

# ARSCliSys projects

## completed after 2005

### **RT#1: GNSS radio occultation for climate monitoring, diagnostics, and processes .... 3**

NEWCLIM - A New Method for Generating Radio Occultation Climatologies .....	3
CLIMRECORD - Reference Climate Record from Radio Occultation for Tracking Climate Change and Evaluating FY-3 and Spire New Missions.....	3
ATROMSAF1 - Austrian Federated Activity with the EUMETSAT ROM SAF Consortium during the CDOP-3 First-half Period .....	5
EOPCLIMTRACK - Evaluation of Reference Occultation Processing Excess Phase Data for Preparing Climate Change Tracking .....	9
AROSA - Assimilation of Radio Occultation from Commercial Satellites over Austria.....	13
VERTICLIM - Atmospheric Vertical Structure and Trends in Climate Data .....	15
OPSCIMVALUE - Value-added Products and Validation of Occultation Processing System Re-processing Data for Climate Monitoring .....	18
OPSCIMPROP - Occultation Processing System for Cal/Val and Climate: Level 1 Processing with Integrated Uncertainty Propagation .....	19
OPSCIMTRACE - Occultation Processing System for Cal/Val and Climate: Advanced Key Algorithms and SI-traceable Processing.....	21
OPSGRAS - Reference Occultation Processing System for GRAS on MetOp and other Past and Future RO Missions .....	22
MMValRO - Multi-Mission Validation by Satellite Radio Occultation; MMValRO-Extension .....	24
DYNOCC - El Niño Dynamics and Effects Observed with Radio Occultation.....	25
SysSon - A Systematic procedure to develop Sonification.....	27
CONSYDER - CONvective Systems DETection and analysis using Radio occultations.....	29
BENCHCLIM - Benchmark Climatologies from Radio Occultation Data .....	30
TRENDEVAL - Klimatrends und Modevaluation mittels Radio-Okkultation .....	32
AV-BENDAPP - Feasibility of generating long-term RO refractivity climatologies without using statistical optimization .....	34
BAROCLIM - Bending Angle Radio Occultation Climatology: Further development of BAROCLIM and implementation in ROPP .....	35
CLIMROCC - Climate Monitoring with Radio Occultation Data .....	35
INDICATE - Indicators of Atmospheric Climate Change from Radio Occultation .....	37
CHAMPCLIM - Radio Occultation Data Analysis Advancement and Climate Change Monitoring based on the CHAMP/GPS Experiment .....	39
START ATCHANGE - Advanced Sounding & Modeling for Atmospheric Change Analysis .....	39

<b>RT#2: Climate and hydrology change monitoring and analysis at regional-local scale</b>	<b>41</b>
.....	
WEGDEMO - Demonstrationsprojekt WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach	41
PP-WegenerNet - Pilotprojekt WegenerNet: Klimastationsnetz Südoststeiermark	42
FWF-DK Climate Change	43
<b>RT#3: Support next-generation global observing system for monitoring the climate</b>	<b>44</b>
.....	
AEXPWIND - Trace Gas Retrieval and Performance of Wind and Greenhouse Gas Profiling in the IRDAS-EXP/ACCURATE Context	44
ACCU-Clouds - Preparing a Key Dimension of ACCURATE Climate Utility: Cloud Sensing and Greenhouse Gas Profiling in Cloudy Air	45
IRDAS-EXP - SWIR Long Range Differential Absorption Experiment for Trace Gas Measurements	46
ACTLIMB - Study of the Performance Envelope of Active Limb Sounding of Planetary Atmospheres	47
IRDAS - Differential Absorption Spectroscopy in the SWIR for Greenhouse Gas Monitoring using Coherent Signal Sources in a Limb Sounding Geometry	49
ACCURAID - Aid to ACCURATE Climate Satellite Mission Preparations for backing the Austrian Lead Role	50
ACEPASS - LEO-LEO Occultation Characterisation Study	51
ACECLIM - Climate Impact Study	51
<b>RT#1 and RT#3: Joint system development for occultation and climate analysis</b>	<b>54</b>
.....	
ESA-ProdexCN2 - Radio and Optical Occultation: EGOPS6 System Development	54
EOPSCLIM - End-to-end Occultation Processing System and Climate Monitoring Service: MetOp GRAS and ACCURATE Integration	55
ESA-ProdexCN1 - Advanced Topics in Radio Occultation Modeling and Retrieval	57
ESA-Prodex - Preparation of the EGOPS Software for the Inclusion of Galileo Signals	58
<b>Complementary projects: other occultation techniques and advanced IR sounding</b>	<b>59</b>
GADEM - Galileo Atmospheric Data Enhancement Mission	59
MULTICLIM - From CHAMP towards Multi-Satellite Climate Monitoring based on the METOP and COSMIC Missions	59
GOMOS-HRTP - Development of Algorithms for the Estimation of High Resolution Temperature, Pressure and Density Profiles from GOMOS	61

# **RT#1: GNSS radio occultation for climate monitoring, diagnostics, and processes**

## **NEWCLIM - A New Method for Generating Radio Occultation Climatologies**

Project leader: Julia Danzer

Projekt team: Ulrich Foelsche (Senior Sci. Adviser)

Partners: Dr. Hans Gleisner, Danish Meteorological Institute (DMI),  
Copenhagen, DK  
Dr. Sean Healy, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts  
(ECMWF), Reading, UK

Sponsor: FWF

Duration: Sep. 2016 - Dec. 2019

Monitoring the atmosphere to gain accurate and long-term stable records of essential climate variables (ECVs) such as temperature is the backbone of atmospheric and climate science and observation from space is the key to obtain such data globally in Earth's atmosphere. GPS radio occultation (RO) provides a unique tool for such monitoring in the free atmosphere as it enables to tie RO-derived ECVs and their uncertainty—in particular temperature and pressure—to fundamental time standards and to their unique long-term stability and narrow uncertainty.

Mainly within the ASAP-9 and ASAP-10 projects OPSCLIMPROP and OPSCLIMTRACE, the Wegener Center currently develops a new Reference Occultation Processing System OPS that realizes this full chain from RO raw data to ECVs with integrated uncertainty propagation and that will have a first re-processing data record 2001-2015 available by end 2015. The OPSCLIMVALUE project will quantitatively evaluate the quality of these novel OPS re-processing data, including of key value-added products and of the integrated uncertainty estimates, in order to establish to what degree the new RO data record outperforms current records and to check the reliability of the new uncertainty estimates.

This will result in the first-time availability of a carefully validated SI-traceable RO data record, including evaluation of uncertainty estimates and of value-added products of high climate science utility, for the benefit of calibration/validation and climate applications.

## **CLIMRECORD - Reference Climate Record from Radio Occultation for Tracking Climate Change and Evaluating FY-3 and Spire New Missions**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Projekt team: Marc Schwärz (Project Manager, Senior Scientist)  
Florian Ladstädter (Postdoc Scientist)  
Veronika Proschek (Postdoc Scientist)

	Josef Innerkofler (Scientist) Barbara Angerer (Data Scientist) Erich Wappis (Data Scientist) Armin Leuprecht (Senior Scientist Adviser) Andrea Steiner (Senior Scientist Adviser)
Partners:	National Space Science Center/Chinese Academy of Sciences (NSSC/CAS), Beijing, CN, Spire Global Inc. (Spire); Data Provision and Advice
Sponsor:	FFG-ALR (Österr. Forschungsförderungsgesellschaft, Agentur für Luft- und Raumfahrt); ASAP-14 (Austrian Space Applications Programme 14th Call)
Duration:	July 2018 - May 2020

Monitoring the atmosphere to gain accurate and long-term stable records of key climate variables such as temperature is the backbone of atmospheric and climate science and observation from space is the key to obtain such data globally in Earth's atmosphere. GPS radio occultation (RO) is a unique method for such monitoring in the atmosphere and CLIMRECORD provided valuable research contributions towards best use of RO for climate monitoring.

With the CLIMRECORD project, the Wegener Center of the University of Graz (WEGC) built on the predecessor ASAP-13 project EOPCLIMTRACK and its quality evaluation of radio occultation (RO) excess phase data. The latter can sensitively indicate temperature and moisture changes due to climate change and also are the basis for climate quality of retrieved atmospheric profiles from the new FY-3 and Spire RO missions. These missions are the FengYun-3 (FY-3) series of Chinese polar-orbiting operational meteorological satellites, with the GNSS occultation sounder (GNOS) as RO instrument on board, and the emerging CubeSat RO constellation of Spire Global, Inc.

In this context, the overall goal of CLIMRECORD was to exploit the climatological utility of WEGC's excess phase data for climate change signal tracking and to evaluate the quality of monthly RO data records derived from the FY-3 and Spire missions for climate uses. This overall aim was formulated into two specific project objectives as follows:

- 1) Exploit the unprecedented altitude-geolocated RO excess phase data of Wegener Center's Reference Occultation Processing System (rOPS), taking advantage of co-estimated uncertainties, for demonstrating a novel approach of long-term tracking of climate change;
- 2) Using the excess phase data of the new FY-3 and Spire missions, evaluate the climate quality of the atmospheric profiles from these missions, based on monthly RO data from rOPS and data providers and with focus on the challenging high and low altitude ranges.

Overall the work demonstrated the excess phase data to be promising for tracking climate change, given their small uncertainty and independence from background information, which makes the signal-to-noise ratio favorable for detecting small climate change signals during a comparatively short time of less than two decades. Likewise, the climate-quality evaluation of the FY-3 and Spire data helped towards "phasing in" these new RO data sources for climate needs of EUMETSAT's ROM SAF ([www.romsaf.org](http://www.romsaf.org)), i.e., to facilitate later operational adoption.

Die Beobachtung der Atmosphäre mit Hilfe genauer und langzeitstabiler Daten wichtiger Klimavariablen, wie etwa der Temperatur, ist von großer Bedeutung in den Atmosphären- und Klimawissenschaften und Beobachtungen aus dem Weltraum sind der Schlüssel um solche globalen Daten der Erdatmosphäre zu erhalten. GPS Radiookkultation (RO) ist eine einzigartige Messmethode für ein besonders genaues Klimamonitoring in der Atmosphäre und CLIMRECORD hat wertvolle Forschungsfortschritte zur bestmöglichen Nutzung von RO für Klimamonitoring beigetragen.

Das CLIMRECORD Projekt des Wegener Centers der Universität Graz (WEGC) baute auf das ASAP-13 Vorläuferprojekt EOPCLIMTRACK und dessen Evaluation von RO Excess Phase-Daten auf. Die Excess Phase-Daten können wegen ihrer Proportionalität zur signalwegintegrierten Refraktivität sehr gut Temperatur- und Wasserdampfänderungen abbilden, was für Klimamonitoring besonders wertvoll ist. Weiters sind sie die Basis für die Berechnung von Atmosphärenprofilen mit hoher klimatologischer Qualität aus den neuen FY-3 und Spire RO Missionen. Diese neuen Missionen sind die FengYun-3 (FY-3) Serie von chinesischen operationellen Wettersatelliten, mit dem GNSS Occultation Sounder (GNOS) an Bord, und die wachsende CubeSat RO Konstellation von Spire Global, Inc.

In diesem Kontext war das übergeordnete Ziel von CLIMRECORD, die klimatologische Qualität der Excess Phase-Daten für Klimawandel-Tracking direkt auf Basis dieser Daten zu nutzen sowie die Qualität von Monatsmittel-Klimadaten der FY-3 und Spire Missionen für Klimaanwendungen zu evaluieren. Dieses übergeordnete Ziel wurde durch das Bearbeiten der folgenden zwei primären Teilziele erreicht:

- 1) Nutzung der RO Excess Phase-Daten des Reference Occultation Processing System (rOPS) des WEGC, unter Berücksichtigung auch der mit-geschätzten Messungenauigkeiten, um ein innovatives Klimawandel-Tracking direkt auf Basis dieser Daten zu demonstrieren;
- 2) Evaluation der klimatologischen Qualität der Atmosphärenprofildaten der neuen FY-3 und Spire Missionen unter Nutzung der Excess Phases auf Basis von RO Monatsmittel-Daten von rOPS und Data Providern, mit Schwerpunkt auf die obere Stratosphäre und die Troposphäre.

Insgesamt hat die Arbeit gezeigt, dass die RO Excess Phase-Daten aufgrund des sehr kleinen Beobachtungsfehlers und der Unabhängigkeit von Hintergrundinformation sehr vielversprechend für eine Nutzung zur Untersuchung und Detektion von Klimaänderungssignalen sind. Ebenso hat die Evaluierung der Klimabeobachtungsqualität von FY-3 und Spire Daten wertvoll beigetragen, um diese neuen RO Datenquellen in Zukunft auch für klimarelevante Anwendungen im Rahmen des EUMETSAT ROM SAF ([www.romsaf.org](http://www.romsaf.org)) in operationellem Kontext einsetzen zu können.

## **ATROMSAF1 - Austrian Federated Activity with the EUMETSAT ROM SAF Consortium during the CDOP-3 First-half Period**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Projekt team: Marc Schwärz (Project Manager, Senior Scientist)  
Florian Ladstädter (Postdoc Scientist)  
Veronika Proschek (Postdoc Scientist)  
Christian Pock (Scientist Adviser)

Jakob Schwarz (Scientist Adviser)  
Andrea Steiner (Senior Scientist Adviser)

Partners: EUMETSAT Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility (ROM SAF) - Danish Meteorological Institute (DMI), Copenhagen, DK; Federated Activity Partners

Sponsor: FFG-ALR (Österr. Forschungsförderungsgesellschaft, Agentur für Luft- und Raumfahrt); ASAP-13 (Austrian Space Applications Programme 13th Call)

Duration: Mar. 2017 - May 2019

At the Wegener Center we employ the unique SI-traceable data from GNSS radio occultation (RO) to monitor the fundamental thermodynamic state of the atmosphere as determined by air density, pressure, temperature, and tropospheric water vapor. These are fundamental variables for tracking climate change and in fact fundamental to all weather and climate processes. Since 2013 the Wegener Center, supported by international partners, developed the new Reference Occultation Processing System rOPS. The rOPS implements SI-traceable atmospheric profiling by RO with integrated uncertainty propagation, to provide benchmark-quality reference RO data for calibration/validation and climate research, complementary to near-real-time data for weather prediction.

The Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility (ROM SAF), part of the SAF Network of EUMETSAT and over 2017-2021 in its Continuous Development and Operations Phase 3 (CDOP-3), generates operational RO data for assimilation into numerical weather prediction systems, re-processed climate data records, a software package for RO processing (ROPP) and weather prediction applications, as well as performs operational monitoring of RO data streams. Its research and development activities are primarily geared towards developing new GNSS RO data products and improving existing products.

With the ATROMSAF1 project the Wegener Center and ROM SAF now joined forces and entered a phase of intensified R&D partnership via a Federated Activity under CDOP-3, aiming to foster high-quality RO data processing and climate applications. The overall aim was to analyze and improve the quantification and understanding of structural uncertainty in RO Level 2 processing from cross-evaluation of Wegener Center's rOPS and ROM SAF's ROPP data products as well as to understand the level of consistency, and potential remaining inconsistencies, in long-term climate data records.

This overall aim was worked on and achieved along two specific project objectives as follows:

1. Cross-evaluation between rOPS and ROPP Level 2 data products from bending angles (L2a processing input) towards atmospheric profiles (L2b processing output), for close analysis of L2a structural uncertainty, including one dedicated focus on non-spherical effects, and close linkage of L2b error covariance specifications plus initial ROPP L2b processing analysis, benefitting from the explicit co-estimation of uncertainties by the rOPS;
2. Consistency evaluation of ROPP re-processing climate data records over 2001 to 2016 by using Wegener Center's RO data as well as independent validation datasets (passive infrared limb-sounder data from MIPAS and SABER and high-

quality Vaisala radiosonde data), with a focus to identify, assess, understand and potentially mitigate remaining inconsistencies.

Figures 1 and 2 below illustrate the processing systems used and example results of the work.

Overall the ATROMSAF1 project, which was complemented by EUMETSAT Visiting Scientist activities on correction of residual ionospheric errors and on improving Level 2b processor interlinkage between rOPS and ROPP, was of substantial benefit both for improving ROM SAF's data products and ROPP usage as well as Wegener Center's rOPS towards further enhanced uncertainty quantification and reliability of its reference RO data. The results achieved also facilitated the preparation and follow-on proposal success for continuing as of 2020 with the ATROMSAF2 project as another joint Federated Activity for advancing RO and its weather and climate applications.

Figure 1. ROM SAF's ROPP and Wegener Center's rOPS input/output data flows were tightly coupled for the purpose of the ATROMSAF1 structural uncertainty studies, illustrated here for the setup of the Level 2a uncertainty analysis that enabled step-by-step quantification and insights from bending angle to atmospheric profile data levels. (Source: Schwärz et al., Wegener Center, 2019)

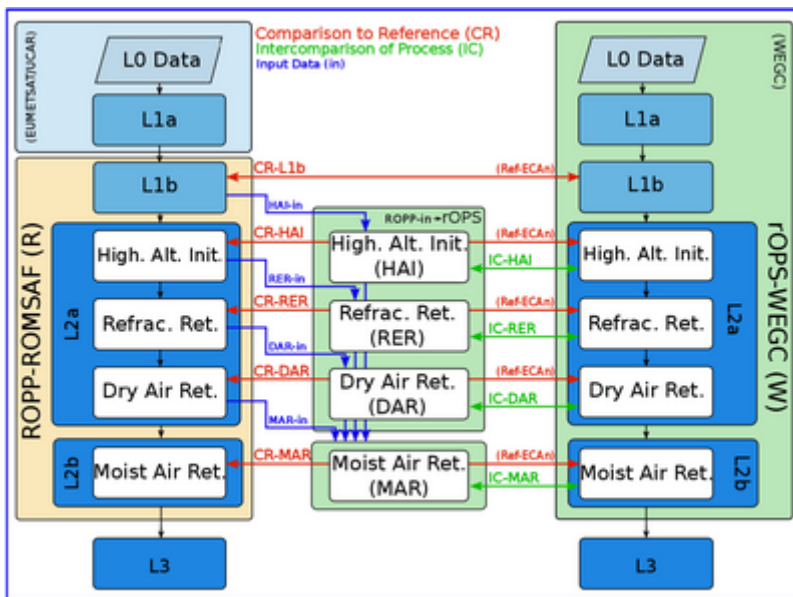
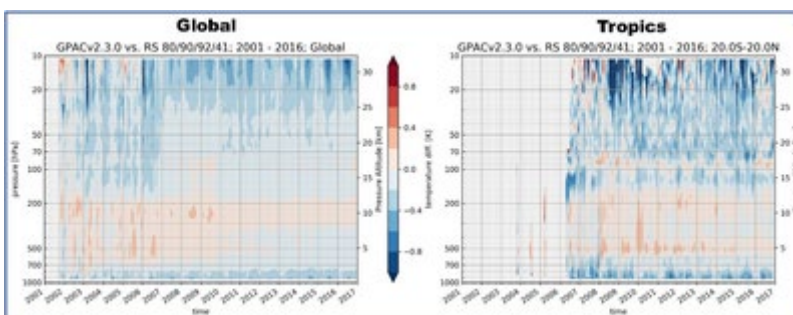


Figure 2. A validation of ROM SAF's RO-derived temperature climate data record 2001-2016 (GPAC) with Wegener Center's radiosonde (RS) record over the troposphere and lower stratosphere indicates both the general high quality of the RO record and remaining small inconsistencies of the datasets that provide valuable insight to detailed properties. (Source: Schwärz et al., Wegener Center, 2019)



Am Wegener Center werden Daten von GNSS Radio-Okkultation (RO) verwendet, um den fundamentalen Zustand der Atmosphäre, bestimmt durch die Variablen Luftdichte, Druck, Temperatur und Wasserdampf, zu beobachten. Diese gehören zu den Schlüsselvariablen, um den Klimawandel und darüber hinaus vielfältige Klima- und Wetterprozesse zu verfolgen. Seit 2013 wurde am Wegener Center, unterstützt von vielen internationale Partnern, ein neues Reference Occultation Processing System (rOPS) entwickelt. Dieses rOPS ermöglicht, die Schlüsselvariablen aus RO Messungen durch hochgenaue Prozessierung mit integrierter Unsicherheitsfortpflanzung zu berechnen, um hochwertige Referenzdaten für Kalibration/Validation und Klimabeobachtung bereit zu stellen, komplementär zu den Nahezu-Echtzeit-Daten für die Wettervorhersage.

Die Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility (ROM SAF), ein Teil des SAF Netzwerkes von EUMETSAT und im Zeitraum 2017-2021 in seiner sog. Continuous Development and Operations Phase 3 (CDOP-3), generiert operationelle GNSS RO Daten für die Assimilation in Wettervorhersage-Modellen, re-prozessiert Klimadatenätze, entwickelt ein Softwarepaket für die RO Prozessierung (ROPP) und stellt operationelles Monitoring von RO-Datenströmen bereit. Der Fokus der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ROM SAF liegt hauptsächlich auf der Entwicklung neuer RO Datenprodukte und der Verbesserung existierender Produkte.

Mit dem ATROMSAF1 Projekt haben Wegener Center und ROM SAF nun ihre Kräfte gebündelt und ihre F&E Partnerschaft mittels einer gemeinsamen "Federated Activity" mit dem Ziel intensiviert, die Prozessierung und Klimaanwendbarkeit von hochqualitativen RO Daten fördern. Das übergeordnete Ziel war dabei die Quantifizierung und das Verständnis der strukturellen Unsicherheiten in der RO Level 2 Prozessierung mittels Vergleich der Wegener Center rOPS und ROM SAF ROPP Systeme zu verbessern sowie auch den Grad an Konsistenz, und mögliche Restinkonsistenzen, in Langzeit-Klimadatenätzen besser zu verstehen.

Dieses übergeordnete Ziel wurde durch das Bearbeiten der folgenden zwei Teilziele erreicht:

1. Gegenseitige Evaluierung von rOPS und ROPP Level 2 Datenprodukten vom Brechungswinkel (L2a Prozessierungs-Input) bis zu Atmosphärenprofilen (L2b Prozessierungs-Output), für eine genaue Analyse der strukturellen Unsicherheiten (mit einem Fokus auch auf nicht-sphärische Effekte), welche auch von der integrierten Unsicherheitsschätzung im rOPS profitiert.
2. Konsistente Evaluierung des re-prozessierten ROPP Klimadatenatzes von 2001 bis 2016 durch die Nutzung der Wegener Center RO Daten und weiterer unabhängiger Validierungs-Datenätze (Infrarot-Limbsounder-Daten von MIPAS und SABER, hochqualitative Vaisala-Radiosondendaten), mit dem Fokus restliche Inkonsistenzen zu identifizieren, einzuschätzen, und potentiell zu korrigieren.

Die Abbildungen 1 and 2 unten illustrieren die verwendeten Prozessierungssysteme sowie Beispielergebnisse.

Insgesamt hat das ATROMSAF1 Projekt, welches durch EUMETSAT Visiting Scientist-Aktivitäten zur Korrektur von ionosphärischen Restfehlern und zu Level 2b-Prozessierungserweiterungen ergänzt wurde, einen substanziellen Nutzen sowohl für Verbesserungen von ROM SAF Datenprodukten und die ROPP Software als auch für das rOPS für weiter verbesserte Quantifizierung von Unsicherheiten und für zuverlässigere RO-Referenzdaten gebracht. Die erzielten Resultate erleichterten auch die Vorbereitung und



den Folgeprojekterfolg um ab 2020 mit dem ATROMSAF2 Projekt eine weitere "Federated Activity" zum Voranbringen von RO für Wetter- und Klimanutzungen gemeinsam durchzuführen.

Abbildung 1. Die ROM SAF ROPP and Wegener Center rOPS Input/Output-Datenströme wurden zum Zweck der ATROMSAF1 Structural Uncertainty-Studien eng gekoppelt, hier illustriert für das Setup der Level 2a Uncertainty-Analyse, die Schritt-für-Schritt eine klare Quantifizierung vom Level Brechungswinkel bis zu Atmosphärenprofilen bietet. (Quelle: Schwärz et al., Wegener Center, 2019)

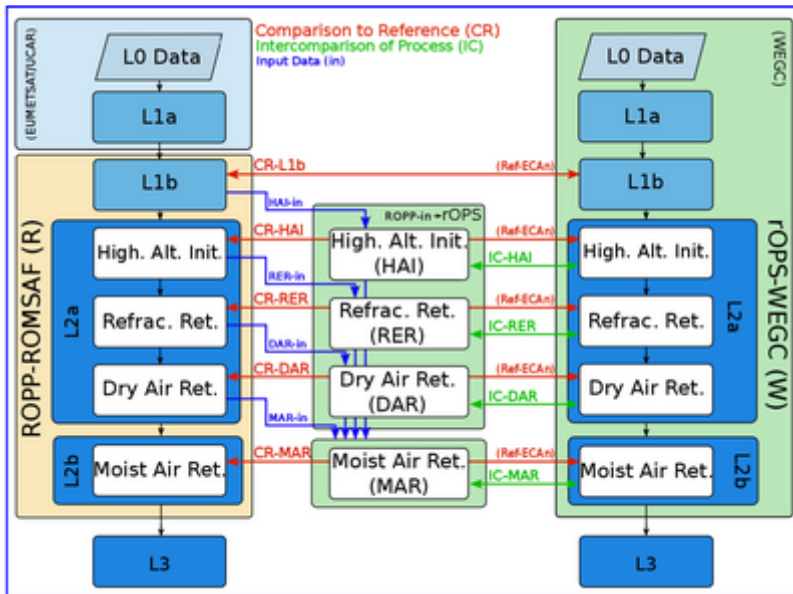
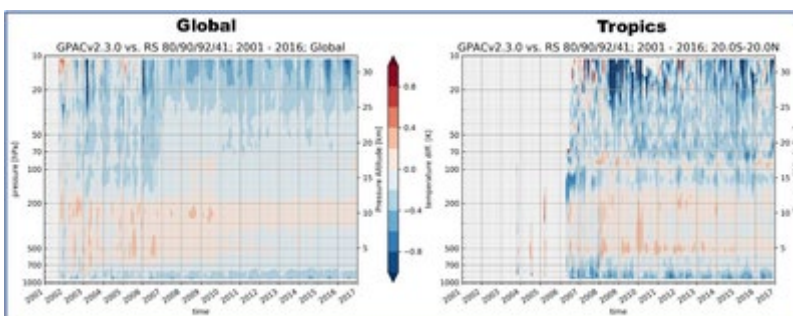


Abbildung 2. Eine Validation der ROM SAF RO-basierten Temperatur-Klimadatensätze 2001-2016 (GPAC) mit Wegener Center Radiosonden-Datensätzen (RS) über die Troposphäre und untere Stratosphäre zeigt sowohl die generell hohe Qualität des RO-Datensatzes als auch kleine Rest-Inkonsistenzen zwischen den Datensätzen, die wertvolle Einsicht in Detailcharakteristika geben. (Quelle: Schwärz et al., Wegener Center, 2019)



## EOPCLIMTRACK - Evaluation of Reference Occultation Processing Excess Phase Data for Preparing Climate Change Tracking

Project leader:Gottfried Kirchengast

Projekt team: Marc Schwärz (Project Manager, Senior Scientist)  
Barbara Angerer (Scientist)  
Josef Innerkofler (Scientist)

Florian Ladstädter (Postdoc Scientist Adviser)  
Armin Leuprecht (Senior Scientist Adviser)

Partners: National Space Science Center/Chinese Academy of Sciences (NSSC/CAS), Beijing, CN, Spire Global Inc. (Spire); Data Provision and Advice

Sponsor: FFG-ALR (Austrian Research Promotion Agency - Austrian Aeronautics and Space Agency); ASAP-13 (Austrian Space Applications Programme 13th Call)

Duration: Feb. 2017 - May 2019

Monitoring the atmosphere to gain accurate and long-term stable records of essential climate variables (ECVs) such as temperature or related variables is the backbone of atmospheric and climate science. Earth observation from space is the key to obtain such data globally in atmosphere. GNSS radio occultation (RO) provides a unique tool for such monitoring in the free atmosphere as it enables to tie RO-derived ECVs and their uncertainty to fundamental time standards and to their unique long-term stability and narrow uncertainty. In previous projects, the Wegener Center has developed and initially validated the new Reference Occultation Processing System (rOPS) that realizes this full chain from RO raw data via atmospheric excess phase data, corresponding to along-ray integrated refractivity, to derived ECVs with integrated uncertainty propagation.

With the EOPCLIMTRACK project, the Wegener Center has built on the rOPS development efforts of the previous projects, with the overall aim to boost the availability of new RO mission data and the quality of these data. Towards this overall goal, the project aimed to strengthen the rOPS Level 1a excess phase data, which by their nature as integrated refractivity react sensitively to temperature and moisture changes due to climate change, through preparing ingestion and performing excess phase data quality evaluation for promising RO data from new missions not yet used internationally so far. These new missions include the FengYun-3 (FY-3) series of Chinese polar-orbiting operational meteorological satellites, with the GNSS occultation sounder (GNOS) as RO instrument on board, and the emerging CubeSat RO constellation of Spire Global, Inc.

The overall aim was worked on and achieved along two specific project objectives as follows:

1. Expansion of the Level 1a data basis due to integration of the new FY-3/GNOS and Spire RO mission data into the rOPS Level 1a processing, ingesting GPS orbit data and the Level 0 data of the new missions for computing Level 1a excess phase data of highest possible quality;
2. Evaluation of the rOPS Level 1a excess phase data quality by a co-location analysis approach using a range of test months of FY-3/GNOS and Spire RO event data and close collocations with the high-quality RO event data of the European operational MetOp-A/-B satellites.

Figures 1 and 2 below illustrate the methodological approach and example results of the work.

The EOPCLIMTRACK project helped to further strengthen the climate-quality rOPS RO data records, by enabling ingestion of the new FY-3/GNOS and Spire RO data and by carefully evaluating their quality against the European MetOp data directly at the excess

phase data level. This holds high promise for climate uses due to the generally small excess phase uncertainty and independence from background information.

Figure 1. Wegener Center Reference Occultation Processing System (rOPS) Level 1a system modeling and data analysis system and the diverse input and output data flows of the Level 1a processor for computing excess phase data. (Source: Innerkofler et al., Wegener Center, 2019)

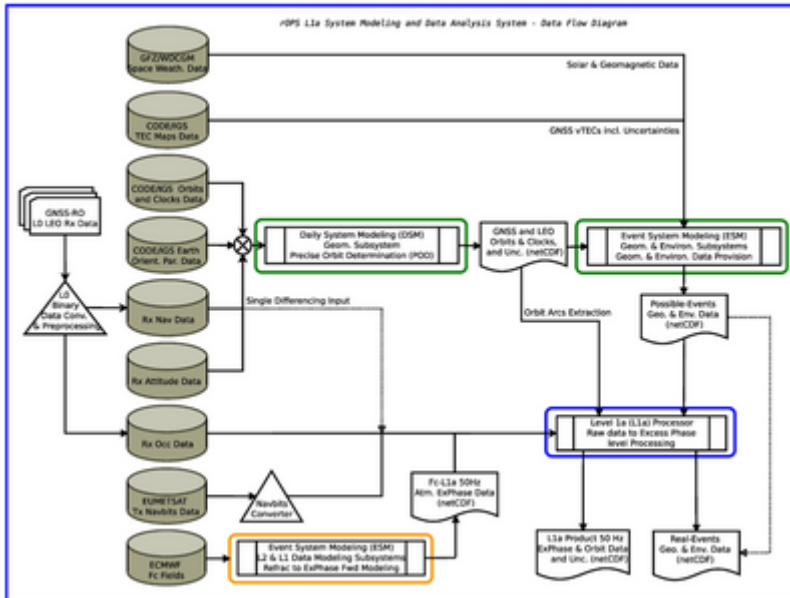
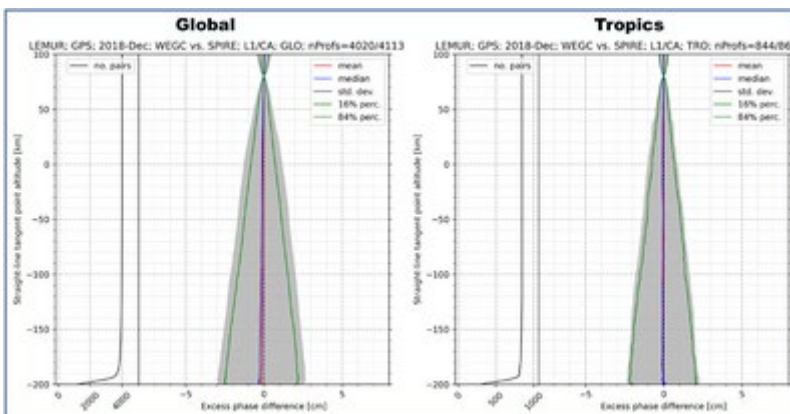


Figure 2. Intercomparison of Level 1a excess phase data from the Spire RO events ensemble of December 2018, independently processed from Level 0 data by Wegener Center rOPS and Spire Level 1a processors, shows high consistency. (Source: Innerkofler et al., Wegener Center, 2019)



Die Beobachtung der Atmosphäre mit Hilfe genauer und langzeitstabiler Daten wichtiger Klimavariablen ("Essential Climate Variables", ECVs), wie etwa der Temperatur, ist von großer Bedeutung in den Atmosphären- und Klimawissenschaften. Beobachtungen aus dem Weltraum sind der Schlüssel um solche globalen Daten der Erdatmosphäre zu erhalten. GNSS Radiookkultation (RO) ist eine einzigartige Messmethode für die Beobachtung der freien Atmosphäre, da sie ECVs und deren Messunsicherheiten mit dem zugrundeliegenden Zeitstandard sowie dessen Langzeitstabilität verbindet und damit eine direkte Aneichung an fundamentale Zeitstandards ermöglicht. Das Wegener Center hat dazu in Vorläuferprojekten das neue Reference Occultation Processing System (rOPS) entwickelt und erstvalidiert, welches die vollständige Prozessungskette von RO

Rohdaten über Phasendaten und Refraktivität bis zu ECVs mit integrierter Unsicherheitsfortpflanzung umgesetzt.

Das EOPCLIMTRACK Projekt hat auf diese Vorläuferarbeiten und rOPS-Entwicklungen mit dem übergeordneten Ziel aufgesetzt, RO Daten von neuen bisher international noch nicht in Auswertungen integrierten Satellitenmissionen bereit zu stellen und deren Qualität zu evaluieren. Dabei ging es insbesondere darum, die Qualität der rOPS Level 1a Excess Phase-Daten zu stärken und zu validieren, die wegen ihrer Proportionalität zur signalwegintegrierten Refraktivität sehr gut Temperatur- und Wasserdampfänderungen abbilden können, was für Klimamonitoring besonders wertvoll ist. Die neuen Satellitenmissionen im Fokus sind die FengYun-3 (FY-3) Serie von chinesischen operationellen Wettersatelliten, mit dem GNSS Occultation Sounder (GNOS) an Bord, und die wachsende CubeSat RO Konstellation von Spire Global, Inc.

Das übergeordnete Ziel wurde durch das Bearbeiten der folgenden zwei primären Teilziele erreicht:

1. Erweiterung der rOPS Level 1a Excess Phase-Datenbasis durch Integration der neuen RO Daten der FY-3/GNOS und Spire RO Missionen in die rOPS Level 1a Prozessierung, ausgehend von den GPS-Orbitdaten und Level 0 Daten der neuen Missionen, zur Berechnung von Excess Phase-Daten bestmöglicher Qualität;
2. Evaluation der Qualität der rOPS Level 1a Excess Phase-Daten auf Basis von Kolokationsanalysen mittels einer Reihe von Testmonaten von FY-3/GNOS und Spire RO Event-Daten und sorgfältiger Kolokation mit den hochqualitativen RO Event-Daten der Europäischen MetOp-A/-B Satelliten.

Die Abbildungen 1 and 2 unten illustrieren den methodischen Zugang und Beispielergebnisse.

Das Projekt hat geholfen, den Klimaforschungsnutzen der rOPS RO Datensätze durch die Integration der Prozessierung der neuen FY-3/GNOS und Spire RO Daten sowie durch deren sorgfältige Validierung mittels der europäischen MetOp-Daten weiter zu stärken. Das ist für weiterführende klimabezogene Anwendungen vielversprechend, da die Excess Phasen-Daten aufgrund des sehr kleinen Beobachtungsfehlers und der Unabhängigkeit von Hintergrundinformationen für die Untersuchung von Klimaänderungen besonders gut geeignet sind. EOPCLIMTRACK lieferte damit einen wertvollen Beitrag zur Vorbereitung der mögliche Detektion statistisch signifikanter Klimaänderungen im RO Langzeitdatensatz auf Basis von Excess Phase-Daten.

Abbildung 1. Das Wegener Center Reference Occultation Processing System (rOPS) Level 1a System Modeling and Data Analysis System und die diversen Input- und Output-Datenströme des Level 1a Prozessors zur Berechnung von Excess Phase-Daten. (Quelle: Innerkofler et al., Wegener Center, 2019)

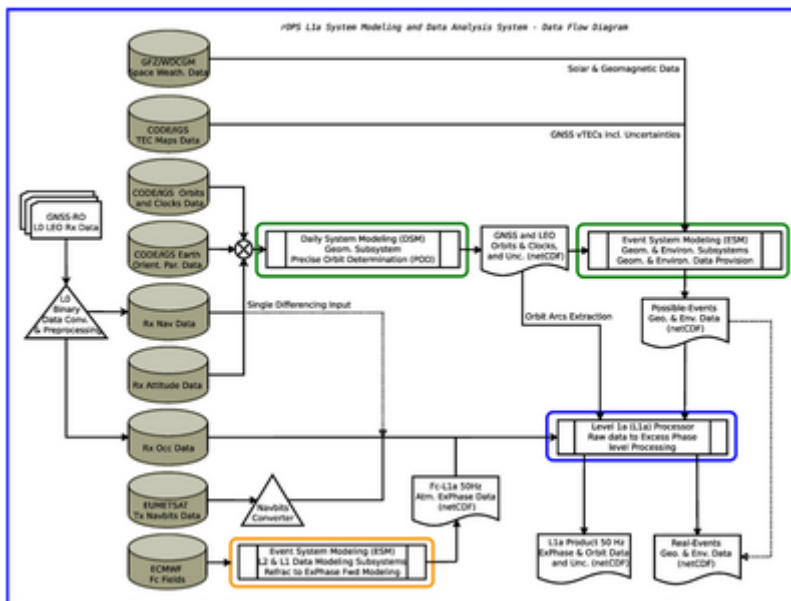
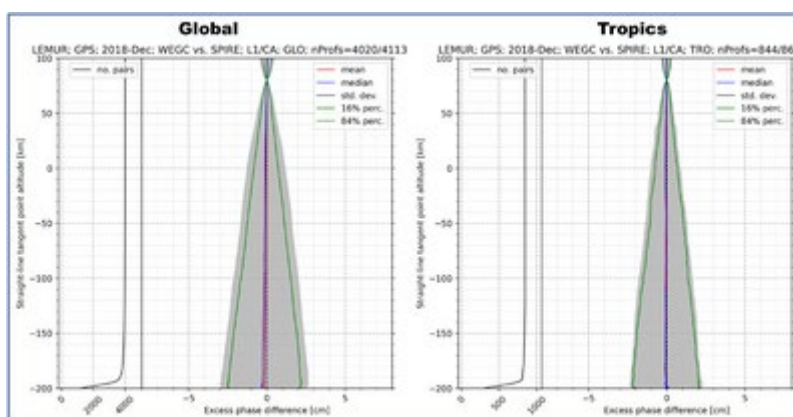


Abbildung 2. Ein Vergleich der Level 1a Excess Phase-Daten des Spire RO Event-Datenensembles vom Dezember 2018, unabhängig voneinander prozessiert durch die Wegener Center rOPS und Spire Level 1a Prozessoren auf Basis der Level 0 Daten, zeigt hohe Konsistenz. (Quelle: Innerkofler et al., Wegener Center, 2019)



## AROSA - Assimilation of Radio Occultation from Commercial Satellites over Austria

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Marc Schwärz (Senior Scientist)

Partners: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), Vienna, AT; Lead

Sponsor: FFG-ALR (Austrian Research Promotion Agency - Austrian Aeronautics and Space Agency); ASAP-13 (Austrian Space Applications Programme 13th Call)

Duration: May 2017 - Apr. 2019

Austria depends significantly on high quality, highly resolved weather forecasts, especially due to its complex orography, manifold landscapes and special meteorologically induced

natural hazards in the alpine area and its important economic branches agriculture and tourism, which are strongly impacted by weather. The success of these forecasts is determined by a precise definition of the current state of the 3D atmosphere with highly resolved measurements due to the nonlinear nature of atmospheric processes.

Radio occultation (RO) methods exploit the bending of a radio signals on their way through the atmosphere by measuring the Doppler shift between a global navigation satellite system (GNSS) and a low earth orbit satellite (LEO) and their precise positions. The refraction of the signals enables atmospheric bending angle measurements that carry accurate information about temperature and moisture at high vertical resolution of a few hundred meters, including at stratospheric altitudes where conventional observations (aircraft and radio soundings) are relatively scarce. Such RO data now become available at increasing spatial density from commercially launched and maintained satellites of the company Spire Inc.

Within the scope of this exploratory project it was hence the aim to utilize the new occultation measurements of Spire Inc. to assimilate them for the first time into the high-resolution numerical weather prediction system AROME operated by ZAMG over Austria. So far, less dense RO data have been used for initializing some global weather forecast models (such as Arpège, GME, ECMWF-IFS), but for the high-resolution case of this project the adequacy of the observation operator simulating the measured data is rather crucial for success. Since the Spire Inc. RO data then became available at sufficient spatial density somewhat too late for this exploratory project's timeframe, the analyses were carried out with comparable data of similar quality, in particular from the RO satellite constellation mission COSMIC.

The analyzed RO data were first pre-processed and evaluated for the model use (derivation of the "bending angles" and data quality assessment through validation) and then a "bending angle" error model was derived (observation error covariance matrix). For the data assimilation initially a 2D bending angle observation operator was available in AROME, which was developed for coarser resolutions. Based on case studies and a test period, the possible impact of the new observations on the analysis performance was studied and the potential of an operational application of the data within the AROME system over the Alpine region and Austria assessed. Through thinning of the other (non-RO) observations also the evaluation of the impact on similar forecasts in data poor regions outside Europe was possible

Österreich ist aufgrund seiner komplexen Orographie, vielfältiger Naturräume, den speziellen wetterinduzierten Naturgefahren im alpinen Gelände sowie den wichtigen aber stark wetterabhängigen Wirtschaftszweigen Tourismus und Landwirtschaft auf qualitativ hochwertige, räumlich hochaufgelöste Wettervorhersagen in hohem Maße angewiesen. Aufgrund der nichtlinearen Vorgänge in der Atmosphäre hängt deren Erfolg entscheidend von der korrekten Definition des dreidimensionalen Atmosphärenzustands mittels hochaufgelöster Messungen ab.

Bei der Radio-Okkultationsmessung wird aus der Dopplerverschiebung eines Funksignals zwischen Satelliten zur globalen Positionsbestimmung (GNSS) und Empfangssatelliten in einem niedrigen Erdorbit (sogenannte LEOs), das die Erdatmosphäre durchläuft, und den Satellitenpositionen auf die Beugung der Radiowellen geschlossen. Dabei wird eine hohe vertikale Beobachtungsauflösung für atmosphärische Brechungswinkelmessungen, die sehr genaue Temperatur- und Wasserdampf-Information enthalten, im Bereich von einigen

hundert Metern erreicht. Dies gilt insbesondere auch in höheren Atmosphärenschichten, wo die Zahl konventioneller Beobachtungen (Radiosonden und Flugzeuge) relativ gering ist. Diese Messungen werden in zunehmender Zahl durch neu gestartete, privatwirtschaftlich betriebene Satelliten der Firma Spire Inc. verfügbar.

Im Rahmen dieses Sondierungsprojekts war daher das Ziel, die neuen Okkultationsmessungen der Firma Spire Inc erstmalig in das numerische Vorhersagesystem AROME der ZAMG über Österreich zu assimilieren. Bisher wurden weniger dichte Okkultationsdaten vor allem schon zur verbesserten Initialisierung von globalen numerischen Wettervorhersagemodellen genutzt (wie Arpège, GME, ECMWF-IFS), wobei bei höheren Modellauflösungen wie in diesem Projekt bei AROME der verwendete Beobachtungsoperator zur Simulation der Messgröße im Modell für den Erfolg wichtig ist. Da die Daten von Spire Inc. für dieses Sondierungsprojekt dann noch nicht in ausreichender Dichte rechtzeitig verfügbar waren, wurde die Analyse mit Analogdaten ähnlicher Qualität insbesondere von der Okkultations-Satellitenkonstellation COSMIC durchgeführt.

Die analysierten Okkultationsdaten wurden zunächst für die Modellierungsnutzung aufbereitet und evaluiert (Herleitung des „bending angles“ und Überprüfung der Datenqualität durch Validation) und dann ein „bending angle“ Fehlermodell abgeleitet (observation error covariance matrix). Für die Assimilation der Daten stand zunächst ein 2D-„Bending Angle“-Beobachtungsoperator zur Verfügung, welcher für gröbere Modellauflösungen entwickelt wurde. Im Projekt wurde eruiert inwieweit eine Verbesserung des Beobachtungsoperators für höhere Auflösungen möglich ist. Anhand von Fallstudien und einer Testperiode wurde mittels AROME Testläufen das Potenzial dichter Beobachtungen auf das Modell abgeschätzt und die Möglichkeit einer zukünftigen operationellen Nutzung über dem Alpenraum und Österreich ausgelotet. Durch Ausdünnung der übrigen Beobachtungen war auch die Abschätzung des Einflusses auf die Vorhersage in datenärmeren Regionen außerhalb Europas möglich.

## **VERTICLIM - Atmospheric Vertical Structure and Trends in Climate Data**

Project leader: Andrea K. Steiner

Project team: Florian Ladstädter (PostDoc Scientist)  
Hallgeir Wilhelmsen (PhD Student)  
Barbara Angerer (Scientist)  
Ulrich Foelsche (Senior Sci. Adviser)  
Gottfried Kirchengast (Senior Sci. Adviser)  
Barbara Scherllin-Pirscher (PostDoc Sci. Adviser)

Partners: Advisers:  
L. Haimberger, Dep. of Meteorology and Geophysics, Univ. of Vienna, Austria  
Partners: G. C. Hegerl, School of GeoSciences, Univ. of Edinburgh, UK  
Y.-H. Kuo, UCAR/NCAR, Boulder, CO, USA  
K. B. Lauritsen, DMI, Copenhagen, Denmark  
C. S. Long, CPC/NOAA College Park, USA  
A. Mannucci, JPL/CalTech, Pasadena, CA, USA

C. Mears, RSS Santa Rosa, USA  
G. Stiller, KIT Karlsruhe, GER  
K. Taylor, PCMDI Livermore, USA  
A. von Engeln, EUMETSAT, Darmstadt, GER  
J. Wickert, German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, GER

Sponsor: FWF - Austrian Science Fund

[Final Project Report](#) (pdf 138 kB)

[Publications, Presentations and Further Outcome](#) (pdf 202 kB)

Observations of the Earth's surface temperature provide undeniable evidence of a changing climate. While surface temperature trends are in accordance amongst different groups, there are still unresolved issues regarding upper-air climate trends. Though overall agreement on a global warming of the troposphere and a cooling of the stratosphere is given, the uncertainty in trend rates and their vertical structure is large and limits the ability to draw robust and consistent inferences about climate trends. This is stated as a key issue in the recent IPCC report implying the need for data with better accuracy.

Addressing this need is challenging since uncertainties exist in observations, reanalyses, and climate model output. Observations from weather satellites and balloons have several shortcomings since they were not intended to serve climate monitoring needs, which demand accurate and long-term stable measurements. In atmospheric reanalyses observations are integrated into models, containing effects of both observation and model errors. In current climate models discrepancies to observations are evident in vertical thermal structure and trends, especially in the upper troposphere and stratosphere. Radio Occultation (RO) provides independent observations with beneficial characteristics in this context. The traceability to time measurements with precise atomic clocks assures a long-term stable and consistent data record with global coverage. Accuracy, low structural uncertainty, and use for climate studies have been demonstrated. High quality and vertical resolution offer the distinct advantage for assessing the vertical thermodynamic structure.

The central aim of the project VERTICLIM is the exploration and evaluation of the vertical structure of atmospheric climate variability and climate trends, their regional imprints, and relevant processes from the surface to the stratopause. Focus periods are 2002-2015 with dense data set coverage for rigorous short-term study, and 1979-2015 with good coverage for complementary longer-term study. New insights will be gained on recent climatic changes in the troposphere and stratosphere by systematically exploiting upper-air records from observations and reanalyses, and climate models.

Evaluating the RO record as reference and the inter-consistency of other high-quality observations such as MIPAS, SABER, radiosondes, and of AMSU/SSU bulk temperatures, will provide essential new information on the climate quality of upper-air observations. Exploration of atmospheric key characteristics, including annual cycle, tropopause/stratopause dynamics, and climate variability modes will reveal key strengths, weaknesses, and improvement potential of reanalyses and models. Also new insights into the vertical structure of trends and their regional imprints in the atmosphere compared to the surface will be gained from RO and best-evaluated records.

Overall we aim with VERTICLIM to draw a picture of unprecedented quality and rigor of the vertical structure of atmospheric climate variability and trends and to reveal key skills of



upper-air observations, reanalyses, and climate models with RO as reference climate data record.

Temperaturbeobachtungen der Erdoberfläche geben eindeutige Hinweise auf eine Klimaänderung. Während Trends der Bodentemperatur verschiedener Datenzentren gut übereinstimmen, gibt es immer noch ungelöste Fragen zu Klimatrends der freien Atmosphäre. Einigkeit herrscht über die globale Erwärmung der Troposphäre und die Abkühlung der Stratosphäre, große Unsicherheiten bestehen jedoch bezüglich Trendraten und ihrer vertikalen Struktur. Daher können nur beschränkt robuste und konsistente Aussagen über Klimatrends gemacht werden. Dieses Schlüsselproblem laut neuestem IPCC Report verlangt nach Daten von besserer Genauigkeit.

Dies ist eine große Herausforderung da Unsicherheiten in Beobachtungen, Reanalysen, und Klimamodellen bestehen. Datensätze von Wettersatelliten und Ballons haben Schwächen, da sie nicht zur Klimabeobachtung konzipiert wurden. Diese erfordert genaue und langzeitstabile Messungen. In Reanalysen werden Beobachtungsdaten in Modelle integriert und beinhalten sowohl Beobachtungs- als auch Modellfehler. Aktuelle Klimamodelle zeigen Unterschiede zu Beobachtungen bezüglich thermischer Struktur und Trends, besonders in der oberen Troposphäre und Stratosphäre.

Die Radio-Okkultation (RO) liefert Beobachtungen mit vorteilhaften Eigenschaften in diesem Zusammenhang. Zeitmessungen mittels hochgenauer Atomuhren garantieren langzeitstabile und konsistente Datensätze mit globaler Abdeckung. Genauigkeit, geringe strukturelle Unsicherheit und die Verwendbarkeit für Trendstudien wurden demonstriert. Beste Qualität und vertikale Auflösung sind von klarem Vorteil für die Untersuchung der vertikalen thermodynamischen Struktur.

Hauptziel des Projektes VERTICLIM ist die Erforschung und Evaluierung der vertikalen Struktur von atmosphärischer Variabilität und Klimatrends, deren regionale Ausprägung und relevante Prozesse von der Erdoberfläche bis zur Stratopause. Im Fokus sind 2002-2015 mit dichter Datenverfügbarkeit für Kurzzeitstudien, sowie 1979-2015 mit guter Datenbedeckung für komplementäre Langzeitstudien. Neue Einblicke in jüngste Klimaänderungen in der Troposphäre und Stratosphäre werden durch die systematische Exploration von Beobachtungen, Reanalysen und Klimamodellen gewonnen.

Die Evaluierung von RO als Referenzdatensatz und anderen hochqualitativen Beobachtungsdaten, wie MIPAS, SABER, Radiosonden, sowie AMSU/SSU Schichttemperaturen, wird neue Informationen über die Klimaqualität atmosphärischer Beobachtungsdaten liefern. Die Erforschung verschiedener Charakteristika wie Jahresgang, Tropopausen/Stratopausendynamik und Klimavariabilität wird Stärken, Schwächen und Verbesserungspotential von Reanalysen und Modellen erschließen. Neue Einblicke in die vertikale Struktur von Trends und deren regionale Ausprägung in der Atmosphäre im Vergleich zur Erdoberfläche werden aus RO und den evaluierten Datensätzen gewonnen.

Insgesamt wollen wir mit VERTICLIM ein Bild noch nie dagewesener Qualität von der vertikalen Struktur atmosphärischer Klimavariabilität und Trends zeichnen und von den Stärken atmosphärischer Beobachtungsdaten, Reanalysen und Klimamodellen mit RO als Referenzklimadatensatz.

## **OPSCIMVALUE - Value-added Products and Validation of Occultation Processing System Re-processing Data for Climate Monitoring**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Projekt team: Johannes Fritzer (Senior Scientist)  
Jakob Schwarz (Scientist)  
Marc Schwärz (Senior Scientist)

Andrea Steiner (Senior Sci. Adviser)  
Barbara Scherllin-Pirscher (PostDoc Sci. Adviser)

Partners: ---

Sponsor: FFG- ALR (Austrian Research Promotion Agency- Austrian Aeronautics and Space Agency); ASAP - 9 Programme

Duration: Feb. 2015 - Nov. 2016

Monitoring the atmosphere to gain accurate and long-term stable records of essential climate variables (ECVs) such as temperature is the backbone of atmospheric and climate science and observation from space is the key to obtain such data globally in Earth's atmosphere. GPS radio occultation (RO) provides a unique tool for such monitoring in the free atmosphere as it enables to tie RO-derived ECVs and their uncertainty—in particular temperature and pressure—to fundamental time standards and to their unique long-term stability and narrow uncertainty.

Mainly within the ASAP-9 and ASAP-10 projects OPSCIMPROP and OPSCIMTRACE, the Wegener Center currently develops a new Reference Occultation Processing System OPS that realizes this full chain from RO raw data to ECVs with integrated uncertainty propagation and that will have a first re-processing data record 2001-2015 available by end 2015. The OPSCIMVALUE project will quantitatively evaluate the quality of these novel OPS re-processing data, including of key value-added products and of the integrated uncertainty estimates, in order to establish to what degree the new RO data record outperforms current records and to check the reliability of the new uncertainty estimates.

This will result in the first-time availability of a carefully validated SI-traceable RO data record, including evaluation of uncertainty estimates and of value-added products of high climate science utility, for the benefit of calibration/validation and climate applications.

Die Beobachtung der Atmosphäre mit Hilfe genauer und langzeitstabiler Daten wichtiger Klimavariablen ("Essential Climate Variables", ECVs), wie etwa der Temperatur, ist von großer Bedeutung in den Atmosphären- und Klimawissenschaften und Beobachtungen aus dem Weltraum sind der Schlüssel um solche globalen Daten der Erdatmosphäre zu erhalten. GPS Radiookkultation (RO) ist eine einzigartige Messmethode für die Beobachtung der freien Atmosphäre, da sie ECVs—vor allem Temperaturprofile und Druckprofile—mit den Messunsicherheiten des zugrundeliegenden Zeitstandards sowie dessen Langzeitstabilität verbindet und damit eine direkte Aneicherung an fundamentale Zeitstandards ermöglicht.

Hauptsächlich in den ASAP-9 und ASAP-10 Projekten OPSCIMPROP und OPSCIMTRACE entwickelt das Wegener Center nun derzeit das neue Referenz-Okkultations-

Prozessierungssystem OPS, welches die vollständige Prozessierungskette von RO Rohdaten bis zu ECVs mit integrierter Unsicherheitsfortpflanzung umsetzt und einen ersten reprozessierten RO Datensatz 2001-2015 mit Ende 2015 bereitstellen wird. Das OPSCLIMVALUE Projekt wird die Qualität dieser neuen OPS-Reprozessierungsdaten evaluieren, einschließlich von abgeleiteten Mehrwert-Datenprodukten und von den integrierten Unsicherheitsabschätzungen, um festzustellen in welchem Ausmaß der neue RO Datensatz bestehende RO Datensätze an Qualität übertrifft sowie um die Zuverlässigkeit der Unsicherheitsabschätzungen zu prüfen.

Damit wird erstmals ein sorgfältig validierter RO Datensatz verfügbar, welcher SI-Standards genügt und welcher bezüglich der Unsicherheitsabschätzungen und der Mehrwert-Datenprodukte mit hoher Klima-Nützlichkeit sauber geprüft ist, zum Wohle der weiteren Anwendungen in Bereichen wie Kalibrierung/Validierung und Klimaforschung.

## **OPSCLIMPROP - Occultation Processing System for Cal/Val and Climate: Level 1 Processing with Integrated Uncertainty Propagation**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Projekt team: Johannes Fritzer (Senior Scientist)  
Jakob Schwarz (Scientist)  
Marc Schwärz (Senior Scientist)  
Andrea Steiner (Senior Sci. Adviser)  
Barbara Scherllin-Pirscher (PostDoc Sci. Adviser)

Partners: ---

Sponsor: FFG- ALR (Austrian Research Promotion Agency- Austrian Aeronautics and Space Agency); ASAP - 9 Programme

Duration: Oct. 2013 - May 2016

Monitoring the atmosphere to gain accurate and long-term stable records of essential climate variables (ECVs) such as temperature is the backbone of contemporary atmospheric and climate science and observation from space is the key to obtain such data globally in Earth's atmosphere. Currently, however, not any existing satellite-based atmospheric ECV record can serve as authoritative reference over months to decades so that atmospheric variability and change are not yet reliably monitored.

GPS radio occultation (RO) provides a unique opportunity to solve this problem in the free atmosphere for core ECVs: the thermodynamic variables temperature and pressure, and to some degree water vapor, which are key parameters both for governing atmospheric chemistry and for tracking climate change. RO accurately measures time delays from atmospheric refraction of the GPS signals, which enables to tie RO-derived ECVs and their uncertainty to fundamental time standards, effectively the SI second, and to their unique long-term stability and narrow uncertainty. However, despite impressive advances since the pioneering RO mission GPS/Met in the mid-1990ties, not least due to work at WEGC, no rigorous trace from fundamental time to the ECVs exists so far.

Establishing such a trace first-time in form of the Reference Occultation Processing System OPS, providing reference RO data for calibration/validation and climate monitoring,

research and services, is therefore a current cornerstone endeavor at the WEGC over 2011 to 2014. It demands to process the full chain from the SI-tied raw data to the ECVs with integrated uncertainty propagation, including a first step to so-called excess phase level (Level 1a), a second one to atmospheric bending angle level (Level 1b), a third one to refractivity/dry-air level (Level 2a), and a fourth one to final thermodynamic ECV profiles (Level 2b).

The OPSCLIMPROP project—following the ESA project OPSGRAS—aims to help complete the novel Level 1 and Level 2 processing of the OPS as follows: 1. complete the chain by adding a Level 1a processor to the Level 1b and Level 2a/2b processors from OPSGRAS, 2. integrate Level 1a/1b uncertainty propagation capabilities. This will enable first-time to trace and propagate the fundamental-time uncertainty and relevant side influences from RO raw tracking data and high-accuracy GPS orbit data to atmospheric bending angles. An ESA/ESRIN project scheduled in parallel (MMValRO-4) will complete the trace with Level 2 uncertainty propagation down to the atmospheric ECVs.

Based on this new OPS, the WEGC is scheduled to serve as of 2015 as the primary global distribution center for benchmark-quality RO data from the CICERO community initiative RO mission (launch of two-satellite pathfinder scheduled in late 2014). We will also (re-)process data from other RO missions, like the European MetOp/GRAS and the Formosat-3/COSMIC mission, with the aim to broadly provide a new reference standard for thermodynamic ECVs for atmosphere and climate research and applications.

Die Beobachtung der Atmosphäre um genaue und langzeitstabile Daten wichtiger Klimavariablen („essential climate variables“, ECVs), wie etwa der Temperatur, zu erhalten ist von hoher Bedeutung in den heutigen Atmosphären- und Klimawissenschaften und Beobachtungen aus dem Weltall können wesentlich dazu beitragen globale Daten der Erdatmosphäre zu erhalten. Derzeit gibt es jedoch keinen einzigen satellitenbasierenden Atmosphären Datensatz von ECVs, welcher als verbindliche Referenz von Monaten bis zu Jahrzehnten dienen kann, sodass atmosphärische Variabilität und atmosphärische Veränderungen nicht zuverlässig überwacht werden können.

GPS Radiookkultation (RO) ist eine einzigartige Methode um dieses Problem in der freien Atmosphäre für ECVs zu lösen: die thermodynamischen Variablen Temperatur und Druck, aber auch der Wasserdampf, sind Schlüsselparameter in der Atmosphärenchemie sowie besonders wichtig um den Klimawandel zu beobachten. Mit großer Genauigkeit misst RO die Zeitverzögerung von GPS Signalen durch atmosphärische Brechung, und ermöglicht dadurch, RO abgeleitete ECVs und deren Unsicherheit hinsichtlich des zugrundeliegenden Zeitstandards, der SI Sekunde, sowie der Langzeitstabilität zu verbinden und damit die Unsicherheiten eingrenzen zu können. Trotz beeindruckender Fortschritte seit der ersten RO Mission GPS/Met in den 1990ern gibt es noch keine gründliche Verfolgung von der den Messungen zugrundeliegenden Zeit zu den ECVs.

Zum ersten Mal soll diese Spur aufgenommen und ein Referenzokkultations-Prozessierungssystem OPS geschaffen werden, welches RO Referenzdaten für die Kalibrierung/Validierung, Klimabeobachtung, Forschung aber auch für andere Dienste liefert und daher eine Meilensteinunternehmung am WEGC von 2011 bis 2014 darstellt. Es erfordert die Prozessierung der vollständigen Kette von SI Rohdaten bis hin zu ECVs mit integrierter Unsicherheitsfortpflanzung, einschließlich dem ersten Prozessierungsschritt zur sogenannten Phasenwegverlängerung (Level 1a), dem zweiten zum atmosphärischen

Brechungswinkel (Level 1b), dem dritten zur Refraktivität und den trockenen Parametern (Level 2a) sowie dem vierten zu den thermodynamischen ECV Profilen (Level 2b).

Das OPSCLIMPROP Projekt, welches dem ESA Projekt OPSGRAS folgt, wird helfen die neue Level 1 und Level 2 Prozessierung des OPS zu vervollständigen: 1. Vervollständigung der Kette durch hinzufügen des Level 1a Prozessors zu den Level 1b und Level 2a/2b Prozessoren von OPSGRAS, 2. Integration der Level 1a/1b Unsicherheitsfortpflanzungen. Das wird es erstmals ermöglichen, die Unsicherheit in der zugrundeliegenden Zeit sowie wesentliche Einflüsse vom RO Rohdatentracking und der GPS Orbitdaten bis zu den Profilen atmosphärischer Brechungswinkel fortzupflanzen. Ein ESA/ESRIN Projekt, welches parallel laufen wird (MMValRO-4), wird diese Spur mit Level 2 Unsicherheitsfortpflanzung zu atmosphärischen ECVs vervollständigen. Basierend auf dieses neue OPS wird das WEGC ab 2015 ein wichtigstes globales Zentrum zur Verfügungstellung von RO Daten der CICERO Mission sein. Weiters werden wir Daten anderer Missionen wie der europäischen MetOp/GRAS oder Formosat-3/COSMIC (re-)prozessieren, mit dem Ziel einen neuen Referenzstandard für thermodynamische ECVs den Atmosphären- und Klimawissenschaften zur Verfügung zu stellen.

## **OPSCLIMTRACE - Occultation Processing System for Cal/Val and Climate: Advanced Key Algorithms and SI-traceable Processing**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Projekt team: Johannes Fritzer (Senior Scientist)  
Jakob Schwarz (Scientist)  
Marc Schwärz (Senior Scientist)  
  
Andrea Steiner (Senior Sci. Adviser)  
Barbara Scherllin-Pirscher (PostDoc Sci. Adviser)

Partners: EUMETSAT, AIUB Berne, DLR Oberpfaffenhofen, TU Graz, DMI Copenhagen, ECMWF Reading, POLITO Torino, UCAR Boulder, RMIT Melbourne, EUMETSAT, GeoOptics Inc.

Sponsor: FFG- ALR (Austrian Research Promotion Agency- Austrian Aeronautics and Space Agency); ASAP - 10 Programme

Duration: Jun. 2014 - Oct. 2016

Monitoring the atmosphere to gain accurate and long-term stable records of essential climate variables (ECVs) such as temperature is the backbone of atmospheric and climate science. Observation from space is the key to obtain such data globally in Earth's atmosphere. GPS radio occultation (RO) provides a unique tool for such monitoring in the free atmosphere as it enables to tie RO-derived ECVs and their uncertainty—in particular temperature and pressure—to fundamental time standards and to their unique long-term stability and narrow uncertainty. The new Reference Occultation Processing System OPS, a cornerstone development at the Wegener Center over 2011 to 2015, aims to realize this full chain from RO raw data to ECVs with integrated uncertainty propagation. The OPSCLIMTRACE project, complementing the ASAP-9 project OPSCLIMPROP, helps to complete the OPS with three new key algorithms essential for an unprecedented quality of the long-term RO data and will carry out an SI-traceable re-processing of the full RO data

record 2001-2015 and an associated validation. This will result in the first-time availability of an SI-traceable RO data record, including uncertainty estimation at all data product levels, which is expected to outperform any current RO record and to provide a novel reference standard.

Die Beobachtung der Atmosphäre mit Hilfe genauer und langzeitstabiler Daten wichtiger Klimavariablen ("Essential Climate Variables", ECVs), wie etwa der Temperatur, ist von großer Bedeutung in den Atmosphären- und Klimawissenschaften. Beobachtungen aus dem Weltraum sind der Schlüssel um solche globalen Daten der Erdatmosphäre zu erhalten. GPS Radiookkultation (RO) ist eine einzigartige Messmethode für die Beobachtung der freien Atmosphäre, da sie ECVs–vor allem Temperaturprofile und Druckprofile–mit den Messunsicherheiten des zugrundeliegenden Zeitstandards sowie dessen Langzeitstabilität verbindet und damit eine direkte Aneicherung an fundamentale Zeitstandards ermöglicht. Das neue Referenz-Okkultations-Prozessierungssystem OPS, ein Schlüsselprojekt am Wegener Center von 2011 bis 2015, hat das Ziel, die vollständige Prozessierungskette von RO Rohdaten bis zu ECVs mit integrierter Unsicherheitsfortpflanzung umzusetzen. Das OPSCLIMTRACE Projekt, welches das ASAP-9 Projekt OPSCLIMPROP ergänzt, vervollständigt das OPS mit drei neuen Schlüsselalgorithmen, welche wesentlich zur bisher unerreichten Qualität der langfristigen RO Daten beitragen werden. Es führt weiters eine geeichte Reprozessierung des vollständigen RO Datensatzes 2001 bis 2015 sowie die dazugehörige Datenvalidierung durch. Damit wird der erste RO Datensatz verfügbar, welcher SI-Standards genügt, welcher Unsicherheitsabschätzungen aller Datenprodukte beinhaltet und von welchem man erwarten kann, dass er die heute existierenden RO Datensätze an Qualität übertrifft und einen neuen Referenzstandard darstellt.

## **OPSGRAS - Reference Occultation Processing System for GRAS on MetOp and other Past and Future RO Missions**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Gottfried Kirchengast  
Marc Schwärz  
Johannes Fritzer

Project team: Team Support and Advice:

Ulrich Foelsche  
Andrea Steiner  
Barbara Pirscher  
Susanne Schweitzer  
Veronika Proschek  
Florian Ladstädter

Partners:

Michael Gorbunov (expert wave-optics algorithms and tools), Inst. of Atmospheric Physics, Moscow, RU  
Kent B. Lauritsen (expert GRAS-SAF/ROPP software and wave-optics), Danish Meteorological Inst., Copenhagen, DK

Sponsor: European Space Agency ESA

Recognizing the strong need for a fresh approach despite six main RO processing centers (and other less known ones) running systems worldwide, the aim of the OPSGRAS project is to implement a new reference Occultation Processing System (OPS). The OPS will process data of the currently most modern RO sensor GRAS (GNSS Receiver for Atmospheric Sounding on EUMETSAT's polar-orbiting meteorological operational satellites MetOp) as well as data from other past and future RO missions (CHAMP, Formosat-3/COSMIC, GRACE, Formosat-7/COSMIC-2, etc). It will interface to the Level 1a data (phase/amplitude and orbit data) of the respective RO raw data providers. In designing and implementing the OPS, OPSGRAS aims to bring to fruition the best of RO know-how learned over the last decade and more and to realize a range of innovative ideas. The goal is to have a new system that is better fit for enabling climate monitoring with benchmark quality than existing systems.

More specifically, the new OPS will be intentionally developed as a system separate from the existing EGOPS software, whereby the OPSGRAS work includes the following main components:

- A renewed 3D atmosphere modeling compared to EGOPS, needed to adequately serve the OPS with reliable background information from ECMWF analyses and forecasts, including serving a new implementation of consistent forward modeling to Level 1 profiles (bending angle, Doppler shift, excess phase) from background refractivity fields.
- A new Level 1b processing system (retrieving atmospheric bending angles from Level 1a phase/amplitude and orbit data) with an innovative approach to use background profiles in supporting the algorithmic chain from pre-processing of phase/amplitude data to high-altitude initialization of raw bending angle data.
- A new Level 2 processing system (retrieving refractivity and further atmospheric profiles like temperature and humidity from bending angles) with a renewed refractivity retrieval optimally matching the new Level 1b bending angles and another innovative algorithmic chain for dry air retrieval and moist air retrieval, including moist air optimal-estimation retrieval.

Provision of the OPS, including the necessary system development, testing and validation work, as a complete OPS software and documentation system that fulfils the "Reference OPS User Requirements" serving as basis for the functionality and performance to be achieved by the work.

Publications on the new OPS for the peer-reviewed scientific literature will be prepared as integral part of the project work, regarding both its algorithms and its performance relative to best-available existing systems. This "work-to-publication approach", less common in ESA projects which usually lead to ex-post publications of selected results, serves to integrate high-quality feedback from independent peers during the project as well as to make the algorithms fully transparent and broadly known as a potential reference for developments at other RO centers.

## **MMValRO - Multi-Mission Validation by Satellite Radio Occultation; MMValRO-Extension**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Gottfried Kirchengast  
Marc Schwärz  
Johannes Fritzer  
Jakob Schwarz  
Florian Ladstädter  
(former member)

Project team: Armin Leuprecht  
Stefan Körner  
Michael Pock

Advice:  
Ulrich Foelsche  
Andrea Steiner

Partners: C. Retscher (consulting expert), NASA Goddard Space Flight Center,  
Greenbelt, MD, USA  
Sensor Performance and Products and Algorithms Office (SPPA),  
ESA/ESRIN Centre, Frascati, Italy

Sponsor: European Space Agency ESA

Duration: Sep. 2008 - May 2014; Extension: Jun. 2014 - Nov. 2015

Within the MMValRO project, the Wegener Center will develop and provide long-term radio occultation (RO) validation data, which will be used in the long-loop monitoring of trends related to both spaceborne instrument and climate system variability, routine validation of atmospheric satellite products, validation of geophysical retrieval algorithms, bridging between temporally separated space missions, as well as scientific evaluation of atmospheric processes. The project will ensure the collection of correlative RO measurements suitable for in-depth examination of tropospheric and stratospheric profiles retrieved from (ESA) satellite observations.

This undertaking is highly worthwhile since the unique combination of global coverage, high accuracy, long-term stability, and all weather capability makes the validation with RO measurements preferable to other methods. The currently available RO receiver constellation provides a combined total of up to about 2500 profiles per day. With the further extension of the Global Navigation Satellite System (GNSS), e.g., by the upcoming Galileo system, this number will further increase.

In the frame of the MMValRO project, a long-term database of temperature, humidity, pressure, density, and refractivity, as a function of mean-sea-level altitude, will be established, covering in particular the thermodynamic state of the upper troposphere/lower stratosphere region. The correlative RO data provided during the project will be co-located with the comparable ESA mission datasets from the Envisat atmospheric instruments MIPAS and GOMOS, as well as the main ground-based validation sites as defined in the TASTE and EQUAL projects related to Envisat. Correlative data for



specific campaigns will also be provided on ESA demand. The correlative data will be provided to a Cal/Val repository of ESA, which will provide the Cal/Val and science community a direct access to these data (Envisat Validation Data Centre, hosted by NILU, Kjeller, Norway).

Furthermore, the Wegener Center will validate the selected ESA satellite data (from MIPAS and GOMOS) against the correlative RO data used as reference, in order to derive estimates of the systematic and random errors and their changes in time. Also specific validation support to ESA algorithm developments and other ad-hoc requests will be provided on ESA demand. Support and advice regarding ESA validation strategies, both multi-mission and mission-specific for ESA missions, will be provided on demand as well.

## **DYNOCC - El Niño Dynamics and Effects Observed with Radio Occultation**

Project leader: Barbara Scherllin-Pirscher

Projekt team: Barbara Scherllin-Pirscher  
Andrea K. Steiner

Partners: L. Haimberger, Dep. of Meteorology and Geophysics, Univ. of Vienna, Austria

W. J. Randel, National Center for Atmospheric Research (NCAR) and University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, CO, USA

S. S. Leroy, Anderson Group, Harvard University, Cambridge, MA, USA

Sponsor: Hertha Firnberg-Position, FWF – Austrian Science Fund

El Niño Southern Oscillation (ENSO) is a coupled ocean-atmosphere phenomenon, which links sea surface temperature (SST) and ocean heat content to atmospheric dynamics. ENSO is the most significant mode of interannual climate variability of the tropical troposphere. Variations of convection, atmospheric temperature and circulation are strongly pronounced at tropospheric low latitudes but signatures associated with ENSO have also been observed at high latitudes as well as at stratospheric altitudes. Numerous studies over the last decades have analyzed the influence of ENSO on atmospheric temperature using observational data, e.g., from radiosondes or satellites, reanalyses, or model data. Since traditional observations have limited spatial coverage and most satellite data have a low vertical resolution in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) region, substantial uncertainties remain in atmospheric dynamics in the UTLS during El Niño and La Niña conditions.

In this context radio occultation (RO) offers new possibilities by providing high quality observations in the UTLS with global coverage. Atmospheric parameters like temperature, pressure, and geopotential height are retrieved with high vertical resolution and high accuracy and precision. A continuous RO record is available since 2001 but the number of RO measurements increased significantly in 2006, with the launch of the six Formosat-3/COSMIC (F3C) satellites. This constellation tracked more than 2000 RO events per day, enabling the derivation of fine-resolved atmospheric fields.

The central aim of the proposed project DYNOC is the assessment of ENSO related atmospheric dynamics and its effects on troposphere-stratosphere processes from this novel multi-year RO record. In a first step I will perform a thorough investigation of UTLS ENSO signals in temperature, pressure, geopotential height, and water vapor to analyze the detailed vertical and horizontal structure of ENSO. The consistency of results obtained from RO will be checked using data from other observations as well as from analyses and reanalyses. Furthermore, I will validate a state-of-the-art global climate model with regard to its representation of the vertical UTLS ENSO structure. In a second step I will use high resolution RO data to investigate details of atmospheric waves associated with local heating induced by El Niño. This will allow gaining deeper understanding of natural climate variability in the transition between the troposphere and stratosphere, an important coupling layer in the atmosphere which is a topic of active current research. Finally, I will use precise RO-based geopotential height profiles on constant pressure surfaces to investigate the vertical and horizontal displacement of the geostrophic zonal wind during El Niño and La Niña conditions.

Addressing these key issues, DYNOC aims at adding detailed understanding of atmospheric dynamics associated with natural climate variability. Extending the application of RO to further research fields, DYNOC will strengthen its value also outside of the RO community.

El Niño Southern Oscillation (ENSO) ist ein Ozean-Atmosphären-Phänomen, welches Meeresoberflächentemperaturen und den Wärmehaushalt der Ozeane mit der Dynamik der Atmosphäre koppelt. ENSO ist der wichtigste Modus der mehrjährigen Klimavariabilität in der tropischen Troposphäre. Veränderungen von Konvektion, Atmosphärentemperatur und Windsystemen sind in den troposphärischen niederen Breiten am stärksten ausgeprägt. Hinweise auf ENSO wurden jedoch auch in hohen Breiten sowie in stratosphärischen Höhen gefunden. Zahlreiche Studien haben den Einfluss von ENSO auf die Atmosphärentemperatur belegt. Dabei wurden Daten von Radiosonden, Satelliten, Reanalysen und Modellen verwendet. Da traditionelle Beobachtungen räumlich begrenzt vorliegen und die meisten Satellitendaten eine schlechte vertikale Auflösung in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre (engl. UTLS) haben, gibt es noch große Unsicherheiten hinsichtlich der Atmosphärendynamik der UTLS während El Niño und La Niña Ereignissen.

In diesem Zusammenhang eröffnet die Radiookkultation (RO), mit hoch qualitativen Beobachtungen der UTLS sowie globaler Datenbedeckung, neue Möglichkeiten. Atmosphärenparameter wie Temperatur, Druck, und geopotentielle Höhe werden mit hoher vertikaler Auflösung und großer Genauigkeit gewonnen. Einen kontinuierlichen Datensatz gibt es seit 2001, doch die Anzahl an RO Messungen hat mit dem Start der Satellitenkonstellation Formosat-3/COSMIC (F3C) im Jahre 2006 beträchtlich zugenommen. Diese Konstellation lieferte mehr als 2000 Profile pro Tag, welche für die Berechnung von feinaufgelösten atmosphärischen Feldern verwendet werden können.

Das Hauptziel von DYNOC ist die Analyse der durch ENSO induzierten Atmosphärendynamik sowie ihrer Auswirkungen in der UTLS. Sorgfältige Untersuchungen des UTLS ENSO Signals in Temperatur, Druck, geopotentieller Höhe und Wasserdampf ermöglichen die detaillierte Analyse der vertikalen und horizontalen Struktur von ENSO. Die Konsistenz dieser mit RO gewonnenen Ergebnisse wird durch andere Beobachtungsdaten sowie Reanalysedaten überprüft. Auch ein Klimamodell wird hinsichtlich seiner vertikalen UTLS ENSO Struktur untersucht. In einer weiteren Studie

werden die RO Daten mit ihrer feinen Auflösung verwendet um durch El Niño induzierte, atmosphärische Wellen zu untersuchen und dadurch ein besseres Verständnis der natürlichen Klimavariabilität im Übergangsbereich von der Troposphäre zur Stratosphäre zu erlangen. Dieser Bereich der Atmosphäre ist besonders wichtig für Kopplungsprozesse und Gegenstand aktueller Forschung. Schlussendlich werden die hochqualitativen RO Daten der geopotentiellen Höhe auf konstanten Druckflächen verwendet, um die vertikalen und horizontalen Veränderungen des geostrophischen zonalen Windes während El Niño und La Niña zu untersuchen.

Durch diese Studien wird DYNOC neue Einsichten in die mit der natürlichen Klimavariabilität in Verbindung stehende Atmosphärendynamik der UTLS geben. Die Verwendung von RO wird dabei den Wert dieser Daten auch außerhalb der RO ForscherInnengemeinschaft stärken.

## **SysSon - A Systematic procedure to develop Sonification**

Robert Höldrich (Institute for Electronic Music and Acoustics, University of  
Project leader: Music and Performing Arts Graz (IEM/KUG), Gesamtleitung)  
Gottfried Kirchengast (Wegener Center, Universität Graz, Leitung)

Institute for Electronic Music and Acoustics, University of Music and  
Performing Arts Graz (IEM/KUG):  
Robert Höldrich  
Katharina Vogt  
Visda Goudarzi

Project team: Wegener Center, University of Graz:  
Gottfried Kirchengast  
Andrea Steiner  
Martin Jury

Centre for Systematic Musicology, University of Graz:  
Richard Parncutt

Partners: Institute for Electronic Music and Acoustics, University of Music and  
Performing Arts Graz (IEM/KUG)  
Centre for Systematic Musicology, University of Graz

Sponsor: FWF - Austrian Science Fund

Website: <http://sysson.kug.ac.at/>

The SysSon project developed sonification for climate science. Sonification is the acoustic analogue to visualization. Climate scientists depend on visual displays to get an insight in their huge and multi-dimensional data sets. But visualization is limited for conceptual and perceptual reasons. Therefore, sonification may be used complementarily, using the human sense of hearing in order to explore climate processes.

The project's focus was on the development of a systematic procedure to enable climate scientists to create their own sonifications. The technical barrier of compatibility between

the data structures and sound synthesis programs was met by developing the open source software SysSon (freely downloadable from [github.com/iem-projects/sysson](https://github.com/iem-projects/sysson)).

Furthermore, the interdisciplinary work process tackled communicational barriers, as, e.g., climate scientists are not used to working with sound and sonification experts are not used to climate science terminology. Therefore a series of evaluations was implemented, based on User Centered Design. This procedure of evaluations, design, and development lead to a process of systematic sonification that can be generalized to other scientific domains as well.

Sonification is on the edge between science and the arts. Therefore, two artistic projects have been co-developed within the project. Klima|Anlage is a joint project with a German radio station and other partners (<http://www.klima-anlage.org>). Climate data were pre-processed to control an interactive climate sound "machine". The installation has been shown in Berlin; further exhibitions are planned. Furthermore, the art installation Turbulence – a climate sound portrait was presented in November 2014 in Forum Stadtpark, Graz, Austria, conveying the climate topic to the public.

Im Projekt SysSon wurde Sonifikation, das akustische Pendant zur Visualisierung, für die Klimaforschung entwickelt. Klimaforschung verwendet heute sehr große Datensätze, die üblicherweise visualisiert werden. Dabei stößt man an die Grenzen der Darstellbarkeit. Ein neuer Ansatz ist die Sonifikation: die Mustererkennung des menschlichen Gehörs wird verwendet, um neue Einblicke in Klimaprozesse zu gewähren.

Der Fokus des Projektes lag dabei auf der Entwicklung eines systematischen Ablaufs, um es Klimaforschenden zu ermöglichen, ihre Daten selbst zu sonifizieren. Technische Hürden, wie die Kompatibilität zwischen den Daten und Klangsynthese-Programmen, wurden durch die Entwicklung eines Open Source Programmes überwunden – SysSon steht auf [github.com/iem-projects/sysson](https://github.com/iem-projects/sysson) frei zum Download zur Verfügung. Darüberhinaus wurden in der interdisziplinären Arbeit Kommunikationshürden bearbeitet, da zum Beispiel, für Klimaforschende der Umgang mit Klang als Medium ungewohnt ist sowie für SonifikationsexpertInnen die Terminologie der Klimawissenschaft. Daher wurde eine Reihe von Evaluierungsmethoden aus dem User Centered Design eingesetzt. Der Ablauf von Evaluierungen, Design und Entwicklung wurde im Projekt allgemein reflektiert, sodass der Prozess der systematischen Sonifikation auch auf andere Wissenschaftsgebiete übertragbar ist.

Da Sonifikation eine Querschnittsmaterie zwischen Wissenschaft und Kunst ist, wurden im Projekt auch zwei Klanginstallationen mitentwickelt die sich mit Klimadaten befassen. Die Klima|Anlage ist ein gemeinsames Projekt mit dem Deutschlandradio Kultur und weiteren Partnern (<http://www.klima-anlage.org>). Aufbereitete Klimadaten werden in einer interaktiven Klang- und Rauminstallation sinnlich erfahrbar. Die Ausstellung wurde im September 2015 in Berlin eröffnet, weitere Ausstellungen sind in Vorbereitung. Weiters wurde die Kunstinstallation Turbulenz – ein Klima-Klang-Portrait im November 2014 im Forum Stadtpark, Graz, Österreich, präsentiert und das Thema Klima einer breiten Öffentlichkeit vermittelt.

## **CONSYDER - CONvective Systems DETection and analysis using Radio occultations**

Project leader: Gottfried Kirchengast (Scientist in Charge)

Project team: Visiting researcher: Riccardo Biondi  
Advise: Andrea Steiner

Partners: -

Sponsor: FP7 - EU - Marie Curie Intra European Fellowship, duration 24 months

Homepage [www.biondiriccardo.it/CONSYDER/connectedprojects.htm](http://www.biondiriccardo.it/CONSYDER/connectedprojects.htm)

Many aspects of deep convective systems and volcanic eruptive clouds are poorly represented in current global climate models. By statistically analysing satellite observations and providing long-term statistics from these data, the project CONSYDER (Convective systems detection and analysis using radio occultations) highlighted observational constraints for improving the theoretical representations.

Researchers relied on radio occultation observations from global positioning system (GPS) satellites. Although GPS satellites are mostly used for navigation, signals sent from one GPS satellite to another are refracted by the atmosphere. From measurements of the associated propagation delay, the refractive index and bending angle, it is possible to estimate key atmospheric parameters.

The CONSYDER team used data acquired in the period 2001 - 2012 via this technique to create a reference atmosphere from the Earth's surface to 80 km altitude. More specifically, they developed 3D maps of refractivity, pressure, temperature and water vapour together with the frequency and standard deviation of measurements at each location and altitude. These radio occultation observations were combined with high-resolution and high-precision measurements from other satellites and ground based sensors. This unique combination allowed researchers to detect the cloud top height and structure of the extreme events. The aim was to gain a better understanding of the clouds' structure especially in the upper troposphere and the lower stratosphere.

CONSYDER results indicated that tropical cyclones should be studied in connection to the ocean basin where they develop. Basins in the northern and southern hemisphere commonly show different thermal structures with storms reaching higher altitudes in the southern hemisphere.

On the other hand, the temperature anomaly above the tropical cyclones' cloud top becomes positive in northern hemisphere ocean basins. The reason for this puzzling warming of the storm cloud top was not clear and is a topic of further investigations beyond the end of CONSYDER.

Before the end of the project, a dataset of radio occultation measurements co-located with tropical cyclones was compiled. Since GPS observations are evenly distributed over the globe, the dataset is suitable for studying extreme events even in remote areas.

CONSYDER also demonstrated that the technique developed for detecting cloud tops of convective systems and tropical cyclones can also be used for detecting and monitoring volcanic cloud tops and inner structure. Volcanic ash clouds and SO<sub>2</sub> clouds have a different impact on the atmospheric thermal structure. The results revealed a clear

warming signature from SO<sub>2</sub> clouds after the eruption of Nabro and a cooling signature from the ash cloud after the Puyehue eruption.

The evolution of tropical cyclones and eruptive clouds, the lifetime of deep convective systems and associated environmental parameters analysed in CONSYDER provide a framework for comparison with model simulations. Besides diagnosing the underlying mechanisms, project outcomes provide guidance for parameterising convective processes in global climate models.

## **BENCHCLIM - Benchmark Climatologies from Radio Occultation Data**

Project leader: Ulrich Foelsche

Project team: Barbara Scherllin-Pirscher (PostDoc: Analysis of RO data)  
Florian Ladstädter (PhD Student: Processing of RO profile data and climatologies)  
Gottfried Kirchengast (Senior Advisor)  
Andrea Steiner (Advisor)

Partners: Advisory Partners:  
Ying-Hwa Kuo, Christian Rocken (COSMIC Program, UCAR, Boulder, USA)  
Jens Wickert (GFZ Potsdam, Germany),  
Axel von Engel (EUMETSAT, Darmstadt, Germany)

Sponsor: FWF - Austrian Science Fund

Accurate, consistent, long-term data are required for any attempt to detect, understand and attribute climate variability and change. Our knowledge about changes in the free atmosphere is still incomplete, despite notable efforts to build long-term upper air records. A new data source for climate monitoring, which can overcome some of the problems of established ones, is the Global Navigation Satellite System (GNSS) Radio Occultation (RO) technique. It has the potential to deliver climate benchmark measurements of the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS), since RO data can be traced, in principle, to the international standard for the second. In previous work we could indeed show an amazing consistency of climatologies derived from RO data from different satellites (better than 0.1K).

The value of RO data for climate monitoring is therefore increasingly recognized by the scientific community, but there is also concern about potential residual systematic errors in RO climatologies, which might be common to data from all satellites. We have compiled a list of possible reasons for such systematic errors and will analyze them in detail. This work will lead to a deeper understanding of remaining (small) systematic errors in RO climatologies, which will allow to avoid or remove some of these errors, and to provide quantitative error estimates for those, which cannot be removed. We will use this knowledge to improve the retrieval of RO, and to provide RO climatologies of bending angle, microwave refractivity, density, pressure, geopotential height, and temperature in the UTLS region, with unprecedented accuracy and consistency. Due to their quality, and rigorous characterization, these RO climatologies are expected to qualify as a benchmark for global UTLS climatologies of thermodynamic variables.

The dataset will be particularly suitable for climate variability and change monitoring in the UTLS region, e.g., changes in the height of the tropopause, changes in the transition height between tropospheric warming and stratospheric cooling, or changes following any major volcanic eruption potentially occurring during the coming years. The improved understanding of systematic errors will also be useful in the field of Numerical Weather Prediction (NWP), where RO data are assimilated.

The overarching goal of BENCHCLIM is to quantify and (if possible) remove potential causes of residual systematic errors in Radio Occultation climatologies of the UTLS - especially those, which could pretend false trends in atmospheric parameters - and to provide high-quality climatologies of the UTLS to the scientific community.

Genauere und konsistente Langzeit-Daten sind nötig, um Klimavariabilität und Klimawandel detektieren, verstehen, und zuordnen zu können. Unser Wissen über Veränderungen in der freien Atmosphäre ist immer noch begrenzt, da solche Daten bis jetzt nicht in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen. Eine neue Datenquelle, mittels der man einige Probleme von etablierten Methoden überwinden kann, ist die Radiokkultations-Methode (RO). Mit ihr ist es im Prinzip möglich, eine absolute Referenz („Benchmark“) für die obere Troposphäre und untere Stratosphäre (engl. UTLS) zu erstellen, da die Daten auf einer Zeitmessung basieren, und damit an die internationale Definition der Sekunde gebunden sind. Tatsächlich konnten wir in früheren Arbeiten zeigen, dass RO Klimatologen von unterschiedlichen Satelliten erstaunlich gut übereinstimmen (besser als 0,1K).

Der Wert von RO Daten für die Klima-Beobachtung wird zunehmend erkannt, es existieren aber auch Bedenken, dass es systematische Fehler geben könnte, die Daten von unterschiedlichen Satelliten gemein sind. Wir haben eine Liste solcher möglicher systematischer Fehler zusammengestellt, und werden diese genau analysieren. Das wird zu einem besseren Verständnis dieser (kleinen) Restfehler führen, und es erlauben, sie zu vermeiden oder zu entfernen, oder aber, sie genau zu charakterisieren, falls sie unvermeidbar sind. Wir werden diese Erkenntnisse nutzen, um die Methode zur Gewinnung von RO Daten zu verfeinern, und damit RO Klimatologien der Parameter Brechungswinkel, Refraktivität, Dichte, Druck, Geopotentielle Höhe und Temperatur in der UTLS, mit bisher unerreichter Genauigkeit und Konsistenz zu erstellen. Dank ihrer hohen Qualität und einer genauen Fehler-Charakterisierung darf man erwarten, dass diese Daten als absolute Referenz (Benchmark) für globale Klimatologien der UTLS dienen können.

Durch die Kombination aus hoher Genauigkeit und guter vertikaler Auflösung eignen sich die Daten auch besonders gut für die Beobachtung von Klimavariabilität und Klimawandel in der UTLS, wie z. B. Änderungen der Tropopausenhöhe, Änderungen der Übergangshöhe zwischen troposphärischer Erwärmung und stratosphärischer Abkühlung, oder Temperaturänderungen, die nach einem größeren Vulkanausbruch zu erwarten sind. Das verbesserte Verständnis der systematischen Fehler wird auch im Bereich der numerischen Wettervorhersage nützlich sein, wo RO Daten jetzt schon mit Erfolg assimiliert werden.

Das übergeordnete Ziel von BENCHCLIM ist es also, mögliche systematische Fehler in RO Klimatologien der UTLS zu quantifizieren und (wenn möglich) zu entfernen - insbesondere die, die einen falschen Trend vortäuschen könnten, und damit Klimatologien der UTLS mit sehr hoher Qualität bereitzustellen.

## **TRENDEVAL - Klimatrends und Modevaluation mittels Radio-Okkultation**

Project leader: Andrea K. Steiner

Andrea K. Steiner  
(Projektleiterin, RO Datenqualität und Bewertung von Klimatrends)  
Bettina C. Lackner  
(PostDoc: Trenddetektion, Ursachenzuweisung, Modellevaluierung)  
Florian Ladstädter  
(Doktorand: Vergleich von Atmosphärendaten mit RO Daten)

Project team: Barbara Pirscher  
(PostDoc: Fehlercharakterisierung von RO Daten)

Advice:  
Gottfried Kirchengast  
Ulrich Foelsche

L. Haimberger, Dep. of Meteorology and Geophysics, Univ. of Vienna, Austria  
S.-P. Ho, COSMIC Program, Univ. Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, CO, USA  
M. A. Ringer, Met Office Hadley Centre for Climate Change, Exeter, UK

Partners: Advisory Partners:  
G. C. Hegerl, School of GeoSciences, Univ. of Edinburgh, Edinburgh, UK  
B. Kuo, COSMIC Program, UCAR, Boulder, CO, USA  
K. B. Lauritsen, Danish Meteorological Institute (DMI), Copenhagen, Denmark  
A. Mannucci, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (JPL/CalTech), Pasadena, CA, USA  
A. von Engel, Satellite Atmospheric Science Group, EUMETSAT, Darmstadt, Germany  
J. Wickert, Dep.1 Geodesy and Remote Sensing, German Research Centre for Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany

Sponsor: FWF - Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung

Observations for atmospheric climate monitoring and change detection have to meet stringent quality requirements as defined by the Global Climate Observing System (GCOS) program. Conventional measurements from weather satellites and balloons have several shortcomings since they were not intended to serve climate monitoring needs. Radio Occultation (RO) based on Global Positioning System (GPS) signals provides a new upper-air record with beneficial characteristics including long-term stability, all-weather capability, global coverage, high accuracy and vertical resolution in the upper troposphere and lower stratosphere.

Knowledge of errors is an important prerequisite for the use of data in climate trend studies. The central aim of the project TRENDEVAL was the assessment of uncertainties in the RO climate record and its application for climate change detection and for climate



model evaluation. We investigated available RO data for 1995/1997 and for 2001 onwards from several satellite missions for the atmospheric variables bending angle, refractivity, pressure, geopotential height, temperature, and specific humidity.

We provided error estimates for individual RO profiles and gridded climatological fields. Climatologies from different RO missions were found highly consistent. This allows for combining them to a single record, which is a key feature of climate benchmark data. We quantified the structural uncertainty of the RO record from six processing centers. Structural uncertainty in trends was found lowest within 50°S and 50°N from 8 km to 25 km meeting the GCOS stability requirements.

The assessment of lower stratospheric temperatures from different observation systems (microwave sounders (AMSU), radiosondes, and RO) revealed a significant difference between AMSU and RO. Analysis of error sources and the good agreement with radiosondes indicated that the difference is not caused by RO.

The validation of the representation of tropical convective regions in the HadGEM2 climate model (Met Office Hadley Centre) with RO revealed a cold bias of the model near the tropical tropopause. Our results showed the high utility of RO data for the evaluation of observations and climate models.

RO parameters were shown to provide useful indicators of climate change. We demonstrated the utility of RO for climate change detection. An emerging climate change signal for geopotential height and temperature was detected in the RO record, reflecting warming of the troposphere and cooling of the lower stratosphere. Overall, the quality, consistency, and reproducibility of RO data was found favorable for becoming a climate benchmark record for use in climate monitoring and change detection.

Messdaten zur Klimabeobachtung und zum Nachweis des Klimawandels der Atmosphäre müssen die strengen Qualitätskriterien des Global Climate Observing System (GCOS) erfüllen. Daten von Wetterballons und -satelliten haben einige Defizite, da sie nicht zur Klimabeobachtung konzipiert wurden. Die Radio-Okkultation (RO) basiert auf Signalen des Global Positioning System (GPS) und liefert einen neuen Datensatz mit vorteilhaften Eigenschaften wie Langzeitstabilität, Allwettertauglichkeit, globale Bedeckung, hohe Genauigkeit und vertikale Auflösung in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre.

Kenntnis von Fehlern ist eine wichtige Voraussetzung für die Verwendung von Daten in Klimastudien. Hauptziel des Projekts TRENDEVAL war die Abschätzung von Unsicherheiten im RO Klimadatensatz und dessen Anwendung zum Nachweis einer Klimaänderung und zur Evaluierung von Klimamodellen. Wir untersuchten RO Daten von 1995/1997 und seit 2001 von mehreren Satellitenmissionen für die Parameter Brechungswinkel, Refraktivität, Druck, geopotentielle Höhe, Temperatur und spezifische Feuchte.

Fehlerabschätzungen für individuelle Profile und klimatologische Felder wurden erstellt. Climatologien von verschiedenen Satelliten zeigen hohe Konsistenz und können daher zu einem Datensatz kombiniert werden. Dies ist ein Hauptmerkmal eines Referenzklimadatensatzes. Weiters quantifizierten wir die strukturelle Unsicherheit der Daten von sechs Prozessierungszentren. Die Unsicherheit in Trends ist am geringsten innerhalb von 50°S bis 50°N sowie 8 km bis 25 km Höhe und erfüllt hier die Stabilitätsanforderungen von GCOS. Die Auswertung von Temperaturen der unteren Stratosphäre verschiedener Datensätze (Mikrowellensondierung (AMSU), Radiosonden, RO) zeigte signifikante Unterschiede

zwischen AMSU und RO. Die Analyse möglicher Fehlerquellen und gute Übereinstimmung mit Radiosonden schließt RO als Ursache aus.

Die Untersuchung tropischer Konvektionsregionen im HadGEM2 Klimamodell (Met Office Hadley Centre) mittels RO zeigte, dass das Modell im Bereich der tropischen Tropopause kühler ist. Unsere Ergebnisse zeigen den hohen Nutzen von RO Daten zur Evaluierung von Beobachtungsdaten und Klimamodellen.

RO Parameter liefern wertvolle Indikatoren zum Klimawandel. Wir demonstrierten den Nutzen von RO zur Detektion einer Klimaänderung. Ein Klimaänderungssignal wurde in der geopotentiellen Höhe von Druckschichten und der Temperatur detektiert. Es zeigt eine Erwärmung der Troposphäre und eine Abkühlung der Stratosphäre. Insgesamt ist die Qualität, Konsistenz und Reproduzierbarkeit von RO Daten vorteilhaft zur Verwendung als Referenzdatensatz zur Klimabeobachtung und zur Detektion des Klimawandels.

## **AV-BENDAPP - Feasibility of generating long-term RO refractivity climatologies without using statistical optimization**

Project leader: Julia Danzer

Projekt team: Julia Danzer

Partners: Kent B. Lauritsen, Danish Meteorological Institute (DMI), Kopenhagen, DK

Sponsor: DMI, ROM SAF I

Duration: Oct. 2013 - Feb. 2014

The retrieval of geophysical information from the observed ionosphere-corrected bending angles requires the use of a priori information. For example, the retrieval of a refractivity profile from neutral bending angles requires an extrapolation of the bending angle profile to infinity. The observations have a limited extension in altitude, and the signal to noise level decreases rapidly with altitude from the upper stratosphere. The standard procedure to retrieve refractivity from noisy bending angles is to smooth and merge the observed bending angle profiles individually with a priori data taken from a climatology. The upper-level bending angle initialization may add to the structural uncertainty of the retrieved variables. This source of structural uncertainty is less important for individual profiles, but may still contribute significantly to the monthly means. It has been suggested that rather than handling the noise in the bending angles separately for each profile, it may be advantageous to first suppress the noise by averaging a large number of profiles. This reduces the random errors and raises the altitude where instrumental errors and ionospheric residuals become significant. The monthly mean refractivities can be directly retrieved from an average bending angle, rather than from statistically optimized refractivity profiles. Studies show that the average-bending angle approach can be used to produce zonal monthly mean refractivities from COSMIC data. However, the generation of long-term climate data requires the use of CHAMP data from 2001 to mid-2006. CHAMP data are more sparse and considerably noisier than COSMIC data. Particularly the data quality may pose a problem. In this project we will study whether the average-bending angle approach works also during the CHAMP period, with an emphasis on the impacts of data quality and data numbers.

## **BAROCLIM - Bending Angle Radio Occultation Climatology: Further development of BAROCLIM and implementation in ROPP**

Project leader: Barbara Scherllin-Pirscher

Partners: S. Syndergaard, Danish Meteorological Institute (DMI), Copenhagen, DK

Sponsor: EUMETSAT ROM SAF CDOP-2 Visiting Scientist Funds

Due to beneficial characteristics of RO data (e.g., high vertical resolution, high accuracy and precision, or long-term stability), in the UTLS region, these data are often used in atmospheric and climate research. Above the middle stratosphere, however, individual RO measurements suffer from low SNR, which strongly limits the measurements' quality. When averaging over a large number of profiles, statistical data noise can be reduced, which enables to use data higher up.

In a first study, Foelsche and Scherllin-Pirscher (2012) calculated mean RO bending angles from the F3C satellite constellation and showed that these data are of very high quality at least up to an impact altitude of 60 km. Above that altitude, mean bending angles are increasingly affected by residual data noise, which even yields negative mean bending angle profiles above 80 km. Since Foelsche and Scherllin-Pirscher (2012) only used closed-loop F3C profiles, their mean bending angle profiles do not reach below approximately 8 km.

In this study, I use their mean RO bending angles, extend them with background information at low (below 10 km) and high altitudes (above 80 km) to generate a BAROCLIM spectral model. To extend mean RO profiles above the Mesopause, I perform statistical optimization from 60 km to 80 km using a best-fitting MSIS profile extracted at a specific latitude, longitude, and month. To extend mean RO profiles down to the surface, I apply a cosine transition from 10 km to 15 km using another best-fitting MSIS profile extracted at a specific latitude, longitude, and month.

The BAROCLIM spectral model is expanded into Chebychev polynomials represented by 128 coefficients and zonal harmonics represented by 18 coefficients. The evaluation of the BAROCLIM spectral model with ECMWF rather reveals deficiencies in ECMWF than in BAROCLIM. While differences are small (<0.5 %) below approximately 35 km, larger differences above 40 km are well known biases in ECMWF analyses, which have also been found in comparisons with other satellite data.

A first, very promising, application of BAROCLIM for bending angle initialization and its validation relative to ECMWF clearly shows the potential of BAROCLIM to be used in RO retrieval algorithms.

## **CLIMROCC - Climate Monitoring with Radio Occultation Data**

Project leader: Ulrich Foelsche

Project team: Michael Borsche  
Barbara Pirscher  
Armin Leuprecht  
Michael Goger  
Claus Suppan  
Irina Thaler  
Senior support and advice:  
Gottfried Kirchengast

Partners: J. Wickert, T. Schmidt; GNSS Atmospheric Sounding Group,  
GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam, Potsdam, Germany  
B. Kuo, C. Rocken; COSMIC Program, Univ. Corporation for Atmospheric  
Research (UCAR), Boulder, CO, USA

Sponsor: FWF - Austrian Science Fund

[Final Report P18837N10 CLIMROCC \[pdf \(0.6 MB\)\]](#)

The provision of accurate, long-term consistent data to sustain and expand the observational foundation for climate studies is one of the high priority areas for action formulated by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in its 2001 Report. Such data are vital to improve the ability to detect, attribute and understand climate variability and change. Until now it has not been possible to determine trends in atmospheric temperature from satellite data sets with convincing accuracy. Radio occultation (RO) data using Global Navigation Satellite System (GNSS) signals have the potential to overcome problems of traditional data sources due to their unique combination of the properties of high accuracy and vertical resolution, long-term stability due to intrinsic self calibration, global coverage, and all-weather capability. The potential of RO data for climate monitoring has been shown with simulation studies and through climatological analyses based on real data.

The CLIMROCC project focuses on using RO data from the occultation sensors on CHAMP, SAC-C, MetOp (launch scheduled April 2006), and COSMIC (launch scheduled March 2006) satellites for deriving accurate and validated monthly, seasonal, and annual benchmark climatologies of temperature, geopotential height, humidity, and refractivity fields of the global upper troposphere and lower stratosphere (UTLS), with a horizontal resolution of about 500-1500 km. This work will build on existing initial single-satellite climatologies from CHAMP, the first opportunity to obtain such climatologies, currently prepared for temperature fields for the years 2002-2005 and scheduled to be finished by end 2005. By including additional climate variables and advancing from the single satellite CHAMP to multi-satellite climatologies, with expected higher data quality from the new COSMIC and MetOp RO sensors, CLIMROCC aims at initiating a new reference standard for global UTLS climatologies.

The climatologies will be obtained in a model-independent manner by statistical binning and averaging techniques, together with carefully prepared observational as well as sampling error estimates, and validated against analysis fields from major weather prediction centers as well as inter-validated amongst different RO missions and RO sensors. Based on the climatologies, indicators of climate change are studied. The overall goal is to globally monitor the climate evolution of the UTLS region with unprecedented

accuracy and consistency and thereby help to improve the ability to detect, attribute, and predict climate variability and change.

Die Bereitstellung genauer, langzeit-stabiler Messdaten wurde vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) im Report des Jahres 2001 als eine der Aktionen höchster Priorität für die zukünftige Klimabeobachtung definiert. Bis jetzt war es nicht möglich, Trends in der Atmosphärentemperatur mit Satellitendaten in überzeugender Genauigkeit zu bestimmen. Radio-Okkultationsdaten (RO), die mittels Signalen von Navigationssatelliten (GNSS - Global Navigation Satellite System) gewonnen werden, haben das Potential, die Probleme traditioneller Datenquellen zu lösen. Die besondere Eignung für die Klimabeobachtung resultiert aus der einzigartigen Kombination aus hoher Genauigkeit, hoher vertikaler Auflösung, Langzeit-Stabilität, globaler Bedeckung und Allwetter-Tauglichkeit. Die Eignung zur Klimabeobachtung wurde durch Simulationsstudien und klimatologische Analysen echter Daten nachgewiesen.

CLIMROCC verwendet RO Daten der Okkultationssensoren auf den Satelliten CHAMP, SAC-C, MetOp (Start geplant für April 2006) und COSMIC (Start geplant für März 2006). Mit ihnen werden genaue, validierte Monats-, Saison- und Jahresklimatologien von Temperatur, Geopotentieller Höhe, Feuchte und Refraktivität in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre (UTLS) mit einer horizontalen Auflösung von ca. 500 - 1500 km berechnet. Diese Arbeit baut auf existierenden Einzelsatelliten-Klimatologien von CHAMP auf, der erstmals die Möglichkeit bot, solche Klimatologien zu bilden. Zurzeit werden Temperaturfelder für die Jahre 2002-2005 berechnet; das Projekt wird Ende 2005 abgeschlossen sein. Durch Hinzunahme weiterer Klimaparameter und Ausweitung auf Multisatelliten-Klimatologien, mithilfe der Daten von COSMIC und MetOp, die eine noch höhere Qualität versprechen, zielt CLIMROCC darauf ab, einen neuen Standard für Referenz- Klimatologien in der UTLS Region zu setzen.

Die Klimatologien werden modellunabhängig durch statistische Flächenmittelung berechnet, zusammen mit sorgfältigen Abschätzungen der Beobachtungs- und Repräsentativitätsfehler. Sie werden einerseits mit Analysefeldern der führenden Wettervorhersagezentren validiert, andererseits werden die Klimatologien unterschiedlicher RO Sensoren untereinander verglichen. Basierend auf diesen klimatologischen Feldern werden Indikatoren für den Klimawandel untersucht. Das übergeordnete Ziel von CLIMROCC ist, die Änderung des Klimas in der UTLS Region mit neuartiger Genauigkeit und Konsistenz zu beobachten, und damit unsere Fähigkeit zu verbessern, Klimavariabilität und Klimawandel zu detektieren, die Ursachen zu verstehen und gute Klimavorhersagen zu berechnen.

## **INDICATE - Indicators of Atmospheric Climate Change from Radio Occultation**

Project leader: Andrea K. Steiner

Andrea K. Steiner  
Bettina C. Lackner

Project team: Florian Ladstädter  
Senior support and advice:  
Gottfried Kirchengast

Partners: G. Hegerl (School of Geosciences, Univ. of Edinburgh, Edinburgh, U.K.)  
J. Jungclaus, L. Kornblueh (MPI for Meteorology, Hamburg, D)  
H. Doleisch, J. Kehrer, P. Muigg (Centre for Virtual Reality and  
Visualization - VRVis, Vienna, A)

Sponsor: FWF - Austrian Science Fund

Duration: Mar. 2006 - Jun. 2009

Finalreport\_p18733-n10\_Indicate [[pdf \(0.4 MB\)](#)]

Considerable efforts are undertaken by the international scientific community in global climate change research, but still large discrepancies and uncertainties exist regarding the detection, attribution and projections of climate trends. One main cause is the lack of suitably accurate and stable long-term climate observations, an urgent need which was addressed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in its "high priority areas of actions" for future research in the IPCC Third Assessment Report 2001. Climate benchmark observations provided by the Radio Occultation (RO) technique using Global Navigation Satellite System (GNSS) signals are well suited to overcome this problem for atmospheric observation, due to their unique combination of properties of accuracy, long-term stability, global coverage, and all-weather capability. Highest accuracy of key climate variables (such as temperature and geopotential height of pressure levels) is obtained in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS), the changing thermal structure in this height domain being a sensitive indicator of climate change.

In this context the main aim of the proposed project was the exploration and provision of benchmark indicators of atmospheric climate change for the UTLS region by using available RO based climatologies and, for exploring the long-term value, "proxy" RO climatologies from re-analyses and climate model runs. Given the limited length of the available RO data (continuous since 2002 only), re-analyses were used to extend the observational datasets back to 1979. Furthermore, Global Climate Model (GCM) scenario simulations for the IPCC 4<sup>th</sup> Assessment Report (AR4) were used as multi-decadal "proxy" datasets out to year 2050. The datasets were systematically explored for finding the most robust and sensitive RO based change indicators both by testing pre-defined potentially useful indicators within a multi-model/multi-ensemble approach and by using a new visualization-driven 4D field exploration technique. Based on the identified most promising indicators, the trend detection capabilities of RO observations were investigated using methods of optimal trend detection ("fingerprinting").

In summary INDICATE aimed at revealing optimal UTLS climate trend indicators available from RO combined with validating the skill of climate models with RO data, thereby making a substantial contribution to climate change monitoring and research.

Die Bereitstellung genauer, langzeit-stabiler Messdaten wurde vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) im Report des Jahres 2001 als eine der Aktionen höchster Priorität für die zukünftige Klimabeobachtung definiert. Bis jetzt war es nicht möglich, Trends in der Atmosphärentemperatur mit Satellitendaten in überzeugender Genauigkeit zu bestimmen. Radio-Okkultationsdaten (RO), die mittels Signalen von Navigationssatelliten (GNSS - Global Navigation Satellite System) gewonnen werden, haben das Potential, die Probleme traditioneller Datenquellen zu lösen. Die besondere Eignung für die Klimabeobachtung resultiert aus der einzigartigen Kombination aus hoher Genauigkeit, hoher vertikaler Auflösung, Langzeit-Stabilität, globaler Bedeckung und

Allwetter-Tauglichkeit. Die Eignung zur Klimabeobachtung wurde durch Simulationsstudien und klimatologische Analysen echter Daten nachgewiesen.

CLIMROCC verwendet RO Daten der Okkultationssensoren auf den Satelliten CHAMP, SAC-C, MetOp (Start geplant für April 2006) und COSMIC (Start geplant für März 2006). Mit ihnen werden genaue, validierte Monats-, Saison- und Jahresklimatologien von Temperatur, Geopotentieller Höhe, Feuchte und Refraktivität in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre (UTLS) mit einer horizontalen Auflösung von ca. 500 - 1500 km berechnet. Diese Arbeit baut auf existierenden Einzelsatelliten-Klimatologien von CHAMP auf, der erstmals die Möglichkeit bot, solche Klimatologien zu bilden. Zurzeit werden Temperaturfelder für die Jahre 2002-2005 berechnet; das Projekt wird Ende 2005 abgeschlossen sein. Durch Hinzunahme weiterer Klimaparameter und Ausweitung auf Multisatelliten-Klimatologien, mithilfe der Daten von COSMIC und MetOp, die eine noch höhere Qualität versprechen, zielt CLIMROCC darauf ab, einen neuen Standard für Referenz- Klimatologien in der UTLS Region zu setzen.

Die Klimatologien werden modellunabhängig durch statistische Flächenmittelung berechnet, zusammen mit sorgfältigen Abschätzungen der Beobachtungs- und Repräsentativitätsfehler. Sie werden einerseits mit Analysefeldern der führenden Wettervorhersagezentren validiert, andererseits werden die Klimatologien unterschiedlicher RO Sensoren untereinander verglichen. Basierend auf diesen klimatologischen Feldern werden Indikatoren für den Klimawandel untersucht. Das übergeordnete Ziel von CLIMROCC ist, die Änderung des Klimas in der UTLS Region mit neuartiger Genauigkeit und Konsistenz zu beobachten, und damit unsere Fähigkeit zu verbessern, Klimavariabilität und Klimawandel zu detektieren, die Ursachen zu verstehen und gute Klimavorhersagen zu berechnen.

## **CHAMPCLIM - Radio Occultation Data Analysis Advancement and Climate Change Monitoring based on the CHAMP/GPS Experiment**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project manager: Ulrich Foelsche

Project team: Michael Borsche  
Ulrich Foelsche  
Andreas Gobiet  
Michael Pock  
Susanne Schweitzer

Partners:

Sponsor: FFG-ALR (Forschungsförderungsgesellschaft)

## **START ATCHANGE - Advanced Sounding & Modeling for Atmospheric Change Analysis**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Ulrich Foelsche (bis Sept. 2004)  
Andrea Steiner  
Jeffrey Lerner (Feb. 1999 bis Ende Feb. 2001)  
Elisabeth Weisz (Feb. 1999 bis Ende April 2001)  
Markus Rieder (Feb. 1999 - Ende Okt. 1999)  
Marc Schwärz (Apr. 2001 - Okt. 2004)  
Armin Löscher (Mai 2001 - Ende Nov. 2004)  
Andreas Gobiet (Jun. 2001 - Dez. 2004)

Partners:

Sponsor: FWF - Austrian Science Fund



# RT#2: Climate and hydrology change monitoring and analysis at regional-local scale

## WEGDEMO - Demonstrationsprojekt WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach

**(WegenerNet Klimastationsnetz: Nutzung für Monitoring und Modellierung von Wetter und Klima in der Oststeiermark - ein internationales Pionierexperiment)**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Gottfried Kirchengast  
Thomas Kabas  
Armin Leuprecht  
Christoph Bichler  
Christoph Stieb  
Sophia Binder  
Alois Neuwirth (WegenerNet Regionswart Süd)  
Richard Gsöls (WegenerNet Regionswart Nord)

Partners: A. Bakirci (consulting expert), Informatik, TU Graz  
GeoPartners-Inst. of Geography and Regional Sciences, Univ. Graz  
A. Pilz Umweltmesstechnik GmbH Graz  
ZAMG-Stmk: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Regionalstelle Steiermark, Graz  
JR-WRM: Joanneum Research Graz/Inst. für  
WasserRessourcenManagement  
FS-UniM: Forschungsgruppe Sferics/Inst. für Physik, Univ. München, D  
Steir. Hagelabwehr Genossenschaft, St.Ruprecht a.d.Raab/Unterfladnitz  
Bezirkshauptmannschaft Feldbach und 27 WegenerNet-Gemeinden  
BORG-Feldbach: Bundesoberstufenrealgymnasium Feldbach  
ASO-Feldbach: Agrarunion Südost Reg.Gen.m.b.H. Feldbach  
BKK-Feldbach: Bezirksbauernkammer Feldbach

Sponsor: Land Steiermark- Wegener Zentrum- Universität Graz

Die [Region Feldbach](#) (Steiermark/Österreich) wurde vom WegCenter als Schwerpunktgebiet für ein Pionierexperiment der österreichischen und internationalen Klimaforschung ausgewählt - für das **WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach**.

151 Klimastationen bilden das WegenerNet und vermessen seit Ende 2006 in einem engmaschigen Netz - eine Station ca. pro zwei Quadratkilometer - die kleinregionale Wetter- und Klimaentwicklung mit neuartiger Genauigkeit. Seit 1.1.2007 laufen die Messungen flächendeckend im 5-Minutentakt; 2007-2008 sind die Jahre des Pilot- und Demonstrationsbetriebs.

In diesem Rahmen verfolgt das Projekt WegDemo, anbindend an das erfolgreiche bis Ende 2007 gelaufene [Pilotprojekt WegenerNet](#), ein dreiteiliges Ziel hin zur

Erreichung einer professionell geführten, in Forschung und Region nachgefragten Klima- und Wetterdatenressource WegenerNet:

1. Aufbereitung der WegenerNet Stationsdaten in operationell verfügbare hochauflösende Wetter- und Klimamonitoring-Felder für alle Daten ab Jänner 2007 (Basisauflösung 1 km x 1 km; gesamtes WegenerNet-Gebiet)
2. Publikation, Verbreitung und Positionierung der Ergebnisse und Informationen zum aufgebauten (weltweit einzigartigen) Feldexperiment in Forschungs-Community, Öffentlichkeit und Region
3. Demonstration des WegenerNet Vollbetriebs in operationeller Form, Festigung der Wartungs-, Service- und Entwicklungsaufgaben bei Stationsinfrastruktur und Sensorik, beim Prozessierungssystem und bei den Nutzerschnittstellen (insbes. Web)

Per Sommer 2009 soll das WegenerNet nach Abschluss des WegDemo Projekts schließlich in einen langfristig angelegten operationellen Betrieb als eine in dieser Art international einzigartige Ressource für hoch auflösende Wetter- und Klimabeobachtung übergehen.

Weiters werden im Laufe des WegDemo Projektes die Kooperationen mit den komplementären flächendeckenden Messungen im WegenerNet-Gebiet zur hoch auflösenden Blitzbeobachtung (LiNet der [Forschungsgruppe Sferics/Dept. f. Physik](#), Univ. München, D) und zur hoch auflösenden Wolken-, Regen- und Hagelbeobachtung (3D Doppler-Wetterradar der [Steirische Hagelabwehrgenossenschaft](#) und TU Graz) intensiviert werden. Ebenso werden (längerfristige) Zukunftsplanungen durchgeführt.

>> [zum WegenerNet Datenportal](#)

## **PP-WegenerNet - Pilotprojekt WegenerNet: Klimastationsnetz Südoststeiermark**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Christoph Bichler (WV)  
Sophia Binder  
Thomas Kabas  
n.n. (Diplomand/in)

*National:*

ASO-Feldbach: Agrarunion Südost Reg.Gen.m.b.H. Feldbach  
BH+Gemeinden Feldbach: Bezirkshauptmannschaft Feldbach und WegenerNet-Gemeinden

Partners: BORG Feldbach: Bundesoberstufenrealgymnasium Feldbach  
ZAMG-Stmk: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik  
Regionalstelle Steiermark  
JR-WRM: Joanneum Research Graz/Institut für WasserRessourcenManagement

Sponsor: Land Steiermark - EU Regionalförderung

The Region Feldbach (Styria/Austria) has been selected by the WegenerCenter as a focus area for a lead experiment of Austrian and international climate research. The

'WegenerNet climate observation network Region Feldbach' is comprised of over 150 weather stations. These have been measuring weather and climate development in a tightly spaced grid (approximately one station per 2 square kilometers) with a previously unknown level of accuracy. The WegenerNet started to deliver data in the fall of 2006. The measurements have been taken in a 5-min interval in the entire grid since Jan 1, 2007. 2007 is the first year ("pilot year") of operation. Many research projects investigating the climate and environmental change and their impact as well as common weather observation will benefit from these measurements. This will lead to a better understanding of climate, weather and environmental risks. Economical and societal consequences can be estimated more precisely.

This will provide further benefit to the population in the region due to the data supporting zoning issues, issues of water and energy supply, protection from natural disasters and regional development.

Die Region Feldbach (Steiermark/Österreich) wurde vom Wegener Zentrum als Schwerpunktgebiet für ein Pionierexperiment der österreichischen und internationalen Klimaforschung ausgewählt - für das WegenerNet Klimastationsnetz Region Feldbach.

Über 150 Klimastationen bilden das WegenerNet und vermessen seit Ende 2006 in einem engmaschigen Netz - eine Station ca. pro zwei Quadratkilometer - die kleinregionale Wetter- und Klimaentwicklung mit neuartiger Genauigkeit. Seit 1.1.2007 laufen die Messungen flächendeckend im 5-Minutentakt; 2007 ist das Jahr des Pilotbetriebs. Viele Projekte zur Erforschung des Klima- und Umweltwandels und seiner Auswirkungen, aber auch die ganz normale Wetterbeobachtung, werden davon profitieren. Klima-, Wetter- und Umweltrisiken werden besser erklärbar und mögliche wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen abschätzbarer. Darüber hinaus entsteht vielfältiger weiterer Nutzen für die Region und die EinwohnerInnen, wie z.B. für Raumordnungsfragen, Versorgung mit Wasser und Energie, Katastrophenschutz und Regionalentwicklung.

## **FWF-DK Climate Change**

Projektname: FWF-DK Klimawandel - Doktoratsprogramm Klimawandel - Unsicherheiten, Schwellenwerte und Bewältigungsstrategien

ProjektleiterIn: Lukas Meyer, Gottfried Kirchengast

Projektteam: [DK Faculty](#)

PartnerInnen: Kooperationspartner

Fördergeber: Österreichischer Wissenschaftsfonds FWF (Haupt-Funding); Universität Graz, Land Steiermark (Ko-Funding)

Dauer: 2014 - 2023

Homepage: <https://dk-climate-change.uni-graz.at/de/>

# RT#3: Support next-generation global observing system for monitoring the climate

## **AEXPWIND - Trace Gas Retrieval and Performance of Wind and Greenhouse Gas Profiling in the IRDAS-EXP/ACCURATE Context**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Gottfried Kirchengast  
Susanne Schweiter  
Veronika Proschek

Partners: Advice:  
Stig Syndergaard, Danish Meteorological Institute (DMI), Copenhagen, DEN

Sponsor: ESA (European Space Agency)

Duration Jul. 2012 - Mar. 2014

The objective of the AEXPWIND study was twofold, 1) to perform a detailed Greenhouse Gas (GHG) analysis and validation of the infrared-laser ground link experiment on the Canary Islands, and 2) to develop a new Abel transform to derive line-of-sight (l.o.s.) wind velocities from Low Earth Orbit (LEO-LEO) infrared-laser occultation (LIO) data and to apply it for l.o.s. wind profile retrieval as well as for improving GHG retrievals in windy air by including a correction for the wind-induced Doppler shift.

The first part of AEXPWIND resulted in a robust algorithm and detailed GHG retrieval results for the first infrared-laser ground link experiment carried out in 2011 in the Canary Islands, which enabled GHG measurements along a 144 km ray-path. Besides the algorithm development and thorough preparation of validation data sets, comprising weather station data and high-resolution ECMWF analysis fields as well as cavity ring-down spectrometer and sampling flask measurements, a thorough analysis of the recorded infrared-laser link spectra and the GHG retrieval process was performed. This included an uncertainty analysis accounting for uncertainties from spectroscopy, validation data, and spectral correction. Retrieval results were obtained for CO<sub>2</sub> isotopes (12CO<sub>2</sub>, 13CO<sub>2</sub>, C18OO), water vapor (H<sub>2</sub>O) and methane (CH<sub>4</sub>). The demonstration was successful and showed that the LIO method has a sound basis for GHG monitoring in the free atmosphere.

The second part of AEXPWIND complemented with its advances the ACCURATE mission concept with a l.o.s. wind retrieval capability and an improvement of the GHG retrieval due to wind-induced Doppler shift correction. As a core basis of this work, a new Abel transform was developed which converts observed differential transmissions between two channels sitting on the inflexion points of the highly symmetric C18OO absorption line to retrieved l.o.s. wind profiles. The transform enables l.o.s. wind profile retrieval accuracies of better than about 2 m/s over the stratosphere (15 km to 35 km), which are essentially unbiased (e.g., averages accurate to better than 0.5 m/s). The corresponding wind-induced Doppler shift in windy air, of the infrared-laser signals for GHG retrieval, can thus

also be robustly corrected; a performance analysis of joint I.o.s. wind and CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O and O<sub>3</sub> retrieval demonstrated this robustness.

## **ACCU-Clouds - Preparing a Key Dimension of ACCURATE Climate Utility: Cloud Sensing and Greenhouse Gas Profiling in Cloudy Air**

Project leader:	Gottfried Kirchengast
Project team:	Gottfried Kirchengast Susanne Schweiter Veronika Proschek
Partners:	Prof. Peter Bernath (expert spectroscopy), Dept of Chemistry, Univ. of York, York, UK Dr. Claudia Emde (expert clouds), Meteorological Institute, Univ. of Munich, Munich, DE Prof. Robert Kursinski (expert microwave occultation), Inst. of Atmospheric Physics, Univ. of Arizona, Tucson, AZ, USA
Sponsor:	FFG-ALR (Austrian Research Promotion Agency- Aeronautic and Space Agency)

The satellite mission concept ACCURATE enables joint atmospheric profiling of greenhouse gases, thermodynamic variables, and wind in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) and beyond. It achieves this unprecedented scope by employing inter-satellite signal links between Low Earth Orbit (LEO) satellites, combining LEO-to-LEO microwave occultation with LEO-to-LEO infrared-laser occultation (LIO). This novel concept was conceived at the WegCenter and proposed to ESA in the context of next Earth Explorer Missions. While not selected for formal phase A study so far, since considered not fully fitting yet from the technical and programmatic side, it received very positive evaluation and was recommended for further study and development.

On this basis FFG-ALR has since 2006 supported the pioneering initial projects [/link{ACCURAD}](#) and [/link{EOPSCCLIM}](#) and ESA subsequently the projects [/link{ACTLIMB}](#) and [/link{IRDAS}](#). ACCU-Clouds builds on these activities as an innovative project complementing these predecessor studies in the key dimension of providing cloud sensing and cloudy-air greenhouse gas profiling capabilities.

Related to assessing the potential of such capabilities for climate change monitoring and research, ACCU-Clouds prepares novel scientific algorithms for retrieving cloud layering and cloudy-air greenhouse gas profiles from LIO data. These algorithms are seamlessly embedded into WegCenter's occultation software system (EGOPS), generally used to integrate new occultation simulation and retrieval developments in an end-to-end framework. Furthermore, in order to test the advanced system, an end-to-end performance analysis is undertaken which uses the new cloudy-air greenhouse gas profiling capability to assess its utility for climate science. Results show that the detection of clouds works in a highly reliable way and that greenhouse gas concentrations are accurately derived in all conditions not blocked by clouds. Overall ACCU-Clouds contributes a crucial milestone on the way towards realizing an ACCURATE mission for the benefit of monitoring the changing atmospheric composition and climate in the 21st century.

## **IRDAS-EXP - SWIR Long Range Differential Absorption Experiment for Trace Gas Measurements**

Project leader: Peter Bernath (Dept of Chemistry, Univ. of York; IRDAS-EXP prime contractor)  
Gottfried Kirchengast (of WegCenter part; IRDAS-EXP main subcontractor)

Univ. of York:  
Peter Bernath  
Barry Thomas  
Jin-G. Wang  
Gonzalo G. Abad  
Keith Tereszchuk  
James Brooke

Project team: WegCenter:  
Gottfried Kirchengast  
Susanne Schweitzer  
Veronika Proschek  
Christoph Zwanziger

Univ. of Manchester:  
Philip Martin  
Vas Kasiutsich

MPI Biogeochemistry-Validation Support:  
Christoph Gerbig  
Olaf Kolle

IAP Moscow-Scintillation Study Support:  
Michael Gorbunov  
Alexandre Gurvich

Partners: Dept of Chemistry, Univ. of York, York, UK  
School of Chemical Engineering and Analytical Science, Univ. of Manchester, Manchester, UK  
Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Jena, DE  
Inst. of Atmospheric Physics, Russian Acad. Sciences, Moscow, RU

Sponsor: European Space Agency ESA

The context of the IRDAS-EXP project, a successor project of the [IRDAS](#) project, is the infrared-laser occultation technique (LIO), which is a powerful, active occultation method for the measurement of various atmospheric trace gases. This technique exploits narrowband laser signals in the short-wave infrared spectral range (SWIR, 2  $\mu\text{m}$  to 2.5  $\mu\text{m}$ ) to derive the concentrations of a range of trace species, especially greenhouse gases, via differential absorption spectroscopy. The previous projects [ACTLIMB](#) and [IRDAS](#) showed that the accuracy of trace gas profiles measured using LIO will be very high. In particular,

using the signals foreseen for the so-called ACCURATE mission for climate benchmark profiling of greenhouse gases and thermodynamic variables and wind from space, the volume mixing ratios of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> (12CO<sub>2</sub>, 13CO<sub>2</sub>, C18OO), CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and CO can be determined accurate to within 1 % to 4 % individual-profile rms error over the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS). Together with the high vertical resolution, unbiasedness and good global coverage of the data---characteristics which are intrinsic to the occultation method---the LIO technique is highly complementary to currently operated measurement methods.

In this context the aim of the IRDAS-EXP project is the preparation and conduction of an experiment, including the related analysis of the results, which will demonstrate the LIO technique for the first time. The IRDAS-EXP experiment will be ground based and be performed at an altitude of about 2.4 km between two observatories at the Canary Islands which are about 144 km apart (isles of La Palma and Tenerife). The instrumentation needed, i.e., transmitter and receiver for testing the infrared-laser occultation, is constructed and tested at the Univ. of York, UK, together with the Univ. of Manchester, UK, with scientific support from the Univ. of Graz, AT. Optionally also cameras for additional analysis of the data are considered, focusing on scintillation studies; this part is scientifically supported by the Inst. of Atmospheric Physics, Russian Acad. of Sciences, RU. The measurement campaign, together with related in-situ greenhouse gas measurements for validation supported by the MPI for Biogeochemistry Jena, DE, is foreseen in July 2011. This experiment, focused in terms of parameters on the key species CO<sub>2</sub> (12CO<sub>2</sub>, 13CO<sub>2</sub>, C18OO), CH<sub>4</sub>, and H<sub>2</sub>O, will deliver important insight into the LIO technique and be an essential step towards operation of the LIO technique in space.

## **ACTLIMB - Study of the Performance Envelope of Active Limb Sounding of Planetary Atmospheres**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project manager: Susanne Schweitzer

Gottfried Kirchengast  
Susanne Schweitzer  
Veronika Proschek  
Florian Ladstädter

Project team: Staff members at DMI:  
Hans-Henrik Benzon  
Georg Bergeton Larsen  
Kent Baekgaard Lauritsen  
Stig Syndergaard

Staff members at CNIT:  
Fabrizio Cuccoli  
Luca Facheris  
Enrica Martini

Staff members at DLR:

Claudia Emde

Staff members at FMI:

Esa J. Kallio

Viktoria Sofieva

Johanna Tamminen

Consulting Experts:

Michael Gorbunov (Institute of Atmospheric Physics, Moscow, Russia)

Joachim Horwath (Institute of Communications and Navigation, DLR, Oberpfaffenhofen, Germany)

Partners:

Danish Meteorological Institute (DMI), Copenhagen, Denmark  
National Inter-University Consortium for Telecommunications (CNIT), Florence, Italy  
Institute of Atmospheric Physics, German Aerospace Center (DLR), Oberpfaffenhofen, Germany  
Finish Meteorological Institute (FMI), Helsinki, Finland

Sponsor: European Space Agency (ESA)

The purpose of the ACTLIMB project is to assess the capabilities and performance of the active limb sounding (also termed occultation) technique, exploiting radio, microwave (MW) and shortwave infrared (SWIR) signals. In doing so, ACTLIMB focuses on the Earth's upper troposphere and lower stratosphere (UTLS), the region where terrestrial occultation techniques are most promising for sounding atmospheric climate, chemistry, and dynamics with unique quality and comprehensiveness (towards end of project some scaling of results to planetary atmospheres, focus Venus and Mars, will be done). Some attention is also paid to the free lower troposphere (down to the top of boundary layer), regarding MW retrieval performance in presence of clouds and turbulence, and the upper stratosphere, regarding the performance in this fairly rarefied gas up to the stratopause.

Furthermore, given that the radio occultation technique (e.g., using GPS radio signals) was already proven in a series of satellite missions, ACTLIMB focuses on the techniques of MW occultation (MWO; cm- and mm-wave signals) and IR laser occultation (ILO; SWIR signals), where no demonstration mission has been undertaken yet and where combining ILO with MWO is novel and was only recently first proposed by the link\{ACCURATE mission proposal to ESA\}. ACTLIMB aims to contribute in particular improved understanding of the performance of this ACCURATE-type combined MWO and ILO mission concept, complemented at the end by scaling the performance to planetary atmospheres (Venus and Mars).

ACTLIMB supports these aims by pursuing the following specific objectives:

- to review the applications of active radio-MW-IR occultation techniques applied so far or proposed for the future (such as the ACCURATE-type MWO+ILO concept),
- to assess the retrieval performance of MW occultation, putting the focus on performance limits in challenging atmospheric conditions (cloudy and turbulent conditions relative to clear-air conditions; and rarefied target species conditions),
- to extend the technique to the SWIR domain, putting the focus on combined MWO+ILO and its performance in challenging conditions (cloudy, turbulent, and



aerosol-laden conditions relative to clear-air; and rarefied conditions) as well as in joint sounding of thermodynamic and trace species variables,

- to assess the performance of the (combined) MWO and ILO methods under non-ideal geometries (foci space-to-ground, space-to-airplane, airplane-to-ground, airplane-to-airplane, ground-to-ground), and the degree to which the non-ideal geometry concepts allow to demonstrate the validity of full occultation geometry implementations,
- to identify unifying and differing elements of the various approaches of radio-MW-IR occultation, and to extend and scale the results to planetary atmospheres, and
- to develop and enhance in course of the work the corresponding simulation and processing software tools (propagation modeling and retrieval algorithms, especially the End-to-end Generic Occultation Performance Simulation and Processing System EGOPS).

With this work scope the ACTLIMB project also provides necessary and valuable pre-requisite and complementary work to the partly concurrent [IRIDAS project](#).

## **IRIDAS - Differential Absorption Spectroscopy in the SWIR for Greenhouse Gas Monitoring using Coherent Signal Sources in a Limb Sounding Geometry**

Project leader: Peter Bernath (Dept of Chemistry, Univ. of York; IRIDAS prime contractor)  
Gottfried Kirchengast (of WegCenter part; IRIDAS main subcontractor)

Univ. of York:  
Peter Bernath  
Barry Thomas  
Jeremy Harrison  
Nick Allen

Project team: WegCenter:  
Gottfried Kirchengast  
Susanne Schweitzer  
Veronika Proschek  
Florian Ladstädter

DMI:  
Georg B. Larsen  
Stig Syndergaard

Partners: Dept of Chemistry, Univ. of York, York, UK  
Danish Meteorological Institute (DMI), Copenhagen, DK  
M. Riese (consulting expert), Inst. for Chemistry and Dynamics of the Geosphere, FZ Juelich, Germany

Sponsor: European Space Agency ESA

The main objective of the IRIDAS project is to consolidate the scientific basis for active occultation measurements in the Shortwave Infrared (SWIR) spectral region as proposed in

the link{ACCURATE climate satellite mission proposal to ESA}. In this method differential absorption of laser beams, in the 2.0–2.5 µm spectral region with propagation in limb sounding geometry, is employed to accurately measure atmospheric concentrations of greenhouse gases. Related to this, IRDAS will focus on the spectroscopic properties of the atmosphere and the relevant (greenhouse gas) target species in the Upper Troposphere and Lower Stratosphere (UTLS).

Active occultation measurements in the SWIR region are novel and could form the basis of a standalone mission (e.g., for demonstration) or be combined with microwave occultation (full climate mission) as discussed in the ACCURATE proposal. Under its overall objective to aid consolidation of the scientific basis for an ACCURATE-type mission, the IRDAS project will focus on:

- Consolidating the basic science objectives, the related geophysical data requirements, and the (in turn) related observational requirements for an ACCURATE-type mission
- Assessing the possible science contribution and scientific impact of an ACCURATE-type mission and synergies with other instruments
- Comparing the expected performance with passive (down-looking) sounding, to identify possible synergies and to highlight the complementary nature of both approaches
- Characterizing broadband atmospheric effects in the differential absorption technique and developing a functional model for the SWIR spectral region
- Consolidating the baseline selection of absorption lines and reference spectral regions for sensing the relevant greenhouse gases
- Recommending representative laser line pairs near 2.1 µm for demonstration purposes
- Providing an error budget, with focus on atmospheric and spectral uncertainties

Under these foci, IRDAS will analyze the uncertain effects of broadband atmospheric “distortions” of the laser beam as well as errors in spectroscopic line parameters on the accuracy of the retrieved trace gas concentrations using the SWIR laser occultation technique. The project will heavily employ software simulation, validated using existing actual SWIR limb observations of the UTLS region. Overall IRDAS will significantly aid to more clearly define the possible contributions to atmosphere and climate science of a dedicated mission based on an ACCURATE-type concept.

## **ACCURAIID - Aid to ACCURATE Climate Satellite Mission Preparations for backing the Austrian Lead Role**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Susanne Schweitzer (Project manager)  
Florian Ladstädter  
Johannes Fritzer  
Josef Ramsauer

Partners: ACCURATE Scientific Partners (more than 20 scientists from more than 12 countries, complemented by a team of industry partners and advisors)

Sponsor: FFG- ALR (Austrian Research Promotion Agency- Austrian Aeronautics and Space Agency); National Space Programme (ASAP- ARTIST)

The overall purpose of the ACCURAID project was an initial assessment of the scientific utility and performance of the novel LEO-LEO infrared occultation (LIO) part of the ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region And climate Trends Explorer) mission concept. With regard to the GNSS-LEO and the LEO-LEO radio occultation parts (GRO and LRO), no work was done within this project, because measurement process and data-retrieval performance of these parts have been studied to some detail in previous work and are continued elsewhere.

ACCURAID was a preparatory and accompanying study in the context of the ACCURATE mission development. In particular, two main lines of work have been pursued:

- Enhancement of an existing end-to-end radio occultation simulation tool (EGOPS) for enabling quasi-realistic simulations of LIO measurements,
- Initial end-to-end analysis of retrieval performance for greenhouse gas and isotope profile retrievals from LIO data.

Project reports for both lines of work document the project results. ACCURAID's initial activities on the ACCURATE mission concept are continued in the successor project EOPSCLIM and other projects.

## **ACEPASS - LEO-LEO Occultation Characterisation Study**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Johannes Fritzer  
Josef Ramsauer  
Susanne Schweitzer

Partners: DMI - Danish Meteorological Institute  
IUP - Institut für Umweltphysik, Universität Bremen  
CTH - Chalmers University of Technology (Space Observatory Onsala), Schweden  
Universität von Florenz, Italien

Sponsor: ESA (European Space Agency)

## **ACECLIM - Climate Impact Study**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team:

Partners: MPIM - Max Planck Institut für Meteorologie,  
Hamburg;  
IUP - Institut für Umweltphysik Universität Bremen;  
CTH - Chalmers University of Technology,  
Göteborg

Sponsor: ESA (European Space Agency)

## **GEOCLIM**

Projektname: Kooperationsprojekt GEOCLIM Data Infrastructure Austria

ProjektleiterIn: Gottfried Kirchengast, Univ. Graz

Projektteam: Heimo Truhetz  
Marc Schwärz  
Univ. Graz: Armin Leuprecht  
Florian Ladstädter  
Clement Atzberger & Harald Rieder & Herbert Formayer, BOKU Wien  
Wolfgang Wagner &  
Matthias Schramm, TU Wien  
Leo Haimberger, Univ. Wien  
PartnerInnen: Torsten Mayer-Guerr, TU Graz  
Gerhard Wotawa & Matthias Themessl & Andreas Krimberger, ZAMG  
Christian Briese &  
Thomas Mistelberger, EODC  
Chris Schubert, CCCA-DZ  
Fördergeber: Hochschulraum-Strukturmittel (HRSM), Wissenschafts- und  
Forschungsministerium BMBWF

Dauer: Jän. 2017 - Juni 2021

Im Projekt GEOCLIM werden die bestehenden Datenzentren Earth Observation Data Centre (EODC am Standort Arsenal; [www.eodc.eu](http://www.eodc.eu)) und Climate Change Centre Austria-Data Centre (CCCA-DZ bei der ZAMG Hohe Warte; [www.ccca.at](http://www.ccca.at)) weiter ausgebaut, integriert und mit den Hochleistungscomputern des Vienna Scientific Cluster (VSC am Standort Arsenal; [www.vsc.ac.at](http://www.vsc.ac.at)) verbunden. Dies schafft international konkurrenzfähige Rechen- und Speicher-Kapazität für Monitoring und Modellierungen (z.B. von Klima, Atmosphäre, Landoberfläche, Wasserhaushalt, Ökosystemen) und fördert die Intensivierung der Kooperation der Projektpartner in wissenschaftlicher Forschung und Anwendungen.

GEOCLIM unterstützt damit nachhaltig die Etablierung und den weiteren Ausbau wichtiger Zukunftsthemen in Österreich, wie satelliten-gestützte Erdbeobachtung, Klimamodellierung und Klimaforschung, sowie Risikomanagement und Ökosystemsimulation.

Durch koordinierten Ausbau der Datenzentren und die Kooperationsförderung in dieser Weise strebt GEOCLIM folgende Zielerreichungen an:

- zeitnahe und kosteneffiziente Verfügbarmachung von Geo- und Klimadaten, für Echtzeitdaten als auch post-prozessierte und langzeit-archivierte Daten;
- gebündelte und effiziente Bereitstellung von Rechenleistung und Storage für die Analyse von Erdbeobachtungs-, Geo-, Klima-Daten sowie für die hoch-auflösende Klimamodellierung und für Klimaservices;
- Vermeidung kostspieliger und zeitaufwendiger Datentransfers durch Förderung des Prinzips "Algorithm to Data";
- dauerhafte Stärkung der Kooperation der beteiligten Partner zur vollen Entfaltung des vorhandenen Potenzials in Forschung, Lehre und Entwicklung;
- Schaffung und Stärkung von Synergien in Lehre und Nachwuchsförderung im Bereich "Big Data" und "Machine learning";
- Schaffung wissenschaftlichen Freiraums (verringerte Arbeitsbelastung) durch gemeinsam genutzte Datenmanagement- und Datenportal-Lösungen;
- Unterstützung der Kooperation durch Bereitstellung einer gemeinsamen und offenen Entwicklungsumgebung für Datenanalyse und -visualisierung;
- volle Nutzung des Potenzials von optischen Sentinel-2 Daten zusammen mit Daten des Mikrowellen-Sensors Sentinel-1 sowie mit Sentinel-3 Daten;
- volle Nutzung des Potenzials der Multi-Satellitendaten der GNSS-Radiokokultation für Atmosphären- & Klimaforschung und Anwendungen;
- Schaffung einer exzellenten Basis zur Akquisition weiterer Projekte und entsprechender Forschungsgelder (z.B. EU, ESA, EUMETSAT Projekte).

# RT#1 and RT#3: Joint system development for occultation and climate analysis

## ESA-ProdexCN2 - Radio and Optical Occultation: EGOPS6 System Development

Project leader: Gottfried Kirchengast

Gottfried Kirchengast  
Johannes Fritzer  
Michael Pock  
Josef Ramsauer (2007)

Project team: Team Support and Advice:  
Barbara Pirscher  
Michael Borsche  
Florian Ladstädter  
Susanne Schweitzer  
Ulrich Foelsche  
Andrea K. Steiner

Partners: Michael Gorbunov (Institut for Atmospheric Physics, Moskau, Russland)  
Christian Retscher (NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA)

Sponsor: ESA (European Space Agency)

The ProdexCN2 project comprises four main aims: 1) Integration and development of end-to-end radio occultation (RO) simulation (both GRO, GNSS-LEO RO, and LRO, LEO-LEO RO) and real RO data processing into a single joint system, 2) Integration of end-to-end simulation of optical LEO-LEO infrared laser occultation (LIO) with radio occultation (LRO and GRO) for all new LIO developments, where in particular the integration of LIO with LRO retrieval processing system elements is challenging at system development level, 3) Upgrades for seamless use of space-to-ground modeling in addition to the space-to-space modeling both in the forward and observation system modeling parts, in order to allow simulation of signals for space-to-ground demonstration setups similar to those for full space-to-space setups, 4) At S/W system level streamlining of the EGOPS S/W interfaces to a simplified and more generic system, especially of input and output data I/Fs for the simulated and processed occultation profile data, complemented by an automatic test suite already utilizing these improved I/Fs.

The scientific-technical work for implementing the four main aims summarized above is performed within the following four main work packages (WP 1 is Project Management):

- WP 2 - EGOPS5 master and EGOPS5 derivatives integration (aims 1 and 2),
- WP 3 - Update and harmonize space-to-ground link modeling (aim 2 and 3),
- WP 4 - Update and streamline EGOPS file I/Fs and graphical user I/F elements (aim 4),

- WP 5 - EGOPS system control, testing, and documentation (aim 4 and integrating WP).

An EGOPS6 User Requirements Document (URD), providing detailed requirements for the S/W, serves as the key reference for the S/W functionality to be achieved by the work.

## **EOPSCLIM - End-to-end Occultation Processing System and Climate Monitoring Service: MetOp GRAS and ACCURATE Integration**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Gottfried Kirchengast  
 Susanne Schweitzer (Project manager)  
 Barbara Pirscher  
 Michael Pock  
 Florian Ladstädter

Project team: Bettina Lackner  
 Irina Thaler  
 Michael Borsche  
 Ulrich Foelsche  
 Andrea Steiner  
 Johannes Fritzer

Partners: International Team Advisors:  
 Bill Kuo (UCAR Boulder, USA)  
 Kent. B. Lauritsen (DMI Copenhagen, DK)  
 Stephen S. Leroy (Harvard University, USA)  
 Christian Retscher (NASA/GSFC, USA)  
 Torsten Schmidt (GFZ Potsdam)  
 Jens Wickert (GFZ Potsdam)  
 sowie Mitglieder des internationalen ACCURATE Team

Sponsor: FFG- ALR (Austrian Research Promotion Agency- Aeronautics and Space Agency)

The provision of carefully validated radio occultation (RO) climatologies from the new European MetOp satellites (MetOp-A launched in October 2006) is of key interest to climate research, since these RO observations derived from navigation signals of the Global Positioning System (GPS) allow to retrieve fundamental variables of the Earth's atmosphere (temperature, pressure, humidity) with unprecedented accuracy and consistency. Complementarily, preparing for future occultation systems, the ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region And climate Trends Explorer) mission conceived at the Wegener Center is a next-generation climate mission concept adding greenhouse gas and wind measurement information. Further developing this concept is another key interest for enabling future occultation systems to provide unprecedented benchmark observations of greenhouse gas increases and related climate change.

In this context, the EOPSCLIM project contributed along three main lines:

1. validation of MetOp GRAS data with data from other research RO missions as well as ECMWF analyses, and set up of regional climate monitoring based on RO data for IPCC regions,
2. advancement of the new ACCURATE infrared laser occultation functionality within the WegCenter's end-to-end occultation simulator system ("EGOPS") by aerosol modeling and by a first version of wind profile retrieval processing,
3. contribution to the integration of real RO data processing within the EGOPS system, focusing on the new MetOp GRAS data stream.

In addition to its vital contributions to further development of the ACCURATE concept and to MetOp GRAS validation in the framework of the ESA/EUMETSAT MetOp Research Announcement of Opportunity, EOPSLIM made available, for the first time, RO based regional climate monitoring over the official IPCC regions (about two dozen worldwide land regions in Africa, Europe, Asia, North America, Central and South America, Australia and New Zealand, complemented by polar and oceanic regions). This opens a new avenue of exploiting RO data for regional climate change diagnosis.

Die Bereitstellung sorgfältig validierter Klimatologien auf Basis von Radiookkultations-(RO)-Messungen der neuen europäischen MetOp Wettersatelliten (Start MetOp-A im Oktober 2006) ist ein Schlüsselinteresse der Klimaforschung. Dies deswegen, da diese RO-Messungen basierend auf Navigationssignalen des Globalen Positionierungssystems GPS die Bestimmung fundamentaler Klimaparameter der Atmosphäre (wie Temperatur, Druck und Feuchte) mit einer bisher nicht erreichten Genauigkeit und Konsistenz ermöglichen. Ergänzend ist die Satellitenmission ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region And climate Trends Explorer), die am Wegener Zentrum erdacht wurde, von besonderem Interesse: ein geplantes Okkultations-Messkonzept der nächsten Generation mit dem in Zukunft zusätzlich auch Treibhausgas-Konzentrationen und Wind gemessen werden können. Dies kann weitere Schlüsselinformationen bezüglich Zunahme von Treibhausgasen und Klimaänderungen in bisher nicht verfügbarer Genauigkeit und Zuverlässigkeit liefern.

In diesem Kontext trug das EOPSLIM Projekt in drei Bereichen bei:

1. Validierung von RO-Daten des MetOp RO-Instruments GRAS (GNSS Receiver for Atmospheric Sounding), wobei Vergleichsdaten anderer RO-Satellitenmissionen und von Analysen des Europäischen Zentrums für Mittelfrist-Wettervorhersage (ECMWF) verwendet wurden,
2. Weiterentwicklungen zur ACCURATE Infrarot-Laserokkultation im end-to-end occultation simulator system "EGOPS" des Wegener Zentrums im Bereich Aerosolmodellierung und Windbestimmung,
3. Beitrag zur Integration der Prozessierung von aktuellen RO-Echtdaten im EGOPS System, mit Fokus auf den Datenstrom vom neuen MetOp GRAS Instrument.

Zusätzlich zu seinen essenziellen Beiträgen zur MetOp GRAS Validierung und zur Weiterentwicklung des ACCURATE Konzepts hat EOPSLIM dabei erstmalig im Rahmen der RO-Datenprozessierung auch regionale Klimatologien über den offiziellen Regionen des IPCC geliefert (mehr als zwei Dutzend Landregionen weltweit in Afrika, Europa, Asien, Nordamerika, Mittel- und Südamerika, Australien und Neuseeland; ergänzt durch polare und ozeanische Regionen). Damit hat EOPSLIM auch eine neue Schiene der Verwertung von RO-Daten für Monitoring und Diagnose von regionalen Klimaänderungen eröffnet.



## **ESA-ProdexCN1 - Advanced Topics in Radio Occultation Modeling and Retrieval**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Johannes Fritzer  
Josef Ramsauer  
Marc Schwärz  
Susanne Schweitzer

Partners: Michael Gorbunov (Institut for Atmospheric Physics, Moskau, Russland)

Sponsor: ESA (European Space Agency)

The objectives of the Prodex-CN1 project included work on advanced topics in radio occultation modeling and retrieval along two study lines, the first one on preparing tools, the second one on using them for performance assessments: 1) advancement of modeling, retrieval algorithms and performance evaluation tools, 2) radio occultation performance studies for X/K band inter-satellite links. Meeting these objectives included advancement of End-to-end Generic Occultation Performance Simulator version 5 (EGOPS5) software and consolidation of LEO-LEO radio occultation (LRO) performance knowledge, in particular related to challenging atmospheric sounding conditions in the presence of atmospheric turbulence, which require invoking a wave-optics (WO) modeling approach in the simulation tools and the analysis.

In line with the project tasks, the EGOPS5 software received substantial LRO simulation upgrades, both in wave-optics forward modeling and retrieval, as well as in the full LRO retrieval processing chain. In addition, the so-called EGOPS Joint Development strategy, started in mid 2006, was especially useful to lead to further advancements related to real GNSS radio occultation (GRO) data processing (CHAMP, SAC-C, etc.) and to a completion of the EGOPsv5.2 full release to users by May 2007. Furthermore, it prepared to define a substantial modernization and further improvement in S/W engineering approach, of future work towards EGOPS6 in the Prodex-CN2 project and related projects.

The performance studies consolidated the knowledge, on top of ACE+ heritage, on both adequate system and observational requirements for X/K band and K band LRO systems as well as on the characterization and understanding of the whole LRO technique and its processing. In particular, they consolidated the understanding of the influence of phase and amplitude scintillations in received X/K band signals in presence of (strong) atmospheric turbulence. Evidence was re-enforced that WO-based differential transmission retrieval keeps retrieval errors at small levels also in presence of strong turbulence and enables that X/K band RO phase delay and transmission are a promising future data source for accurate temperature and humidity profiling.

Looking forward to the Prodex-CN2 project, this will allow to fully realize the new approach of EGOPS Joint Development by the UniGraz group and its international development partners. It will transform the present EGOPS5 system (ending with the EGOPsv5.2 release) to a new EGOPS6 system where GRO, LRO, and LEO-LEO infrared laser occultation (LIO), as well as simulated data processing and real data processing, are treated at a joint system development level. This will provide a further enormous boost to the scope and utility of EGOPS for all users, both in-house at UniGraz as well as worldwide,

and will ensure further growth of the user community and of the international standing of the EGOPS development partners. For more information on the planned Prodex-CN2 work see the "ESA-ProdexCN2" project description.

## **ESA-Prodex - Preparation of the EGOPS Software for the Inclusion of Galileo Signals**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Johannes Fritzer  
Josef Ramsauer

Partners: Manfred Sust (Austrian Aerospace, Wien)  
Georg Grabmayr (Austrian Aerospace,  
Wien)

Sponsor: ESA (European Space Agency)

The project was concerned with the upgrade of the End-to-end Generic Occultation Performance Simulator (EGOPS) software for end-to-end treatment of Galileo signals, at equal footing with GPS signals. This included in particular the respective upgrading of the three core sub-systems (mission analysis/planning, atmospheric observable modelling, and geophysics retrieval processing) as well as preparing the observation system modeling for seamless inclusion of Galileo instrument processing (i.e., allowing Galileo receiving system simulation at in the same manner as GPS receiving system simulation).

By end of project EGOPS was capable of handling at equal footing all three GNSS systems, GPS (U.S.), Glonass (Russia), and Galileo (European, under development). The documentation to these upgrades was embedded into the EGOPS documentation of the extension project "ESA-ProdexCN1".

# Complementary projects: other occultation techniques and advanced IR sounding

## **GADEM - Galileo Atmospheric Data Enhancement Mission**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Josef Ramsauer  
Marc Schwärz

Partners: Erwin Kayser-Threde GmbH, München  
GEO-ZUP Company, Moskau

Sponsor: EU

The WegCenter/UniGraz Team has summarized scientific applications and defined scientific requirements for GADEM K band radio signals, and performed an end-to-end scientific performance analysis for both space-to-space and space-to-ground links.

The performance analysis addresses the quality of atmospheric data products expected by a GADEM-type measurement configuration. The performance analysis covers a Galileo-LEO part (occultation measurements of temperature and humidity profiles) as well as a Galileo-GS part (space-to-ground slant column integrated water vapor measurements). Based on a comprehensive end-to-end simulation software (End-to-end Generic Occultation Performance Simulator, EGOPS), the performance of both these measurement configurations was simulated and analyzed for a typical set of instrumental errors, using realistic orbital and ground-station geometries and using as a realistic atmospheric model a high resolution global weather analysis field, including also liquid water and ice water clouds. An operational analysis of the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) was taken for the purpose. In addition, turbulent atmospheric conditions were taken into account for Galileo-LEO links.

The main conclusion is that the GADEM system requirements as laid out in the GADEM scientific applications document are just adequate to achieve the observational requirements (summarized in the same document) for both the Galileo-LEO part and the Galileo-GS part, respectively. This confirms that those requirements, in many aspects drawing from heritage from previous study of similar systems (e.g., LEO-LEO K band occultation) provide a sound basic set of specifications for GADEM system design.

Based on the encouraging results of the performance analysis a GADEM demonstration experiment is strongly recommended.

## **MULTICLIM - From CHAMP towards Multi-Satellite Climate Monitoring based on the METOP and COSMIC Missions**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Armin Leuprecht  
Michael Pock  
Marc Schwärz

Partners:

Sponsor: FFG-ALR  
(Forschungsförderungsgesellschaft)

The overarching goal of the MULTICLIM project was to prepare for global monitoring of the climate evolution of the Earth's upper troposphere/lower stratosphere region with high accuracy and consistency and thereby help to improve the ability to detect, attribute, and predict climate variability and change. The key datasets for this purpose are radio occultation (RO) data and Infrared Atmospheric Sounder Interferometer (IASI) data, of which the latter were in the focus of the MULTICLIM project.

One of the primary objectives of the IASI sensor on board the European MetOp satellites (the first satellite MetOp-A being in orbit since October 2006) is the improvement of the vertical resolution of temperature and water vapor profiles to about 1-2 km in the troposphere as well as to improve the retrieval accuracy to within 1 K in temperature and about 10% in humidity. A main scientific motivation for this is the key role played by water vapor in the upper troposphere and its effects on the global climate, since only small changes in humidity and its trends have serious implications on the amount of thermal energy escaping to space and thus on the strength of the Earth's greenhouse effect. IASI is expected to supply more accurate quantification of climate variability and change, particularly contributing to our knowledge of the climate relevance of the upper troposphere. Additionally, the IASI data promise to greatly assist numerical weather prediction (NWP) in delivering accurate and frequent temperature and humidity profiles for operational and meteorological research needs.

Contributing in the framework of the joint ESA and EUMETSAT MetOp Research Announcement of Opportunity, the MULTICLIM project undertook to advance IASI retrieval algorithms and to prepare IASI climatology processing for climatologies at high horizontal resolution, but also with horizontal grids matching RO climatologies prepared in a separate project. Furthermore, retrieved temperature, humidity, and ozone profiles as well as sea surface temperature (SST) data from a "test orbit" of real MetOp IASI data were validated against co-located data from analysis fields of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

The project valuably contributed to the validation of IASI data during the MetOp-A satellite commissioning phase as well as paved the way to further advancement and broader application of the IASI retrieval system for climate studies.

Das übergeordnete Ziel des MULTICLIM Projektes war zur Vorbereitung eines globalen Klima-Monitorings der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre der Erde mit hoher Genauigkeit und Konsistenz beizutragen und damit zu einer verbesserten Detektion und Vorhersage von Klimavariabilität und Klimawandel. Schlüssel-Datensätze für diesen Zweck sind jene von Radiookkultation und des Infrarot-Atmosphären-Sondierungs-Interferometers (IASI), wobei letzteres im Fokus des MULTICLIM Projektes stand.

Ein primäres Ziel des neuen IASI Instruments an Bord der Europäischen operationellen Wettersatelliten MetOp (der erste Satellit MetOp-A ist seit Oktober 2006 im Orbit) ist die

Verbesserung der vertikalen Auflösung von Temperatur- und Wasserdampfprofilmessungen auf ca. 1-2 km in der Troposphäre sowie der Genauigkeit auf mind. 1 K in der Temperatur und ca. 10% in der Feuchte. Eine wissenschaftliche Hauptmotivation für dieses Ziel ist die Schlüsselrolle des Wasserdampfs in der oberen Troposphäre wegen seiner Auswirkungen auf das globale Klima: nur kleine Feuchteänderungen und -trends bewirken schon deutliche Änderungen in der Wärmestrahlung der Erde und damit bei der Stärke des Treibhauseffekts. IASI sollte eine genauere Berechnung der Klimaänderungen ermöglichen und insbesondere der klimatischen Relevanz der oberen Troposphäre dabei. Zusätzlich verspricht IASI signifikante Beiträge zur Numerischen Wettervorhersage durch seine genauen und räumlich dicht gewonnenen Temperatur- und Wasserdampfprofile für den Bedarf der operationellen Meteorologie und der Wetterforschung.

Als Beitrag im Rahmen des gemeinsam von ESA und EUMETSAT getragenen "MetOp Research Announcement of Opportunity" wurde im MULTICLIM Projekt ein IASI Datenprozessierungssystem zur Atmosphärenprofilberechnung weiter entwickelt sowie die Erstellung von globalen Klimatologien mit hoher räumlicher Auflösung aus IASI Profilen vorbereitet und demonstriert. Weiters wurden Temperatur-, Feuchte- und Ozonprofile sowie Meeresoberflächentemperaturen, welche aus einem „Test-Orbit“ echter MetOp IASI Daten berechnet wurden, mit Hilfe von örtlich-zeitlich passenden Daten von Wetteranalyse-Feldern des Europäischen Zentrums für Mittelfrist-Wettervorhersage validiert.

Das Projekt lieferte damit einerseits wertvolle Beiträge zur Validierung von IASI-Daten während der Kommissionierungsphase des MetOp-A Satelliten und bereitete andererseits den Weg zur weiteren Verbesserung und breiteren Anwendung des IASI Prozessierungssystems für Klimastudien.

## **GOMOS-HRTP - Development of Algorithms for the Estimation of High Resolution Temperature, Pressure and Density Profiles from GOMOS**

Project leader: Gottfried Kirchengast

Project team: Christian Retscher (bis Mai. 2005)

Partners: Christian Retscher (ab Jun. 2005; ESRIN, Frascati, Italien)  
ACRI - ST, Sophia Antipolis Cedex, Frankreich

Sponsor: ESA (European Space Agency)