

# Wissenschaftliche Resultate 2021/2022





Umwelt Forschungsstation Schneefernerhaus

Nummer o7 Oktober 2023

Herausgeber:Umweltforschungsstation Schneefernerhaus GmbH<br/>Zugspitze 5; 82475 ZugspitzeInternet:www.schneefernerhaus.deDruck:StMUVStand:September 2023

Diese Druckschrift wird kostenios im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Druckschrift nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteianahme 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 urbeberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Broschüre wird kostenlos abgegeben, jede entgelitliche 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 Corona-Pandemie konnte Forschung und Entwicklung in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus nicht aufhalten. In 15 Beiträgen berichten Forscherinnen und Forscher über ihre Projekte. Die Arbeiten decken dabei eine breite fachliche Palette ab. In dieser Ausgabe erzählen Forscherinnen und Forscher über ihre Arbeiten, die die Entwicklung meteorologischer Größen an der Station selbst und am Rand zum Weltraum beschreiben. Auch über einige unmittelbare Folgen der Klimaveränderung, von der Entwicklung des Permafrostes im Felsen, dem Wassergehalt im Karstkörper der Zugspitze bis hin zu Entwicklungen von Extremwettersituationen infolge sich verändernder großräumiger atmosphärischer Strömungen, ist in dieser Ausgabe die Rede. Die Auswirkung der sich verändernden Umweltbedingungen auf die menschliche Gesundheit ist ein weiteres Thema in der Umweltforschungsstation. So können Sie über den Einfluss von Pflanzenschutzmittelrückständen, Pollen- und Sporenkonzentrationen auf das Wohlbefinden des Menschen lesen und Sie erfahren, wie satellitenbasierte Messungen der Luftqualität dazu beitragen, das zusätzliche Gesundheitsrisiko im Alpenraum durch sogenannte Umweltstressoren wie etwa Luftschadstoffe zu quantifizieren. Zudem gibt es über ein sehr spezielles Ereignis einen Beitrag: In den Berichtszeitraum fiel der gewaltige Ausbruch des Vulkans Hunga Tonga-Hunga Ha'apai der in der UFS registriert werden konnte. Ich wünsche Ihnen viel Freude bei der Lektüre der Aufsätze und verbleibe

mit den besten Grüßen

Ihr

likel 2.m

Prof. Dr. Michael Bittner Wissenschaftlicher Koordinator der UFS

# INHALTSVERZEICHNIS

# **A**BKÜRZUNGSVERZEICHNIS

1.	Mesopausen-Temperaturen über Europa 2010 bis 2022 und der Einfluss der Sonne	7
	Carsten Schmidt, Lisa Küchelbacher, Sabine Wüst, Michael Bittner	
2.	Strahlungsenergieflussdichten des OH-Nachthimmelleuchtens Anna Moser, Carsten Schmidt, Sabine Wüst, Michael Bittner	10
3.	OH- und O2-Airglow-Intensität des Instruments BAIER von 2014 bis 2022 Patrick Hannawald, Carsten Schmidt, Till Rehm, Sabine Wüst, Michael Bittner	13
4.	Planetare Wellen und Extremtemperaturereignisse auf der Zugspitze Bianca Frischholz, Lisa Küchelbacher, Sabine Wüst, Michael Bittner	17
5.	Projekt AlpAirEO: Atmosphärische Risikofaktoren für die Gesundheit im Alpenraum Lorenza Gilardi, Frank Baier, Thilo Erbertseder, Jana Handschuh, Oleg Goussev	20
6.	Hinweise auf Druckwellen ausgelöst durch die Eruption des Hunga Tonga Ha'Apai auch in der mittleren Atmosphäre über Europa Leon Knez, Carsten Schmidt, Patrick Hannawald, Sabine Wüst, Michael Bittner	24
7.	Pflanzenschutzmittelrückstände in der Deposition an der UFS Uwe Kunkel, Katharina Willemeit, Margit Krapp	27
8.	Vergleichende Untersuchung verschiedener Lufttemperatur- Messungen an der UFS Klaus Hager, Jucundus Jacobeit	31
9.	<b>Untersuchungen zur Hydrologie des Zugspitzgebietes</b> Karl-Friedrich-Wetzel, Franziska Koch, Christian Voigt	34
10.	Umfassendes Monitoring der Permafrostverbreitung – und Entwicklung am westlichen Zugspitzgrat Riccardo Scandroglio, Maike Offer, Lukas Lucks, Robert Delleske, Markus Keuschnik, Inga Beck, Till Rehm, Johannes Leinauer, Michael Krautblatter	39

11	Solare UV-Strahlung – Vermessung der spektralen Bestrahlungsstärke am Schneefernerhaus Sebastian Lorenz, Markus Laufmann, Ingo Mayer und Daniela Weiskopf	44
12	LIDAR-Fernsondierung der Atmosphäre am Schneefernerhaus Hannes Vogelmann	49
13	KlimaAlps – Klimawandel sichtbar machen Inga Beck, Cornelia Baumann	52
14	50 Jahre CO2 Messungen an den Stationen Schauinsland und Westerland Cedric Couret, Frank Meinhardt, Bryan Hellack, Antje Hoheisel, Martina Schmidt	55
15	Pollen – und Sporenkonzentration in alpiner Umgebung und allergische Symptome Maria P. Plaza, Athanasios Damialis, Daniela Bayr, Franziska Kolek, Stefanie Gilles, Claudia Traidl-Hoffmann	57

# **A**BKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ACTRIS AlpAirEO	Aerosols, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure Air Quality and Health in the Alpine Region in the context of the initiative "EO
I -	science for society".
AlpEnDAC	Alpine Environmental Data Analysis Centre
BAIER	Bavarian Airglow ImagER
BioClis	Bioklimatisches Informationssystem
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BVLOS	Bevond Visual Line Of Sight
BOKU Wien	Universität für Bodenkultur Wien
CAMS	Copernicus Atmospheric Service
DAV	Deutscher Albenverein
DBU	Deutsche Rundesstiftung Limwelt
DED	Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum
	Deutsches Zentrum für Luft- und Paumfahrt
	Deutscher Wetterdienst
	European Centre for Medium, Pange Weather Forecasts
	European Centre for Medion-Range Weather Forecasis
	Erychen wirksame bestramungsstarke
	Fernerkondongsdatenzentrom des DER in Oberprahemoren
ESA	European Space Agency
EZG	Einzugsgebiet
FIRMUS	Far-Infrared Radiation Mobile Observation System
GAW	Global Atmosphere Watch
GFZ	Geotorschungszentrum Potsdam
GNSS	Globale Navigationssatellitensysteme
GRIPS	GRound-based Infrared P-branch Spectrometer
GUF	Global Urban Footprint
НТНН	Hunga Tonga Hunga-Ha'apai
ICOS	Integrated Carbon Observation System
IMK-IFU	Institute of Meteorology and Climate Research
	Atmospheric Environmental Research
IWC	ice water content
LAU	Local Administrative Unit
LfU	Bayerische Landesamt für Umwelt
LIDAR	Light Dectection And Ranging
MPE	Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik
MLT	Mesosphere Lower Thermosphere
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NDACC	Network for the Detection of Atmospheric Composition Change
NDMC	Network for the Detection of Mesospheric Change
NetCDF	Network Common Data Form
ОН	Hydroxyl
PESPAT	Pan-European Study of Pesticides long-range Atmospheric Transport
PW	Planetare Wellen
POP	Persistent Organic Pollutants
DCM	Pflanzenschutzmittel
	Physikalisch Technischen Bundesanstalt
	Synthetic Aporture Dadar
	Standard Enthem Dasis
	Stallualu-Elythem-Dosis
STIVIUV	Bayerisches Staatsministerium für Omweit und Verbraucherschutz
SWE	Schnee-Wasser-Aquivalent
IHG	i reidhausgase
I U Munchen	I echnische Universität Munchen
UFS	Umweltforschungsstation Schneefernerhaus
UIBK	Universität Innsbruck

UTCI	Universal Thermal Climate Index
UV	Ultraviolett
UVI	UV Index
VAO	Virtual Alpine Observatory
ZUGOG	Zugspitze Geodynamic Observatory Germany

# MESOPAUSEN-TEMPERATUREN ÜBER EUROPA 2010-2022 UND DER EINFLUSS DER SONNE

CARSTEN SCHMIDT<sup>1</sup>, LISA KÜCHELBACHER<sup>1</sup>, SABINE WÜST<sup>1</sup> UND MICHAEL BITTNER<sup>1, 2</sup> <sup>1</sup>DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR), DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM (DFD), 82234 OBERPFAFFENHOFEN <sup>2</sup>UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, 86159 AUGSBURG E-MAIL: CARSTEN.SCHMIDT@DLR.DE

Zusammenfassung: Seit 2009 erfasst das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luftund Raumfahrt (DLR) von der Umweltforschungsstation "Schneefernerhaus" (UFS) unterbrechungsfrei das sog. OH-Nachtleuchten (engl.: *airglow*) aus der Mesosphäre / unteren Thermosphäre (engl.: MLT-region, Mesosphere-Lower Thermosphere) in ca. 86-87 km Höhe.

In den folgenden Jahren wurden weitere Stationen in Betrieb genommen. Es zeigt sich, dass die solare Einstrahlung einen starken Einfluss auf die OH-Temperaturen ausübt. Allerdings ist die Wechselwirkung mit dem solaren Zyklus an allen Orten unterschiedlich stark ausgeprägt.

Abstract: Since 2009 the German Remote Sensing Data Center (DFD) of the German Aerospace Center (DLR) has been observing the OH airglow region from the environmental research station "Schneefernerhaus" (UFS) without any interruption. This faint luminosity originates in the Mesosphere-Lower Thermosphere (MLT) region at approximately 86-87 km height.

More sites were put into operation during the following years. It is now evident that solar radiation exerts a strong forcing on OH temperatures. However, this relation to

# the solar cycle varies in intensity between the individual sites.

Das OH-Leuchten in der Mesopausenregion hat seinen Ursprung in einer exothermen chemischen Reaktion, bei der ein sog. Hydroxyl-Molekül (OH) produziert wird. Die freigesetzte Energie wird dabei überwiegend auf das Hydroxyl-Molekül übertragen, das diese Energie nach kurzer Zeit hauptsächlich in Form infraroter Strahlung wieder abgibt. Aus den so entstehenden Emissionsspektren des OH-Moleküls kann auf die Umgebungstemperatur in 86-87 km Höhe geschlossen werden (vgl. Schmidt et al. (2013) und Wüst et al. (2017)).

Dieser Höhenbereich ist von entscheidender Bedeutung beim Verständnis der



Abb.1: Lage der Gesichtsfelder der betrachteten Stationen: UFS (blau), Wuppertal (WUP, rot), Observatoire de Haute-Provence (OHP, rot), Georgian National Astronomical Observatory (ABA, rot), Catania (CAT, rot). Weitere operationelle Stationen, deren Zeitreihen aktuell noch nicht lang genug sind, befinden sich in der Nähe des Al-

penraums (grau); Kartenmaterial: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Ec kert4.jpg [CC0, 18.1.2023].

Energiebilanz der Atmosphäre. Der Einfluss der solaren Aktivität auf die mittleren Temperaturen ist stärker, Temperaturänderungen aufgrund des höheren CO2-Gehalts der Atmosphäre sollten schneller erfolgen. Eine genaue Quantifizierung beider Einflüsse ist daher von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der langfristigen Entwicklung.

Erhebliche Diskrepanzen zwischen den diesbezüglichen Messungen an unterschiedlichen Orten führten nach Gründung des NDMC (Network for the Detection of Mesospheric Change) zu der Neuentwicklung der GRIPS (Ground-based Infrared P-branch Spectrometer) Instrumente durch das DLR. Im Anschluss wurden viele Stationen mit diesen identischen Spektrometern ausgestattet, angefangen 2009 bei der UFS – der Referenzstation des NDMC. So werden nun an verschiedenen Orten Daten mit identischen Messgeräten erhoben, die wiederum mit identischen Methoden untersucht werden können (s. Abb. 1). Neben der UFS liegen nun an weiteren Stationen Zeitreihen ausreichender Länge vor, um erste Analysen durchzuführen.

Abbildung 2 zeigt die entsprechenden Zeitreihen von fünf ausgewählten Stationen. Sofort fällt die Korrelation mit dem solaren Zyklus ins Auge. Am deutlichsten zeigt sie sich an der UFS, da hier der solare Zyklus 24 (2008 -2019) fast vollständig abgedeckt wird. Die Stationen in OHP, ABA und CAT, die ihn nicht mehr ganz erfassen, weisen zumindest die Jahre 2012 (CAT) bzw. 2014 (OHP, ABA) als zwei der wärmsten aus - mit einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Rückgang der Temperaturen bis 2021. Einzig an der am nördlichsten gelegenen Station WUP scheinen andere dynamische Prozesse noch eine Rolle zu spielen. Dies wird auch daran erkennbar, dass die Konfidenzintervalle hier einen größeren Bereich abdecken: sie berechnen sich statistisch aus der generellen



Abb.2: Jahresmittelwerte der OH-Temperatur an verschiedenen Standorten. Am deutlichsten zeigt sich die Korrelation von solarer Aktivität und OH-Temperatur am Schneefernerhaus (a). Die meisten Stationen zeigten seit 2014 einen Rückgang der Temperaturen, der in 2022 überall zu einem abrupten Ende kam (c-d), für Wuppertal (b) lässt sich aufgrund der begrenzten Länge der Zeitreihe noch keine Aussage treffen, der Anstieg in 2022 findet jedoch auch hier statt.

jeweiligen Station. Eine genaue Analyse wird zurzeit noch dadurch erschwert, dass die Messungen dort erst im Jahr 2015 starten.

Aus den Daten des Zyklus 24 konnte für vier Stationen der Einfluss der solaren Einstrahlung mit 6,3 K±0,7 K/100sfu (sfu: *solar flux unit*) für UFS, 4,0 K±1,0 K/100sfu (OHP), 4,5 K±1,0 K/100sfu (ABA) und

# 4,7 K±0,9 K/100sfu (CAT) abgeschätzt werden (Stand: Ende 2021).

Basierend auf diesen Ergebnissen und zusammen mit Kenntnis der Sonnenaktivität im Jahr 2022 – hier wurden Werte erreicht, die in den letzten 15 Jahren nur in 2014 überschritten wurden - konnte so ein wahrscheinlicher Anstieg der OH-Temperaturen von 2-3 K für 2022 prognostiziert werden. An den mitteleuropäischen Stationen UFS, WUP, OHP wie auch an CAT in Südeuropa stimmen die tatsächlich gemessen Werte gut mit dieser Prognose überein (UFS: +2,4 K (±1,2 K) / WUP: +3,0 K (±1,4 K) / OHP: +2,5 K (±1,5 K) / CAT: +2,7 K (±0,8 K)). Dahingegen bleibt der Anstieg der Temperaturen mit lediglich ca. +1,0 K ( $\pm 0,9$  K) in ABA deutlich hinter den Erwartungen zurück.

Ein weiteres interessantes Phänomen besteht in der Tatsache, dass die Temperaturen an der UFS dem solaren Zyklus offenbar besonders gut folgen, ab 2014 mit einem steilen Rückgang innerhalb von drei Jahren, um dann über fünf Jahre nahezu konstant zu bleiben. Wohingegen in CAT ab 2014 über acht Jahre ein mehr oder weniger stetiger Rückgang von o,5 K/Jahr zu beobachten ist, gefolgt von einem umso steileren Anstieg in 2022.

Diese einfachen Beispiele verdeutlichen, dass bezüglich der langfristigen Temperaturänderungen noch einige offenen Fragen bestehen, die mithilfe dieser und weiterer Messungen in den kommenden Jahren hoffentlich zuverlässig beantwortet werden können.

# Literatur

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

Wüst, S., Bittner, M., Yee, J.-H., Mlynczak M.G., Russel, J.M. III, 2017. Variability of the Brunt– Väisälä frequency at the OH\* layer height. AMT

# 10, 4895-4903, <u>https://doi.org/10.5194/amt-10-</u> 4895-2017.

#### Danksagung

Für die hervorragende Betreuung der Instrumente gilt unser ausdrücklicher Dank dem Personal der UFS, allen voran Herrn Dr. Till Rehm, ohne dessen Engagement das hohe Qualitätsniveau der UFS-Zeitreihen kaum zu erreichen wäre.

Die Messungen wurden in den vergangenen Jahren durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz über die Projekte GUDRUN (71b-U8729-2003/125-13), GRIPS3 Back-Up (2009/40051), BHEA (TLK01U-49580), LUDWIG (TUS01UFS-67093), VoCaS (TKP01KPB-70581) and AlpEn-DAC (TUS01UFS-72184) finanziert.

Die Daten des solaren Zyklus stammen vom Goddard Space Flight Center / Space Physics Data Facility, GSFC/SPDF OMNIWeb interface (https://omniweb.gsfc.nasa.gov, Zugriff 16.1.2023).

# STRAHLUNGSENERGIEFLUSSDICHTEN DES OH-NACHTHIMMELLEUCHTENS

Anna Moser<sup>1, 2</sup>, Carsten Schmidt<sup>1</sup>, Sabine Wüst<sup>1</sup>, Michael Bittner<sup>1, 2</sup> <sup>1</sup>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), 82234 Oberpfaffenhofen <sup>2</sup>Universität Augsburg, Institut für Physik, 86159 Augsburg

E-MAIL: ANNA.MOSER@DLR.DE

Zusammenfassung: Seit 2009 erfasst das Fernerkundungsdatenzentrum Deutsche (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) von der Umweltforschungsstation "Schneefernerhaus" (UFS) aus das sog. Hydroxyl (OH)-Nachtleuchten (engl.: airglow) aus der oberen Mesosphäre / untere Thermosphäre in ca. 86-87 km Höhe. Nach aufwendiger Kalibrierung und Qualitätssicherung liegen erste Ergebnisse zur Langzeitentwicklung der **OH-Airglow-**Strahlung vor. Dies wird in zukünftigen Studien verwendet, um auf die Konzentrationen von atomarem Sauerstoff zu schließen, was nicht nur für die Produktion von OH benötigt wird, sondern auch ein wichtiger Energiespeicher in der mittleren Atmosphäre ist.

Abstract: Since 2009 the German Remote Sensing Data Center (DFD) of the German Aerospace Center (DLR) has been observing the OH airglow region from the environmental research station "Schneefernerhaus" (UFS). This faint luminosity originates in the Mesosphere Lower Thermosphere (MLT) region at approximately 86-87 km height. After complex calibration and quality assurance, first results concerning the long-term development of the OH airglow radiance are obtained. This will be used in future studies to infer the concentrations of atomic oxygen, which is not only required for the production of OH but also an important energy reservoir in the middle atmosphere.

Das Nachthimmelleuchten im nahen Infrarot entsteht bei chemischen Prozessen in einer Höhe von ca. 86-87 km (Wüst et al., 2017). Atome bzw. Moleküle werden tagsüber durch die Sonnenstrahlung im UV-Bereich ionisiert, dissoziiert oder energetisch angeregt.

$$\begin{array}{rcl} O_2 \ + \ h\nu \ \rightarrow \ O \ + \ O \\ O_3 \ + \ h\nu \ \rightarrow \ O \ + \ O_2 \end{array}$$
$$\begin{array}{rcl} O \ + \ O_2 \ + \ M \ \rightarrow \ O_3 \ + \ M, \\ H \ + \ O_3 \ & \rightarrow \ OH^* \ + \ O_2, \end{array}$$

So wird in Höhen über etwa 80 km vermehrt atomarer Sauerstoff (O) produziert, der nachfolgend wiederum Ozon (O<sub>3</sub>) bildet. Dieses reagiert mit atomarem Wasserstoff (H) zu molekularem Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und einem angeregten Hydroxyl-Molekül (OH) (vgl. Bates und Nicolet, 1950). Bei diesem Prozess wird Infrarotstrahlung freigesetzt. Das OH-Nachthimmelleuchten wird seit 2010 an der UFS mit den beiden GRIPS-Instrumenten 7 und 8 gemessen (Schmidt, 2016 und Schmidt et al., 2013). Die Nutzung zweier Geräte dient unter anderem der Qualitätskontrolle. Bei einer Messkampagne 2017 wurden beide Instrumente in Kooperation mit der Physikalisch-Technischen-Bundesanstalt (PTB) neu kalibriert und auf die nationalen Standards der PTB zurückgeführt. Dadurch können erstmals OH-Strahlungsenergieflussdichten (im Folgenden kurz als Strahldichten bezeichnet) untersucht werden.



Abb.1: Die Nachtmittelwerte der Strahldichten des OH-Leuchtens (blaue Dreiecke) inkl. Varianz der Strahldichten im Verlauf einer Nacht (hellblau schraffiert) von Oktober 2010 bis Ende 2022. Die höchsten Werte werden im Winter und Sommer erreicht; dabei liegen die Wintermaxima systematisch höher als die Sommermaxima.

In Abbildung 1 ist der langfristige Verlauf der Nachtmittelwerte der von GRIPS 8 gemessenen Strahldichten (blaue Dreiecke) von 2010 bis Ende 2022 dargestellt. Ihre Unsicherheiten (hellblau schraffiert) wird überwiegend aus der Varianz der Strahldichten im Verlauf einer Nacht bestimmt

Sowohl im Winter als auch im Sommer bilden sich Maxima in den Strahldichten aus. Die Wintermaxima sind dabei systematisch stärker ausgeprägt als die Sommermaxima. Die Maxima sind maßgeblich auf die erhöhte Konzentration von atomarem Sauerstoff in der Atmosphäre zurückzuführen. Der Anstieg der Konzentration von O ist dabei in erster Linie auf vertikale Transportprozesse zurückzuführen, denn die Konzentration von O steigt mit zunehmender Höhe über der MLT stark an. Abwärts gerichtete Strömungen sind ein Kennzeichen der winterlichen MLT. Insofern ist die Ausbildung des sekundären Maximums im Sommer zunächst überraschend. Aktuelle Modellierungen von Grygalashvyly et al. (2021) zeigen jedoch, dass sich aufgrund der zonalen Struktur der Temperatur, O-Konzentration und Höhe der OH-Schicht in mittleren Breiten ein Sommermaximum ausbilden sollte. Erste weitere Analysen zeigen, dass die sekundären Sommermaxima besonders ab 2019 deutlich intensiver werden.

Dies wird derzeit noch weiter untersucht, offenbar korreliert der langfristige Verlauf der OH-Strahldichten mit der Änderung der solaren Einstrahlung. Erkennbar ist dies an den bis Ende 2015 erhöhten Werten – angedeutet durch die gestrichelten roten Linien –, die mit dem Maximum des solaren Zyklus 24 zusammenfallen.



Abb.2: Die kalibrierten Strahldichten des OH-Leuchtens für beide Instrumente GRIPS 7 (schwarz) und GRIPS 8 (blau) im Verlauf der Nacht vom 24. auf den 25.11.2016. Die Schwankungen der Strahldichten sind auf starke Wellenaktivität in der Atmosphäre zurückzuführen.

Im Jahr 2016 wurde eine der hellsten Nächte (bezogen auf den gesamten Beobachtungszeitraum) vom 24. auf den 25.11.2016 detektiert. Diese Nacht ist für beide Instrumente GRIPS 7 (schwarze Dreiecke) und GRIPS 8 (blaue Dreiecke) in Abbildung 2 im zeitlichen Verlauf dargestellt. Das Gesichtsfeld von GRIPS 7 ist zu diesem Zeitpunkt nicht deckungsgleich mit dem von GRIPS 8. Die Unterschiede der Messreihen beider Instrumente sind bedingt durch die unterschiedliche Ausrichtung der Geräte. Inwiefern die Helligkeit von der Aktivität kurzperiodischer Wellen abhängig ist, ist Gegenstand anstehender Untersuchungen. Wellenaktivität ist offenkundig in dieser Nacht präsent und ändert sich bereits auf den etwa 200 km zwischen den beiden Gesichtsfeldern.

Die Prozessierung und Qualitätssicherung der Daten erweist sich als aufwendig und herausfordernd, da die Instrumente ursprünglich nicht darauf ausgelegt worden waren, die Strahldichten zu erfassen.

Dennoch konnten bereits saisonale (Jahresund Habjahresgang) und langfristige (solarer Zyklus) Helligkeitsschwankungen des OH-Leuchtens nachgewiesen werden.

# Literatur

Bates, D. R. und Nicolet, M. 1950, "The Photochemistry of Atmospheric Water Vapor", Journal of Geophysical Research, Volume 55, Issue 3, doi: 10.1029/JZ055l003P00301.

Grygalashvyly et al. 2021, "Semi-Annual Variation of Excited Hydroxyl Emission at Mid-latitudes", Annales Geophysicae 39.1, S. 255-265, doi: 10.5194/angeo-39-255-2021

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

Schmidt, C. 2016, "Entwicklung eines Bodengebundenen Infrarotspektrometers für die zeitlich hochaufgelöste Beobachtung des OH-Leuchtens aus der Mesopausenregion", Dissertation, Universität Augsburg

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

# Danksagung

Für die hervorragende Betreuung der Instrumente gilt unser ausdrücklicher Dank dem Personal der UFS, allen voran Herrn Dr. Till Rehm, ohne dessen Engagement das hohe Qualitätsniveau der UFS-Zeitreihen kaum zu erreichen wäre.

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

# OH- UND O2-AIRGLOW-INTENSITÄT DES INSTRUMENTS BAIER VON 2014 BIS 2022

PATRICK HANNAWALD<sup>1</sup>, CARSTEN SCHMIDT<sup>1</sup>, TILL REHM<sup>3</sup>, SABINE WÜST<sup>1</sup>, MICHAEL BITTNER<sup>1,2</sup> <sup>1</sup> DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR), DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM (DFD), 82234 OBERPFAFFENHOFEN <sup>2</sup> UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, 86159 AUGSBURG <sup>3</sup> UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS GMBH, 82475 ZUGSPITZE 5 E-MAIL: PATRICK.HANNAWALD@DLR.DE

Zusammenfassung: Seit über acht Jahren erfasst die Kamera BAIER in der UFS zweidimensional aufgelöst die Helligkeit sowohl des OH- als auch des O2-Luftleuchtens (engl. airglow). Die Beobachtung dieser beiden Airglow-Schichten in ca. 86-87 km bzw. 94-95 km Höhe ermöglicht es, kontinuierlich Informationen aus diesen Höhenschichten zu erhalten. In diesem Artikel wird die Variabilität der Helligkeit der beiden Airglow-Schichten sowohl auf saisonalen Zeitskalen als auch auf Zeitskalen von Minuten und Stunden miteinander verglichen. Die Unterschiede zeigen gut die Auswirkungen der atmosphärischen Dynamik auf das Airglow und somit auf die Atmosphäre.

Abstract: The airglow imager BAIER at the UFS has been observing the OH- and O<sub>2</sub>airglow emission for more than eight years now. The two airglow layers located at 86-87 km and 94-95 km, respectively, allow continuous atmospheric observations at these altitudes. In this article, we present a comparison of the variability of both airglow species on seasonal time scales and also on time scales of minutes to hours. These differences reveal the influence of atmospheric dynamics on the atmosphere in this altitude regime. Als Airglow bezeichnet man das Luftleuchten in der mittleren Atmosphäre. Es entsteht als Folge von exothermen chemischen Reaktionen und geht auf verschiedene angeregte Atome oder Moleküle zurück. Hierzu zählen u.a. das Hydroxylmolekül (OH) und molekularer Sauerstoff (O<sub>2</sub>) (vgl. zum OH-Airglow etwa den Artikel von Moser et al. zu Strahlungsenergieflussdichten des OH in dieser Ausgabe des UFS-Berichts). Es kann vor allem nachts und vermehrt im nahinfraroten Spektralbereich beobachtet werden. Airglow tritt nur in einem verhältnismäßig konstanten und vertikal begrenzten Höhenbereich auf; man spricht deshalb auch von Airglow-Schichten. Sie unterliegen in ihrer Höhe u.a. jahreszeitlichen Änderungen von wenigen Kilometern (Wüst et al. 2017). Das OH-Airglow hat seine Schwerpunkthöhe in ca. 86-87 km, das O<sub>2</sub>-Airglow in ca. 94-95 km.

Die chemischen Vorgänge, welche zum Airglow führen, werden v.a. durch die Verfügbarkeit der Reaktionspartner (z.B. atomarem Sauerstoff) aber auch durch Druck und Temperatur verändert, was direkte Auswirkungen auf die beobachtete Intensität des Airglows hat. Atmosphärische Wellen, die sowohl die Verfügbarkeit der Reaktionspartner verändern, aber auch zu Druck- und Temperaturvariationen führen, können so in dieser Höhenschicht als Intensitätsvariationen im Airglow beobachtet werden. Airglow wird deshalb als sog. "Tracer" zur Untersuchung atmosphärischer Dynamik in dieser Höhenregion verwendet.

Das bildgebende Instrument BAIER (Bavarian Airglow Imager) auf der Zugspitze misst seit 2014 jede Nacht sowohl einige Emissionslinien des OH- als auch einen Übergang des O<sub>2</sub>-Airglows im Spektralbereich 715-930 nm bzw. bei 865 nm. Abb. 1 zeigt beispielhaft eine Aufnahme des OH-Airglows, aufgenommen mit BAIER. Es sind verschiedene Wellenstrukturen, darunter eine Welle im Zenit zu sehen. Neben den Strukturen ist auch der Sternenhintergrund und die Zugspitze zu erkennen. In der hier durchgeführten Auswertung werden nicht die vollen Bildinformationen betrachtet, sondern nur die Airglow-Intensität im Zenit. Die acht Jahre umfassende Zeitreihe der Zenit-Intensität ist in Abb. 2 in Form von Monatsmittelwerten dargestellt (von Juni 2014 bis Juni 2015 war das Instrument zeitweilig am DLR in Oberpfaffenhofen in Betrieb, welches etwa 150 km vom Schneefernerhaus entfernt ist).



Abb. 1: Eine Aufnahme des OH-Airglows beobachtet mit dem Instrument BAIER auf der UFS. In der Aufnahme sind verschiedene Wellenstrukturen, zumeist Schwerewellen, erkennbar, u.a. eine im Zenit. (Bild nicht nordweisend).

Es zeigt sich ein sehr deutlicher Jahresgang sowohl im  $O_2$ - (oberer Teil von Abb. 2) als auch OH-Airglow (unterer Teil von Abb. 2). Das Maximum der Intensität liegt hierbei sowohl bei OH als auch  $O_2$  jeweils im Winter, zumeist im Dezember oder Januar (in 2021 jedoch erst im Februar). Auffallend ist, dass die OH-Intensität im Jahr 2022 (gelb) in den Monaten April bis Juni gegenüber den Vorjahren leicht erhöht ist. Bei  $O_2$  ist die Intensität sogar beinahe das gesamte Jahr über höher als in den Vorjahren. Generell gibt es ein schwaches Sekundärmaximum im Juni, welches bei  $O_2$  etwas ausgeprägter ist als bei OH.

Für die beobachteten Spektralbereiche ist bekannt, dass die Intensität des OH-Airglows generell größer ist als jene des O<sub>2</sub>-Airglows. In Abb. 2 ist die relative Intensität der beiden Emissionen vergleichbar. Der Unterschied beträgt hier in etwa eine Größenordnung (ca. 200-400 relative Einheiten für OH im Vergleich zu ca. 15-30 relative Einheiten für O<sub>2</sub>).

Es gibt Hinweise in der Literatur, z.B. Le Texier et al. (1987) und Marsh et al. (2006), dass auch die saisonale Variabilität auf die atmosphärische Dynamik, z.B. aufgrund von brechenden Schwerewellen oder atmosphärischen Gezeiten, zurückzuführen ist. Die genaue Ursache bzw. Wirkung dieser ausgeprägten Dynamik und etwaiger weiterer Einflussfaktoren ist Teil aktueller Forschung.

Auch wenn der relative Intensitätsverlauf des OH- und O<sub>2</sub>-Airglows auf einer zeitlichen Skala von Monaten verhältnismäßig ähnlich ist, so gibt es doch innerhalb der einzelnen Messnächte immer wieder Unterschiede, in denen die Intensitätsvariabilität der beiden Schichten entweder nur schwer miteinander vergleichbar oder auch zeitlich versetzt ist. Die Ursache dafür sind z.B. Schwerewellen, welche zuerst in der einen Schicht und erst später in der anderen etwa 8 km höheren/niedrigen Schicht zu beobachten sind. Brechen die Wellen in der einen Schicht, sind sie in der anderen nicht mehr zu beobachten.



Abb. 2: Intensitätszeitreihe des OH- und O₂-Airglow, aufgenommen mit dem Instrument BAIER. Dargestellt ist der Monatsmittelwert über die Zenitwerte der Airglowintensität in relativen Einheiten für jedes Jahr der Messungen. Anmerkung: BAIER stand von Juni 2014 bis April 2015 in Oberpfaffenhofen und nicht auf der UFS. Diese Daten sind hier aus Konsistenzgründen nicht gezeigt.

Für eine erste Untersuchung der Unterschiede zwischen den OH- und O<sub>2</sub>-Airglow-Schichten werden die Zeitreihen der Zenit-Intensität in voller zeitlicher Auflösung von 3,7 min (ab Feb 2022 von 2 min) betrachtet. Es werden durchgängige wolkenfreie Sequenzen in den Datenreihen identifiziert, wobei die kürzeste Sequenz 1 h andauert und die Sequenzen im Mittel etwa 5 h lang sind. Für jedes Sequenzpaar (O<sub>2</sub> und OH) wird eine Kreuzkorrelation berechnet und anschließend der maximale Korrelationskoeffizient und dessen zeitlicher Versatz bestimmt. Abb. 3 zeigt für jede derart untersuchte Sequenz den zeitlichen Versatz zwischen OH- und O<sub>2</sub>-Intensitäten. Punkte rechts der Nulllinie bedeuten, dass ein Signal zuerst im O<sub>2</sub>-Airglow und danach im OH-Airglow zu beobachten ist. Bei Punkten links der Nulllinie verhält es sich umgekehrt.



Abb. 3: Kreuzkorrelation von OH- und O<sub>2</sub>-Intensitäts-Zeitreihen. Für jede kontinuierliche Datenreihe (max. eine gesamte Messnacht lang) wird eine Kreuzkorrelation berechnet, deren maximaler Korrelationskoeffizient und zeitlicher Versatz hier aufgetragen ist. Positive "Time-Lag"-Werte bedeuten, dass ein Signal in den Daten zuerst im O<sub>2</sub>-Airglow und danach im OH-Airglow zu beobachten ist. Je länger eine Zeitreihe ist, desto dunkler ist der Datenpunkt, um eine Einschätzung der Datenabdeckung zu geben.

Der Korrelationskoeffizient gibt die Ähnlichkeit der Zeitreihen an, Werte über 0,7 werden hier als gute Übereinstimmung angesehen. In der Mehrheit der Fälle ist der Zeitversatz (engl.: lag) null, d.h. die Signale treten zeitgleich auf. Dies könnte z.B. auf große vertikale Wellenlängen von Schwerewellen hindeuten. Jedoch ist auch ein großer Anteil der Signale mit bis zu +1,5 h Versatz zu beobachten. Bei Korrelationskoeffizienten unterhalb von o,6 gibt es eine breite Streuung, die Ähnlichkeit beider Zeitreihen ist für diese Punkte bereits relativ gering. Insofern ist fraglich, ob es sich dann tatsächlich um die gleiche Welle handelt, welche in beiden Schichten beobachtet wird. Zur Klärung dieser Details werden im Rahmen einer umfangreicheren Analyse in naher Zukunft die gesamten Bilder von BAIER, und nicht nur die (1-D) Zenit-Intensitätszeitreihe untersucht.

# Literatur

Marsh, D.R., Smith, A.K., Mlynczak, M.G., Russell III, J.M.: SABER observations of the OH Meinel airglow variability near the mesopause, Journal of geophysical research, 111, 10.1029/2005JA011451, 2006.

Le Texier, H., Solomon, S., Garcia, R.R., Seasonal variability of the OH Meinel bands, Planetary and Space Science, 35, 977-989, 10.1016/0032-0633(87)90002-X, 1987

Wüst, S., Bittner, M., Yee, J.-H., Mlynczak, M.G., Russell III, J.M., Variability of the Brunt-Väisälä frequency at the OH\* layer height, Atmospheric Measurement Techniques, 10, 4895-4903, 10.5194/amt-10-4895-2017, 2017

# Danksagung

Dank gilt der Mannschaft des Schneefernerhauses für die unermüdliche Durchführung von anfallenden Wartungsarbeiten am Instrument. BAIER wurde über das Drittmittelprojekt GRIPS3 BackUp (2009/40051) des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert.

# PLANETARE WELLEN UND EXTREMTEMPERATUREREIGNISSE AUF DER ZUGSPITZE

BIANCA FRISCHHOLZ<sup>2</sup>, LISA KÜCHELBACHER<sup>1</sup>, SABINE WÜST<sup>1</sup>, MICHAEL BITTNER<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>Deutsches Zentrum Für Luft- Und Raumfahrt (DLR), Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), 82234 Oberpfaffenhofen <sup>2</sup>Universität Augsburg, Institut für Physik, 86159 Augsburg E-Mail: bianca.frischholz@physik.uni-augsburg.de

Zusammenfassung: Planetare Wellen beeinflussen die Dynamik in der mittleren Atmosphäre und dadurch indirekt unser Wetter. Vorgestellt wird ein Vergleich zwischen der Aktivität dieser großräumigen atmosphärischen Wellen und Extremtemperaturereignissen am Boden.

Abstract: Planetary waves influence the dynamics in the mid atmosphere and hence indirectly our weather. Through comparing the planetary wave activity and extreme temperature events on the earth's surface a possible connection can be investigated.

# Hintergrund

Planetare Wellen (PW) treten nicht nur in der unteren sondern auch in der mittleren Atmosphäre (10 km bis 100 km) auf. Sie werden z.B. erzeugt, wenn Luftpakete beim Überqueren von Gebirgen nach oben ausweichen müssen und dabei gestaucht werden. PW können sich unter bestimmten Umständen vertikal in der Atmosphäre ausbreiten. Mit ihnen ist die Ausbildung von Hoch- und Tiefdruckgebieten verbunden; dadurch, aber auch durch weitere Prozesse, beeinflussen sie mittel- und unmittelbar unser Wetter. (Küchelbacher und Bittner, 2022)

# Zielsetzung

Das WAVE-Projekt, durchgeführt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Universität Augsburg, befasst sich u.a. mit Temperaturschwankungen in der mittleren und unteren Atmosphäre aufgrund von PW. Neben den langfristigen Veränderungen der Welle (Küchelbacher, 2012) ist auch der mögliche Zusammenhang zwischen PW und Hitze- bzw. Kälteereignissen von Interesse. Der Alpenraum als ein System, das empfindlich auf Klimaveränderungen reagiert, ist ein besonders gefährdeter Raum, wenn es um extreme Temperaturen und ihre Folgen geht.

#### Arbeitsansatz und Daten

Im Rahmen dieses Teils des WAVE-Projekts werden Temperaturdaten (ERA5, Hersbach 2016 und 2020) in Bodennähe in einem Zeitraum von 1979 bis 2019 auf Extremereignisse analysiert. Als extrem wird die mittlere Temperatur eines Tages eingestuft, wenn sie höher oder niedriger liegt als  $\pm 2\sigma$ , wobei  $\sigma$  die Standardabweichung ist. Außerdem werden mit Hilfe einer Spektralanalyse (harmonischen Analyse, Bittner et al. 2000) Informationen über die Amplitude und Phase der ersten neun Wellenlängen der PW für verschiedene Höhen und jeden Tag gewonnen. Hierfür werden ebenfalls ERA5-Temperaturdaten verwendet. Die Ergebnisse werden über den Breitenkreisbereich 50°N-60°N gemittelt. Durch die Betrachtung der Ausprägung der Wellen an einem als extrem kategorisierten Tag können Schlüsse über einen möglichen Zusammenhang zwischen PW und extremen Temperaturen auf Bodenhöhe gezogen werden.



Abb. 1: Mittlere Temperatur pro Tag im Juli über zwölf Jahre seit 2011, dabei in schwarz das Jahr 2015 mit einem besonders heißen Julibeginn. Die Temperatur stammt von einer internen Messtelle des DWD 2 m über der Oberkante des Daches der UFS.

#### Der Hitzesommer 2015

Der Sommer 2015 rangiert in den Top 10 der heißesten Sommer in Deutschland, Österreich und der Schweiz, wobei sogar in Regionen über 1000 m Höhe Temperaturen über 30°C auftraten. (DWD Pressemitteilung, 2015) Insbesondere ab Anfang Juli gab es Hitzerekorde. In diesem Zeitraum und für den Längenkreisbereich von Mitteleuropa zeigen auch die PW ein lokales Maximum, das über mehreren Tagen hinweg stabil war (siehe Abb. 2).

In Abb. 1 ist ersichtlich, dass der heiße Julistart 2015 auch im Hochgebirge an der UFS Auswirkungen hatte. Die Temperatur der gesamten ersten Tage lag signifikant über der der Jahre 2011 bis 2022. In Abb. 3 ist die Temperatur auf 500 hPa Höhe gezeigt, die durch die Überlagerung der ersten neun PW zustande kommt. Auch in dieser Höhe zeigt sich im Längenkreisbereich für Mitteleuropa (um 10° geographische Länge) ein lokales Maximum. Dieses Maximum besteht über fünf Tage vor dem Ereignis, wobei das Extremum in den drei bis fünf Tagen vor dem Hitzeereignis am Boden am ausgeprägtesten ist. Dies kann ein Hinweis auf eine Ankündigung von Extremereignissen auf der Erdoberfläche durch Wellen in größerer Höhe, in diesem Fall 500 hPa, sein. Der vermutete Zusammenhang wird allerdings durch so viele Variablen



Abb. 2: Die schwarze Kurve beschreibt die aus der Überlagerung der PW resultierende Temperatur auf Bodenhöhe für ein am **04.07.2015** aufgetretenes Hitzeevent. Die roten und blauen Linien stellen deren zeitlichen Verlauf dar (rot = 4 Tage vor, bis blau = 4 Tage nach dem 04.07.2015). Die räumliche Ausdehnung des Hitzeereignisses am Boden ist grau hinterlegt. Die rote vertikale Linie zeigt den am beständigsten betroffenen Längengrad.



Abb. 3: Gezeigt ist die aus der Überlagerung der PW resultierende Temperatur auf 500 hPa Höhe am Datum (04.07.2015) des detektierten Extremereignisses sowie an den vier Tagen zuvor. Tag 1 bezeichnet dabei den Tag des Ereignisses.

beeinflusst, dass die einzelnen Einflüsse noch untersucht werden.

# Literatur

Bittner, M., Offermann, D. und Graef, H. H.: Mesopause temperature variability above a midlatitude station in Europe, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105(D2), 2045-2058, doi: 10.1029/1999JD900307, 2000.

DWD Pressemitteilung, Deutschlandwetter im Sommer 2015, abrufbar unter:

https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilunge n/DE/2015/20150828\_deutschlandwetter\_sommer \_2015.pdf?\_\_blob=publicationFile&v=3tter, 2015.

Hersbach, H. und Dee, D.: ERA5 reanalysis is in production, ECMWF newsletter, 147(7), 5-6, abrufbar unter: https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/er a5-reanalysis-production5 reanalysis is in production | ECMWF, 2016.

Hersbach, H. et al.: The ERA5 global reanalysis, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999-2049, doi: 10.1002/qj.3803, 2020.

Küchelbacher, L. und Bittner, M.: Large scale dynamics of the atmosphere: Planetary waves - Theoretical overview, climate change, trends and variability. In: Bittner, M. (Ed.), Science At The Environmental Research Station Schneefernerhaus/ Zugspitze, Kapitel 10, S. 158-175, https://schneefernerhaus.de/forschung/science-atthe-environmental-research-station-

schneefernerhaus-zugspitze/Schneefernerhaus - Science at the Environmental Research Station Schneefernerhaus | Zugspitze, 2022.

Küchelbacher, L.: Charakterisierung der Änderungen der planetaren Wellenaktivität vor dem Hintergrund des Klimawandels,

Dissertation, Universität Augsburg, 2021.

#### Danksagung

Das WAVE Projekt wird durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziell gefördert.

Wir bedanken uns herzlich bei Alrik Selle (DWD) und Thomas Schartner (DWD) für die Bereitstellung und Aufbereitung der UFS-Temperaturdaten, sowie bei Till Rehm (UFS) für seine Unterstützung bei der Datenrecherche.

# PROJEKT ALPAIREO: ATMOSPHÄRISCHE RISIKOFAKTOREN FÜR DIE GESUNDHEIT IM ALPENRAUM

LORENZA GILARDI<sup>1</sup>, FRANK BAIER<sup>1</sup>, THILO ERBERTSEDER<sup>1</sup>, JANA HANDSCHUH<sup>1</sup>, OLEG GOUSSEV<sup>1</sup> <sup>1</sup>DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, OBERPFAFFENHOFEN E-MAIL: LORENZA.GILARDI@DLR.DE

Zusammenfassung: AlpAirEO ist ein von der Europäischen Weltraumorganisation ESA bewilligtes Projekt zur Entwicklung eines Dienstes zur Förderung der Luftqualität und Gesundheit im Alpenraum im Rahmen der Regionalinitiative "EO-Wissenschaft für die Gesellschaft". Ein Hauptziel ist die Nutzung der Satellitenfernerkundung zur Bereitstellung innovativer Wissenschafts- und Informationsdienste. Diese sollen der Unterstützung von sachkundigen und nicht sachkundigen Interessengruppen dienen und damit zur Verbesserung der allgemeinen Lebensqualität in den Alpen beitragen. Im Vordergrund steht die Untersuchung des aktuellen Zustands der Luftqualität und des damit verbundenen Gesundheitsrisikos in der Alpenregion. Mit Hilfe einer interaktiven IT-Plattform können in naher Echtzeit Informationen und Prognosen zur Luftqualität und dem damit verbundenen zusätzlichen Gesundheitsrisiko auf lokaler administrativer Ebene geliefert werden.

Abstract: AlpAirEO is a project granted by the European Space Agency ESA with two years funding to develop a service to promote air quality and health in the Alpine region in the context of the regional initiative "EO science for Society". The primary goal is to use satellite remote sensing to deliver innovative science and information services to support expert and non-expert stakeholders and, thereby, helping to improve the quality of life in the Alps. The main outputs are the investigation of the current status of the air quality and associated health risk in the alpine region and the development of an interactive IT platform, capable of providing near real time information and forecast of air quality and the associated health risk at local administrative level.

# Einführung

Umweltstressoren wie Feinstaub, Stickoxide, Hitze oder Kälte können die Gesundheit des Menschen in vielfältiger Weise beeinträchtigen [1]. Durch die kleinräumige Struktur sind diese Faktoren im Alpenraum einer hohen Variabilität unterworfen [2]. Der Klimawandel bewirkt zudem eine Veränderung dieser Parameter, wobei vor allem die Extreme zunehmen und der Alpenraum im Vergleich zum globalen Durchschnitt besonders vom Klimawandel betroffen ist [3]. Der menschliche Organismus wird vor neue Herausforderungen gestellt. Proaktive Klimaanpassung wird daher, gerade im Alpenraum, immer bedeutender. Satellitengestützte Daten von Feinstaub [4] oder Stickoxiden [5] können in Kombination mit Modellsystemen [6] einen wichtigen Beitrag leisten, die Auswirkungen der Umwelt auf die Gesundheit zu analysieren [7] und bedarfsgerechte Informationssysteme zur Verbesserung der Lebensqualität zu entwickeln [8].

# Projektziele und Umsetzung

#### 1: Anforderungsanalyse:

In der ersten Projektphase erfolgte zunächst eine Recherche potenzieller Nutzergruppen, um die verschiedenen Bedürfnisse an Umwelt- und Gesundheitsdiensten bzw. von Interessengruppen zu ermitteln, und so eventuelle Lücken zwischen Bedarf und Angebot zu identifizieren.

![](_page_21_Figure_4.jpeg)

Abb.1: Monatliche mittlere Konzentrationen von, von oben, PM10, PM2,5, O3 und NO2, zwischen 2013 und 2018, für urbanisierte (blaue Linie) und nicht urbanisierte (orange Linie) Gebiete über der Alpenregion. Die durchgezogene Linie entspricht dem Mittelwert, der über die Gebiete berechnet wurde, die die städtischen/nichtstädtischen Maskierungskriterien erfüllen.

Zu diesem Zweck wurde ein erstes Webinar organisiert, um das Projekt vorzustellen und aussagekräftige Informationen von Seiten verschiedener Interessengruppen zu erhalten. An dem Webinar nahmen Vertreter folgender Institutionen teil: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR als Veranstalter), Europäische Raumfahrtagentur (ESA), Alpenkonvention, Fondazione Lombardia Ambiente, Interreg Alpine Space und Umwelt Forschungsstation Schneefernerhaus (UFS). Des Weiteren erfolgte die Identifizierung und Bewertung verfügbarer Umweltdaten, die für Gesundheitsinstitutionen relevant sein können. Zu diesem Zweck wurden sowohl Satelliten und bodengestützte Messnetzwerke wie auch Modellprognosen des CAMS Copernicus Atmospheric Service herangezogen [4,5,6]. Schließlich wurden auch die Bewertung und Überprüfung relevanter demografischer und gesundheitlicher Datenquellen für den Alpenraum durchgeführt.

#### 2: Leistungsumfang und -bewertung

Diese Phase umfasste die Definition des Portfolios für die Gesundheitsrisikobewertung und die Indexberechnung. Auf der Grundlage der Rückmeldungen der Stakeholder in Phase 1 wurden die Anforderungen an den Dienst spezifiziert. Als Ausgangspunkt diente das Bioklimatische Informationssystem (https://www.alpendac.eu/bioclis). BioClis wurde im Rahmen eines Verbundprojekts für Klimawandel und Gesundheit des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz sowie des Bayerischen Staatsministeriums für Gesundheit und Pflege entwickelt [8]. Es ist im Alpine Environmental Data Analysis Center (AlpEnDAC) operationell implementiert und wird vom DLR technisch und wissenschaftlich betreut. Darüber hinaus wurde in dieser Phase die Bewertung der Schadstoffbelastung in den Alpen sowie eine Bewertung der Exposition der Bevölkerung unter Verwendung der in Phase 1 ermittelten Umwelt- und demografischen Daten durchgeführt. In Abbildung 1 ist eines der Ergebnisse dieser Untersuchung dargestellt: die zeitliche Entwicklung der mittleren Schadstoffkonzentration differenziert nach Verstädterungsgrad. Die Konzentrationsdaten wurden aus dem CAMS-Reanalysedatensatz [4] und die Urbanisierungsdaten aus dem Global Urban Footprint (GUF) [9] abgeleitet [10].

# 3: Service-Implementierung

Ein entscheidendes Designziel für die Nutzerschnittstelle war die Darstellbarkeit auf mobilen Geräten. Die wesentlichen Informationen mussten leicht verständlich und übersichtlich dargestellt werden. Die auf der Plattform angezeigten Gesundheitsindizes sind der Aggregate Risk Index [11], der das mit der Luftverschmutzung verbundene Gesundheitsrisiko zeigt, und der Universal Thermal Climate Index (UTCI) [12], der ein Maß für die thermische Belastung darstellt. Andere Variablen wie Konzentrationsaggregate von Schadstoffen und meteorologische Parameter sind ebenfalls verfügbar. Die gewählte räumliche Aggregation ist die Local Administrative Unit (LAU). Die Wahl dieser kleinen Aggregationseinheit ermöglicht es, Unterschiede in den Gesundheitskarten im alpinen Raum besser zu erfassen, die durch heterogene territoriale Merkmale gekennzeichnet sind. Ein Beispiel ist in Abbildung 2 dargestellt. Die webbasierte Plattform enthält außerdem eine Archivierungsfunktion mit Kalenderschnittstelle.

Täglich werden zusätzlich hochauflösend Karten für Detailgebiete zur Verfügung gestellt, die die Belastungssituation für besonders belastete alpine Regionen zeigen.

Air Quality map
Parameter ARI UTCI O3 NO2 PM10 PM2.5 SO2
Day -1 today +1 +2 Aggregation mean max

![](_page_22_Picture_6.jpeg)

Abb.2: Beispiel der webbasierten Plattform mit Darstellung der mittleren NO2-Werte über LAU-Gebiete im Alpenraum am 31.01.2023.

Zu diesen Gebieten gehören: die gesamte Alpenregion, das Brennerpassgebiet, das Stadtgebiet von Mailand und Umgebung sowie die Region zwischen Lyon/Turin.

# 4: Servicebereitstellung und Evaluierung

Inzwischen wurde der Dienst erfolgreich implementiert und auf der Seite https://www.wdc.dlr.de/AlpAirEO/ bereitgestellt. Daten sind im NetCDF-Format zum Download verfügbar. Auf Anforderung können auch auf LAU-Basis aggregierte Json-Files verfügbar gemacht werden.

Bis zum Ende des Projekts soll eine Evaluierung anhand von Gesundheits- und Umweltdaten erfolgen. Erste Zwischenergebnisse zeigen z.B. eine deutliche Abhängigkeit des ARI von der Geländehöhe. Im Hinblick auf Erkrankungen sind die Ergebnisse noch nicht eindeutig.

# 5: Servicebewertung durch Nutzer

Die in Phase 1 identifizierten Interessengruppen wurden eingeladen, die neu eingeführte Plattform zu testen und an einem abschließenden Workshop teilzunehmen, in dem sie Feedback zum Service geben konnten. Die Bewertung fiel im Allgemeinen sehr positiv aus, da bisher vergleichbare (Gesundheits-) Dienste für den gesamten Alpenraum fehlen. Es zeigte sich aber auch, dass die Anforderungen sehr unterschiedlich sind. Die Zukunft wird voraussichtlich zu flexibleren technischen Lösungen führen, um die verschiedenen Anwendungen besser bedienen zu können.

#### Literatur

[1] WHO 2022 https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breatheunhealthy-air-new-who-data (aufgerufen am 31.01.2023)

[2] Alpenkonvention (2020), Air Quality in the Alps,Report,

https://www.alpconv.org/fileadmin/user\_upload/O rganization/AC/XVI/RSA8\_final\_draft\_ACXVI.pdf

[3] APCC - Austrian Panel on Climate Change (APCC): Austrian Assessment Report 2014 (AAR14), Band 1 Kapitel 3: Auer, I und Foelsche, U: Vergangene Klimaänderung in Österreich (pp. 227ff) https://austriaca.at/APCC\_AAR2014.pdf [zuletzt besucht 31.01.2023]

[4] Handschuh, J., Erbertseder, T., Schaap, M. and Baier F.: Estimating Surface PM2.5 Concentrations from AOD: A Combination of SLSTR and MODIS. Remote Sensing Applications: Society and Environment, Vol. 26, S. 100716, https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100716, 2022.

[5] Müller, I., Erbertseder, T. and Taubenböck, H.: Tropospheric NO2: Explorative Analyses of Spatial Variability and Impact Factors, Rem. Sens. Env., Vol. 270, S. 112839, https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112839, 2022.

[6] CAMS Regional: European air quality analysis and forecast data documentation,https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CA MS+Regional%3A+European+air+quality+analysis +and+forecast+data+documentation, last accessed: Jan. 27th, 2023.

[7] Rittweger, J., Gilardi, L., Baltruweit, M., Dally, S., Erbertseder, T., Mittag, U., Naeem, M., Schmid, M., Schmitz, M.-T., Wüst, S., Dech, S., Jordan, J., Antoni, T., and M. Bittner: Temperature and particulate matter as environmental factors associated with seasonality of influenza incidence – an approach using Earth observation-based modeling in a health insurance cohort study from Baden-Württemberg (Germany). Environ Health, Vol., 21, Nr. 131, https://doi.org/10.1186/s12940-022-00927-y, 2022.

[8] Erbertseder, T., Mittelstädt, L., Gilardi, L., Traidl-Hoffmann, C., Hachinger, S., Bittner, M. (2021): Bioklimatisches Informationssystem Bayern: ein Service der UFS. Schlussbericht zum Vorhaben, 84p., https://www.vkg.bayern.de/projekte/doc/vkg\_bio\_ clis\_schlussbericht.pdf.

[9] Esch, T., Marconcini, M., Felbier, A., Roth, A., Heldens, W., Huber, M., Schwinger, M., Taubenböck, H., Müller, A., Dech, S.: Urban Footprint Processor – Fully Automated Processing Chain Generating Settlement Masks from Global Data of the TanDEM-X Mission. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 10, Nr. 6, S. 1617-1621,

http://dx.doi.org/10.1109/LGRS.2013.2272953, 2013.

[10] Gilardi, L., Metz-Marconcini, A., Marconcini, M., and Erbertseder, T.: Urban air pollution exposure: an assessment exploiting world settlement footprint and land use data. Proc. SPIE 11864, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments VI, 1186406; https://doi.org/10.1117/12.2600414, 2021.

[11] Sicard, P., Talbot, C., Lesne, O., Mangin, A., Alexandre, N., Collomp, R.: The Aggregate Risk Index: An intuitive tool providing the health risks of air pollution to health care community and public. Atmospheric Environment, S. 11-16, 2012.

[12] Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G. (2012): UTCI--why another thermal index? Int. J Biometeorol: 56(3): Vol. 421, Nr. 8. doi: 10.1007/s00484-011-0513-7, 2011.

#### Danksagung

AlpAirEO ist ein Projekt der ESA Regionalinitiative EO4Alps. Wir danken außerdem dem CAMS Copernicus Atmospheric Service für die Bereitstellung der Luftqualitätsdaten.

# HINWEISE AUF DRUCKWELLEN AUSGELÖST DURCH DIE ERUPTION DES HUNGA TONGA-Hunga Ha'apai auch in der mittleren Atmosphäre über Europa

LEON KNEZ<sup>1,2</sup>, CARSTEN SCHMIDT<sup>1</sup>, PATRICK HANNAWALD<sup>1</sup>, SABINE WÜST<sup>1</sup>, MICHAEL BITTNER<sup>1,2</sup> <sup>1</sup> DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR), DEUTSCHES FERNERKUNDUNGSDATENZENTRUM (DFD), 82234 OBERPFAFFENHOFEN <sup>2</sup>UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR PHYSIK, 86159 AUGSBURG E-MAIL: LEON.KNEZ@DLR.DE

Zusammenfassung: In der Nacht vom 15.01.2022 brach im Königreich Tonga der Vulkan Hunga Tonga – Hunga Ha'apai (HTHH) aus und generierte starke atmosphärische Druckwellen, die teils mehrfach um die Welt propagierten. An der Umweltforschungsstation "Schneefernerhaus" (UFS), sowie in ganz Europa, konnten entsprechende Signale sogar in der Mesopause (80-100 km Höhe) mit den GRIPS (GRoundbased Infrared P-branch Spectrometer) und BAIER (Bavarian Airglow ImagER) Instrumenten sowohl im OH- als auch im O<sub>2</sub>-Airglow registriert werden.

Abstract: On January 15<sup>th</sup> 2022 the Hunga Tonga – Hunga Ha'apai volcano erupted and generated strong atmospheric pressure waves of which some propagated several times across the globe. At the Environmental Research Station "Schneefernerhaus" (UFS), as well as in whole Europe, signals could be detected even at MLT (Mesosphere-Lower-Thermosphere) heights (8o-100 km) using the GRIPS (GRound-based Infrared P-branch Spectrometer) and the BAIER (Bavarian Airglow ImagER) instruments for the observation of the OH and the O2 airglow. Der Ausbruch des Vulkans Hunga Tong -Hunga Ha'apai (HTHH) im Königreich Tonga ereignete sich am 15. Januar 2022 um ca. 04:15 UTC und war einer der explosivsten und energiereichsten Ausbrüche des letzten Jahrhunderts (Matoza, 2022; Vergoz, 2022). Er löste dabei eine Reihe atmosphärischer Störungen aus, die in Form von Wellen mehrfach um die Erde propagierten (Matoza, 2022). Ein Teil dieser Signale konnte in ganz Europa auch in Airglowmessungen registriert werden, die sich in den letzten Jahrzehnten als sehr hilfreich für die Beobachtung von dynamischen Prozessen in der Atmosphäre erwiesen haben (z.B. Bittner, 2002; Schmidt, 2018; Wüst, 2018). Die Signale zeigen sich als Helligkeitsschwankungen des Airglows, d.h. von Emissionen verschiedener energetisch angeregter Moleküle (z.B. molekularer Sauerstoff, O2 oder Hydroxyl, OH) in ca. 94-95 km bzw. 86-87 km Höhe.

An der UFS, am Sonnblick-Observatorium (SBO), in Otlica (OTL, Slowenien), am Observatorium Haute-Provence (OHP, Frankreich) und in Catania (CAT, Italien) konnten in GRIPS-Messungen entsprechende Wellen registriert werden. In Abbildung 1 sind die

![](_page_25_Figure_1.jpeg)

Abb.1: OH-Airglow-Intensitäten an den Stationen UFS (blau), SBO (orange), OTL (grün), OHP (rot) CAT (violett) und oben die zur UFS gehörige Rotationstemperatur (blau) am 15/16.01.2022; Für die bessere Übersicht wurden die Intensitätsdaten vertikal gegeneinander verschoben. Kurzperiodische Wellen treten zwischen ca. 02:00-06:00 UTC nahezu zeitgleich an allen Stationen auf.

Intensitätsmessungen des sog. Q (3-1)-Zweigs des OH-Airglows (d.h. bestimmter Linien bei ca. 1.505  $\mu$ m Wellenlänge) aus ca. 86 – 87 km Höhe zu sehen. Dabei werden Wellenpakete ca. 22,5h nach dem ungefähr 17.000 km entfernten Ausbruch und über drei Stunden hinweg an den Stationen registriert (als Referenzpunkt wurde ca. 03:00 UTC gewählt). Ihre Frequenzen beschränken sich hauptsächlich auf den Bereich von ungefähr 1–3 mHz.

Hin und wieder ließen sich zwar ähnliche Wellenpakete in den GRIPS-Beobachtungen der letzten Jahre identifizieren, jedoch konnten sie nie über 3 h hinweg und auch nicht an mehreren Stationen gleichzeitig gemessen werden. Ein Zusammenhang mit dem Ausbruch des HTHH liegt daher nahe.

Hätte sich die Welle über den kürzesten direkten Weg vom Vulkan zur jeweiligen Messstation ausgebreitet (s. Abb. 2, gelber Pfeil), so hätte sie eine Geschwindigkeit von ca. 211 ± 36 m/s gehabt. Für den längeren entgegengesetzten Weg (s. Abb. 2, grüner Pfeil) hätte sich eine Geschwindigkeit von ca. 279  $\pm$  30 m/s ergeben.

Im ersten Fall hätten die Signale der Schockwelle dementsprechend gegen 19:20 UTC im Airglow beobachtet werden müssen. Das war nicht der Fall. Erst nach dem Durchgang der Schockwelle, die den entgegengesetzten Weg um die Erde genommen hat, um ca. 01:10 UTC, lassen sich Signale erkennen.

Zwischen der Rotationstemperatur und der Intensität des Airglows an der UFS (blaue Graphen in Abb. 1) konnte kein Phasenunterschied festgestellt werden.

![](_page_25_Figure_9.jpeg)

Abb.2: Die vom HTHH ausgelöste Schockwelle kam an der UFS einmal über den kürzesten direkten Weg (gelber Pfeil) und einmal über den längeren entgegengesetzten Weg (grüner Pfeil) an der UFS an.

Mit BAIER, einem Kamerasystem, das Teile des Spektrums des  $O_2$ - (865 ± 5 nm) und OH-Airglows (715 – 930 nm) registriert und ebenfalls an der UFS steht, konnten in der Nacht vom 16.01.2022 um ca. 04:00 UTC entsprechende Wellen registriert werden. In Abbildung 3 sind Wellenfronten (rot markiert) zu sehen und aus mehreren Aufnahmen zwischen ca. 04:00 – 05:00 UTC konnte eine zugehörige durchschnittliche Wellenlänge von ca. 77 km (blau markiert) bei einer Geschwindigkeit von etwa 170 m/s und einer Frequenz von ca. 2 mHz, d.h. identisch zu den Frequenzen der Wellen in GRIPS, errechnet werden. Diese Geschwindigkeit ist für atmosphärische Schwerewellen vergleichsweise hoch und für die Schockwelle, die eine Lambwelle ist, wäre sie zu niedrig. Dies lässt auf besondere Prozesse in der Atmosphäre in dieser Nacht schließen, die auf eine Verbindung zum HTHH zurückgeführt werden könnten. Die beobachtete Ausbreitungsrichtung aus Ost-Nordost (Azimut um 70°, gelber Pfeil in der Abb. 3) gibt allerdings noch Rätsel auf (erwartet wurde eine Ankunft aus Nord-Nordost für den kürzeren und Süd-Südwest für den längeren Weg).

Wie von Vergoz et al. (2022) bereits diskutiert worden ist, sind die Wellenfronten über Europa in ihrer Richtung teilweise bis zu 90° vom erwarteten Wert abgewichen. Dies könnte einen Teil der Erklärung für die unerwartete Ausbreitungsrichtung liefern.

![](_page_26_Picture_3.jpeg)

Abb.3: Sichtbare Wellen im OH-Airglow in der Nacht vom 16.01.2022 um 04:12 UTC aufgenommen von BAIER. Die roten Linien zeigen Wellenfronten und der gelbe Pfeil die Ausbreitungsrichtung. Die Wellen kommen aus ca. 70° Azimut, also aus Ost-Nordost.

# Literatur

Bittner, M., Offermann, D., Graef, H.H., Donner, M., Hamilton, K., 2002. An 18 year time series of OH rotational temperatures and middle atmosphere decadal variations. J. Atmos. Terr. Phys. 64 (8–11), 1147–1166. https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00065-2

Matoza, R. S., Fee, D., Assink, J. D., Iezzi, A. M., Green, D. N., Kim, K., Toney, L., Lecocq, T., Krishnamoorthy, S., Lalande, J.-M., Nishida, K., Gee, K. L., Haney, M. M., Ortiz, H. D., Brissaud, Q., Martire, L., Rolland, L., Vergados, P., Nippress, A., Wilson, D. C. (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the january 2022 hunga eruption, tonga. *Science (New York, N.Y.)*, 377(6601), 95–100.

https://doi.org/10.1126/science.abo7063

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

Vergoz, J., Hupe, P., Listowski, C., Le Pichon, A., Garcés, M. A., Marchetti, E., Labazuy, P., Ceranna, L., Pilger, C., Gaebler, P., Näsholm, S. P., Brissaud, Q., Poli, P., Shapiro, N., de Negri, R., & Mialle, P. (2022). Ims observations of infrasound and acoustic-gravity waves produced by the january 2022 volcanic eruption of hunga, tonga: A global analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, *591*, 117639. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117639

Wüst, S., Offenwanger, T., Schmidt, C., Bittner, M., Jacobi, C., Stober, G., Yee, J.-H., Mlynczak, M. G., and Russell III, J. M.: Derivation of gravity wave intrinsic parameters and vertical wavelength using a single scanning OH(3-1) airglow spectrometer, Atmos. Meas. Tech., 11, 2937-2947,

https://doi.org/10.5194/amt-11-2937-2018, 2018

# Danksagung

Für die hervorragende Betreuung der Instrumente gilt unser ausdrücklicher Dank dem Personal der UFS, allen voran Herrn Dr. Till Rehm, ohne dessen Engagement das hohe Qualitätsniveau der UFS-Zeitreihen kaum zu erreichen wäre.

Die Messungen wurden in den vergangenen Jahren durch das bayerische Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz über die Projekte GUDRUN (71b-U8729-2003/125-13), GRIPS3 Back-Up (2009/40051), BHEA (TLK01U-49580), LUDWIG (TUS01UFS-67093), VoCaS (TKP01KPB-70581) und AlpEn-DAC (TUS01UFS-72184) finanziert.

# PFLANZENSCHUTZMITTELRÜCKSTÄNDE IN DER DEPOSITION AN DER UFS

UWE KUNKEL<sup>1</sup>, KATHARINA WILLEMEIT<sup>1</sup> UND MARGIT KRAPP<sup>,1</sup> <sup>1</sup>Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister- Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg E-Mail: uwe.kunkel@lfu.bayern.de

Zusammenfassung: Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) untersucht seit März 2021 Pflanzenschutzmittel (PSM) in der Deposition an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS). Insgesamt wurden 20 PSM und PSM-Metabolite an der UFS nachgewiesen. Darunter fallen hauptsächlich Herbizide und Fungizide. Neun Stoffe konnten in mehr als einer Probe detektiert werden, wobei das Herbizid Terbuthylazin und seine Metabolite am häufigsten auftraten. Die Konzentrationen und Depositionsraten an der UFS sind meist ein bis zwei Größenordnungen geringer als an Standorten im bayerischen Flachland.

# Abstract

Since March 2021, the Bavarian Environment Agency analyses pesticides in deposition samples at the Environmental Research Station Schneefernerhaus (UFS). In total, 20 pesticides and metabolites were detected at UFS, mainly herbicides and fungicides. Nine pesticides were detected more than once such as the herbicide terbuthylazine and its metabolite desethylterbuthylazine. The concentrations and deposition rates of pesticides were usually one to two orders of magnitude lower than at lowland regions across Bavaria.

Hintergrund und Fragestellung: Seit 2005 nimmt das Bayerische Landesamt für Umwelt an der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) regelmäßig Luft- und Niederschlagsproben, um darin die Konzentrationen von persistenten Umweltchemikalien zu bestimmen. Im Jahr 2018 wurden innerhalb des Projekts PureAlps (Umweltbundesamt Wien GmbH und Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2020) erstmal auch Pflanzenschutzmittel (PSM) bei Regenfällen ereignisbezogen in der Deposition an der UFS untersucht und einige Wirkstoffe detektiert. Seit März 2021 führt das LfU an der UFS regelmäßige Untersuchungen zum Vorkommen von PSM-Rückständen in Depositionsproben durch. Ziel der Untersuchungen ist es, die Konzentrationen bzw. Depositionsraten mit den Ergebnissen anderer Standorte in Bayern zu vergleichen und somit auch Aussagen über den atmosphärischen Transport von PSM ableiten zu können.

Analytik: Die Gesamtdeposition von PSM-Wirkstoffen wurde mittels E-Bulk-Sammlern (28-Tages-Mischproben) bestimmt. Für die Analytik wurden 10 ml der Probe mit Isotopen-markierten internen Standards versetzt und mittels LC-online-SPE-HRMS (Flüssigkeitschromatographie mit online-Festphasenanreicherung und Detektion per hochauflösender Massenspektrometrie) bestimmt. Die Bestimmungsgrenze für die meisten Stoffe betrug 2 ng/l. Insgesamt wurden die Depositionsproben auf 134 PSM-Rückstände aus den Wirkstoffklassen Herbizide, Fungizide und Insektizide sowie ausgewählte Metabolite dieser PSM analysiert.

**Vorkommen von PSM an der UFS**: Nachfolgend werden die Ergebnisse von 20 untersuchten 28-Tages-Mischproben aus dem Zeitraum März 2021 bis September 2022 dargestellt. Von den untersuchten Stoffen wurden 20 Verbindungen mindestens in einer Probe oberhalb der Bestimmungsgrenze nachgewiesen. Darunter befinden sich zehn Herbizide und sechs Fungizide sowie drei Herbizid-Metaboliten und ein Fungizid-Metabolit. Eine Übersicht der detektierten Stoffe ist in Abb. 1 zu sehen.

![](_page_28_Figure_2.jpeg)

Abb.1: Detektionshäufigkeiten und Maximalkonzentrationen von PSM-Rückständen in Depositionsproben an der UFS im Zeitraum 03/2021-10/2022

Am häufigsten wurde das Herbizid Terbuthylazin (Einsatz überwiegend als Vorlauf-Herbizid im Maisanbau) sowie dessen Hauptmetabolit Desethylterbuthylazin (5 bzw. 6 Nachweise in den 20 untersuchten Proben) detektiert. Die maximalen Konzentrationen betrugen 21 ng/l für Terbuthylazin und 68 ng/l für Desethylterbuthylazin. Die anderen Wirkstoffe konnten hingegen zumeist nur in wesentlichen geringeren Konzentrationen im einstelligen ng/l-Bereich nachgewiesen werden.

Die Konzentrationen der mehrfach detektierten PSM-Rückstände an der UFS unterliegen einem Jahresgang (Abb.2). In der Regel werden die höchsten Konzentrationen an der UFS, wie auch im Flachland, im Frühsommer direkt nach der Applikation der PSM in den Anbaugebieten gemessen. In den Herbst- und Wintermonaten liegen die Konzentrationen der Stoffe dagegen unterhalb der Bestimmungsgrenze. Dieses saisonale Auftreten in der Deposition ist beispielweise für die Herbizide Metolachlor und Terbuthylazin besonders ausgeprägt. Daraus lässt sich ein rascher atmosphärischer Transport der PSM in den alpinen Raum und eine nur bedingte Stabilität der Stoffe in der Atmosphäre ableiten, da sich sonst ein weniger ausgeprägter Jahresgang zeigen müsste.

Ausnahme bildet Eine die 28-Tagesmischprobe vom 29.03.2022. Diese Probe ist durch sehr geringen Niederschlag und einen hohen Anteil von Feinpartikel durch die Deposition von Saharastaub charakterisiert. In dieser Probe wurde das Herbizid 2,4-D mit ungewöhnlich hohen Konzentrationen von 50 ng/l detektiert, zudem waren auch andere PSM wie beispielsweise Bentazon und Pyroxsulam nur in dieser Probe an der UFS nachweisbar. An den anderen Standorten im bayerischen Flachland wurden diese Stoffe im Untersuchungszeitraum 2021/22 nicht oder nur in geringeren Konzentrationen gefunden. Dies legt einen partikulären Ferntransport dieser Stoffe über die Atmosphäre nahe.

Einordnung der PSM-Funde an der UFS im Vergleich zu anderen Standorten in Bayern: Im Vergleich zu anderen Regionen in Bayern werden an der UFS eher wenige PSM und diese auch in geringeren Konzentrationen nachgewiesen. Beispielhaft werden im Vergleich hier die Ergebnisse der Standorte Bidingen im Ostallgäu (geringer ackerbaulicher Einfluss im Umfeld) und Neusling in der Donauebene (intensive Landwirtschaft) dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Daten wurden die Konzentrationen in den Proben mit Hilfe der Niederschlagsdaten in Depositionsraten umgerechnet.

Alle an der UFS detektierten PSM weisen im bayerischen Flachland einen deutlichen Jahresgang der jeweiligen Depositionsraten auf (Abb.2), der an der UFS nicht für alle PSM so ausgeprägt ist. Das Fungizid Dimethomorph (Abb.2a) und das Herbizid Terbuthylazin (Abb.2b) haben die höchsten Depositionsraten direkt nach Anwendung der Stoffe im Frühsommer. Die maximalen Depositionsraten der beiden PSM liegen dabei bei einigen Hundert ng pro m<sup>2</sup> und Tag und nehmen mit der Entfernung von ackerbaulichen Flächen deutlich ab. An der UFS werden die Stoffe nur in geringen Mengen ohne erkennbare zeitliche Verzögerung ebenfalls im Frühsommer detektiert.

![](_page_29_Figure_2.jpeg)

Abb.2: Zeitliche Verläufe der Depositionsraten von Dimethomorph, Terbuthylazin und Desethylterbuthylazin an der UFS sowie den Standorten Bidingen (Ostallgäu) und Neusling (Donauebene) im Zeitraum 03/2021-10/2022

Mit steigender Entfernung zu den Anwendungsgebieten nimmt der Metabolit Desethylterbuthylazin relativ zum eigentlichen Wirkstoff Terbuthylazin zu. So lag das Verhältnis von Desethylterbuthylazin zu Terbuthylazin an der UFS im Mittel bei 2,1 im Vergleich zum Anwendungsgebiet um Neusling mit im Mittel 0,64. Ein ähnliches Bild zeigt sich für das Herbizid Prosulfocarb, welches an landwirtschaftsnahen Standorten regelmäßig in hohen Konzentrationen detektiert wird. An der UFS hingegen war Prosulfocarb in der Messperiode 2021/22 nicht nachweisbar, allerdings konnte sein Metabolit Prosulfocarb-Sulfoxid einmal detektiert werden.

Prosulfocarb wird während des atmosphärischen Transports durch photochemische Prozesse abgebaut (Muñoz et al., 2018). Fernab der Anwendungen von PSM ist es daher sinnvoll, verstärkt auch das Auftreten von Metaboliten zu untersuchen.

Zwar existieren für die Metabolite sowie für die eigentlichen Wirkstoffe keine gesetzlichen Grenzwerte in der Luft oder im Niederschlag, dennoch kann es über die Verfrachtung der Stoffe zu einer unerwünschten Belastung von naturnahen und schützenswerten Lebensräumen wie den Alpen führen. Aus der Gesamtmenge der detektierten Wirkstoffe lässt sich bislang keine ökotoxikologische Wirkung ableiten, da die summarische Wirkung der Stoffe nur unzureichend untersucht ist.

**Vergleich mit PESPAT Daten an der UFS:** Innerhalb einer europaweiten Studie (Pan-European Study of Pesticides long-range Atmospheric Transport, PESPAT) wurden im Frühjahr 2020 auch an der UFS PSM-Rückstände in der Luft analysiert (Mayer et al. 2022). Die Probenahme an der UFS fand mittels verschiedenen aktiven Luftsammlern statt. Der untersuchte Analytenumfang deckt sich weitgehend mit den am LfU bestimmten PSM.

Die am LfU am häufigsten nachgewiesenen PSM (Metolachlor, Terbuthylazin) wurden in der PESPAT-Studie ebenso detektiert. Allerdings gab es in der PESPAT-Studie keine Nachweise von PSM-Metaboliten, da sich diese Arbeit auf die PSM-Wirkstoffe fokussierte und keine Metabolite untersucht wurden. Einzelne in der PESPAT-Studie nachgewiesene Stoffe wie Chlorpyrifos-Ethyl oder Prochloraz konnten in den untersuchten Depositionsproben nicht nachgewiesen werden. Dies kann sowohl in den unterschiedlichen Untersuchungsmedien (Luftkonzentration vs. Deposition), den Probenahmezeiten (2020 vs. 2021/22) als auch unterschiedlichen Nachweisstärken der angewandten Analysenverfahren begründet sein. Im Allgemeinen decken sich die Funde an PSM in Proben aus Luftsammelsystemen und Depositionssammlern aber weitgehend.

# Literatur

Mayer, Ludovic; Lammel, Gerhard; Degrendele, Céline (2022): Pan-European Study of Pesticides long-range Atmospheric Transport - Results Mt. Zugspitze (UFS).

Umweltbundesamt GmbH; Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2020): PureAlps 2016-2020 - Abschlussbericht.

Muñoz, Amalia; Borrás, Esther; Ródenas, Milagros; Vera, Teresa; Pedersen, Hans Albert (2018): Atmospheric Oxidation of a Thiocarbamate Herbicide Used in Winter Cereals. In: Environmental science & technology 52 (16), S. 9136–9144. DOI: 10.1021/acs.est.8b02157.

# Danksagung

Wir danken Till Rehm und dem Team der UFS für die Unterstützung bei der Probennahme und dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) für die finanzielle Unterstützung innerhalb des Projekts "OPTIMON".

# VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNG VERSCHIEDENER LUFTTEMPERATUR-MESSUNGEN AN DER UFS

KLAUS HAGER<sup>1</sup> UND JUCUNDUS JACOBEIT<sup>1</sup> <sup>1</sup>Institut für Geographie, Universität Augsburg E-Mail: Klaus.Hager@t-online.de, Jacobeit@geo.uni-augsburg.de

Zusammenfassung: Für den Zeitraum 12/2020 bis 11/2022 werden verschiedene Temperaturmessungen an der UFS miteinander verglichen (PT 100 Sensoren in einer Reinhardt-Station, einer Wetterhütte und am Stationsmast des DWD). Die Tagesmittel-, -höchst- und -tiefsttemperaturen zeigen meist die höchsten Werte an der Reinhardt-Station, die niedrigsten am Stationsmast, die größten Differenzen (>2°C im Mittel) treten bei den Tagesmaxima auf. Tagesmittel aus den täglichen Temperaturextrema führen zu höheren Werten als Mittelungen über eine größere Anzahl an Einzelmessungen geringerer Schrittweite.

# Abstract:

For the period 2020/12 to 2022/11 different measurements of temperature at the UFS are compared (Pt 100 sensors within a Reinhardt station, a weather station and on the DWD tower). Daily mean, max and min temperatures mostly have the highest values at Reinhardt station, the lowest ones at the tower, greatest differences (>2°C in the mean) occur with daily maxima. Daily means derived from daily extremes lead to higher values than averaging a larger number of measurements for smaller intervals.

# Einleitung

Messungen der Lufttemperatur an einer stimmten Lokalität können teils nicht unerheblich voneinander abweichen in Abhängigkeit von den eingesetzten Messsensoren und den jeweiligen Standorteigenschaften. Bezüglich der seit den 1980er Jahren erfolgten allmählichen Substitution vormals verwendeter visuell abzulesender Glasthermometer durch elektronische Sensoren mit automatischer Messwerterfassung sind bereits verschiedene Vergleichsstudien durchgeführt worden (z.B. Hager & Jacobeit 2011; Hager 2013; Hager et al. 2013), die derartige Abweichungen in den gemessenen Temperaturen belegen konnten. Ein wesentlicher Moment dabei ist die wesentlich schnellere Reaktion elektronischer Sensoren auf kurzzeitige Temperaturschwankungen, was nicht nur genauere aktuelle Werte liefert, sondern sich besonders auch bei den täglichen Extremtemperaturen zeigt. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich bei gleicher Messsensorik auf Temperaturunterschiede, die durch verschiedene Gegebenheiten an den jeweiligen Messorten bedingt sind, wobei die Messausstattung an der UFS beste Möglichkeiten für eine derartige Vergleichsstudie geboten hat.

# Messdatensätze

Im Jahr 2020 erfolgte eine Erneuerung der Messeinrichtung der Universität Augsburg, so dass für diesen Beitrag ein zweijähriger Zeitraum (Dezember 2020 bis November 2022) mit täglichen Temperaturmessungen zur Verfügung stand. Abb. 1 zeigt diese Messanlage, die aus einer automatischen Messstation (links außen, Reinhardt-Station) sowie einer großen herkömmlichen Wetterhütte besteht. In ihr sind der gleiche elektronische Temperatursensor wie in der Reinhardt-Station (Pt 100 Widerstandsthermometer) sowie die traditionellen Glasthermometer (Quecksilber- bzw. Alkoholthermometer für die Bestimmung der Höchst- bzw. Tiefsttemperaturen) untergebracht, deren Werte für den gesamten Untersuchungszeitraum aufgrund der lediglich werktags erfolgenden visuellen Ablesung jedoch nicht unmittelbar mit den kontinuierlich erfassten elektronischen Daten verglichen werden können. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden benachbarten Pt 100 Sensoren besteht darin, dass derjenige in der Reinhardt-Station zwangsbelüftet ist und daher rasch kleine Unterschiede der aktuellen Lufttemperatur erfasst, während der Sensor in der Wetterhütte lediglich der normalen Belüftung ausgesetzt ist, was zu Unterschieden in den Messergebnissen führen kann. Ergänzend wurden auch die täglichen Temperaturextrema mit einbezogen, die am Stationsmast des Deutschen Wetterdienstes (siehe Abb. 2) ebenfalls mit einem PT 100 Sensor erfasst werden.

![](_page_32_Picture_2.jpeg)

Abb.1: Automatische Reinhardt-Station und Wetterhütte

![](_page_32_Picture_4.jpeg)

Abb. 2: Stationsmast des Deutschen Wetterdienstes DWD

Tagesmittel der Temperatur sind einerseits aus dem Mittel der täglichen Temperaturextrema (sog. amerikanisches Mittel) berechnet worden, andererseits für die universitären Pt 100 Datenreihen auch aus allen Einzelwerten im 5 Minuten Abstand. Daraus wiederum sind Mittelwerte für den gesamten zweijährigen Zeitraum bestimmt worden, ergänzt um die mittlere monatliche Anzahl an Eis- und an Frosttagen. Als Schwankungsmaß, das im Wesentlichen den generellen Umfang des Jahresganges widerspiegelt, dient die jeweilige Standardabweichung – bei größeren Mittelwertabweichungen zwischen einzelnen Datenreihen und Mittelwerten nicht nahe dem Wert Null auch der Variationskoeffizient (Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert). Als Bezugsgröße für die primär interessierenden Temperaturdifferenzen wurde der elektronische Sensor in der Wetterhütte festgelegt.

# Ergebnisse

Bei den Ergebnissen zeigen sich folgende Unterschiede:

- <u>Tagesmitteltemperatur</u>: Reinhardt ist 0,5 °C wärmer, Mast 0,7 °C kälter als der Sensor in der Hütte;

- <u>Tageshöchsttemperatur</u>: Reinhardt ist 0,4 °C wärmer, Mast 2,1 °C kälter als der Sensor in der Hütte; - <u>Tagestiefsttemperatur</u>: Reinhardt ist o,8 °C wärmer, Mast o,1 °C wärmer als der Sensor in der Hütte;

- <u>Eistage</u>: Reinhardt hat 0,6 Tage weniger, Mast 2,1 Tage mehr als der Sensor in der Hütte;

 <u>Frosttage</u>: Reinhardt hat 0,4 Tage weniger, Mast 0,1 Tage weniger als der Sensor in der Hütte;

- <u>Differenz verschiedener Mittelwertberech-</u> <u>nungen</u>: amerikanisches Mittel aus den Temperaturextrema ist 0,7 °C wärmer als das Mittel aus allen 5-Minuten-Werten;

- <u>Glasthermometer</u>: die Werte sind nicht unmittelbar vergleichbar (siehe oben), aber tendenziell niedriger als die elektronischen Werte (außer beim Tagesmaximum am Mast).

- <u>Schwankungsmaße</u>: die Variationskoeffizienten unterscheiden sich meist nur geringfügig und weisen nicht auf substanzielle Unterschiede im Umfang der Jahresgänge hin. Lediglich bei den Standardabweichungen der Tagesmittelwerte fällt auf, dass die Reinhardt-Station den geringsten Wert aufweist, obwohl sie im Mittel das höchste Temperaturniveau zeigt; der Jahresgang stellt sich also etwas gedämpfter als bei den anderen Messeinrichtungen dar.

# Folgerungen

Die verschiedenen Lufttemperaturmessungen an der UFS zeigen selbst bei gleichem elektronischem Sensor voneinander abweichende Werte, wobei meist die vergleichsweise höchsten Werte an der Reinhardt-Station, die niedrigsten am Stationsmast ermittelt werden (abgesehen von den Tiefstwerten, die am Mast und am Sensor in der Hütte im Mittel nahezu gleich ausfallen). Die größten Differenzen treten bei den Höchstwerten auf, die im Mittel am Mast mehr als zwei Grad niedriger liegen als bei den anderen Messungen. Die Hauptursache dieser Abweichungen findet sich in der unterschiedlichen Kubatur der Messörtlichkeiten (kleine Stationseinfassung bzw. große Wetterhütte bzw. Mastanbringung), wobei eine geringere Kubatur eine raschere Reaktion der Sensoren auf Ein- und Ausstrahlungsänderungen impliziert.

Weiterhin konnte für Messungen an der UFS der bekannte Tatbestand bestätigt werden, dass Tagesmittelwertbildungen lediglich aus den beiden täglichen Temperaturextrema meist zu höheren Werten führen als Mittelungen über eine größere Anzahl an Einzelmessungen geringerer Schrittweite.

All diese Befunde sind zu berücksichtigen, wenn auf der Basis langzeitlicher Datenreihen mit Umstellungen bei Sensoren, örtlichen Kubaturen oder Mittelwertbildungen Analysen zur langfristigen Variabilität oder Änderung des thermischen Klimas durchgeführt werden.

#### Literatur

Hager, K.: Vor- und Nachteile durch die Automatisierung der Wetterbeobachtungen und deren Einfluss auf vieljährige Klimareihen. Beilage zur Berliner Wetterkarte 10.9.2013, 1-4, 2013.

Hager, K., Oßwald, E. und Jacobeit, J.: Differenzen bei der Extremtemperaturmessung im Zugspitzgebiet zwischen verschiedenen Sensoren. UFS – Wissenschaftliche Resultate 2011/2012, 34-35, 2013.

Hager, K. und Jacobeit, J.: Untersuchung zur Inhomogenität von Extremtemperatur-Messreihen durch Änderung der Messtechnik. UFS – Wissenschaftliche Resultate 2009/2010, 36-38, 2011.

#### Danksagung

Besonderer Dank geht an die Beschäftigten der UFS und des DWD für die Beschaffung der Datensätze sowie an Dr. Till Rehm für die Aufnahmen der Messeinrichtungen.

	R	Diff R-RH	RH	Diff Ma-RH	Ма	GI
Mw	0,8	<mark>0,5</mark>	0,3	- <mark>0,7</mark>	-0,4	-0,4
Sd	5,72	-0,17	5,89	-0,03	5,86	5,47
Abs. Max	13,0	<mark>0,4</mark>	12,6	- <mark>2,1</mark>	10,5	11,4
<i>Vk</i>	<i>0,44</i>	-0,01	<i>0,4</i> 5	0,07	<i>0,52</i>	<i>0,53</i>
Abs. Min	-9,9	<mark>0,8</mark>	-10,7	<mark>0,1</mark>	-10,6	-10,9
<i>Vk</i>	0,74	0,04	<i>0,70</i>	-0,01	<i>0,6</i> 9	<i>0,67</i>
Eistage	8,7	<mark>-0,6</mark>	9,3	<mark>2,1</mark>	11,4	
<i>Vk</i>	1,0	0,05	<i>0,95</i>	-0,08	0,87	
Frosttage	18,2	- <mark>0,4</mark>	18,6	- <mark>0,1</mark>	18,5	
<i>Vk</i>	<i>0,6</i> 6	0,03	<i>0,63</i>	0,0	0,63	
Mw Ab5 Sd	0,1 <i>5,57</i>	<mark>0,5</mark> -0,21	-0,4 5,78			
<b>Mw</b> (wie Zeile 1)	0,8	0,5	0,3			
Diff Mw-MwAb5	0,7	0,0	0,7			

# Tab. 1: Temperaturvergleiche an der UFS, Dezember 2020 bis November 2022

# Legende:

R	Reinhardt Kompaktstation
RH	Reinhardt Temperatursensor in der Wetterhütte
Ма	Temperatursensor am DWD Mast
GI	Glasthermometer in der Wetterhütte
Diff	Differenzen zum Reinhardt-Sensor in der Wetterhütte
Mw	Tagesmittelwert (amerikanisches Mittel, °C)
Sd	Standardabweichung
Vk	Variationskoeffizient
Abs. Max	Mittelwert aus den absoluten täglichen Maxima (°C)
Abs. Min	Mittelwert aus den absoluten täglichen Minima (°C)
Eistage	Tage mit Dauerfrost
Frosttage	Tage mit Minimum unter Null Grad, Max. über Null Grad
Mw Ab5	Mw aus den täglichen Messungen im 5 Minuten Abstand

# UNTERSUCHUNGEN ZUR HYDROLOGIE DES ZUGSPITZGEBIETES

KARL-FRIEDRICH WETZEL<sup>1</sup>, FRANZISKA KOCH<sup>2</sup>, CHRISTIAN VOIGT<sup>3</sup>

<sup>1</sup>UNIVERSITÄT AUGSBURG, INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE, ALTER POSTWEG 118, 86159 AUGSBURG <sup>2</sup>UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN, INSTITUT FÜR HYDROLOGIE UND WASSERWIRTSCHAFT, MUTHGASSE 18,

#### AT-1190 WIEN

#### <sup>3</sup>Helmholtz-Zentrum Potsdam

DEUTSCHES GEOFORSCHUNGSZENTRUM GFZ, TELEGRAFENBERG, 14473 POTSDAM

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

Zusammenfassung: Die Unterschiede in den Abflussverhältnissen des Zugspitzgebietes sind von Jahr zu Jahr erheblich. Einen bedeutenden Anteil daran hat der Schneedeckenspeicher, der im Gebirge bislang nur unzureichend erfasst wird. Darauf zielen die gemeinsamen Untersuchungen von Uni Augsburg, BOKU Wien und GFZ, bei denen neben innovativen Methoden der Schneedeckenerfassung wie LIDAR, Drohnen oder GNSS-Sensoren, das Supraleitgravimeter des GFZ auf der Zugspitze zum Einsatz kommen. Die vom Gravimeter registrierten Schwerevariationen korrelieren signifikant mit dem Gebietswasserhaushalt.

Abstract: A high year to year variability of runoff in the Zugspitze region can be observed. The contribution of snowmelt to runoff is substantial while the knowledge of stored snow water equivalent in alpine areas is low. Joint investigations of the University of Augsburg, BOKU Wien and GFZ are focussed on innovative methods of snow cover measurements like LIDAR, UAV, GNSS and gravity variations observed by the superconducting gravimeter at the top of Zugspitze. The gravity variations are significantly correlated with the local water balance.

# Hydrologische Charakteristika der Jahre 2021 und 2022

Unter hydrologischen Gesichtspunkten waren die beiden vergangenen Jahre recht unterschiedlich. Nach den Niederschlagsdaten des Observatoriums des DWD auf der Zugspitze betrug der Niederschlag im Jahr 2021 2.098,5 mm und lag damit nahe am Mittel von 2.084,2 mm der Jahre 1901 bis 2022. Im Jahr 2022 betrug der Niederschlag nur 1.821,0 mm und damit 87,4 % des langjährigen Mittels. Insbesondere die Frühjahrs- und Sommermonate waren mit 52 % bzw. 74 % des langjährigen Mittels ausgesprochen trocken.

![](_page_35_Figure_12.jpeg)

Abb.1: Der Verlauf der Abflüsse der Partnach an der Station Bockhütte in den hydrologischen Jahren 2021 (rot) und 2022 (blau). Die Abflussspitze am 19.7.2021 betrug ca. 12 m<sup>3</sup>/s. (eigene Daten).

Dies zeigt auch der Vergleich der in beiden Jahren an der Partnach (Station Bockhütte) registrierten Abflüsse (Abb. 1). Nach dem Ende der Schneeschmelze gegen Ende Juni 2022 gehen die Abflüsse gegenüber dem feuchteren Jahr 2021 deutlich zurück.

# Neue Ansätze zur Erfassung der Schneerücklage

Nach wie vor bereitet die möglichst genaue Erfassung des Schneewasseräquivalents (SWE) auf dem Zugspitzplatt große Probleme. Wie im Bericht der Jahre 2019/2020 bereits angesprochen, werden auch von den Niederschlagswaagen auf dem Zugspitzplatt fehlerhafte Werte vor allem durch windverdrifteten Schnee aufgezeichnet. Es bestehen kaum Möglichkeiten diese Daten zu korrigieren. Daher wird aktuell mit ganz unterschiedlichen Ansätzen versucht die Schneerücklagen und damit die Schneehöhe und das SWE der Schneedecke auf dem Zugspitzplatt zu erfassen.

# Erfassung mit LIDAR:

Oberflächenscans des Zugspitzplatts wurden in der Zeit von 2014 bis 2018 zu mehreren Zeitpunkten mit einem LIDAR vom Zugspitzgipfel aus vorgenommen. Dieses Verfahren soll auch zukünftig eingesetzt werden, wobei eine Automatisierung der Messungen erfolgen soll. Im früheren Labor des Max Planck Instituts für Extraterrestrische Physik (MPE) auf dem Zugspitzgipfel, in dem seit Herbst 2018 vom Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) das "Zugspitze Geodynamic Observatory Germany" (ZUGOG) betrieben wird, soll das LIDAR durch ein Fenster einen Ausschnitt des Zugspitzplatts erfassen (Abb. 2). Die Messung erfolgt durch ein spezielles im nahen Infrarotbereich entspiegeltes Fenster und soll zukünftig über das Internet remote gesteuert werden.

![](_page_36_Picture_6.jpeg)

Abb. 2: Das frühere Labor des Max Planck Instituts für Extraterrestrische Physik, in dem das ZUGOG mit dem Supraleitgravimeter und das LIDAR der UFS untergebracht sind (Foto C. Voigt).

# Erfassung mittels Drohnen:

![](_page_36_Picture_9.jpeg)

Abb. 3: Höhenunterschiede auf einer Versuchsfläche unterhalb der UFS Schneefernerhaus nach Drohnenaufnahmen am 21.2.2023 (Berechnungen: C. Rempfer).

In der Literatur werden Verfahren beschrieben, Strukturen von Schneeoberflächen in hoher Genauigkeit auf Basis photogrammetrischer Auswertungen von drohnengestützten Luftbildern zu erfassen (z.B. Revuelto et al. 2021). Die drohnengestützte Erfassung von Schneeoberflächen bietet die Möglichkeit innerhalb von kurzer Zeit größere Flächen rasch zu erfassen und die Schneedeckenentwicklung während eines Winters zu dokumentieren. Aktuell beschäftigt sich eine Bachelorarbeit an der Universität Augsburg mit dieser Thematik (Abb. 3). Ziel der Arbeit ist es, einen Arbeitsablauf für die Befliegung und anschließende Auswertung zu entwickeln sowie Anforderungen an die Rahmenbedingungen für den Einsatz von Drohnen (Licht- und Windverhältnisse) zu definieren.

#### Erfassung mittels Satelliten-Daten:

Photogrammetrische Auswertungen sind auch von hochauflösenden Satellitenbildern möglich, die aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen wurden (Deschamps-Berger et al., 2020). Insbesondere die Aufnahmen der Pléiades Satelliten, die panchromatisch Auflösungen von 50 cm erreichen und auswählbare Bereiche stereoskopisch abdecken, sind dafür geeignet. Abb. 4 zeigt eine Auswertung der Schneehöhenverteilung für das Zugspitzplatt mit einer räumlichen Auflösung von 2 m, die als Input für die räumliche und mengenmäßige Niederschlagsverteilung bei der Schneedeckenmodellierung im physikalischbasierten Schneedeckenmodell Alpine3D (Vögeli et al., 2016) genutzt wurde (Koch et al. 2023).

![](_page_37_Figure_4.jpeg)

Abb. 4: Schneedeckenverteilung nach Pléiades Daten vom 9.4.2021 auf dem Zugspitzplatt (Koch et al. 2023).

# Erfassung mittels GNSS:

Im Herbst 2021 wurden zwei Global Navigation Satellite (GNSS) Sensor-Systeme zur Schneedeckenerfassung im Bereich der Zugspitze aufgebaut. Ein Mehrfrequenz-GNSS-System wurde an der LWD Station am Zugspitzplatt montiert, ein weiteres wurde in einem 35° steilen Hang oberhalb des UFS- Gebäudes installiert, um Schneedeckenentwicklungen in potentiell lawinengefährdeten Hängen zu erfassen. Ein Sensorsystem umfasst dabei 2 Antennen – eine ist direkt am Boden unterhalb der Schneedecke angebracht, die andere als Referenz oberhalb der Schneedecke. Anhand der Laufzeitverzögerung der GNSS-Signale durch die Schneedecke wird das SWE, und anhand der Signaldämpfung, der Flüssigwassergehalt in der Schneedecke, berechnet (Koch et al., 2019, Capelli et al, 2022).

# Weiterentwicklung des Hydro-Gravimeter-Ansatzes

Seit Herbst 2018 betreibt das GFZ auf dem Zugspitzgipfel das ZUGOG (vgl. Abb. 2) mit einem Supraleitgravimeter. Mit dem supraleitenden Gravimeter wird die zeitliche Veränderung der Erdschwerebeschleunigung mit einer Genauigkeit von etwa 1 nm/s<sup>2</sup> gemessen (Voigt 2020). Dabei werden auch die Auswirkungen der Massenveränderungen von Schnee, Eis und Wasser auf die Schwere erfasst, die im Bereich von 9·10<sup>-7</sup> m/s<sup>2</sup> oder 900 nm/s<sup>2</sup> liegen. Sie liegen damit um fast 3 Zehnerpotenzen über der Messgenauigkeit des Gravimeters und können zudem mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst werden. Die zeitlichen Variationen der Schwerebeschleunigung werden entsprechend des Newtonschen Gravitationsgesetzes durch Massenzunahmen z.B. durch Schneefall oder Regen und durch Massenverluste durch Schnee- oder Gletscherschmelze, Abfluss aus dem Karstsystem des Zugspitzplatts oder auch Abschmelzen von Permafrost verursacht.

Die kontinuierliche Zeitreihe der hydrologischen Schwerevariationen auf der Zugspitze wurde fortgeführt und ist in Abb. 5 dargestellt (Voigt 2023). Aus dem Vergleich der Jahresminima lassen sich signifikante Schwereabnahmen von -20 nm/s<sup>2</sup>/Jahr für die Jahre 2019 bis 2021 ableiten. Im Zeitraum 2021-2022 betrug diese Abnahme sogar -50 nm/s<sup>2</sup>/Jahr. Diese langfristigen Schwereabnahmen wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit an der TU München analysiert (Achmüller 2022). Dazu wurden hochauflösende Digitale Geländemodelle aus den Jahren 2005 und 2020 gegenübergestellt und damit Höhen- und Massendifferenzen lokalisiert und quantifiziert. Inwieweit die Schwereabnahmen mit dem Verlust von Gletschereis und Permafrost zusammenhängen, wird derzeit untersucht.

![](_page_38_Figure_2.jpeg)

Abb.5: Hydrologische Schwerevariationen gemessen mit dem Supraleitgravimeter am Gipfel der Zugspitze (Voigt 2023).

![](_page_38_Figure_4.jpeg)

Abb.6: Schwerevariationen und Komponenten des Wasserhaushalts gemessen mit dem Supraleitgravimeter am Gipfel der Zugspitze (Koch et al. 2023).

Den Zusammenhang der Schwerevariationen mit verschiedenen Komponenten des Wasserhaushaltes zeigt Abb. 6. Es ist nicht nur der Auf- und Abbau des Schneedeckenspeichers, der vom Gravimeter erfasst wird, sondern auch das Auslaufen des Karstwasserkörpers im Spätsommer sowie die Massenzunahmen, die durch einzelne starke Niederschlagsereignisse hervorgerufen werden. Genau diese Zusammenhänge sollen während der nächsten Jahre in einem größeren gemeinsamen Projekt von GFZ, BOKU Wien und Universität Augsburg untersucht werden.

# Literatur

Achmüller, K.: Lokalisierung und Quantifizierung von gravitativen Massenbewegungen im Bereich der Zugspitze zum Vergleich mit gravimetrischen Messungen, Bachelorarbeit an der Fakultät Physik der TU München, 2022.

Capelli, A., Koch, F., Henkel, P., Lamm, M., Appel, F., Marty, C. and Schweizer, J., 2022. GNSS signalbased snow water equivalent determination for different snowpack conditions along a steep elevation gradient. The Cryosphere, 16(2), pp.505-531.

Deschamps-Berger, C., Gascoin, S., Berthier, E., Deems, J., Gutmann, E., Dehecq, A., Shean, D. and Dumont, M., 2020. Snow depth mapping from stereo satellite imagery in mountainous terrain: evaluation using airborne laser-scanning data. The Cryosphere, 14(9), pp.2925-2940.

Koch, F., Henkel, P., Appel, F., Schmid, L., Bach, H., Lamm, M., Prasch, M., Schweizer, J. and Mauser, W., 2019. Retrieval of snow water equivalent, liquid water content, and snow height of dry and wet snow by combining GPS signal attenuation and time delay. Water Resources Research, 55(5), pp.4465-4487.

Koch, F., Schulz, K., Voigt, C., Achmüller, K., Gascoin, S., Rehm, T., Wetzel, K.-F.: Observing cryospheric and hydrological processes and storages at high-alpine catchment scales by a superconducting gravimeter at the top of Mt. Zugspitze, Vortrag VAO-Symposium, Grainau, 2023.

Revuelto, J., Alonso-Gonzalez, E., Vidaller-Gayan, I., Lacroix, E., Izagirre, E., Rodríguez-López, G. & López-Moreno, J.I.: Intercomparison of UAV platforms for mapping snow depth distribution in complex alpine terrain, Cold Regions Science and Technology 190, doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103344, 2021.

Voegeli, C., Lehning, M., Wever, N. and Bavay, M., 2016. Scaling precipitation input to spatially distributed hydrological models by measured snow distribution. Frontiers in Earth Science, 4, p.108.

Voigt, C.: Ebbe und Flut auf den Kontinenten. Physik in unserer Zeit, 2020, 51, 6, 305. https://doi.org/10.1002piuz.202070609.

Voigt, C.: Forschung in luftiger Höhe: Der Wasserhaushalt in den Alpen. Beilage der Geographischen Rundschau 3-2023 in Kooperation mit dem Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ zum Thema Hochgebirge, 2023.

#### Danksagung

Für die Nutzung der Forschungsinfrastruktur an der UFS Schneefernerhaus und im Zugspitzgebiet sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Das betrifft auch die tatkräftige Unterstützung durch die Mitarbeiter der UFS. Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden bislang von den beteiligten Partnern selbst finanziert.

# UMFASSENDES MONITORING DER PERMAFROSTVERBREITUNG UND -ENTWICKLUNG AM WESTLICHEN ZUGSPITZGRAT

RICCARDO SCANDROGLIO<sup>1</sup>, MAIKE OFFER<sup>1</sup>, LUKAS LUCKS<sup>2</sup>, ROBERT DELLESKE<sup>3</sup>, MARKUS KEUSCHNIG<sup>3</sup>, INGA BECK<sup>4</sup>, TILL REHM<sup>4</sup>, JOHANNES LEINAUER<sup>1</sup> UND MICHAEL KRAUTBLATTER<sup>1</sup> <sup>1</sup>PROFESSUR FÜR HANGBEWEGUNGEN, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, ARCISSTRASSE 21, 80333 MÜNCHEN <sup>2</sup>PROFESSUR FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND FERNERKUNDUNG, TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN, MÜNCHEN <sup>3</sup>GEORESEARCH FORSCHUNGSGESELLSCHAFT MBH, URSTEIN SÜD 13, 5412 PUCH BEI HALLEIN, ÖSTERREICH <sup>4</sup>UMWELTFORSCHUNGSSTATION SCHNEEFERNERHAUS UFS, ZUGSPITZE 5, ZUGSPITZE E-MAIL: R.SCANDROGLIO@TUM.DE, WWW.CEE.ED.TUM.DE/LANDSLIDES

Zusammenfassung: Die Professur für Hangbewegungen der TUM betreibt und koordiniert intensive Permafrostforschung am westlichen Zugspitzgrat. Umfassende geophysikalische Messungen, ergänzt durch kontinuierliche Temperatur- und Bewegungsmessungen, ermöglichen eine differenzierte Überwachung der Permafrostverbreitung und -entwicklung. Diese gezielten Messungen werden durch Fernerkundungsmethoden wie Drohnen und Infrarotkameras ergänzt, um eine großflächige Abdeckung des Gebiets zu erhalten.

Abstract: The Chair of Landslide Research at the TUM conducts and coordinates intensive permafrost monitoring on the western Zugspitze Ridge. Extensive geophysical measurements are coupled with thermal and displacement information to track permafrost evolution. These selective measurements are complemented by remote sensing techniques like drones and infrared cameras to cover the whole area.

# Einführung

Der Rückgang von Permafrost in den letzten zwei Jahrzehnten (Scandroglio et al, 2021) wurde als ein Hauptgrund für die erhöhte Instabilität von Felshängen erkannt. Dadurch erhöht sich das Risikopotenzial von alpinen Naturgefahren, welche besonders Bergsteiger sowie technische und touristischen Infrastrukturen bedrohen. Um eine adäquate Beurtei-

![](_page_40_Picture_8.jpeg)

Abb.1: Monitoringkonzept für den westlichen Zugspitzgrat und die steilen nördlichen Felswände. Quelle: RealityMaps

lung der bestehenden Gefahren zu ermöglichen, ist ein verbessertes Verständnis und genaues Monitoring der ablaufenden geologischen Prozesse notwendig.

# Monitoringkonzept

Das Langzeitmonitoring der Permafrostentwicklung im Kammstollen (A) wurde in den letzten Jahren mit Beobachtungen einer Felsgleitung am Grat ergänzt (B). Im Sommer 2022 wurden zusätzliche Profile für geophysikalische Erkundungen oberhalb des Kammhotels mit dem Ziel einer 3D-Quantifizierung des Felszustands aufgebaut (C). Im Rahmen des Projektes AlpSenseRely<sup>1</sup> wurde die Übertragbarkeit dieser drei gezielten Erkundungen auf größere Flächen untersucht. Mit der Hilfe von mehreren Thermalkameras (D) und Drohnebefliegungen (E) wurden der Grat und die steilen nördlichen Felswände mit unterschiedlichen Auflösungen und Messfrequenzen aufgenommen. Um eine Validierung der Messungen mit der Temperatur zu ermöglichen, sind zudem alle Messstandorten mit Felstemperaturloggern in unterschiedlicher Tiefe ausgestattet.

Die Ergebnisse unserer angewandten Forschungsarbeit wurden im September 2021 beim AlpSenseRely Stakeholder Meeting im Schneefernerhaus mit dem Thema "Welche Bedürfnisse sehen Sie als Anwender bei der Vorhersage von Naturgefahren im Klimawandel?" vorgetragen. Unter anderem waren Vertreter des Bayerischen Umweltministeriums, des DAV, Gemeinden aus Bayern und Tirol, der Bayerischen Zugspitzbahn, der Bergrettung, der Geologischen Dienste aus Südtirol, Tirol und dem Salzburger Land anwesend.

![](_page_41_Figure_5.jpeg)

Abb.2: Widerstandsmessungen nach Krautblatter et al. (2010) zeigen die Entwicklung des Permafrostes im Kammstollen für 2021 und 2022. Jede Box ist ein Tomogramm: die obere Kante stellt die externe Felswand dar (vgl. Abb.3), die untere Kante den Tunnel. Maße: Länge 275m, Tiefe 28m. Die Ausbreitung des gefrorenen Bereiches ist in blau zu erkennen, mit einem Maximum im April 2022 und einem Minimum im September 2021.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> www.cee.ed.tum.de/landslides/alpsense/projekt/

#### A) Kammstollen - Langzeitmonitoring

Der Kammstollen ist ein Tunnel, welcher unterhalb des Zugspitzgrates verläuft und direkt mit dem UFS verbunden ist.

Die damit verbundene einfache Logistik und die Unabhängigkeit von äußeren Witterungsbedingungen ermöglichen eine ganzjährige Durchführung von aufwändigen Messungen – eine Ausnahme im hochalpinen Bereich. Die ersten Erkundungsmessungen mit der Widerstandstomographie (ERT) und dessen Kalibrierung im Labor fanden im Jahr 2007 statt (Krautblatter et al. 2010). Seit 2014 werden die Messungen monatlich wiederholt (Abb.2). Um die Langzeitauswirkungen des Klimawandels auf das Permafrostsystem besser zu verstehen, werden an diesem Standort zusätzlich kontinuierliche Luft-, Felstemperaturund Kluftwassermessungen durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen eine maximale Permafrostausbreitung in den Monaten April/Mai und eine minimale Ausdehnung in den Monaten September/Oktober.

Der Trend über die Jahre hinweg zeigt eine stetige Abnahme des gefrorenen Felsbereichs, welches mit dem Anstieg der Lufttemperaturen und der Dauer bzw. Höhe der Schneedecke korreliert.

# B) Felsgleitung: Messungen und Modellierungen

Mamot et al. (2021) beobachteten in den letzten sieben Jahren eine Felsgleitung im Bereich von eisgefüllten Klüften und des Permafrosts des westlichen Zugspitzgrates. Kontinuierliche Bewegungsmessungen und jährliche elektrische und seismische Untersuchungen, sowie umfangreiche Labortests und Modellierungen, erlaubten eine präzise Einschätzung der Gefahr. Die gewonnen Erkenntnisse können ebenso auf andere Felsrutschungen übertragen werden.

# C) Entwicklung neuer geophysikalischer Verfahren

Die Erwärmung des Permafrosts als Folge des Klimawandels wirkt sich signifikant auf die Festigkeit von Felsen und die Fels-Eis Schnittstellen aus (Mamot et al. 2018). Da Infrastrukturen im hochalpinen Bereich häufig in dauerhaft gefrorenem Festgestein mit geringer Porosität verankert sind, ist hier ein vollständiges Verständnis der Prozessdynamiken und der daraus resultierenden Stabilitätsveränderungen notwendig. Mehrere elektrische und seismische Tomographien wurden in Sommer 2022 in dem Bereich oberhalb des Kammhotels durchgeführt (Abb.3) und sollen in den kommenden Jahren wiederholt werden. Ebenso ergänzen zahlreiche Felstemperaturlogger dieses Messsetup. Die Auswertung der 3D-Feldmessungen zusammen mit durchgeführten Kalibrierungen im Labor erlauben eine quantitative Analyse von eisarmen Festgestein und sollen zu einer verbesserten Gefahreneinschätzung für hochalpine Infrastrukturen führen.

![](_page_42_Figure_10.jpeg)

Abb.3: Ergebnisse der Widerstandsmessungen für C. In Blautönen sind die Bereiche mit hohen Werten dargestellt, die auf ein Permafrostvorkommen hindeuten.

Die Entwicklung einer kombinierten 4D Auswertung dieser Feldmessungen zusammen mit Laborkalibrierungen erlaubt eine quantitative Analyse von eisarmen Festgestein und eine bessere Risikoeinschätzung für Infrastrukturen.

# D) Thermische Infrarot (TIR) Monitoring von Felswänden

Thermale Infrarotbilder wurden im Jahr 2021 und 2022 in allen obengenannten Bereichen (A), (B) und (C) aufgenommen und für die Erkennung von Permafrostbereichen in anderen benachbarten Gebieten verwendet. Die geophysikalischen und thermischen Daten werden zur Validierung benutzt. Das Projekt besteht aus den drei folgenden Teilen.

i) Eine festinstallierte TIR-Kamera für tägliche, saisonale und jährliche Veränderungen. Aufgrund des logistischen Aufwands (Strom, Internet, Wartung, usw.) erfolgte die Installation der Kamera im Schneefernerhaus mit Blick auf die Nordseite des Schneefernerkopfs. Die Installation wurde mit zwei Temperaturloggern im beobachteten Fels ergänzt, um eine direkte Validierung zu ermöglichen.

ii) Kurzzeit Beobachtungen (24h) der Nordwand, insbesondere der Außenbereich des Kammstollens mit einer TIR-Handkamera (Abb.4). Auch hier wurde ein Temperaturlogger installiert, aber aufgrund der schweren Zugänglichkeit können diese Messungen nur im Sommer/Herbst durchgeführt werden. Die hiermit gewonnen Informationen erlauben einen Vergleich der Messungen zwischen Schneefernerkopf, Kammstollen und Grat.

![](_page_43_Figure_5.jpeg)

Abb.4: Thermales Panoramabild des westlichen Zugspitzgrats von der Nordseite in Juni 2022, schneebedeckte Bereiche in blau. Verlauf des Kammstollen in weiß dargestellt.

iii) Eine Temperatur-Emissivität Laborkalibrierung von Felsproben unter kontrollierten Bedienungen, um Referenzwerte zu gewinnen.

# E) BVLOS UAV-Befliegungen

Das zweijährige Projekt, gestartet im Jahr 2021 unter der Leitung der UFS, untersucht saisonale Änderungen der Fels-/ Bodentemperaturen und Schneehöhen mit Hilfe von RGB- und IR-Aufnahmen aus UAV (Drohnen). Dadurch können flächenhaft Permafrostbereiche in steilen unzugänglichen Hängen ohne Gefahr detektiert werden. Felsstürze werden damit ebenfalls erkannt, was wichtige zusätzliche Information über Gefahrenbereiche liefert. Die GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH ist für die Testflüge sowie für die Auswertung in Zusammenarbeit mit der TUM zuständig. Ein weiteres Ziel dieses Projektes ist das Erfüllen aller administrativen Anforderungen für den UAV-Betrieb in Alpenregionen, in Grenzgebieten (D/Ö), und Beyond Visual Line Of Sight (BVLOS).

# Literatur

Krautblatter, M., Verleysdonk, S., Flores-Orozco, A., & Kemna, A.: Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps). Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 115(F2), 1– 15. https://doi.org/10.1029/2008JF001209, 2010.

Mamot, P., Weber, S., Eppinger, S., & Krautblatter, M.: A temperature-dependent mechanical model to assess the stability of degrading permafrost rock slopes. Earth Surface Dynamics, 9(5), 1125–1151. https://doi.org/10.5194/esurf-9-1125-2021, 2021.

Mamot, P., Weber, S., Schröder, T., & Krautblatter, M.: A temperature-and stress-controlled failure criterion for ice-filled permafrost rock joints. The Cryosphere, 12, 3333–3353. https://doi.org/10.5194/tc-12-3333-2018, 2018

Scandroglio, R., Draebing, D., Offer, M., & Krautblatter, M.: 4D quantification of alpine permafrost degradation in steep rock walls using a laboratory-calibrated electrical resistivity tomography approach. Near Surface Geophysics, 19(2), 241– 260. https://doi.org/10.1002/nsg.12149, 2021

# Danksagung

Besonderer Dank geht an die Umweltforschungsstation Schneefernerhaus, die Bayerische Zugspitzbahn AG und das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) für die freundliche Unterstützung. Weiterer Dank für die finanzielle Unterstützung an das Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, sowie die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, DBU.

# SOLARE UV-STRAHLUNG – VERMESSUNG DER SPEKTRALEN BESTRAHLUNGSSTÄRKE AM SCHNEEFERNERHAUS

SEBASTIAN LORENZ<sup>1</sup>, MARKUS LAUFMANN<sup>1</sup>, INGO MAYER<sup>1</sup> UND DANIELA WEISKOPF<sup>1</sup> <sup>1</sup>BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ, ABT. WIRKUNGEN UND RISIKEN IONISIERENDER UND NICHTIONISIERENDER STRAHLUNG, INGOLSTÄDTER LANDSTR. 1, 85764 OBERSCHLEIßHEIM

E-MAIL: SLORENZ@BFS.DE

Zusammenfassung: Das Bundesamt für Strahlenschutz vermisst seit Sommer 2017 die spektrale UV-Bestrahlungsstärke am Schneefernerhaus. An der UV-Messstation werden die höchsten Werte der solaren UV-Strahlung im deutschen solaren UV-Messnetz gemessen. Die lokal auftretende Bewölkung beeinflusst die Messdaten stark. 2021 wurde die Station daher um eine Wolkenkamera erweitert. Wissenschaftliche Auswertungen der UV-Messdaten zeigen, dass die Werte 2021 und 2022 im Varianzbereich der Vorjahre liegen mit einer erneut hohen Anzahl extremer UV-Index-Werte.

Abstract: The German Federal Office for Radiation Protection has been measuring the spectral UV irradiance at Schneefernerhaus since summer 2017. The station is part of the solar UV measuring network in Germany. The highest values of solar UV radiation are detected at this UV measuring station. The measurement data are strongly influenced by the locally occurring cloudiness. Therefore, the station was expanded with a cloud camera in 2021. Scientific evaluations of the UV data show that the measured values in 2021 and 2022 are within the range of the previous years, with a high number of extreme UV index values.

# Solare UV-Strahlung

UV-Strahlung kann zu zahlreichen sofortigen sowie später im Leben auftretenden Erkrankungen an Haut und Auge führen. Die schwerwiegendste Folge sind Hautkrebserkrankungen. Klimawandel und der Ozonabbau beeinflussen die am Erdboden ankommende solare UV-Strahlung (Baldermann & Lorenz, 2019). Die Messung und Bewertung der solaren UV-Bestrahlungsstärke sind ein wichtiges Hilfsmittel, um deren gesundheitliche Auswirkungen abzuschätzen und Veränderungen der solaren UV-Strahlung zu untersuchen. Die Messdaten sind zudem für die Umwelt- und Materialforschung von Bedeutung.

# Solares UV-Messnetz

Das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) betreibt gemeinsam mit dem Umweltbundesamt, dem deutschen Wetterdienst und weiteren Institutionen das bundesweite solare UV-Messnetz. Dabei wird in allen Klimazonen Deutschlands die bodennahe solare UV-Strahlung kontinuierlich von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang spektral aufgelöst gemessen und der UV-Index ermittelt (WHO, 2002).

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

#### UV-Messstation am Schneefernerhaus

Für die Klimazone Hochgebirge, in der die höchsten gemessenen UV-Bestrahlungsstärken in Deutschland auftreten, betreibt das BfS seit 2017 an der UFS ein Spektralradiometer (Abb. 1, rechts). Im Vergleich zu Messungen mit Breitbandradiometern liefern die BfS-Messungen mit einem präzisen Spektralradiometer eine erweiterte Datengrundlage für die Analyse der solaren UV-Strahlung und deren wellenlängenabhängigen Wirkungen auf den Menschen.

![](_page_46_Picture_3.jpeg)

Abb.1: Wolkenkamera (links) und Dioden-Array-Spektralradiometer zur Erfassung der solaren UV-Strahlung (rechts).

# Erweiterung Wolkenkamera

Im Sommer 2021 erweiterte das BfS die UV-Messstation mit einer Wolkenkamera (ASI-16 All Sky Imager, Firma: CMS Schreder). Diese Kamera (Abb.1, links) nimmt von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang alle 15 Minuten ein Foto des Himmels mithilfe eines Fischaugenobjektivs auf. Aus den Bildern kann u.a. der Bedeckungsgrad bestimmt werden. Die Daten werden auch dazu genutzt, um kurzzeitige, starke Erhöhungen der UV-Strahlung in den Spektralradiometermessungen vor Ort verifizieren zu können. Diese Überhöhungen treten auf, wenn bei durchbrochener Wolkendecke solare UV-Strahlung an den Wolken reflektiert wird und als zusätzlicher Beitrag am Messgerät ankommt. Abbildung 2 zeigt eine beispielhafte Aufnahme der BfS-Wolkenkamera am 14. April 2022 um 13:55 Uhr.

![](_page_46_Picture_8.jpeg)

Abb.2: Beispielhafte Aufnahme der BfS-Wolkenkamera am Schneefernerhaus vom 14.04.2022 um 13:55 Uhr.

# Daten-Auswertung und Ergebnisse

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

Abbildung 3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der UV-Index-Tagesspitzenwerte in den Jahren 2021 (rot) und 2022 (blau) im Vergleich zur mittleren Häufigkeit der Jahre 2018-2020 (grün). Die schwarzen Klammern symbolisieren die Spannweite der UV-Index-Häufigkeiten in den Jahren 2018-2020. Die Werte der Jahre 2021 und 2022 liegen in der Spannweite der aufgetretenen Häufigkeiten der Jahre 2018-2020. 2021 war erneut eine sehr hohe Zahl an extremen UV-Index Werten zu verzeichnen. UV-Index-Werte von 12 traten in den Jahren 2021 und 2022 nicht auf. Die seltenen, in den Vorjahren detektieren UV-

Index 12-Werte resultierten alle aus dem gleichzeitigen Auftreten von niedrigen Ozonwerten an Tagen im Jahreszeitraum des Sonnenhöchststandes und durchbrochener Bewölkung mit wolkenbedingter Strahlungsüberhöhung zur Mittagszeit.

![](_page_47_Figure_2.jpeg)

Abb.3: Häufigkeitsverteilung der UV-Index-Tagesspitzenwerte in den Jahren 2021 (rot) und 2022 (blau) im Vergleich zur mittleren Häufigkeit der Jahre 2018-2020 (grün).

Der Jahresverlauf der UV-Index-Tagesspitzenwerte ist in Abbildung 4 für die Jahre 2018-2020, 2021 und 2022 nebeneinander nach Monaten dargestellt. An der rechten Achse ist die Erythem-wirksame Bestrahlungsstärke aufgetragen und an der linken Achse der jeweilige UV-Index zu den Messwert-Gruppen.

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

Der erhöhte Monatsmittelwert und Monatsmedian im Juni 2021 kann auf eine hohe Anzahl sonniger Tage in diesem Monat zurückgeführt werden. Die statistische Verteilung der übrigen Monate liegt im Varianzbereich der Vorjahre. Aufgrund der starken Schwankungen der Haupt-Einflussparameter (Bewölkung, Ozonschicht-Dicke und Schneebedeckung im Gebirge) lassen sich von 2018 bis 2022 noch keine Trendaussagen treffen.

![](_page_47_Figure_7.jpeg)

Abb.4: UV-Index-Tagesspitzenwerte der Jahre 2018-2020, 2021 und 2022 gruppiert in Monate mit als Box-Plots dargestellten statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen. (horizontale Linie: Median, Box: Interquartilsabstand, schwarze Linien: Verbindung Mittelwerte, Whisker: minimale bzw. maximale Messwertverteilung innerhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstandes).

Zur Berechnung der EEr-Tagesdosis wird der EEr-Tagesverlauf von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang integriert. Die ermittelten Tagesdosen sind als Standard-Erythem-Dosis (SED) in Abbildung 5 dargestellt. Eine SED entspricht 100 J/m<sup>2</sup> der EEr-Tagesdosis. Die Messwertgruppierung und Darstellung der statistischen Verteilung der Monatswerte erfolgte analog zu Abbildung 4. Zwei zusätzliche Linien zeigen die über das Jahr kumulierte SED (Abb. 5, rechts). Grün hinterlegt ist diesen Linien der Varianzbereich der kumulierten SED-Werte aus den Jahren 2018-2020. Es zeigt sich, dass die kumulierten Werte von 2021 (rote Kurve) und 2022 (blaue Kurve) im Wertebereich der Vorjahre (7400 bis 8250 SED pro Jahr) liegen.

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

Dabei unterscheiden sich die Jahresverläufe von UVA- und UVB-Strahlung (Abb. 6 und 7): Die UVA-Tagesdosis erreicht ihr Maximum im Jahresverlauf im Mai/Juni etwa einen Monat vor der UVB-Tagesdosis im Juni/Juli. Dies kommt dadurch zustande, dass zwar beide Jahresverläufe stark vom Jahresverlauf des Sonnenhöchststandes beeinflusst werden. Die solare UVB-Strahlung am Erdboden wird aber zusätzlich vom Jahresverlauf der atmosphärischen Ozonkonzentration beeinflusst, die über Deutschland ein Maximum im Frühling erreicht und typischerweise bis Herbst abfällt.

Im Vergleich zu den Vorjahren zeigen die Ergebnisse der UVA- und UVB-Tagesdosisberechnung analog zu den SED-Ergebnissen (Abb. 5), dass die Werte der Jahre 2021 und 2022 im Varianzbereich der Vorjahre liegen.

# Literatur:

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

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

![](_page_48_Figure_9.jpeg)

Abb.5: Standard-Erythemdosis-Werte der Jahre 2018-2020, 2021 und 2022 gruppiert nach Monaten mit als Box-Plots dargestellter statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen (→ linke Achse) und über das Jahr kumulierte SED (durchgezogene Linien, → rechte Achse).

![](_page_49_Figure_1.jpeg)

Abb.6: UVA-Tagesdosis-Werte (315 nm – 400 nm) der Jahre 2018-2020, 2021 und 2022 gruppiert nach Monaten mit als Box-Plots dargestellter statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen (→ linke Achse) und über das Jahr kumulierte UVA-Tagesdosis (durchgezogene Linien, → rechte Achse).

![](_page_49_Figure_3.jpeg)

Abb.7: UVB-Tagesdosis-Werte (290 nm – 315 nm) der Jahre 2018-2020, 2021 und 2022 gruppiert nach Monaten mit als Box-Plots dargestellter statistischer Auswertung des jeweiligen Monats links neben den Messwertgruppen (→ linke Achse) und über das Jahr kumulierte UVB-Tagesdosis (durchgezogene Linien, → rechte Achse).

# LIDAR-FERNSONDIERUNG DER ATMOSPHÄRE AM SCHNEEFERNERHAUS

HANNES VOGELMANN

KIT CAMPUS ALPIN KREUZECKBAHNSTR. 19, 82467 GARMISCH-PARTENKIRCHEN E-MAIL: VOGELMANN@KIT.EDU

Zusammenfassung: Neben der Fortsetzung der fast 50-jährigen Langzeitserie zur Bestimmung der Belastung der Stratosphäre mit Aerosolen wurden die im Rahmen der FIRMOS Kampagne (2019) durchgeführten Messungen ausgewertet. Diese dienen als Vorbereitung einer Satelliten-Mission zur Messung der thermischen Abstrahlung der Erde. Darüber hinaus wurde ein neuartiger Titan-Saphir-Laser entwickelt, der im Rahvon ACTRIS für die Lidarmen Fernerkundung der Wasserdampfverteilung in der freien Troposphäre eingesetzt werden soll.

Abstract: While the long-term series (almost 50 years) of lidar measurements of the stratospheric aerosol load was continued, the measurements of the FIRMOS campaign (2019) were evaluated. Its purpose was the preparation of a satellite mission for the measurement of the thermal radiation of the earth. Additionally, a new type of a titanium sapphire laser was developed which will be used for lidar profiling of free tropospheric water vapor within the framework of ACTRIS.

#### Stratosphärische Aerosolmessungen

Die Langzeitserie von Lidar-Messungen der stratosphärischen Aerosolbelastung wird seit nunmehr 47 Jahren fortgesetzt. Seit 2016 erfolgen diese Messungen am Schneefernerhaus. Mit dem sehr kräftigen grünen Laserstrahl (532nm, 12W) sind diese Messungen nicht nur ein weithin sichtbares Symbol für die wissenschaftliche Arbeit auf der Zugspitze, sondern sie liefern auch einen wertvollen Beitrag zur Langzeitbeobachtung der Stratosphäre und zum globalen Messnetz NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change). In den letzten Jahren wurde dabei in auffälliger Häufigkeit und Intensität eine Verschmutzung der unteren Stratosphäre mit Aerosolen aus großen Waldbränden beobachtet (Publikation in Vorbereitung). Im Sommer 2022 wurde bereits eine Kontamination mit Partikeln aus dem gigantischen Ausbruch des submarinen Vulkans Hunga Tonga im Südpazifik gemessen. Dessen Eruptionssäule erreichte im Januar 2022 eine Höhe von 58km. Über der Zugspitze wurden diese Partikel in einer Höhe von 23 km beobachtet (Abb. 1).

![](_page_50_Figure_9.jpeg)

Abb.1: Kontamination der Stratosphäre über der Zugspitze ein halbes Jahr nach Ausbruch des Vulkans Hunga Tonga im Südpazifik.

Die optischen Dicke von Eis- und Mischphasenwolken in den Messungen mit dem Infrarot-Spektrometer und Lidar im direkten Vergleich Zur Vorbereitung einer Satellitenmission mit einem Infrarotspektrometer zur Messung der thermischen Abstrahlung der Erde, wurde im Winter 2019 eine Messkampagne mit dem Prototyp FIRMOS (Far-Infrared Radiation Mobile Observation System) auf der Zugspitze durchgeführt (National Institute of Optics, CNR-INO, Italien). Dabei wurden direkte Vergleiche mit dem einem am Gipfel installierten Ferninfrarotspektrometer (E-AERI) sowie dem Aerosol-Lidar und dem Wasserdampf-Raman-Lidar am Schneefernerhaus durchgeführt. Die räumliche Nähe ermöglichte eine gute Übereinstimmung der untersuchten Eis- und Mischphasenwolken (Zirrus) in der oberen Troposphäre (Abb. 2). Dabei konnte gezeigt werden, dass sich Lidar-Messungen grundsätzlich sehr gut eignen um eine Klimatologie für die aerosoloptische Dicke von dünnen Wolken zu bestimmen, sowie den aerosoloptischen Parameter k, der die Beziehung zwischen Rückstreuung und Extinktion beschreibt. Beides sind wichtige Eingangsparameter, um die mit FIRMOS gemessene Infrarotstrahlung in Beziehung zu modelliertem Strahlungstransport zu setzen.

![](_page_51_Picture_2.jpeg)

Abb.2: Räumliche Anordnung von Infrarotspektrometern am Zugspitzgipfel und Lidar am Schneefernhaus während der FIRMOS Kampagne im Winter 2019.

# Entwicklung eines neuartigen Titan-Saphir-Lasers für die Lidar-Messung von Wasserdampf

Die sehr erfolgreiche Betriebsphase des Wasserdampf-DIALs (Differential Absorption Lidar) von 2007 bis 2015 wurde jäh beendet

durch einen irreparablen Schaden des Titan-Saphir-Lasers als zentraler Bestandteil zur Verstärkung der für diese Technik benötigten Laser-Emission im nahen Infrarot (817nm). Für den Betrieb waren hohe elektrische Spannungen (bis 30kV) nötig, die in der dünnen Luft in fast 3000 m Höhe immer wieder zu Problemen mit Funkenüberschlägen führte. Da derartige Laser-Systeme nicht kommerziell verfügbar sind, wurde in den letzten Jahren am IMK-IFU ein neuartiger Titan-Saphir-Laser entwickelt, der eine vergleichbare mittlere Ausgangsleistung erzielen kann (5W), der jedoch ohne hohe Betriebsspannung auskommt. Hierfür wurde die bereits zuvor am Schneefernerhaus eingesetzte Technik des transversalen Pumpens mit der Technik des Pumpens mit grüner Laserstrahlung aus einem modernen Nd:YAG-Laser kombiniert. Es entstand der erste operationell einsetzbare transversal Laser-gepumpte Titan-Saphir-Laser (Abb. 3) Dies stellt einen großen Fortschritt in der Entwicklung solcher Laser dar. Anders als bei den üblichen, longitudinal gepumpten Titan-Saphir-Lasern, ist durch die neue transversale Pumpgeometrie die Pulsenergie nicht mehr auf wenige mJ beschränkt, womit der Einsatz im leistungsstarken Lidar für große Reichweiten sehr attraktiv wird.

![](_page_51_Figure_7.jpeg)

Abb. 3: Neue transversale Pumpgeometrie beim Titan-Saphir-Laser. Es kann viel mehr Pumpleistung eingebracht werden als beim longitudinalen Pumpen.

# Literatur

Di Natale, G.; Barucci, M.; Belotti, C.; Bianchini, G.; D'Amato, F.; Del Bianco, S.; Gai, M.; Montori, A.; Sussmann, R.; Viciani, S.; Vogelmann, H.; Palchetti, L: Comparison of mid-latitude single- And mixed-phase cloud optical depth from co-located infrared spectrometer and backscatter lidar measurements, Atmos. Meas. Tech., 14 (10), 6749– 6758. <u>doi:10.5194/amt-14-6749-2021</u>, 2021

Palchetti, L.; Barucci, M.; Belotti, C.; Bianchini, G.; Cluzet, B.; D'Amato, F.; Del Bianco, S.; Di Natale, G.; Gai, M.; Khordakova, D.; Montori, A.; Oetjen, H.; Rettinger, M.; Rolf, C.; Schuettemeyer, D.; Sussmann, R.; Viciani, S.; Vogelmann, H.; Wienhold, F. G.: Observations of the downwelling farinfrared atmospheric emission at the Zugspitze observatory, Earth system science data, 13 (9), 4303–4312. doi:10.5194/essd-13-4303-2021, 2021

Vogelmann, H.; Speidel, J.; Perfahl, M.; Trickl, T.: Transverse-pumping approach for a powerful single-mode Ti:sapphire laser for near infrared lidar applications, Applied Optics, 61 (29), 8553–8562. doi:10.1364/AO.463257, 2021

# Danksagung

European Space Agency (FIRMOS project ESA– ESTEC, contract no. 4000123691/18/NL/LF) Bundeswirtschaftsministerium (Zentrale Innovation Mittelstand ZIM, Förderkennzeichen: KF2371)

# KLIMAALPS – KLIMAWANDEL SICHTBAR MACHEN

INGA BECK<sup>1</sup> UND CORNELIA BAUMANN<sup>2</sup> <sup>1</sup>Umweltforschungsstation Schneefernerhaus GmbH, Zugspitze 5, 82475 Zugspitze <sup>1</sup>Energiewende Oberland, Am Alten Kraftwerk 4, 82377 Penzberg E-Mail: 1.beck@schneefernerhaus.de

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

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

# KlimaAlps – das Projekt

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

Mit dem Projekt sollten Potenziale zum Klimaschutz in jedem Einzelnen geweckt werden und der breiten Bevölkerung Anstöße zum nachhaltigen Nachdenken und Handeln gegeben werden. Das Projekt hatte eine Laufzeit von drei Jahren, und wurde im Juli 2022 erfolgreich beendet. Es basierte auf den drei Säulen i) Ausbildung zum "KlimaPädagoge", ii) Etablierung von "KlimaTopen" und iii) Aufbau eines "Klima Netzwerkes".

# KlimaPädagoge

Ein Ziel des Projektes war die Konzeptionierung einer Ausbildung zum zertifizierten KlimaPädagogen, für die die UFS GmbH für die wissenschaftlichen Inhalte verantwortlich war. Die Konzeptionierung wurde erfolgreich abgeschlossen und Pilotläufe durchgeführt. Die Ausbildung besteht aus einem Grundlagenmodul, sowie sechs verschiedenen weiteren Modulen (Abbildung 1). Aus diesen sechs Modulen dürfen die Teilnehmer drei Module frei wählen. Jedes Modul dauert drei Tage. Am Abschluss der Ausbildung steht ein eintägiges Zertifizierungsmodul zur Reflektion und Prüfung. Mehr Informationen gibt es auf der KlimaAlps Homepage (klimaalps.eu) und in einem Erklärungsvideo abrufbar siehe Abbildung 2. Im Juli 2022 wurden die ersten Klima-Pädagogen ausgezeichnet. Die Ausbildung wird nun standartmäßig angeboten.

![](_page_53_Picture_11.jpeg)

Abb.1: Module der KlimaPädagogen Ausbildung.

![](_page_54_Picture_1.jpeg)

Abb.2: QR Code zum Erklärungsvideo ,KlimaPädagoge'

# KlimaTope

KlimaTope sind Orte, an denen der Klimawandel sichtbar gemacht werden kann. Im Rahmen des Projektes wurden sieben solcher KlimaTope an verschiedenen Standorten in Oberbayern, Nordtirol und Oberösterreich errichtet und 2022 eröffnet (Abbildung 3). Mit unterschiedlichen Methoden wird dort der Klimawandel sichtbar gemacht, bzw. kann auf eigene Faust erforscht werden. Die KlimaTope beziehen sich dabei thematisch auf die Module der KlimaPädagogen Ausbildung. Für alle KlimaTope wurden außerdem Begleithefte mit wichtigen Informationen erstellt. Die sieben KlimaTope sind:

- Moor: Entdeckungsreise rund um den Wildsee und Reitermoor

(www.klimaalps.eu/klimatope/reither-moor).

- Hochgebirge: Auf Spurensuche rund um die Berliner Hütte

(www.klimaalps.eu/klimatope/hochgebirge).

- Landwirtschaft: Erlebnisweg im Ammertal (www.klimaalps.eu/klimatope/landwirtschaftammertal).

- Bergwald: Klimafitter Bergwald an der Nordkette

(www.klimaalps.eu/klimatope/bergwald-im-klimawandel).

- Flüsse uns Seen: Dem Klimawandel auf der Spur an der Isar! (www.klimaalps.eu/klimatope/fl%C3%BCsseund-seen-k%C3%B6nigsdorf).

- Mensch und Siedlung: Sinnesreise in Linz (www.klimaalps.eu/klimatope/mensch-undsiedlung-im-klimawandel). -Moor (2): Interaktive Ralley in den Loisach-Kochelsee Mooren (www.klimaalps.eu/klimatope/loisachkochelsee-moore).

![](_page_54_Picture_15.jpeg)

Abb.3: Eröffnung der drei KlimaTope in Oberbayern (Landwirtschaft, Flüsse und Seen, Moor)

# KlimaAlps-Netzwerk

Da nur gemeinsam die Ziele von KlimaAlps erreicht werden können, spielt die Vernetzung der relevanten Akteure eine große Rolle. Der stete Austausch und die Weitergabe von aktuellen Informationen bildet alle Akteure themenspezifisch weiter.

# Action Bound und KlimaBags

Durch das coronabedingte Ausfallen einiger im Projektplan vorgesehener Milestones, wie z. B. Workshops, mussten Alternativen gefunden werden. So wurden unter anderem drei Action Bounds kreiert, sowie sogenannte KlimaBags entwickelt. Diese beinhalten ,to go'- Experimente, um den Klimawandel in pädagogischen Einheiten sichtbar zu machen und stehen den KlimaPädagogen in den drei Landkreisten zur freien Verfügung.

Action Bounds wurden für das KlimaTop Moor in Benediktbeuern, dem KlimaTop Flüsse und Seen in Königsdorf sowie den Schneefernerhaus entwickelt. Letzteres (,Hilf Gletschi beim Überleben', Abbildung 4) wurde bereits mehrfach ausgezeichnet und bei der 10-Jährigen Jubiläumsfeier von Action Bound als Showcase vorgestellt.

![](_page_55_Picture_1.jpeg)

Abb.4: Action Bound , Hilf Gletschi beim Überleben'.

# Literatur

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

Beck, I.: Sustainable education for the youngest – The implementation of new technologies to foster the awareness for environmental problems for elementary and secondary school. In .... [Eds]. Routledge 2023. In print.

Beck, I., Baumann, C.: KlimaAlps – Klimawandel sichtbar machen. In UFS GmbH (Ed.) Wissenschaftliche Resultate 2019/ 2020. 2021.

Keller, L., Parth S., Kubich S., Baumann, C., Wachsmann, G., Heufelder A., Barkmann, R., Beck, I., Armbruster, S. und Frisch, R.: Klimawandel sichtbar machen – Das Projekt KlimaAlps. In. GAIA 30/3 (2021): 204 – 206. 2021.

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

# Danksagung

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

# 50 Jahre CO2 Messungen an den Stationen Schauinsland und Westerland

CEDRIC COURET<sup>1</sup>, FRANK MEINHARDT<sup>2</sup>, BRYAN HELLACK<sup>3</sup>, ANTJE HOHEISEL<sup>4</sup> UND MARTINA SCHMIDT<sup>4</sup>

<sup>1</sup>UMWELTBUNDESAMT, ZUGSPITZE 5, 82475 ZUGSPITZE <sup>2</sup> UMWELTBUNDESAMT, SCHAUINSLANDWEG 2, 79254 HOFSGRUND <sup>3</sup> UMWELTBUNDESAMT, PAUL-EHRLICH-STRASSE 29, 63225 LANGEN <sup>4</sup> UNIVERSITÄT HEIDELBERG, IM NEUENHEIMER FELD 229, 69120 HEIDELBERG

E-MAIL: CEDRIC.COURET@UBA.DE

Zusammenfassung: Kohlendioxid (CO2) ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas in der Atmosphäre. Seit 1972 führt das Umweltbundesamt an den Stationen Schauinsland (Schwarzwald) und Westerland (Sylt) Langzeitmessungen des atmosphärischen CO2 durch. Dies sind die längsten kontinuierlichen CO2-Zeitreihen in Europa, weltweit gibt es nur wenige Stationen mit längeren Messreihen, wie z.B. Mauna Loa (Hawaii), wo die Beobachtungen 1958 begannen. Auf der Zugspitze wurde die erste CO2-Messung vor über 40 Jahren, 1981, durchgeführt.

Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) ist das wichtigste vom Menschen verursachte Treibhausgas in der Atmosphäre. Messungen von Lufteinschlüssen in Eisbohrkernen zeigen, dass die vorindustrielle CO<sub>2</sub> Konzentration bei nur 278 ppm lag. Aktuelle Messungen aus den internationalen Messnetzen bestimmen eine mittlere globale CO<sub>2</sub> Konzentration von 415.7 ppm für das Jahr 2021, was einen Anstieg von fast 50% bedeutet.

Langzeitmessungen von atmosphärischem CO2 werden an den Messstationen Schauinsland (Schwarzwald) und Westerland (Sylt) des Umweltbundesamtes schon seit 1972 durchgeführt. Diese sind somit die längsten kontinuierlichen CO2 Zeitreihen in Europa, und nur wenige Stationen weltweit, wie z.B. Mauna Loa (Hawaii), die 1958 mit Messungen begann, können längere Zeitreihen aufweisen. Während der letzten fünf Jahrzehnte hat sich die Messtechnik sowohl in der Genauigkeit als auch in der Messfrequenz weiterentwickelt. Während am Anfang die CO2 Konzentration über eine Stunde gemittelt und mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 ppm gemessen wurde, so haben die heutigen Geräte schon eine zeitliche Auflösung von wenigen Sekunden mit einer Genauigkeit, die besser ist als 0.1 ppm. Seit 2021 ist das Umweltbundesamt mit den Stationen Schauinsland, Westerland und Zugspitze der Europäischen Forschungsinfrastruktur ICOS (Integrated Carbon Observation System) beigetreten. Ziel von ICOS ist es, umfassende, qualitativ hochwertige und standardisierte Treibhausgasmessungen in der Atmosphäre zu erheben, um eine faktenbasierte Bewertung von Veränderungen und von der Wirksamkeit der europäischen Emissionsminderungsmaßnahmen zu ermöglichen. Hierfür sind die präzisen Langzeitmessungen des Umweltbundesamtes von herausragender Bedeutung.

In Abbildung 1 sind die Monatsmittelwerte der CO<sub>2</sub> Konzentration (mole fraction) an den Stationen Schauinsland (grün) und Westerland (blau) von 1972 bis 2022 dargestellt. Zum Vergleich ist die CO<sub>2</sub> Konzentration an der Reinluftstation Mauna Loa (Hawaii) in rot und der Langzeittrend von Mauna Loa in schwarz eingezeichnet. Alle drei Zeitreihen zeigen ähnliche Verläufe mit einem immer stärker werdenden Anstieg sowie den typischen jahreszeitlichen Variationen. Die Jahresmittelwerte der CO2 Konzentration an der Station Schauinsland sind in dem dargestellten Zeitraum von 330.4 auf 419.5 ppm angestiegen. Das entspricht einer Zunahme von 27%. Dieser Anstieg der CO2 Konzentration in der Atmosphäre wird durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe und durch die Änderung der Landnutzung verursacht. Die CO2 Kurven zeigen aber noch einen weiteren charakteristischen Verlauf, der den jährlichen Vegetationszyklus in der Nordhemisphäre widerspiegelt. Im Frühling und Sommer, nehmen die Pflanzen CO2 auf, was sich dann in einem Rückgang der CO2 Konzentration zeigt. Die niedrigsten CO2 Konzentrationen werden dementsprechend im August gemessen und die höchsten im März. Je nach Lage der Station variiert dieser Jahresgang etwas in seiner Amplitude sowie seinem zeitlichen Verlauf.

![](_page_57_Figure_2.jpeg)

Abbildung 1: Monatsmittelwerte der CO2 Konzentration an den Stationen Westerland (blau), Schauinsland (grün), Mauna Loa, Hawaii (rot) und Trend (schwarz). Quelle CO2 Daten Mauna Loa: scrippsco2.ucsd.edu, <u>https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html</u>.

In Abbildung 2 sind die jährlichen CO2 Anstiegsraten an der Station Schauinsland dargestellt. Die mittlere Anstiegsrate über die letzten 50 Jahre beträgt 1.78 ppm pro Jahr und ist vergleichbar mit Anstiegsraten anderer Stationen weltweit. Die Schwankungen der jährlichen Anstiegsraten sind hauptsächlich auf Änderungen der Austauschflüsse zwischen Atmosphäre, Vegetation und Ozeanen zurückzuführen. Allerdings zeigen die horizontalen Linien in der Graphik, dass die mittlere Anstiegsrate von 1.4 ppm pro Jahr für die Jahren 1972 bis 1999 (schwarz) deutlich kleiner ist als diejenige für den Zeitraum 2000 bis 2022 von 2.3 ppm pro Jahr (grün). Dieser deutliche Anstieg in der Wachstumsrate läuft parallel zu dem Anstieg der globalen CO2 Emissionen durch menschliche Aktivitäten. Die kontinuierlichen CO2 Zeitreihen der Stationen Schauinsland und Westerland gehen in zahlreiche wissenschaftliche Studien und Veröffentlichungen ein, insbesondere wegen der frühen Messungen in den 70er und 80er Jahren, als es nur sehr wenige europäische Messtationen für CO2 gab. Zusätzlich zu den langen CO2 Zeitreihen werden auch Messungen von weiteren Klimagasen am Schauinsland und in Westerland durchgeführt. Methan (CH4) wird am Schauinsland seit 1992, Lachgas (N2O) seit 1996 und Schwefelhexafluorid (SF6) seit 2001 gemessen. Diese Daten werden in Klimamodellen genutzt, um Emissionen zu bestimmen (Inverse Modellierung).

![](_page_57_Figure_6.jpeg)

Abbildung 2: Jährliche CO2 Anstiegsraten an der Station Schauinsland (grau) und diese über drei Jahre geglättet (grün). Die horizontalen Linien repräsentieren die mittleren CO2 Anstiegsraten für die Jahre vor und nach 2000.

# POLLEN- UND SPORENKONZENTRATION IN ALPINER UMGEBUNG UND ALLERGISCHE SYMPTOME

MARIA P. PLAZA<sup>1</sup>, ATHANASIOS DAMIALIS<sup>2</sup>, DANIELA BAYR<sup>3</sup>, FRANZISKA KOLEK<sup>1</sup>, STEFANIE GILLES<sup>1</sup> UND

CLAUDIA TRAIDL-HOFFMANN<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL MEDICINE, FACULTY OF MEDICINE, UNIVERSITY OF AUGSBURG, NEUSAESSER STR. 47, 86156 AUGSBURG, GERMANY

<sup>2</sup>TERRESTRIAL ECOLOGY AND CLIMATE CHANGE, DEPARTMENT OF ECOLOGY, SCHOOL OF BIOLOGY, FACULTY OF SCIENCES, ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI, THESSALONIKI, GREECE

> <sup>3</sup>INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL MEDICINE, HELMHOLTZ CENTRE MUNICH, NEUSAESSER STR. 47, 86156 AUGSUBRG, GERMANY E-MAIL: MARIA.PLAZA@TUM.DE

# Zusammenfassung:

Wir untersuchten, wie häufig weiträumige Pollentransporte in der alpinen Umwelt vorkommen und ob es sich dabei um Hochrisiko-Allergiefälle handeln könnte. Die räumlich-zeitlichen Muster von Pollen und Pilzsporen wurden in der Luft des Schneefernerhauses gemessen und mit den realen Symptomen einer Allergikerkohorte in Verbindung gebracht. Unsere Ergebnisse zeigten, dass unter geeigneten Umweltbedingungen, vor allem Luftdruck und Niederschlag, systematische Episoden hoher Aeroallergenkonzentrationen an einem solchen hochgelegenen Standort auftreten können, die auf einen ständigen Langstreckentransport zurückzuführen sind und bei sensibilisierten Personen allergische Symptome verursachen.

# Abstract

We investigated how frequent long-range pollen transport incidents are in alpine environment and if they may actually comprise high-risk allergy cases. Spatio-temporal patterns of pollen and fungal spores were sampled in the air of Schneefernerhaus and integrated with real-life symptoms in an allergic human cohort. Our results showed that under appropriate environmental conditions, mainly atmospheric pressure and precipitation, systematic episodes of high aeroallergen concentrations may occur at

# such a high-altitude location derived from consistent long-distance transport and caused allergic symptoms in sensitised individuals.

Tausende von Pflanzenarten geben jedes Jahr ihre Pollen in die Luft ab. Die Prävalenz von Pollenallergien in der europäischen Bevölkerung wird auf 40 % geschätzt, was sie zu einem der häufigsten Allergene in Europa macht (Damialis et al., 2019b; Traidl-Hoffmann, 2021). Selbst geringe Pollenkonzentrationen in der Luft können bei hochsensiblen Personen bereits Allergiesymptome auslösen. Mehrere Studien sagen voraus, dass wärmere Temperaturen und ein späterer Frostbeginn aufgrund des Klimawandels dazu führen werden, dass die Pollensaison früher im Jahr beginnt (Rojo et al., 2021). Darüber hinaus werden wärmere Temperaturen es den Pflanzen ermöglichen, in höheren Breitengraden zu überleben, was die Art der vorhandenen Pollen verändert und die Pollensaison für einige Pflanzen und damit die Exposition empfindlicher Personen verlängern kann (D'Amato et al., 2020).

Die Höhenvegetation umfasst seltene und endemische Arten, die besonders empfindlich auf den globalen Wandel reagieren, weshalb es wichtig ist, allergene Pflanzen und ihre Pollen in diesen extremen Umgebungen zu untersuchen. Diese Standorte können auch einen Hinweis auf die entfernte Herkunft von Biopartikeln geben, da es kaum bewaldete Vegetation gibt und die Pollen dieser Taxa sehr wahrscheinlich aus weit entfernten Quellen stammen.

Ziel dieser Studie war es, die biologische Vielfalt und die räumlich-zeitlichen Häufigkeitsmuster von Pollen und luftgetragenen Pilzsporen in einem hochgelegenen alpinen Gebiet zu untersuchen, um den Ursprung von Bioaerosolen zu ermitteln. Parallel dazu wurde dort eine Kohorte allergischer Menschen aufgebaut, um zu testen, ob zufällige oder aus der Ferne transportierte Aeroallergene tatsächlich assoziierte Symptome verursachen können.

Die Untersuchungen wurden 2016 an der alpinen Forschungsstation UFS durchgeführt. Luftgetragene Pollen wurden mit tragbaren volumetrischen Hirst-Fallen zwei Wochen lang im Juni dreimal täglich überwacht, und eine Woche vor und nach dem Aufenthalt wurden Pollendaten in niedrigen Breitengraden (Augsburg) referenziert. Darüber hinaus wurde der mögliche Ursprung einiger Pollenarten mit Hilfe des HYSPLIT-Rückwärts-Trajektorienmodells und hochgenauer meteorologischer Daten ermittelt und mit den Angaben der Probanden zu ihren Symptomen verknüpft.

Die Exposition gegenüber Bioaerosolen war auf der Zugspitze im Vergleich zu Augsburg signifikant geringer (Damialis et al., 2019a; Kolek et al., 2021), was insgesamt zu einem Rückgang der allergischen Symptome führte. Unsere Ergebnisse zeigen jedoch, dass unter bestimmten meteorologischen Bedingungen, vor allem bei steigenden Temperaturen, höherem Luftdruck und geringem Niederschlag, systematische Episoden hoher Aeroallergenkonzentrationen auch in hochgelegenen, vegetationsarmen Gebieten auftreten können. In der UFS wurden in nur 4 Tagen mehr als 1.000 Pollenkörner m3 Luft gemessen (Abbildung 1). Das entwickelte Zirkulationsmodell bestätigte, dass die lokal nachgewiesenen Bioaerosole aus einem Ferntransport von Pollen stammen könnten, der aus einer Entfernung von mehr als 1000 km stammt, zumindest aus der Schweiz, Nordwestfrankreich und sogar darüber hinaus (Abbildung 2), ähnlich wie in anderen Studien (Ghasemifard et al., 2020). Diese von so weit her transportierten Pollen können die allergischen Symptome erklären, die bei sensibilisierten Personen mit einer bemerkenswerten Rate von 87 % während des Studienzeitraums beobachtet wurden (Abbildung 3).

![](_page_59_Figure_6.jpeg)

Abb: 1. Tägliche Pollenkonzentrationen der häufigsten Pollenarten während des Untersuchungszeitraums (13. Juni bis 23. Juni 2016) an der UFS auf der Zugspitze (Bayern, Deutschland), in 2.650 m Höhe über NN.

Daher kann der weiträumige Transport von Aeroallergenen zu einer hohen Pollenkonzentration führen, selbst in einer alpinen Umgebung mit spärlicher, wenig exponierter und "risikoarmer" alpiner Vegetation. Damialis et al. (2017) haben die Existenz von Pollen- und Sporenwolken in Richtung Grenzschicht nahegelegt, was auf die Notwendigkeit einer dreidimensionalen atmosphärischen Modellierung hinweist und nicht auf die allgemeine Annahme, dass Bioaerosole hauptsächlich in der Nähe von Vegetationsquellen vorkommen.

![](_page_60_Figure_1.jpeg)

Abb. 2. NOAA HYSPLIT MODEL Backward trajectories 48 h ending at 12 UTC during Jun 14-24, 2016, using GFS Meteorological Data over Zugspitze, Germany.

![](_page_60_Figure_3.jpeg)

In Anbetracht der klimatischen Veränderungen, die in den kommenden Jahren eintreten werden, ist es außerdem von entscheidender Bedeutung zu wissen, wie sich Pollen in der Atmosphäre bewegen und wie weit bzw. hoch Gebieten wie den Alpen und welche Veränderungen wir daher in der Vegetation und welche möglichen negativen Auswirkungen wir auf die allergische Bevölkerung haben werden.

**Abb. 3**. Symptome und einige Umweltbedingungen während des Untersuchungszeitraums in der UFS-Station a) Gesamtsymptome der Patienten [log]

b) Pollenarten mit der höchsten Abundanz [log der Gesamtzahl]

c) Prozentualer Anteil der HYSPLIT-Trajektorien mit Flughöhen  $\geq$  200m AGL

#### Literatur

D'Amato, G., Chong-Neto, H.J., Monge Ortega, O.P., Vitale, C., Ansotegui, I., Rosario, N., Haahtela, T., Galan, C., Pawankar, R., Murrieta-Aguttes, M., Cecchi, L., Bergmann, C., Ridolo, E., Ramon, G., Gonzalez Diaz, S., D'Amato, M., Annesi-Maesano, I., 2020. The effects of climate change on respiratory allergy and asthma induced by pollen and mold allergens. Allergy 75, 2219–2228. https://doi.org/10.1111/all.14476 Damialis, A., Häring, F., Gökkaya, M., Rauer, D., Reiger, M., Bezold, S., Bounas-Pyrros, N., Eyerich, K., Todorova, A., Hammel, G., Gilles, S., Traidl-Hoffmann, C., 2019a. Human exposure to airborne pollen and relationships with symptoms and immune responses: Indoors versus outdoors, circadian patterns and meteorological effects in alpine and urban environments. Science of The Total Environment 653, 190–199.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.366 Damialis, A., Traidl-Hoffmann, C., Treudler, R., 2019b. Climate Change and Pollen Allergies, in: Marselle, M.R., Stadler, J., Korn, H., Irvine, K.N., Bonn, A. (Eds.), Biodiversity and Health in the Face of Climate Change. Springer International Publishing, Cham, pp. 47–66.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-02318-8\_3 Ghasemifard, H., Ghada, W., Estrella, N., Lüpke, M., Oteros, J., Traidl-Hoffmann, C., Damialis, A., Buters, J., Menzel, A., 2020. High post-season Alnus pollen loads successfully identified as longrange transport of an alpine species. Atmospheric Environment 231, 117453.

https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117453 Kolek, F., Plaza, M.P., Charalampopoulos, A., Traidl-Hoffmann, C., Damialis, A., 2021. Biodiversity, abundance, seasonal and diurnal airborne pollen distribution patterns at two different heights in Augsburg, Germany. Atmospheric Environment 267, 118774.

https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118774 Rojo, J., Oteros, J., Picornell, A., Maya-Manzano, J.M., Damialis, A., Zink, K., Werchan, M., Werchan, B., Smith, M., Menzel, A., Timpf, S., Traidl-Hoffmann, C., Bergmann, K.-C., Schmidt-Weber, C.B., Buters, J., 2021. Effects of future climate change on birch abundance and their pollen load. Global Change Biology 27, 5934–5949. https://doi.org/10.1111/gcb.15824 Traidl-Hoffmann, C., 2021. Allergologie. In: Traidl-Hoffmann, C., Schulz, C. Herrmann, M. Simon, B. (Hrsg.), Planetary Health. Klima, Umwelt und Gesundheit im Anthropozän. 52-59. Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.

#### Danksagung

Wir danken dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, das die Studie in Teilen gefördert hat.

![](_page_62_Picture_0.jpeg)

Umwelt Forschungsstation Schneefernerhaus

Umweltforschungsstation Schneefernerhaus GmbH Zugspitzstraße 5 82475 Zugspitze