

GFZ

Helmholtz-Zentrum
POTS DAM

HELMHOLTZ-ZENTRUM POTSDAM

**DEUTSCHES
GEOFORSCHUNGSZENTRUM**

C. Falck, F. Flechtner, F.-H. Massmann,
J.-C. Raimondo, Ch. Reigber, A. Scherbatschenko

Betrieb des PRARE- Bodensegments für ERS-2

Abschlussbericht 2003

Scientific Technical Report STR04/20

Recommended citation:

Falck, C., Flechtner, F., Massmann, F.-H., Raimondo, J.-C., Reigber, Ch., and Scherbatschenko, A. (2013), Betrieb des PRARE-Bodensegments für ERS-2 - Abschlussbericht 2003. *Scientific Technical Report 04/20*, GFZ German Research Centre for Geosciences.

Imprint

HELMHOLTZ CENTRE POTSDAM
**GFZ GERMAN RESEARCH CENTRE
FOR GEOSCIENCES**

Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

Published in Potsdam, Germany
September 2013

ISSN 1610-0956

DOI: 10.2312/GFZ.b103-04202
URN: urn:nbn:de:kobv:b103-04202

This work is published in the GFZ series
Scientific Technical Report (STR)
and electronically available at GFZ website
www.gfz-potsdam.de > News > GFZ Publications



C. Falck, F. Flechtner, F.-H. Massmann,
J.-C. Raimondo, Ch. Reigber, A. Scherbatschenko

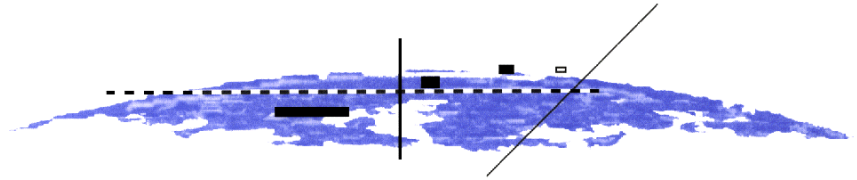
Betrieb des PRARE- Bodensegments für ERS-2

Abschlussbericht 2003

Förderkennzeichen: 50 EE 9904

Projektleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Ch. Reigber

Scientific Technical Report STR04/20



GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Betrieb des PRARE-Bodensegments für ERS-2
Abschlussbericht 2003

Förderkennzeichen: 50 EE 9904

Projektleitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Ch. Reigber

C. Falck, F. Flechtner, F.-H. Massmann,
J.-C. Raimondo, Ch. Reigber, A. Scherbatschenko

GeoForschungsZentrum Potsdam
Department 1: Geodäsie und Fernerkundung
Telegraphenberg A17, D-14473 Potsdam

April 2004

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	8
2. Das PRARE-System	11
2.1 <i>Komponenten des PRARE-Systems</i>	11
2.2 <i>PRARE-Messprinzip</i>	12
2.3 <i>Systemunabhängige Kalibrierung</i>	14
3. Aufgabenstellung	15
4. Planung und Ablauf der Vorhaben	16
5. Stand der Wissenschaft	17
6. Zusammenarbeit mit anderen Institutionen	19
7. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	21
7.1 <i>Systemrealisierung</i>	21
7.2 <i>Hardwareaufbau</i>	22
7.3 <i>Softwareentwicklung</i>	26
7.4 <i>Koordinierung und Aufbau des Trackingnetzes</i>	29
8. Anwendungsergebnisse	35
8.1 <i>Nachweis der projizierten Leistungsfähigkeit</i>	35
8.2 <i>Bahnvorhersage</i>	38
8.3 <i>Externe Kalibrierung</i>	39
8.4 <i>Präzise Bahnbestimmung</i>	42
8.5 <i>Bestimmung geodätischer Parameter</i>	45
8.6 <i>PRARE-Zeitsystem</i>	54
8.7 <i>Bestimmung des Gesamtelektroneninhalts der Ionosphäre</i>	59
9. Zusammenfassung	61
10. Darstellung des PRARE-Systems in der Öffentlichkeit	63
10.1 <i>Veröffentlichungen</i>	63
10.2 <i>Vorträge</i>	69
10.3 <i>Teilnahme an Symposien, Konferenzen und Tagungen</i>	73
10.4 <i>Sonstiges</i>	74
11. Referenzen	74

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Das PRARE Bordsegment auf METEOR 3-7	9
Abb. 1-2: PRARE Bodenstation mit Thermobox, automatischer Metrologieeinheit und M+T Computer.	10
Abb. 2-1-1: Datenfluss zwischen den Segmenten des PRARE-Systems.....	11
Abb. 2-1-2: Funktionsprinzip des PRARE-Systems	12
Abb. 2-2-1: PRARE-Messprinzip (DLL: Delay Locked Loop, PLL: Phase Locked Loop)	13
Abb. 6-1-1: PRARE Installation in Ny Alesund (Statens Kartverk, Spitzbergen)	19
Abb. 7-1-1: Struktur des FTP-Servers am GFZ-Datenzentrum zur Verteilung der PRARE-Daten.....	22
Abb. 7-2-1: Hardwareausstattung der PRARE-Masterstation	23
Abb. 7-2-2: Zeitsystem der PRARE-Masterstation	24
Abb. 7-2-3: Die wichtigsten Hardware Komponenten des PRARE Zeitsystems	25
Abb. 7-3-1: Ablaufschema der PRARE Datenvorverarbeitung	26
Abb. 7-4-1: Aktive Stationen, geordnet nach COSPAR Nummern	31
Abb. 7-4-2: Aktive Stationen, geordnet nach Hardware Nummern	31
Abb. 7-4-3: globale Verteilung der PRARE Bodenstationen in den Jahren 1995 und 1997.....	32
Abb. 7-4-4: globale Verteilung der PRARE Bodenstationen in den Jahren 2001 und 2003.....	33
Abb. 8-1-1: Anzahl der von PRARE Stationen und Laserstationen getrackten ERS-2 Passagen.....	35
Abb. 8-1-2: Typischer Noise der Range- (oben) und Dopplermessungen (unten) pro Passage, Station Maracaibo (äquaturnah), Kalenderwoche 06 in 2004.....	37
Abb. 8-1-3: Typischer Noise der Range- (oben) und Dopplermessungen (unten) pro Passage, Station Ny Alesund (polnah) Kalenderwoche 06 in 2004	37
Abb. 8-2-1: Güte der PRARE Elemente in Flugrichtung (Zeitraum 24.04. 1995 bis 31.12. 1998)	38
Abb. 8-3-1: Prinzip der Kalibrierungsdatengewinnung; gleichzeitige PRARE und SLR Messungen.....	39
Abb. 8-3-2: Rangebiase für 6-Tage-Bögen der Station Potsdam (7730); 6 Besetzungen.....	40
Abb. 8-3-3: EPOS-OC CALPRA Abweichung der Rangebiase für die Station Potsdam; 6 Besetzungen ..	41
Abb. 8-3-4: EPOS-OC CALPRA Abweichung der Zeitbiase für die Station Potsdam; 6 Besetzungen	41
Abb. 8-4-1: Anpassung der PRARE Range Beobachtungen an die präzise ERS-2 Bahn (1996–2003).....	43
Abb. 8-4-2: Anpassung der PRARE Doppler Beobachtungen an die präzise ERS-2 Bahn (1996-2003)	43
Abb. 8-4-3: Anpassung der Laser Beobachtungen an die präzise ERS-2 Bahn (1996–2003)	44
Abb. 8-5-1: Vergleich von 6 Halbjahres- mit 3 Einjahreslösungen in mm.....	46
Abb. 8-5-2: PRARE-Stationsgeschwindigkeiten in mm/y (Dreijahreslösung)	46
Abb. 8-5-3: PRARE-Stationskoordinatengenauigkeiten berechnet aus Vergleichen mit lokalen Exzentritäten und GPS-Lösungen vor (oben) und nach (unten) Helmert-Transformation.....	47
Abb. 8-5-4: laterale Bewegung der Station Neumayer, bestimmt mit PRARE zwischen 1996 und 2004	48
Abb. 8-5-5: vertikale Bewegung der Station Neumayer, bestimmt mit PRARE zwischen 1996 und 2004..	49
Abb. 8-5-6: tägliche Abweichung der vertikalen Komponente von der mittleren Bewegung.....	49
Abb. 8-5-7: Tiden (Februar 1996) für 70.65° Süd und 8.26° West nach Schwiderski	50
Abb. 8-5-8: Vergleich von Berechnungen zur Polwanderung mit PRARE und DORIS.....	51
Abb. 8-5-9: Geoiddifferenzen zwischen Basislösung und ERS-2 Daten-Lösung in 780 km Höhe.....	53
Abb. 8-6-1: Frequenzablage des Oszillators im Modul A und Modul B des Raumsegments	54
Abb. 8-6-2: Mittlere Temperatur der Module „A“ und „B“ im PRARE Raumsegment auf ERS-2	55

Abb. 8-6-3: Experimenteller Zweiweg- „Common View“ –Uhrenvergleich mit verschiedenen Frequenznormalen; Cs (Potsdam), Rb (Oberpfaffenhofen) und H-Maser (Weilheim).....	57
Abb. 8-6-4: Konfiguration der Instrumente und kalibrierte Signallaufzeiten in Weilheim und Potsdam..	57
Abb. 8-6-5: Relativer Stand und Gang des H-Maser (oben), Rb-Normal (mitte) und Cs Normal (unten)..	58
Abb. 8-7-1: Einweg Laufzeitdifferenzen aus Code Messungen und nach dem DRVID Verfahren.....	59
Anhang 1: Ansicht des europäischen Erdbeobachtungssatelliten ERS-2.....	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 7-4-1: Einsatzstandorte der Bodenstationen, geordnet nach COSPAR Nummern.....	30
--	-----------

Abkürzungsverzeichnis

ASI	Italian Space Agency
AUSLIG	Australian Survey and Land Information Group
AWI	Alfred Wegener Institut für Polarforschung
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (bis 5.8.1997: IFAG)
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
COSPAR	Conference on Space Research
CSR	Center for Space Research
DARA	Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (seit 1.10.1997: in DLR)
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
DLR	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
D-PAF	German Processing and Archiving Facility
DUT	Delft University of Technology
ERP	Earth Rotation Parameters
ERS	ESA Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
ESTEC	ESA Technology Centre
FTP	File Transfer Protocol
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GPS	Global Positioning System
GSOC	German Space Operation Center
IfAG	Institut für Angewandte Geodäsie (ab 6.8.1997: BKG)
INS	Institut für Navigation
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LAN	Local Area Network
LAPAN	Indonesian National Institute of Aeronautics and Space
LPAO	La Plata Astronomical Observatory
MCS	Monitoring and Command Station
MOU	Memorandum of Understanding
MTCOM	Monitor and Test Computer
NIPR	National Institute of Polar Research
POL	Prowdman Oceanographic Institute
PRARE	Precise Range And Range-Rate Equipment
PRC	Precise Orbit
PRD	Predicted Orbit
PRL	Preliminary Orbit
PRS	PRARE System
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RPD	Rapid Orbit
SAA	Südamerikanische Anomalie
SAO	Shanghai Astronomical Observatory
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAS	Station Announcement Sheet
SDF	Station Description File
SIP	Station Interrogation Plan
SK	Statens Kartverk
TEC	Total Electron Content
UC	University of Copenhagen
UR	Unavailability Report
UTC	Universal Time Coordinated
VLBI	Very Long Baseline Interferometry

Vorwort

Am 14.09.1987 wurde vom Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI), Abt. I, München, beim Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn, ein Antrag auf Gewährung einer Bundeszuwendung auf Ausgabenbasis (AZA) mit dem Thema "Aufbau der PRARE-Masterstation" eingereicht. Die Mittelzuwendung überdeckte den Zeitraum 01.01.1988 bis 31.12.1992. Das Förderkennzeichen lautete 01 QS 87 157, Projektleiter war Prof. Dr. Ch. Reigber.

Ein Bewilligungsbescheid vom 30.10.1991 bezog sich auf den PRARE-Betrieb einschließlich der Installation einer zweiten Dumpingstation in Tromsø/Norwegen und beinhaltete neben der Hardwarebeschaffung zum Kommunikationsbetrieb mit der Satellitenstation Tromsø den Aufbau und Betrieb der Dumpingstationen einschließlich der Vorverarbeitung der übertragenen Daten.

Am 26.03.1993 wurde vom GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ), auf das nach der Berufung des Projektleiters nach Potsdam die PRARE-Projektarbeiten des DGFI übergegangen waren, ein Antrag auf Gewährung einer Zuwendung bei der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten GmbH (DARA) mit dem Thema "Errichtung und Betrieb des PRARE-Bodensegmentes und Navigationsunterstützung der PRARE/METEOR-3-Mission" eingereicht. Der Förderzeitraum dieses Antrags war 01.01.1993 bis 31.10.1995. Das Förderkennzeichen war 50 EE 93 05, Projektleiter Prof. Dr. Ing. Ch. Reigber.

Am 08.12./19.12.1995 (Rev. vom 29.03.1996) wurde vom GFZ ein Fortsetzungsantrag zum "Betrieb des PRARE-Bodensegmentes für ERS-2" auf Gewährung einer AZK bei der DARA eingereicht. Die Genehmigung erfolgte am 08.05.1996 mit einem Förderzeitraum 01.12.1995 bis 30.11.1998 unter dem Förderkennzeichen 50 EE 9539. Projektleiter war wiederum Prof. Dr. Ing. Ch. Reigber.

Es folgten drei weitere Fortsetzungsanträge mit gleichem Titel, die den Betrieb bis zum 31.12.1999 (nach Umwidmung nicht abgerufener Projektmittel bis 30.06.2000), 30.04.2002 und 30.04.2003 absicherte.

Da auch nach Ablauf des letzten Förderzeitraums für PRARE weiterhin eine präzise Orbitbestimmung für den immer noch aktiven ERS-2 erfolgen sollte, wurde das PRARE System fortan auf einer „best effort“ Basis betrieben. Dabei verzichtete die Firma Timetech auf die Bezahlung ihrer Leistungen beim Datenempfang, während das GFZ alle anderen bis dato wahrgenommenen Arbeiten mit eigenen Mitteln weiterführte.

Der vorliegende Abschlußbericht umfasst die Beschreibung der Durchführung der Fördervorhaben sowie die Darstellung der wesentlichen, technischen und wissenschaftlichen Ergebnisse.

1. Einführung

Das System PRARE (Precise Range And Range-Rate Equipment) ist ein in Deutschland vollständig neu entwickeltes, satellitengestütztes Zweiweg-/Zweifrequenz- Entfernung- und Dopplermesssystem, das zur genauen Bestimmung der Bahn des Trägersatelliten, der Koordinaten der Beobachtungsstationen und sonstiger, über die Satellitenbahn ableitbarer geodätisch-geodynamischer Parameter dient. Die Messdaten werden satellitenzentral erfasst, d. h. alle Messdaten von den Bodenstationen sowie alle Sekundärdaten wie instrumentelle Kalibrierungsergebnisse, meteorologische Parameter oder Messwerte zur Erfassung der Ionosphäre werden im PRARE-Bordrechner gespeichert und später zur Auswertung zum Boden übertragen.

PRARE wurde als gemeinsames Experiment von Prof. Dr. Ph. Hartl (zunächst Technische Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, ab 1983 Universität Stuttgart, Institut für Navigation, INS) und Prof. Dr. Ing. Ch. Reigber (zunächst DGFI München, Abt. I, ab 1992 GFZ Potsdam) 1983 bei der Europäischen Weltraumbehörde (ESA) als Antwort auf ein "Announcement of Opportunity for Participation in the Proposed ERS-1 Mission" eingereicht und als Zusatzexperiment angenommen. Die Zusammenarbeit zwischen der ESA und dem BMFT wurde anschließend in einem "Memorandum of Understanding" (MOU) definiert. PRARE wurde erstmals 1982 vom BMFT als eigenständiges Projekt gefördert.

Zur Vorbereitung des erstmaligen Einsatzes des PRARE-Systems auf dem Europäischen Fernerkundungssatelliten ERS-1 (Startdatum: 17.07.1991) wurde 1988, damals noch innerhalb des DGFI, damit begonnen, alle wesentlichen Komponenten der PRARE-Masterstation (Empfangsstation, Zeitsystem, Vorverarbeitungsrechner und -software) in Oberpfaffenhofen aufzubauen, sowie eine weitere Bodenstation zur Laserkalibrierung (damals noch in Wettzell in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Geodäsie, IfAG) zu installieren [Reigber et al., 1988].

Diese Vorbereitungsphase bis zum Start von ERS-1 konnte im Wesentlichen wie geplant abgewickelt, das Gesamtsystem PRARE jedoch leider nicht erfolgreich auf ERS-1 erprobt werden. Kurz nach dem Start entstand ein nicht reparabler Fehler im PRARE-Bordsegment, beim Durchflug des Satelliten durch die sog. Südamerikanische Anomalie (SAA), einem sehr strahlungsintensiven Gebiet östlich von Südamerika.

Eine eingehende Beschreibung über die Fehlerursache und damit verbundene Konsequenzen finden sich im "DLR/ESA Industry Failure Review Board Report". Eine wesentliche, für die Projektförderung wichtige Schlussfolgerung dieses Berichtes war, dass ein erneuter Mitflug eines modifizierten PRARE-Instruments auf dem Nachfolgesatelliten ERS-2 gerechtfertigt sei.

Als Vorbereitung auf die ERS-2-Mission (Startdatum: 21.04.1995) wurde mit erneuter Förderung der DARA eine weitere, diesmal mit erheblich strahlungsfesteren Bauelementen ausgestattete Flugeinheit erstellt (siehe Abb. 1-1). Diese konnte auf dem russischen Wettersatelliten METEOR-3/7 installiert und am 25.01.1994 erfolgreich eingeschossen werden. Über einen Zeitraum von 21 Monaten konnten mit diesem Satelliten alle Funktionen des PRARE-Systems und alle Bodenstationen erfolgreich getestet werden. Am 01.11.1995 wurde das PRARE-System an Bord von METEOR-3/7 wegen Auslaufens der Förderung dieses Projektes und der Notwendigkeit sich auf ERS-2 zu konzentrieren, abgeschaltet (siehe Abschlußbericht [Bedrich et al., 1997]).

Auf dem ERS-2-Satelliten wurde das verbesserte PRARE-Bordsegment einschließlich eines baugleichen Backupmoduls installiert. ERS-2 wurde am 21.04.1995 vom Startplatz Kourou mit einer Ariane-4-Rakete in eine 98.5 Grad gegen den Äquator geneigte, 785 km hohe, sonnensynchrone Kreisbahn eingeschossen. Das PRARE-Bordsegment konnte am 24.04.1995 erfolgreich in Betrieb genommen werden und die ersten Tracking-Daten wurden

am 02.05.1995 in Oberpfaffenhofen empfangen. Nach der erfolgreichen Commissioning Phase begann ab dem 01.01.1996 der operationelle Betrieb des PRARE Systems. Es liefert bei guter globaler Verteilung der Bodenstationen (Abb. 1-2) kontinuierlich Messdaten von sehr hoher Qualität, die die gestellten Erwartungen als primäres Satellitentrackingsystem von ERS-2 vollständig erfüllt und zum Teil sogar deutlich übertroffen haben.

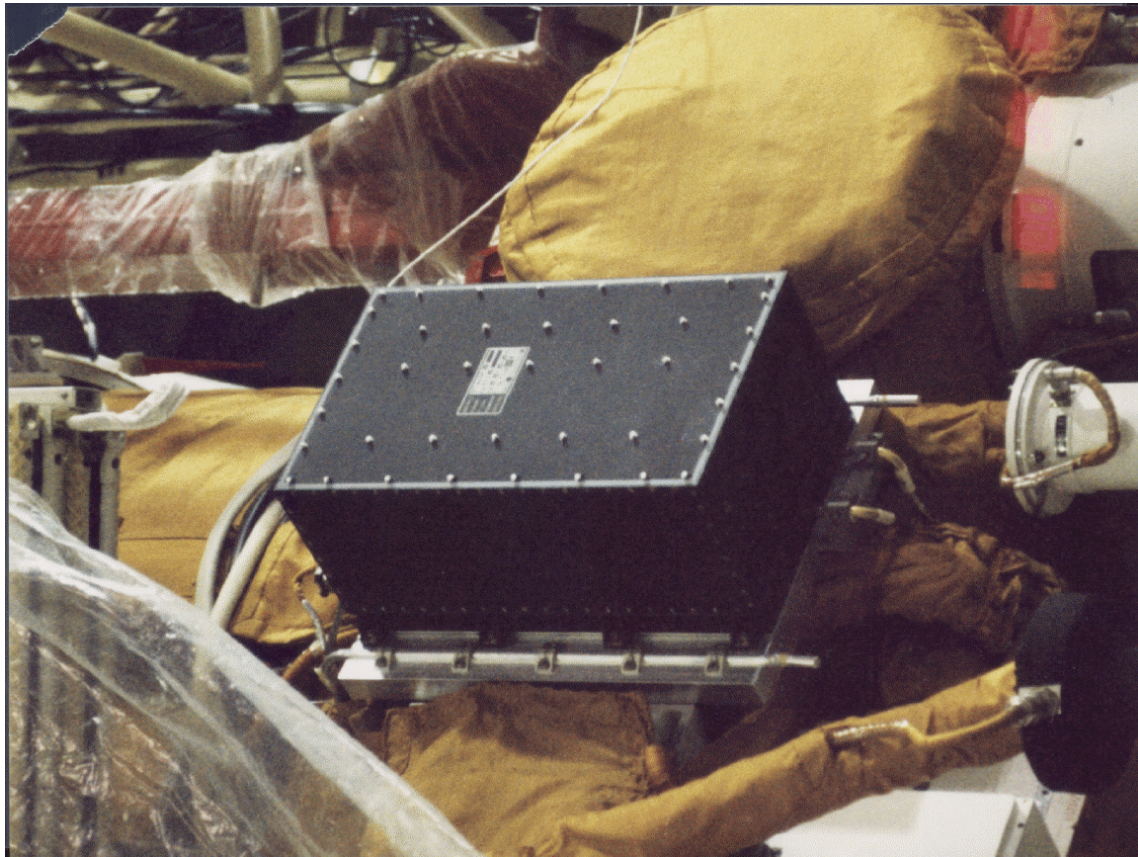


Abb. 1-1: Das PRARE Bordsegment auf METEOR 3-7

Nach einer langen Zeit des Betriebs ohne Probleme musste dann vom „Modul A“ im PRARE Raumsegment auf das baugleiche „Modul B“ umgeschaltet werden. Die Umschaltung wurde notwendig, da für das „Modul A“ eine unerlaubt hohe Stromaufnahme registriert worden war, die am 17. Mai 2000 zu einer automatischen Abschaltung durch den ERS-2 Bordrechner geführt hatte und deren Ursache sich nicht ermitteln liess. Das „Modul B“ wurde am 29. Mai 2000 in Betrieb genommen und hat seitdem störungsfrei gearbeitet. Die Qualität der mit beiden Modulen gewonnenen Daten war gleichwertig.

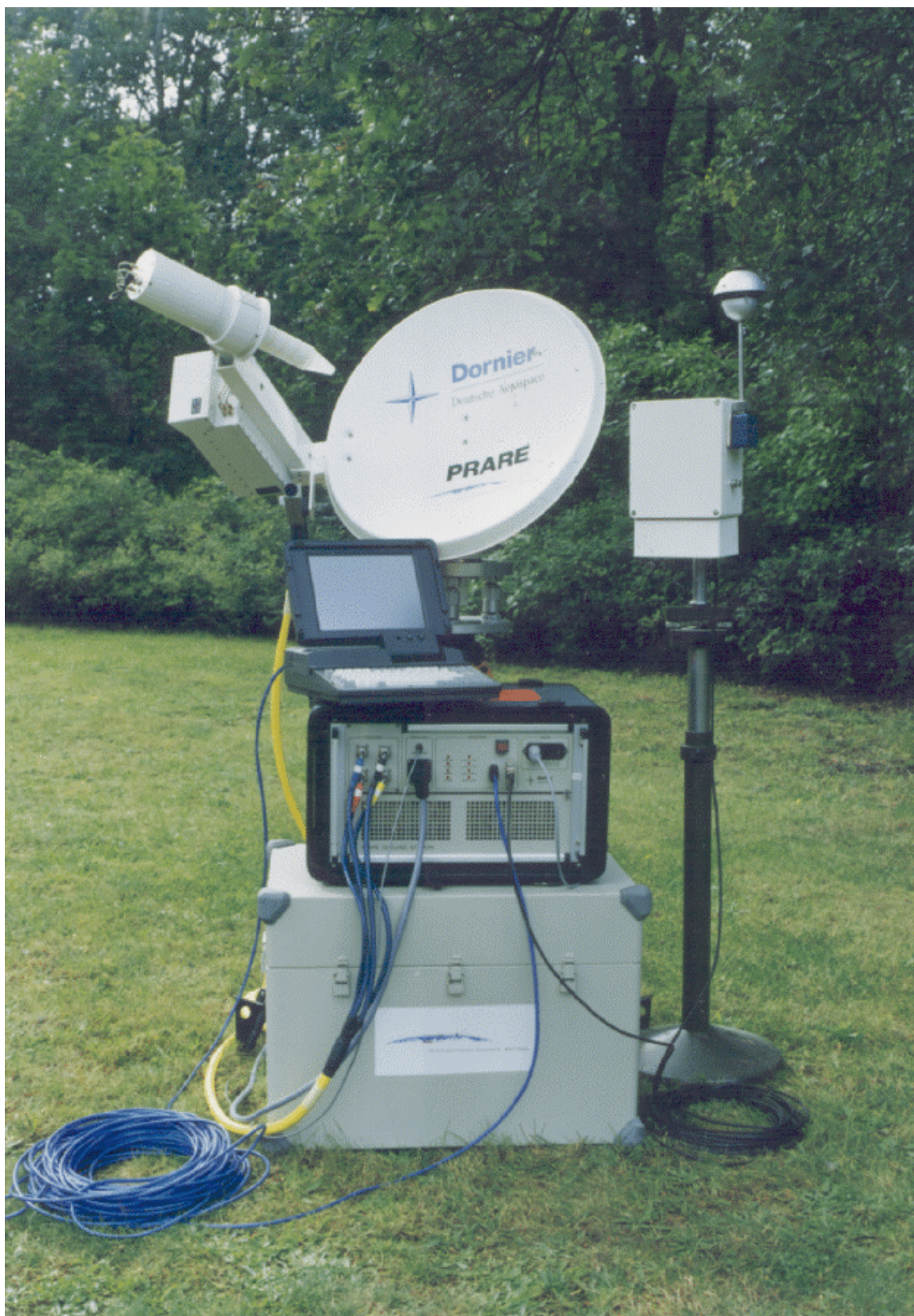


Abb. 1-2: PRARE Bodenstation mit Thermobox, automatischer Metrologieeinheit und M+T Computer

2. Das PRARE-System

2.1 Komponenten des PRARE-Systems

Das PRARE-System besteht, wie jedes aktive Satellitenpositionierungssystem, aus folgenden drei Segmenten:

- dem Bordsegment,
- dem Systemkontrollsegment und
- den Bodenstationen.

Das Kontrollsegment ist selbst dreigeteilt und setzt sich aus einer Überwachungs- und Kontrollstation für das Bordsegment (MCS Station, betrieben in Stuttgart von der Firma TimeTech), einer Masterstation (GFZ, Oberpfaffenhofen) zur zentralen Verarbeitung der Messdaten, zum Betrieb des PRARE-Zeitsystems und zur Koordinierung des weltweiten Trackingnetzes, sowie einer Laserkalibrierungsstation (GFZ, Potsdam) zusammen (Abbildung 2-1-1).

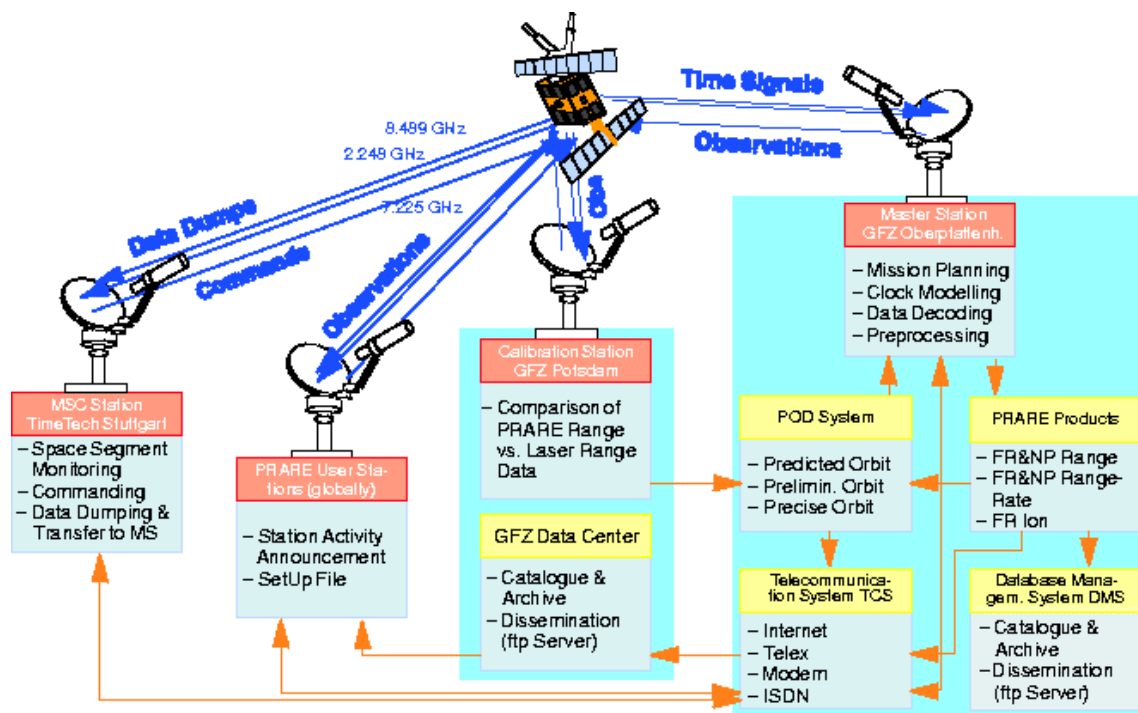


Abb. 2-1-1: Datenfluss zwischen den Segmenten des PRARE-Systems

Zur Generierung der Messdaten strahlt das PRARE-Raumsegment, nach einmaliger Initialisierung, permanent zwei modulierte Mikrowellensignale ab (je ein Signal im X- und S-Band, 8.489 bzw. 2.248 GHz). Diese können von allen PRARE-Bodenstationen, die sich im Sichtbarkeitsbereich des Satelliten befinden, empfangen und dekodiert werden. Das X-Bandsignal wird nach kohärenter Frequenzumsetzung auf 7,225 GHz durch die Bodenstationen zum Raumsegment zurückgesendet, wo durch Korrelationsmessung mit

dem ursprünglich ausgesendeten Abwärtssignal die hochgenauen Zweiweg-Messungen durchgeführt werden (Abbildung 2-1-2).

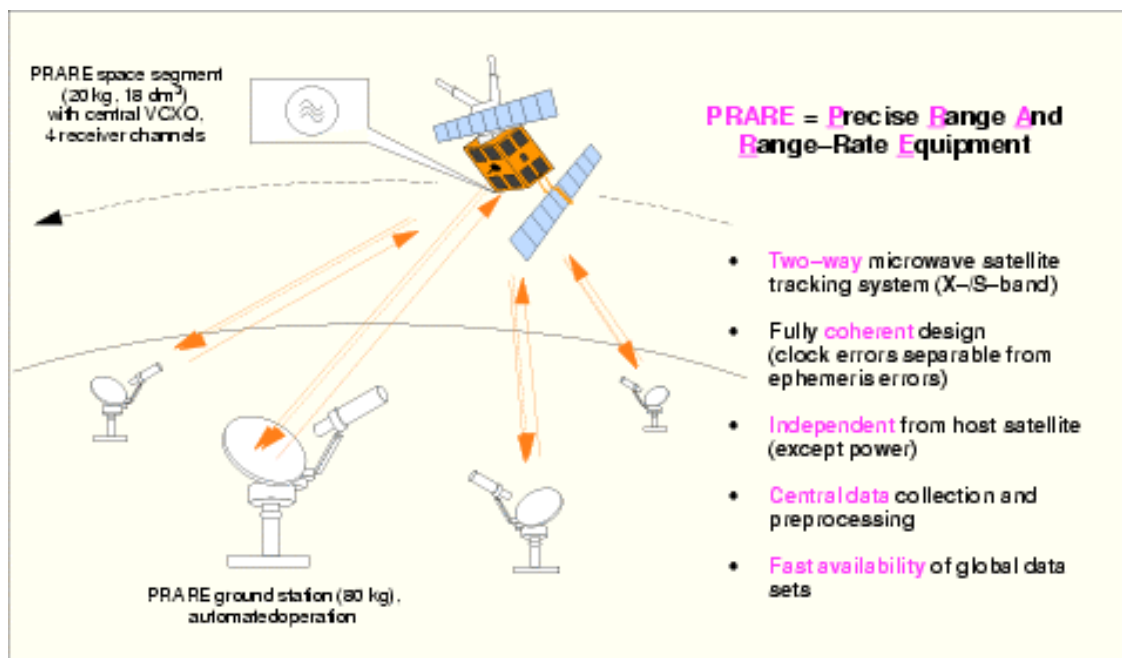


Abb. 2-1-2: Funktionsprinzip des PRARE-Systems

Mittels der vier parallelen Empfängerkanäle über die das Raumsegment verfügt, können Messungen mit bis zu vier, vorab selektierten Bodenstation gleichzeitig vorgenommen werden. Dabei wird die Synchronizität der Datensätze untereinander durch das implementierte Taktungsverfahren (zentraler Hauptoszillator im Raumsegment) streng eingehalten.

2.2 PRARE-Messprinzip

Im einzelnen erfolgt die Messwertgewinnung wie folgt: Das vom Raumsegment abgestrahlte, mit einem binären pn-Code (10 Mchips/s) phasenmodulierte X-Bandsignal kann von der Parabolantenne der Bodenstation empfangen werden, sobald eine Sichtverbindung zum Satelliten besteht. Nach einer kurzen Akquisitionsphase beginnt die hochgenaue Rangingphase, bei welcher bis zum Ende des Sichtbarkeitsintervalls das empfangene Signal kohärent (festes, ganzzahliges Frequenzverhältnis zwischen Abwärts- und Aufwärtssignal), transparent (keine Veränderung der Dopplerverschiebung des Abwärtssignals) und regenerativ (Neucodierung des Aufwärtssignals) umgesetzt und zum Raumsegment zurückgestrahlt wird.

Das Raumsegment korreliert in jedem seiner vier Empfängerkanäle signaltechnisch unabhängig voneinander, infolge des Zentraloszillators jedoch streng kohärent zueinander die Phasenlage des empfangenen mit dem ausgesendeten Signal, wodurch sich sowohl die Zweiweg-Signallaufzeit bzw. die Schrägentfernung zwischen Raumsegment und Bodenstation (Codephasenlage) als auch ihre zweifache Entfernungsänderung bzw. Relativgeschwindigkeit (Trägerphasenlage) bestimmen lassen (Abbildung 2-2-1). Es erfolgen 91 separate Entfernungsmessungen pro Sekunde mit einer Einzelmessauflösung von 3 mm,

die zur Reduzierung des Messrauschens und der Speicherfüllung gemittelt werden. Die Trägerphasenmessung erfolgt sekundlich mit einer Auflösung von 1/1000 der Wellenlänge des Aufwärtssignals, also mit etwa 0,04 mm/s relativer Genauigkeit.

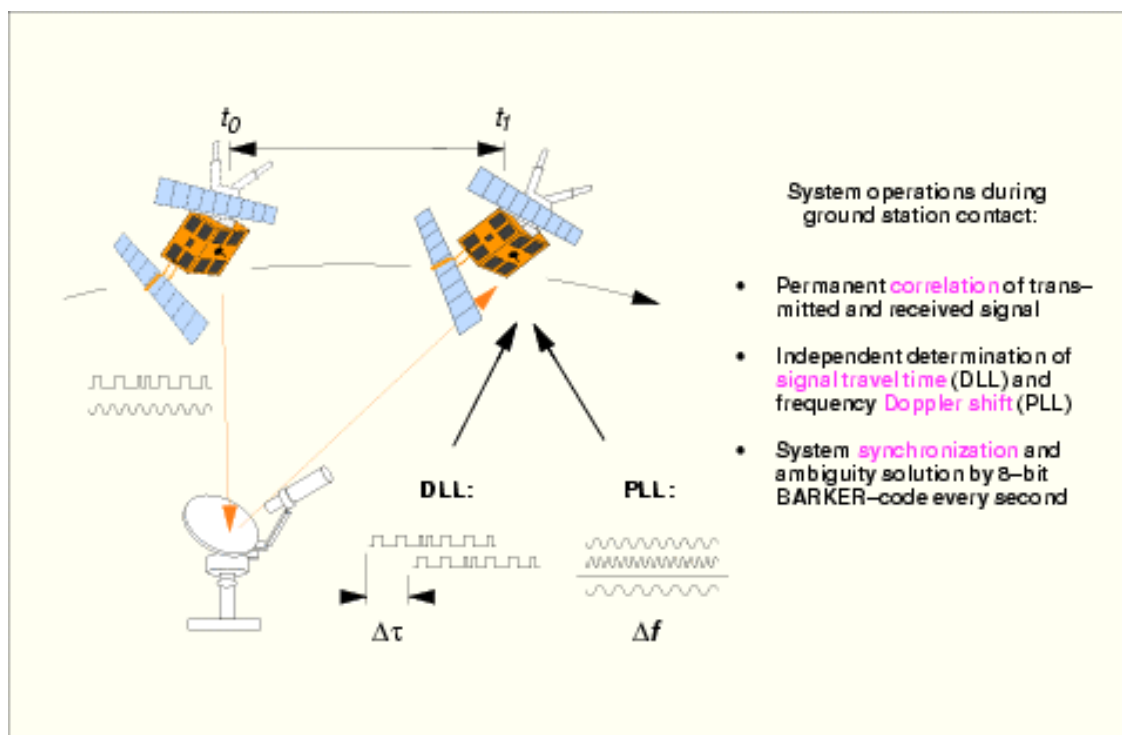


Abb. 2-2-1: PRARE-Messprinzip (DLL: Delay Locked Loop, PLL: Phase Locked Loop)

Um die Systemgenauigkeit weiter zu erhöhen, werden die Signallaufzeiten innerhalb der Bodenstationen und des Raumsegments mit Hilfe von Testtranspondern vermessen und bei der späteren Datenvorverarbeitung berücksichtigt. Die durch die Ionosphäre und Troposphäre verursachten Ausbreitungseffekte werden ebenfalls durch Hilfsmessungen in den Bodenstationen erfaßt: Zum einen durch Laufzeitdifferenzmessungen von X- und S-Band-Codesignal, die proportional zum Gesamtelektroneninhalt (Total Electron Content, TEC) auf der Signalstrecke durch das Plasma sind, zum anderen durch die Bodenstationswetterdaten Lufttemperatur, -druck und -feuchte, mit welchen sich unter Zuhilfenahme von entsprechenden Modellen die Signalverzögerungen in der niederen Atmosphäre bestimmen lassen.

Alle diese Daten werden binär codiert, auf das Messsignal moduliert, durch das Raumsegment zentral gesammelt und zusammen mit den primären Messwerten zwischengespeichert. Bei jedem Überflug des Satelliten über Deutschland (sechs bis acht Passagen pro Tag mit jeweils etwa zehninütiger Dauer) werden diese Daten dann durch ein Telekommando der Monitor- und Kommandostation Stuttgart (MCS) aus dem Raumsegmentsspeicher ausgelesen, dem Messsignal in veränderter Form erneut aufmoduliert und in Stuttgart empfangen. Nach Übertragung aller dieser Dumpdaten nach Oberpfaffenhofen erfolgt dort die weitere Vorverarbeitung, Auswertung, physikalische Interpretation und Kurzzeitarchivierung.

Auch Bahnvorhersagen und Betriebsablaufpläne werden, nach Generierung durch die Masterstation Oberpfaffenhofen, über Telekommandierung durch die Stuttgarter Station an das Raumsegment weitergegeben und von dort an die Bodenstationen verteilt. Weitere, über

die Primär- und Sekundärdaten hinausgehende Telemetrieinformationen der Stationen und des Raumsegments werden ebenfalls in Stuttgart empfangen und ausgewertet bzw. nach Oberpfaffenhofen weitergereicht. Alle Informationen sind in einem definierten und einheitlich strukturierten Datenformat abgelegt und erlauben daher eine relativ einfache und zeitlich exakt regenerierbare Dekodierung und Interpretation [Bedrich et. al., 1997].

2.3 Systemunabhängige Kalibrierung

Systemunabhängige Kalibrierungsparameter werden mittels des in Potsdam vorhandenen Lasersystems (2. und 3. Generation), in unmittelbarer Nachbarschaft einer dort installierten PRARE-Station gewonnen (s. Kapitel 8). Durch simultane Auswertung quasi-synchroner Laser- und PRARE-Messungen lassen sich die PRARE-Messdaten zum einen hinsichtlich ihrer Qualität überprüfen, zum anderen in eines der international üblichen geodätischen Referenzsysteme, beispielsweise das International Terrestrial Reference Frame (ITRF), einbinden. Auf diese Weise ist eine messsystem-unabhängige Nutzung der PRARE-Daten auf internationaler und zeitunabhängiger Basis möglich.

3. Aufgabenstellung

Die durch den Förderantrag 50 EE 9539 "Betrieb des PRARE-Bodensegmentes für ERS-2" abgedeckten Arbeitsziele richteten sich vor allem auf den zuverlässigen operationellen Betrieb des PRARE-Gesamtsystems als primäres Satellitentrackingsystems von ERS-2.

Die Aufgaben der PRARE Master Station beinhalteten sowohl die Kontrolle und Wartung der notwendigen Hardware (Empfangsstation, Zeitsystem, Rechnerverbund) als auch die Pflege und Weiterentwicklung der Softwarekomponenten (Produktgenerierung, Automatisierung der Prozessierungskette, Kalibrierung).

Für den Aufbau eines gleichmäßig verteilten Bodenstationsnetzes war die Koordinierung des Transportes, der Installation und Wartung von PRARE Stationen, einschließlich des Abschlusses von Vereinbarungen mit externen Nutzern erforderlich.

Höherwertige Produkte (hochgenaue Satellitenbahnen, Stationskoordinaten, Schwerefeld- und Erdrotationsparameter, Ionosphären Daten, Zeitübertragung zur Synchronisation verschiedener Atomnormale) wurden im Rahmen der F&E Arbeiten des Aufgabenbereiches 1 (später Department 1) des GFZ generiert.

Wesentliche weitere Aufgaben betrafen das Management des Projektes (Verträge, Finanzen, Controlling, Öffentlichkeitsarbeit).

4. Planung und Ablauf der Vorhaben

Die Planung des Vorhabens "Betrieb des PRARE-Bodensegmentes für ERS-2" (50 EE 9539) orientierte sich im wesentlichen an den in Anhang II beschriebenen Teilaufgaben. Dargestellt sind hier jeweils das Ziel, die Methodik, Input und Output, der Zeitraum, die beteiligten Mitarbeiter und die notwendigen Investitionen.

Als wichtigste Einzelziele des Fördervorhabens "Betrieb des PRARE-Bodensegmentes für ERS-2" sind zu nennen:

1) Management des Vorhabens (AP 1000):

- AP 1100: vertragliche und finanzielle Aspekte und organisatorische Einzelheiten
- AP 1200: Koordinierung der Aktivitäten der Bodenstationsnutzer
- AP 1300: Öffentlichkeitsarbeit
- AP 1400: Organisation von Meetings, Workshops und Reisen

2) Betrieb des PRARE-Systems (AP 2000):

- AP 2100: Betrieb der PRARE-Masterstation einschließlich der Betreuung von Hard- und Software, der Missionsplanung und der Level 1 Produktgenerierung
- AP 2200: Betrieb der Kalibrierungsstation, Betreuung von Hard- und Software
- AP 2300: Betreuung und Koordination des PRARE Bodenstationsnetzes
- AP 2400: Verwaltung der Daten (Archivierung, Bereitstellung)
- AP 2500: Generierung höherwertiger Produkte

3) Prozessierung der PRARE-Messdaten (AP 3000):

- AP 3100: Bahnvorhersage und Berechnung hochgenauer Orbits
- AP 3200: Überprüfung der charakteristischen Größen des PRARE-Bezugssystems
- AP 3300: Kalibrierung und Validierung des PRARE Ionosphärenproduktes
- AP 3400: Bestimmung von Schwerfeldparametern
- AP 3500: Berechnung von Erdrotationsparametern
- AP 3600: Vergleich von Atomnormalen mittels Zeitübertragung

5. Stand der Wissenschaft

Die Grundkonzeption des PRARE-Systems basiert auf der Idee, ein autonomes, hochgenaues und satellitengetragenes Trackingsystem für hochpräzise Zweiweg-Range- und Range-Rate-Messungen zu realisieren, die zu einzelnen, sehr kompakten Bodenstationen durchgeführt werden können. Hiermit eröffnet sich ein weites Anwendungsspektrum im Bereich der Physik der festen Erde, der Erderkundung über Ozean-, Land- und Eisregionen, der Atmosphärenforschung, der Überwachung von Raumfahrzeugen und der hochgenauen satellitengestützten Zeitübertragung. Als Beispiele sind im einzelnen zu nennen:

a) Physik der festen Erde:

- die genaue, absolute und relative Positionsbestimmung für Punkte auf der Erdoberfläche mit weitgestreuten Anwendungen in Geodäsie, Ingenieurvermessung, Geodynamik, Glaziologie, Vulkanologie und Ozeanographie
- die genaue Überwachung der Polbewegung und der Variationen der Erdrotation mit Anwendungen in Geophysik, Geodäsie, Geologie und Ozeanographie
- Bestimmung des globalen Erdschwerefeldes bei mittlerer und hoher Auflösung mit relevanten Anwendungen in Geophysik, Geodäsie, Geologie und Ozeanographie

b) Erderkundung:

- die schnelle und genaue Bestimmung der Trägersatellitenbahn zur Ermittlung von Sensorpositionen (Radaraltimeter, SAR, optische und elektronische Kameras) mit Anwendungen in Satellitenfernerkundung, Kartographie, Photogrammetrie und Glaziologie
- die präzise Bestimmung von Koordinatendifferenzen für Kontrollstationen am Boden und von sich langsam bewegenden Bodenstationen mit Anwendungen in Kartographie, Photogrammetrie, Glaziologie und Ozeanographie

c) Ionosphärenforschung:

- aus den in den Bodenstationen gemessenen X/S-Laufzeitdifferenzen oder dem Vergleich der quasi-simultan durchgeführten Range- und Range-Rate-Messungen lassen sich Rückschlüsse auf den Gesamtelektroneninhalt der Ionosphäre ziehen, die Anwendung in der Korrektur der Einfrequenz-ERS-Altimetermessungen finden

d) Zeitübertragung:

- Die satellitengestützte Übertragung hochgenauer Zeitinformationen zwischen weit voneinander entfernten Uhren hat sich in den letzten Jahren zu einem wichtigen Anwendungsbereich der Satellitentechnik entwickelt. Sowohl in Wissenschaft (z.B. Geodäsie) als auch Technik (z.B. Telekommunikation) werden sehr stabile Präzisionsoszillatoren eingesetzt, deren Zeitinformation jedoch a priori nur lokal verfügbar sind.

Zweck des PRARE-Experimentes im Rahmen der ERS-2-Missionen war es primär, eine Methode der sehr genauen und effizienten Bahnvermessung operationell einzusetzen. Dies umfasste die schnelle Bestimmung einer vorläufigen Satellitenbahn, die Verbesserung der Bahnüberdeckung vorhandener Lasertrackingstationen mit zusätzlichen PRARE-Range- und

Dopplermessungen zur Orbit- und Schwerefeldbestimmung, die präzise relative und absolute Punktbestimmung und die Bestimmung des Elektronengesamtinhalts der Ionosphäre TEC auf dem Signalweg.

Durch das weltweite Interesse am PRARE-Projekt beteiligten sich bis Ende des Berichtszeitraumes insgesamt 21 internationale Institutionen (s. Kapitel 6) durch den Kauf bzw. Betrieb einer oder mehrerer Bodenstationen, von denen insgesamt 29 Stück produziert worden sind und zum Einsatz kamen.

Zum Zeitpunkt des Beginns des Förderantrags haben Beobachtungen von künstlichen Erdsatelliten und die Interferometrie über lange Basislinien (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) beachtliche Möglichkeiten zur präzisen Koordinatenbestimmung von Oberflächenpunkten der Erde, zur Überwachung der Verlagerung der Erdrotationsachse der Erde sowie zur Modellierung des globalen Erdschwerefeldes geliefert. Die hierbei benutzten Messdaten wurden, mit Ausnahme der Altimetriemessungen, von bodengebundenen Messsystemen gewonnen. Höchste Beobachtungsgenauigkeit lieferten dabei Lasersysteme der 3. Generation und VLBI-Systeme.

Dabei treten jedoch bestimmte Schwierigkeiten auf, die eine intensive Nutzung dieser Systeme für die schnelle, geodätische Parameterbestimmung mit höchstmöglicher Genauigkeit und zeitlicher Auflösung ausschließen. Zu diesen Schwierigkeiten zählen insbesondere:

- die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten (VLBI, Laser)
- die schlechte globale Verteilung (VLBI, Laser)
- die geringe Effizienz von Lasersystemen in Gebieten mit schlechten Wetterbedingungen
- die geringe oder fehlende Mobilität (VLBI, Laser)
- die langen Zeitspannen und die Kosten, die für die Datensammlung von einem weltweit verteilten Netz von Laser- und VLBI-Stationen und für die Verarbeitung von VLBI-Beobachtungen benötigt werden.

Mit der Entwicklung und Inbetriebnahme des PRARE-Systems sollte gezeigt werden, dass sich insbesondere gegenüber der bis dahin primär benutzten Technik zur Bahnbestimmung von Satelliten, der Laserbeobachtung im optischen Spektrum, umfassende Verbesserungen infolge der Benutzung von Mikrowellen des Radarspektrums ergeben. Dies betrifft zum einen die Allwettertauglichkeit, aber vor allem auch den Einsatz von automatisierten und kompakten Bodenstationen und die damit verbundenen stark reduzierten Betriebskosten.

Die zentrale Sammlung der hochgenauen Range- und Dopplerdaten im Bordspeicher von PRARE, die anschließende zentrale Weiterverarbeitung der Daten an der Masterstation in Oberpaffenhofen, sowie die äußerst schnelle Verfügbarkeit der Daten für Bahn- und Positionierungsbestimmungen sind zusätzliche Vorteile des bei PRARE benutzten Zweiweg-Verfahrens. Während die Genauigkeit der PRARE-Abstandsmessungen etwa derjenigen von modernen Lasersystemen entspricht (2 bis 3 cm Restungenauigkeit), steht als zusätzliche Messgröße die Bestimmung der Abstandsänderung im Bereich Submillimeter / Sekunde zur Verfügung.

Es konnte nachgewiesen werden, dass infolge der spezifischen PRARE-Signalübertragungstechnik hochgenaue lokale Zeitinformationen auch an entfernten Orten zur vollen Ausnutzung gebracht werden können.

6. Zusammenarbeit mit anderen Institutionen

Im Vorfeld und insbesondere während der Entwicklung des PRARE-Systems ergaben sich Kooperationen des DGFI mit zahlreichen anderen Instituten und Firmen:

- DARA GmbH, Bonn: Projektfinanzierung und -betreuung; seit 1.10.1997 DLR
- Dornier GmbH, ab 1995 Nortel Dasa Network Systems GmbH, seit 2000 ND-Satcom Friedrichshafen: Entwicklung, Fertigung und Reparatur der Bodenstationen
- Institut für Navigation der Universität Stuttgart (INS), seit 1991 TimeTech GmbH, Stuttgart: PRARE-Systementwicklung, Design und Herstellung der wichtigsten Systemkomponenten, Systemabnahme, Überwachung und Kommandierung des Raumsegmentes während der Missionen
- Kayser-Threde GmbH, München: Herstellung von Teilen der Flughardware in enger Zusammenarbeit mit dem INS bzw. TimeTech.

Im Rahmen der Koordinierung und des Aufbaus des globalen Trackingnetzes wurden darüber hinaus enge Kontakte mit zahlreichen internationalen Institutionen hergestellt und gepflegt, um das PRARE / ERS-2-Trackingnetz zu vergrößern und zu erhalten. Dabei haben viele Partner grosse Hilfe bei der Installation und dem Betrieb (Wartung, Reparaturen) geleistet. Das Bild 6-1-1 zeigt die Installation der PRARE Station in Ny Alesund / Spitzbergen. Die solide Konstruktion unter dem Radom wurde von Statens Kartverk aufgebaut.



Abb. 6-1-1: PRARE Installation in Ny Alesund (Statens Kartverk, Spitzbergen)

Mit einzelnen Einrichtungen wurden bei Bedarf weitergehende Kooperationsvereinbarungen abgeschlossen:

- Agenzia Spaziale Italiana (ASI), Matera, Italien
- Alfred-Wegener-Institut (AWI), Bremerhaven, Deutschland
- Astronomical Observatory Kitab (AOK), Kitab, Usbekistan
- Astronomical Observatory La Plata (AOLP), La Plata, Argentinien
- Center for Space Research (CSR), Austin, Texas, USA
- Council for Scientific and Industrial Research (CSIR), Pretoria, Südafrika
- Delft Technical University (DUT), Delft, Niederlande
- Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG), Leipzig und Wettzell, seit 6.8.1997 BKG
- Indian Space Research Organisation (ISRO), Bangalore, Indien
- Jet Propulsion Laboratory (JPL), Pasadena, California, USA
- Laboratoire de Géologie-Géophysique de Nouméa (ORSTOM, IRD), Neukaledonien
- National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), Jakarta, Indonesien
- Nippon Institute of Polar Research (NIPR), Tokio, Japan
- Proudman Oceanographic Laboratory (POL), Birkenhead, UK
- Research Center of Astronomy and Geophysics (AGRC), Ulaan Baatar, Mongolei
- Shanghai Observatory (SAOB), Shanghai, China
- Statens Kartverk (SK), Honefoss, Norwegen
- Universität Kopenhagen (UC), Kopenhagen, Dänemark

7. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

7.1 Systemrealisierung

Wesentliche Komponenten des PRARE-Systems konnten bereits vor Beginn der PRARE/ERS-2-Mission realisiert und ihre Funktionsfähigkeit nachgewiesen werden. Deshalb soll hier noch einmal kurz auf die Systemrealisierung vor dem Berichtszeitraum eingegangen werden. Einzelheiten finden sich im Abschlußbericht der METEOR-3/7-Mission [Bedrich et al., 1997])

Von der Dornier GmbH (später Nortel Dasa GmbH bzw. ND-Satcom) in Friedrichshafen wurden 29 Bodenstationen in Kleinserie hergestellt. Anhand von simultanen Aufstellungen mehrerer Stationen in Potsdam wurden 1995 zahlreiche Analysen der in den Bodenstationen gewonnenen X/S-Laufzeitdifferenzen gemacht und der Fa. Nortel Dasa in Nachfolge von Dornier zur Verfügung gestellt. Es zeigte sich insbesondere, dass die Stationen relative Biase in den X/S-Messungen aufwiesen, die Ende 1995 im Rahmen einer umfangreichen, nachträglichen Kalibrierungskampagne [Nortel Dasa, 1995] zum Teil beseitigt wurden. 1998 wurden alle Stationsbiase durch Vergleich mit zwei Ionosphärenmodellen mit hoher Genauigkeit bestimmt.

In Kooperation mit Dornier erfolgte die Entwicklung eines Monitor- und Testcomputers zur Initialisierung und Überwachung der Bodenstationen, als auch zur Implementierung einer Bahnvorhersagesoftware zur Empfängervoreinstellung und Antennennachführung an den Bodenstationen.

Die meteorologischen Stationen mit einer mikroprozessorgesteuerten Messeinheit für die Aufzeichnung von Bodenwetterdaten (Luftdruck, -temperatur und -feuchte) wurden beim INS Stuttgart (seit 1991 bei TimeTech GmbH, Stuttgart) gebaut.

Von der Universität der Bundeswehr in Neubiberg wurden die geodätischen Adapterplatten, zum Einrichten der PRARE Antennendrehstände produziert. Zusätzliche Adapterplatten wurden am GFZ in Potsdam gefertigt.

In Kooperation mit der Abteilung WT-DA des DLR Oberpfaffenhofen wurde der Standort für die Aufstellung der PRARE-Masterstation im Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) festgelegt. Als Dumpstation diente die von TimeTech betriebene Station in Stuttgart und mit Hilfe der Potsdamer Station erfolgte die Kalibrierung der PRARE-Rangemessungen gegenüber den Messungen der dortigen Laserstation.

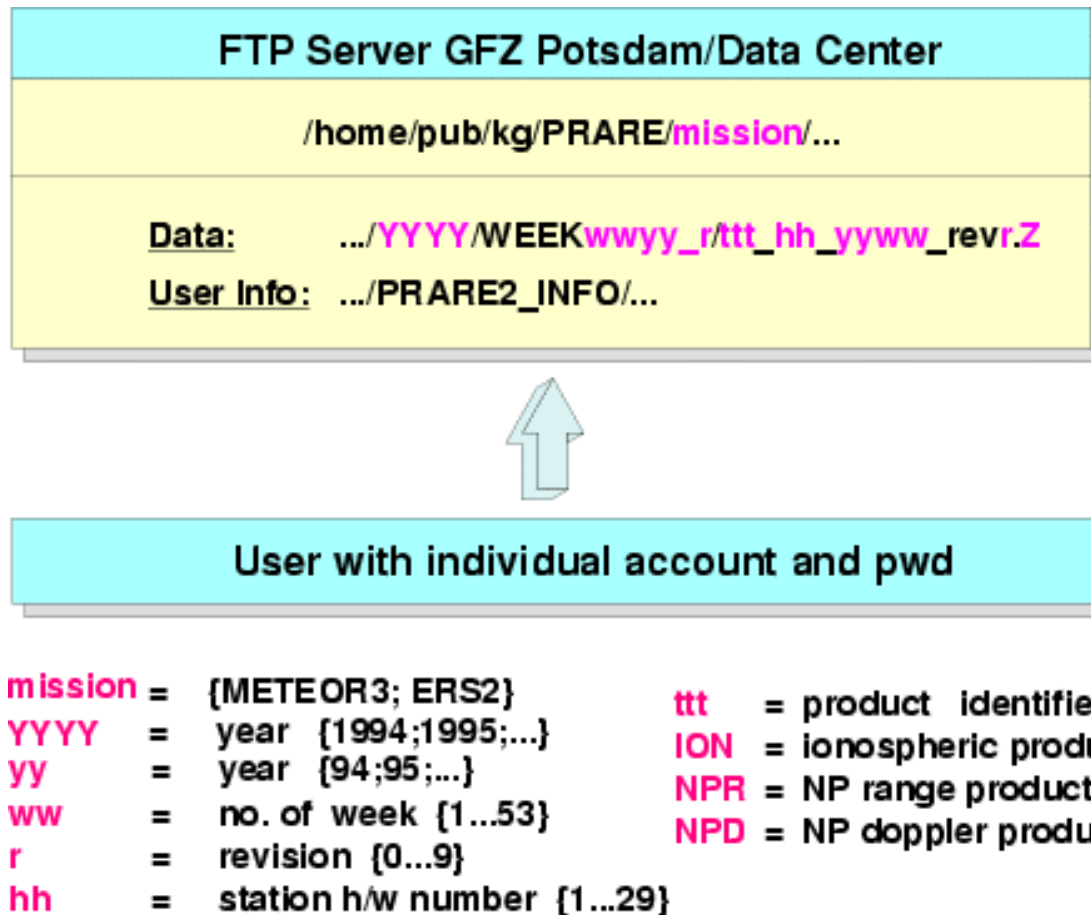
Die betriebliche Kommandierung des Raumsegmentes (Dumpdatenempfang, Aufdatierung der Ephemeriden und des Fahrplans einschließlich PN-Code und Leistungsreduzierung) wurden an der Monitoring and System Command Station in Stuttgart durch die Fa. TimeTech GmbH durchgeführt. Ein Interface zur Masterstation wurde in einem Dokument definiert, optimiert und soweit automatisiert, dass PRARE Daten auf täglicher Basis für "Rapid Orbits" des GFZ zur Verfügung standen [Enninghorst und Rentsch, 1997]. Die im Raumsegment gespeicherten Daten wurden seit 1996 teilweise statt mit 4 kb/s mit 10 kb/s gedumpt. Die Masterstation war nach der Modifizierung der Dekodiersoftware in der Lage, diese Daten auszuwerten.

Mitte 1995 wurde unter Zuhilfenahme der neu aufgestellten PRARE Station in Hartebeesthoek/Südafrika erstmals damit begonnen, die Abhängigkeit der Rangemessungen vom benutzten Raumsegment-Empfangskanal zu untersuchen. Dazu wurde das Signal der Bodenstation nicht nur wie üblich in einem Kanal aufgezeichnet, sondern (durch spezielle Programmierung des Raumsegmentes) in allen vier Kanälen gleichzeitig. Im Laufe des Berichtszeitraums wurde eine solche Kampagne für jede Station nach erfolgter Inbetriebnahme durchgeführt.

Bis Anfang 1996 erfolgte eine automatische, entfernungsabhängige Reduktion der Sendeleistung des Bordsegmentes, mit der Folge von Sprüngen in den Range-Messungen.

Diese wurden durch Entwicklung entsprechender Analyseverfahren bestimmt und bei der Datenprozessierung berücksichtigt.

Für die operationelle Verteilung der PRARE-Daten während der ERS-2-Mission wurde 1995 beginnend ein FTP-Server am GFZ in Potsdam aufgebaut, der einen Passwort-geschützten Zugang zu den Daten erlaubt. Abbildung 7-1-1 zeigt den strukturellen Aufbau dieses Servers. Die Daten werden wöchentlich auf dem Server abgelegt und können damit an die verschiedenen internationalen Nutzergruppen verteilt werden.



Z = data are compressed with UNIX compress command

Abb. 7-1-1: Struktur des FTP-Servers am GFZ-Datenzentrum zur Verteilung der PRARE-Daten

7.2 Hardwareaufbau

Für die verschiedenen Aufgaben der PRARE-Masterstation (Dumpdatenempfang, Dekodierung, Zeitmodellierung, Vorverarbeitung und Komprimierung der Daten, Missionsplanung etc.), standen im Laufe des Vorhabens die in Abbildung 7-2-1 gezeigten Hardwarekomponenten zur Verfügung. Sie bestehen im wesentlichen aus dem oben

erwähnten Zeitsystem und mehreren SUN-Workstations und PCs. Fast alle Rechner wurden miteinander vernetzt, um alle anfallenden Daten schnell weiterreichen zu können.

Zur Sicherung des Messdatenempfangs (Zeitdaten des Bordoszillators sowie Highrate-Daten) wurde eine zweite, sog. Backup-Bodenstation installiert. Um die PRARE-Ionosphären Daten gegen GPS kalibrieren und validieren zu können, wurde zusätzlich ein GPS TurboROGUE-Empfänger installiert.

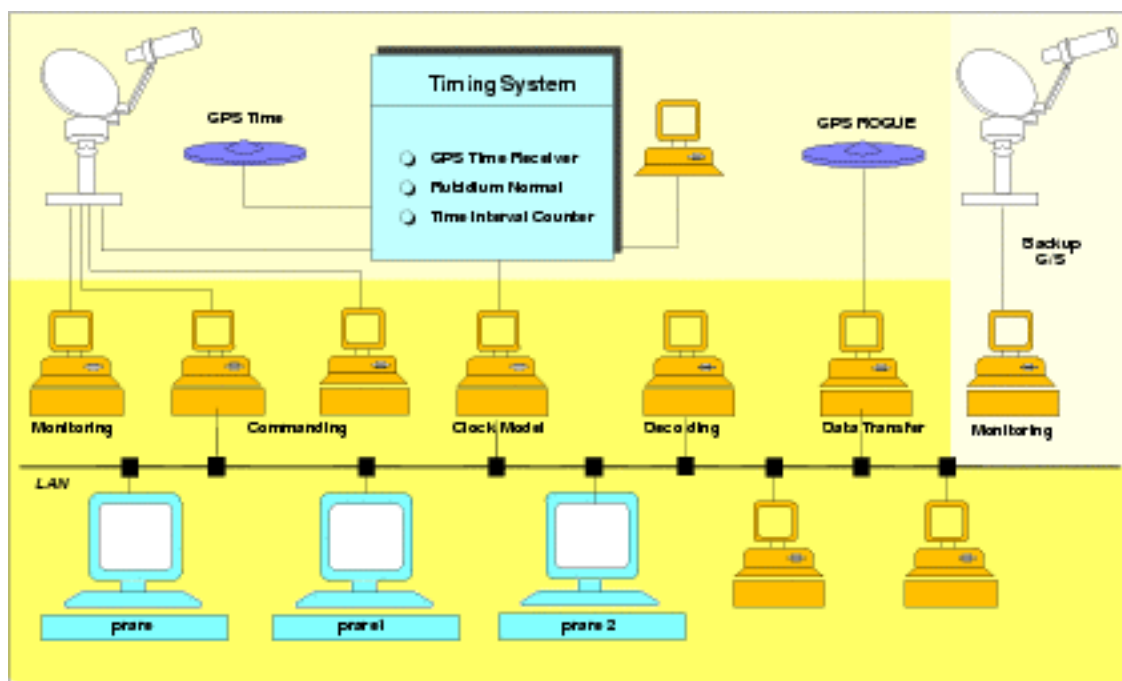


Abb. 7-2-1: Hardwareausstattung der PRARE-Masterstation

Das Zeitsystem der Masterstation (Abbildung 7-2-2) dient dazu, den PRARE-Bordoszillator gegenüber einer internationalen Referenzzeitskala (UTC) zu vermessen, um einerseits die genauen Messzeitpunkte der Range- und Dopplerdaten, andererseits den Frequenzoffset des Oszillators gegenüber seiner Nominalfrequenz zu erfassen. Die Realisierung des Zeitsystems begann 1988 in enger Kooperation mit dem Institut für Hochfrequenztechnik (NE-HF) der DLR.

Das Zeitsystem wurde Ende 1990 zusammengestellt, geliefert und installiert und ist seit 1991, also kurz vor Beginn der ERS-1-Mission, in kontinuierlichem Betrieb. Es besteht im wesentlichen aus folgenden Teilen:

- Modulares Zeitsystem der Fa. EFRATOM, Hofolding b. München:
 - zwei Rubidium-Oszillatoren (Typ MARK-L)
 - Synchronizer (Typ MDC-RR)
 - Verstärker
 - 1-PPS-Verteiler
 - Modularer VLF-Empfänger (DCF77) mit Uhr, Antenne und Anzeige

- Elektronischer Zeitintervallzähler zur Zeitdifferenzmessung der Fa. Stanford Research, USA, (Modell SR 620)
- programmgesteuerte Umschalteneinrichtung (Relaisbank)
- NAVSTAR GPS-Zeittransfersystem der Fa. Allen Osborne Associates, USA, (Modell TTR-6)
- Personal Computer mit spezifischem Steuerprogramm (entwickelt von TimeTech GmbH, Stuttgart)
- Notstromversorgung (UPS)

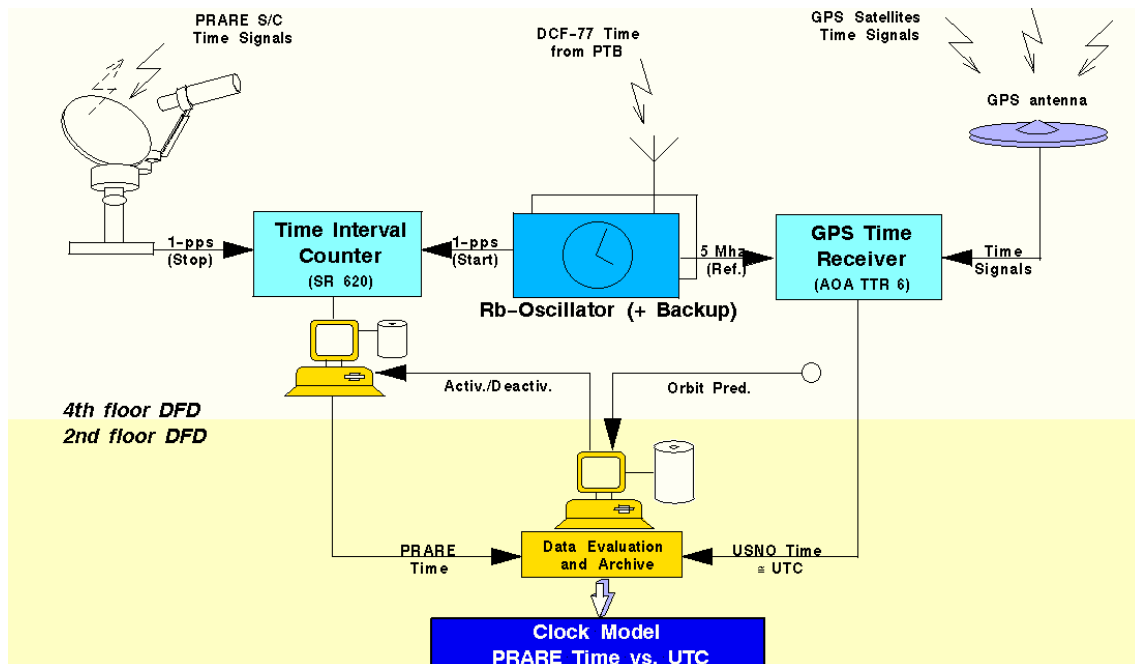


Abb. 7-2-2: Zeitsystem der PRARE-Masterstation

Die Echtzeitmessungen der benötigten Zeitdifferenzen zwischen GPS bzw. UTC (USNO), Rubidium und PRARE werden vom Steuerprogramm durchgeführt. Eine Relaisbank, die vom Steuerprogramm angesprochen wird, ermöglicht die Einstellung zahlreicher unterschiedlicher Konfigurationen des Messprozesses. Für die Zeit- und Frequenzüberwachung sind insbesondere die beiden folgenden Arten von Messungen relevant:

- PRARE-Borduhr gegen Rubidiumnormal: Diese Zeitdifferenz wird nur während der Überflüge des Satelliten über der Masterstation gemessen. Die Messungen werden durch Kommandos des PRARE-Steuerrechners gestartet und beendet, die jeweils aus PRARE-Bahnvorhersagen berechnet werden. Alle Messungen werden auf der Festplatte des PCs zwischengespeichert.
- Zeitdifferenzen UTC (USNO) gegen Rubidiumnormal: Diese können mit Hilfe des Steuerprogramms ähnlich wie unter a) gemessen und abgespeichert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Messung und Zwischenspeicherung dieser Zeitdifferenzen bietet die Standardauswertesoftware und Hardware des TTR-6-Empfängers.

Bereits im Verlauf der METEOR-3-7 Mission konnte die volle Funktionsfähigkeit des PRARE Zeitsystems belegt und die benötigten Datensätze generiert werden. So wurde u.a. festgestellt, dass die lineare Drift der Rubidium-Masteruhr lediglich etwa 50 bis 100 Nanosekunden / Tag beträgt, d.h. die Referenzuhr der PRARE-Masterstation eine Stabilität von etwa 1×10^{-12} aufweist. Der Koeffizient des quadratischen Driftterms ist sogar um etwa drei Größenordnungen kleiner. Auch die Überwachung des PRARE-Raumsegmentoszillators konnte sowohl für die METEOR-7- als auch ERS-2- Mission in vollem Umfang und mit der notwendigen Präzision gewährleistet werden (s. Kapitel 8).

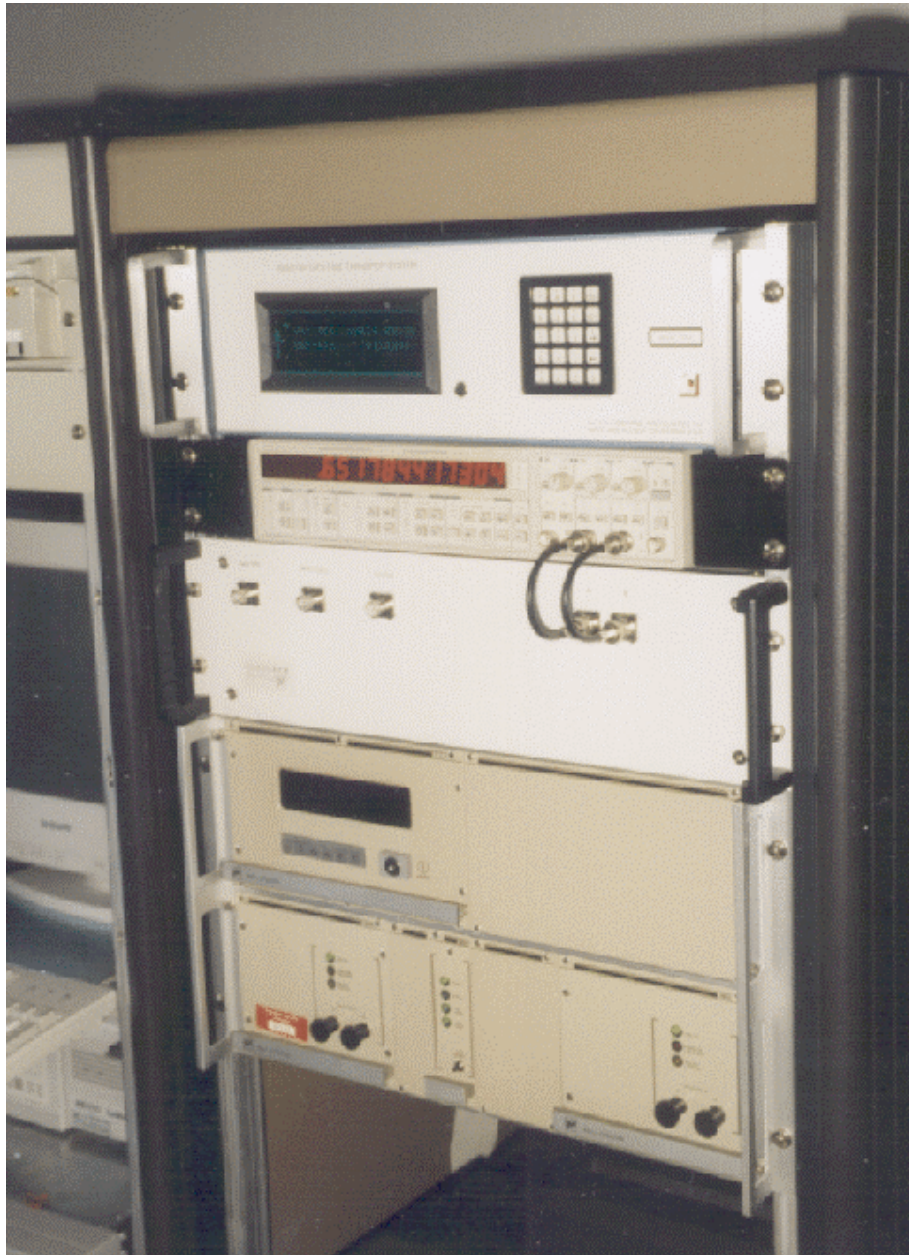


Abb. 7-2-3: Die wichtigsten Hardware Komponenten des PRARE Zeitsystems

7.3 Softwareentwicklung

Vorverarbeitungssoftware

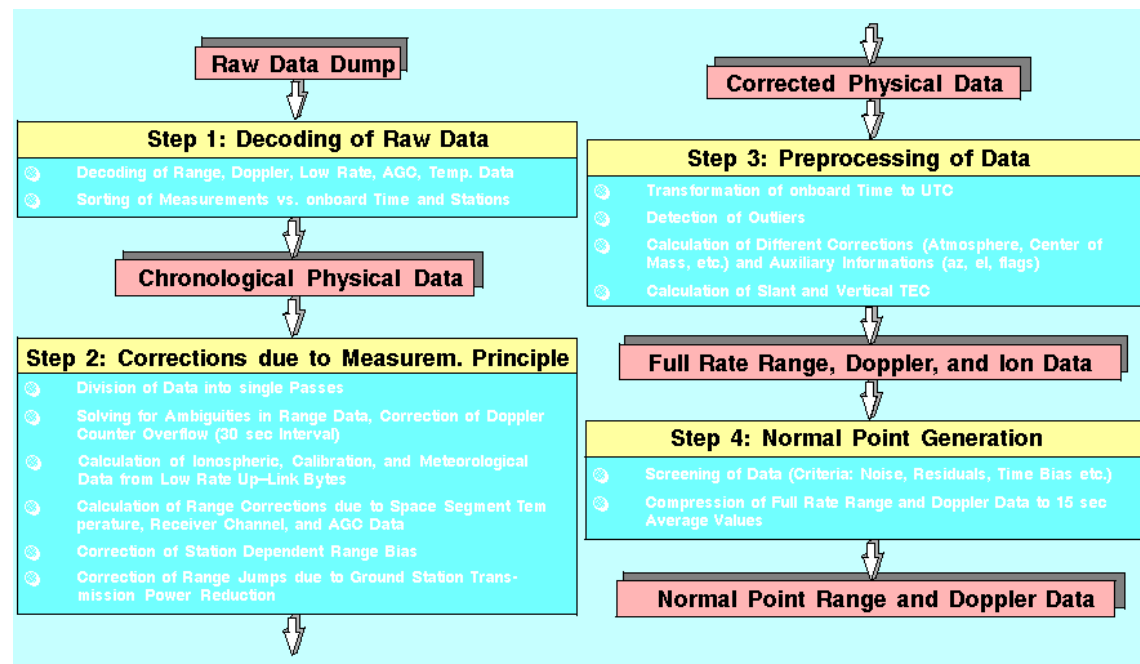


Abb. 7-3-1: Ablaufschema der PRARE Datenvorverarbeitung

Die gesamte Vorverarbeitungskette für PRARE-Rohdaten (Abb. 7-3-1), bestehend aus der Dekodierungssoftware, dem Programm zur Anbringung aller messtechnischen, geometrischen und atmosphärischen Korrekturen, sowie zur Verdichtung der sekundlichen Full-Rate-Daten in fünfzehnssekündliche Normalpunkte wurde kontinuierlich optimiert. Dies resultierte insbesondere in der Generierung zweier Prozessierungssoftware-Versionen, Revision 5 und Revision 6.

Revision 5

Die am Beginn der ERS-2-Mission aus den Erfahrungen der METEOR-3/7-Mission zur Verfügung stehende Revision 4 Auswertesoftware wurde hinsichtlich folgender Punkte weiter verbessert:

- Die Dekodierungssoftware wurde so modifiziert, dass Rohdatendumps variabel mit Datenraten von 2, 4 oder 10 Kb/s verarbeitet werden können
- Die Kalibrierung der Raumsegmenthardware über Testtranspondermessungen im Anschluss an die Passagen wurde durch über die Missionszeit aktualisierte, temperaturabhängige Polynomkoeffizienten ersetzt.
- Nutzung der Ergebnisse der für jede PRARE Bodenstation durchgeführten Mehrkanaltests (das von der Bodenstation zurückgesendete Signal wurde auf allen 4 möglichen Kanälen parallel aufgezeichnet und so ein vom Bodenstationskanal abhängiger Korrekturwert gewonnen)

- Die Rangesprünge bei Leistungsreduktion der Bodenstation werden korrigiert
- Einbau einer relativen Ionosphärenkalibrierung von Nortel / DASA
- An Stelle der Einweg-Laufzeitdifferenzmessungen der Bodenstationen werden Zweiweg-DRVID-Messungen (Differenced Range Versus Integrated Doppler) des Bordsegmentes zur Berechnung des Gesamtelektroneninhalts TEC, zur ionosphärischen Korrektur der Entfernungs- und Dopplerbeobachtungen und zum Aufdecken von Mehrwegeeffekten am ERS-2-Solarzellenausleger verwendet
- Im Falle des Fehlens oder der Fehlfunktion einer PRARE-Meteorologiestation werden Druck, Temperatur und Feuchte statt durch Standardmetrologiewerte jetzt durch Monatsmittel von ECMWF ersetzt
- Überarbeitung des Programmpakets zur Verdichtung der Entfernungs- und Dopplerdaten zu Normalpunkten.

Diese Version wird den PRARE Nutzern seit Kalenderwoche 51, 1996 über den FTP-Server des GFZ/DC zur Verfügung gestellt.

Revision 6

Die zuvor beschriebene Revision 5 wurde in 1998 kontinuierlich weiterverbessert:

- Einbau von weiteren Interfaces für die Verwendung evtl. von Nutzern bereitgestellter externer meteorologischer Daten (Druck, Temperatur und Feuchte) zum Ersatz der in Revision 5 genutzten groben ECMWF-Daten
- Verbesserung der S/W zur Berechnung der DRVID-Werte
- Nutzung der Ergebnisse der wiederholten Ionosphärenkalibrierung (s.u.)
- Verbesserung des Datenscreenings (u.a. Ausschluss von Beobachtungsperioden mit nachgewiesenen Hardware- oder Performance-Problemen)

Zeitsystem

Die Ergebnisse des Vergleichs der PRARE-Borduhr mit der GPS-Zeitskala UTC / USNO wurden so angepasst, dass die mittlere Abweichung zwischen aus Laser und PRARE gerechneten Zeitbiasen für die gesamte ERS-2-Mission Null beträgt (nur Revision 6).

Bodenstationssteuersoftware

Die Software für den Betrieb des Bodenstationsprozessors und des M+T Computers (Monitor und Test) wurde mehrfach weiterentwickelt. Seit KW 38 in 1996 stand eine neue S/W (V7.8) für den Bodenstationsprozessor zur Verfügung. Damit werden eventuelle Fehler der Bodenstation bereits während der Vorverarbeitung an der Masterstation erkannt (im Rahmen der Rapid-Produkte bereits nach wenigen Stunden), die Bahnephemeriden korrekt aufdatiert und die Setup-Parameter protokolliert.

Der PN-Code und die Leistungsreduktion (6 dB Reduktion für europäische Stationen) der Bodenstationen werden seit Ende 1996 über die Monitor- und Systemkommandostation in Stuttgart kommandiert. Die entsprechenden Anzeigen und Protokollfunktionen des M&T-Computers wurden angepasst.

Weitere Änderungen an der Software für den M+T Computer wurden u.a. durch den Jahrtausendwechsel notwendig. Die letzte Aktualisierung (Version 4.44) enthält eine Routine, die das Übernehmen einer falschen, vom Raumsegment nach einer Wiedereinschaltung gesendeten Zeit (Aufwärmphase des Bordoszillators), durch die Bodenstationen verhindern soll. Das Übernehmen einer falschen Systemzeit hatte teilweise zu längeren Ausfallzeiten an einzelnen Bodenstationen geführt.

Bodenstationsanalysesoftware

Durch die lange Betriebsdauer des PRARE Systems kam es immer häufiger zu hardwarebedingten Problemen und Ausfällen an den Bodenstationen. Zur möglichst schnellen und sicheren Unterstützung bei der Fehlerbehebung wurde eine spezielle Software entwickelt und an der Masterstation eingesetzt. Die Software verwendet die an den Bodenstationen vom M+T Computer aufgezeichneten Protokoll-Dateien in denen Housekeeping-Daten wie z.B. Modultemperaturen, VCO-Abstimmspannungen und Empfangsfeldstärken gespeichert werden. Durch die so ermöglichten Analysen konnten Reparaturversuche vor Ort und am GFZ, unabhängig vom Support durch den Hersteller der Bodenstationen, beschleunigt und verbessert werden.

Ionosphärenkalibrierung

Es wurde Software entwickelt, um die absolute Ionosphärenkalibrierung der PRARE Code- und DRVID-TEC-Daten im Vergleich zur Internationalen Referenz Ionosphäre IRI95 und den aus GPS-Beobachtungen abgeleiteten Global Ionospheric Maps (GIM) bestimmen zu können. Mittels 3.5 Jahren ERS-2-PRARE-Daten zwischen Mai 95 und Dezember 98 wurden für alle Bodenstationen Biase und deren evtl. vorhandene Drift bestimmt. PRARE-TEC-Daten stimmen als Ergebnis dieser Kalibrierung auf wenige TECU mit externen Daten wie dem Zwei-Frequenz-Altimeter von TOPEX/POSEIDON überein [Flechtner et al. 1998].

Tägliche Prozessierung

Es wurden sämtliche Schnittstellen zur Automatisierung der täglichen Auswertung der PRARE-Daten überarbeitet und optimiert. Als Ergebnis standen PRARE-Normalpunkte zur Nutzung innerhalb der D-PAF-Rapid-Orbits [Enninghorst und Rentsch, 1997] sowie der Zustand des globalen Netzes mit nur wenigen Stunden Verzögerung nach der Messung zur Verfügung.

PRARE-Ionosphärenmodell entlang der ERS-2-Bodenspur

Aus den kalibrierten PRARE-TEC-Beobachtungen wurde zur ionosphärischen Korrektur des Einfrequenz-Altimeters ein Kombinations-Ionosphärenmodell entlang der ERS-2-Bodenspur gebildet, das sich aus IRI95-Modellwerten und PRARE-TEC-Beobachtungen zusammensetzt. Da selbst zur Zeit der besten globalen PRARE Stationsverteilung Mitte 1997 (siehe 7-4-3) lediglich ca. 15% der Ozeane mit PRARE-Daten bedeckt waren, stützt sich das entwickelte Modell weiter auf IRI95. Eine Verwendung innerhalb der Kreuzungspunkt-Analyse brachte daher nur geringfügige Verbesserungen von max. 4 % in den mittleren Kreuzungspunktdifferenzen. Auf die Generierung eines neuen PRARE-Produktes wurde daher verzichtet.

7.4 Koordinierung und Aufbau des Trackingnetzes

Das DGFI hat 1989 im Rahmen des BMFT-Fördervorhabens "ERS-1-Hochpräzisionsbahnen für die Meeresforschung" (FKZ 03F0541A) sieben PRARE-Bodenstationen beschafft, die nach Wechsel des Projektleiters Prof. Dr. Ing. Dr. Ing. E.h. Ch. Reigber zum GFZ dort inventarisiert wurden. Ein Abschlußbericht wurde 1993 erstellt [Reigber et al. 1993].

Zu Beginn der PRARE/ERS-2 Missionen haben sich 13 Institute durch den Besitz einer oder mehrerer Bodenstationen (GFZ, TimeTech, DLR/LAPAN, ASI, AWI, DGFI, CSR, DUT, IFAG/PKG, NIPR, POL, SK, UC) am Aufbau des PRARE-Trackingnetzes beteiligt.

Weitere Organisationen konnten nach Verhandlungen überzeugt werden, Bodenstationen der obengenannten Institute zu betreuen, um dadurch eine gute Verteilung des Trackingnetzes zu ermöglichen.

Zusätzlich waren beim Bodenstationshersteller Dornier bzw. bei Nortel Dasa, Friedrichshafen, Stationen für Reparatur-, Test- bzw. Validierungszwecke (einige Tage bis Monate) abwechselnd im Betrieb. Hierzu sind vom GFZ nach Auswertung der Daten jeweils Testberichte (Biase, Noise, Lockverhalten etc.) erstellt worden.

Hauptgesichtspunkte bei der Standortauswahl waren:

- wissenschaftliches Interesse und geeignetes technisches Personal seitens der Gastinstitution
- gute logistische Verhältnisse, die die Einrichtung der PRARE-Bodenstation sowie evtl. erforderliche Kontroll- und Reparatursätze mit vertretbarem, zeitlichen und finanziellen Aufwand ermöglichen; Insbesondere sollte sich der Standort der Station auf einem bewachten Gelände befinden.
- gute Sichtbarkeitsbedingungen (möglichst 10 Grad Mindestelevation)
- zuverlässige Infrastruktur im Hinblick auf einen mehrjährigen operationellen und weitgehend automatischen Betrieb der PRARE-Bodenstation.

Zur Stationsvorbereitung gehörten in jedem Einzelfall die folgenden Punkte:

- Abschluss von Vereinbarungen über den Betrieb der Bodenstationen (kooperierende Einrichtung zwischen GFZ und Instituten),
- Vorbereitung von Ausfuhrgenehmigungen für die PRARE-Bodenstationen und
- Bereitstellung technischer Unterlagen für die infrastrukturelle Vorbereitung des PRARE-Standes (u.a. Pfeilerbauten, Stromversorgung, Unterbringung bzw. Anschluss Stationsprozessor, Monitor- und Testcomputer, Meteorologiestation) sowie zum Aufbau und Betrieb der Station durch die Gastgeberinstitute.

Die 29 Bodenstationen kamen an 32 Standorten zum Einsatz (siehe Tabelle 7-4-1 und Abb.7-4-1 sowie Abb. 7-4-2).

COSPAR-Nr	Standort	Betreiber
7700	Stuttgart	TimeTech
7701	Potsdam	GFZ
7702	Tromsøe	TSS
7703	Wettzell-0	BKG
7704	Matera-0	ASI
7705	Honefos	SK
7706	Narsarsuaq	UC
7707	Hofn	SK
7708	Fairbanks	GCGO
7709	Tahiti-0	UFP
7710	O'Higgins	BKG
7711	Syowa	NIPR
7713	Tahiti-1	UFP
7714	Hartebeesthoek	CSIR
7715	La Plata	AOLP
7716	Maracaibo	LUZM
7717	Ascension	CW
7718	Bogor	LAPAN
7720	Ulaan Baatar	AGRC
7721	Kitab	AOK
7722	Greenbelt-0	GSFZ
7723	Weilheim	DLR
7724	Kokee Park	KPGO
7725	Bangalore	ISRO
7727	München	Kayser-Threde
7728	Ny Alesund	SK
7729	Friedrichshafen-0	ND-Satcom (ex Dornier)
7730	Potsdam-0	GFZ
7734	Shanghai	SAOB
7735	Herstmonceux	POL
7736	Oberpfaffenhofen-1	GFZ
7737	Potsdam-3	GFZ
7738	Friedrichshafen-7	ND-Satcom (ex Dornier)
7739	Friedrichshafen-8	ND-Satcom (ex Dornier)
7740	Potsdam-1	GFZ
7741	Potsdam-2	GFZ
7743	Wettzell-1	BKG
7744 ... 7749	Friedrichshafen-1 ... -6	ND-Satcom (ex Dornier)
7754	Neumayer	AWI
7755	Greenbelt-1	GSFZ
7756	Matera-1	ASI
7758	Pasadena	JPL
7760	Noumea	ORSTOM
7761	Conception	BKG

Tabelle 7-4-1: Einsatzstandorte der Bodenstationen, geordnet nach COSPAR Nummern

Bis Anfang 1998 konnte das Bodenstationsnetz auf bis zu 18 gleichzeitig aktive Stationen, mit über 600 empfangenen Passagen pro Woche ausgebaut werden. Durch technische Probleme und Fehlbedienung bei der Installation oder Wartung kam es im weiteren Verlauf zum Ausfall mehrerer Stationen. Durch die abnehmende Projektfinanzierung und reduzierten Support durch den Hersteller konnten Reparaturen nur verzögert oder gar nicht durchgeführt werden, so dass am Ende des Berichtszeitraums nur noch etwa 6 Stationen in Betrieb waren (Abb. 7-4-1 und 7-4-2)

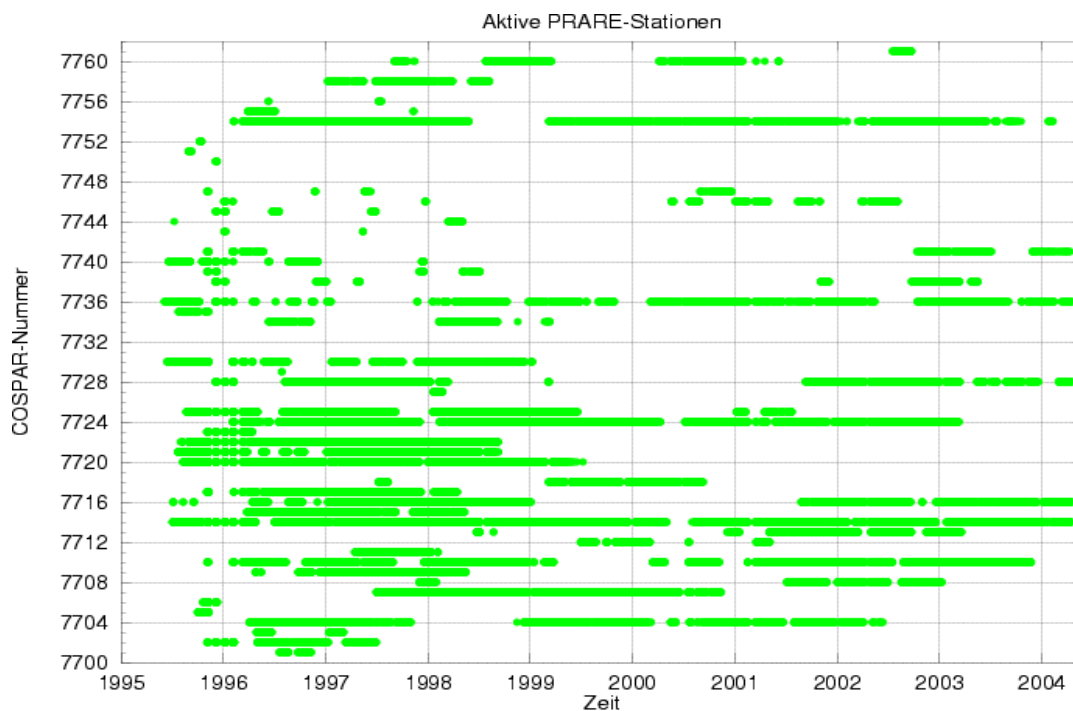


Abb. 7-4-1: Aktive Stationen, geordnet nach COSPAR Nummern

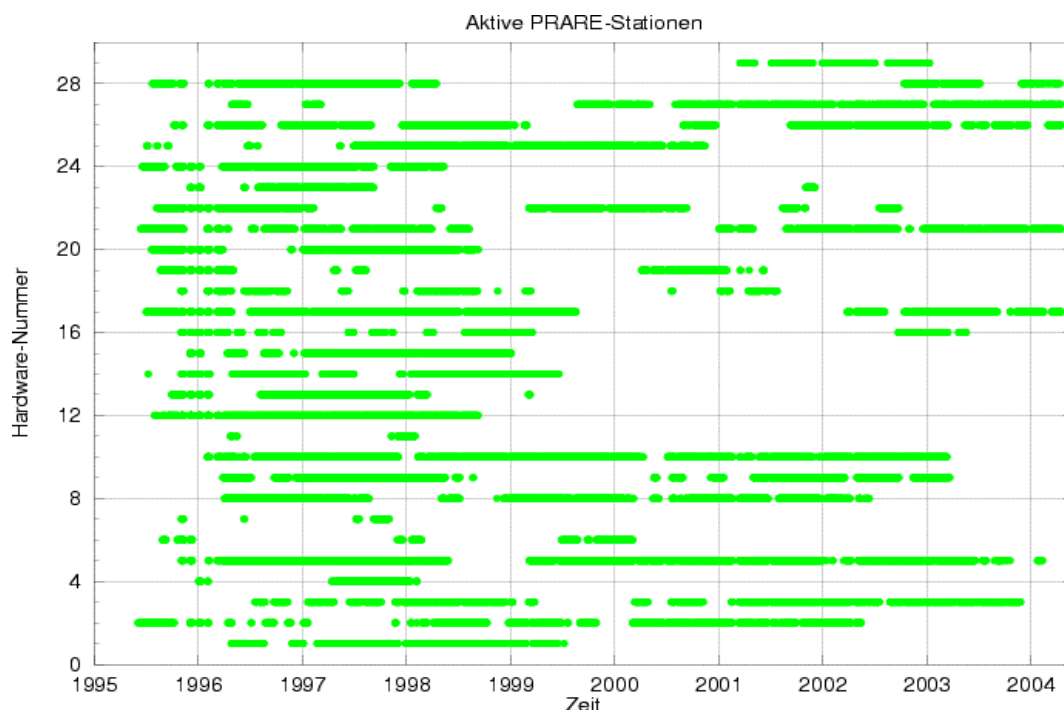


Abb. 7-4-2: Aktive Stationen, geordnet nach Hardware Nummern

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die globale Verteilung der Bodenstationen mit ERS-2 Bodenspuren in den Jahren 1995, 1997, 2001, 2003.

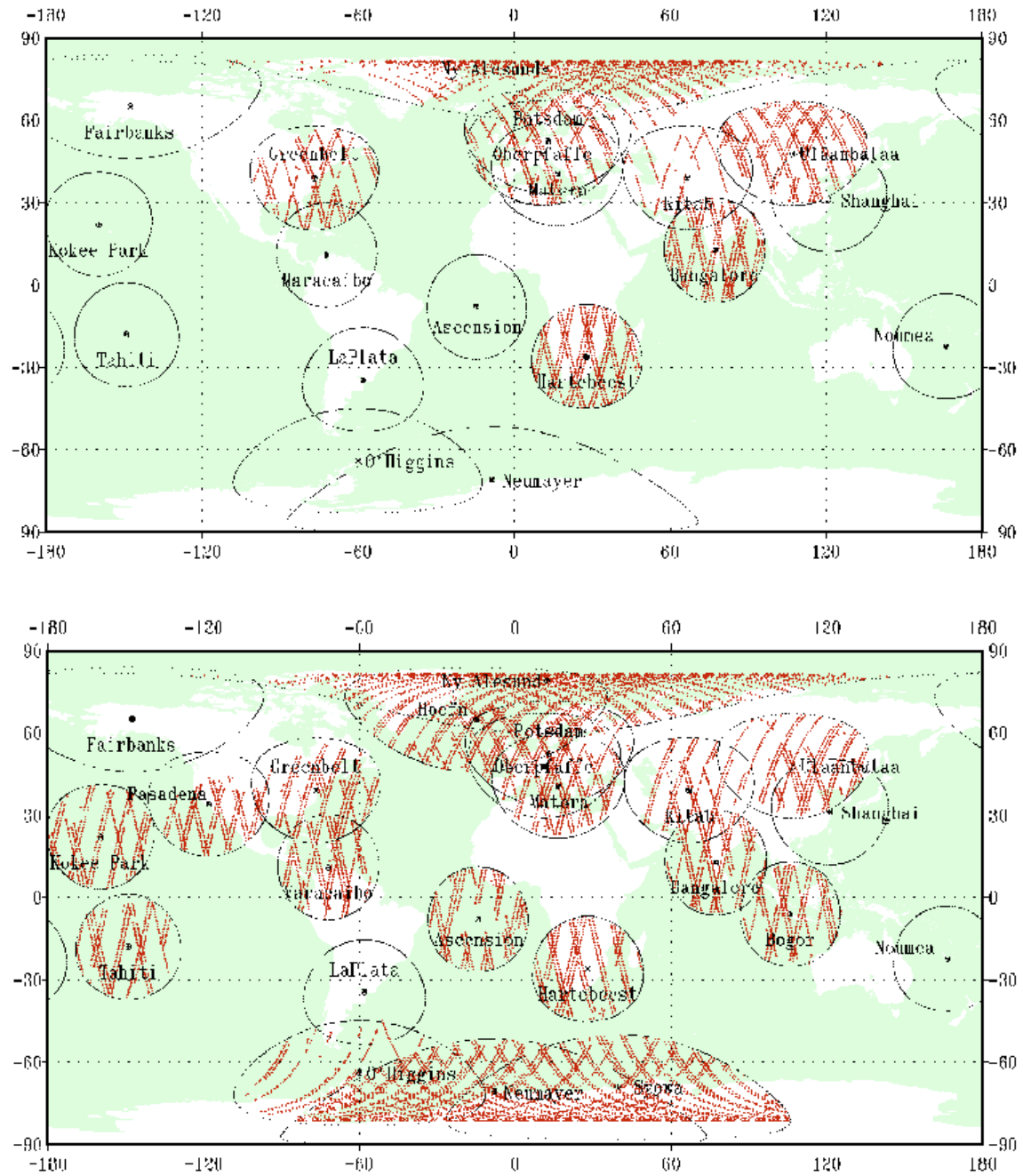


Abb. 7-4-3: globale Verteilung der PRARE Bodenstationen in den Jahren 1995 und 1997

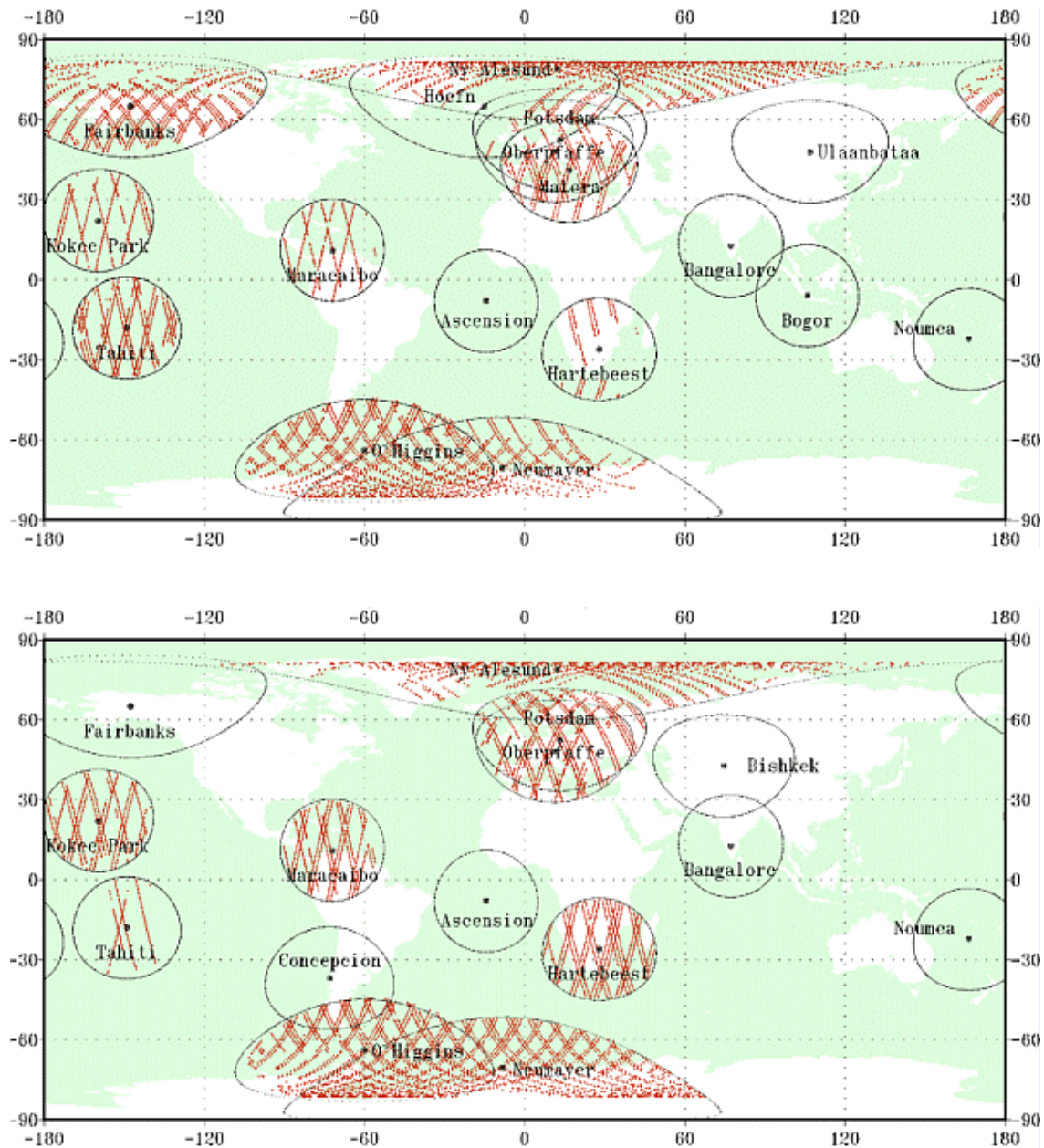


Abb. 7-4-4: globale Verteilung der PRARE Bodenstationen in den Jahren 2001 und 2003

Ein Ende 1997 begonnenes Projekt zur Aufstellung einer PRARE Bodenstation am Hochrisikovulkan Merapi (Indonesien) ab ca. Mitte 1998 zur Aufdeckung und Überwachung von Deformationen (Förderung durch das Internationale Büro der DLR) musste beendet werden, da die Stromversorgung durch einen Windgenerator oder Solarzellen nicht sichergestellt werden konnte.

Zur Koordinierung der weltweiten Nutzergemeinschaft wurden regelmäßig Wochenberichte erstellt und an die Nutzer verschickt. Das PRARE System und wichtige Ergebnisse sind in den Web-Seiten des GFZ beschrieben:

- <http://op.gfz-potsdam.de/prare> oder
- http://www.gfz-potsdam.de/pb1/welcome_en.html (Link PRARE)

Außerdem wurden Workshops durchgeführt, in denen der jeweilige Entwicklungszustand des Systems dargestellt und die Planungen der einzelnen Nutzergruppen diskutiert und koordiniert wurden:

- 2nd International PRARE User Workshop, Potsdam, 29./30.01.1996
- PRARE Session: EGS XXII General Assembly, Vienna, Austria, April 21-25, 1997
- 1st PRARE Splinter Meeting: 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, U.K., July 17, 1996
- 2nd PRARE Splinter Meeting, GFZ Potsdam, Potsdam, 29.9.1998

8. Anwendungsergebnisse

8.1 Nachweis der projizierten Leistungsfähigkeit

Nach Einschalten von PRARE auf ERS-2 konnten seit Anfang Mai 1995 die im Orbit gewonnenen Daten des PRARE-Messsystems empfangen, weitergeleitet, verarbeitet und validiert werden.

Das Modul-A im PRARE Bordsegment hat 5 Jahre lang zuverlässig gearbeitet, wurde dann aber nach einer Störung (unerlaubt hohe Stromaufnahme) am 17. Mai 2000 abgeschaltet. Anschliessende Analysen der Satelliten- und PRARE-Telemetrie brachten keinen Aufschluss über die Ursache des Problems oder Hinweise zu dessen Behebung und so wurde am 29. Mai 2000 auf das Modul-B umgeschaltet.

Nach der Umschaltung wurden umfangreiche Arbeiten zur Neukalibrierung des Systems notwendig. Diese Arbeiten betrafen nicht nur die Bestimmung von Parametern des Raumsegments, sondern auch z.B. die Wiederholung der Mehrkanaltests mit allen Bodenstationen. Nach der Reprozessierung der zwischenzeitlich im operationellen Betrieb gesammelten Daten wurde mit dem Modul-B die gleiche Genauigkeit wie für das Modul-A erreicht.

Neben dem durch die Umschaltung der Module im Raumsegment bedingten Ausfall des Systems, kam es noch zu weiteren Unterbrechungen des Messbetriebs, vornehmlich verursacht durch automatische Abschaltungen der gesamten ERS-2 Payload aufgrund von Plattform Anomalien. Die Abbildung 8-1-1 zeigt eine Statistik der vom PRARE-System getrackten ERS-2 Passagen pro Woche im Vergleich mit dem durch das weltweite Netz an Laserstationen getrackten ERS-2 Passagen pro Woche, sowie die durch PRARE (blau) und den Satelliten selbst (orange) verursachten Ausfallzeiten.

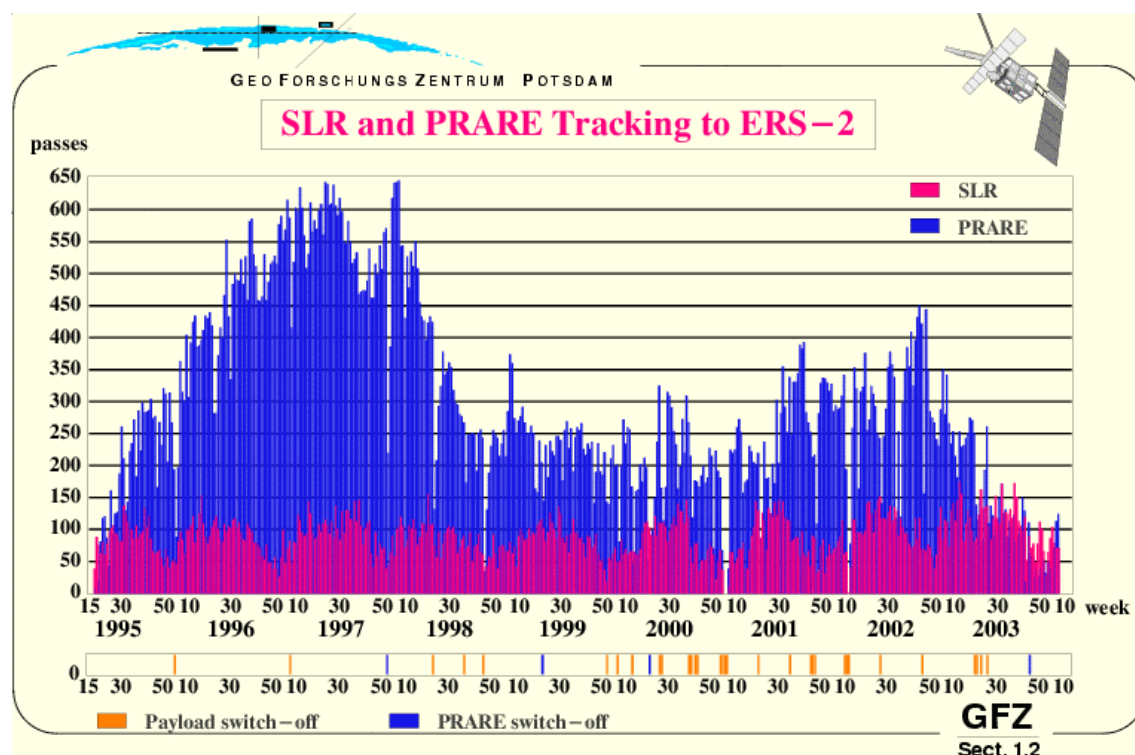


Abb. 8-1-1: Anzahl der von PRARE Stationen und Laserstationen getrackten ERS-2 Passagen

Die Zahl der durch Laser getrackten Passagen lässt die Abhängigkeit dieses Systems von saisonal bedingten Wetterbedingungen erkennen. Der Verlauf für das PRARE System wird nach der Ausbauphase insbesondere durch Ausfälle von Bodenstationen (Alterung der Hardware), zusammenhängend mit dem nachlassenden Support durch den Hersteller (Dornier / ND-Satcom) und eigenen Initiativen (Analysesoftware, Reparaturen am GFZ) bestimmt. Bis zum Ende des Förderzeitraums wurde die Primäraufgabe (Haupttrackingsystem für ERS-2) des hier beschriebenen Vorhabens kontinuierlich erfüllt.

In den ersten Wochen der PRARE/ERS-2-Mission wurde mit wenigen, vor allem mit den in Deutschland befindlichen Stationen gearbeitet, also mit etwa drei bis fünf Stationen. Dies diente zum einen der Verifizierung aller Funktionen der Stationen, die durch ihre Installation am Kontrollsegment leicht zugänglich und somit leicht anzupassen waren, sowie der Etablierung des operationellen Datenflusses zwischen den Messstationen bzw. Betreiberinstitutionen wie auch zwischen den Stationen des Kontrollsegmentes, insbesondere Stuttgart und Oberpfaffenhofen.

Deutlich ist auch die im Verlauf der Mission, insbesondere Mitte 1997 und Anfang 1998 zunehmende Anzahl der operationellen Stationen erkennbar, die durch verschiedene Stationsaufbauten in außereuropäischen Ländern bewirkt wurde. Etwa Anfang 1998 nimmt die Anzahl der PRARE/ERS-2-Stationen wieder ab, da mehrere Stationen ab diesem Zeitpunkt wegen technischer Fehler ausfielen (s. Kapitel 7).

Im Rahmen der Systemvalidierung wurde darüber hinaus das korrekte Auslesen der gesammelten Daten aus dem Raumsegment-Messspeicher sowie deren korrekter Empfang und Dekodierung an der Masterstation Oberpfaffenhofen verifiziert.

Die Qualitätsprüfung der empfangenen PRARE-Daten, also die Bestimmung ihres Rauschens bezüglich eines nominalen Referenzwertes, begann ebenfalls mit dem Start von ERS-2 und Empfang der ersten Messdaten, wobei die Schwerpunkte zu Beginn der Mission eher auf Seiten des eindeutigen Nachweises der projizierten Messgenauigkeit des Gesamtsystems lagen, gegen Ende hingegen eher auf Seiten der Etablierung eines kontinuierlichen und operationellen Prozessierungsablaufes. Dies geschah insbesondere im Hinblick auf das ständig anwachsende Stationsnetz, das immer mehr Daten lieferte, wobei Stationen, die in höheren Breiten aufgestellt wurden, aufgrund ihrer günstigeren Sichtverhältnisse zu dem hoch inklinierten Satelliten ERS-2 relativ viele Daten lieferten.

In jedem Fall wurde auf eine gleichbleibend hohe, von zeitlichen und örtlichen Gegebenheiten weitgehend unabhängige Datenqualität geachtet. Auf diese Weise konnte die gewünschte systematische Messgenauigkeit des PRARE-Systems in eindeutiger Weise verifiziert werden. Das Rauschen der PRARE/ERS-2-Zweiweg-Rangedaten liegt kontinuierlich bei etwa 2 bis 3 cm, das Rauschen der Zweiweg-Dopplerdaten bei etwa 0,1 bis 0,15 mm/s Gesamtunsicherheit, wobei Stationen in Polnähe aufgrund von Mehrwegeeffekten ein etwas höheres Range-Rauschen zeigen, (vgl. Abbildung 8-1-2a und 8-1-3a). Umgekehrt weisen Stationen in Äquatornähe wegen stärkerer Ionosphäreneinflüsse ein höheres Doppler-Rauschen auf (vgl. Abbildung 8-1-2b und 8-1-3b). Diese Ergebnisse wurden mit verschiedenen, jeweils verbesserten Versionen der Messdaten-Vorverarbeitungssoftware erzielt, wobei bis zum Ende des Berichtszeitraums operationell Revision 5 eingesetzt wurde (siehe Kapitel 7.3).

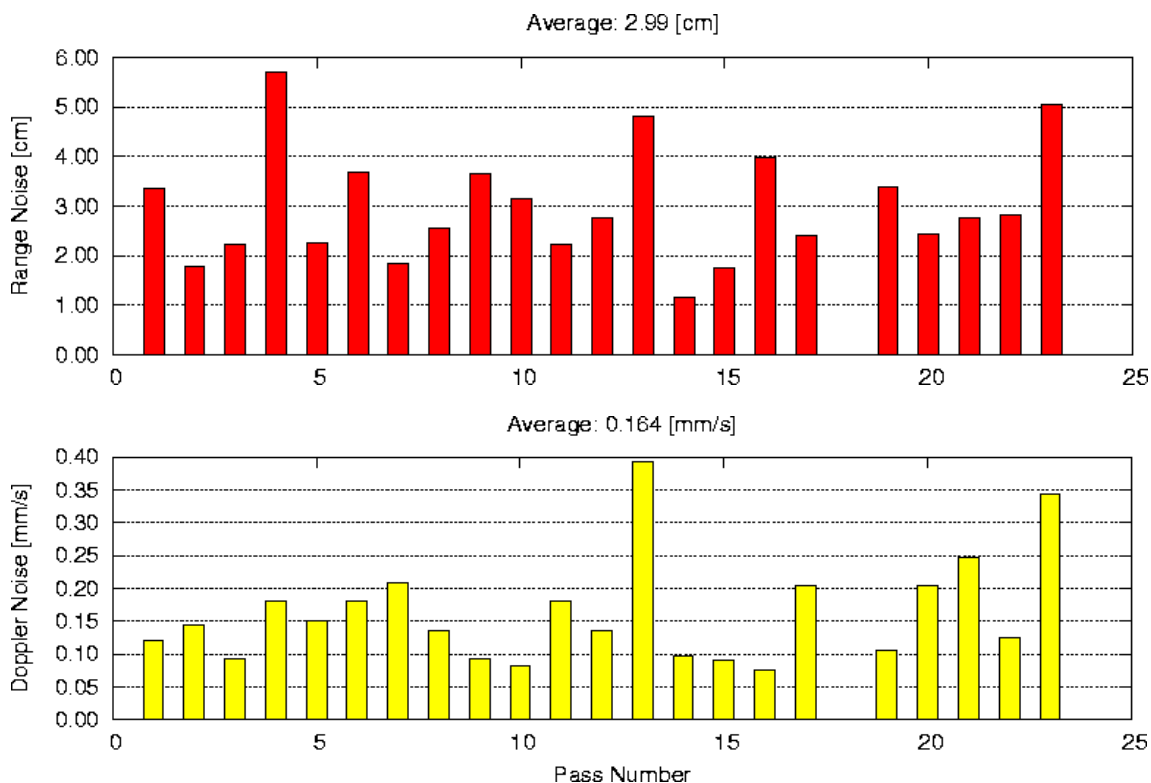


Abb. 8-1-2: Typischer Noise der Range- (oben) und Dopplermessungen (unten) pro Passage, Station Maracaibo (äquatornah), Kalenderwoche 06 in 2004

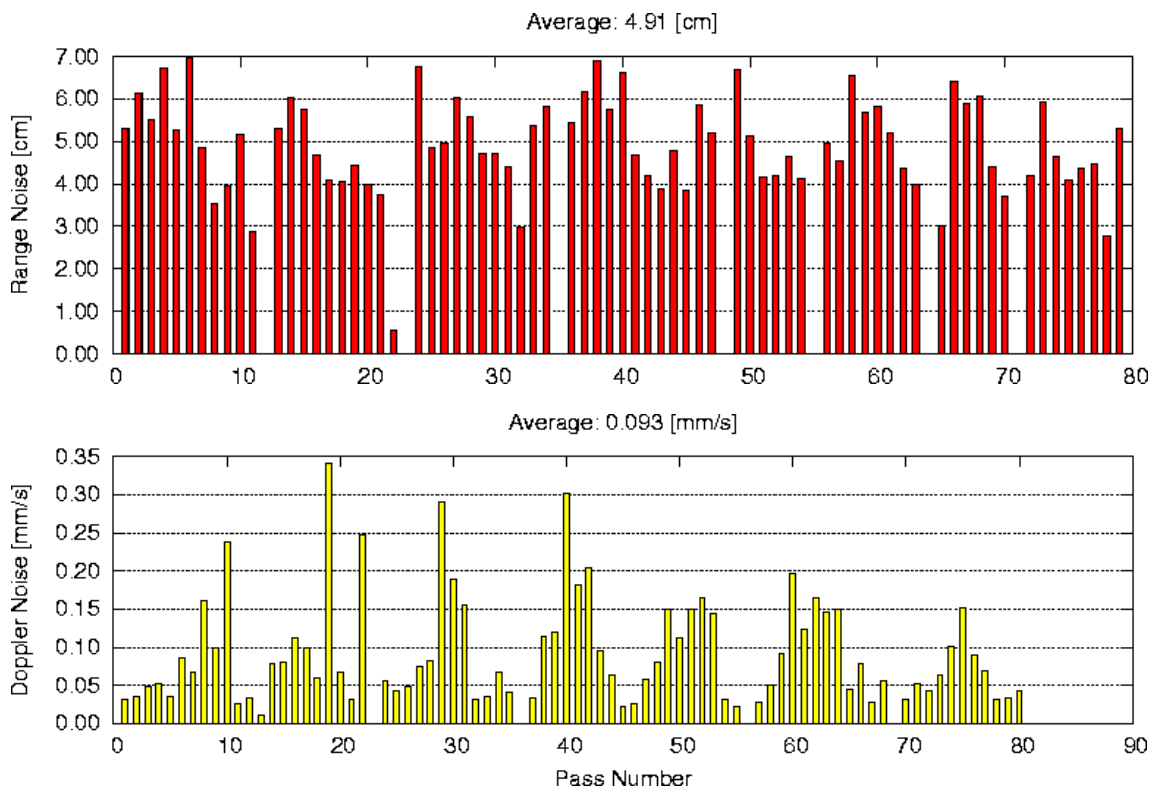


Abb. 8-1-3: Typischer Noise der Range- (oben) und Dopplermessungen (unten) pro Passage, Station Ny Alesund (polnah) Kalenderwoche 06 in 2004

8.2 Bahnvorhersage

Zur Steuerung der PRARE-Bodenstationsantennen sind Satellitenbahnvorhersagen mit ca. 0.5 Grad Genauigkeit (~6,7 km in 770 km Flughöhe) erforderlich. Diese werden über das Raumsegment an die weltweit verteilten PRARE-Stationen bei jedem Überflug übermittelt.

Da im Rahmen der GFZ-Arbeiten bei der deutschen Prozessierungs- und Archivierungseinrichtung für ERS (D-PAF) in Oberpfaffenhofen aus Satellitenlasermessungen Bahnvorhersagen hoher Güte (< 70 m in Flugrichtung in 770 km Flughöhe) für das internationale Laserstationsnetz berechnet und verteilt werden, kann auf entsprechende Zwischenprodukte zurückgegriffen werden. Die im Minutenabstand prädierten kartesischen Bahnephemeriden werden dazu in sogenannte PRARE-Bahnelemente umgesetzt. Diese bestehen pro nicht-singulärem Bahnelement (a , $e \cos v$, $e \sin v$, i , Ω , $\omega + v$) aus den signifikanten Koeffizienten harmonischer Funktionen eines Vielfachen der Umlauffrequenz und erlauben eine komprimierte Weitergabe der genauen Bahnvorhersagen. Die erzeugten Elemente werden von der PRARE-Masterstation an die Kommandierungseinrichtung in Stuttgart übertragen, die den Transfer ins Raumsegment durchführt.

Die Erzeugung der PRARE-Bahnelemente erfolgt seit ERS-2 Missionsbeginn im April 1995 auf wöchentlicher Basis. Abbildung 8-2-1 veranschaulicht die Güte der PRARE-Along-Track Bahnvorhersage in Flugrichtung, welche am unsichersten bestimmt ist (1 ms = 7 m).

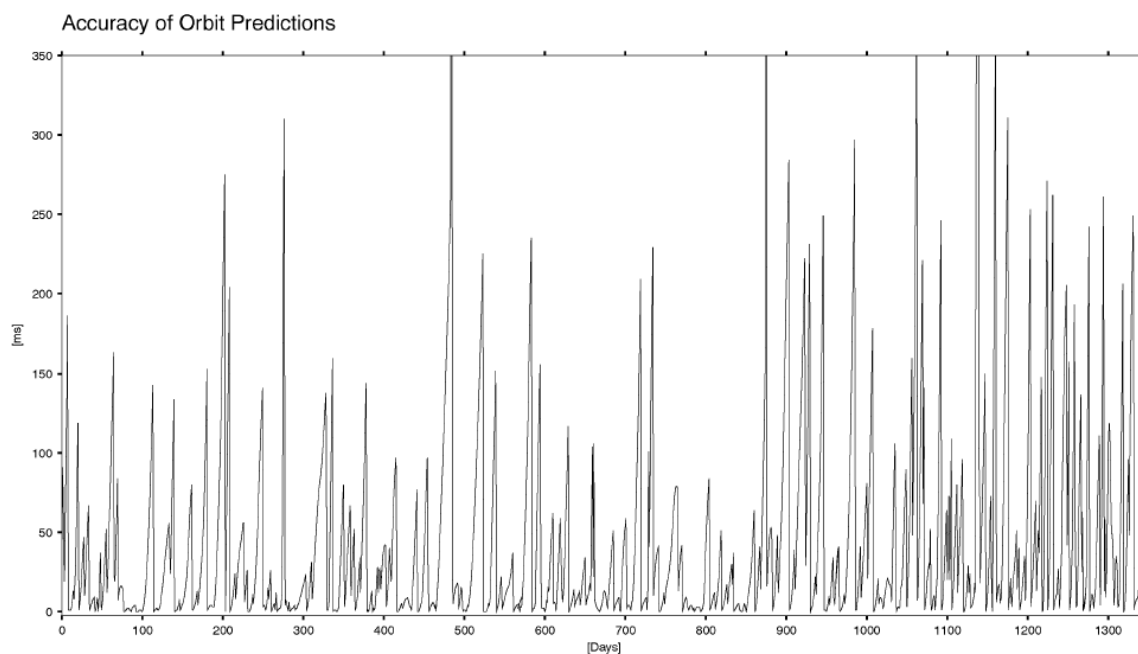


Abb. 8-2-1: Güte der PRARE Elemente in Flugrichtung (Zeitraum 24.04. 1995 bis 31.12. 1998)

8.3 Externe Kalibrierung

Zur exakten Kalibrierung des PRARE-Systems, d.h. zur Bestimmung eventueller externer, sog. systematischer Messfehler, ist ein Vergleich zwischen den PRARE-Daten und Daten eines unabhängigen, alternativen Satellitenmesssystems durchzuführen. Bedingung für die Generierung gültiger Messungen ist es, dass die Daten simultan und von Stationen erzeugt werden, die nicht zu weit voneinander entfernt sind (Abbildung 8-3-1), so dass ihr relativer Abstand mit hoher Zuverlässigkeit bestimmbar ist. Für diesen Zweck bieten sich insbesondere die bereits erwähnten optischen Entfernungsmessungen hochpräziser Lasersysteme der 3. Generation an, wie sie in Potsdam und Greenbelt existieren. Dagegen war in Matera nur ein Vergleich mit einem Lasersystem der 2. Generation möglich.

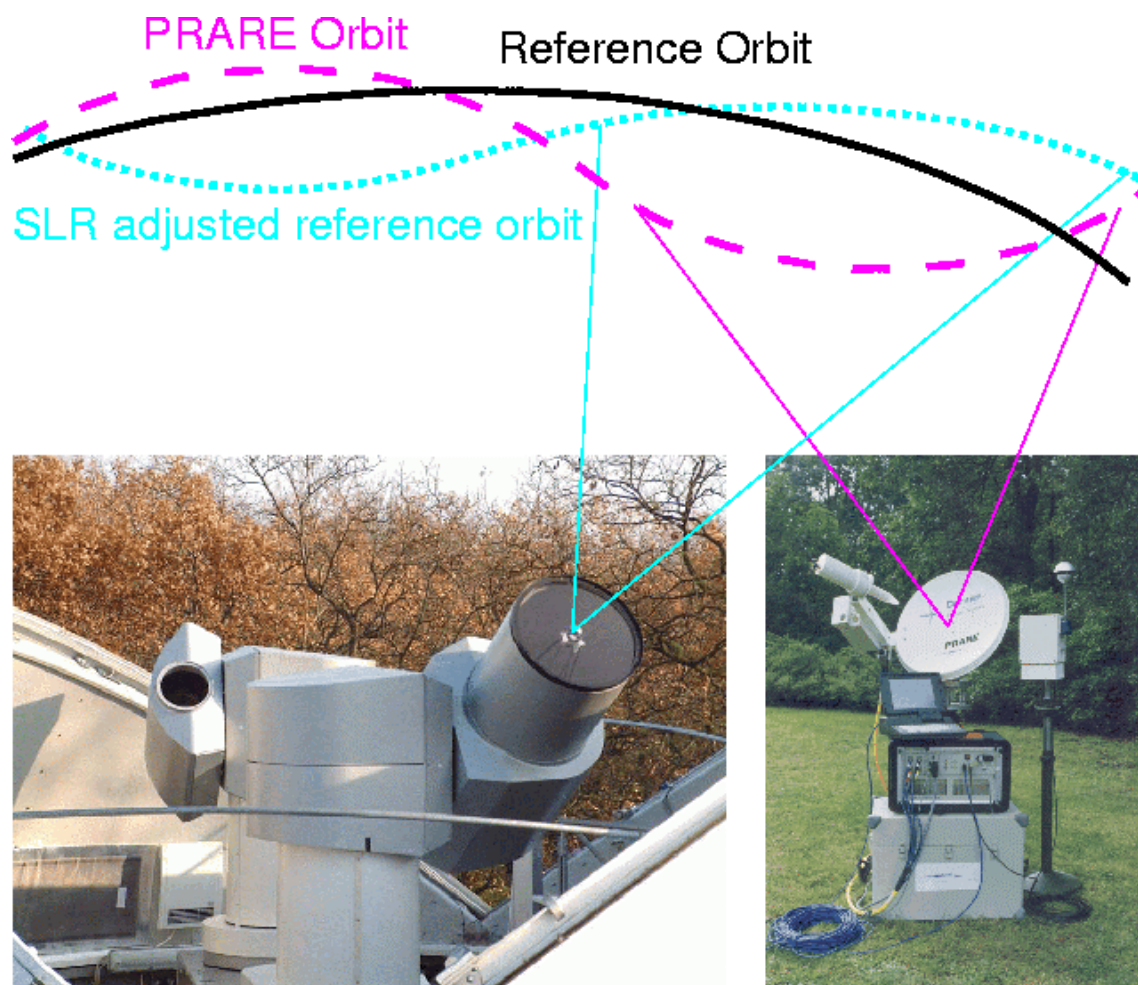


Abb. 8-3-1: Prinzip der Kalibrierungsdatengewinnung; gleichzeitige PRARE und SLR Messungen

Während des Förderzeitraums wurden eine ganze Reihe von gemeinsam aufgezeichneten Messpassagen an den drei oben genannten Orten generiert, wobei insgesamt 1647 simultane Passagen von Mai 1995 bis Mai 1998 ausgewertet wurden:

Potsdam:	619 Passagen	186 Bögen
Greenbelt:	228 Passagen	186 Bögen
Matera:	126 Passagen	77 Bögen

Die Kalibrierung erfolgte mittels zweier am GFZ entwickelter Softwarepakete EPOS-OC und CALPRA. Zunächst wurden jeweils die Range-Residuen der PRARE Revision-6- und SLR-Normalpunkte bezüglich eines 6-Tage-ERS-2 Orbits (Bogen) bestimmt (GRIM5 Standard). Für jede PRARE-Besetzungszahl wurde ein mittlerer Rangebias geschätzt und im weiteren berücksichtigt (Abb. 8-3-2).

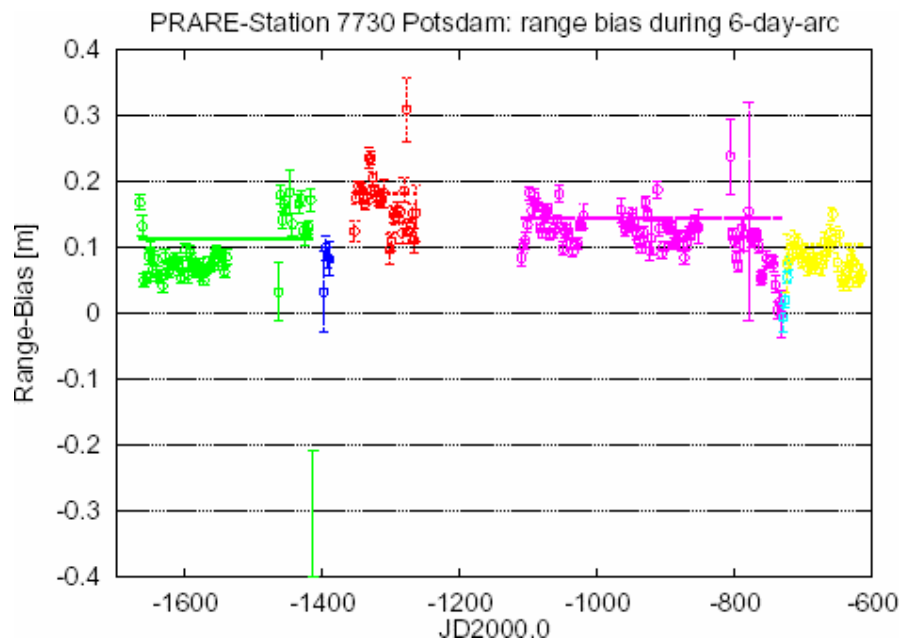


Abb. 8-3-2: Rangebiase für 6-Tage-Bögen der Station Potsdam (7730); 6 Besetzungen

Im 2. Schritt wurden die Range- und Zeitbiase der PRARE- und SLR-Residuen für jeden Bogen angepasst. Die Synchronisation bezüglich Zeit und Range erfolgte unabhängig voneinander. Es ergaben sich folgende Differenzen zwischen den mittleren Range- (Abb. 8-3-3) und Zeitbiasen (Abb. 8-3-4), abgeleitet aus den Orbitberechnungen und der externen Kalibrierung pro 6-Tage-Bogen:

Potsdam:	-0,3 bis 2,2 cm (RMS < 4 cm)	; 0 " 7 ms
Greenbelt:	-0,5 bis -1,5 cm (RMS < 6 cm)	; -2 " 4 ms
Matera:	3,3 bis 4,1 cm (RMS < 8 cm)	; 1 " 16 ms

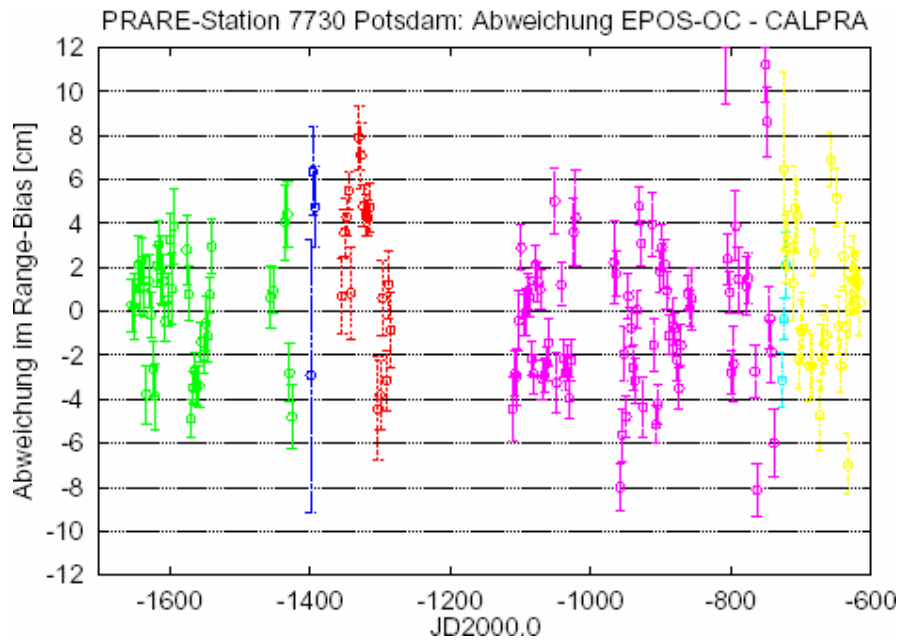


Abb. 8-3-3: EPOS-OC CALPRA Abweichung der Rangebiase für die Station Potsdam; 6 Besetzungen

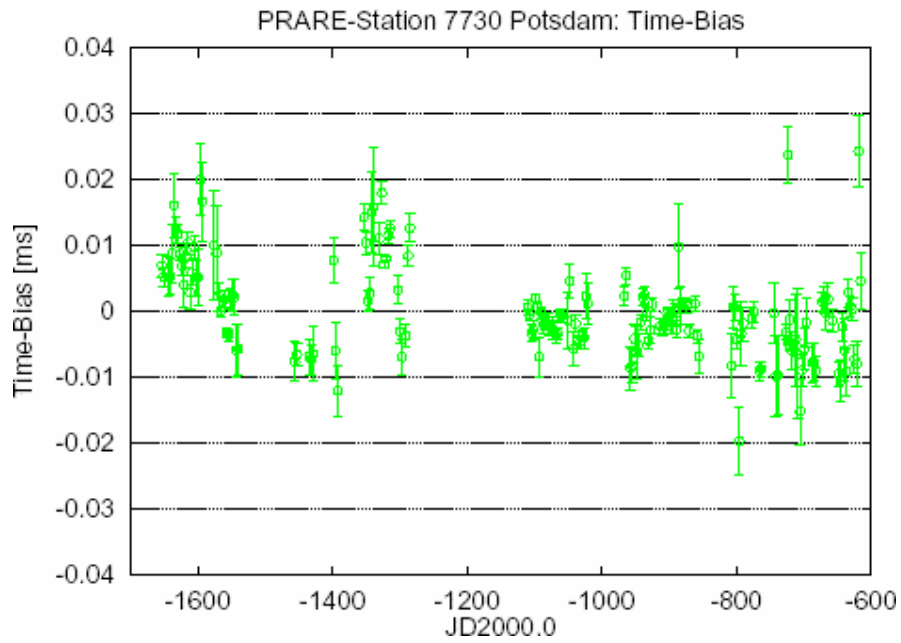


Abb. 8-3-4: EPOS-OC CALPRA Abweichung der Zeitbiase für die Station Potsdam; 6 Besetzungen

8.4 Präzise Bahnbestimmung

Auf Grund seiner langjährigen Erfahrung in der präzisen Bahnmodellierung verschiedenster Satellitenmissionen, hat das GFZ Potsdam unter anderem die Aufgabe zur Erzeugung präziser ERS-Bahnprodukte von der ESA übertragen bekommen. Diese Aktivität findet im Rahmen der Deutschen Prozessierungs- und Archivierungseinrichtung für ERS (D-PAF) in Oberpfaffenhofen statt, die vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR in Kooperation mit dem GFZ betrieben wird.

Die ERS-2 Standard-Bahnprodukte umfassen den Preliminary Orbit (PRL), der nach ca. einer Woche vorliegt, sowie den Precise Orbit (PRC), der nach Vorliegen präziser Daten für Erdrotation und Sonnenaktivität nach ca. 2 Monaten berechnet werden kann. Beide Produkte wurden zunächst mittels Satellitenlasermessungen sowie den aus Radaraltimetermessungen abgeleiteten Höhendifferenzen an Kreuzungspunkten von auf- und absteigendem Bahnbogen berechnet. Die Genauigkeit der kalkulierten Bahnephemeriden lag bei ca. 7 cm radial, 15 cm normal und 20-30 cm tangential (RMS-Werte).

Nach erfolgreichem Abschluss der PRARE Validierungsphase sowie umfangreichen Bahnmodellierungstests werden seit Januar 1997 (PRL) bzw. Mitte Dezember 1995 (PRC) statt der Altimeterdaten die PRARE Entfernung- und Dopplermessungen zur Berechnung der Produkte verwendet. Die Nutzung von PRARE-Daten bietet neben den Vorzügen der Wetterunabhängigkeit sowie der zentralen Datensammlung (verglichen mit dem Lasersystem) noch weitere Vorteile im Vergleich zu den Altimeterdaten:

- Die Satellitenbeobachtungen sind unabhängig von der Meeresoberfläche
- Es stehen zwei Messtypen zur Verfügung (Entfernungs- und Dopplermessungen), d.h. die Beobachtungen sind nicht nur in radialer Richtung sensitiv.

Als PRARE-spezifische, zusätzliche Unbekannte werden in den PRC-Produkten eine Entfernungsablage pro Station und Bogen, eine Zeitablage pro Bogen sowie ein Skalierungsfaktor zum troposphärischen Modell pro Station und Satellitenüberflug mitgeschätzt. Die mit PRARE-Daten berechneten Bahnprodukte weisen die gleiche bzw. eine leicht bessere Genauigkeit gegenüber den mit Altimeterdaten berechneten auf.

Die Abbildungen 8-4-1 und 8-4-2 veranschaulichen die Gesamtgenauigkeit (einschließlich Bahnmodellierungsfehler) der Messtypen „Range“ und „Doppler“ der wöchentlichen PRC-Bahnbögen seit Anfang 1996. Als Referenz zeigt die Abbildung 8-4-3 die Genauigkeit der ausschliesslich mit Laserdaten berechneten Bahnen (Range) für den gleichen Zeitraum. Klar ersichtlich ist die hohe Güte der PRARE-Daten. Ein deutlicher Gewinn zeigt sich auch bei den zur Qualitätssicherung berechneten überlappenden Bahnteilen. Durch PRARE ergeben sich deutlich homogenere, aufeinander folgende Bögen.

Dank der hohen Datenausbeute und des schnellen, zentralen Datenflusses ermöglichen die PRARE-Messwerte die Berechnung schnell verfügbarer täglicher Bahnprodukte (Rapid Orbit), die jeden Mittag für den Vortag vorliegen. Dieses Produkt wurde seit Juli 1997 bis Anfang 2000 erzeugt und den Nutzern für Fast-Echtzeit Anwendungen, wie z.B. die schnelle SAR-Datenanalyse im Falle von Katastrophen (Hochwasser) bereitgestellt. Anschliessend wurde es noch intern, zum schnellen Monitoring der eingehenden PRARE-Daten und damit zur schnellen Kontrolle des Bodenstationsnetzes verwendet.

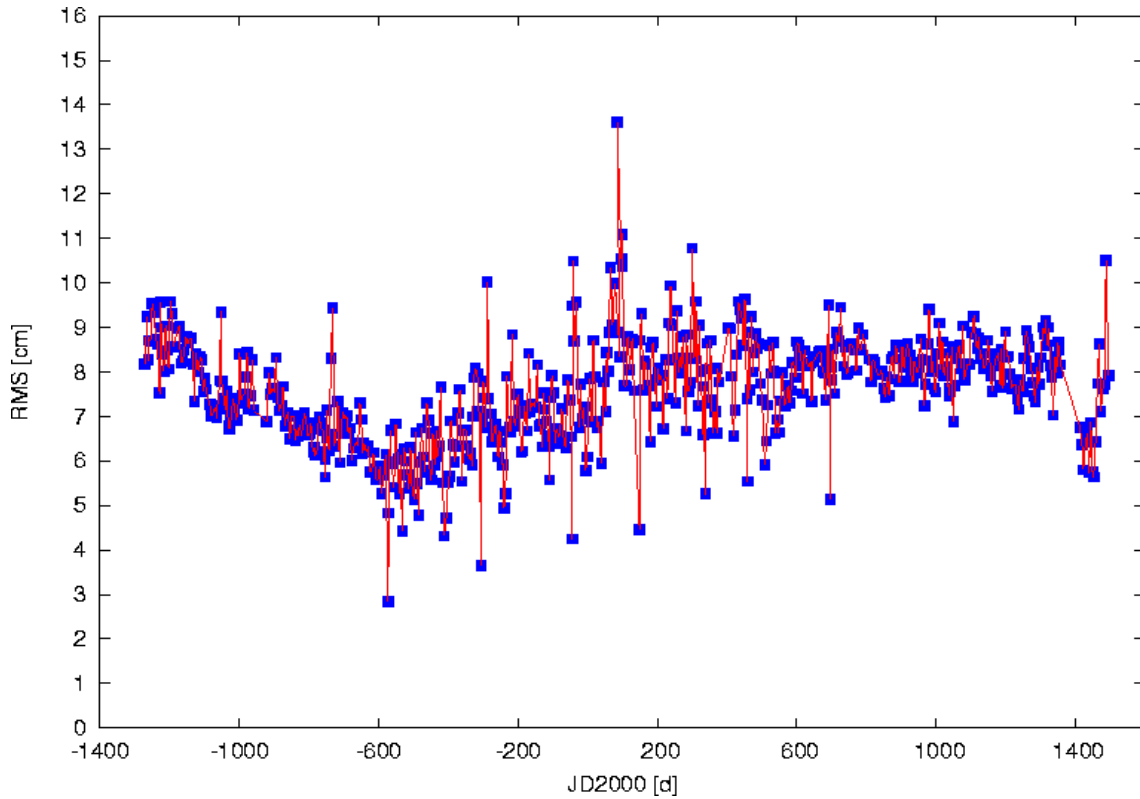


Abb. 8-4-1: Anpassung der PRARE Range Beobachtungen an die präzise ERS-2 Bahn (1996–2003)

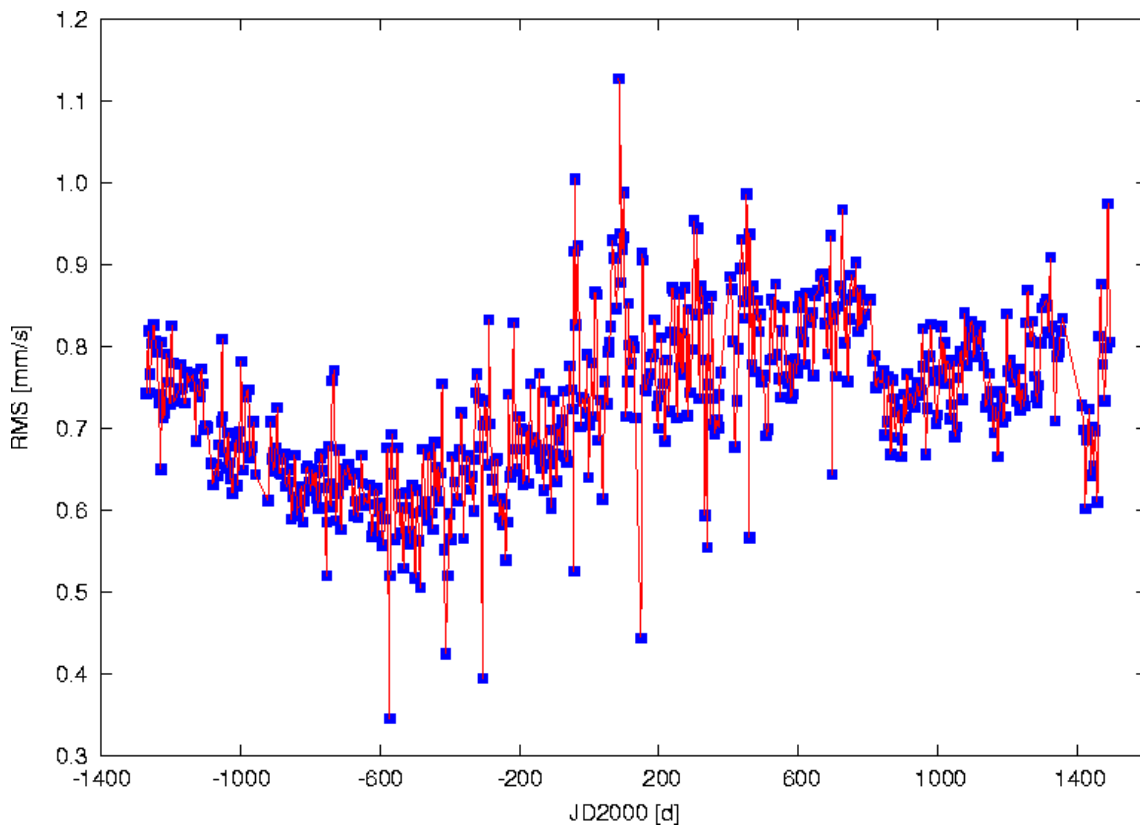


Abb. 8-4-2: Anpassung der PRARE Doppler Beobachtungen an die präzise ERS-2 Bahn (1996–2003)

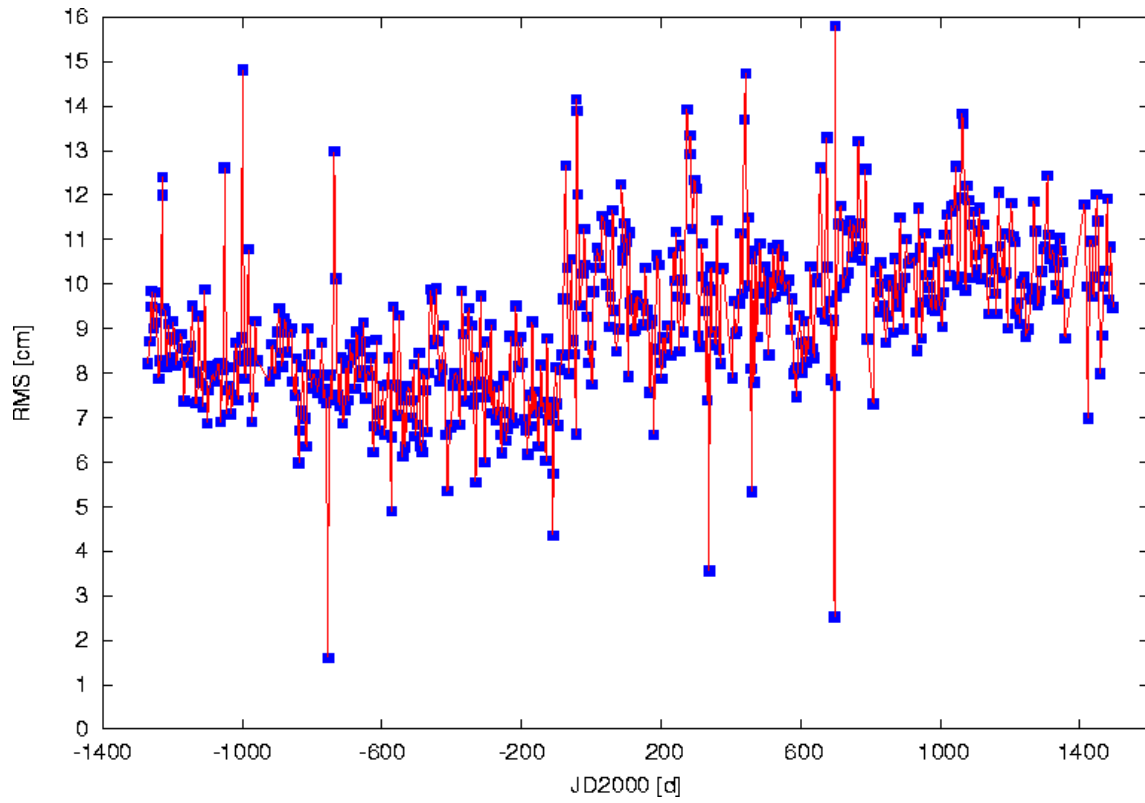


Abb. 8-4-3: Anpassung der Laser Beobachtungen an die präzise ERS-2 Bahn (1996–2003)

8.5 Bestimmung geodätischer Parameter

Die PRARE-Daten bilden eine sehr gute Basis für die Bestimmung von geodätischen Parametern, wie hochgenauen Bodenstationskoordinaten, Stationsbewegungen sowie Erdschwerefeldkoeffizienten.

PRARE-Stationskoordinaten und Stationsgeschwindigkeiten

Die PRARE-Stationskoordinaten wurden unter Verwendung von Revision-6-Daten über einem Zeitraum von etwa 3 Jahren (20.06.1995 bis 01.05.1998) berechnet. Dabei wurde das gesamte PRARE-Netz genutzt, mit Ausnahme der Teststationen in Friedrichshafen und der Neumayerstation, die einer speziellen Behandlung bedarf (siehe nächster Abschnitt). Die Berechnung der Satellitenbahnen erfolgte entsprechend den GRIM5 Standards, wobei die Bogenlänge 5 Tage betrug und Daten zur Zeit größerer ERS-2 Manöver ausgeschlossen wurden. Folgende Parametrisierung wurde gewählt:

- 6 Orbitalelemente
- 3 Drag-Skalierungsfaktoren pro Tag
- je 1 empirischer globaler "Along-" bzw. "Cross-Track" Beschleunigungsparameter pro Satellitenumlauf
- 1 troposphärischer Skalierungsfaktor pro Passage
- 1 Range-Bias pro PRARE-Station

Um die interne Verträglichkeit der Lösung zu prüfen, wurden 6 Halbjahreslösungen mit den 3 Ganzjahreslösungen verglichen. Es ergab sich ein gewichteter Mittelwert für die Abweichungen der Stationspositionen von 24 mm (Abb. 8-5-1).

Für Stationen mit signifikanter Drift und hinreichend langer Beobachtungszeit wurden die Geschwindigkeiten bestimmt und mit ITRF96 verglichen (Abb. 8-5-2). Mit einer Genauigkeit von besser als 1 cm/y für jede Geschwindigkeitskomponente besteht, unter Berücksichtigung der relativ kurzen Zeitspanne, eine gute Übereinstimmung.

Schließlich wurden die Dreijahreslösungen mit externen Koordinatenbestimmungen (lokale Exzentrizitäten, GPS-Messungen) verglichen. Die Unterschiede zwischen zwei Lösungstypen (vor und nach einer 7-Parameter Helmert-Transformation) sind in Abb. 8-5-3 gezeigt.

Berücksichtigt man die Dichte des PRARE-Bodennetzes, dessen zeitliche Instabilität, die Länge der Beobachtungsdauer, die an den ERS-2-Solarzellen auftretenden Mehrwegeeffekte bei Polarstationen und die geringe Bahnhöhe des ERS-2, die sehr viel geringer als die von normalerweise zur Positionsbestimmung verwendeten Satelliten ist, sind die mit PRARE-Daten erhaltenen Resultate (Stationskoordinaten und -Geschwindigkeiten) als sehr gut zu bewerten.

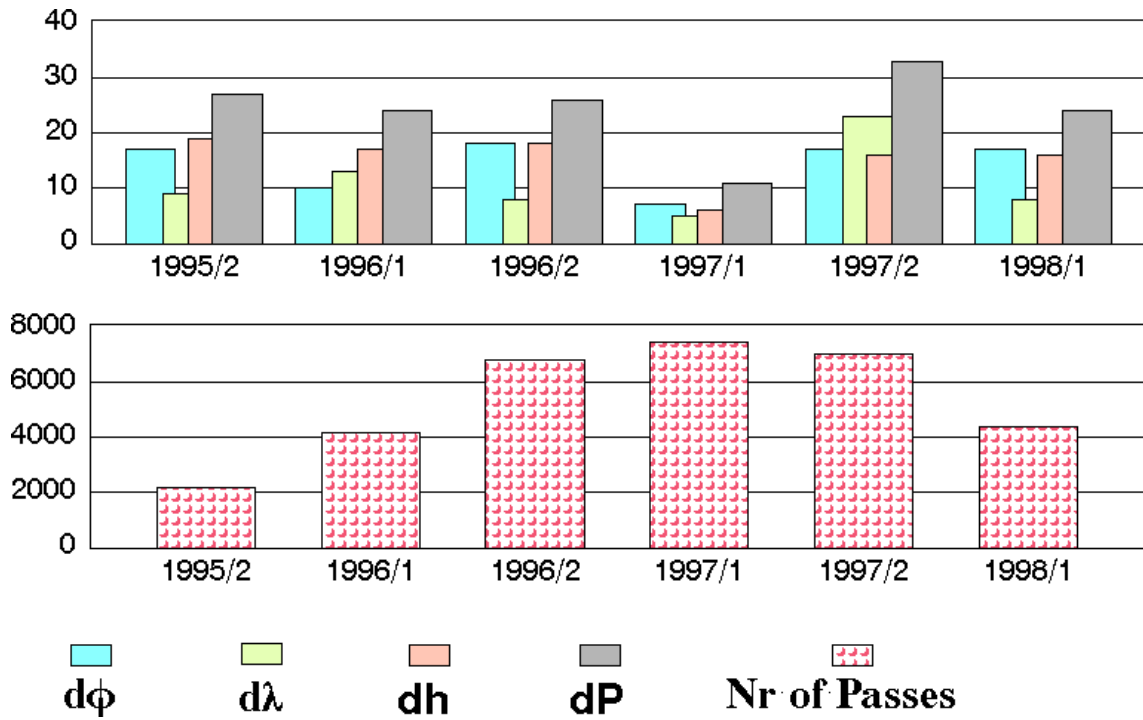


Abb. 8-5-1: Vergleich von 6 Halbjahres- mit 3 Einjahreslösungen in mm

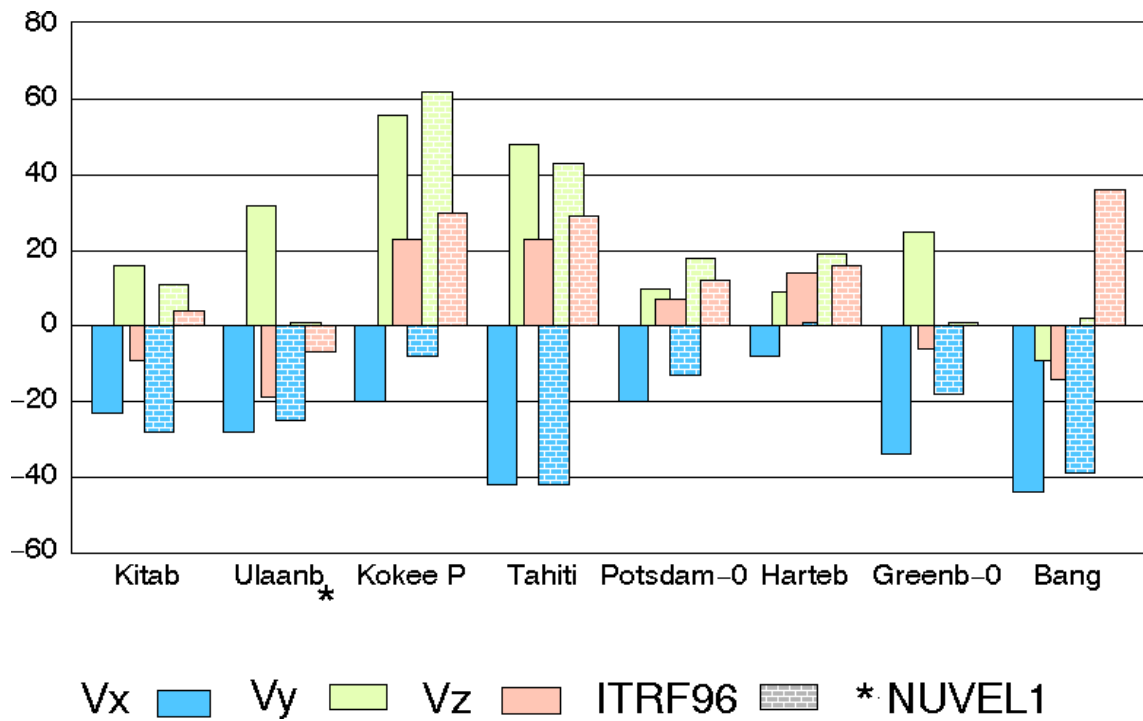


Abb. 8-5-2: PRARE-Stationsgeschwindigkeiten in mm/y (Dreijahreslösung)

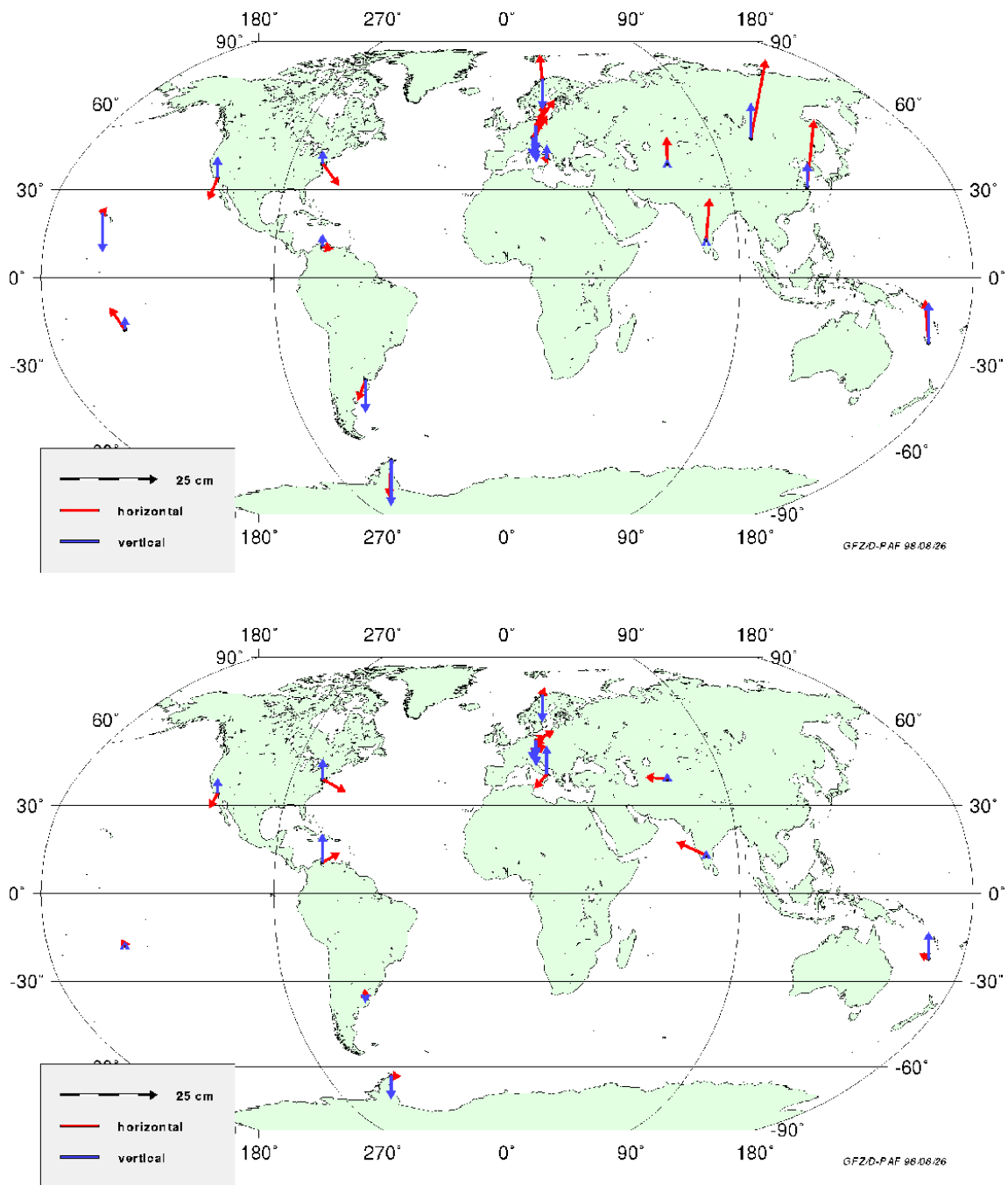


Abb. 8-5-3: PRARE-Stationskoordinatengenauigkeiten berechnet aus Vergleichen mit lokalen Exzentritäten und GPS-Lösungen vor (oben) und nach (unten) Helmert-Transformation

Bewegung der Station Neumayer

Zu den besonderen Herausforderungen des Tracking-Systems PRARE gehört die Verarbeitung von Daten der Bodenstation Neumayer, welche an der Antarktis-Station des AWI betrieben wird. Die gesamte Station befindet sich auf einem Gletscher, der langsam in Richtung des Meeres driftet [Enninghorst et al. ,1998]. Richtung und Größe dieser Bewegung müssen bei der korrekten Prozessierung von Daten berücksichtigt werden.

Das PRARE-System ermöglicht die Positionsbestimmung eines Punktes auf einem Gletscher, wobei außerdem eine Vorhersage der Position mit einer Genauigkeit von 10 cm für eine Woche möglich ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Positionsbestimmung aus der Prozessierung von PRARE-Daten für den Zeitraum 1996 bis 2004 präsentiert. Die Abbildung 8-5-4 zeigt anhand von mit PRARE Daten, wöchentlich bestimmten Positionen, dass sich die Station während dieser Zeit um über 1190 m, mit einer Geschwindigkeit von 0.410 m/d in nördlicher und 0,065 m/d in westlicher Richtung bewegt hat.

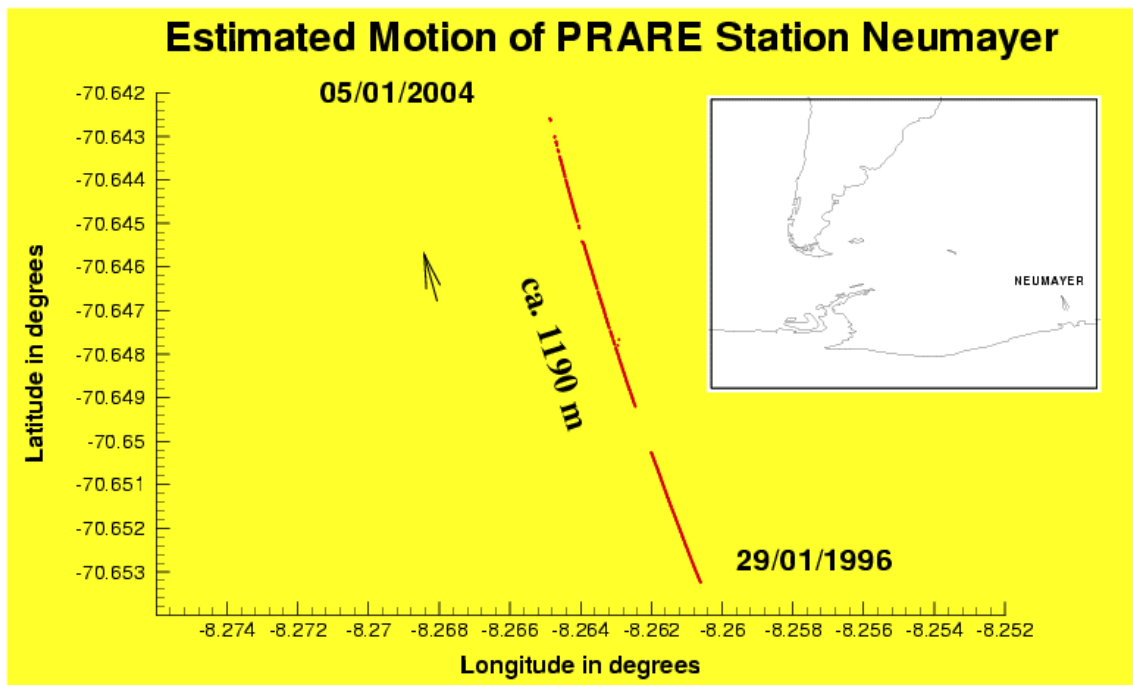


Abb. 8-5-4: laterale Bewegung der Station Neumayer, bestimmt mit PRARE zwischen 1996 und 2004

Die Analyse der Höhenkomponente (Abb. 8-5-5) zeigt im Mittel eine stetige Abnahme und drei auffällige Sprünge (JD2000: -1050, +350, +1450) von etwa jeweils 1,5 m. Die Abnahme der Höhenkomponente hat ihre Ursache in einem stetigen Absinken des Installationsortes der PRARE Anlage (Container „Ballonfüllhalle“) in den Untergrund. Die registrierten Sprünge stammen vom wiederholten Hochsetzen des Containers durch die Besatzung der Station.

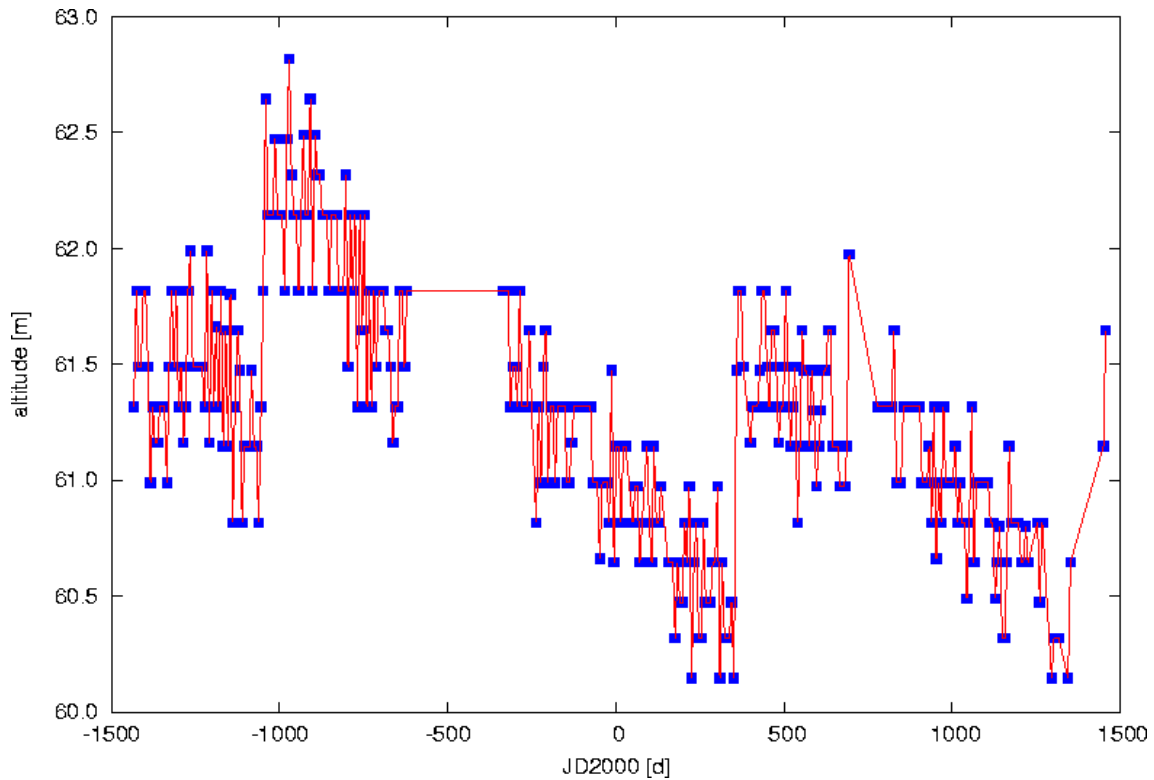


Abb. 8-5-5: vertikale Bewegung der Station Neumayer, bestimmt mit PRARE zwischen 1996 und 2004

Eine genauere Untersuchung der Vertikalkomponente in der Nähe des ersten Sprunges zeigt die Abbildung 8-5-6. Dargestellt ist die tägliche Abweichung der vertikalen Komponente von der mittleren Bewegung. Es ist eine Schwingung mit einer Periode von 14,5 d zu beobachten. Bei der Prozessierung wird die Gezeitenbewegung des Gletschers, auf der die PRARE-Station steht, vernachlässigt. In Abbildung 8-5-7 ist die vertikale Gezeitenbewegung nach dem Modell von Schwiderski dargestellt. Dieses Modell ist jedoch nicht dazu gedacht, Bewegungen des Schelfeises wiederzugeben. Insbesondere zu den ebenfalls beobachteten horizontalen Schwingungen kann ein solches Modell keine Aussagen machen, da hierzu die Umsetzung der Gezeiten in Strömungen notwendig wäre. Die gute Übereinstimmung in den Perioden reicht jedoch, um die Schwingungen als Gezeiteneffekt zu identifizieren.

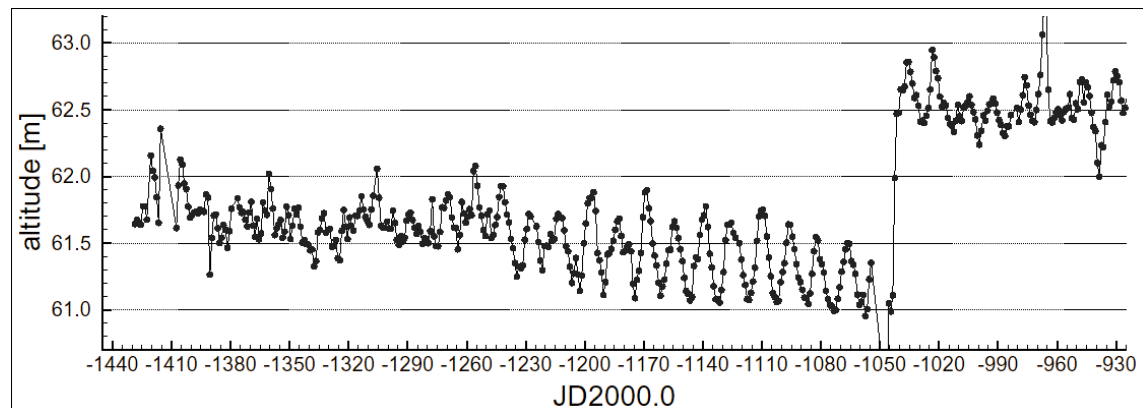


Abb. 8-5-6: tägliche Abweichung der vertikalen Komponente von der mittleren Bewegung

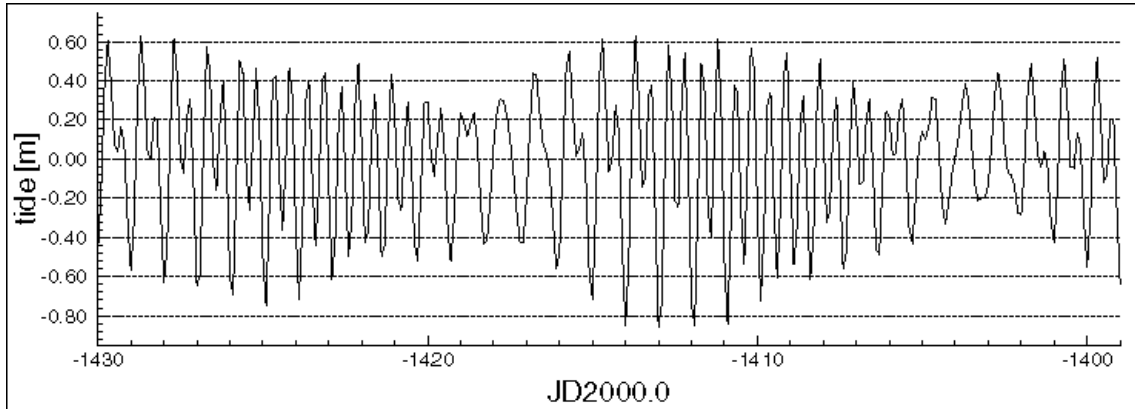


Abb. 8-5-7: Tiden (Februar 1996) für 70.65° Süd und 8.26° West nach Schwiderski

Erdrotationsparameter

Zu Testzwecken wurden auch Erdrotationsparameter aus PRARE-Beobachtungen abgeleitet. Wie zu erwarten war, zeigen sie nicht die hohe Güte, wie die aus Laser- oder GPS-Beobachtungen abgeleiteten Werte anderer Satellitenmissionen. Dies ist klar bedingt durch die niedrige Flugbahn von ERS-2. Ein Vergleich mit den DORIS-Auswertungen allein des SPOT-2/3-Satelliten, der eine ERS-ähnliche Bahn fliegt, zeigt, daß die Erdrotationsparameter aus PRARE und DORIS mit der gleichen Genauigkeit bestimmt werden.

GEO FÖRSCHUNGS ZENTRUM POTSDAM

POLAR MOTION COMPARISONS WITH IERS of Daily Solutions (Period : 10/9/96–14/10/96)				
TYPE OF DATA USED	Xp (mas)		Yp (mas)	
	Mean	RMS	Mean	RMS
PRARE (ERS-2)	0.61	2.59	-1.42	4.21
DORIS (SPOT-3)	-1.33	2.16	-2.65	3.26
DORIS (TOPEX)	-0.19	1.81	0.40	1.78
DORIS (SPOT-2/3+TOPEX)	-0.11	1.37	0.91	1.36

GFZ
D-PAF

GDF_GOV_P_EIT

Abb. 8-5-8: Vergleich von Berechnungen zur Polwanderung mit PRARE und DORIS

Erdschwerefeldmodellierung

Auf Grund ihrer guten räumlichen und zeitlichen Verteilung sowie ihrer hohen Genauigkeit stellen die PRARE-Messdaten einen guten Datensatz für die Erdschwerefeldmodellierung dar. So wurden diese neben einer Vielzahl anderer Satellitenmessungen in vielen Schwerefeldmodellen mit Erfolg verwendet (TEG3/CSR, GRIM5/GFZ/GRGS). In die Berechnung des GRIM5-Erdschwerefeldmodelles sind ca. 700000 PRARE-Messungen von 250 ERS-2 5-Tages-Bahnbögen des Zeitraumes Juli 1995 bis Oktober 1997 eingeflossen. Neben den Schwerefeldkoeffizienten wird simultan für eine Reihe weiterer geodätischer Parameter aufgelöst: Stationskoordinaten und -geschwindigkeiten, Ozeangezeiten, Geozentrum.

Der Einfluß der ERS-Messdaten auf die Erdschwerefeldmodellierung zeigte sich klar bei der Berechnung eines GRIM5 Nur-Satellitenmodelles. Ausgehend von einer Basis aus aufakkumulierten Normalgleichungen von 15 verschiedenen Satelliten (Etalon-1/2, Lageos-1/2, Ajisai, Starlette, Stella, Spot-2/3, Topex, Geosat, D1-C, D1-D, Nova3, Meteor-3) wurden weitere Geopotentialmodelle unter Hinzunahme von ERS-1 bzw. ERS-2 Daten berechnet. Geoid- bzw. Satellitenbahnvergleiche zeigen deutlich den positiven Einfluss der ERS-2 Messdaten.

Vergleicht man die resultierenden Geoide mit dem des amerikanischen Kombinationsmodelles EGM96, so ist ersichtlich, dass das mit ERS-1 Daten berechnete Modell nur eine um 1 mm bessere Anpassung an EGM96 liefert als die Basislösung ohne ERS-1/2. Dagegen ergeben sich beim ERS-2 Modell Verbesserungen von 1.3 cm (bei Entwicklungsgrad $l=10$), 4.4 cm ($l=36$) sowie 4.1 cm ($l=72$). Dies ist Ausdruck der hohen Güte der PRARE-Messdaten aber auch der guten räumlichen und zeitlichen Überdeckung der ERS-2 Bahn.

Abb. 8-5-9 zeigt zudem die Geoiddifferenzen zwischen der Basislösung GRIM-5 (Biancale et. al., 2000) sowie der Lösung mit ERS-2 Daten in einer Höhe von 780 km (= ERS-Flughöhe). Interessanterweise zeigen sich größere Differenzen über Regionen, in denen PRARE-Stationen aufgebaut sind (Südafrika, Indien, Ascencion, Tahiti). Auffällig sind auch die relativ hohen, streifenförmig ausgeprägten Differenzen in der Nähe des Äquators. Diese können als ionosphärische Signatur gedeutet werden und würden damit auf eine nicht hinreichend genaue ionosphärische Korrektur bei der PRARE-Datenverarbeitung hindeuten.

Auch ein Vergleich der Anpassung der Beobachtungen an die ausgeglichene Satellitenbahn zeigt für 9 nicht im Schwerefeld enthaltene ERS-2 Bahnbögen einen ähnlichen Trend. Während das ERS-1 Modell gegenüber dem Basismodell keine oder nur marginale Verbesserungen zeigt, ergeben sich beim ERS-2 Modell 3-7 % bessere Anpassungen. Insbesondere die Altimeterkreuzungspunktdifferenzen fallen um ca. 6 mm besser aus, wobei der Mittelwert deutlich auf Null zurückgeht.

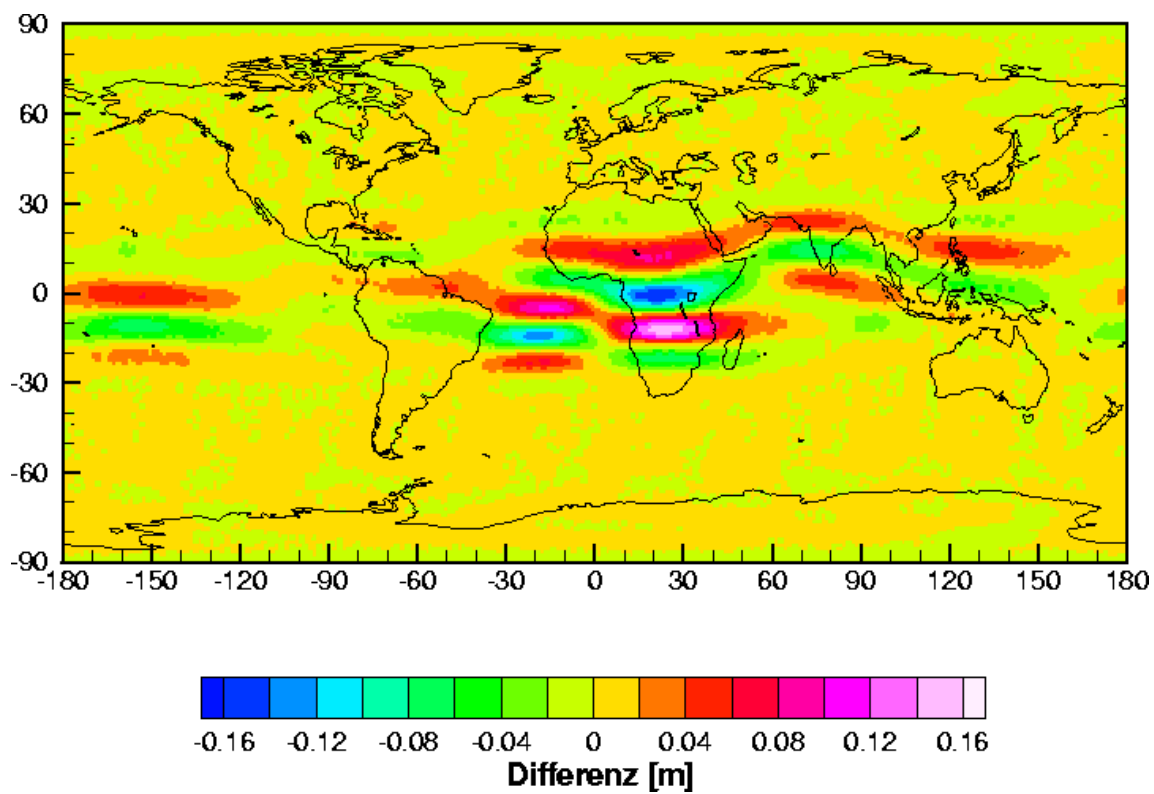


Abb. 8-5-9: Geoiddifferenzen zwischen Basislösung und ERS-2 Daten-Lösung in 780 km Höhe

8.6 PRARE-Zeitsystem

Zeitüberwachung

Während der PRARE/ERS-2-Mission konnte im Berichtszeitraum gezeigt werden, daß PRARE-Zeitsignale kontinuierlich empfangen und mit der erwarteten Genauigkeit ausgewertet und weiterverarbeitet werden konnten. Dies wurde einerseits dazu genutzt, den Zeitbezug der im PRARE-System beteiligten Uhren untereinander zu bestimmen, insbesondere des PRARE-Hauptoszillators im Raumsegment gegen UTC (s. Kapitel 7), andererseits um hochgenaue Uhrenvergleiche und Zeitübertragung zwischen externen Uhren zu erproben.

Die Restungenauigkeit der Modellierung des PRARE-Bordoszillators gegenüber UTC betrug generell nur wenige Mikrosekunden. Damit konnte sowohl eine hochgenaue Zeitmarkierung der PRARE-Messdaten und damit die Kurzzeitstabilität des Systems als auch die Langzeitdrift des PRARE-Hauptoszillators mit hoher Genauigkeit validiert werden.

Abbildung 8-6-1 zeigt den Verlauf der Frequenzablage für die beiden Module (A und B) im PRARE Raumsegment in der Zeit von Mai 1995 bis März 2004. Der Verlauf für das Modul A ist nahezu linear. Nach dem Wechsel auf das Modul B entsprach dessen Frequenzablage etwa dem des Modul A bei dessen Abschaltung. Die Datenlücke am Ende der Kurve des Moduls B hat ihren Ursprung im Ausfall des PRARE Zeitsystems in Oberpfaffenhofen zu dieser Zeit. Die in dieser Zeit gesammelten Daten konnten, mangels eines genauen Uhrenmodells nicht prozessiert werden.

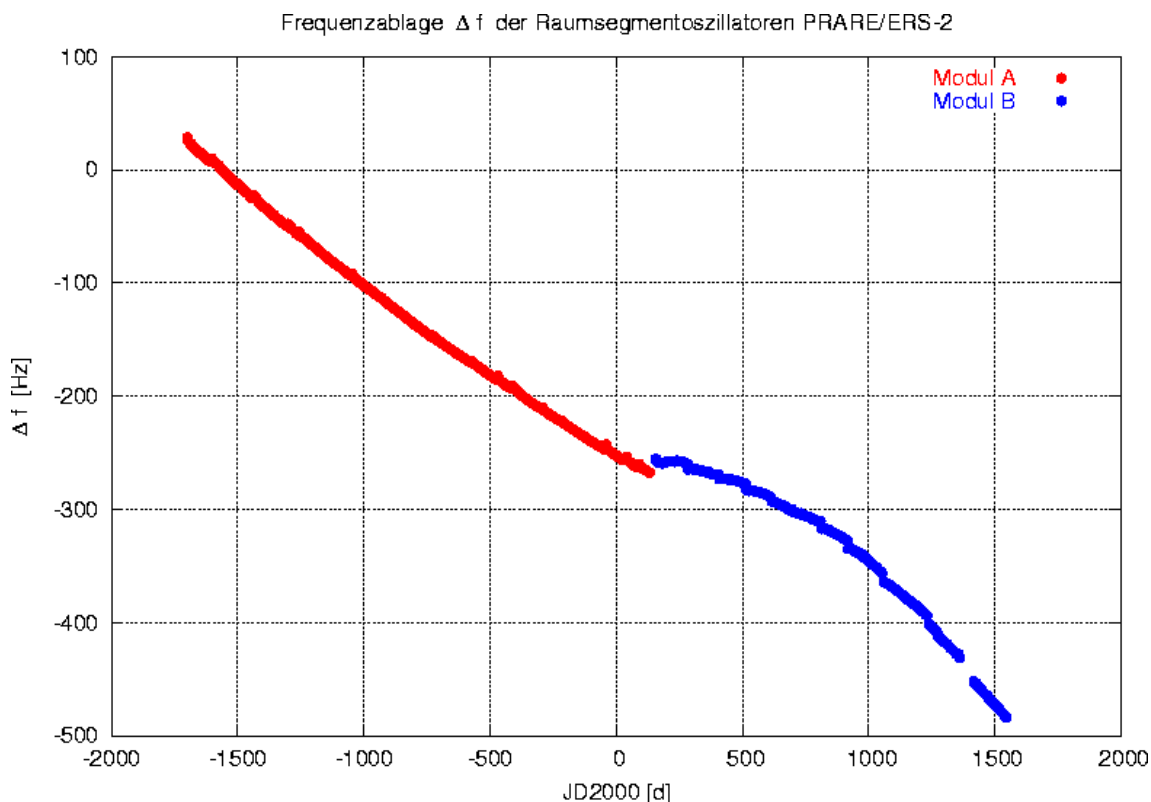


Abb. 8-6-1: Frequenzablage des Oszillators im Modul A und Modul B des Raumsegments

Das Driftverhalten des PRARE-Bordoszillators war während des gesamten Zeitraums sehr stabil. Einzelne kurzzeitige Ausreißer, die durch ein wenige Tage währendes "Wiedereinpendeln" auf das vorherige Frequenzniveau gekennzeichnet sind, entstanden durch mehrmaliges, automatisches Abschalten des PRARE-Instruments infolge verschiedener ERS-2 Plattform-Anomalien (siehe Abb. 8-1-1). Auch langfristig betrachtet erfüllte der thermisch nicht speziell stabilisierte BVA-Oszillators mit einer Alterungsrate von lediglich etwa $-2.1 \cdot 10^{-11}$ pro Tag die gestellten Stabilitätserwartungen. Für die Akkommodation des PRARE-Instruments auf ERS-2 wurde offensichtlich eine thermaltechnisch gesehen günstige Stelle ausgewählt; darüber hinaus scheint die Temperaturregelung des Satelliten gut zu funktionieren, wie Abb. 8-6-2 zeigt.

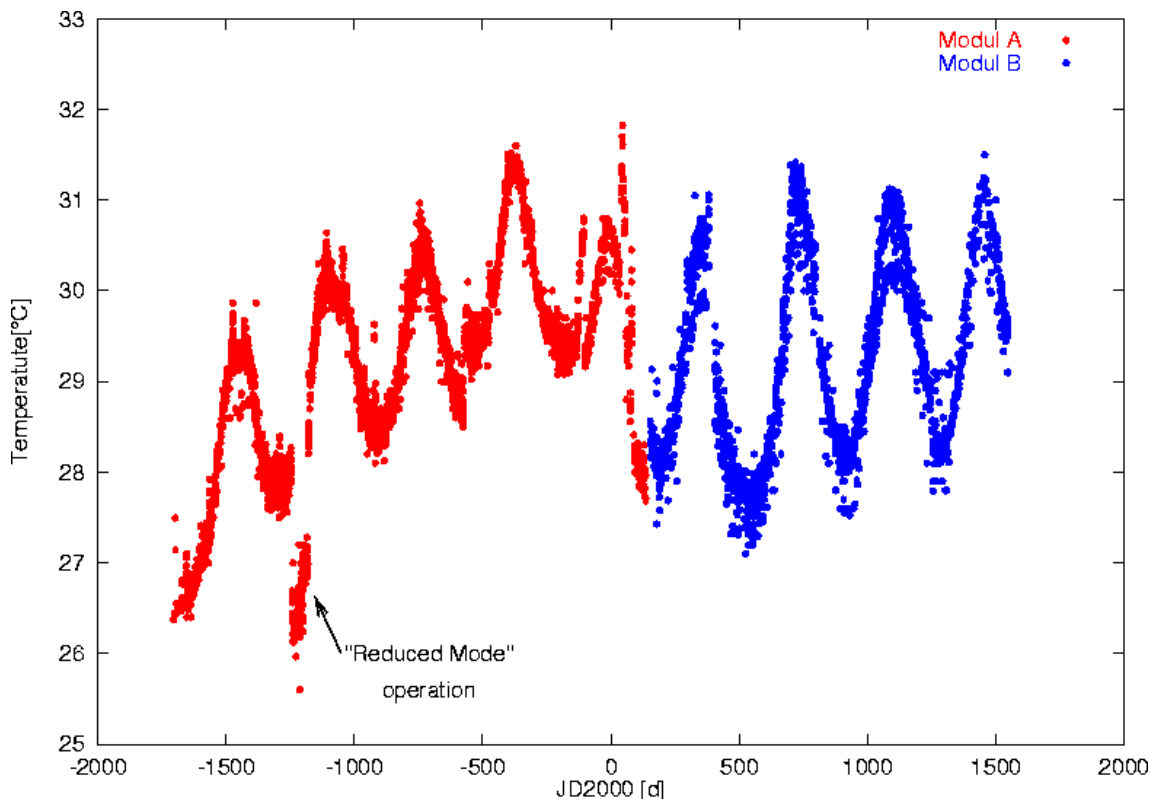


Abb. 8-6-2: Mittlere Temperatur der Module „A“ und „B“ im PRARE Raumsegment auf ERS -2

Die im Raumsegment gemessene und per Telemetrie übertragene Temperatur, veränderte sich nur langsam und schwankte lediglich zwischen 25 und 32,5° C. Neben einem Tagesgang von etwa 0,55° C und einem Jahresgang, war ein langfristiger Anstieg der mittleren Temperatur zu verzeichnen. Dieser könnte durch Alterungseffekte des Raumsegmentes oder die zunehmende Sonnenaktivität verursacht worden sein. Zwischen dem 30. Juli und 10. September 1996 wurde der Betriebsmodus von PRARE von "Nominell" auf "Reduced" umgestellt, was eine deutliche Verringerung der Temperatur um etwa 2,5° C zur Folge hatte. Der Grund hierfür war, dass im "Reduced Mode" verschiedene nicht benötigte Baugruppen abgeschaltet wurden.

Zeitübertragung

Das von der PRARE-Masterstation primär angewandte Uhrenvergleichsverfahren zum Betrieb des PRARE-Zeitsystems, das im vorherigen Abschnitt vorgestellt wurde, stellt eine echte Einweg-Zeitübertragung dar. Durch die bei PRARE mögliche Messung von Einweg- und Zweiweglaufzeiten entfällt die Berechnung von Parametern, insbesondere die modellmäßige Bestimmung der aktuellen Schrägentfernung zwischen Station und Satelliten, d.h. alle relevanten Größen können messtechnisch ermittelt und systematische Fehler somit nahezu ausgeschlossen werden.

Die erzielten Resultate können dahingehend interpretiert werden, dass das residuelle Messrauschen der Korrelation von Ein- und Zweiwegmessdaten

- unabhängig vom Typ der Zweiwegmessdaten ist, d.h. die Qualität der Entfernung- und der Dopplermesswerte für die Zweiweg-Zeitübertragung gleichwertig ist,
- eine durchschnittliche Standardabweichung von etwa 1 ns zeigt und damit um etwa eine Größenordnung über dem residuellen Messrauschen der Zweiwegdaten selbst liegt (100 ps), sowie
- ausschließlich durch die Einweg-Laufzeitmessung am Boden hervorgerufen wird.

Eine weitere Besonderheit von PRARE, gleichzeitig bis zu vier sich im Sichtbarkeitsbereich des Satelliten befindliche Stationen unabhängig voneinander, aber streng phasenkohärent anmessen zu können, erlaubt die Anwendung des "Common View" Uhrenvergleichs, also die simultane Beobachtung eines gemeinsamen Referenzoszillators durch bis zu vier Vergleichsuhren.

Zwischen November 1995 und Februar 1996 wurde in einer dedizierten Kampagne ein solches Experiment mit drei Uhren realisiert (siehe Abb. 8-6-3 und 8-6-4).

Dabei konnte die außerordentliche Leistungsfähigkeit und sehr hohe systematische Genauigkeit des Bodenuhrenvergleichs mit PRARE belegt werden:

- mit PRARE lassen sich Strukturen identifizieren die, selbst wenn sie nur sehr kurzzeitig auftreten, klar auf einseitige lokale Instabilitäten hinweisen, sei es von der Bodenstation selbst oder von der angeschlossenen Uhr. Als Beispiel hierzu wird auf die Ausschläge bei Sekunde 71940 in den Kurven 8-7-3a und c hingewiesen, die auf eine vorübergehende Instabilität am Messort Weilheim schließen lassen
- hinsichtlich der Uhrenstabilitäten zeigen die Bilder 8-6-5a und b, dass die Driften sowohl des H-Masers als auch der Cs-Uhr relativ zur Rb-Uhr sehr gering sind, letztere also in dem betrachteten, etwa zehnmütigen Zeitintervall sehr stabil läuft, während die Relativdrift zwischen H-Maser und Cs-Uhr (Abb. 8-6-5c) etwas größer ist
- die unterschiedlichen Basislängen zwischen den Uhrenstandorten (vgl. Abb. 8-6-3) haben auf die Korrelationsgenauigkeit offensichtlich keinen Einfluss, da weder durch die Messgeometrie bedingte Restfehler, noch systematische langperiodische Störungen als Folge der bloßen Halbierung der Zweiwegdaten identifiziert werden können
- die relative Genauigkeit jedes einzelnen der drei Korrelationspaare ist mit 1 ns sehr hoch; im Falle (Rb - Cs) (Abb. 8-6-5b) beträgt die Standardabweichung sogar lediglich etwa +450 ps.

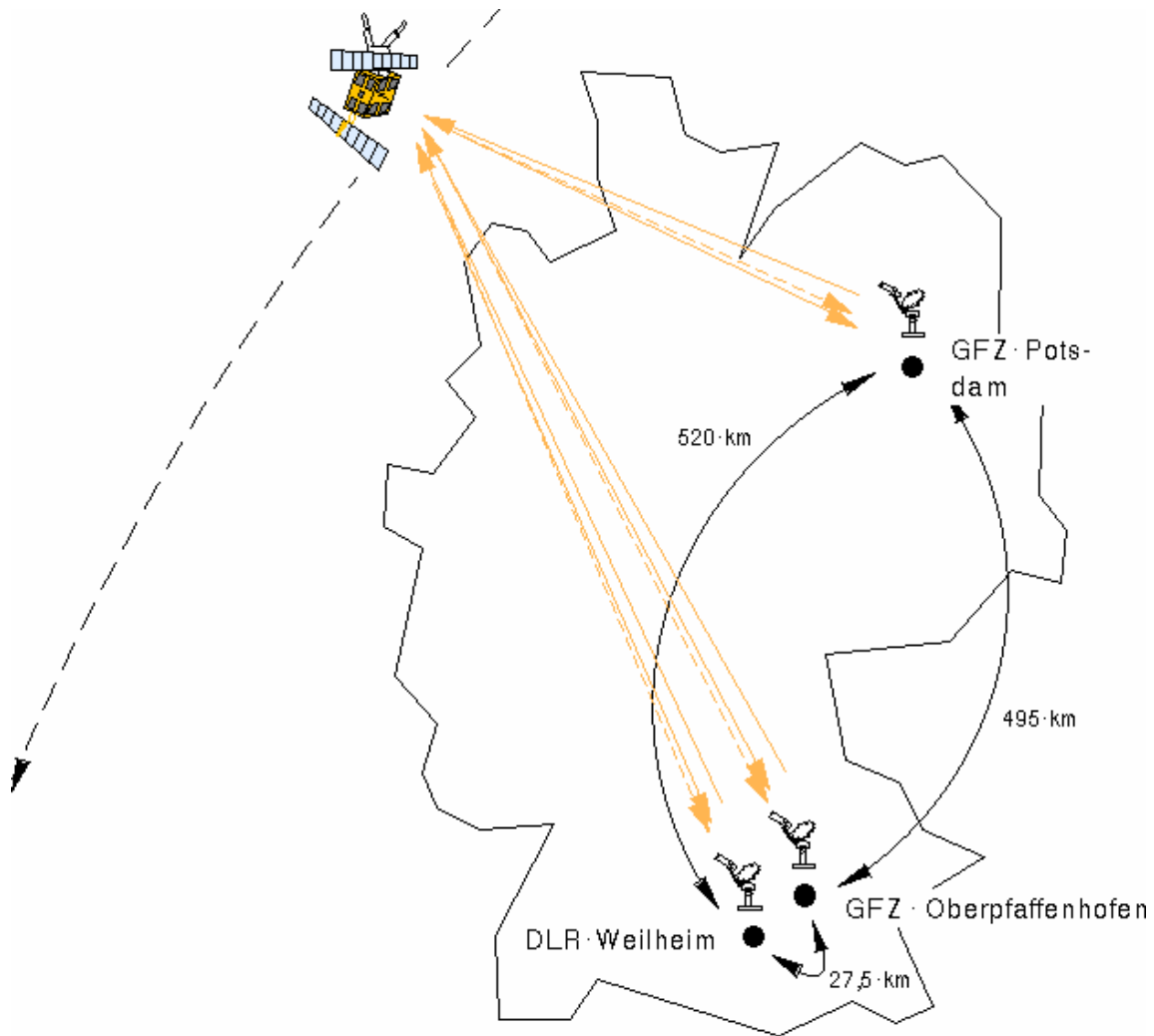


Abb. 8-6-3: Experimenteller Zweiweg- „Common View“ –Uhrenvergleich mit verschiedenen Frequenznormalen; Cs (Potsdam), Rb (Oberpfaffenhofen) und H-Maser (Weilheim)

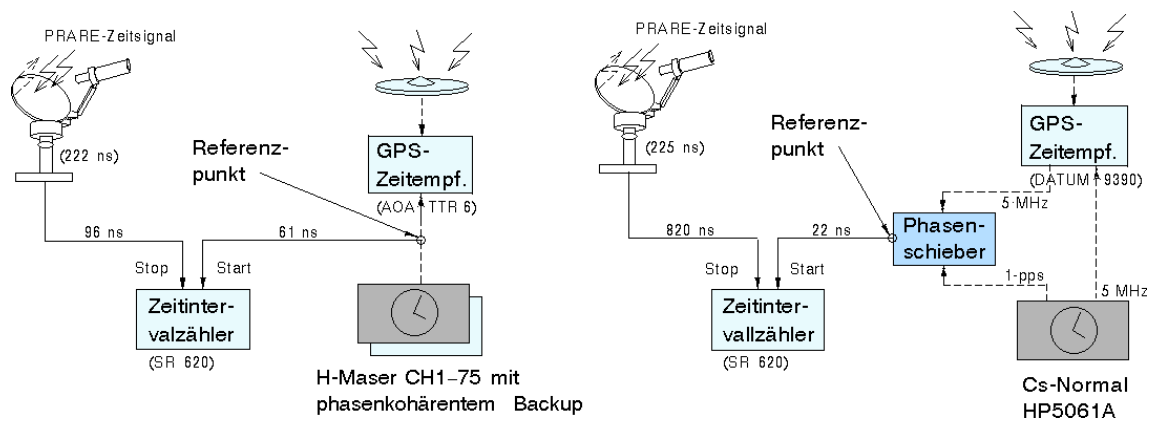


Abb. 8-6-4: Konfiguration der Instrumente und kalibrierte Signallaufzeiten in Weilheim und Potsdam

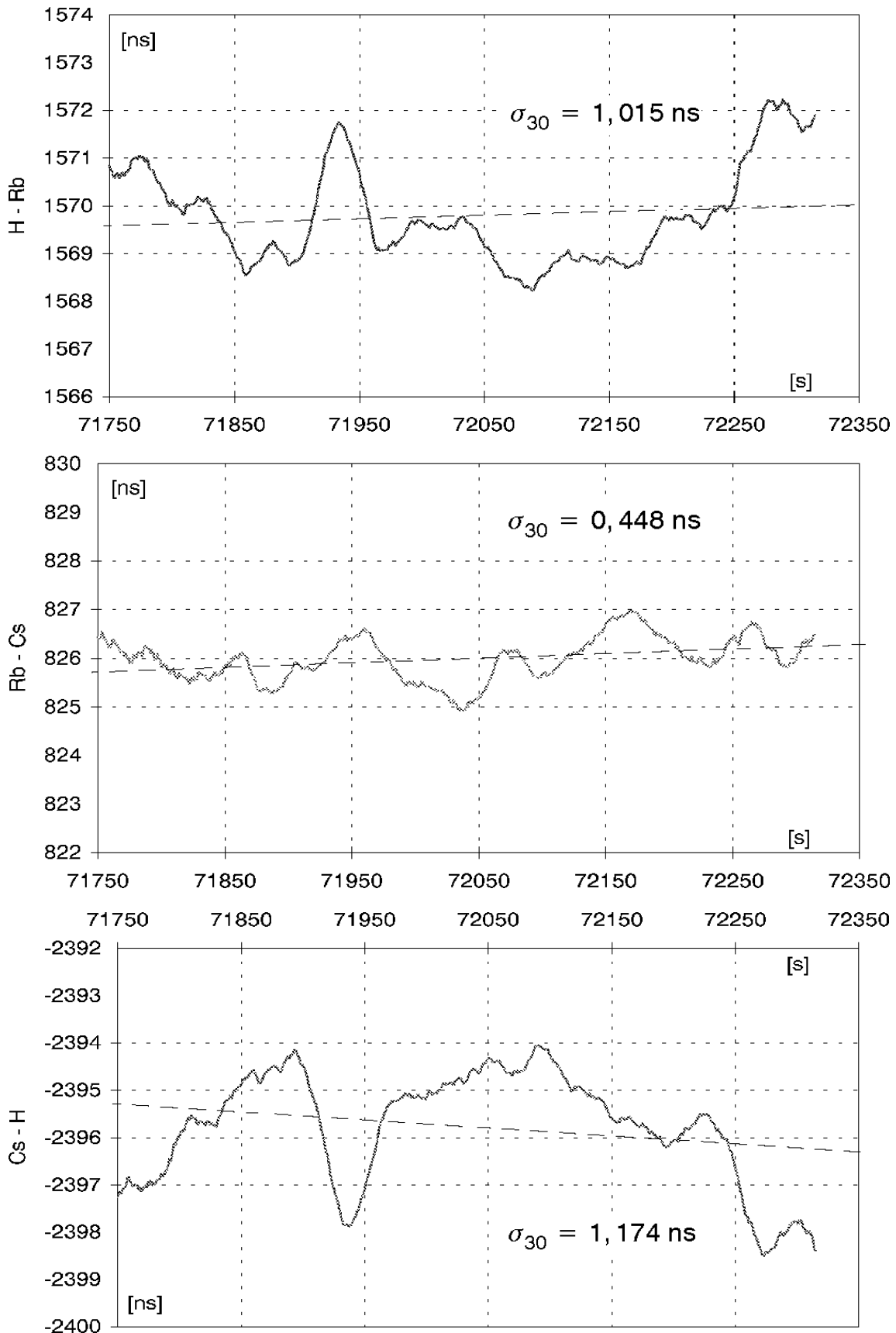


Abb. 8-6-5: Relativer Stand und Gang des H-Maser (oben), Rb-Normal (mitte) und Cs Normal (unten)

8.7 Bestimmung des Gesamtelektroneninhalts der Ionosphäre

Das PRARE-System bietet zwei verschiedene Möglichkeiten zur Bestimmung des Gesamtelektroneninhalts der Ionosphäre (TEC) zwischen Bodenstation und Satellit (Flechtner, 2000). Zum einen wird die Laufzeitdifferenz ΔXS der vom Bordsegment quasi-simultan ausgesendeten X- und S-Band -Codesignale direkt in der Bodenstation gemessen. Diese ist direkt proportional zum TEC und steht bei der Datenvorverarbeitung als viersekündlicher Mittelwert innerhalb der Low-Rate-Rahmen zur Verfügung. Andererseits lässt sich der relative Verlauf der ΔXS auch aus den einsekündlichen Zweiweg-Entfernungs- und Dopplerbeobachtungen des Bordsegmentes ableiten. Diese Methode wird als Differenced Range versus Integrated Doppler (DRVID) bezeichnet und beruht auf dem unterschiedlichen Brechungsindex von Code- und Phasenmessungen in dispersiven Medien wie der Ionosphäre. Bildet man die Differenz zweier aufeinanderfolgender sekundlicher Entfernungsmessungen R mit den aus den ebenfalls sekundlich vorliegenden Doppler-Beobachtungen N abgeleiteten Entfernungsänderungen, ergibt sich die zweifache Differenz der ionosphärischen Signalkorrektur, falls die entsprechenden geometrischen, atmosphärischen und messtechnischen Korrekturen an die Beobachtungen angebracht worden sind:

$$DRVID(t_i, t_j) = [R(t_i) - R(t_j)] - \frac{c}{k \cdot f} \cdot N(t_i, t_j) = 2 \cdot [C_{ion}(t_i) - C_{ion}(t_j)]$$

Dabei bedeuten c die Lichtgeschwindigkeit und $k \cdot f$ die Sendefrequenz der Bodenstation. Diese Korrekturdifferenz lässt sich wiederum in ΔXS und TEC umrechnen. Voraussetzung für die Berechnung der DRVID ist die vorherige zeitliche Synchronisation der beiden Messtypen und die Bestimmung der Integrationsunbekannten $C_{ion}(t_1)$. Diese erfolgt durch Anpassung an die Laufzeitdifferenzmessungen der Bodenstation.

Als Beispiel für beide Verfahren dient die Passage in Oberpfaffenhofen am 13. Januar 2001 um 10:18 UTC (Abb. 8-7-1).

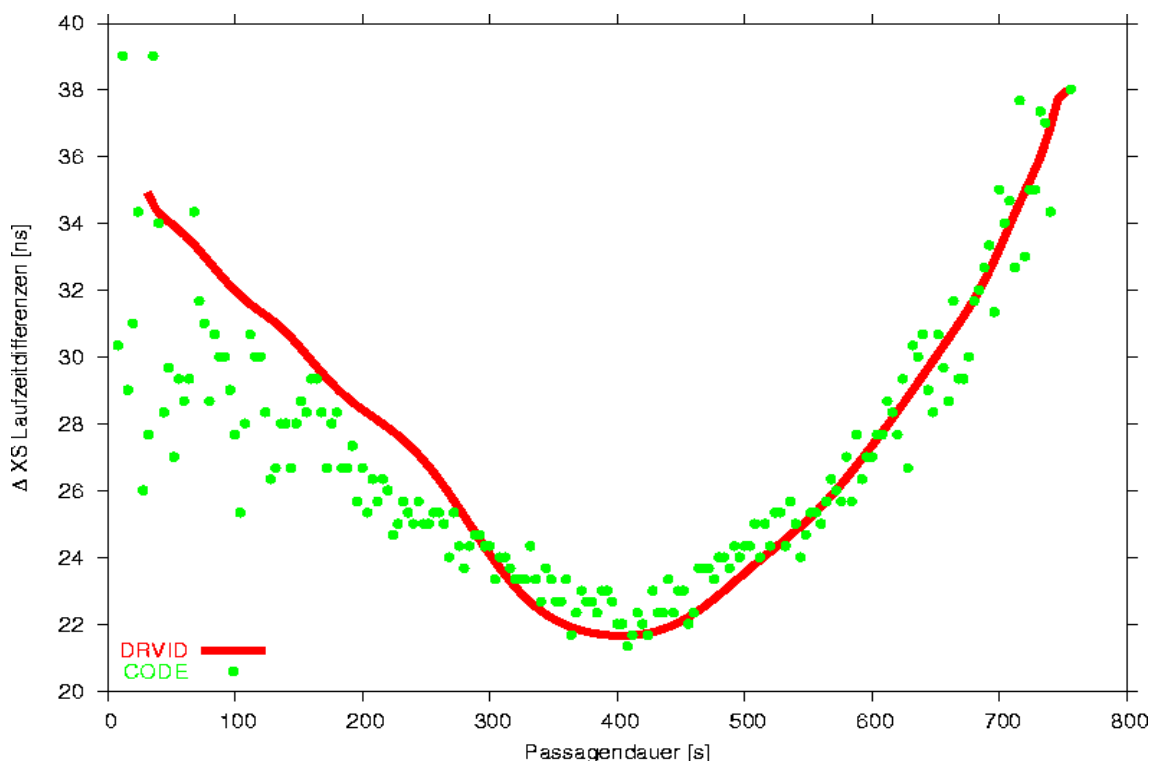


Abb. 8-7-1: Einweg Laufzeitdifferenzen aus Code Messungen und nach dem DRVID Verfahren

Die notwendige Kalibrierung der Laufzeitdifferenzmessungen erfolgte durch Vergleich aller PRARE-Daten zwischen Start von ERS-2 bis Dezember 1998 mit dem Ionosphärenmodell IRI95 (International Reference Ionosphere) und den aus GPS-Beobachtungen abgeleiteten Global Ionospheric Maps (GIM) des IGS-Analysezentrums in Bern. Wegen der geringen Sonnenaktivität im Untersuchungszeitraum stellen beide Modelle eine gute Langzeit-Referenz dar, die dazu genutzt wurde, den Zeit- und Hardwareabhängigen Bias der Bodenstationen zu bestimmen. Die mittlere Abweichung zwischen dem PRARE- und dem Modell-TEC beträgt lediglich wenige Zehntel TECU (10^{16} Elektronen/m²) mit einer Standardabweichung von etwa 3 TECU. PRARE-interne Kalibrierungsverfahren wie die Common-View-Methode, bei der zwei Bodenstationen gleichzeitig Sicht zum Satelliten haben müssen, scheiterten an der durch die geringe Flughöhe von ERS-2 sehr ungünstigen Geometrie zwischen Stationen und Bordsegment.

Vergleiche des PRARE-TEC mit TOPEX/POSEIDON-Zweifrequenz-Altimeterbeobachtungen zeigten eine realistische mittlere Abweichung von ca. 4 TECU mit einer Standardabweichung von etwa 2.5 TECU. Diese ist primär bedingt durch die verschiedenen Bahnhöhen von TOPEX (1330 km) und ERS-2 (780 km).

Das ERS-2-Altimeter arbeitet lediglich auf einer Frequenz und muss daher mittels eines Modells um den Einfluss der Ionosphäre korrigiert werden. Um die Auswirkung der Nutzung der PRARE-TEC-Beobachtungen innerhalb der Altimeter-Auswertungen abschätzen zu können, wurde für einen Zeitraum von 5 Wochen am Anfang von 1998, wo das PRARE-Netz mit 18 Stationen und 650 Passagen die bisher größte Ausdehnung hatte, ein Kombinationsmodell aus IRI95-Modellwerten und PRARE-Beobachtungen entlang der ERS-2-Bodenspur mit Hilfe einer Spline-Interpolation berechnet. Trotz der guten globalen Verteilung der PRARE-Stationen waren aber durchschnittlich nur 35% der Bodenspur mit PRARE-Beobachtungen bedeckt. Auf dem für die Altimetrie entscheidenden Teil, den Ozeanen, reduzierte sich dieser Anteil auf etwa 15%. Das Kombinationsmodell ist daher nach wie vor sehr an IRI95 angelehnt. Trotz dieser durch die geringe ERS-2-Bahnhöhe bedingten ungünstigen Voraussetzungen, gab es eine Verbesserung der Kreuzungspunktdifferenzen von 0.2 mm (4%), das Rauschen verringerte sich um 0.3 mm. Dieses zeigt das große Potential des PRARE-Systems für die Bestimmung des TEC, das in den nächsten Jahren, wenn die Sonnenaktivität wieder steigen wird und das Bodenstationsnetz evtl. auf die Ozeane ausgeweitet werden kann, weiter zum Tragen kommen kann.

9. Zusammenfassung

Der Aufbau der PRARE-Masterstation für das satellitengestützte Zweiweg-/Zweifrequenz-Entfernungs- und -Dopplermesssystem PRARE konnte bis zum Start von ERS-2 am 21. April 1995 im wesentlichen wie geplant vollzogen werden. Die Aktivitäten hierzu umfassten vor allem den Ausbau und die Wartung der Hardware (Empfangsstation, Zeitsystem, Rechnerverbund) sowie die Pflege und Weiterentwicklung der notwendigen Softwarekomponenten zur Datenvorverarbeitung und Systemkalibrierung. Die Hauptaufgabe des Projektes "Betrieb des PRARE-Bodensegmentes für ERS-2" bestand im Aufbau und in der Koordinierung des globalen Trackingnetzes an Bodenstationen, sowie der Bereitstellung hochgenauer, kalibrierter Range-, Doppler- und Ionosphärenprodukte.

Alle Aufgaben der mit vorliegendem Bericht dokumentierten Projektstufen konnten erfolgreich durchgeführt werden. Zusammenfassend sind folgende Hauptergebnisse zu nennen:

- Die Masterstation in Oberpfaffenhofen war mit Beginn der ERS-2 Mission vollständig aufgebaut und arbeitete kontinuierlich im operationellen Betrieb.
- Das globale Trackingnetz wurde kontinuierlich auf bis zu 18 Stationen ausgebaut, wobei eine gute globale Überdeckung erreicht wurde. Wegen technischer Probleme (Überschreiten der projektierten Lebensdauer) an den Bodenstationen verringerte sich deren Anzahl zu Ende des Förderzeitraums auf etwa 6 Stationen. Zahlreiche Kontakte zu internationalen Instituten wurden aufgebaut, um das Bodenstationsnetz während der ERS-2-Mission zu koordinieren.
- Die PRARE Messdaten wurden kontinuierlich im Speicher des ERS-2-Raumsegmentes aufgezeichnet und beim Überflug über die Monitorstation Stuttgart gedumpte. Nach dem Ausfall des Modul A konnte das Modul B dessen Aufgabe ohne grosse Zeitverzögerung, mit gleicher Genauigkeit übernehmen
- Die Rohdaten konnten kontinuierlich und sehr zuverlässig an der Masterstation in Oberpfaffenhofen zu Range-, Doppler- und Ionosphärenprodukten weiterverarbeitet werden und den Nutzern über einen ftp-Server zur Verfügung gestellt werden.
- Die Datenqualität war durchweg sehr hoch: Das Rauschen der Rangemessungen betrug ca. 2 bis 3 cm (bei Polarstationen wegen der Mehrwegeeffekte an der Solarzellenanlage ca 4-6 cm), das der Dopplerdaten ca. 0.15 bis 0.2 mm/s.
- Die Genauigkeit der Bahnvorhersage zur Voreinstellung der Empfänger in den Bodenstationen und im Raumsegment sowie zur Ausrichtung der Bodenstationsantennen war mit einem durchschnittlichen Vorhersagefehler von 10 bis 200 ms besser als erforderlich.
- Die externe Kalibrierung der PRARE-Rangedaten gegen Laserdaten am GFZ Potsdam ergab innerhalb zahlreicher Messkampagnen, außer einem stabilen Rangebias von -0,3 bis 2,2 cm (RMS < 4 cm) und einem konstanten Timebias von $0 \pm 7 \text{ ns}$ (Station Potsdam), keine weiteren systematischen Fehler.
- Die Bahnbestimmung von ERS-2 mittels PRARE Daten erbrachte Ergebnisse von gleichbleibend hoher Qualität. Trotz der veränderlichen Anzahl von trackenden Stationen hat sich PRARE als primäres Trackingsystem für den ERS-2 voll bewährt.
- Die mit Hilfe von PRARE gewonnenen Werte für den Gesamtelektroneninhalt der Ionosphäre haben eine Genauigkeit von etwa 2 TECU. Eine Nutzung dieser hohen

Qualität zur ionosphärischen Korrektur des ERS-2 Altimeters brachte wegen der mit 15 % geringen Bedeckung der Bodenspuren mit PRARE-Messdaten über den Ozeanen keine wesentliche Verbesserung.

- Die Überwachung des PRARE-Bordoszillators mit Hilfe des Zeitsystems der Masterstation arbeitete vollautomatisch und lieferte eine sehr hohe Stabilität der Ergebnisse. Der den Weltraumbedingungen nahezu unmittelbar ausgesetzte PRARE-Bordoszillator erfüllte mit einer Alterungsrate von lediglich etwa -2.1×10^{-11} pro Tag die gestellten Stabilitätserwartungen.
- Mittels Bodenuhrenvergleich über PRARE lassen sich Atomuhren auf ca 200 ps genau synchronisieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich PRARE als Primärtrackingsystem für den ERS-2 im operationellen Betrieb sehr bewährt und die Genauigkeit der Bahnbestimmung von ERS-2 gegenüber der von ERS-1 signifikant erhöht hat. PRARE hat die an das System in der Designphase gestellten Anforderungen im Langzeitbetrieb über mehrere Jahre voll bestätigt bzw. zum Teil deutlich übertroffen. Eine Verwendung auf weiterführenden Missionen wäre wünschenswert.

10. Darstellung des PRARE-Systems in der Öffentlichkeit

10.1 Veröffentlichungen

- Andersen, P.H., Aksnes, K., Skonnord, H. (1998): Precise ERS-2 Orbit Determination using SLR, PRARE and RA observations. *Journal of Geodesy* 72, 421-429
- Bedrich, S. (1997): A New Method for Highly Precise Two-Way Common-View Time Transfer between Ground-Based Atomic Clocks with PRARE. *Ann. Geophys.* 15 (Suppl. I: Abstr. XXII Gen. Ass. EGS, Wien).
- Bedrich, S. (1998): Hochgenaue satellitengestützte Zeitübertragung mit PRARE. Dissertation, Scientific Technical Report STR98/24, GFZ, Potsdam.
- Bedrich, S.; Enninghorst, K.; Flechtner, F.; Teubel, A. (1997): Das Satellitentrackingsystem PRARE - Systemstatus und Anwendungsbeispiele. 2. Geodät. Woche, Berlin.
- Bedrich, S.; Flechtner, F. (1996): PRARE One resp. Two Years in Orbit - Performance Analysis of the Instruments' Oscillators onboard Meteor-3/7 and ERS-2. *Proc. 10th Eur. Freq. Time Forum (EFTF)*, Brighton, 200-205.
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Förste, Ch.; Reigber, Ch.; Teubel, A. (1997a): PRARE System Performance. *Ann. Geophys.* 15 (Suppl. I: Abstr. XXII Gen. Ass. EGS, Wien).
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Förste, Ch.; Reigber, Ch.; Teubel, A. (1997b): PRARE System Performance. *Proc. 3rd ERS Sci. Symp. (ESA SP-414)*, Florenz.
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Massmann, F.-H.; Reigber, Ch. (1996): Interface Document for Operational PRARE/ERS-2 Data Exchange between Master Station Oberpfaffenhofen and Monitoring and System Command Station Stuttgart. Scientific Technical Report STR96/11, GFZ, Potsdam.
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Reigber, Ch. (1995): PRARE Routine Operations Plan. Scientific Technical Report STR95/12, GFZ, Potsdam.
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Reigber, Ch.; Teubel, A. (1996): PRARE - A New Tool for Satellite Navigation and Geosciences. *Ann. Geophys.* 14 (Suppl. I: Abstr. XXI Gen. Ass. EGS, Den Haag).
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Reigber, Ch.; Teubel, A. (1997): Aufbau der PRARE-Masterstation sowie Einrichtung und Betrieb des PRARE-Bodensegments und Navigationsunterstützung der PRARE/Meteor-3/7-Mission. Abschlußbericht, GFZ, Potsdam.
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Teubel, A. (1997): Modelling of the Ionosphere with PRARE. *Ann. Geophys.* 15 (Suppl. I: Abstr. XXII Gen. Ass. EGS, Wien).
- Bedrich, S.; Flechtner, F.; Teubel, A. (1998): Accuracy Verification of the PRARE Measurement Data and Calibration Techniques. *Ann. Geophys.* 16 (Suppl. I: Abstr. XXIII Gen. Ass. EGS, Nizza).
- Bedrich, S.; Hahn J. (1995): Satellitengetragener H-Maser als hochpräzise Zeitreferenz für ein zukünftiges GNSS. *Jahrb. DGLR*, Bonn, 573-581.

- Bedrich, S.; Hahn J. (1997): A New Method for Two-Way Common-View Clock Synchronization of Ground-Based Atomic Clocks with PRARE. Proc. 11th Eur. Freq. Time Forum (EFTF), Neuchâtel, 200-204.
- Bedrich, S.; Härting, A. (1995): Monitoring of the PRARE Clock Onboard Meteor-3/7: Operations and Performance Analysis. Proc. 9th Eur. Freq. Time Forum (EFTF), Besançon.
- DGFI (1986a): The German ERS-1 Off-Line Ground Segment: Processing and Archiving of ERS-1 Radar Altimeter and Tracking Data (Requirements, Interfaces, Products). TN 24, DGFI, München.
- DGFI (1986b): The German ERS-1 Off-Line Ground Segment: Tracking Network Realization and Support. TN 25, DGFI, München.
- DGFI (1986c): The German ERS-1 Off-Line Ground Segment: PRARE System and Data. TN 26, DGFI, München.
- DGFI (1987): The German ERS-1 Off-Line Ground Segment: Orbit Generation (Predictions, Preliminary, Precise). TN 28, DGFI, München.
- Engelke, G.; Ostendorf, F.-J. (1992): Entwicklung einer geometrischen Methode zur terrestrischen Punktbestimmung aus PRARE-Laufzeitbeobachtungen. Diplomarbeit, Insitut für Theoretische Geodäsie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.
- Enninghorst, K.; Bedrich, S.; Flechtner, F.; Teubel, A. (1998): The Motion of the PRARE Station Neumayer Located on a Floating Ice-Shelf in Antarctica. Ann. Geophys. 16 (Suppl. I: Abstr. XXIII Gen. Ass. EGS, Nizza).
- Enninghorst, K; Rentsch, M. (1997): ERS-2 Rapid Products Validation. Scientific Technical Report STR97/13, GFZ, Potsdam.
- ESA (1992): PRARE Failure Review Board - Final Report. Doc. ER-RP-ESA-PR-0214-2.4, ESA/ESTEC, Noordwijk.
- Flechtner, F.; Bedrich, S.; Massmann, F. H. (1997): PRARE/ERS-2: System Status and Results. CSTG Bull. 13, 67-71.
- Flechtner, F.; Bedrich, S.; Teubel, A. (1997): Modelling of the Ionosphere with PRARE. Proc. 3rd ERS Sci. Symp. (ESA SP-414), Florenz.
- Flechtner, F.; Bedrich, S.; Teubel, A. (1998): First Results of Comparisons of PRARE TEC with TOPEX Measurements and with Ionospheric Models. Advances in Space Research 22(6) , 815-818.
- Flechtner, F.; Bedrich, S.; Teubel, A. (1998b): Comparisons of PRARE TEC with TOPEX Measurements and with Ionospheric Models. Ann. Geophys. 16 (Suppl. I: Abstr. XXIII Gen. Ass. EGS, Nizza).
- Flechtner, F.; Härting, A.; Kang, Z.; Massmann, F.-H.; Meixner, H.; Raimondo, J.-C.; Reigber, Ch.; Schwintzer, P. (1994): Study of Geodetic Aspects of the Proposed Joint Experiment on a Meteor-3M Satellite - Final Report. GFZ, Potsdam.
- Flechtner, F.; Jopek, T. J. (1993a): The PRARE Data Preprocessing Software. Bericht ERS-D-pre- 31200, GFZ, Potsdam.

- Flechtner, F.; Jopek, T. J. (1993b): The PRARE Data Preprocessing Software - Software User Manual. Bericht ERS-D-use-31200, GFZ, Potsdam.
- Flechtner, F.; Kaniuth, K.; Reigber, Ch.; Wilmes, H. (1990): The Precise Range And Range-Rate Equipment PRARE: Status Report on System Development, Preparations for ERS-1 and Future Plans. Proc. 2nd Int. Symp. on Prec. Positioning with GPS (GPS '90), Ottawa.
- Flechtner, F.; Reigber, Ch.; Schwintzer, P. (1992): Impact of PRARE Failure on ERS-1 Precise Orbit and Gravity Model. Bericht ERS-D-pra-31200, DGFI, München.
- Flechtner, F. (2000): Bestimmung des Gesamtelektroneninhalts der Ionosphäre aus PRARE-Entfernungs- und Dopplerbeobachtungen, Scientific Technical Report, STR 00/02, GFZ, Potsdam
- Förste, Ch.; Reigber, Ch. (1997): Die Einmessung der PRARE-Bodenstationen und der neuen SLR-Station im lokalen Netz auf dem Telegraphenberg Potsdam. Scientific Technical Report STR97/03, GFZ, Potsdam.
- Gieschen, N.; Schäfer, W. (1984): The Precise Range And Range-Rate Equipment (PRARE) - A Tool for Enhanced Orbit Determination and Geophysical Applications. Proc. Int. Astron. Fed. (IAF).
- Griech, R. (1990): Software-Entwurf für das hochpräzise Satellitenbahnvermessungsinstrument PRARE. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Mikrorechner und Automation, Universität Karlsruhe.
- Hahn, J.; Bedrich, S. (1995): Erweiterung des satellitengetragenen Zweiweg-Entfernungsmeßgerätes PRARE für hochpräzise Zeitübertragung. SPN 3/1995, 100-106.
- Hahn, J.; Bedrich, S. (1996a): "Common View" Clock Synchronization of Remote Atomic Clocks Using GPS and PRARE onboard ERS-2. Proc. 10th Eur. Freq. Time Forum (EFTF), Brighton, 393-398.
- Hahn, J.; Bedrich, S. (1996b): Ultra-Precise Synchronization of Remote Atomic Clocks with PRARE onboard ERS-2. Proc. IEEE 4th Int. Symp. Spread Spectrum Techn. Appl. (ISSSTA), Mainz.
- Hahn, J.; Bedrich, S.; Nau, H. (1995): Study on "H-Maser in Space" as Ultra-Stable Clock for Time Transfer and Time Dissemination - Final Report. DLR, Oberpfaffenhofen.
- Härtling, A. (1995): The Timing System at the PRARE Master Station - Draft Version. Interner Bericht, GFZ, Potsdam.
- Hartl, Ph. (1984): The Precise Range And Range-Rate Equipment PRARE and its Possible Support to the Radar Altimeter Measurements for ERS-1. Proc. Workshop ERS-1 Radar Altim. Prod. (ESA SP-221), Frascati, 153-160.
- Hartl, Ph. (1988): Fernwirktechnik der Raumfahrt: Telemetrie, Telekommando, Bahnvermessung. 2. Aufl., Springer, Berlin/Heidelberg/New York.
- Hartl, Ph.; Reigber, Ch. (1991): Das PRARE-System der ERS-1-Mission. Geowissenschaften 9(4/5), 156-162.

- Hartl, Ph.; Schäfer, W. (1987): Nutzung der Spread-Spectrum-Technik bei Kombination der Aspekte Navigation und Telekommunikation in Satellitensystemen. Teil I: Frequenz 41(11/12), 321-328; Teil II: Frequenz 42(1), 29-34.
- Hartl, Ph.; Schäfer, W.; Reigber, Ch.; Lechner, W. (1990): PRARE on GPS and/or GLONASS. Proc. 4th Eur. Freq. Time Forum (EFTF), Neuchâtel.
- Hartl, Ph.; Schäfer, W.; Reigber, Ch.; Wilmes, H. (1986): PRARE System Description. Proc. Workshop Solid Earth Sci. Appl. Mission Eur. (SESAME) (ESA SP-1080), Chiemsee.
- Hodge, C. C.; Davis, J. A.; Gallop, J. C.; Allan, D. W.; Ashby, N.; Bedrich, S.; Cutler, L. S.; Hahn, J.; Nau, H.; Kern, R. H.; Maleki, L.; Vessot, R. F. C. (1996): Towards 10 Millimeter Real-Time Position Determination and 30 Picosecond Time-Transfer Capability with the Next-Generation of Global Navigation Satellite Systems (GNSS). Proc. ION GPS-96, Kansas City, MO, 1127-1142.
- Isaksson, P. (1994): DORIS, PRARE, and GPS: Three Potential Satellite Tracking Systems - Final Report. Earth Observation Mission Support Division, ESA/ESTEC, Noordwijk.
- Jopek, T. J. (1990): The Ionospheric Correction of the PRARE Range and Range-Rate Observations by PRARE-derived TEC Data. Bericht ERS-D-ion-31200, DGFI, München.
- Jopek, T. J. (1996): The PRARE Raw Data Decoding Software. Interner Bericht, GFZ, Potsdam.
- König, R. (1989): Predictions for ERS-1. Proc. 7th Int. Workshop Laser Ranging Instr., Grasse, 385-392.
- Lechner, W.; Reigber, Ch.; Wilmes, H. (1989): The Precise Range And Range-Rate Equipment PRARE: System Description and Future Perspectives. Proc. ION GPS-89, Colorado Springs, CO.
- Massmann, F. H.; Flechtner, F.; Raimondo, J. C.; Reigber, Ch. (1997): Impact of PRARE on ERS-2 POD. Adv. Space Res. 19(11), 1645-1648.
- Massmann, F. H.; Neumayer, K. H.; Raimondo, J. C.; Enninghorst, K.; Li, H. (1997): Quality of the D-PAF ERS Orbits Before and After Inclusion of PRARE Data. Proc. 3rd ERS Sci. Symp. (ESA SP-414), Florenz.
- Mueller, I. I.; Montag, H.; Reigber, Ch.; Wilson, P. (1996): An IUGG Network of Fundamental Geodynamic Reference and Calibration Stations - Rationale and Recommendations. CSTG Bull. 12, 75-94.
- Müssener, K.-M. (1983): Optimierung von Tracking-Loops hinsichtlich der Anwendung in PRARE. Diplomarbeit, Institut für Luft- und Raumfahrt, Technische Universität Berlin.
- Nortel Dasa (1995): PRARE Ground Station Technical Documentation. Nortel Dasa Network Systems GmbH, Friedrichshafen.
- Rahnemoon, M. (1988): Ein neues Korrekturmodell für Mikrowellen-Entfernungsmessungen zu Satelliten. DGK Reihe C, Heft Nr. 335, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München.
- Reigber, Ch.; Angermann, D.; Flechtner, F.; Kaniuth, K. (1993): ERS-1-Hochpräzisionsbahnen für die Meeresforschung. Abschlußbericht, GFZ, Potsdam

- Reigber, Ch.; Bedrich, S.; Flechtner, F.; Förste, Ch.; Jopek, T.; Massmann, F. H.; Raimondo, J. C. (1995): Results from PRARE on Meteor-3/7 and ERS-2. Proc. XXI Gen. Ass. IUGG, Boulder, CO.
- Reigber, Ch.; Flechtner, F.; Förste, Ch.; Montag, H.; Neubert, R.; Jakowski, N. (1994): PRARE In-Orbit Calibration Plan for ERS-2. Technical Note 94-1.1.2, GFZ, Potsdam.
- Reigber, Ch.; Hartl, Ph. (1989): PRARE/PRAREE System Development Status. CSTG Bull. 11, 157-164.
- Reigber, Ch.; Hartl, Ph. (1990): Das Satellitenbeobachtungssystem PRARE. ZfV 12/1990, 512-519.
- Reigber, Ch.; Hartl, Ph.; Schäfer, W.; Flechtner, F.; Härting, A.; Conrad, M.; Förste, Ch. (1994): Das PRARE-System auf dem Satelliten Meteor-3/7. Geowissenschaften 12(10/11), 296-299.
- Reigber, Ch.; Lechner, W.; Wilmes, H. (1988): ERS-1 and the PRARE System. Proc. 6th Int. Symp. Geodesy Phys. Earth, Potsdam.
- Reigber, Ch.; Massmann, F. H.; Flechtner, F. (1997): The PRARE System and the Data Analysis Procedure. CSTG Bull. 14, 11-19.
- Schäfer, W.; Wilmes, H.; (1986): Precise Range And Range-Rate Equipment (PRARE): System Design and Status of Development. Proc. Workshop Adv. Sat. Radio Tracking, Austin, TX.
- Schmidt, M. (1990): Ein relativistisches Modell für PRARE-Beobachtungen. DGK Reihe C, Heft Nr. 365, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München.
- Thiel, K.-H. (1996): Konzeptionelle Untersuchung für ein ziviles Satellitennavigationssystem. DGK Reihe C, Heft Nr. 470, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München.
- Thomas, C.; Wolf, P.; Uhrich, P.; Schäfer, W.; Nau, H.; Veillet, Ch. (1994): Anticipated Uncertainty Budgets of PRARETIME and T2L2 Techniques as Applied to EXTRAS. Proc. 26th Annu. Precise Time Interv. Appl. Plann. Meet. (PTTI), Greenbelt, MD.
- TimeTech (1996): TM200 Meteorological Sensor Technical Manual. TimeTech GmbH, Stuttgart.
- Vorm, P. v. d. (1996): Evaluation of the PRARE System for the ERS-2 Orbit Determination. MSc. Thesis, Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, Delft University of Technology, Delft.
- Walmsley, R., Moore, Ph. (1998): Analysis of PRARE Data for ERS-2. Proc. 3rd ERS Sci. Symp. (ESA SP-414), Florenz.
- Willis, P. (1996): Precise Satellite Microwave Systems. CSTG Bull. 12, 53-56.
- Wilmes, H.; Reigber, Ch.; Schäfer, W.; Hartl, Ph. (1987): Precise Range And Range-Rate Equipment PRARE on-board ERS-1: Orbitography in Support to Radar Altimetry and Tool for Precise Geodetic Positioning. Proc. XIX Gen. Ass. IUGG, Vancouver.

Zandbergen, R.; Dow, J.M.; Martinez Fadrique, F.; Romay Merino, M.; Piriz, R. (1997): Progress in ERS Orbit and Tracking Data Analysis. Proc. 3rd ERS Sci. Symp. (ESA SP-414), Florenz.

Zhu, S. Y.; Reigber, Ch.; Massmann, F. H. (1996): ERS Standards Used at D-PAF. Interner Bericht, GFZ, Potsdam.

10.2 Vorträge

- Wilmes, H.: "PRARE Tracking Measurements of ERS-1 in Support to the Altimeter Data Processing", Bidston, Birkenhead, UK, February 2, 1988
- Wilmes, H.: "PRARE Tracking System onboard ERS-1", DFVLR, Oberpfaffenhofen, March 14, 1988
- Wilmes, H.: "Nutzung des PRARE-Systems zur Positions- und Attitudebestimmung für die geplante Planetary Telescope Mission", DFVLR, Oberpfaffenhofen, March 14, 1988
- Lechner, W., Wilmes, H.: "PRARE auf GPS-012: Erste Simulationen zur Leistungsfähigkeit des PRARE-Systems zur Bahnbestimmung eines GPS-Satelliten", DFVLR, Köln-Porz, May 3, 1988
- Reigber, Ch.: "PRARE In-Orbit Calibration Plan", EOPAG Meeting, Paris, June 13, 1988
- Lechner, W.: "PRARE on ERS-1: An Experiment for Orbit Determination and Positioning", University of Calgary, Calgary, Canada, July 5, 1988
- Lechner, W, Reigber, Ch.: "The Precise Range And Range Rate Equipment PRARE: An Autonomous Selfcontained Payload Element for Applications on Geodetic and Navigation Satellites", Conf. Land Vehicle Navigation 89, Münster, July 6, 1989
- Reigber, Ch., Wilmes H.: "PRARE: Status and Prospects", IAG General Meeting, Edinburgh, Scotland, August 3, 1989
- Lechner, W., Reigber, Ch.: "The Precise Range And Range Rate Equipment PRARE: System Description and Future Perspectives", ION GPS-89, Institute of Navigation, Satellite Division, 2nd International Technical Meeting, Colorado Springs, Colorado, USA, September 29, 1989
- Lechner, W, Reigber, Ch.: "The PRARE/GPS Experiment: A Contribution to Geodesy, Geodynamics and Navigation", The '89 International Conference of the Royal Institute of Navigation, London, UK, October 19, 1989
- Reigber, Ch.: "PRARE-Einsatz im Zirkumpolargebiet", BMFT, Bonn, August 31, 1990
- Reigber, Ch., Flechtner, F., Kaniuth, K., Wilmes, H.: "PRARE System Preparations for ERS-1 Mission", CDP Investigators Meeting, Greenbelt, USA, October 25/26, 1990
- Reigber, Ch.: "Study Group Preparations", 5th PRARE Tracking Workshop, Oberpfaffenhofen, February 28, 1991
- Flechtner, F.: "Development and Implementation Status of the PRARE Control Segment", 5th PRARE Tracking Workshop, Oberpfaffenhofen, February 28, 1991
- Flechtner, F.: "Modelling of the PRARE range and range rate observations", 5th PRARE Tracking Workshop, Oberpfaffenhofen, February 28, 1991
- Flechtner, F.: "PRARE data preprocessing schedule, communication and data flow Master Station - Users", 5th PRARE Tracking Workshop, Oberpfaffenhofen, March 1, 1991
- Reigber, Ch.: "The PRARE Network", MCC, Moscow, July 11, 1991

- Flechtner, F.: "Status of the PRARE Masterstation and Additional Dumping Site Tromsø", MCC, Moscow, July 11, 1991
- Reigber, Ch., Hartl, Ph.: "The Precise Range And Range Rate Equipment PRARE", XX General Assembly IUGG, IAG Symposium G2, Vienna, August 18, 1991
- Reigber, Ch., Hartl, Ph.: "PRARE onboard GPS", XX General Assembly IUGG, IAG Symposium G2, Vienna, August 20, 1991
- Reigber, Ch., Flechtner, F., Härting, A.: "First Results of PRARE on METEOR-3/7 and PRARE Network Link to ITRF", IERS/IGS Annual Meeting, Paris, March 23, 1994
- Reigber, Ch., Flechtner, F., Härting, A.: "First Assessment of PRARE Performance on the METEOR 3/7 Spacecraft", 30th COSPAR, Session PSD, Hamburg, July 18, 1994
- Flechtner, F., Härting, A., Reigber, Ch.: "Preliminary Analysis of PRARE Data from METEOR-3/7", DARA, Bonn, September 9, 1994
- Bedrich, S.: "Monitoring of the PRARE Clock onboard METEOR-3: Operations and Performance Analysis", 9th European Frequency and Time Forum, Besançon, France, March 8, 1995
- Flechtner, F.: "The PRARE System on METEOR-3 and ERS-2", Hartebeesthoek, Südafrika, 17.03.1995
- Bedrich, S.: "Precise Two-Way Time Transfer to Space-Borne Atomic Clocks", 9th European Frequency and Time Forum, Besançon, France, March 10, 1995
- Flechtner, F.: "Results from PRARE on METEOR-3 and ERS-2", XXI General Assembly of IUGG, Boulder, Colorado, USA, July 11, 1995
- Bedrich, S.: "Satellitengetragener H-Maser als hochpräzise Zeitreferenz für ein zukünftiges GNSS", DGLR-Jahrestagung, Bonn, September 29, 1995
- Flechtner, F.: "PRARE Ground Station Commissioning Report", First ERS-2 Commissioning Review, ESRIN, Frascati, Italy, October 26/27, 1995
- Flechtner, F.: "Status of PRARE Master Station and Data Preprocessing", 2nd International PRARE User Workshop, Potsdam, 29.01.1996
- Bedrich, S.: "PRARE Clock Modeling", 2nd International PRARE User Workshop, Potsdam, 29.01.1996
- Flechtner, F.: "GFZ FTP Server and PRARE Data Distribution", 2nd International PRARE User Workshop, Potsdam, 29.01.1996
- Bedrich, S.: "Precise Clock Comparison using PRARE FR Data", 2nd International PRARE User Workshop, Potsdam, 30.01.1996
- Flechtner, F.: "Improvement of PRARE Data Preprocessing", 2nd International PRARE User Workshop, Potsdam, 30.01.1996
- Bedrich, S.: "The Satellite Tracking System PRARE onboard ERS-2", Fakultät für Astronomie und Geophysik, Universität La Plata, Argentinien, 27.02.1996

- Bedrich, S.: "PRARE One resp. Two Years in Orbit: Performance Analysis of the Instruments' Oscillators onboard ERS-2 and METEOR-3/7", 10th European Frequency and Time Forum, Brighton, UK, March 1996
- Massmann, F.H.: "Quality of the D-PAF ERS Orbits Before and After Inclusion of PRARE Data", 3rd ERS Scientific Symposium, Florenz
- Bedrich, S.: "PRARE: A New Tool for Satellite Navigation and Geosciences", XXI Gen. Ass. of the EGS, Den Haag, May 10, 1996
- Flechtner, F.: "PRARE/ERS-2: System Status and Revision 5 Changes", PRARE Splinter Meeting, 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, U.K., July 17, 1996
- Massmann, F. H.: "Impact of PRARE on ERS-2 POD", 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, U.K., July 18, 1996
- Bedrich, S.: "Leistungsfähigkeit und Nutzungsmöglichkeiten des Mikrowellenmesssystems PRARE", 1. Geodätische Woche, Stuttgart, 8. Oktober 1996
- Bedrich, S.: "Präziser Zeitvergleich mit GPS - Technik und Anwendungen", 41. DVW-Seminar "GPS '96", Potsdam, 8. November 1996
- Bedrich, S.: "PRARE System Status", Jet Propulsion Lab, Dept. Microwave Tracking Systems and Applications, Pasadena, USA, December 10, 1996
- Flechtner, F.: "PRARE/ERS-2: System Status and Results", CSTG sub-commission on Precise Satellite Microwave Systems, Paris, France, October 17, 1996
- Flechtner, F.: "PRARE/ERS-2: System Status and Results", GSOC Kolloquium "Astrodynamik", DLR Oberpfaffenhofen, 13. November 1996
- Bedrich, S.: "A New Method for Two-Way Common-View Synchronization of Ground-Based Atomic Clocks with PRARE", 11th European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, Switzerland, March 5, 1997
- Bedrich, S.: "PRARE System Performance", 3rd ERS Symposium, Florence, Italy, March 18, 1997
- Flechtner, F.: "Modeling the Ionosphere with PRARE", 3rd ERS Symposium, Florence, Italy, March 20, 1997
- Bedrich, S.: "A new method for highly precise two-way common-view time transfer between ground based atomic clocks with PRARE", EGS XXII General Assembly, Vienna, Austria, April 24, 1997
- Flechtner, F.: "PRARE System Performance", EGS XXII General Assembly, Vienna, Austria, April 24, 1997
- Flechtner, F.: "Modelling the Ionosphere with PRARE", EGS XXII General Assembly, Vienna, Austria, April 24, 1997
- Flechtner, F.: "Modelling the Ionosphere with PRARE", Joint COST/IRI Workshop "New Developments in Ionospheric Modelling and Prediction", Institute of Atmospheric Physics, Kühlungsborn, Germany, May 28, 1997

- Bedrich, S.: "PRARE System Status", Presentation at LAPAN, Bogor (Indonesia), June 5, 1997
- Teubel, A.: "Modeling the Ionosphere with PRARE", IAMAS/IAPSO Melbourne, Australia, July 4, 1997
- Bedrich, S.: "PRARE System Status", Presentation at ORSTOM, Noumea (New Caledonia), July 30, 1997
- Bedrich, S.: "Das Satellitentrackingsystem PRARE: Systemstatus und Anwendungsbeispiele", 2. Geodätische Woche, Berlin, 7. Oktober 1997
- Bedrich, S.: "The German CHAMP Satellite Mission", Presentation at ISTRAC, Bangalore, India, December 17, 1997
- Flechtner, F.: "PRARE: A New Tool for Global Ionospheric Modeling", Workshop on Ionospheric Determination and Specification for Ocean Altimetry and GPS Surface Reflections, JPL, Pasadena, California, December 3, 1997
- Bedrich, S., Flechtner, F.: "The PRARE Microwave Satellite Tracking System - Data Acquisition and Control "from End to End"", DLR Oberpfaffenhofen, 16.03.1998
- Bedrich, S.: "Accuracy Verification of the PRARE Measurement Data and Calibration Techniques", XXIII EGS General Assembly, Nice, France, 20.04.1998
- Flechtner, F.: "The PRARE Microwave Satellite Tracking System - Description and Applications", University Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 22.04.1998
- Bedrich, S.: "Comparisons of PRARE TEC with TOPEX measurements and with ionospheric models", (Poster), XXIII EGS General Assembly, Nice, France, 23.04.1998
- Bedrich, S.: "The motion of the PRARE station Neumayer located on a floating ice-shelf in Antarctica", XXIII EGS General Assembly, Nice, France, 24.04.1998
- Bedrich, S.: "Hochgenaue satellitengestützte Zeitübertragung mit PRARE", Universität Stuttgart, Stuttgart, 19.06.1998
- Flechtner, F.: "The Performance of PRARE on ERS-2 and the use of SLR data for PRARE range calibration and coordinate solutions", 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf, Germany, 21.9.1998
- Flechtner, F.: "Revision 6 Data Preprocessing and Calibration of PRARE Ionospheric Data", 2nd PRARE Splinter Meeting, GFZ Potsdam, Potsdam, 29.9.1998
- Teubel, A.: "Status of PRARE Ground Station Network", 2nd PRARE Splinter Meeting, GFZ Potsdam, Potsdam, 29.9.1998
- Raimondo, J.C.: "External Calibration of PRARE Range Data and PRARE Station Coordinate Solution", 2nd PRARE Splinter Meeting, GFZ Potsdam, Potsdam, 29.9.1998

10.3 Teilnahme an Symposien, Konferenzen und Tagungen

- Bedrich, S.: 9th European Frequency and Time Forum, Besancon, France, 09.-11.03.1995
- Flechtner, F.: XXI General Assembly of IUGG, Boulder, Colorado, USA, 10.-14.07.1995
- Bedrich, S.: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress/DGLR Jahrestagung 1995, Bonn-Bad Godesberg, 26.-29.09.1995
- Flechtner, F.: First ERS-2 Commissioning Review, ESRIN, Frascati, Italy, 26.-27.10.1995
- Bedrich, S., Flechtner, F., Teubel, A.: 2nd International PRARE User Workshop, Potsdam, 29./30.01.1996
- Bedrich, S. : 10th European Frequency and Time Forum (10th EFTF), Brighton, Grossbritannien, 04.-08.03.1996
- Bedrich, S.: XXI Gen. Ass. of the EGS, Den Haag, May 6-10, 1996
- Flechtner, F.: 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, U.K., July 17, 1996
- Massmann, F. H.: 31st COSPAR Scientific Assembly, Birmingham, U.K., July 17, 1996
- Bedrich, S.: 1. Geodätische Woche, Stuttgart, 7.-11. Oktober 1996
- Bedrich, S.: 41. DVW-Seminar "GPS ' 96", Potsdam, 7./8. November 1996
- Bedrich, S.: 11th European Frequency and Time Forum (EFTF), Neuchatel, Switzerland, March 4-7, 1997
- Bedrich, S.: 3rd ERS Symposium, Florence, Italy, March 17-21, 1997
- Flechtner, F.: 3rd ERS Symposium, Florence, Italy, March 17-21, 1997
- Massmann, F. H.: 3rd ERS Symposium, Florence, Italy, March 17-21, 1997
- Bedrich, S., Flechtner, F.: EGS XXII General Assembly, Vienna, Austria, April 21-25, 1997
- Flechtner, F.: Joint COST/IRI Workshop "New Developments in Ionospheric Modelling and Prediction", Institute of Atmospheric Physics, Kühlungsborn, Germany, May 27-30, 1997
- Teubel, A.: IAMAS/IAPSO Melbourne, Australia, July 1-9, 1997
- Bedrich, S.: 2. Geodätische Woche, Berlin, 6.-11. Oktober 1997
- Flechtner, F.: Workshop on Ionospheric Determination and Specification for Ocean Altimetry and GPS Surface Reflections, JPL, Pasadena, California, December 2-4, 1997
- Bedrich, S.: 12th European Frequency and Time Forum (EFTF), Warschau, Polen, 10.-12.03.1998
- Bedrich, S.: XXIII EGS General Assembly, Nice, France, 20.-24.04.1998
- Flechtner, F.: 11th International Workshop on Laser Ranging, Deggendorf, Germany, 21.9.1998

Flechtner, F., Teubel, A., Raimondo, J.C.: 2nd PRARE Splinter Meeting, GFZ Potsdam, Potsdam, 29.9.1998

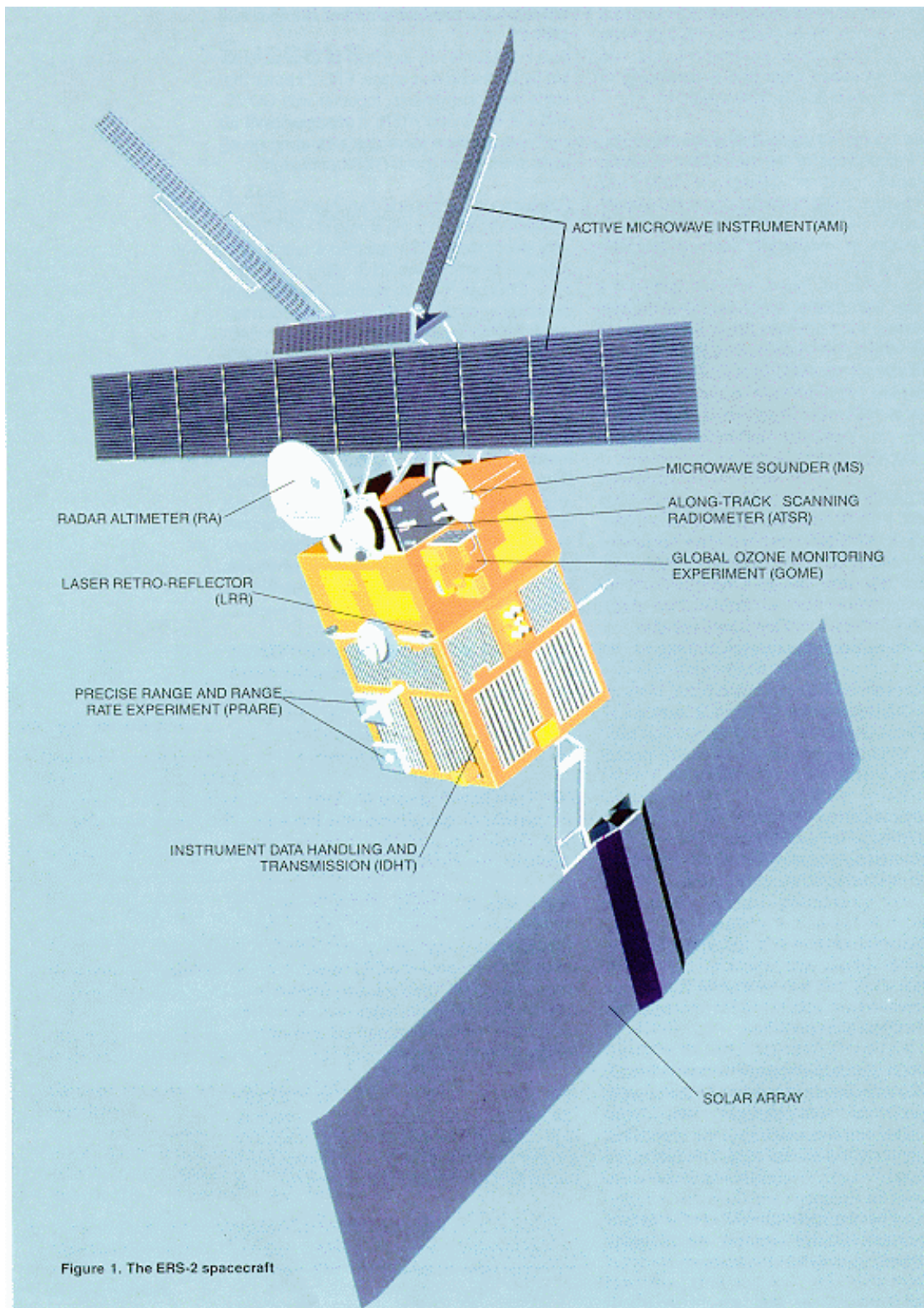
Flechtner, F., Teubel, A., Raimondo, J.C.: 2nd PRARE Splinter Meeting, GFZ Potsdam, Potsdam, 29.9.1998

10.4 Sonstiges

Installation einer PRARE Bodenstation auf der Sonderausstellung „50 Jahre Deutsche Geodätische Kommission (DGK)“, Bayrische Akademie der Wissenschaften, München, 25.10. 2002

11. Referenzen

Biancale, R., Balmino G., Lemoine, J.-M., Marty, J.-C., Moynot, B. Barlier, F., Exertier, P. Laurain, O., Gegout, P., Schwintzer, P., Reigber, Ch., Bode, A., Koenig, R., Massmann, F.H., Raimondo, J.C., Schmidt, R., Zhu, S.Y. A new global Earth' s gravity field model from satellite orbit perturbations: GRIM5-S1 Geophysical Research Letters, 27(22), pp. 3611-3614, 2000



Anhang 1: Ansicht des europäischen Erdbeobachtungssatelliten ERS-2



ISSN 1610-0956