



Satellitengeodäsie in Graz im Dienste der Global Change Forschung

Hans Sünkel ¹, Georg Kirchner ², Peter Pesec ³

¹ *Abteilung für Satellitengeodäsie, Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Lustbühelstraße 46, A-8043 Graz*

² *Abteilung für Satellitengeodäsie, Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Lustbühelstraße 46, A-8043 Graz*

³ *Abteilung für Satellitengeodäsie, Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Lustbühelstraße 46, A-8043 Graz*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **83** (4), S. 215–223

1995

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Suenkel_VGI_199521,  
Title = {Satellitengeod{"a}sie in Graz im Dienste der Global Change Forschung  
},  
Author = {S{"u}nkel, Hans and Kirchner, Georg and Pesec, Peter},  
Journal = {VGI -- {"O}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {215--223},  
Number = {4},  
Year = {1995},  
Volume = {83}  
}
```





Satellitengeodäsie in Graz im Dienste der Global Change Forschung

Hans Sünkel, Georg Kirchner, Peter Pesec, Graz

Zusammenfassung

Die zunehmende Konfrontation mit Umweltproblemen und die von Sir Karl Popper artikulierten Erkenntnis „Wir wissen nicht – wir raten“ gaben letztlich den Anstoß für die Global Change Forschung. Ihr Ziel ist es, das dynamische, hochgradig vernetzte, komplexe System Erde verstehen zu lernen, und so eine tragfähige Plattform für künftige internationale geopolitische Steuerungsmaßnahmen zu schaffen. Ein weltweites geowissenschaftliches Unterfangen dieser Art bedarf natürlich ebenso globaler Untersuchungsmethoden, die uns heute durch mannigfache Satellitenverfahren zur Verfügung stehen.

Die Satellitengeodäsie als Teil der Geowissenschaften trägt zu dieser weltweiten Initiative mehrfach bei; durch die Überwachung und Analyse von Rotationsverhalten und Verformung des Erdkörpers und durch die Erforschung des globalen Gravitationsfeldes als Antwort auf die Massenverteilung im Erdinneren. Die Grazer Satellitengeodäsie leistet auf diesen Gebieten beachtenswerte Beiträge durch Forschung, Entwicklung und Anwendung von extrem genauen Satelliten-Laserverfahren, durch GPS-gestützte geodynamische Untersuchungen, sowie durch Analyse von Radar-Altimeterdaten und mathematisch-numerische Entwicklungen im Hinblick auf eine geplante dedizierte Erdschwerefeldmission.

Abstract

The growing concern for the environment and common knowledge, interpreted by Sir Karl Popper in terms of „We are ignorant – we just guess“, triggered contemporary Global Change research. Its goal is a sound understanding of how the highly dynamic and utterly complex system Earth works which enables us to establish a solid platform for further geopolitical measures on an international level. A global geoscientific undertaking such as this one requires equally global investigation methods and tools which we have at our disposal nowadays in terms of various satellite techniques.

Space Geodesy as one branch of geoscience is contributing to this worldwide initiative in various ways: by monitoring and analyzing the rotation and deformation behaviour of the Earth, and by investigating the global gravitational field as a response to the Earth's mass distribution. The Space Geodesy Division in Graz is making remarkable contributions to the Global Change Program in terms of research, development and application of very precise satellite laser techniques, GPS-supported geodynamical investigations, by analyzing radar altimeter data, and through mathematical-numerical developments for a dedicated satellite gravity field mission.

1. Einleitung

Wenn man von rechtlichen und administrativen Aspekten absieht, so war das Aufgabengebiet der Geodäsie seit jeher gekennzeichnet durch die Herstellung, Darstellung und Verwaltung des Raumbezugs sowie durch die Erforschung des Erdschwerefeldes. Bis vor etwa drei Jahrzehnten bediente man sich dazu naturgemäß terrestrischer Verfahren, die bis zur Grenze ihrer Möglichkeiten ausgereizt und ausgeschöpft wurden.

Die imposante technologische Entwicklung während der letzten Jahrzehnte hat uns Satelliten als neue Werkzeuge zur Verfügung gestellt. Mit diesem enorm leistungsfähigen Instrumentarium hat sich sowohl ein qualitativer als auch ein quantitativer Wandel in vielen geodätischen Auf-

gabenbereichen vollzogen. War bis vor kurzem vor allem die Erforschung des Zustandes der Erde ein zentrales Anliegen, so ist es nunmehr die Zustandsänderung, die meßbar geworden ist und derzeit im Blickfeld internationaler Forschung und Entwicklung steht. „Global Change“ ist das Schlagwort, „space only“ ist out, „space-time“ ist in.

Zur Erforschung des Zustandes und der Zustandsveränderung unserer Erde bedienen wir uns bekanntlich verschiedenster Sensoren, welche zur Bewältigung der jeweiligen Aufgaben gleichsam maßgeschneidert sind. So liefern raumgestützte Fernerkundungs- und Positionierungssysteme bedeutende Informationen über großräumige Bewegungen und Deformationen tektonischer Platten, über die Änderung des Rotationsverhaltens der Erde, die Struktur des Erd-

schwerfeldes, die Topographie und Dynamik der Ozeane, die Atmosphäre, die Kryosphäre und die Biosphäre. Derzeit in Diskussion befindliche dedizierte Satelliten-Schwerfeldmissionen versprechen einen enormen Informationszuwachs in bezug auf Auflösung und Genauigkeit des Erdschwerfeldes, und erlauben uns, in Verbindung mit seismischen Daten einen Blick ins Erdinnere zu werfen und so zu ergründen, „was die Welt im Innersten zusammenhält“.

Die an der Grazer Abteilung für Satellitengeodäsie des Institutes für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) betriebenen Aktivitäten decken sich mit den eingangs erwähnten Aufgabenbereichen der Geodäsie. Es sind dies Forschung und Entwicklung auf den Gebieten der satellitengestützten Geodynamik und der satellitengestützten Erdschwerfeldbestimmung. Die diesen beiden Aufgabenbereichen zugeordneten Ziele unserer Anstrengungen, die natürlich nur im Verbund mit anderen weltweit operierenden geowissenschaftlichen Institutionen erreicht werden, lassen sich im Detail wie folgt zusammenfassen:

Geodynamik:

- Bahnprädiktion, Bahnverfolgung und Bestimmung von Satellitenbahnen
- Realisierung eines internationalen terrestrischen Referenzsystems
- Überwachung des Erdrotationsvektors
- Bestimmung der Bewegung von großen tektonischen Einheiten
- Herstellung und Überwachung eines geodynamischen Grundnetzes für Österreich

Erdschwerfeld:

- Bestimmung des Erdschwerfeldes im Allgemeinen und des Geoids im besonderen
- Bestimmung der dynamischen Meeresflächen-topographie
- Entwicklung optimaler numerischer Verfahren zur Verarbeitung von GPS Satellite-to-Satellite Tracking-Daten in Verbindung mit Satelliten-Gradiometerdaten zur globalen Erdschwerfeldbestimmung

Zur Erfüllung dieser Aufgaben steht ein mittlerweile ungemein breites Spektrum satellitengestützter Meßverfahren zur Verfügung. Die bei uns derzeit schwerpunktmäßig eingesetzten Verfahren lassen sich den technologischen Komplexen Laser, GPS, Satelliten-Radar-Altimetrie und Satelliten-Gradiometrie zuordnen. In der Folge wird über unsere einschlägigen Aktivitäten auf diesen Gebieten berichtet.

2. Geodynamik – F & E

Die Positionierung ist für die Geowissenschaften von zentraler Bedeutung, da der Wert einer geowissenschaftlichen Messung oft von der Positionierungsgenauigkeit des Meßpunktes abhängt. In der Vergangenheit war statische Relativpositionierung in einem lokal beschränkten Gebiet oft ausreichend. Heutzutage haben wir hochtechnologische Positionierungssysteme zur Verfügung, welche die Überwachung von Punktpositionen in einem globalen Koordinatensystem erlauben und die Messung der relativen Lageveränderung von Punkten über interkontinentale Entfernungen mit Zentimetergenauigkeit ermöglichen. Die zu diesem Zweck derzeit eingesetzten drei Verfahren sind VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging) und GPS (Global Positioning System). SLR und GPS werden im Wirkungsbereich der Abteilung für Satellitengeodäsie seit geraumer Zeit für die Zwecke geodynamischer Überwachung sehr erfolgreich eingesetzt. Die dabei erzielten Meßgenauigkeiten haben mittlerweile ein Niveau erreicht, das geodätische Positionierung zum leistungsfähigsten Werkzeug für die globale Überwachung der Bewegung von großräumigen tektonischen Platten bis hin zur Deformationsanalyse kleiner lokaler Strukturen macht.

Positionierungsverfahren liefern dreidimensionale geozentrische Koordinaten, die für die globalen Aufgaben der Realisierung eines internationalen Bezugssystems, zur Überwachung des Erdrotationsvektors, zur Bestimmung von Satellitenbahnen und natürlich auch zur globalen Überwachung geodynamischer Vorgänge benötigt werden. Laserverfahren (SLR), haben seit mehr als einem Jahrzehnt ihre hohe Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt und sich zum Standardverfahren der absoluten Positionierung entwickelt. Sie beruhen auf der hochpräzisen Messung der Zweiweg-Laufzeit von Laserimpulsen zwischen Bodenstationen einerseits und mit Retroreflektoren ausgestatteten Satelliten andererseits. Das Prinzip ist also denkbar einfach, die Realisierung wie so oft ein anderes Thema. Durch SLR-Messungen von den weltweit verteilten etwa 40 SLR-Stationen aus können bei Kenntnis der Satellitenbahn(en) die geozentrischen Koordinaten der Bodenstationen abgeleitet werden, und umgekehrt können bei Kenntnis der Position der Bodenstationen die Bahnen von Satelliten bestimmt werden.

Werden solche Laser-Entfernungsmessungen laufend durchgeführt, so können aus der zeitlichen Veränderung der Position der Bodenstationen

nen natürlich auch die Bewegungen und Deformationen von tektonischen Platten abgeleitet werden. Darüberhinaus enthalten Zeitreihen dieser Art auch noch Information über die zeitliche Änderung des Rotationsverhaltens der Erde. Somit ermöglichen Laserverfahren auch die Überwachung des Erdrotationsvektors. Und da die Bahnen aller Satelliten vom Gravitationsfeld der Erde kontrolliert werden, enthalten Laser-Entfernungsmessungen auch Information über das Erdschwerefeld. Die derzeit bei SLR-Messungen weltweit erzielten Einzelschuß-Genauigkeiten der ernstzunehmenden SLR-Stationen schwanken zwischen etwa 5 und 50 mm.

Zu einem äußerst kostengünstigen und zuverlässigen relativen Positionierungsverfahren hat sich mittlerweile bekanntlich GPS entwickelt. Im Gegensatz zum optischen SLR-Verfahren wirkt die Ionosphäre auf die Ausbreitung der Mikrowellen dispersiv. Ihr Einfluß wird bekanntlich durch Messung in zwei Frequenzen weitgehend eliminiert. Die Qualität der GPS-Ergebnisse hängt daher zu einem erheblichen Teil von der Kenntnis des Zustandes der Ionosphäre zum Zeitpunkt der Messungen ab. Die Troposphäre als nichtionisierte neutrale Atmosphäre beeinflusst ebenso, wenn auch nicht dispersiv, die Ausbreitung von Mikrowellen, weshalb die Genauigkeit der GPS-Ergebnisse auch von der Kenntnis des Zustandes der Troposphäre abhängt. Daher werden derzeit weltweit große Anstrengungen unternommen, um aus GPS-Messungen durch atmosphärische Tomographie den Zustand der Troposphäre zu bestimmen und die GPS-Daten von diesem Einfluß zu befreien. Aus den bisher weltweit erfolgten GPS-Messungen läßt sich jedoch ableiten, daß mit den besten derzeit verfügbaren Zweifrequenz-Empfängern Relativgenauigkeiten zwischen 1 und 0.01 ppm, abhängig von der Länge der Basislinie, erreichbar sind. GPS stellt daher derzeit bereits eine ideale Ergänzung der beiden „aristokratischen“ Verfahren SLR und VLBI dar und ist auf dem besten Weg, diese beiden Verfahren in vielen Bereichen zu verdrängen.

Die Abteilung für Satellitengeodäsie des Instituts für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften beteiligt sich seit dessen Gründung vor mehr als 20 Jahren mit der in Österreich einzigartigen geodynamischen Fundamentalstation Graz-Lustbühel an internationalen Satellitenprojekten, welche die Bestimmung der geometrischen und geophysikalischen Parameter unserer Erde und ihre zeitlichen Veränderungen zum Ziel haben. Sie nimmt teil an internationalen geodynamischen Projekten wie

DOSE (Dynamics of the Solid Earth, NASA), am europäischen Projekt WEGENER (Messung und Interpretation von Erdkrustenbewegungen in Europa), am internationalen Erdrotationsdienst IERS (Überwachung der Polbewegung und Rotationsgeschwindigkeit der Erde), sowie an der Bahnbestimmung von Erdbeobachtungssatelliten. Graz/Lustbühel ist des weiteren Basisstation des IGS-Netzes (International GPS Geodynamic Service) und international als GPS-Datenzentrum für spezielle geodynamische Auswertungen im ost- und südeuropäischen Raum im Rahmen von CEI (Central European Initiative) verantwortlich. Zur Wahrnehmung der geodynamischen Positionierungsaufgaben werden von uns SLR und GPS massiv eingesetzt. In der Folge geben wir einen kurzen Überblick über die Grazer SLR-Anlage und informieren über gegenwärtige geodynamische Forschungsaktivitäten im Bereich Österreichs und im adriatischen Raum.

SLR:

Die Grazer Satelliten-Laser-Anlage wurde im Jahr 1979 auf Initiative von Karl Rinner eingerichtet und ist seit 1982 operationell. Sie stellt das Herzstück der Abteilung für Satellitengeodäsie der ÖAW dar. Der routinemäßig mit einer Wellenlänge von 532 nm (grün) arbeitende Nd:Yag-Laser wird mit einer maximalen Energie von 50 mJ und einer maximalen Schußfrequenz von 10 Hz betrieben. Die Qualität einer Laser-Entfernungsmessung ist von vielen Faktoren, vor allem aber von drei Kenngrößen abhängig: der Pulslänge, der Startpulsdetektion und der Photonen-Empfangsdetektion.

Die laufenden technologischen Verbesserungen der Anlage haben zu einer sehr beachtlichen qualitativen, aber auch quantitativen Steigerung geführt. So wird derzeit routinemäßig mit einer Pulslänge von lediglich 35 psec gearbeitet, was einer Länge des Photonenpaketes von 1 cm entspricht. Der Zeitpunkt der Aussendung des Photonenpaketes und des Empfangs des reflektierten Signals (bloß einige wenige Photonen (!)) wird mit einer Präzision von besser als 10 psec festgestellt. Die Zeit wird dabei durch die mit äußerst genauen Atomuhren ausgestattete Zeitstation am Observatorium Graz/Lustbühel (Prof. W. Riedler, Doz. D. Kirchner) zur Verfügung gestellt. Eine neue technologische Entwicklung erlaubt sogar die Detektion eines einzigen (!) Photons mit Hilfe des seit 1991 installierten Einzelphotonen-Lawinendetektors.

Derzeit werden von uns im operationellen Betrieb 14 Satelliten, die sich in einem Bahnhöhen-

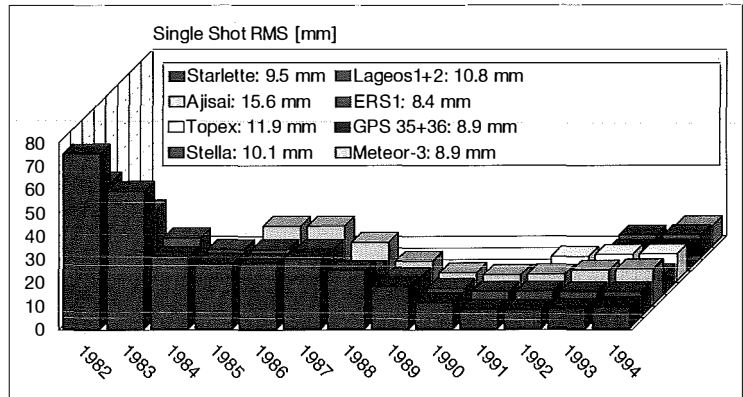
bereich von etwa 300 bis 2000 km befinden, mittels SLR-Messungen in ihrer Bahn verfolgt: die vier geodynamischen Satelliten LAGEOS-1, LAGEOS-2, STARLETTE und AJISAI, die drei Fernerkundungssatelliten ERS-1, ERS-2 und TOPEX/POSEIDON, die beiden GPS-Satelliten 35 und 36, die beiden GLONASS-Satelliten ETALON-1 und ETALON-2 sowie drei weitere Satelliten Stella, Meteor-3 und GFZ-1. Die Messungen erfolgen routinemäßig während der Nacht; Tageslichtmessungen sind ebenso möglich und werden bei Bedarf durchgeführt.

sungen dramatisch zu verbessern. Die Messung in der zweiten und dritten Farbe (rot, 683 nm und blau, 430 nm) wird mit einer Energie von wenigen mJ betrieben. Graz gelingt damit weltweit erstmals die gleichzeitige SLR-Messung in drei Farben zu den meisten beobachtbaren Satelliten. Die operationelle Mehrfarben-SLR-Messung wird uns erlauben, den Störeinfluß der Troposphäre auf die Signalausbreitung weitgehend zu eliminieren und Einzelschußgenauigkeiten von wenigen Millimetern zu erreichen – ein technologischer Quantensprung, der die Grazer SLR-Sta-

Mit diesen hervorragenden Leistungsmerkmalen der Grazer SLR-Anlage werden derzeit im Routinebetrieb Einzelschußgenauigkeiten von typischerweise 8–10 mm erreicht (siehe Abbildung 1), wobei die nicht modellierbare Dispersion der Troposphäre einen Anteil von etwa 5 mm verursacht. Die Grazer SLR-Anlage ist damit bezüglich aller Leistungsmerkmale seit vielen Jahren die beste in Europa und in bezug auf Datenrate und so manche andere Kenngrößen bereits jetzt weltweit führend (siehe Abbildung 2). Unsere Lasermessungen fließen in ein Verarbeitungssystem ein, das laufend nicht nur die Bahnen der weltweit beobachteten Satelliten bestimmt, sondern darüberhinaus auch die aktuellen Positionen und gegenseitigen Bewegungen der Laserstationen und die aktuellen Erdrotationsparameter ermittelt.

Derzeit wird im Rahmen eines ESA-Projektes an einer grundlegenden technologischen Erweiterung in Richtung 3-Farbenmessung gearbeitet, um auch noch den nicht modellierbaren Anteil der Troposphäre weitgehend eliminieren zu können und so die Genauigkeit der SLR-Mes-

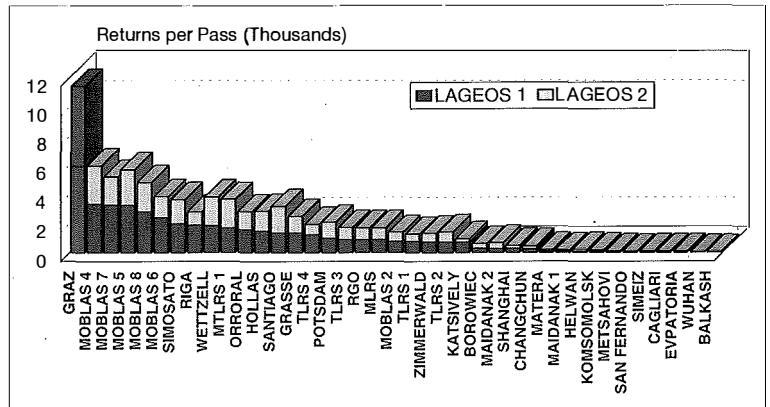
LASER STATION GRAZ SINGLE SHOT RMS IMPROVEMENT



<Kirchner/Koidl, 1994-12-31>

Abb. 1: Verbesserung der „Einzelschußgenauigkeit“ der Grazer SLR-Anlage

GLOBAL SLR NETWORK AVERAGE LAGEOS RETS / PASS



<Kirchner/Koidl, 1995-06-07>; Source: NASA

Abb. 2: Datenrate der Grazer SLR-Anlage im internationalen Vergleich

tion in allen Belangen weltweit zur Nummer Eins machen wird.

GPS:

Die Abteilung für Satellitengeodäsie der ÖAW begann bereits vor mehreren Jahren mit dem Aufbau eines geodynamischen GPS-Netzes für Österreich, das aus etwa 100 weitgehend im Fels vermarkten GPS-Punkten besteht. Die Überwachung der Veränderungen der mit Zentimetergenauigkeit bestimmten Koordinaten dieser GPS-Punkte soll Aufschluß über regionale geotektonische Bewegungsvorgänge im Ostalpenraum geben.

Die im Rahmen dieses Projektes AGREF (Austrian Geodynamics Reference Network) getätigten GPS-Messungen, die im übrigen auch den Bereich Sloweniens und den nördlichen Teil Kroatiens abdecken, konnten in den letzten Jahren abgeschlossen werden. Diese Erstvermessung des geodynamischen Netzes Österreich, an der auch das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) sowie die beiden geodätischen Institute der Technischen Universität Graz maßgeblich mitgewirkt haben, stellt gleichsam eine Nullmessung dar. Es ist beabsichtigt,

das gesamte Netz im Abstand von etwa 5–10 Jahren zu vermessen, um so eine Zeitreihe relativer Positionsveränderungen der Netzpunkte zu erhalten, die wiederum geodynamische Aktivitäten im Ostalpenraum abbildet.

Eine wesentliche Ursache für die geodynamischen und seismischen Vorgänge im Bereich der Alpen und somit in Österreich ist die Aktivität der adriatischen Mikroplatte, die bis nach Kärnten reicht. Um ihre Dynamik zu studieren, wird derzeit im Rahmen des IDNDR-Projektes (International Decade for Natural Disaster Reduction) ALPMED ein Netz von etwa 20 GPS-Punkten im adriatischen Raum (Österreich, Italien, Griechenland, Albanien, Kroatien, Slowenien) aufgebaut. Als geodynamische Basisstationen im Bereich Österreichs dient die seit Jahren bereits permanent messende GPS-Fundamentalstation Graz/Lustbühel, sowie die in Zusammenarbeit mit der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik nunmehr betriebenen GPS-Permanentstationen Patscherkofel, Hafelekarak und die in Kürze in Betrieb gehende Station Reißbeck (siehe Abbildung 3).

Es wird erwartet, daß Wiederholungsmessungen des Adria-Netzes innerhalb von etwa fünf

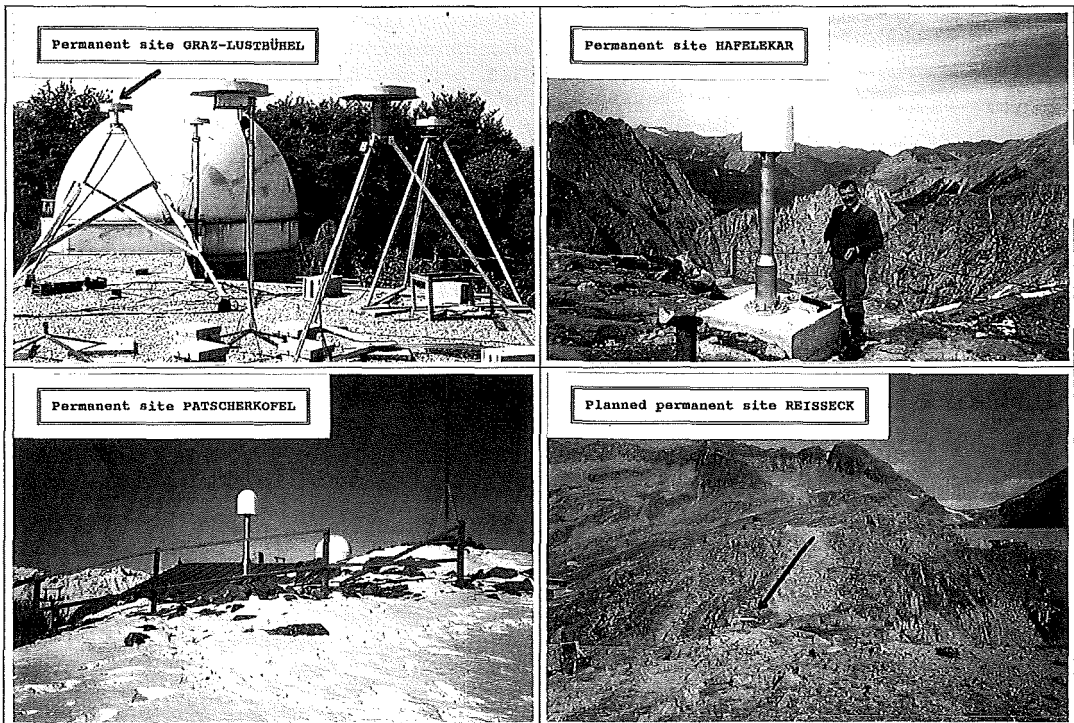


Abb. 3: GPS-Permanentstationen

Jahren die wesentlichen geodynamischen Aktivitäten dieser Mikroplatte mit hinreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit abbilden.

3. Erdschwerefeld – F & E

Die Bestimmung der Detailstruktur des Erdschwerefeldes, das im Bereich des mittleren Meeresniveaus durch das Geoid als ausgezeichnete Äquipotentialfläche repräsentiert wird, ist sowohl für die Erforschung der dynamischen Vorgänge im Erdinneren als auch für die präzise Vorhersage der Bahnen erdnahe Satelliten von fundamentaler Bedeutung. Des weiteren stellt das Geoid bekanntlich eine globale Referenzfläche für orthometrische Höhen dar und ist aus diesem Grunde auch von erheblicher praktischer Bedeutung, insbesondere bei der Verknüpfung von GPS-Ergebnissen mit terrestrischen Daten.

Bis vor etwa drei Jahrzehnten basierte die Erdschwerefeldbestimmung auf der Messung von Schwere und Lotabweichung, wobei diese Messungen fast ausschließlich auf das Festland beschränkt waren, zumal die Dynamik der Meere lediglich Schweremessungen mit geringer Dichte und Genauigkeit zuläßt. Diese Messungen wurden vor allem in den großen Industrienationen weitgehend flächendeckend durchgeführt. Die Dichte der Schwerefelddaten im überwiegenden Teil der Erdoberfläche, vor allem auf den Weltmeeren, war völlig unbefriedigend und nicht geeignet, ein globales Geoid mit hoher Genauigkeit und Auflösung bestimmen zu können.

SLR-gestützte dynamische Satellitenmethoden, welche sich kugelförmiger und mit Laser-Retroreflektoren ausgestatteter Satelliten mit hoher Massendichte als passive Sensoren im Gravitationsfeld der Erde bedienen, lieferten und liefern den langwelligen Anteil des globalen Gravitationsfeldes mit hoher Genauigkeit. Erdschwerefeldmodelle, die aus solchen SLR-Messungen abgeleitet werden, repräsentieren das Erdschwerefeld mit kleinsten, gerade noch auflösbaren Wellenlängen von etwa 1000 km. Eine Kombination dieser Erdmodelle mit den oben angeführten terrestrischen Erdschwerefelddaten führte zu zahlreichen lokalen bis regionalen Geoidbestimmungen – so auch etwa zum Geoid für Österreich, das 1987 am Institut für Theoretische Geodäsie der Technischen Universität Graz berechnet wurde (Im übrigen ist eine Neuberechnung des Geoids für Österreich mit dem Arbeitstitel GEOID 2000 derzeit im Gange.).

Alle diese lokalen bzw. regionalen Geoidlösungen beschränkten sich mit wenigen Ausnahmen

auf kontinentale Bereiche. Über den Kontinenten war das Geoid daher in vielen Fällen bedeutend besser bekannt als in ozeanischen Bereichen. Durch die Möglichkeit der satellitengestützten Radar-Altimeter-Abtastung der Meeresoberfläche, gekoppelt mit einer präzisen Bahnbestimmung, hat sich dieses Bild jedoch schlagartig geändert, sodaß heute die Geoidstruktur in Meeresbereichen im allgemeinen deutlich besser bekannt ist als über kontinentalen Gebieten. Zu diesem enormen Informationszuwachs haben die NASA-Satelliten GEOS-C, SEASAT und GEOSAT, die allesamt mit Radar-Altimetersystemen ausgestattet waren, in hohem Maße beigetragen.

Die enorme Steigerung der Meßgenauigkeit (Radar-Altimetrie und Bahnbestimmung), die hohe Abtastrate und die Möglichkeit der Verknüpfung mehrerer Sensoren ermöglichen nunmehr nicht nur eine hochpräzise Geoidbestimmung, sondern darüberhinaus auch die Untersuchung der Meerestopographie, also die Abweichung der mittleren Meeresoberfläche vom Geoid, und sogar die Überwachung der gesamten Ozeandynamik.

Derzeit liefern uns die ESA-Fernerkundungssatelliten ERS-1, ERS-2 und der NASA/CNES-Satellit TOPEX/POSEIDON, die alle mit Radar-Altimetern ausgestattet sind, eine enorme Fülle von hochpräziser Information mit räumlich oder zeitlich höchster Auflösung. Ihre Daten, verknüpft mit anderen Erdschwerefeldinformationen, bieten uns ein äußerst detailliertes Bild vom Zustand und der Zustandsänderung der Weltmeere. Diese globale Information liefert nicht nur das Geoid im Bereich der Ozeane und ein Bild der dynamischen Ozeantopographie, sondern stellt aufgrund der starken Wechselwirkung zwischen den Weltmeeren, der Erdatmosphäre und den polaren Eismassen auch eine bedeutende Randbedingung für die Erforschung des Weltklimas dar.

Satelliten-Altimetrie:

Die Abteilung für Satellitengeodäsie des Institutes für Weltraumforschung der ÖAW und die Abteilung für Mathematische Geodäsie und Geoinformatik der Technischen Universität Graz waren bei ERS-1 an zwei Altimetrie-Projekten beteiligt: am Projekt COMPASS II, das eine alternative Methode der Kalibrierung des Radar-Altimeters durch Verwendung von Mikrowellen-Transpondern als idealisierte Reflexionsfläche zum Inhalt hatte, und am Projekt GEOMED, das sich der Erforschung des Geoids sowie der Un-

tersuchung der Meerestopographie und der Ozeanströmungen im geotektonisch so aktiven (und vermutlich deshalb auch landschaftlich und kulturell so attraktiven) Bereich des Mittelmeerraumes widmete.

Im Rahmen des Projektes COMPASS II, das in Zusammenarbeit mit Gruppen aus Großbritannien und der Schweiz durchgeführt wurde, erfolgte die Kalibrierung des ERS-1 Radar-Altimeters sowie der Versuch einer Höhenübertragung durch Altimetrie mittels zweier Mikrowellen-Transponder. Die beiden Transponder waren entlang des Venedig-Orbits von ERS-1 in Revine bei Venedig und in Ginzling im Zillertal für mehrere Wochen stationiert, ihre Position wurde mit Hilfe von GPS bestimmt. Der Radar-Altimeter an Bord von ERS-1 wurde jeweils beim Überflug aktiv. Durch Vergleich der Altimeter-Messungen mit der Sollhöhe des Satelliten über den Transpondern, die durch SLR-Bahnbestimmung bzw. durch GPS ermittelt wurde, konnte das Altimetersystem kalibriert werden und gleichzeitig eine Höhenübertragung zwischen den beiden Transpondern durch Radar-Altimetrie getestet werden.

Die dabei erzielten Ergebnisse, die im Genauigkeitsbereich weniger Zentimeter liegen, sind nicht nur in hohem Maße befriedigend, sondern gaben Anlaß zu gänzlich neuen Einsatzmöglichkeiten von Transpondersystemen. So ist etwa bei bekannter Position des Transponders die sehr kritische vertikale Komponente der Satellitenbahn mittels Radar-Altimetrie bestimmbar oder umgekehrt, bei bekannter Bahn (etwa aus SLR-Daten oder mittels PRARE ermittelt) lassen sich über große Distanzen Höhen zwischen Transpondern mit hoher Genauigkeit übertragen. Eine detaillierte Analyse der Transponder-Echos zeigt, daß neben der vertikalen Komponente der Satellitenbahn durch genaue Zeitzuordnung der Radar-Impulse auch noch die Komponente in Flugrichtung mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Dezimeter mittels Transponder bestimmbar ist.

Radar-Altimetrie über Mikrowellen-Transponder liefert so bedeutende Beiträge zur Bahnbestimmung. Besonders für ERS-1 war dies von großer Bedeutung, zumal sein bordeigenes Positionierungssystem bekanntlich kurz nach dem Start ausgefallen ist und die genaue Positionierung allein von SLR-Bahnverfolgung abhängt. Diese neuen, vielversprechenden Aspekte haben im Vorjahr zum Erwerb eines Mikrowellen-Transponders durch die Abteilung für Satellitengeodäsie geführt, der derzeit in einschlägigen ERS-2-Projekten, wie oben beschrieben, eingesetzt wird.

Ein von wissenschaftlichen Instituten (Rutherford Appleton Laboratory, Newcastle, Cambridge, Kopenhagen und Graz) gemeinsam eingebrachter Vorschlag zur Nutzung von Transpondern für die Kalibrierung des ERS-2 Altimeters und für Höhenübertragungen mittels Altimeterdaten wurde von der ESA mit höchster Priorität angenommen. Unsere Gruppe beteiligt sich daher während der Commissioning Phase von ERS-2 mit Transpondermessungen in Ostösterreich und Auswertungen. Weitere Einsätze im Mittelmeerraum, in Grönland und der Antarktis befinden sich derzeit in Planung.

Im Rahmen des GEOMED-Projektes wurden, wie bereits erwähnt, das Geoid, die Meerestopographie und die Ozeandynamik für den Bereich des Mittelmeeres aus ERS-1 Radar-Altimeterdaten und zusätzlichen Erdschwerefelddaten bestimmt (siehe Abbildung 4). Das Projekt wurde im Rahmen eines europäischen Konsortiums unter Beteiligung der Universitäten in Mailand, Madrid, Thessaloniki, Kopenhagen, Helsinki und TU Graz durchgeführt. Unsere Grazer Gruppe arbeitete dabei am Problem der Kreuzungspunktausgleichung, das als Output den Input für die anschließende Geoidbestimmung liefert, an der recht aufwendigen Validierung des Höhenmodells für das Untersuchungsgebiet sowie an den vergleichenden statistischen Analysen im Zusammenhang mit der Geoidbestimmung und der Bestimmung der dynamischen Meerestopographie.

Die nunmehr vorliegenden Ergebnisse zeigen eine Genauigkeit der Geoidbestimmung im Dezimeterbereich bei einer Auflösung von etwa 10 km Wellenlänge. Diese beachtlichen Ergebnisse verstärkten daher die Bestrebungen der beiden Abteilungen, sich auch an den derzeitigen und zukünftigen Altimeter-Missionen von ESA und NASA im Rahmen ihrer Möglichkeiten zu beteiligen.

Satelliten-Gradiometrie:

Die mangelhafte Kenntnis des globalen Erdschwerefeldes stellt derzeit noch immer die Schwachstelle schlechthin bei Bahnvorhersagen bzw. Bahnbestimmungen dar. Ohne globale Detailkenntnis des Erdschwerefeldes kann das gewaltige Potential, das in den Altimeterdaten von SEASAT, GEOSAT, ERS-1, ERS-2, TOPEX/POSEIDON und zukünftigen Missionen liegt, nur zum Teil ausgeschöpft werden.

Sowohl bei ESA als auch bei NASA wird daher seit geraumer Zeit eine dedizierte Schwerefeldmission diskutiert, die das Geoid mit einer Auflö-

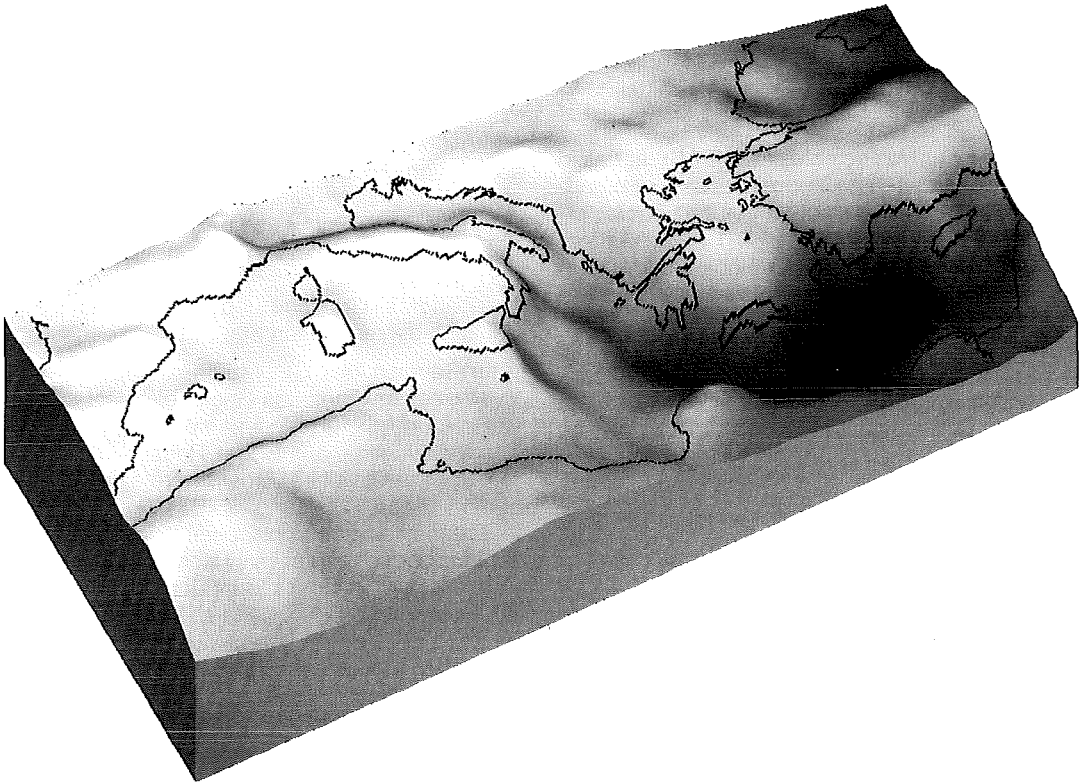


Abb. 4: Altimeter-Geoid Mittelmeerraum

sung von 100 km und einer homogenen Genauigkeit von besser als 10 cm liefert. Dieses Ziel wird erreicht durch eine Kombination von GPS Satellite-to-Satellite Tracking (GPS-SST) und die Messung zweiter Ableitungen des Gravitationspotentials (Satelliten-Gradiometrie-SGG) in sehr niedriger Bahnhöhe von 200 bis maximal 450 km.

Das SGG-Kerninstrument besteht aus einem Bündel von Beschleunigungsmessern, die im Verbund ein Satelliten-Gradiometer repräsentieren, das mit einer kaum vorstellbar hohen Präzision von $10^{-13} / \sqrt{\text{Hz}} \cdot \text{sec}^{-2}$ arbeitet. Die Orbit-Bestimmung erfolgt mittels des globalen Positionierungssystems GPS, gestützt durch SLR, mit einer Positionierungsgenauigkeit von vermutlich 1 cm (!).

Das Schwerfeld als Antwort auf die Massenverteilung der Erde liefert durch Inversion enorm wichtige Ausgangsdaten (Randbedingungen) für zahlreiche geophysikalische Fragestellungen. Eine genaue Kenntnis des globalen Schwerfeldes hilft daher auch in hohem Maße bei der Erforschung geodynamischer Prozesse im Erdinneren. Schließlich liefern Zustand bzw. Zu-

standsänderung des Geoids bedeutende Information für den riesigen Komplex der Klimaforschung.

Eine solche Mission mit dem geplanten integrierten geodätischen Paket (SGG+GPS) würde nicht nur das globale Geoid mit hoher Auflösung und Genauigkeit liefern, sondern darüberhinaus einen enormen Synergieeffekt bewirken und das Instrumentarium zur Ausschöpfung des gesamten Potentials der Erdbeobachtungsmissionen bereitstellen. Praktisch alle Geowissenschaften wie Geodäsie, Geophysik, Ozeanographie und Klimaforschung würden von einer solchen dedizierten Schwerfeldmission in hohem Maße profitieren.

Die Abteilung für Satellitengeodäsie arbeitet seit kurzem gemeinsam mit der Abteilung für Mathematische Geodäsie der TU Graz bereits an theoretischen Untersuchungen und umfangreichen Simulationen und spielt verschiedene Missions-Szenarien zur Bahn- und Gravitationsfeldbestimmung der Erde durch. Neben den massiven theoretischen Problemen, deren Lösung an sich schon eine gewaltige Herausforderung darstellt, werden mathematisch-numerisch-

sche Mammutaufgaben bewältigt, die letztlich in der Lösung linearer Gleichungssysteme mit allen erdenklichen unangenehmen Eigenschaften numerischer Art und darüberhinaus mit gewaltiger, ja nahezu furchterregender Dimension münden. Als Ergebnis dieser Anstrengungen wird das Gravitationsfeld der Erde, durch etwa 100,000 Parameter modelliert, vorliegen.

4. Schlußfolgerungen

Die gegenwärtigen gewaltigen Fortschritte in der Hochtechnologie der Positionierung erlauben nicht nur die Realisierung eines globalen geozentrischen Koordinatensystems höchster Präzision, sondern ermöglichen auch Positionsveränderungen in diesem System zu überwinden. Da aber natürliche Positionsveränderungen stets physikalische und chemische Prozesse im Erdinneren, aber auch in der Atmosphäre als Ursache haben, stellen solche Informationen sehr bedeutende Randbedingungen für die Erforschung der äußerst komplexen Vorgänge im Erdinneren, in den Weltmeeren und in der Atmosphäre dar und sind so auch indirekt für die Klimaforschung von erheblicher Bedeutung – eine wahrlich komplexe, aber oder gerade deshalb wunderschöne Welt, in der wir leben dürfen.

Mit der ständigen Überwachung der Erde trägt die Satellitengeodäsie maßgeblich zu einer Forschungsinitiative bei, welche die Beschreibung des globalen Erdsystems und seiner feststellbaren Änderungen mit dem Ziel umfaßt, Vorhersagen der Veränderungen der Einzelkomponenten des Erdsystems bei Vorgabe realistischer Randbedingungen für die kommenden Jahrzehnte zu erstellen. Solche Vorhersagen sollen die Grundlage für geopolitische Entscheidungen bilden, deren Ziel die Eindämmung von Folgen globaler Veränderungen für das Leben der Menschen einerseits und für die Festlegung von Maßnahmen zur Reduzierung menschlicher Einflußnahme auf dieses System andererseits beinhalten.

Diese neue globale Funktion, in der Raum und Zeit vereint auftreten, bedingt eine intensive fachübergreifende Kooperation mit allen Geowissenschaften. Diese Zusammenarbeit wirkt gegenseitig befruchtend und eröffnet bisher un-

gekante Möglichkeiten in Forschung und Entwicklung. Die wissenschaftliche Geodäsie ist aufgefordert, diese einmalige Herausforderung anzunehmen und eine zentrale Rolle zu spielen im Konzert aller Geowissenschaften.

Literatur

- [1] Egger, E.-M., W. Fürst, E. Höck and H. Sünkel (1994): Validation of ETOPO5U in a Local Area Referring to the Height Model of Spain and a Comparative Analysis of Different Geoid Models in the Mediterranean. In: Mare Nostrum IV, University of Thessaloniki, pp. 33-61.
- [2] Fürst, W., W. Hausleitner, E. Höck, W.-D. Schuh, and H. Sünkel (1992): GEOMED-Crossover Adjustment of Satellite Altimeter Data. In: Mare Nostrum II, University of Madrid, pp. 75-90.
- [3] Kirchner, G., K. Hamal, and I. Prochazka (1991): Advanced Technologies for Satellite Laser Ranging. Paper presented at the XX General Assembly of IUGG, Vienna, 1991.
- [4] Kirchner, G., F. Koldl, I. Prochazka, and K. Hamal (1994): Multiple Wavelengths Ranging in Graz. In: Proceedings, 9th Int. Workshop on Laser Instrumentation, Canberra, in Druck.
- [5] Lichtenegger, H. and H. Sünkel (1989): Mathematische-Geophysikalische Modelle. In: Österreichische Beiträge zum Wegener-Medlas-Projekt. Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 65, S. 61-80.
- [6] Pesec, P. (1994): The Use of Transponders for Precise Height Transfer. 1st Working Conference on CERGOP, Warsaw.
- [7] Pesec, P., H. Sünkel, and N. Windholz (1995): Transponders for Altimeter Calibration and Height Transfer. Paper presented at the XXI General Assembly of IUGG, Boulder.
- [8] Pesec, P. and N. Windholz (1995): Dynamics of the Adriatic Microplate and the Eastern Alps. In: „Gravity and Geoid“ (Ed.: H. Sünkel and I. Marson), Proceedings, IAG Symposium „Gravity and Geoid“, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 502-508.
- [9] Sünkel, H. (1989): Solid Earth, Gravity Field and Environment. In: Remote Sensing and the Earth's Environment. ESA publication no. SP-301, pp. 115-123.
- [10] Sünkel, H., W. Hausleitner, and W.-D. Schuh (1995): Satellite Gravity Gradiometry and GPS Satellite-to-Satellite Tracking-Tailored Numerical Solution Strategies. ESA-CI-GAR III/Phase 2 Study, ESA, Paris.
- [11] Sünkel, H. (1995): Classical Dynamical Satellite Geodesy. In: Proceedings, ECMI 94 Conference, Kaiserslautern, in Druck.

Anschrift der Autoren:

o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Hans Sünkel^{1,2}, Dipl.-Ing. Dr. Georg Kirchner¹, Dr. Peter Pesec¹.

(1): Abteilung für Satellitengeodäsie, Institut für Welt- raumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Lustbühlstraße 46, A-8043 Graz.

(2): Abteilung für Mathematische Geodäsie und Geoinformatik, Institut für Theoretische Geodäsie, Technische Universität Graz, Steyrergasse 30, A-8010 Graz.