

## COVER

Combination of observation techniques for climate and geophysical research

<b>Programm / Ausschreibung</b>	ASAP, ASAP, ASAP 18. Ausschreibung (2021)	<b>Status</b>	abgeschlossen
<b>Projektstart</b>	01.07.2022	<b>Projektende</b>	30.06.2024
<b>Zeitraum</b>	2022 - 2024	<b>Projektlaufzeit</b>	24 Monate
<b>Keywords</b>	Earth gravity field;combination;GRACE;SLR;Space Debris;		

### Projektbeschreibung

Zeitlich variable Schwerefeldlösungen spielen seit Beginn des 21 Jahrhunderts eine wesentliche Rolle bei der Bestimmung von Massentransporten im System Erde. Sie eignen sich besonders für die Beobachtung und Analyse von klimatischen und geophysikalischen Systemen. Dazu zählt zum Beispiel der terrestrische Wasserkreislauf, die weltweiten Ozeane oder die Kryosphäre. Des Weiteren liefern sie zuverlässige Indizien für deren zukünftige Entwicklung.

Speziell durch die Schwerefeldmission GRACE (2002-2017) und ihrer Nachfolgemission GRACE Follow-On (gestartet 2018) hat sich unser Verständnis hinsichtlich der Massentransporten im System Erde grundlegend geändert. Allerdings sind beide Missionen, aufgrund des zur Anwendung kommenden Messprinzips (satellite tracking in low-low mode), nicht sehr sensitiv für die Bestimmung des sehr langwelligen Anteils des Erdschwerefeldes. Im Gegensatz dazu ist SLR eine Beobachtungstechnik welche speziell darauf ausgelegt ist diesen Bereich des Erdschwerefeldes zu bestimmen. Folglich kann die Kombination der beiden Techniken einen substanziellen Mehrwert darstellen. Bis dato wird dies zumeist durch einen einfachen Austausch der jeweiligen Koeffizienten erreicht. Dies hat jedoch zur Folge das sämtliche vorhanden Zusatzinformationen von GRACE/GRACE-FO verworfen werden.

Ziel des Projektes COVER ist es eine Methodik zu entwickeln welche es ermöglicht, unter der Berücksichtigung von zufälligen und systematischen Fehlern, eine Kombination beider Techniken durchzuführen. Die Grundlage dazu bildet die Implementierung einer unabhängigen SLR Prozessierungskette im bestehenden Softwarepaket GROOPS, welches zur GRACE Prozessierung verwendet wird. Durch diesen Schritt wird eine konsistente Prozessierung von SLR und GRACE/GRACE-FO angestrebt. Die darauf aufbauende Strategie zur Kombination wird zunächst auf Varianzkomponentenschätzung, basierend auf Normalgleichungssystemen, beruhen. Dabei soll ein spezieller Fokus auf die Behandlung von systematischen Fehlern gelegt werden, um einer Überparametrisierung entgegenzuwirken. Zur Quantifizierung des Rauschniveaus des Kombinationsproduktes werden die Ergebnisse mit „GRACE-only“ Lösungen verglichen. Diese Validierung wird durch die Bestimmung von Werten des Quadratmittels individuell für Trockengebiete und ozeanische Bereiche durchgeführt. Hinsichtlich des eigentlichen Signalgehaltes der Kombinationslösung wird weiters ein Vergleich mit unabhängigen SLR und GRACE/GRACE-FO Lösungen in Gebieten mit hohem geophysikalischem Signal angestrebt.

In Bezug auf die SLR Prozessierung verfolgt das Projekt COVER noch ein weiteres Ziel. Seit dem ersten erfolgreichen tracken des Beacon-B Satelliten mittels SLR im Jahr 1964 hat sich die Technik immer mehr weiterentwickelt. Heutzutage kann man mittels SLR die Bahn von Navigations- und geostationäre Satelliten auf wenige Millimeter bestimmen. Allerdings hat sich in den letzten Jahrzehnten, durch die stetig steigende Anzahl an Satelliten im Weltraum, die Gefahr von Kollisionen mit Weltraumschrott signifikant erhöht. Aus diesem Grund initiierte die Europäische Weltraumorganisation (ESA) 2009 das Space Situational Awareness Programm. Teil davon ist das Space Surveillance and Tracking Segment, welches dazu dient, aktive und inaktive Satelliten sowie Weltraumschrottteile (z.B. Trägerstufen von Raketen) zu beobachten. Grundsätzlich werden diese Messungen durch Bodenstationen mittels Radartechnik durchgeführt. Da jedoch die Genauigkeit dieser Methodik limitiert ist haben in der Vergangenheit bereits einige Studien gezeigt, dass SLR das Potential besitzt einen wichtigen Beitrag zur Überwachung von Weltraumschrott zu leisten. Als größtes Hindernis wurde dabei die unzureichende Genauigkeit der Bahnvorhersage angesehen, welche jedoch für eine erfolgreiche SLR Beobachtung benötigt wird. Daher ist es derzeit nur wenigen Stationen weltweit möglich diese Beobachtungen unter großem technischem Aufwand durchzuführen. Eine der führenden SLR Stationen auf dem Gebiet der Beobachtung von Weltraumschrott ist die von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften betriebene Station Graz-Lustbühel.

Vor diesem Hintergrund wird die Station Graz-Lustbühel innerhalb der Projektlaufzeit von COVER, unter Verwendung der erstellten Prädiktionen, Messungen zu Weltraumschrott durchführen. Die dabei gewonnen Erkenntnisse werden direkt in die Weiterentwicklung einfließen. Damit soll gewährleistet werden dass die Qualität der generierten Bahnvorhersagen sich für die SLR Beobachtung von Weltraumschrott eignen und so ein wichtiger Beitrag für die zukünftige Sicherheit im Weltraum geleistet werden kann.

## Abstract

Since the beginning of the 21st century special attention is placed on the computation of long-term mass changes in the system Earth from time-variable gravity. It reflects a key quantity in Earth-, climate and geophysical research and enables the monitoring of geophysical systems like for instance the terrestrial water cycle, the global oceans, and the cryosphere. Subsequently it can also provide a reliable indication on their temporal behaviors.

Especially the gravity field mission GRACE, which was in orbit from 2002 till 2017, and its successor mission GRACE Follow-On (launched in 2018) have fundamentally changed our understanding of mass transport in the Earth system. However, due to their mission design (satellite tracking in low-low mode), both are not especially sensitive to the very long wavelengths of the gravity field. In contrast, satellite laser ranging (SLR) represents an observation technique which is predestined for the determination of the long-wavelength part of Earth's gravity field. Thus, a combination of SLR and GRACE/GRACE-FO can offer substantial benefits. Usually, this is accomplished by a simple substitution of the relevant coefficients, with the effect that all the GRACE/GRACE-FO information is discarded.

Therefore, the project COVER has the objective to develop a methodology to allow for a combination of both observation techniques taking into consideration random and systematic errors. The foundation of these enhanced methodology will be the implementation of an independent SLR processing chain in the existing and well recognized GRACE processing software package GROOPS. This is a key point since it ensures a consistent processing of SLR and GRACE/GRACE-FO. The combination strategy will rely on variance component estimation based on full systems of normal equations with a special focus on the treatment of systematic errors. To avoid overparameterization the potential systematic deficiencies will be thoroughly examined. The noise level of the combination product will be quantified by comparing it with a GRACE only solution in form

of estimating the root-mean-square over ocean regions and dry areas. For the actual signal content, a comparison with independent SLR and GRACE/GRACE-FO solutions in regions where large geophysical signals are expected is envisaged.

Regarding the SLR processing the project has an additional objective in mind. The first SLR observations were performed in 1964 by tracking the Beacon-B satellite. Since then, the observation technique has become more and more sophisticated and has now the capability to track navigation and geostationary satellites with millimeter accuracy. However, through the steadily increasing number of satellites in orbit the risk of collisions with space debris objects is apparent. For this reason, the European Space Agency (ESA) initiated in 2009 the Space Situational Awareness Program which inter alia includes the Space Surveillance and Tracking segment. This has the objective to observe active and inactive satellites, discarded launch stages and space debris objects which are orbiting the Earth.

In general, these observations are performed by ground-based radar stations. However, since the accuracy of these observation technique is limited, several studies in the past have attempted to show that SLR has the capability to make an important contribution regarding the tracking of such uncooperative targets. The biggest barrier nowadays is still the availability of orbit predictions, which are accurate enough to enable a successful tracking. Thus, currently space debris tracking via SLR is only possible with much additional technical effort.

To address this issue, the implementation of the SLR chain will directly be support by the local SLR station Graz-Lustbühel through real-time measurements to space debris objects using the self-produced orbit predictions. Based on the incorporation of cutting-edge force modelling, the consideration of systematic observation errors and the feedback of the SLR station the orbit predictions should be as accurate as possible to enable a successful tracking of space debris objects. With that in mind, the project COVER is intended to make a significant contribution to more safety and security in space in the future.

## **Endberichtkurzfassung**

Mit dem Start der ersten dezidierten Schwerefeldmission CHAMP im Juli 2000 begann eine neue Ära in der globalen Erdschwerefeldbestimmung. Allerdings wiesen sowohl CHAMP als auch alle nachfolgenden Satellitenmissionen (GRACE, GRACE-FO, GOCE) Schwächen bei der Bestimmung des langwelligen Anteils des Erdschwerefeldes auf. Für die exakte Bestimmung dieses Anteils ist nach wie vor die Technik des Satellite Laser Ranging (SLR) zu bevorzugen. Im Projekt COVER konnten erfolgreich Schwerefeldmessungen mittels Satelliten (GRACE, GRACE Follow-On) mit der Messmethode von SLR innerhalb eines einzigen Softwarepakets zusammengeführt werden. Dabei handelt es sich um das Software Paket "Gravity Recovery Object Oriented Programming System" (GROOPS) welches am Institut für Geodäsie entwickelt wird und der Community auf GitHub kostenlos zur Verfügung gestellt wird.

Im Rahmen des Projektes COVER wurde nun die Software um die SLR-Funktionalität erweitert. Dank dieser Erweiterung können nun kombinierte Schwerefeldlösungen aus verschiedenen Beobachtungstechniken innerhalb von GROOPS bestimmt werden. Bei einer Durchführung über einen längeren Zeitraum lassen sich somit erfolgreich Massenänderungen auf der Erdoberfläche nachweisen.

Ein weiterer Schwerpunkt im Projekt COVER war die Verbesserung der Prädiktion von Weltraumschrott-Objekten durch die Hinzunahme einer exakten Kräftemodellierung sowie SLR-Beobachtungen. Die erfolgreiche Umsetzung ermöglichte die Bestimmung der Genauigkeit bestehender Radarbeobachtungen, deren bisheriger Wert bei ungefähr einem Kilometer lag, auf rund 100 Meter genau.

## **Projektpartner**

- Technische Universität Graz