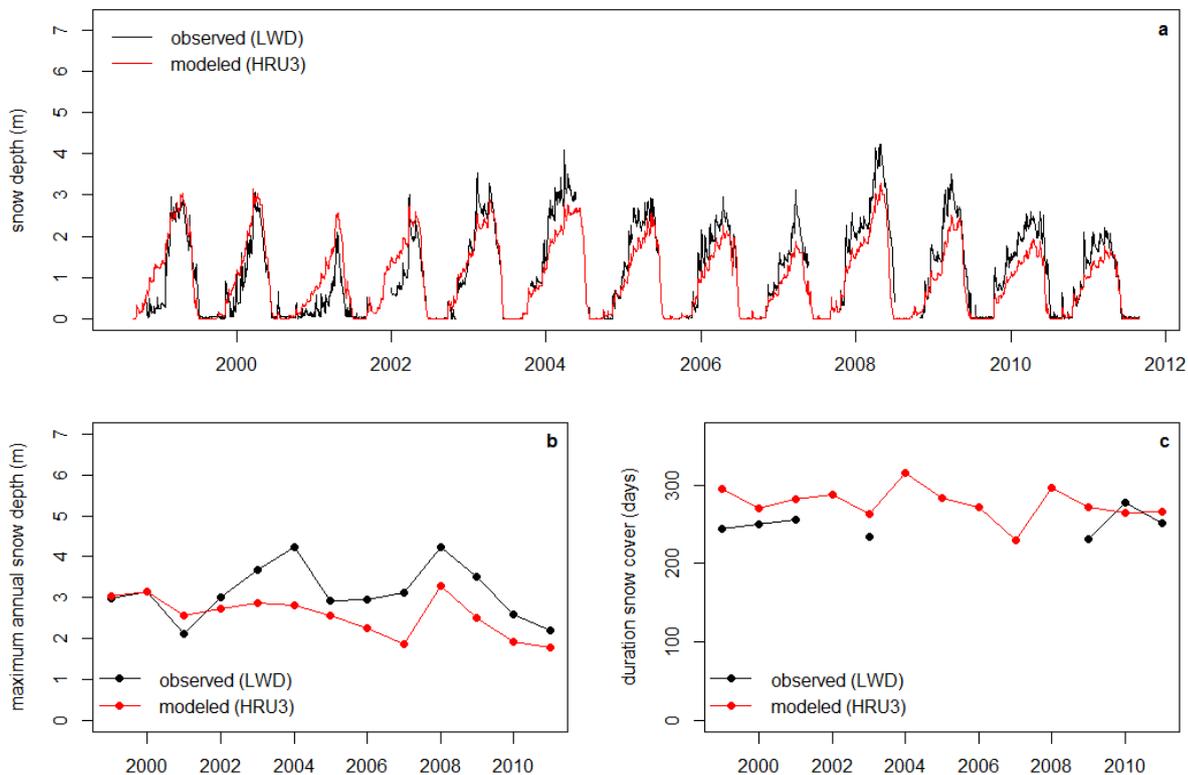


Abb.1: Tägliche modellierte und gemessene Schneehöhe in HRU₃ (a). Jährliche maximale modellierte und gemessene Schneehöhe in HRU₃ (b). Jährliche modellierte und gemessene Schneedeckendauer in HRU₃ (c) (Weber et al. 2016)

Schneeprozesse im EZG räumlich optimal abgebildet werden.

Um die dominierenden Prozesse zu identifizieren und räumlich zuzuordnen, wird mit Hilfe eines terrestrischen Lidar die Schneehöhe im EZG gemessen und aus den gewonnenen Daten eine Zeitreihe von Schneehöhenkarten erstellt.

Ergebnisse

Anhand der im EZG gemessenen Schneehöhen an der Station des Bayerischen Lawinenwarndienst (LWD, 2420 m ü. NN) zeigte sich, dass CRHM valide Ergebnisse für die Schneedeckendynamik auf stündlicher Basis liefert (Abb. 1a). Abbildung 1b zeigt die gemessene und modellierte jährliche maximale Schneehöhe.

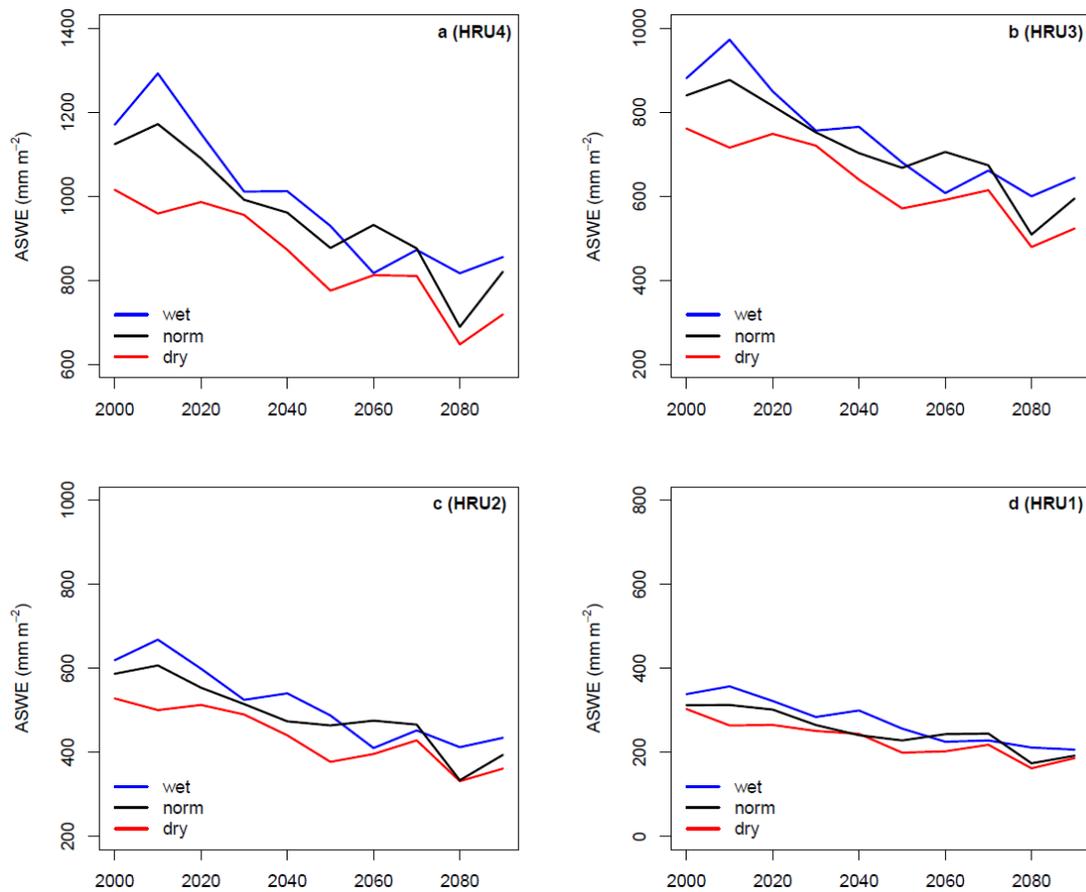


Abb. 2: Zukünftige Entwicklung des akkumulierten Schneewasseräquivalents (ASWE) in HRU₄ (a, höchste HRU), HRU₃ (b), HRU₂(c) und HRU₁ (d, niedrigste HRU) unter dem trockenem, normalen und feuchten WETTREG Szenario.

Die Identifikation der Muster in der Schneehöhenverteilung und deren steuernde Prozesse erfolgt mittels einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) auf Basis der Schneehöhenkarten. Zudem werden Lidar Aufnahmen des Nördlichen Schneeferners verwendet um über Differenzrechnung dessen Abschmelzdynamik zu dokumentieren.

Es ist eine Unterschätzung durch das Modell in fast allen Jahren zu erkennen, wohingegen die Schneedeckendauer (Abb. 1c) meist überschätzt wird (Weber et al., 2016).

Als Hauptgrund für die Modellfehler ist die grobe räumliche Diskretisierung des EZG zu nennen, die nicht alle Schneeprozesse, die zur Schneehöhenverteilung führen ausreichend repräsentiert. Hierzu zählen expositionsbedingte Unterschiede in der Ablation und der

Winddrift sowie Lawinenumverteilung und Einflüsse durch Pistenraupen. Die Analyse der Zukunftsprojektionen auf Basis der WETTREG Daten zeigt eine deutliche Abnahme sowohl der Schneedeckendauer als auch der -mächtigkeit in allen Szenarien und Höhenstufen. Abbildung 2 zeigt die zukünftige Entwicklung des akkumulierten Schneewasseräquivalents (ASWE) im EZG und damit die im EZG gespeicherte Menge an Wasser. Die Abnahme des ASWE hat zur Folge, dass die wasserspeichernde Wirkung der Schneedecke zunehmend verloren geht und zukünftig weniger Schmelzwasser zur Pufferung von Niedrigwassersituationen in den Frühjahrs und

kunftsprojektionen mit aktuellen Downscalingprodukten der Uni Augsburg bestätigen diese Ergebnisse (siehe Kaspar et al., Kapitel 14, Seite 57).

Um die erwähnten Probleme in der Modellgüte zu lösen wurden die hochaufgelösten Lidar-Schneehöhenkarten einer PCA unterzogen. Diese ermöglicht es Muster in der Schneehöhenverteilung sichtbar zu machen und auf die steuernden Prozesse wie Winddrift, Lawinen oder Pistenraupen zu schließen (Abb. 3). Die bisherige visuelle Interpretation der Ergebnisse wird im weiteren Studienverlauf durch statistische Methoden ergänzt.

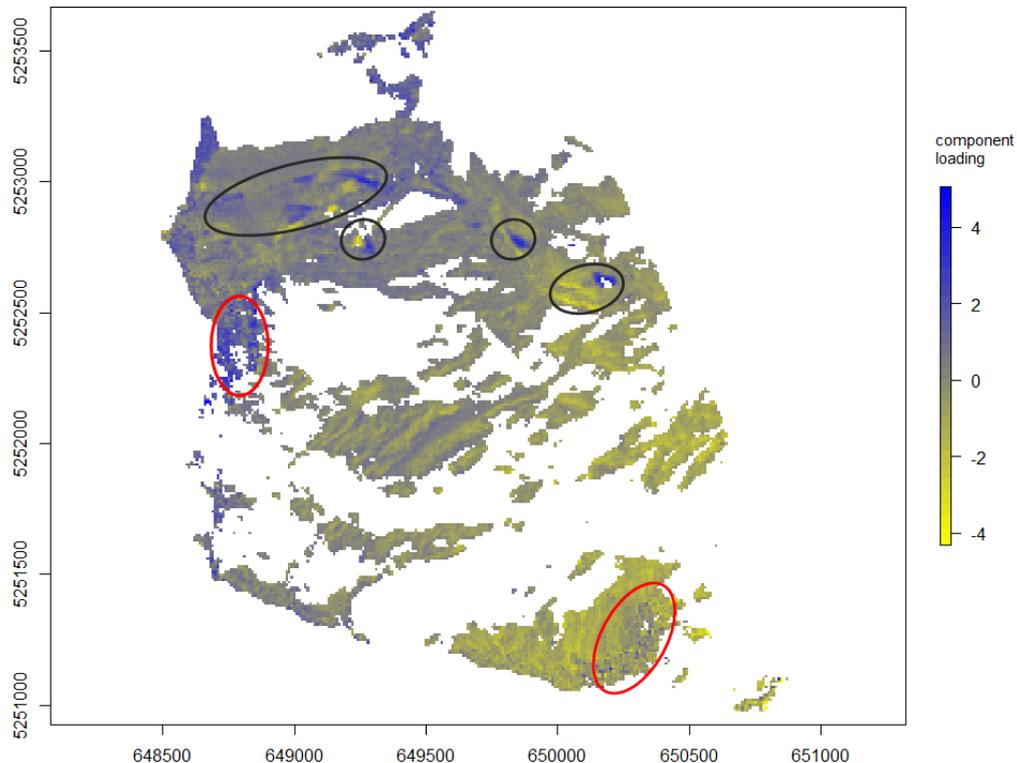


Abb. 3:2. Hauptkomponente der Akkumulationsphase. Weiße Bereiche repräsentieren Schattenbereiche, schwarze Kreise markieren Schneerverschiebungen durch Pistenraupen, rote Kreise Lawinenbereiche

Sommermonaten zur Verfügung steht. Gleichzeitig steigt das Risiko für Rain on Snow Events, die starke Überschwemmungen verursachen können. Des Weiteren bedeutet eine Verringerung der Schneedecke große Einschnitte für den Wintertourismus. Zu-

Die Auswertung der Lidar Aufnahmen des Nördlichen Schneeferners vom Sommer 2014 und Sommer 2015 verdeutlichen dessen Ablation im Jahr 2015 (Abb. 4). Im rekordwarmen Sommer 2015 verlor der Nördliche Schneeferner im Mittel 1,6 m an Höhe was ca. 1 m

mehr als dem langjährigen Mittel entspricht. Die Bereiche mit positiver Bilanz zeigen die Schneedepots, die durch Pistenraupen aufgeschüttet wurden. Bereiche an denen der Schnee für die Depots entnommen wurde zeichnen sich durch eine stark negative Bilanz mit Höhenverlusten von über 4 m aus.

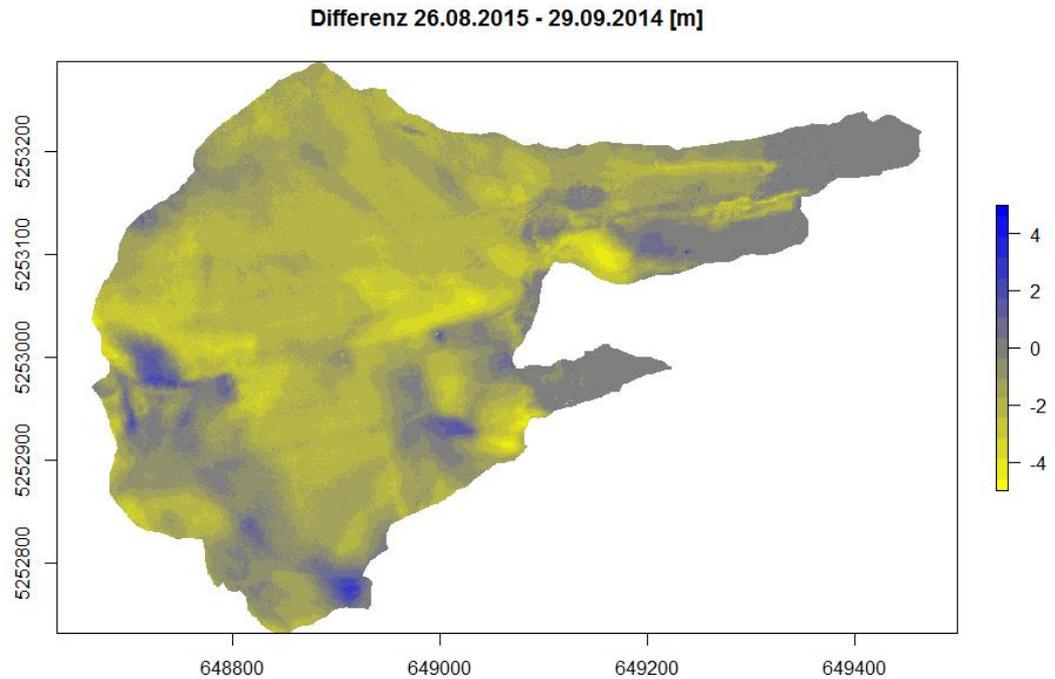


Abb. 4: Ablation des Nördlichen Schneeferners im Sommer 2015

Literatur

Bernhardt, M., Härer, S., Jacobeit, J., Wetzel, K.F. und Schulz, K.: The Virtual Alpine Observatory – research focus Alpine Hydrology. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 58, 241-243, 2014.

Klemes, V.: Foreword. *Hydrology of Mountainous Areas. Proceedings of a Workshop, June 1988*, Molnar, L. (ed.), IAHS Press, 1990.

Liniger, H., Weingartner, R. und Grosjean, M.: *Mountains of the World: Water Towers for the 21st Century*, Centre for Development and Environment (CDE), Institute of Geography, University of Berne, 1998.

Meybeck, M., Green, P. und Vörösmarty, C.: A New Typology for Mountains and Other Relief

Classes, Mt. Res. Dev., 21, 34-45, 10.1659/0276-4741(2001)021[0034:ANTFMA]2.0.CO;2, 2001.

Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Brown, T., Hedstrom, N. R., Quinton, W. L., Granger, R. J. und Carey, S. K.: The cold regions hydrological model: a platform for basin process representation and model structure on physical evidence, *Hydrological Processes*, 21, 2650-2667, 10.1002/hyp.6787, 2007.

Viviroli, d., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M. und Weingartner, R.: Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance, *Water Resources Research*, 43, 1-13, 10.1029/2006WR005653, 2007.

Weber, M., Bernhardt, M., Pomeroy, J. W., Fang, X., Härer, S. und Schulz, K.: Description of current

and future snow processes in a small basin in the Bavarian Alps, *Environmental Earth Sciences*, 75, 10.1007/s12665-016-6027-1, 2016.

Danksagung

Die Studie wurde mit Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz im Rahmen des Vorhabens Ausbau und Internationalisierung des Virtuellen Alpenobservatoriums (VAO-II) finanziert.

LANGZEIT-MONITORING DER PERMAFROST-DYNAMIK IN DER ZUGSPITZNORDWAND (TUM LANDSLIDES)

MICHAEL KRAUTBLATTER¹, MAXIMILIAN WITTMANN¹, PHILIP MAMOT¹, TANJA SCHRÖDER¹,
SASKIA EPPINGER¹

¹ PROFESSUR FÜR HANGBEWEGUNGEN DER TU MÜNCHEN; ARCISSTR. 21; 80333 MÜNCHEN
E-MAIL: M.KRAUTBLATTER@TUM.DE

Zusammenfassung: Im Kammstollen an der Zugspitznordwand messen wir seit 2007 die Permafrostdynamik steiler Felswände. In dem aufwendig instrumentierten Outdoor-Lab werden seit 2007 in vielen Jahren monatliche Tomographien der gefrorenen steilen Felsbereiche erstellt; es ist das am längsten laufende Monitoring-Programm dieser Art. Die Daten aus einem Jahrzehnt Permafrostentwicklung geben erste Einblicke in die Reaktion von Permafrost auf langzeitige Veränderungen wie den Klimawandel und kurzzeitige Prozesse wie Schneedynamik oder saisonale Temperaturschwankungen.

Abstract: Since 2007, we measure permafrost dynamics of steep rock faces in the Kammstollen Gallery along the Zugspitze North Face. In a carefully instrumented outdoor lab, we have measured tomographies of frozen rock sections often monthly since 2007; this is the longest operating monitoring of this kind. Based on a decade of results, we start to gain insights into long-term rock wall permafrost behaviour responding to global warming as well as short term responses to snow and temperature regimes.

Was bedeutet Permafrostveränderung?



Abb 1: Die Zugspitze und das bayerische Schneekar – im obersten Bereich der Zugspitznordwand ab ca. 2800 m findet sich in schneearmen Bereichen Permafrost.

Permafrost ist thermisch definiert als Untergrund, dessen Temperatur in zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter 0 °C liegt. Ab einer Höhe über 2600-2800 m findet man permanent gefrorene Bereiche in den nordorientierten Hängen des Zugspitzmassivs. Die Poren im Gestein sowie Klüfte und Karstgefäße (Höhlen) in den Felswänden sind dann permanent eisgefüllt. Permafrost beeinflusst nachhaltig die Stabilität von intaktem Gestein und eisgefüllten Klüften sowie die Wasserführung von Felswänden. In den Alpen lässt sich seit den 1980ern an mehreren Stationen eine deutliche Veränderung/Erwärmung des Permafrosts analog zum alpenweiten Erwärmungstrend nachweisen.

Was ist besonders am Wettersteingebirge?

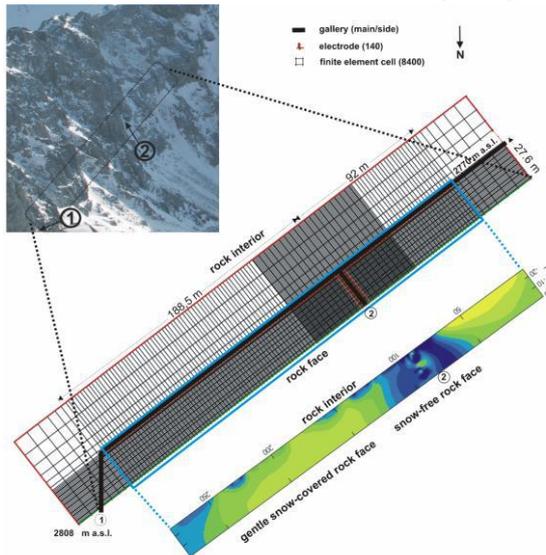


Abb. 2: Hochauflösende elektrische Resistivitätstomographie entlang eines 270 m langen Transekts des Kammstollens an der Zugspitze. Spezifische Widerstände im Bereich von gefrorenem Zugspitzdolomit (Labormessungen) sind in blau gekennzeichnet. Gefrorene Felsbereiche im Februar 2007 bis in 27 m Felstiefe von der Wand weg sind nur im steilen schneefreien Felsbereich bei Stollenfenster 2 auszumachen; sie bilden eine Permafrostlinse mit ca. 50 m Durchmesser und Temperaturen im Kernbereich von -0.5 bis -1.5 °C.

Das Wettersteingebirge zeigt grundsätzlich hohe Steinschlagaktivitäten auf, auch dort wo kein Permafrost zu finden ist. Im benachbarten Reintal wird die langfristige jährliche Aktivität auf 8600 (±3400) m³ pro Jahr geschätzt, davon entfallen ca. 18 % auf Steinschlag (0-10 m³), 6 % auf Blockstürze (10-100 m³) und 4 % auf kleine Felsstürze (100-10000 m³), der größte Teil (62 %) allerdings auf kleinere Bergstürze (>1 mio. m³) die hier z.B. vor ca. 200 und 500 Jahren niedergingen (Krautblatter et al., 2012) . Ca. 90 % aller Steinschläge (0-10 m³) werden von Starkregen ausgelöst (Krautblatter & Moser, 2009). Permafrost als Einflussfaktor auf Felsstabilität findet sich nur im Gipfelbereich der Zugspitze ab ca. 2800 m (Krautblatter et al., 2010); hier kann die Mechanik von Ablösungen durch Eis und gefrorene Felsen beeinflusst werden (Krautblatter et al., 2013; Sass, 2005) was sich auch im Langzeitlaborversuch zeigen lässt (Mamot &

Krautblatter, 2016; Murton et al., 2016). Ablösungsprozesse und die Auswirkungen von Felsstürzen sind in den letzten fast 100 Jahren umfassend beobachtet und untersucht worden (Heckmann et al., 2012; Leuchs, 1921; Sass & Krautblatter, 2007; Sass et al., 2007).

Der Kammstollen als einzigartige Messeinrichtung:



Abb. 2: Hochauflösende elektrische Resistivitätstomographie entlang eines 270 m langen Transekts des Kammstollens an der Zugspitze. Spezifische Widerstände im Bereich von gefrorenem Zugspitzdolomit (Labormessungen) sind in blau gekennzeichnet. Gefrorene Felsbereiche im Februar 2007 bis in 27 m Felstiefe von der Wand weg sind nur im steilen schneefreien Felsbereich bei Stollenfenster 2 auszumachen; sie bilden eine Permafrostlinse mit ca. 50 m Durchmesser und Temperaturen im Kernbereich von -0.5 bis -1.5 °C.

Die Messung im Kammstollen, der die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) auf der Südflanke mit dem Kammhotel auf der Nordflanke der Zugspitze verbindet, ist dabei etwas ganz Besonderes. Im Kammstollen, findet seit 2007 ein Monitoring-Programm zur Überwachung der Permafrost-dynamiken der Zugspitznordwand statt (Krautblatter et al., 2010). Weltweit liegen nur sehr wenige Beobachtungsreihen in steilen Felswänden vor und die ca. 50*70 m große Permafrostlinse der Zugspitze befindet sich am unteren Rand der Permafrostverbreitung und reagiert sehr empfindlich auf jede Witterungsanomalie (warmer/kalte Sommer und Winter). Somit kann der aufwendig instrumentierte Kammstollen wie ein Außenlabor

genutzt werden, in dem schnelle Änderungen dokumentiert werden können. Der Kammstollen und die Infrastruktur am Schneefernhaus machen es möglich, dass dort seit 2007 in vielen Jahren monatliche Tomographien der gefrorenen Felsbereiche erstellt werden können. Beim Verfahren der elektrischen Resistivitätstomographie werden dort an mehr als 100 Elektroden Strom eingeleitet (in mehr als 1000 Elektroden-Kombinationen) und über die Leitfähigkeitsverteilung im Fels kann die Größe der Permafrostlinse und der thermische Zustand abgeschätzt werden (Krautblatter et al., 2010). Ziel dieses Programmes ist es, das Verhalten einer Permafrost-Felswand unter dem Einfluss verschiedenster Umwelteinflüsse wie Temperatur, Schneebedeckung der Außenwand und Porenwasserdrücken in Felsklüften zu messen, zu verstehen und in Modellen nachzuvollziehen, die dann prognostisch genutzt werden können. In Laboruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass der elektrische Widerstand des Wettersteinkalks/-dolomits direkt korreliert ist mit dessen Temperatur (Krautblatter et al., 2010). Dieser Zusammenhang wird genutzt, um aus den gemessenen Widerständen die Felstemperatur abzuleiten und gefrorene von nicht-gefrorenen Bereichen zu unterscheiden. Die von dauerhaft installierten Temperaturfühler stündlich gemessenen Werte dienen zur Überprüfung der Tomographien.

Ergebnisse 2016 (Auswahl):

Im Kammstollen gibt es einen an Größe deutlich variierenden Permafrostbereich (ca. Meter 80-140; Abb. 4), der seit 2007 kontinuierlich gefroren war. Ein zweiter Bereich am Ausgang des Kammstollens zur Nordwand (ca. Meter 260) ist fast ganzjährig gefroren; er taut aber in den meisten Sommern für kurze Zeit ab, überdauert aber in wenigen kalten Sommern. In den Jahren 2015 und 2016 ist, wie auch in den übrigen Jahren ersichtlich, dass in 15 m Entfernung von der Felswand die

niedrigsten Temperaturen im Felsinneren gegen Ende des Sommerhalbjahres gemessen werden. Das lässt auf eine Wärmeleitung durch das Gestein mit circa halbjährlicher Latenz schließen.

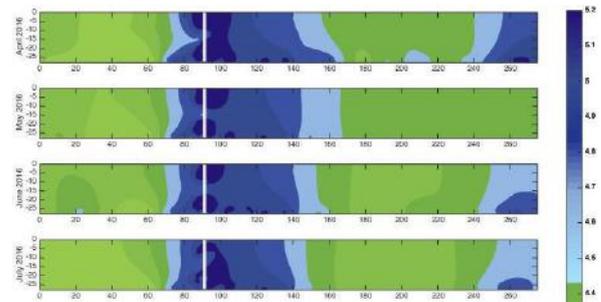


Abb. 4: Elektrische Resistivitätstomographien des Kammstollens (siehe Abb. 2) im Frühjahr und Frühsommer 2016 zeigen monatlich in blau den gefrorenen Bereich (< -0.5 °C, Gefrierpunkt Wettersteinkalk) des Kammstollens; der lila Kernbereich entspricht laut Laborkalibrierung Fels-Temperaturen von nahe -2 °C, die dort auch von den Temperaturloggern im weiß markierten Seitenstollen (Abb. 3) gemessen werden.

Ausblick Sommer 2017:

Das Monitoring-Programm der Permafrostdynamik an der Zugspitznordwand ist das am längsten laufende Projekt dieser Art. Die Daten, welche ein Jahrzehnt Permafrostentwicklung repräsentieren, geben erste Einblick in die Reaktion von Permafrost auf langzeitige Prozesse wie den Klimawandel und kurzzeitige Prozesse wie Schneeschmelzen oder saisonale Temperaturschwankungen. Im Sommer 2017 verfolgen wir monatlich und zum Teil wöchentlich wie der außergewöhnlich kalte Winter 2016/2017 auf die Permafrostlinse wirkt. Die Frage ist ob und wie sich die seit 2007 abgetauten Bereiche wieder erholen können oder ob durch den mit Auftauen einsetzenden Wasserfluss in Klüftbereichen das Abtauen des Permafrostbereichs irreversibel ist.

Projekte

(<https://www.landslides.geo.tum.de/projects/>):

- Predicting the effects of climate change on alpine rock slopes: Evaluation of paraglacial and periglacial drivers of rockfall in the European Alps (ALPINE ROCK SLOPES, 2016 – 2019) – Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG
- Steep permafrost slopes in Norway (CryoWALL, 2015 – 2019) – Norwegian Science Foundation.
- Influences of snow cover on thermal and mechanical processes in steep permafrost rock walls (ISPR 2011 – 2015) – Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG
- Monitoring potential hazardous rock walls and slopes in mountain regions (MOREXPERT, 2010-2017) - Austrian Research Promotion Agency (FFG)
- Sensitivity of rock permafrost to climate change and implications for rock instability (SORP, 2008-2011) - Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG
- Real time monitoring of fracture initiation in natural stones induced by environmental stresses (StoneMon, 2015-2017) - DBU (German Environmental Foundation)
- Monitoring the thermal state of permafrost by automated time-lapse Capacitive Resistivity Imaging. NERC/UK, 2010-2013, UK Science Foundation.

Literatur

Heckmann, T., Bimboese, M., Krautblatter, M., Haas, F., Becht, M. und Morche, D. : From geotechnical analysis to quantification and modelling using LiDAR data: a study on rockfall in the Reintal catchment, Bavarian Alps, Germany, *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(1), 119-133. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2250>, 2012.

Krautblatter, M. und Moser, M. : A nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps), *Natural Hazards and Earth System Science*, 9, 1425-1432, 2009.

Krautblatter, M., Funk, D. und Guenzel, F.: Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space, *Earth Surf. Process. Landforms*, 38(8), 876-887. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3374>, 2013.

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. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JF001209>, 2010.

Krautblatter, M., Moser, M., Schrott, L., Wolf, J. und Morche, D. : Significance of rockfall magnitude and carbonate dissolution for rock slope erosion and geomorphic work on Alpine limestone cliffs (Reintal, German Alps), *Geomorphology*, 167, 21-34, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.007>, 2012.

Leuchs, K. : Die Ursachen des Bergsturzes am Reintalanger (Wettersteingebirge), *Geologische Rundschau*, 12, 189-192, 1921.

Mamot, P., und Kautblatter, M. : Towards a mechanical failure model for degrading permafrost rock slopes representing changes in rock toughness and infill, in 11th Int. Conference on Permafrost, edited by F. Günther and A. Morgenstern, Potsdam, 2016.

Murton, J., Kuras, O., Krautblatter, M., Cane, T., Tschofen, D., Uhlemann, S., Schober, S. und Watson, P. : Monitoring rock freezing and thawing by novel geoelectrical and acoustic techniques, *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JF003948>, 2019'6.

Sass, O. : Spatial patterns of rockfall intensity in the northern Alps, *Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd.* 138, 51-65, 2005.

Sass, O. und Krautblatter, M. : Debris flow-dominated and rockfall-dominated talus slopes: Genetic models derived from GPR measurements, *Geomorphology*, 86(1-2), 176-192. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.08.012>, 2007.

Sass, O., Krautblatter, M. und Morche, D.: Rapid lake infill following major rockfall (bergsturz) events revealed by ground-penetrating radar (GPR) measurements, Reintal, German Alps, Holocene, 17(7), 965-976, 2007.
<http://dx.doi.org/10.1177/0959683607082412>

UNTERSUCHUNGEN ZUR HOCHGEBIRGSPEDOSPHÄRE AUF DEM ZUGSPITZPLATT

SVEN GRASHEY-JANSEN¹, SEBASTIAN DÖTTERL¹

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

E-MAIL: SVEN.JANSEN@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

DOETTERL@GEO.UNI-AUGSBURG.DE

Zusammenfassung: Aufgrund der klimasensiblen Stoffdynamik und Wasserretention ist die räumliche Verbreitung bodentragender Flächen in hochalpinen Lagen von großer Forschungsrelevanz.

Auf den Ausgangsgesteinen des Zugspitzplatts entwickeln sich v.a. *Eutric Regosols*. Bekannt ist aber auch das Auftreten von *Cambisols*, deren Entwicklung an kalkarme Substrate (u.a. äolisch eingetragene Stäube aus den Zentralalpen) geknüpft ist. Durchgeführte Untersuchungen zeigen ein räumliches Muster der Bodenverbreitung, welches auf einen entscheidenden Einfluss lokaler Luftströmungen hinweist.

Abstract: Knowledge of the spatial distribution of soils in high-alpine environments is of great relevance for climate-sensitive carbon dynamics and alpine soil water retention capacity. Predominant soils at the Zugspitz-plateau are *Eutric Regosols*, locally interlinked with *Cambisols* tied to parent material low in carbonates. Preliminary analyses show a spatially complex pattern of soil, which points towards the importance of local air flows for mica-enriched dust deposition originating in granitic Central Alps.

Verbreitungsmuster der Böden auf dem Zugspitzplatt

Ein Großteil der (Roh-)Bodenformationen im Untersuchungsgebiet wird durch das autochthone Ausgangsgestein bestimmt. Der ladinische Wettersteinkalk (alpine Trias) gilt auf-

grund der vorwiegend lagunären Schichtserien in seiner Stratigraphie als ein sehr reines Kalkgestein ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 > 95\%$). Infolgedessen weist das Untersuchungsgebiet ein ausgeprägtes Karstrelief auf, das lokal von glazialen und rezenten Schuttakkumulationen bedeckt wird. Die typische Pedogenese läuft (v.a. im initialen Stadium) vorwiegend im basisch-neutralen Bereich ab. Aufgrund der Höhenlage dominieren physikalische gegenüber chemischen Verwitterungsprozessen, was zur Ausbildung verschiedener Syrosemi und Rendzinen geführt hat (*Eutric Leptosols/Eutric Regosols*). Die im Mittel ganzjährig kühl-feuchten Bedingungen führen zu einer retardierten Zersetzung und Akkumulation der toten Biomasse. Höhenzonal typische Felshumusböden (*Folic Histosols*) prägen daher einen Großteil des Untersuchungsgebietes.

Pedogenetische Modifizierung durch Glimmerdepositionen

Untersuchungen von Hüttl (1997), Credner et al. (1998) und Küfmann (2003; 2008) belegen spätglaziale und rezente äolische Einträge von Silikatstäuben der Schlufffraktion aus dem zentralalpiner Raum (Abb.1). Dies hat lokal eine Modifizierung der basischen Bodenentwicklung bewirkt. Vorwiegend in den Kluftkarrenfeldern zeigen sich Anreicherungen von allochthonen Silikatglimmern im gesamten Solum der Karsttaschen bis hin zum anstehenden Ausgangsgestein. Infolge der fehlenden Säurepufferung konnten hier tiefgreifende und für das Carbonatgestein

untypische Verbraunungsprozesse nachgewiesen werden.

Im Rahmen einer Detailkartierung wurde eine signifikante Dominanz der *Cambisol*-Verbreitung auf den nach Südosten exponierten Karstflächen festgestellt (Grashey-Jansen et al., 2014), was die bisher generell vertretene Annahme einer gleichmäßigen Verteilung auf dem Zugspitzplatt widerlegt.

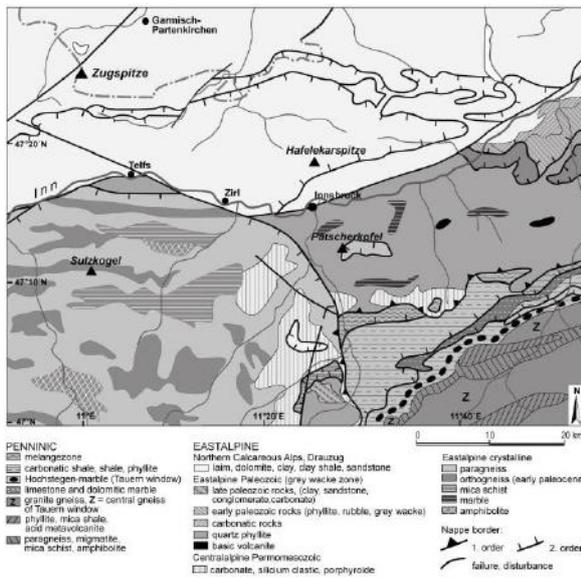


Abb.1: Geologie der südlich an das Untersuchungsgebiet angrenzenden Zentralalpen, die als ein potentielles Hauptliefergebiet äolischer Einträge gesehen werden (Grashey-Jansen et al., 2014).

Die kartierten Verbreitungsmuster legen vielmehr einen an Südostströmungen gekoppelten äolischen Eintrag durch das Gatterl nahe (Abb.2), welches durch seine Öffnung im Reliefverbund des Grat- und Kammverlaufes eine strömungskanalisierende Wirkung vermuten lässt.

Das räumliche Verteilungsmuster von mit Glimmern angereicherten Substraten wird durch die höhendifferenzierte Analyse der CaCO_3 -Gehalte und pH-Werte gestützt. Abbildung 3 zeigt eine signifikante Zunahme der entsprechenden Werte in den Oberböden mit zunehmender Höhe über NN und hebt das dominante Vorkommen der *Cambisols* zwischen 2100 m und 2200 m ü. NN hervor.

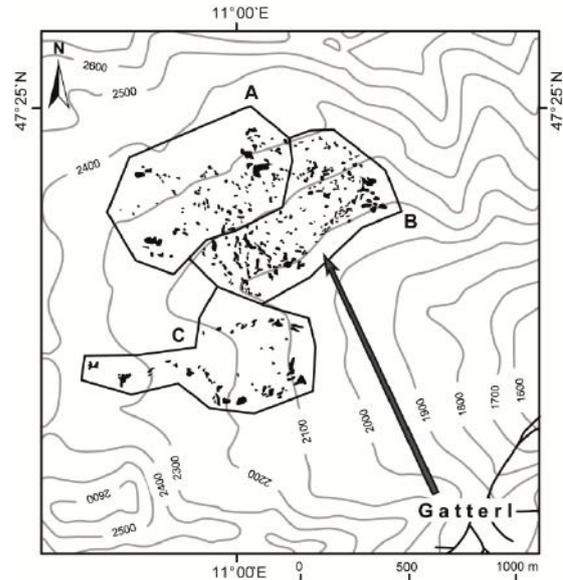


Abb.2: Bodenkundliche Detailkartierung zwischen 2100 m und 2400 m ü NN. Verteilung von Arealen im Untersuchungsgebiet mit Bodenmächtigkeiten >10 cm (= schwarze Flächen). Der schwarze Pfeil gibt die vermutete Hauptrichtung des äolischen Eintrags an. **A:** Böden mit $\text{CaCO}_3 > 45\%$ und pH-Werten $< 7,5$ (vorwiegend Eutric Regosols und Folic Histosols). **B:** Böden mit $\text{CaCO}_3 < 10\%$ und pH-Werten $< 6,5$ (vorwiegend Cambisols). **C:** Junge Böden auf rezent aktiven Schuttakkumulationen und verlängerten Schneeschmelzperioden (vorwiegend Eutric Regosols und Folic Histosols) (Grashey-Jansen et al., 2014).

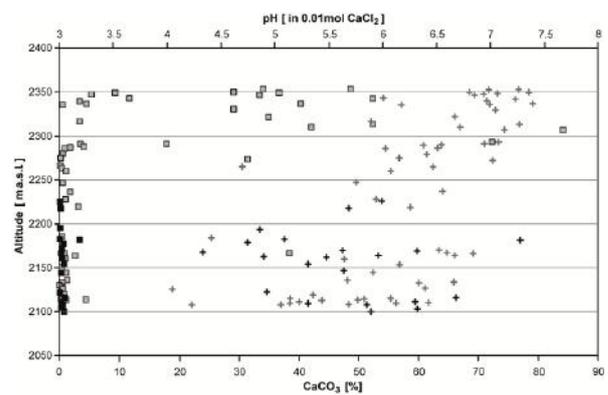


Abb.3: Zusammenhang zwischen Höhenlage und CaCO_3 -Gehalt der Oberböden (Quadratsignaturen; schwarz mit, grau ohne Glimmeranreicherungen) sowie Zusammenhang zwischen Höhenlage und pH-Milieu der Oberböden (Kreuzsignaturen; schwarz mit, grau ohne Glimmeranreicherungen) (Grashey-Jansen et al., 2014).

Dieses Verteilungsmuster der Böden kann durch eine eingeschränkte räumliche Wirksamkeit der verantwortlichen Luftströmungen erklärt werden: Es ist davon auszugehen, dass die SE-Winde nach dem kanali-

sierten Durchströmen des „Gatterls“ durch die Reibung an der nach Norden ansteigenden und mit Vegetation besetzten Karstoberfläche sowie der Südwand unterhalb des Jubiläumsgates relativ schnell abgebremst werden, so dass sich die äolische Fracht auf den Oberflächen deponiert. Eine abbremsende Wirkung kann auch im Einfluss lokaler Berg-Talwindzirkulationen sowie durch das Gegenströmen katabatischer Fallwinde vermutet werden. In allen Fällen fungieren die Karsttassen hierbei als natürliche Sedimentfallen hinsichtlich des Rückhalts und der Akkumulation der eingetragenen Silikatglimmer.

Bedeutende Kohlenstoffspeicherung in den hochalpinen Böden

Durch gezielte Probennahmen wurden in einer noch laufenden Untersuchung die Böden hinsichtlich ihres Speichervermögens für Kohlenstoff analysiert. Primäre Zielsetzung ist es, einen initialen Datensatz der C-Speicherung zu erzeugen, um daraus Aussagen zur C-Dynamik ableiten zu können.

Im Zuge der ersten Untersuchungen wurden dabei zwei unterschiedliche Ausgangssubstrate (Mergel und Wettersteinkalk) in ähnlicher Exposition und in einer Höhe von 2000-2200 m ü. NN beprobt. Die Zwischenergebnisse zeigen, dass sich die Gesamtgehalte der Kohlenstoffmassen auf beiden Gesteinen stärker annähern (Abb. 4). Dies ist insofern bemerkenswert, weil sich die Konzentrationen an Kohlenstoff zwischen den Rasenmatten und organischen Auflagen der initialen Böden des Wettersteinkalks und den Pararendzinen/Braunerden des Mergels stark unterscheiden (Abb. 5). Erste Resultate zeigen, dass sich sowohl die Tiefenverteilung als auch die Masse an Kohlenstoff im Hochgebirgsraum stark unterscheiden. Aufgrund der Abhängigkeit dieser Verteilung von der vorherrschenden Geologie ergibt sich eine regelmäßige, aber kleinräumig sehr variable Verteilung von Kohlenstoff. Zukünftige Untersu-

chungen sollen zeigen, inwiefern der Zusammenhang von Geologie und Kohlenstoffspeicherung eine Variabilität in der Sensibilität des Hochgebirgsraumes und der darin stattfindenden Kohlenstoffflüsse im Hinblick auf die zu erwartende Erwärmung im Rahmen des Klimawandels zur Folge hat.

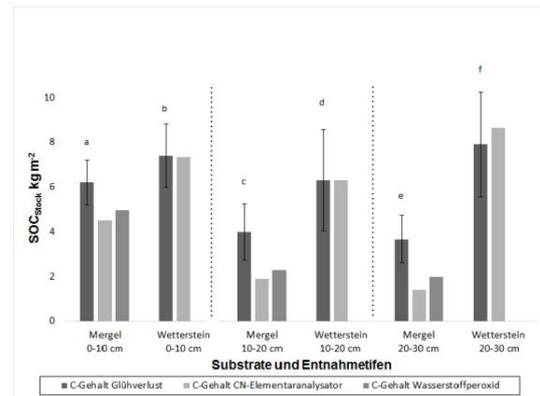


Abb.4: Gegenüberstellung der SOC-Gehalte [C kg-1 m-2] ermittelt durch drei unterschiedliche Methoden. Fehlerindikatoren entsprechen der Standardabweichung. Die Resultate der Varianzanalyse beziehen sich auf Messung durch Glühverlust. Signifikante ($p > 0,05$) Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben über den Mittelwerten der Messungen dargestellt, getestet über die einzelnen Tiefenstufen, separat für beide Ausgangssubstrate (unveröffentlicht).

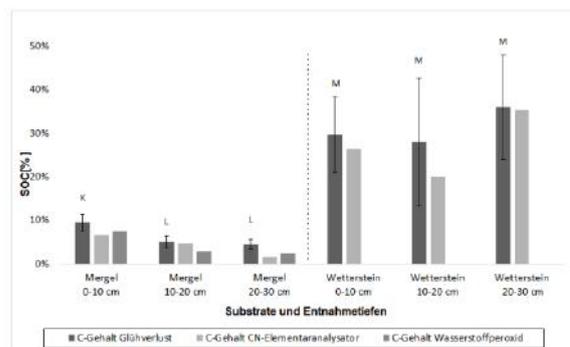


Abb.5: Gegenüberstellung der SOC-Gehalte [C %] ermittelt durch drei unterschiedliche Methoden. Fehlerindikatoren entsprechen der Standardabweichung. Die Resultate der Varianzanalyse beziehen sich auf Messung durch Glühverlust. Signifikante ($p > 0,05$) Unterschiede sind durch unterschiedliche Buchstaben über den Mittelwerten der Messungen dargestellt, getestet über die einzelnen Tiefenstufen, separat für beide Ausgangssubstrate (unveröffentlicht).

Ausblick

Im Kontext des Klimawandels ist den Böden und der räumlichen Verteilung von bodentragenden Flächen in den Alpen eine zentrale Bedeutung beizumessen – nicht nur hinsichtlich der zukünftigen pedogenetischen Entwicklung, sondern vor allem auch im Hinblick auf den alpinen Wasserhaushalt. Da sich die Wasserspeicherung in der Phytomasse höhenbedingt reduziert und die Retention von Wasser in den Schneedecken aufgrund des Klimawandels zunehmend unsicherer wird, kommt den bodentragenden Flächen auch durch ihr hydrologisches Speicherpotential eine große Bedeutung zu. Die Funktion des Bodens als Retentionskörper im Wasserhaushalt wird hierbei besonders im Skalenbereich kleiner alpiner Einzugsgebiete relevant, weil er als Zwischenspeicher bei der Abflussbildung eine äußerst wichtige Schlüsselstellung einnimmt. Allerdings wurden die bodentragenden Flächen (hoch-)alpiner Lagen in diesem Kontext bisher unzureichend berücksichtigt. Für eine quantitative Abschätzung des Wasserhaushaltes alpiner Einzugsgebiete ist die bodenhydrologische Kenntnis aus den beitragenden Flächen aber von elementarer Bedeutung. Diese Fragestellung soll im Rahmen intendierter Forschungsvorhaben für das Zugspitzplatt genauer untersucht werden.

Literatur

Credner, B., Hüttl, C. und Rögner, K.: The formation and distribution of soils and vegetation at the Zugspitzplatt (Bavaria, Germany) related to climate, aspect and geomorphology. *Ecologie*, 29 (1-2), 63-65, 1998.

Grashey-Jansen, S., Korch, O., Beck, C., Friedmann, A., Bernhard, R. und Dubitzky, C.: Aeolian influenced soil sites in consideration of atmospheric circulation types – a case study in the alpine zone of the Zugspitzplatt (Northern Calcareous Alps, Germany). *Journal of Geology, Agriculture and Environmental Sciences*, 2 (4), 11-19, 2014.

Hüttl, C.: The influence of different soil types and associations of vegetation on limestone solution in a high-mountainous region (Zugspitzplatt, Wettersteingebirge, Germany). *Ecologie*, 29 (1-2), 83-87, 1997.

Küfmann, C.: Soil types and eolian dust in high-mountainous karst of the Northern Calcareous Alps (Zugspitzplatt, Wetterstein Mountains, Germany). *Catena*, 53, 211-227, 2003.

Küfmann, C.: Are Cambisols in Alpine Karst Autochthonous or Eolian in Origin? *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 40 (3), 506-518, 2008.

AUSWIRKUNGEN DER TÄGLICHEN CHRONISCH INTERMITTIERENDEN HYPOBAREN HYPOXIE AUF DEN LUNGENKREISLAUF

JEREMIAS GÖTSCHKE^{1,2}, PONTUS MERTSCH^{1,2}, NIKOLAUS KNEIDINGER^{1,2}, DIEGO KAUFFMANN-GUERRERO^{1,2}, JÜRGEN BEHR^{1,2,3}, RUDOLF MARIA HUBER^{1,2}, FRANK REICHENBERGER^{2,3}, KATRIN MILGER^{1,2}

¹MEDIZINISCHE KLINIK V, LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT, MARCHIONINISTRASSE 15, 81377 MÜNCHEN

²COMPREHENSIVE PNEUMOLOGY CENTER (CPC-M), MITGLIED DES DEUTSCHEN ZENTRUMS FÜR LUNGENFORSCHUNG (DZL)

³ASKLEPIOS FACHKLINIKEN MÜNCHEN GAUTING

E MAIL: JEREMIAS.GÖTSCHKE@MED.UNI-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Die chronische Hypoxie führt zu einem chronischen Anstieg des Lungenarteriendrucks. Mitarbeiter der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) sind durch ihre Arbeit in der Höhe einer chronisch intermittierenden Hypoxie ausgesetzt. Es ist nicht bekannt wie sich diese auf den Lungenkreislauf auswirkt. Daher wurden Mitarbeiter der UFS, sowie Kontrollprobanden, welche im Flachland arbeiten, hinsichtlich ihrer Lungenfunktion und des Lungenarteriendrucks in Ruhe sowie unter Belastung, im Flachland sowie in der Höhe, untersucht. Es fanden sich keine Hinweise auf eine chronische Erhöhung des Lungenarteriendrucks.

Abstract Chronic hypoxia leads to a chronic increase in pulmonary arterial pressure. Because of their work at high altitude, the staff of the environmental station Schneefernerhaus (UFS) are exposed to chronic intermittent hypoxia (CIH). The consequences of this exposure on the pulmonary circulation are unclear. Thus, the staff of the UFS and matched control subjects who work in lowland were studied concerning their lung function and pulmonary arterial pressure at rest and during exercise, at lowland and at high altitude. Here we found no signs of a chronic increase in pulmonary artery pressure in subjects exposed to CIH.

Hintergrund

Die akute Höhenexposition führt zu einem Anstieg des Lungenarteriendrucks durch die hypoxische Vasokonstriktion (Euler-Liljestrand-Reflex). Eine chronische Höhenexposition mit Hypoxie führt zu Umbauprozessen in den Lungenarterien mit Verdickung der Intima, Media und Adventitia und Einengung des Lumens, wodurch eine persistierende Erhöhung des Lungenarteriendrucks resultiert. Diese bleibt auch nach Rückkehr in die Normoxie für einen längeren Zeitraum bestehen und kann zudem Umbauprozesse der rechtsseitigen Herzhöhlen bedingen (wilkins et al., 2015). In letzter Zeit wurde Interesse für die chronisch intermittierende hypobare Hypoxie (CIHH) geweckt, da die Anzahl der Menschen, die in der Höhe arbeiten aber im Tiefland wohnen, zunimmt. Betroffen sind hiervon u. a. Mitarbeiter der Tourismusbranche wie z. B. Bergbahnen, Berghütten und Gipfelrestaurants, aber auch Mitarbeiter der UFS. Jedoch sind die Auswirkungen einer solchen täglichen chronisch intermittierenden hypobaren Hypoxie auf den Lungenkreislauf nicht bekannt.

Methoden

In unsere Studie wurden acht gesunde Mitarbeiter (vier Männer und vier Frauen) eingeschlossen, die jeden Werktag für 8-9 h in einer Höhe von ca. 2600 m ü. NN arbeiten, jedoch

im Tiefland leben und schlafen. Diese werden im folgenden CIHH-Probanden genannt. Zudem wurden acht gesunde Kontrollprobanden rekrutiert, welche den Mitarbeitern in Basischarakteristika entsprachen, jedoch im Flachland arbeiten, leben und schlafen. Wir führten Basismessungen inklusive Lungenfunktionstests mit Diffusion, Echokardiographie, Blutgasanalyse und Blutlaboruntersuchungen im Tiefland in München, 530 m ü. NN durch. Zudem wurde eine Fahrradergometerbelastung mit Belastungsechokardiographie und Sauerstoffsättigungsmessung in München durchgeführt.

Außerdem wurden alle Probanden in der UFS, 2650 m ü. NN untersucht. Die UFS wurde ohne Anstrengung mit Hilfe der Seilbahn erreicht. In der Höhe wurden Blutlaboruntersuchungen, eine Echokardiographie und Blutgasanalyse in Ruhe, sowie eine Fahrradbelastung mit Echokardiographie und Sauerstoffsättigungsmessung durchgeführt.

Ergebnisse

Die Basischarakteristika inklusive Alter, Geschlecht, Körpermasseindex, sportliche Aktivität und Vorerkrankungen waren in den CIHH-Probanden und den Kontrollprobanden gleich. Die Dauer der CIHH betrug im Median 3,5 Jahre (min. 2,5 Jahre, max. 20 Jahre). Die Lungenfunktionstests im Tiefland inklusive Diffusionsmessungen waren bei allen Probanden im Normbereich und nicht unterschiedlich zwischen den Gruppen. Der Hämoglobinwert war in CIHH-Probanden deutlich höher als in den Kontrollen. Die Basis-Echokardiographie zeigte normal dimensionierte rechtsseitige und linksseitige Herzhöhlen mit normaler Funktion und fehlenden Krankheitszeichen in allen Probanden. Die Rechtsherzfunktion gemessen anhand der TAPSE (Tricuspid annular plane systolic excursion) war in beiden Gruppen ähnlich. Die Ruheblutgasanalyse sowohl im Tiefland als

auch in der Höhe zeigte einen signifikant niedrigeren Kohlendioxidpartialdruck (pCO_2) in CIHH-Probanden verglichen mit den Kontrollprobanden. Der echokardiographisch gemessene systolische Pulmonalarterien- druck (sPAP) in Ruhe war in beiden Gruppen gleich. Jedoch war der sPAP unter Belastung sowohl im Tiefland als auch in der Höhe in CIHH-Probanden signifikant niedriger als in den Kontrollen (Abb. 1), während die Sauerstoffsättigung (SpO_2) signifikant höher war.

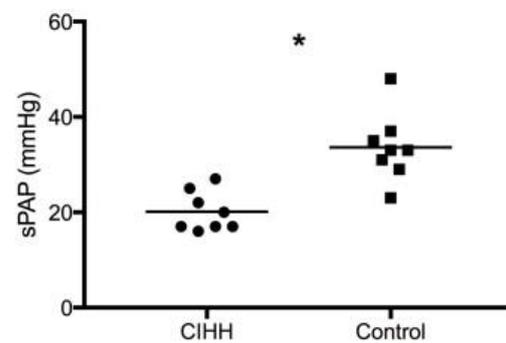


Abb.: sPAP unter Belastung (75W) in hypobarer Hypoxie. Der sPAP war signifikant niedriger in der CIHH-Gruppe (t-test). CIHH: Chronisch intermittierende hypobare Hypoxie

Schlussfolgerung

Bei Probanden, die einer chronisch intermittierenden hypobaren Hypoxie ausgesetzt sind, zeigte sich kein chronisch erhöhter Lungenarterien- druck und keine Zeichen von Umbauprozessen in den Lungengefäßen oder rechtsseitigen Herzhöhlen. Interessanterweise, war der sPAP unter Belastung in der Höhe und im Tiefland bei den CIHH- Probanden sogar niedriger als in den Kontrollen. Grund hierfür könnte eine stärker ausgeprägte Hyperventilation als Anpassungsmechanismus gegenüber der CIHH sein.

Literatur

Wilkins, M. R., Ghofrani, H.-A., Weissmann, N., et al.: Pathophysiology and Treatment of High-Altitude Pulmonary Vascular Disease. *Circulation* 2015; 131: 582–590. 2015.

WAHRNEHMUNG DES KLIMAWANDELS BEI PATIENTEN MIT CHRONISCHEN LUNGENERKRANKUNGEN

JEREMIAS GÖTSCHKE¹, PONTUS MERTSCH¹, MICHAEL BISCHOF², NIKOLAUS KNEIDINGER¹, SANDHYA MATTHES¹, ELLEN D RENNER^{3,4,5}, KONRAD SCHULTZ⁶, CLAUDIA TRIDL-HOFFMANN^{3,4}, HANS-WERNER DUCHNA^{3,5}, JÜRGEN BEHR^{1,7}, JÜRGEN SCHMUDE², RUDOLF MARIA(IYXÖT& BW HUBER¹, KATRIN MILGER¹

¹MEDIZINISCHE KLINIK V, LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT, MARCHIONINISTRASSE 15, 81377 MÜNCHEN

²LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT, LEHRSTUHL FÜR WIRTSCHAFTSGEOGRAPHIE UND TOURISMUSFORSCHUNG

³CHRISTINE KÜHNE - CENTER FOR ALLERGY RESEARCH AND EDUCATION, CK-CARE, DAVOS, SCHWEIZ

⁴LEHRSTUHL UND INSTITUT FÜR UMWELTMEDIZIN, UNIKA-T, AUGSBURG, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN UND HELMHOLTZ ZENTRUM MÜNCHEN

⁵HOCHGEBIRGSKLINIK DAVOS, DAVOS, SCHWEIZ

⁶KLINIK BAD REICHENHALL DER DEUTSCHEN RENTENVERSICHERUNG BAYERN SÜD, BAD REICHENHALL

⁷ASKLEPIOS FACHKLINIKEN MÜNCHEN GAUTING

E MAIL: JEREMIAS.GÖTSCHKE@MED.UNI-MUENCHEN.DE

Zusammenfassung: Der Klimawandel wirkt sich auf die menschliche Gesundheit aus. Patienten mit Lungenerkrankungen sind diesbezüglich besonders gefährdet. Die subjektive Wahrnehmung der Patienten und ihre Reaktion auf die Umweltveränderungen wurden bislang nicht untersucht. Wir befragten 172 Patienten mit Lungenerkrankung, die eine Rehabilitationsmaßnahme durchliefen, sowie 832 gesunde Touristen in der Alpenregion zu ihrer Wahrnehmung vom Klimawandel betroffen zu sein. Patienten zeigten ein stärkeres Bewusstsein bzgl. gesundheitsbezogener Folgen des Klimawandels. Jedoch wurde das Risiko von Hitzetagen unterschätzt.

Abstrac: Climate change affects human health. Patients with chronic lung disease are particularly vulnerable to the involved environmental alterations. However, their subjective perception and reactions to these alterations remain unknown. Thus, we surveyed 172 adult patients undergoing pulmonary rehabilitation and 832 healthy tour-

ists in the alpine region about their perception of being affected by climate change. Overall we found that patients are more sensitive to health-related consequences of climate change. Yet, the hazard of heat-days seems underestimated.

Ergebnisse

Der aktuelle Klimawandel beeinflusst bereits die menschliche Gesundheit und es wird vorhergesagt, dass die Folgen in den nächsten Jahrzehnten weiter zunehmen (WHO, 2014). Da wir ca. 10.000 Liter der umgebenden Luft pro Tag atmen, ist die Lunge ständig der Umwelt ausgesetzt und daher eines der ersten Organe, das von Veränderungen betroffen ist.

Die Prävalenz von Lungenerkrankungen wie z. B. Asthma oder COPD (chronisch obstructive Lungenerkrankung) ist weltweit steigend (WHO, 2013). Patienten mit solchen Lungenerkrankungen sind besonders anfällig gegenüber Umweltveränderungen, die mit dem Klimawandel einhergehen. Beispielsweise ist die Sterblichkeitsrate bei Hitzewellen

unter Patienten mit chronischen Lungenerkrankungen im Vergleich zur Allgemeinbevölkerung erhöht (Zanobetti et al., 2012). Die subjektive Wahrnehmung von Patienten mit chronischer Lungenerkrankung und ihre Reaktion auf die Umweltveränderungen wurden bislang nicht untersucht. Daher befragten wir Patienten mit Lungenerkrankung, die eine Rehabilitationsmaßnahme durchliefen, sowie gesunde Touristen in der Alpenregion zu ihrer Wahrnehmung vom Klimawandel betroffen zu sein und ihre potentielle Reaktion auf spezifische Folgen. Es wurden 172 Patienten und 832 Touristen eingeschlossen. Der Patientenfragebogen enthielt zudem den COPD Assessment Test (CAT) um die Schwere der Krankheitssymptome einordnen zu können. Die meisten Patienten hatten als Grunderkrankung Asthma (74 %) oder COPD (9 %) oder beides (11 %). 6 % gaben an, an einer anderen Lungenerkrankung zu leiden. Generell fühlen Patienten und Touristen sich gleichermaßen vom Klimawandel betroffen, jedoch geben diejenigen mit Allergien in beiden Gruppen eine stärkere Betroffenheit an ($p=0,04$). Die Schwere der Symptome, gemessen anhand des CAT korreliert mit der Stärke der Betroffenheit ($p<0,01$). Die Patienten stören sich am stärksten an der steigenden Anzahl an Stechmücken und Zecken,

dem erhöhten Allergierisiko sowie dem vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen wie Gewitterstürmen, während Touristen sich weniger an diesen Faktoren stören (Abb. 1). Die steigende Anzahl an Hitzetagen beunruhigt beide Gruppen nur wenig. Insgesamt stören sich Patienten stärker an gesundheitsbezogenen Folgen des Klimawandels als Touristen und würden diese auch stärker meiden. Jedoch unterschätzen sie das Risiko von Hitzetagen und diesbezüglich sollten die Patienten besser informiert werden.

Literatur

WHO: Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. ISBN 978 924 150769 1. 2014

WHO.: Global surveillance, prevention and control of chronic respiratory diseases - A comprehensive approach. WHO Press, 2013.

Zanobetti, A., O'Neill, M. S., Gronlund, C.J. und Schwartz, J.D.: Summer temperature variability and long-term survival among elderly people with chronic disease. Proc Natl Acad Sci U S A. 2012;109(17):6608-6613. doi:10.1073/pnas.1113070109, 2012

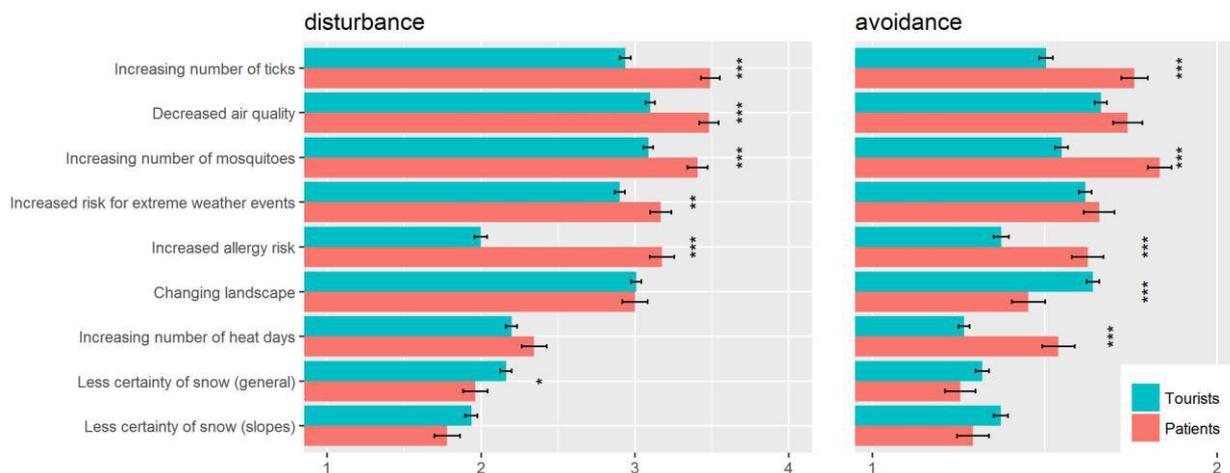


Abb. 1: Reaktion von Patienten und Touristen auf spezifische Klimaeinflüsse. Graduierung Stören (Disturbance): 1 = nicht störend bis 4 = sehr störend; Meiden (Avoid) 1 = meiden bis 2 = nicht meiden