

A. Reinhold

**Basislinienbestimmung mit
GPS-Daten an Bord TerraSAR-X
und TanDEM-X im Hinblick auf
die Modellierung der
Bahnmanöver**

Scientific Technical Report STR13/12

Recommended citation:

Reinhold, A. (2013), Basislinienbestimmung mit GPS-Daten an Bord TerraSAR-X und TanDEM-X im Hinblick auf die Modellierung der Bahnmanöver. *Scientific Technical Report 13/12, GFZ German Research Centre for Geosciences.*

Citation example for individual chapters:

Reinhold, A. (2013) Kombinierte Bahlösung von zwei LEO Satelliten. In: Reinhold, A., Basislinienbestimmung mit GPS-Daten an Bord TerraSAR-X und TanDEM-X im Hinblick auf die Modellierung der Bahnmanöver (pp.47-50). *Scientific Technical Report 13/12, GFZ German Research Centre for Geosciences.*

Imprint

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

Telegrafenberg
D-14473 Potsdam

Published in Potsdam, Germany
November 2013

ISSN 1610-0956

DOI: 10.2312/GFZ.b103-13128
URN: urn:nbn:de:kobv:b103-13128

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



Basislinienbestimmung mit GPS-Daten an Bord TerraSAR-X und TanDEM-X im Hinblick auf die Modellierung der Bahnmanöver

Diplomarbeit im Studiengang
Geodäsie und Geoinformatik
an der Universität Stuttgart

Anton Reinhold

Stuttgart, Oktober 2013

Betreuer: Dr. Rolf König
GeoForschungsZentrum Potsdam, c/o Oberpfaffenhofen

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Nico Sneeuw
Universität Stuttgart

Erklärung der Urheberschaft

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Waiblingen, den 31.10.2013

(Ort, Datum)

(Unterschrift)

Abstract

For the exploitation of TanDEM-X mission data the accuracy of the baseline, i.e. the distance between the two satellites TanDEM-X and TerraSAR-X, is of crucial importance. The most prominent factor in precise orbit determination and consequently also in precise baseline determination is relying on the correct estimation of all forces acting on the satellite during its course on the orbit. In particular the correct estimation of maneuvers appearing like an additional disturbing force plays an important role. The maneuver estimation in EPOS-OC is done by a special algorithm that approximates the disturbing force of a maneuver. In this thesis the maneuver parametrization of EPOS-OC is revised and improved.

In the first part of the thesis an overall description of the orbit calculation is given and various models are explained. In the second part the practical investigation of orbit determination with EPOS-OC is performed. The accuracy of different approaches will be investigated where the absolute position accuracy will be checked based on independent SLR observations. In the next part the accuracy of the baselines computed with the current maneuver parametrization will be examined in a relative comparison with baseline solutions from other software packages. At the end a new maneuver parametrization will be developed. Its accuracy and stability by orbit determination will be examined and the results will be presented.

Keywords: *TanDEM-X, TerraSAR-X, precise orbit determination, baseline determination, EPOS-OC, maneuver estimation.*

Zusammenfassung

Bei der Auswertung von Messdaten der TanDEM-X Mission ist die Genauigkeit der Basislinien (der Abstand zwischen den beiden Satelliten) von entscheidender Bedeutung. Einer der wichtigen Faktoren bei der Durchführung einer hochgenauen Bahnberechnung und in Folge davon auch einer genauen Basislinienbestimmung ist die richtige Schätzung aller Störkräfte, die auf einen Satelliten auf seiner Umlaufbahn wirken. Insbesondere die richtige Schätzung der Manöver eines Satelliten, die wie eine zusätzliche Störkraft auf die Bahn wirken, spielt hierbei eine wichtige Rolle. Die Manöverschätzung in EPOS-OC erfolgt mit Hilfe eines speziellen Algorithmus, der die Störkraft eines Manövers approximieren soll. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Manöverparametrisierung überarbeitet und verbessert.

Im ersten Teil der Arbeit wird eine generelle Vorstellung der Bahnberechnung durchgeführt und verschiedene Modelle der Bahnberechnung vorgestellt. Im zweiten Teil wird anschließend die praktische Bahnberechnung mit EPOS-OC durchgeführt. Hier wird unter anderem die Genauigkeit der Bahnbestimmung von verschiedenen Berechnungsverfahren bei EPOS-OC untersucht, sowie auch die absolute Positionsgenauigkeit der beiden Satelliten mit Hilfe von SLR-Beobachtungen überprüft. Weiter wird die Genauigkeit der Basislinien, die aus der Bahnberechnung mit der aktuellen Manöverparametrisierung stammen, im Rahmen eines relativen Vergleichs mit Basislinien aus Berechnungen mit anderen Programmpaketen untersucht. Anschließend wird eine neue Manöverparametrisierung entwickelt. Diese wird im Anschluss darauf auf ihre Genauigkeit und Stabilität in der Berechnung untersucht, und die Ergebnisse hierfür werden vorgestellt.

Schlagwörter: *TanDEM-X, TerraSAR-X, präzise Bahnbestimmung, Basislinienbestimmung, EPOS-OC, Manöverschätzung.*

Danksagung

Ich möchte mich bei allen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben, bedanken. Ein besonderer Dank geht an meine Eltern, die mich während meines Studiums unterstützt hatten, sowie an meinen Betreuer Dr. Rolf König, der mich bei allen möglichen Fragen und Problemen unterstützt hatte, und diese Arbeit erst ermöglicht hat. Ein Dank geht auch an das komplette Team von GFZ Oberpfaffenhofen für die Hilfestellungen und die tolle Zeit, die ich während meiner Arbeit dort verbracht hatte. Ein weiterer Dank geht auch an Dipl.-Geogr. René Pasternak, der für mich diese Arbeit vermittelt hat.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XXI
1 Einleitung	1
2 Die TanDEM-X Mission	3
3 Grundlagen der Bahnberechnung	7
3.1 Dynamisches Modell	8
3.1.1 Einfluss des Erdgravitationsfeldes	8
3.1.2 Einfluss der Gravitationsfelder anderer Himmelskörper im Sonnensystem	10
3.1.3 Einfluss der Gezeiten	11
3.1.4 Einfluss der Sonnenstrahlung	14
3.1.5 Einfluss der atmosphärischen Reibung	17
3.2 Geometrisches Modell	18
3.2.1 Koordinatentransformation zwischen einem erdfesten und einem inertialen System	18
3.2.2 Einfluss der Gezeiten auf die Stationskoordinaten	21
3.2.3 Einfluss der Lithosphärenbewegungen auf die Stationskoordinaten	22
3.3 Beobachtungsmodell	24
3.3.1 GPS	24
3.3.2 Satellite Laser Ranging	30
4 Bahnberechnung mit EPOS-OC	35
4.1 Berechnung der GPS Bahnen und Uhren	35
4.2 Berechnung der Low Earth Orbit Bahnen	37
4.3 Kombinierte Bahnlösung von zwei LEO Satelliten	47
4.4 Schätzung der Bahngüten	50
4.4.1 Schätzung der Bahngüte der TerraSAR-X/TanDEM-X-Bahnen mit SLR Beobachtungen	50
4.4.2 Vergleich der Einzelbahnen und Bahnen aus der kombinierten Bahnberechnung	75
4.5 Untersuchung der Genauigkeit der Basislinien	104
4.6 Schätzung der Manöverparameter in EPOS-OC	107
4.6.1 Entwicklung einer neuen Manöverparametrisierung	115
4.6.2 Untersuchung der Stabilität der neuen Manöverparametrisierung	119
4.6.3 Untersuchung der Genauigkeit der neuen Manöverparametrisierung	129
5 Zusammenfassung der Ergebnisse	137
Anhang	XXIII
Literaturverzeichnis	XXIX

Abbildungsverzeichnis

1	Aufnahmemodi von SAR am Beispiel von TerraSAR-X	3
2	Aufnahmemodi von TanDEM-X und TerraSAR-X	4
3	Helix-Bahnkonfiguration von TanDEM-X und TerraSAR-X	4
4	Beobachtungszusammenhang in der Bahnberechnung.	7
5	Gravitationseinfluss eines Himmelskörpers auf die Satellitenposition.	10
6	Koordinatenübergang zwischen ITRS und GCRS.	19
7	Verschiebungsvektoren der DTRF2008 Referenzstationen aufgrund der Plattenbewegungen der Erde	23
8	Erdplattenmodell APKIM2005	23
9	Messablauf beim Satellite Laser Ranging	31
10	Messbedingte Korrekturen bei SLR	32
11	Verteilung der Beobachtungsstationen vor der Optimierung.	35
12	Verteilung der Beobachtungsstationen nach der Optimierung.	36
13	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	41
14	Residuen der Phasenbeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	41
15	RMS und Standardabweichung der Codebeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	42
16	RMS und Standardabweichung der Phasenbeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	42
17	Anzahl der akzeptierten Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	43
18	Manövergeschwindigkeiten des TanDEM-X entlang jeder Achse.	43
19	Residuen der Codebeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	44
20	Residuen der Phasenbeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	44
21	RMS und Standardabweichung der Codebeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	45
22	RMS und Standardabweichung der Phasenbeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	45
23	Anzahl der akzeptierten Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen und kinematischen Berechnung	46
24	Manövergeschwindigkeiten des TerraSAR-X entlang jeder Achse.	46
25	Residuen der Code- und Phasenbeobachtungen bei der kombinierten Berechnung der TanDEM-X-/TerraSAR-X-Bahnen	49
26	RMS und Standardabweichung der Code- und Phasenbeobachtungen bei der kombinierten Berechnung der TanDEM-X-/TerraSAR-X-Bahnen	49
27	Anzahl der akzeptierten Beobachtungen bei der kombinierten Berechnung der TanDEM-X-/TerraSAR-X-Bahnen.	50
28	Verteilung der SLR-Stationen.	52
29	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.	52
30	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.	52
31	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.	53
32	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.	53
33	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.	53
34	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.	53

35	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.	54
36	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.	54
37	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.	54
38	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.	54
39	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.	55
40	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.	55
41	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.	55
42	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.	55
43	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.	56
44	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.	56
45	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.	56
46	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.	56
47	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.	57
48	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.	57
49	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	57
50	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	57
51	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	58
52	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	58
53	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	58
54	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	58
55	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	59
56	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	59
57	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	59
58	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.	59
59	Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Dynamische Berechnung.	64
60	RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Dynamische Berechnung.	64
61	Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Kinematische Berechnung.	64
62	RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Kinematische Berechnung.	64

63	Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Dynamische Berechnung.	65
64	RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Dynamische Berechnung.	65
65	Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Kinematische Berechnung.	65
66	RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Kinematische Berechnung.	65
67	Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TanDEM-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.	66
68	RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TanDEM-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.	66
69	Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TerraSAR-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.	66
70	RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TerraSAR-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.	66
71	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	68
72	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	68
73	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	68
74	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	68
75	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	69
76	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	69
77	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	69
78	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	69
79	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	70
80	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	70
81	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	70
82	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	70
83	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	71
84	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	71
85	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	71
86	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	71
87	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	72
88	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	72
89	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	72
90	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	72

91	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	73
92	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	73
93	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	73
94	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	73
95	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	74
96	Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	74
97	Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	74
98	Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	74
99	RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	75
100	Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.	75
101	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.	77
102	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.	77
103	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.	77
104	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.	78
105	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.	78
106	Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.	78
107	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.	79
108	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.	79
109	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.	79
110	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.	80
111	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.	80
112	Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.	80

113	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.	81
114	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.	81
115	Differenzen der Positionen des der TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.	81
116	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.	82
117	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.	82
118	Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.	82
119	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.	83
120	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.	83
121	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.	83
122	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.	84
123	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.	84
124	Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.	84
125	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen aus der Bernese Auswertung vom 09.03.2012, 11 Uhr.	92
126	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen aus der Bernese Auswertung vom 09.03.2012, 11 Uhr.	92
127	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	92
128	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	93
129	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	93
130	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	93

131	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	94
132	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	94
133	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	94
134	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	95
135	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	95
136	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.	95
137	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	99
138	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	99
139	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	99
140	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	100
141	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	100
142	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	100
143	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	101
144	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	101
145	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	101
146	Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	102
147	Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	102
148	Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.	102
149	Statistische Auswertung der Differenzen der Basislinien von EPOS-OC und Bernese.	105
150	Statistische Auswertung der Differenzen der Basislinien von EPOS-OC und GSOC.	106

151	Statistische Auswertung der Differenzen der Basislinien von Bernese und GSOC.	106
152	Auszug aus der EPOS-OC Konfigurationsdatei mit der aktuellen Manöverparametrisierung.	108
153	Auszug aus der EPOS-OC Konfigurationsdatei mit der Standard Manöverparametrisierung.	108
154	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und Bernese	110
155	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und GSOC	110
156	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich Bernese und GSOC	110
157	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 30.04.2012, 23 Uhr.	113
158	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 19.04.2012, 11 Uhr.	113
159	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 02.04.2012, 23 Uhr.	114
160	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr.	114
161	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr.	115
162	Neue Manöverparametrisierung in EPOS-OC.	118
163	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 19.03.2012, 23 Uhr.	121
164	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Vergleichsbahnbogen am 06.03.2012, 11 Uhr.	122
165	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 19.03.2012, 23 Uhr nach der Eliminierung der schlechten Beobachtungen.	123
166	Residuen der Code Beobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 20.04.2012, 23 Uhr.	124
167	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Vergleichsbahnbogen am 20.05.2012, 23 Uhr.	125
168	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 20.04.2012, 23 Uhr nach der Eliminierung der schlechten Beobachtungen.	126
169	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 21.04.2012, 11 Uhr.	127
170	Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 21.04.2012, 11 Uhr aus der Berechnung mit neuen Anfangswerten.	128
171	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und Bernese mit der aktuellen Manöverparametrisierung	130
172	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und Bernese mit der neuen Manöverparametrisierung 130	
173	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und GSOC mit der aktuellen Manöverparametrisierung131	
174	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und GSOC mit der neuen Manöverparametrisierung 131	
175	Standardabweichung und RMS der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich Bernese und GSOC	131
176	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 30.04.2012, 23 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.	132
177	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 19.04.2012, 11 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.	133
178	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 02.04.2012, 23 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.	133
179	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.	134
180	Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.	134

Tabellenverzeichnis

1	Love Koeffizienten mit Grad $l = 2$ für ein elastisches und ein unelastisches Erdmodell	13
2	Einfluss der GPS Fehler auf die gemessene Pseudostrecke	30
3	Übersicht über die Qualitätsparameter für das Akzeptieren einer Bahn.	39
4	Maximale Residuen als Eliminierungskriterien für schlechte Beobachtungen.	39
5	Eliminierungskriterien für schlechte Beobachtungen, berechnet als ein Vielfaches der σ .	40
6	Statistische Auswertung der Code- und Phasenresiduen von TanDEM-X und TerraSAR-X über den gesamten Analysezeitraum.	47
7	Statistische Auswertung der Code- und Phasenresiduen aus allen Berechnungen über den gesamten Analysezeitraum.	50
8	Statistische Auswertung der Residuen der SLR-Beobachtungen für TanDEM-X und TerraSAR-X.	61
9	Statistische Auswertung der Residuen der SLR-Beobachtungen für TanDEM-X und TerraSAR-X nach Eliminierung schlechter Stationen. Globale Werte über alle Stationen.	67
10	Statistische Auswertung der SLR-Residuen aus den untersuchten Bahnbögen.	85
11	Statistische Auswertung der SLR-Residuen aus der Vermessung der Bernese-Bahnen.	89
12	Statistische Auswertung der SLR-Residuen aus der Vermessung der GSOC-Bahnen.	96
13	Globalwerte der SLR-Residuen der untersuchten Bahnen.	103
14	Statistische Auswertung der Basisliniendifferenzen über den gesamten Berechnungszeitraum.	107
15	Klassifizierung der Bahnbögen mit Manövern.	111
16	Übersicht aller empirischen Beschleunigungen der neuen Manöverparametrisierung	119
17	Zusammenfassung der Ergebnisse aller Berechnungen.	120
18	Statistische Auswertung der Basisliniendifferenzen aus der Berechnung mit der alten und neuen Manöverparametrisierung.	129
19	Statistische Auswertung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen aus unterschiedlichen Berechnungen.	136
21	Zusammenfassung der statistischen Auswertungen der Residuen der SLR-Beobachtungen für TanDEM-X und TerraSAR-X.	137
22	Zusammenfassung der statistischen Auswertungen der Basisliniendifferenzen aus der Berechnung mit der alten und neuen Manöverparametrisierung.	138
23	Fehlerquoten in der Bahnberechnung mit der neuen und alten Manöverparametrisierung.	138

1 Einleitung

Seit im Juni 2010 der deutsche Fernerkundungssatellit TanDEM-X sein Betrieb aufgenommen hat, wurde der Beginn einer neuen wichtigen Tandem-Mission eingeläutet. Zusammen mit seinem Schwestersatelliten TerraSAR-X, der bereits drei Jahre zuvor gestartet wurde, sollen die beiden Satelliten eine Reihe von wichtigen Aufgaben übernehmen, allen voran die Generierung eines hochgenauen globalen Höhenmodells (DHM). Grundlage dafür stellt ein enger Formationsflug der beiden Satelliten dar, der eine exakte Positionierung der Satelliten erfordert.

Zum Erreichen ihrer Missionsziele führen beide Satelliten SAR-Aufnahmen (*Synthetic Aperture Radar*) durch, die interferometrisch ausgewertet werden. Für diese Auswertung werden hochgenauen Daten über die Basislinie zwischen den beiden Satelliten benötigt. Diese werden vom Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) mit der hauseigenen Software EPOS-OC (*Earth Parameter and Orbit System - Orbit Computation*) im Rahmen einer aufwendigen Bahnberechnung bestimmt. Eine der großen Schwierigkeiten bei der Bahnbestimmung mit EPOS-OC stellen die Manöver der Satelliten dar. Während dieser kurzen Zeiträume erfahren die Satelliten eine zusätzliche Kraft, die sich wie eine Störkraft auf die Bahn auswirkt. Die richtige Berücksichtigung dieser Kraft während der Bahnberechnung ist essentiell, um eine hohe Genauigkeit in der Positions- und folgend auch in der Basislinienbestimmung zu erreichen. Grundlage hierfür ist in EPOS-OC ein Algorithmus, der die Störkräfte aufgrund der Manöver approximieren soll. Dieser Algorithmus soll nun im Rahmen dieser Arbeit überprüft und eine neue Vorgehensweise zur Approximierung der Manöver entwickelt werden. Ferner werden auch einige Untersuchungen zu generellen Genauigkeit der Bahn- und Basislinienbestimmung durchgeführt.

Die Gliederung der Arbeit umfasst hierfür mehrere Kapitel. Als erstes werden im kommenden Kapitel 2 die beiden Satelliten TanDEM-X und TerraSAR-X und die Eigenschaften ihrer Mission kurz vorgestellt. Im nächsten Kapitel 3 werden die theoretischen Grundlagen der Bahnbestimmung erläutert. Diese werden anhand verschiedener Bereiche (Modelle) in der Bahnbestimmung gegliedert, und jedes Modell einzeln behandelt und vorgestellt. Im darauf folgenden Kapitel 4 werden schließlich die eigentlichen Hauptthemen dieser Arbeit behandelt. Diese umfassen unter anderem die Genauigkeitsuntersuchung der Bahnberechnung im ausgewählten Analysezeitraum, Untersuchung der absoluten Positionsgenauigkeit der Satelliten, Genauigkeit der Basislinien, sowie die Entwicklung einer neuen Manöverparametrisierung in EPOS-OC. Abschließend werden im letzten Kapitel 5 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und vorgestellt.

2 Die TanDEM-X Mission

TanDEM-X und TerraSAR-X sind zwei Erdbeobachtungssatelliten, die in ca. 514 km Höhe in einer geschlossenen Formation auf jeweils einer sonnensynchronen Bahn um die Erde kreisen. Die beiden Satelliten sind im Rahmen einer öffentlich-privaten Partnerschaft zwischen DLR (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) und EADS Astrium GmbH (*European Aeronautic Defence and Space*) entstanden. Der Start von TerraSAR-X erfolgte am 15 Juni 2007, gefolgt von dem Start des TanDEM-X am 21 Juni 2010.

Die Hauptaufgabe der TanDEM-X Mission besteht in der Generierung eines globalen hochauflösenden digitalen Höhenmodells. Das DHM soll dabei eine Auflösung von 12×12 Metern besitzen und über eine absolute Höhengenaugigkeit von ca. 10 Metern verfügen. Zu diesem Zweck sind beide Satelliten mit einem modernen hochgenauen SAR-Instrument ausgestattet, das im X-Band arbeitet und interferometrische SAR-Aufnahmen durchführt. Hier wird auch der Vorteil der geschlossenen Satellitenformation deutlich. So können dadurch die für eine interferometrische Auswertung notwendige stereographische Aufnahmen durch den Einsatz von zwei Satelliten nahezu simultan erfolgen. Im Gegensatz dazu werden bei nur einem Satelliten für die gleiche Aufgabe mehrere Bahnumläufe notwendig, was zu einer Verringerung der Genauigkeit, beispielsweise aufgrund von zeitlichen Veränderungen in der Atmosphäre zwischen zwei Bahnumläufen, führen kann.

Die SAR-Instrumente der beiden Satelliten unterstützen alle drei gängigen Aufnahmemodi: ScanSAR, Stripmap und Spotlight (vgl. Abbildung 1). So charakterisiert sich der *ScanSAR Modus* durch einen flexiblen Auslenkwinkel der Antenne, wodurch ein größeres Gebiet nach und nach abgetastet werden kann. Beim *Stripmap Modus* wird dagegen der Auslenkwinkel der Antenne fixiert, so dass ein kontinuierliches Aufnahmeband parallel zur Flugbahn abgetastet wird. Der *Spotlight Modus* charakterisiert sich wiederum dadurch, dass hier die Antenne während des Überfluges stets auf ein bestimmtes Gebiet ausgerichtet wird, so dass nur dieses kontinuierlich abgetastet wird. Dies ist besonders dann praktisch, wenn hochgenaue Daten von einem oder mehreren fest definierten Gebieten benötigt werden.

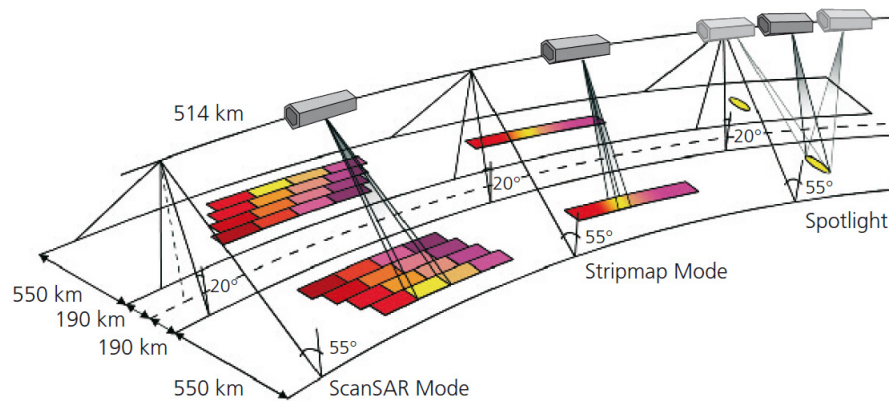


Abbildung 1: Aufnahmemodi von SAR am Beispiel von TerraSAR-X. (Quelle: <http://www.dlr.de>).

Die Datenerfassung im Rahmen des Formationsfluges der beiden Satelliten kann nach Krieger et al. (2007) in verschiedenen operationellen Modi erfolgen. Dazu gehören unter anderem der monostatische, der bistatische und der abwechselnd bistatische Modus (vgl. Abbildung 2 auf der nächsten Seite). So führen im monostatischen Modus (vgl. das linke Bild in der Abbildung 2) die beiden Satelliten die Aufnahmen unabhängig von einander durch. Im bistatischen Modus (vgl. das mittlere Bild in der Abbildung 2) fungiert hingegen einer der beiden Satelliten als Transmitter und sendet das Radarsignal aus, beide Satelliten empfangen anschließend simultan das reflektierte

Signal. Der abwechselnd bistatische Modus (vgl. das rechte Bild in der Abbildung 2) funktioniert analog wie der bistatische Modus, hier wechseln sich jedoch die Satelliten in der Transmitterrolle nach jeder Aufnahme ab. Diese drei operationellen Modi sind weiter mit den SAR-Modi ScanSAR, Stripmap und Spotlight kombinierbar.

Für die Generierung des digitalen Höhenmodells wird der bistatische Stripmap Modus verwendet. Einer der Vorteile dieses Modus ist, dass hier die Energie zum Signalausenden gespart wird, da nur ein Satellit als Transmitter fungiert. Des weiteren kann die Messgenauigkeit durch das simultane Empfangen des reflektierten Signals verbessert werden, da beide Satelliten das Signal unter annähernd identischen Bedingungen empfangen (vgl. Krieger et al., 2007).

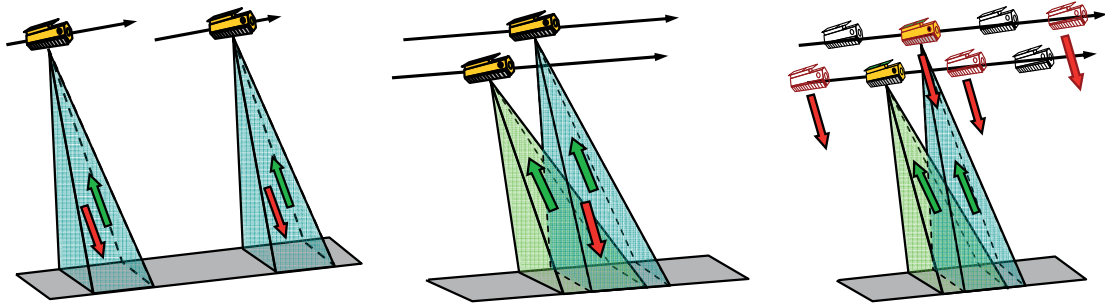


Abbildung 2: Aufnahmemodi von TanDEM-X und TerraSAR-X. (Quelle: Krieger et al., 2007).

Die oben beschriebenen Aufnahmemodi erfordern eine streng koordinierte geschlossene Flugformation der beiden Satelliten. Als gemeinsame Bahnformation wurde die sogenannte Helix-Formation ausgewählt (vgl. Krieger et al., 2007). Bei dieser Formation verlaufen die Bahnen der Satelliten am Äquator in horizontaler Ebene parallel zu einander, und im Bereich der Pole in vertikaler Ebene parallel zu einander (vgl. Abbildung 3). So wird eine mögliche Kollision implizit verringert. Die Bezeichnung der Bahn beruht dabei auf der relativen Bewegung der Satelliten in Form einer Helix. Die Besonderheit dieser Formation ist, dass die Satelliten eine variable Basislinie über einen kompletten Umlauf besitzen.

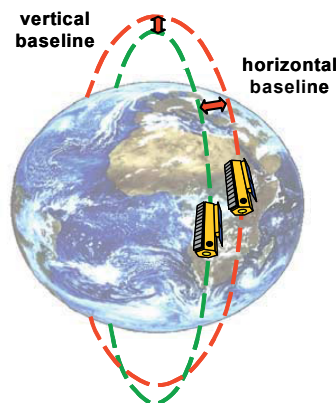


Abbildung 3: Helix-Bahnkonfiguration von TanDEM-X und TerraSAR-X. (Quelle: Krieger et al., 2007).

Da bei der Helix-Bahnformation zu keinem Zeitpunkt eine Überschneidung der Bahnen besteht, können die beiden Satelliten entlang ihrer Bahnen beliebig versetzt werden und die transversale

Komponente der Basislinie der Satelliten so für bestimmte Breiten optimiert werden (vgl. Krieger et al., 2007). Dies ist besonders bei *crosstrack* und *alongtrack* Interferometrie hilfreich.

So liegen bei der *crosstrack Interferometrie* die Aufnahmepositionen der beiden SAR-Bilder auf einer Linie senkrecht zu der Flugrichtung. Um hier eine hohe Genauigkeit zu erreichen, muss die transversale Basislinienkomponente der beiden Satelliten möglichst kurz sein (vgl. Krieger et al., 2007). Diese Art der SAR-Interferometrie wird insbesondere bei der Erzeugung eines digitalen Höhenmodells verwendet.

Bei der *alongtrack Interferometrie* werden dagegen die beiden SAR-Bilder mit einer zeitlichen Verzögerung zu einander aufgenommen. Abhängig von dem Anwendungsgebiet können hier die Basislinien mit einer transversalen Komponente von einigen hundert Meter bis mehreren Kilometer zum Einsatz kommen. Die Hauptanwendungsgebiete dieser Art der SAR-Interferometrie liegen in der Überwachung von dynamischen Prozessen an der Erdoberfläche, wie beispielsweise Messung von Meeresströmungen oder Überwachung der Eisschollen Bewegungen (vgl. Krieger et al., 2007).

Da die SAR Instrumente immer schräg zur Flugrichtung messen, werden für die präzise Auswertung der Messergebnisse jedoch hauptsächlich die hochgenauen Basislinien in radialer und normaler Richtung benötigt.

3 Grundlagen der Bahnberechnung

Alle Methoden zur Bestimmung der Satellitenposition und Durchführung der Bahnüberwachung basieren auf der grundlegenden Vektorgleichung (vgl. Abbildung 4):

$$\bar{x}_B + \bar{\rho} - \bar{x}_S = \vec{0}. \quad (3.1)$$

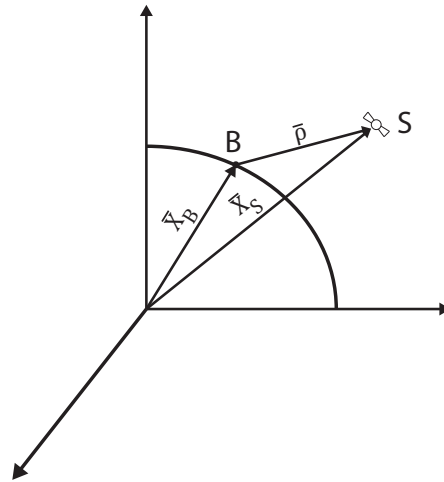


Abbildung 4: Beobachtungszusammenhang in der Bahnberechnung.

Der Vektor $\bar{\rho}$ beschreibt dabei die Beobachtung zum Satelliten von einer Basistation aus, und ist von der Beobachtungszeit und der Beobachtungsart abhängig. Der Vektor \bar{x}_B beschreibt die Position der Überwachungsstation im gegebenen Koordinatensystem, während der Vektor \bar{x}_S die Satellitenposition im gleichen Koordinatensystem beschreibt. Beide Positionsvektoren \bar{x}_B und \bar{x}_S sind von mehreren Einflussfaktoren geprägt, welche modelliert werden können.

Zu den Einflussfaktoren auf den Satellitenpositionsvektor \bar{x}_S zählen unter anderem:

- Einfluss des Erdgravitationsfeldes.
- Einfluss der Gravitationsfelder des Mondes, der Sonne und der größeren Planeten im Sonnensystem.
- Einfluss der Sonneneinstrahlung, speziell der Solardruck.
- Einfluss der atmosphärischen Reibung, die insbesondere bei niedrig fliegenden Satelliten von großer Bedeutung ist.

Bei den Störeinflüssen auf die Stationskoordinaten, repräsentiert durch den Positionsvektor der Überwachungsstation \bar{x}_B , kann zwischen folgenden Einflüssen unterschieden werden:

- Einfluss der Gezeiten (Erd- und Ozeangezeiten) auf die Stationskoordinaten.
- Einfluss der Lithosphärenbewegungen auf die Stationskoordinaten.

Der Zusammenhang zwischen den Beobachtungen und den Einflussfaktoren kann durch folgende Gleichung verdeutlicht werden:

$$\bar{\rho}(t, \bar{P}) = \bar{\rho}(t, \bar{X}_S, \bar{X}_B), \text{ mit} \quad (3.2)$$

$$\bar{X}_S := \bar{X}_S(\bar{X}_S^0, \bar{\beta}, \bar{\varepsilon}), \text{ und}$$

$$\bar{X}_B := \bar{X}_B(\bar{S}_B, \bar{\beta}, \bar{\omega}).$$

Die Beobachtungen $\bar{\rho}$ sind demzufolge stets eine Funktion der Zeit t und der Parameter \bar{P} , speziell der momentanen Satellitenposition und -geschwindigkeit \bar{X}_S , und der Stationskoordinaten \bar{X}_B . Der momentane Positions- und Geschwindigkeitsvektor des Satelliten ist seinerseits eine Funktion des initialen anfänglichen Positions- und Geschwindigkeitsvektors des Satelliten \bar{X}_S^0 , der Geopotentialparameter $\bar{\beta}$, sowie der auf den Satelliten wirkenden Störkräfte $\bar{\varepsilon}$. Der Positionsvektor der Beobachtungsstation ist eine Funktion der Stationskoordinaten \bar{S}_B im gegebenen Referenzrahmen, der Geopotentialparameter $\bar{\beta}$, und der Erdrotationsparameter $\bar{\omega}$. Die Bahnberechnung kann daraufhin in dynamisches Modell, geometrisches Modell und Beobachtungsmodell aufgeteilt werden.

Das dynamische Modell umfasst die verschiedenen Kräfte, denen ein Satellit auf seiner Bahn unterliegt. Diese sind weiter oben als Einflussfaktoren auf den Satellitenpositionsvektor aufgelistet und werden im nachfolgenden Kapitel 3.1 kurz vorgestellt. Das geometrische Modell befasst sich mit den Stationskoordinaten und den Störeinflüssen auf sie. Diese werden im Kapitel 3.2 beschrieben. Und schließlich widmet sich das Beobachtungsmodell den Beobachtungsverfahren, wie beispielsweise GPS oder Satellite Laser Ranging (SLR), die ihr Einsatz bei der Bahnbestimmung finden. Diese werden im Kapitel 3.3 vorgestellt und kurz diskutiert.

Die Bahnbestimmung selbst lässt sich in zwei unterschiedlichen Verfahren durchführen. Die erste Möglichkeit wäre vollständige Bahnberechnung unter Berücksichtigung aller physikalischen Einflusskräfte auf die Satellitenbahn aus dem dynamischen Modell. Das Verfahren wird auch als dynamische Bahnbestimmung bezeichnet und wird üblicherweise bei Bahnberechnungsverfahren angewendet.

Die zweite Möglichkeit ist die rein geometrische Betrachtung des Zusammenhangs zwischen dem Satellit und den Beobachtungsstationen, und wird als kinematische Bahnbestimmung bezeichnet. Da hier keine Berücksichtigung der Störkräfte stattfindet, führen insbesondere Manöver zu groben Positionsfehlern oder kompletten Ausfällen der Lösung. Andererseits tendiert die dynamische Bahnbestimmung zur Verschmierung der lokal begrenzten Manövereffekte.

Eine dritte Möglichkeit ist die reduziert dynamische Bahnbestimmung bei der ein Teil der nicht oder wenig bekannten dynamischen Einflüsse durch eine große Anzahl an empirischen, mit stochastischen Eigenschaften versehenen Parametern ersetzt wird. Voraussetzung dafür ist, dass genügend viele Beobachtungen vorhanden sind.

Mit dem Programmpaket EPOS-OC lassen sich alle Bahnbestimmungsverfahren durchführen. Dies wird später in Kapitel 4 ausführlich behandelt.

Die Grundlagen für Bahnbestimmungsverfahren stellen jedoch die oben erwähnten Modelle dar. Sie werden nachfolgend etwas ausführlicher behandelt.

3.1 Dynamisches Modell

3.1.1 Einfluss des Erdgravitationsfeldes

Die größte wirkende Kraft auf einen sich in der Erdumlaufbahn befindenden Satelliten ist die Erdanziehung, die durch das Erdgravitationspotential charakterisiert werden kann. Die übliche Darstellung des Gravitationspotentials eines Zentralkörpers mit einer nicht homogenen Massenverteilung ist die aus der Physikalischen Geodäsie bekannte Kugelflächenfunktionsentwicklung (vgl. Sneeuw, 2006):

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{R} \sum_{l=0}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{l+1} \sum_{m=0}^l P_{lm}(\cos \theta) (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda), \quad (3.3)$$

mit den Legendre Polynomen:

$$P_m(t) = (1 - t^2)^{m/2} \frac{d^m P_l(t)}{dt^m} \quad \text{und} \quad P_l(t) = \frac{1}{2^l l!} \frac{d^l (t^2 - 1)^l}{dt^l}, \quad (3.4)$$

wobei $t = \cos \theta$ ist,

und den Geopotentialkoeffizienten C_{lm} und S_{lm} :

$$\left. \begin{matrix} C_{lm} \\ S_{lm} \end{matrix} \right\} = (2 - \delta_{m,0}) \frac{(l-m)!}{(l+m)!} \frac{1}{MR^l} \int \int \int_V r^l P_{lm}(\cos \theta) \left\{ \begin{matrix} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{matrix} \right\} \rho dV, \quad (3.5)$$

$$\text{mit } \delta_{m,0} = \begin{cases} 1, & \text{falls } m = 0 \\ 0, & \text{falls } m \neq 0 \end{cases}.$$

Die Koeffizienten C_{lm} und S_{lm} beschreiben die Massenverteilung im Zentralkörper und können über die Raumintegrale berechnet werden, wenn die Dichte ρ und die Geometrie des Zentralkörpers bekannt sind. Da die exakte Geometrie des Geoids jedoch nicht bekannt ist und auf Hypothesen beruht, werden die Geopotentialkoeffizienten C_{lm} und S_{lm} aus der Auswertung der Daten der Schwerefeldmissionen, wie beispielsweise CHAMP, GRACE und GOCE bestimmt. Bis zum Grad l und Ordnung $m = 2$ lassen sich die beiden Geopotentialkoeffizienten jedoch auch analytisch leicht über die Auswertung der obigen Raumintegrale berechnen. So ergibt sich für die sphärische harmonische Funktionen $r^l P_{lm}(\cos \theta) \left\{ \begin{matrix} \cos m\lambda \\ \sin m\lambda \end{matrix} \right\}$ aus der Formel (3.5) (vgl. Sneeuw, 2006):

$$\begin{aligned} l = 0 : \quad r^0 P_{0,0}(\cos \theta) &= 1 & (3.6) \\ l = 1 : \quad r^1 P_{1,0}(\cos \theta) &= r \cos \theta &= z \\ r^1 P_{1,1}(\cos \theta) \cos \lambda &= r \sin \theta \cos \lambda &= x \\ r^1 P_{1,1}(\cos \theta) \sin \lambda &= r \sin \theta \sin \lambda &= y \end{aligned}$$

Durch das Einsetzen von Formeln (3.6) ins (3.5) erhält man für die ersten 4 Geopotentialkoeffizienten:

$$C_{0,0} = \frac{1}{M} \int \int \int dm = 1 \quad (3.7)$$

$$C_{1,0} = \frac{1}{MR} \int \int \int z dm = \frac{1}{R} z_M$$

$$C_{1,1} = \frac{1}{MR} \int \int \int x dm = \frac{1}{R} x_M$$

$$S_{1,1} = \frac{1}{MR} \int \int \int y dm = \frac{1}{R} y_M$$

Die Geopotentialkoeffizienten $S_{l,0}$ der Ordnung $m = 0$ werden dabei wegen $\sin 0\lambda = 0$ zu 0.

Der Geopotentialkoeffizient $C_{0,0}$ beschreibt das Potential einer Punktmasse, während die Koeffizienten $C_{1,0}$, $C_{1,1}$ und $S_{1,1}$ die Koordinaten des Massenzentrums des Zentralkörpers im ausgewählten Koordinatensystem beschreiben. Da laut den Vereinbarungen für das erdfeste Koordinatensystem der Koordinatenursprung mit dem Massenzentrum der Erde zusammenfällt, ergibt sich für alle drei Koeffizienten: $C_{1,0} = C_{1,1} = S_{1,1} = 0$.

Mit den oben berechneten Koeffizienten ergibt sich für das Erdgravitationspotential aus der Formel (3.3):

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{R} + \frac{GM}{R} \left(\sum_{l=2}^{\infty} \left(\frac{R}{r} \right)^{l+1} \sum_{m=0}^l P_{lm}(\cos \theta) (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) \right). \quad (3.8)$$

Der erste Term hier wird auch der Keplerterm genannt und repräsentiert das Potential eines Zentralfeldes. Dieser Term hat den größten Einfluss auf die Bahn eines Satelliten und beschreibt die ideale Kepler Bahn. Der zweite Term ist das Potential einer nicht sphärischen Gravitation des wahren Erdkörpers und beschreibt die Abweichungen der Satellitenbahn von der idealen Kepler Bahn. Je größer der Grad l ist, umso präziser kann das Schwerefeld approximiert werden und die Satellitenbahn in Folge genauer bestimmt werden. Mit einem wachsenden Abstand von dem Zentralkörper wird der Einfluss der höheren Grade l jedoch immer geringer. Das wird insbesondere an dem Term $\left(\frac{R}{r}\right)^{l+1}$ deutlich. Mit $r \gg R$ strebt der komplette Term mit einem wachsenden Exponenten $l+1$ gegen 0. Rein physikalisch lässt es sich auch dadurch erklären, dass der Gravitationseinfluss proportional zu der Entfernung der zwei sich anziehenden Körpern ist, so dass

geringere Potentialstörungen mit einem wachsenden Abstand r vom Zentralkörper immer mehr im Zentralfeld untergehen.

Aus diesem Grund wird die Berechnung des Schwerefeldes an die Flughöhe des jeweiligen Satelliten gekoppelt, so dass die Grad l und die Ordnung m der Potentialentwicklung entsprechend der Flughöhe ausgewählt werden.

3.1.2 Einfluss der Gravitationsfelder anderer Himmelskörper im Sonnensystem

Für die Berechnung von hochpräzisen Satellitenbahnen reicht die alleinige Berücksichtigung des Erdschwerefeldes nicht aus. Insbesondere die Gravitationsfelder des Mondes und der Sonne müssen berücksichtigt werden, da sie die größten externen gravitationellen Einflussfaktoren auf eine Satellitenbahn in dem Erdumlauf sind. Aber auch der Einfluss von weiteren Planeten im Sonnensystem muss berücksichtigt werden, um eine hohe Bahnengenauigkeit zu erreichen.

Bei der Berechnung der Gravitationsbeschleunigung, die auf eine Satellitenbahn wirkt, wird von einem Zentralfeld einer Punktmasse ausgegangen. Bei der großen Entfernung der besagten Himmelskörper ist dies auch für eine präzise Bahnberechnung ausreichend.

Nach dieser Vereinfachung lässt sich die Gravitationsbeschleunigung eines Himmelskörpers auf eine Satellitenbahn relativ einfach berechnen. Der dafür benötigte geometrische Zusammenhang wird in der Abbildung 5 dargestellt. Der Koordinatenursprung des Bezugssystems fällt dabei mit dem Massenzentrum der Erde zusammen.

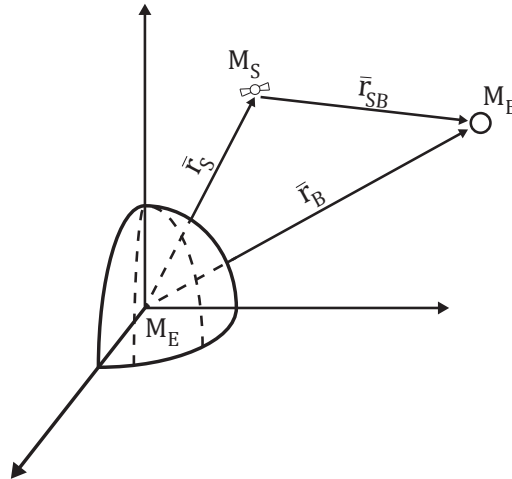


Abbildung 5: Gravitationseinfluss eines Himmelskörpers auf die Satellitenposition.

Es gilt nun für die Gravitationsbeschleunigung auf ein Satellit Masse M_S , verursacht durch die Anziehungskräfte der Erde mit der Masse M_E und eines fremden Himmelskörpers mit einer Masse M_B :

$$\ddot{\vec{r}}_S = -G \frac{M_E}{r_S^3} \vec{r}_S + G \frac{M_B}{r_{SB}^3} \vec{r}_{SB}, \quad (3.9)$$

sowie für die Gravitationsbeschleunigung von Erde, verursacht durch die Anziehungskräfte des Satelliten und des fremden Himmelskörpers:

$$\ddot{\vec{r}}_E = G \frac{M_S}{r_S^3} \vec{r}_S + G \frac{M_B}{r_B^3} \vec{r}_B. \quad (3.10)$$

Daraus folgt für die Relativbeschleunigung auf den Satelliten:

$$\ddot{\vec{r}}_S - \ddot{\vec{r}}_E = G \left(\frac{M_B}{r_{SB}^3} \vec{r}_{SB} - \frac{M_B}{r_B^3} \vec{r}_B \right) - G \left(\frac{M_E + M_S}{r_S^3} \vec{r}_S \right). \quad (3.11)$$

Der erste Term beschreibt hier die Gravitationsbeschleunigung des fremden Himmelskörpers auf den Satelliten, während der zweite die Gravitationsbeschleunigung der Erde auf den Satelliten definiert. Mit $\bar{r}_{SB} = \bar{r}_B - \bar{r}_S$ bekommen wir somit für die endgültige Gravitationsbeschleunigung eines Himmelskörpers auf einen sich in der Erdumlaufbahn befindenden Satelliten:

$$\ddot{\bar{r}}_B = GM_B \left(\frac{\bar{r}_B - \bar{r}_S}{(r_B - r_S)^3} - \frac{\bar{r}_B}{r_B^3} \right). \quad (3.12)$$

Es wird somit für die Bestimmung der Gravitationsbeschleunigung $\ddot{\bar{r}}_B$ neben dem Satellitenpositionsvektor \bar{r}_S in dem definierten Koordinatensystem auch noch die Masse M_B des fremden Himmelskörpers benötigt, sowie sein Positionsvektor \bar{r}_B in dem gleichen Koordinatensystem. Der letztere stellt dabei eine Funktion der Zeit dar und kann durch eine Interpolation mit Hilfe von planetaren Ephemeriden zu jedem Zeitpunkt berechnet werden. Die aktuellsten Modelle mit den planetaren Ephemeriden sind das Modell DE421 von der NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) (vgl. Folkner et al., 2008), INPOP08 von dem Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE) (vgl. Fienga et al., 2009) und EPM2008 von dem Institut Angewandter Astronomy der Russischen Akademie der Wissenschaften (IAA) (vgl. Pitjeva, 2009).

3.1.3 Einfluss der Gezeiten

Der im vorherigen Kapitel 3.1.2 beschriebene Einfluss der externen Himmelskörper verursacht neben der zusätzlichen gravitativen Anziehung auch noch die Änderung des Gravitationspotentials der Erde infolge von Massenverlagerungen aufgrund der selbigen Anziehung dieser externen Himmelskörper, auch bekannt als Gezeiten. Vergleichsweise besonders groß fällt dabei der Einfluss des Mondes, wegen der geringen Entfernung, und der Sonne, wegen ihrer sehr großen Masse, auf.

Der Einfluss der Gezeitenkräfte auf den Erdkörper erfolgt grundsätzlich in Form von direkten und indirekten Effekten. Bei den direkten Effekten reagiert die Erde auf den unmittelbaren Einfluss der gezeitenerzeugenden Kräfte in Form von Wasser- und Landmassenbewegungen, sowie in Form von Schwingungen in dem Erdmantel und dem flüssigen Erdkern. Die indirekten Effekte kommen dagegen als Folge von direkten Effekten der Gezeiten zustande. Beispielsweise führen die Wassermassenbewegungen der Ozeane zur Änderung der Auflastkräfte auf den Meeresboden und in Folge davon zur dessen Deformation. Während die Schwingungen im Erdmantel und dem flüssigen Erdkern zu einem zunehmenden Zentrifugalpotential und folgend zu Deformationen im Erdkörper führen (vgl. Gérard und Brian, 2010).

Unabhängig von diesen beiden Effekten lassen sich die Gezeiten in zwei größere Bereiche unterteilen: Erdgezeiten, die alle Landmassenbewegungen und Erddeformationen umfassen, sowie Ozeangezeiten, die Wassermassenbewegungen in den Ozeanen umfassen. In diesem Kapitel wird der Einfluss der beiden Gezeitenarten kurz vorgestellt.

Einfluss der Erdgezeiten

Der Einfluss der Erdgezeiten auf das Geopotential wird in der Regel in Form von Änderungen in den Geopotentialkoeffizienten C_{lm} und S_{lm} modelliert (vgl. Eanes et al., 1983). Dabei muss grundsätzlich zwischen zwei Erdmodellen, eines elastischen und eines nicht elastischen Erdkörpers, unterschieden werden. In beiden Fällen erfolgt die Modellierung der Änderungen der Geopotentialkoeffizienten ΔC_{lm} und ΔS_{lm} mit Hilfe von drei Love Koeffizienten k_{lm} und $k_{lm}^{(\pm)}$ (vgl. Wahr, 1981), die die Deformation des Erdkörpers beschreiben. Während die Berechnung des Haupteinflusses der Erdgezeiten, der sich aus den direkten Gezeiteneffekten zusammensetzt, mit konstanten Love Koeffizienten erfolgt, sind diese im Falle von indirekten Gezeiteneffekten stark frequenzabhängig. Dies erfordert zusätzliche Korrekturen an den Änderungen der Geopotentialkoeffizienten ΔC_{lm} und ΔS_{lm} , um alle Gezeiteneffekte vollständig zu berücksichtigen (vgl. Gérard und Brian, 2010). Die Größenordnung dieser zusätzlichen Korrekturterme ist in der Regel mit einem Faktor von ca. 100 geringer als die des Haupteffektes, so dass die indirekten Gezeiteneffekte erst bei hochpräzisen Anwendungen berücksichtigt werden müssen (vgl. Eshagh und Najafi Alamdari, 2006). Da die Berechnung der zusätzlichen Korrekturterme sehr komplex ausfallen kann, wird sich die folgende Beschreibung allein auf den Haupteffekt der Erdgezeiten im Rahmen der beiden Erdmodelle

beschränken.

Bei einem elastischen Erdmodell können die Änderungen der Geopotentialkoeffizienten ΔC_{lm} und ΔS_{lm} unter Einbeziehung der Ephemeriden der gezeitenerzeugenden Körper mit Hilfe von sphärischen harmonischen Funktionen berechnet werden. In dem folgenden Beispiel beschränkt sich die Berechnung auf die beiden größten gezeitenerzeugenden Körper: Sonne und Mond. Der Gezeiteneinfluss von weiteren Himmelskörpern kann jedoch analog berücksichtigt werden.

In der Regel ist bei der Berechnung eine Entwicklung bis zum Grad $l = 4$ ausreichend, da die Größenordnung von ΔC_{lm} und ΔS_{lm} bei diesem Entwicklungsgrad bereits bei 10^{-11} liegt (vgl. Gérard und Brian, 2010), und die Geopotentialkoeffizienten eines höheren Grades eine vergleichbar noch geringere Änderung erfahren, so dass deren Berechnung vernachlässigt werden kann. Die damit zu erreichende Genauigkeit reicht in der Regel für normale Anwendungen aus, im Falle von hochpräzisen Anwendungen können jedoch weitere Entwicklungsgrade berücksichtigt werden. Da die Entwicklung höherer Grade entsprechend analog verläuft, wird an dieser Stelle nur die Entwicklung bis zum Grad $l = 4$ vorgestellt. Der Einfluss der Gezeiten betrifft dabei nur die Geopotentialkomponenten ab dem Grad $l = 2$, da wie im vorherigen Kapitel 3.1.1 gezeigt, der Geopotentialkoeffizient $C_{0,0}$ nur das Potential einer Punktmasse beschreibt, sowie $C_{1,0} = C_{1,1} = S_{0,0} = S_{1,0} = S_{1,1} = 0$ sind.

Für die Änderungen der normierten Geopotentialkoeffizienten $\Delta \bar{C}_{lm}$ und $\Delta \bar{S}_{lm}$ mit Grad $l = 2$ und $l = 3$ gilt nach Gérard und Brian (2010):

$$\Delta \bar{C}_{lm} - i \Delta \bar{S}_{lm} = \frac{k_{lm}}{2l+1} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_{\oplus}} \left(\frac{R_E}{r_j} \right)^{l+1} \bar{P}_{lm}(\sin \Phi_j) e^{-im\lambda_j}, \quad (3.13)$$

mit:

- k_{lm} - normierter Love Koeffizient mit Grad l und Ordnung m ,
- R_E - Erdradius am Äquator,
- GM_{\oplus} - Gravitationskonstante der Erde,
- GM_j - Gravitationskonstante des Mondes (für $j = 2$) und der Sonne (für $j = 3$),
- r_j - Abstand von dem Geozenter zum Mond oder zur Sonne,
- Φ_j - geozentrische Breite des Mondes oder der Sonne im erdfesten Koordinatensystem und
- λ_j - östliche Länge (in Bezug auf Greenwich Meridian) des Mondes oder der Sonne im erdfesten Koordinatensystem.

Da die Gezeiten mit Grad $l = 2$ auch einen Einfluss auf die Geopotentialkoeffizienten mit Grad $l = 4$ ausüben, können die Änderungen der normierten Geopotentialkoeffizienten $\Delta \bar{C}_{4m}$ und $\Delta \bar{S}_{4m}$ mit Hilfe von Love Koeffizienten $k_{2m}^{(+)}$ berechnet werden (vgl. Gérard und Brian, 2010):

$$\Delta \bar{C}_{4m} - i \Delta \bar{S}_{4m} = \frac{k_{2m}^{(+)}}{5} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_{\oplus}} \left(\frac{R_E}{r_j} \right)^3 \bar{P}_{2m}(\sin \Phi_j) e^{-im\lambda_j}. \quad (3.14)$$

Die direkte Berechnung des Gezeiteneinflusses mit Grad $l = 4$ auf diese Koeffizienten kann aufgrund sehr geringen Größe vernachlässigt werden (vgl. Gérard und Brian, 2010).

Im Falle eines unelastischen Erdmodells beinhalten die Love Koeffizienten k_{lm} und $k_{lm}^{(\pm)}$ kleine imaginäre Anteile, verursacht durch eine Phasenverschiebung in dem Deformationsantwort der Erde auf die gezeitenerzeugende Kräfte (vgl. Gérard und Brian, 2010).

Durch einfaches Einsetzen von komplexen Love Koeffizienten in die Formel (3.13) ergibt sich für die Änderungen der normierten Geopotentialkoeffizienten $\Delta\bar{C}_{lm}$ und $\Delta\bar{S}_{lm}$ nach Eshagh und Najafi Alamdari (2006):

$$\Delta\bar{C}_{lm} - i\Delta\bar{S}_{lm} = \frac{(\operatorname{Re}k_{lm} + i \operatorname{Im}k_{lm})}{2l+1} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_{\oplus}} \left(\frac{R_E}{r_j}\right)^{l+1} \bar{P}_{lm}(\sin\Phi_j) e^{-im\lambda_j}. \quad (3.15)$$

Die Berechnung der Änderungen der normierten Geopotentialkoeffizienten $\Delta\bar{C}_{4m}$ und $\Delta\bar{S}_{4m}$, verursacht durch die Gezeiten mit Grad $l=2$, bleibt an dieser Stelle gleich und erfolgt analog der Formel (3.14) mit einer Ausnahme, dass hier für dieses Modell angepasste Love Koeffizienten $k_{2m}^{(+)}$ verwendet werden.

Eine Übersicht der Love Koeffizienten mit Grad $l=2$ für beide Erdmodelle ist in der Tabelle 1 gegeben.

Tabelle 1: Love Koeffizienten mit Grad $l=2$ für ein elastisches und ein unelastisches Erdmodell (Quelle: Gérard und Brian, 2010).

Grad l	Ordnung m	Elastisches Erdmodell		Unelastisches Erdmodell		
		k_{lm}	$k_{lm}^{(+)}$	$\operatorname{Re}k_{lm}$	$\operatorname{Im}k_{lm}$	$k_{lm}^{(+)}$
2	0	0.29525	-0.00087	0.30190	-0.00000	-0.00089
2	1	0.29470	-0.00079	0.29830	-0.00144	-0.00080
2	2	0.29801	-0.00057	0.30102	-0.00130	-0.00057

Die Unterschiede zwischen den beiden Erdmodellen sind sehr gering, so dass die Unelastizität der Erde in den meisten Anwendungen vernachlässigt werden kann. So weist der Erkörper unter Einfluss von Gezeiten und im Falle eines unelastischen Erdmodells eine ca. 3 mm höhere Abplattung an den Polen, sowie ca. 2.5 mm größere Ausdehnung am Äquator auf, im Vergleich zu einem Modell einer elastischen Erde (vgl. Eshagh und Najafi Alamdari, 2006). Für hoch präzise Anwendungen ist es jedoch empfohlen, die Erdgezeiten auf der Basis eines unelastischen Erdmodells zu berechnen, um eine möglichst höhere Genauigkeit in der Gezeitenmodellierung zu erreichen (vgl. Eshagh und Najafi Alamdari, 2006).

Weiterführende Informationen zum Thema Erdgezeiten, wie beispielsweise Berechnung der zusätzlichen Korrekturterme anhand von frequenzabhängigen Love Koeffizienten, können unter anderem in den aktuellen IERS Konventionen 2010 (vgl. Gérard und Brian, 2010) gefunden werden.

Einfluss der Ozeangezeiten

Der Einfluss der Ozeangezeiten auf das Geopotential wird analog den Erdgezeiten in Form von periodischen Variationen der normierten Geopotentialkoeffizienten $\Delta\bar{C}_{lm}$ und $\Delta\bar{S}_{lm}$ modelliert (vgl. Gérard und Brian, 2010):

$$[\Delta\bar{C}_{lm} - i\Delta\bar{S}_{lm}](t) = \sum_f \sum_{+}^{\bar{-}} \left(C_{f,lm}^{\pm} \mp i S_{f,lm}^{\pm} \right) e^{\pm i\theta_f(t)}, \quad (3.16)$$

mit $C_{f,lm}^{\pm}$ und $S_{f,lm}^{\pm}$ als harmonische Amplituden für die Tide f , sowie $\theta_f(t)$ als Argument der Tide f .

Die harmonischen Amplituden $C_{f,lm}^{\pm}$ und $S_{f,lm}^{\pm}$ können mit Hilfe von Ozeangezeitenmodellen bestimmt werden. Diese werden in der Regel mit einem gitterförmigen Muster, das über die Ozeane gelegt wird, entwickelt. Für jeden Gitterpunkt des Modells und jede Tide werden dabei die Höhen der Amplituden angegeben, mit deren Hilfe sich die harmonischen Amplituden $C_{f,lm}^{\pm}$ und $S_{f,lm}^{\pm}$ bestimmen lassen.

In der Regel beinhalten solche Modelle nur die Amplituden der größten Haupttiden, die Amplituden der Nebentiden lassen sich jedoch durch eine Interpolation zwischen zwei Haupttiden bestimmen (vgl. Gérard und Brian, 2010). Ein Beispiel eines solchen Ozeangezeitenmodells ist das aktuelle Modell FES2012 (vgl. Carrère et al., 2012).

Für das Argument der Tide θ_f gilt nach Gérard und Brian (2010):

$$\theta_f = \bar{n} \cdot \bar{\beta} = \sum_{i=1}^6 n_i \beta_i, \quad (3.17)$$

mit $\bar{\beta}$ als den Vektor mit den Doodson Fundamental Argumenten, sowie \bar{n} als den Vektor mit den Multiplikationskoeffizienten der Fundamental Argumente.

Im Falle der Gezeiten des Mondes und der Sonne besteht der Vektor $\bar{\beta}$ aus insgesamt 6 Elementen:

- τ - mittlere Mondzeit,
- s - mittlere ekliptikale Länge des Mondes,
- h - mittlere ekliptikale Länge der Sonne,
- p - mittlere ekliptikale Länge des Mondperigäums,
- N' - negative mittlere ekliptikale Länge des aufsteigenden Mondknotens,
- p_s - mittlere ekliptikale Länge des Sonnenperigäums.

Die Doodson Fundamental Argumente werden zusammen mit deren Multiplikationskoeffizienten in den Gezeitenkatalogen zusammengefasst und können daraus direkt abgelesen werden. Der aktuellste davon ist der Gezeitenkatalog von Hartmann und Wenzel von 1995 (vgl. Hartmann und Wenzel, 1995).

Weiterführende Informationen zum Thema Ozeangezeiten, unter anderem auch Hintergrundinformationen zu den Ozeangezeitenmodellen, können beispielsweise in den aktuellen IERS Konventionen 2010 (vgl. Gérard und Brian, 2010) gefunden werden.

3.1.4 Einfluss der Sonnenstrahlung

Eine weitere Störkraft eines nicht gravitativen Ursprungs auf eine Satellitenbahn stellt der Einfluss der Sonneneinstrahlung dar. Dieser Einfluss gliedert sich in zwei Wirkungsbereiche: direkter und indirekter Einfluss. Zu dem direkten Einfluss gehört der Einfluss des Solardruckes, den die Sonne durch eine direkte Bestrahlung der Satellitenoberfläche auf den Satelliten ausübt. Der indirekte Einfluss umfasst seinerseits sowohl den Einfluss der von der Erdoberfläche reflektierter optischen Strahlung, als auch den Einfluss der thermischen Strahlung der Erde im Infrarotbereich.

Während es im Falle einer Bahnberechnung von höherfliegenden Satelliten, wie beispielsweise GPS Satelliten, die alleinige Berücksichtigung der direkten Einstrahlung ausreichend ist, bedarf es bei der Bahnberechnung von niedrig fliegenden Satelliten, wie beispielsweise TanDEM-X/TerraSAR-X, auch der Berücksichtigung von der indirekten Einstrahlung.

Die Berechnung der Störbeschleunigung aufgrund einer direkten Sonneneinstrahlung wird bei den GPS Satelliten in EPOS-OC mit Hilfe von sogenannten ROCK-Modellen durchgeführt. Diese sind speziell auf die Spezifikationen der GPS Satelliten zugeschnitten und erlauben eine gute Approximation der Störbeschleunigung aufgrund des Solardruckes.

Anders als bei GPS Satelliten erfolgt die Berechnung der gleichen Störbeschleunigung bei niedrig fliegenden Satelliten mit Hilfe von allgemeinen Makro-Modellen. Da die Satellitenoberfläche oft eine komplexe Struktur aufweist, wird diese in mehrere Grundelemente aufgeteilt, so dass für jeden dieser Elemente eine separate Berechnung durchgeführt werden kann. Die Gesamtstörbeschleunigung ergibt sich anschließend als die Summe der Störbeschleunigungen aus allen Teilberechnungen.

Ein Beispiel eines solchen Modells ist in der Formel (3.18) gegeben (vgl. Sneeuw, 2006 (2)):

$$\ddot{\mathbf{r}}_{sun_i} = \chi P_{\odot} \left(\frac{1AU}{r_{sat}} \right)^2 \frac{A_i}{m} \cos \theta_i [(1 - \epsilon_i) \bar{\mathbf{e}} + 2\epsilon_i \cos \theta_i \bar{\mathbf{n}}_i], \quad (3.18)$$

mit:

- χ - Schattenfunktion,
- P_{\odot} - Solarkonstante,
- ϵ_i - Reflektionskoeffizient des bestrahlten Flächenelementes,
- A_i - Fläche des Grundelementes,
- m - Masse des Satelliten,
- r_{sat} - Abstand zwischen dem Satelliten und der Sonne,
- $\bar{\mathbf{e}}$ - Vektor von dem Satelliten zur Sonne (normiert),
- $\bar{\mathbf{n}}_i$ - Normalvektor der bestrahlten Grundfläche (normiert) und
- θ_i - Winkel zwischen dem Normalvektor der bestrahlten Grundfläche $\bar{\mathbf{n}}_i$ und dem Vektor von dem Satelliten zur Sonne $\bar{\mathbf{e}}$.

Die wesentlichen Probleme bei der Bestimmung der oben aufgelisteten Variablen treten bei der Schattenfunktion χ und der Solarkonstante P_{\odot} .

Die Schattenfunktion χ ist eine zeitvariable Komponente und setzt den Solardruck in Abhängigkeit zu der Satellitenposition. So ist die Schattenfunktion $\chi = 0$, falls der Satellit sich im Erdschatten befindet und $\chi = 1$, falls der Satellit in der direkten Strahlung der Sonne liegt. In den Bereichen dazwischen erhält die Schattenfunktion die Werte zwischen 1 und 0. So definiert die Schattenfunktion einen ungefähren Skalierungsfaktor für die Größe des Solardruckes, der den Satelliten trifft. Um die numerischen Instabilitäten bei der Parameterschätzung infolge der Bahnberechnung zu vermeiden, sowie um den Übergang von dem Erdschatten in den direkten Sonnenlicht zu glätten, werden in der Regel jedoch kompliziertere Schattenfunktionen verwendet. Da alle Schattenfunktionen nur eine Approximation einer Änderung des Solardruckes in Abhängigkeit von der Satellitenposition darstellen, können hier die Restfehler nicht vollkommen ausgeschlossen werden.

Bei der Solarkonstante P_{\odot} muss hingegen berücksichtigt werden, dass sie eigentlich keine Konstante im engeren Sinne ist, sondern eine Funktion der Zeit und des Ortes ist. So liegt der durchschnittliche Wert der Solarkonstante bei $1367 \frac{W}{m^2}$ bei einer Entfernung von $1AU$ ($= 1,49598 \times 10^8 km$) von der Sonne. Dieser Wert variiert mit der jährlichen Entfernung der Erde von der Sonne, sowie infolge des 11-jährigen Sonnenzyklus, ebenso wie in Folge von Sonneneruptionen. Die Variation der Solarkonstante aufgrund der variablen jährlichen Entfernung der Erde von der Sonne wird zwar durch den Koeffizienten $\left(\frac{1AU}{r_{sat}} \right)^2$ berücksichtigt, die Modellierung von beiden anderen zeitlichen Änderungen der Solarkonstante kann sich jedoch, insbesondere aufgrund von kaum vorhersehbaren Sonneneruptionen, als sehr schwierig erweisen.

Aufgrund der oben genannten Unsicherheiten, sowie weiteren modellbedingten Restfehlern wird in der Regel im Rahmen der Ausgleichung noch ein zusätzlicher Parameter k geschätzt, der als Skalierungsfaktor für den Modellwert der Störbeschleunigung dient:

$$\ddot{\mathbf{r}} = k \cdot \ddot{\mathbf{r}}_{Modell}. \quad (3.19)$$

Dies gilt sowohl für die Berechnung der GPS Bahnen mit Hilfe von ROCK Modellen, als auch für die Berechnung der niedrigeren LEO-Bahnen (*Low Earth Orbit*) mit Hilfe von Makro-Modellen. Auf diese Weise können vorhandene Restfehler aufgrund einer nicht hinreichend genauen Modellierung weitgehend aufgefangen werden.

Noch aufwendiger erfolgt die Modellierung des indirekten Strahlungsdruckes durch die von der Erde reflektierten optischen Strahlung. Da die unterschiedlichen Bereiche der Erdoberfläche

auch über unterschiedliche Reflektionseigenschaften verfügen, ist es sinnvoll die Erdoberfläche vor der Berechnung in mehrere Sektoren gleicher räumlichen Ausdehnung zu unterteilen, und die Berechnung für jeden Sektor separat durchzuführen (vgl. Doornbos, 2001). Der gesamte reflektierte Strahlungsdruck ergibt sich dann als Summe der Strahlungsmengen von allen in die Berechnung einbezogenen Sektoren. Die Größe der Sektoren kann dabei variabel definiert werden und sollte idealerweise so ausgewählt werden, dass die Reflektionseigenschaften innerhalb jedes Sektors annähernd konstant sind. Mit Hilfe der Kenntnisse der Satellitenposition sowie den Flächeneigenschaften des Sektors lässt sich nun die Menge der am Satelliten ankommenden Strahlung, die von einem Sektor reflektiert wurde, berechnen (vgl. Doornbos, 2001):

$$P_{alb_i} = P_{\odot} \frac{1AU^2}{r_{\odot_i}^2} C_{alb_i} A_i \sin E_{\odot_i} \frac{\sin E_{sat_i}}{\pi} \frac{1}{r_{sat_i}^2}, \quad (3.20)$$

mit:

- r_{\odot_i} - Abstand zwischen dem Sektor und der Sonne,
- C_{alb_i} - Reflektionskoeffizient (Albedo) des Sektors,
- A_i - Sektorfläche,
- E_{\odot_i} - Elevationswinkel der Sonne,
- E_{sat_i} - Elevationswinkel des Satelliten und
- r_{sat_i} - Abstand zwischen dem Sektor und dem Satelliten.

Die beiden Abstände beziehen sich dabei immer auf den Sektormittelpunkt, während die beiden Elevationswinkel als Bezugssystem ein lokales Koordinatensystem mit Ursprung im Sektormittelpunkt haben. Die Modellierung des Reflektionskoeffizienten C_{alb_i} kann sich jedoch aufgrund von zahlreichen zeitlichen Variablen, wie beispielsweise jahreszeitliche Änderungen in der Verteilung der Eisoberflächen, oder kaum vorhersehbare Wolkenverteilung, als sehr schwierig erweisen. Um diese und weitere Unsicherheiten zu minimieren, kann auch hier analog der Formel (3.19) ein Skalierungsfaktor für den Modellwert im Rahmen der Ausgleichung mitgeschätzt werden.

Die Berechnung des indirekten Strahlungsdruckes aufgrund der thermischen Strahlung der Erdoberfläche gestaltet sich ähnlich der obigen Berechnung für den indirekten Strahlungsdruck aufgrund der reflektierten optischen Strahlung. Auch hier ist eine Aufteilung der Erdoberfläche in mehrere Sektoren gleicher räumlichen Ausdehnung sinnvoll. Die Menge der am Satelliten ankommenden thermischen Strahlung, die von einem Sektor emittiert wurde, lässt sich dann mit Hilfe der Kenntnisse der Satellitenposition sowie den Flächeneigenschaften des Sektors berechnen (vgl. Doornbos, 2001):

$$P_{IR_i} = A_i P_{\oplus_i} \frac{\sin E_{sat_i}}{\pi} \frac{1}{r_{sat_i}^2}, \quad (3.21)$$

mit P_{\oplus_i} - thermischer Strahlungsdruck eines Sektors.

Die Gesamtmenge der thermischen Strahlung, die den Satelliten trifft, ergibt sich anschließend als Summe der Strahlungsmengen von allen in die Berechnung einbezogenen Sektoren.

Der größte Unsicherheitsfaktor in diesem Modell ist der thermische Strahlungsdruck P_{\oplus_i} , der von einem Sektor emittiert wird. Dieser lässt sich aufgrund vieler zeitlicher und klimabedingter Variationen nur sehr schwer modellieren. Eine Abhilfe kann hier, wie bereits bei den beiden anderen Modellen, die Schätzung eines zusätzlichen Skalierungsfaktors analog der Formel (3.19) schaffen.

Eine weitere Alternative zur Verwendung von Modellen für die Berechnung des Solardruckes stellt der Einsatz von Accelerometer Messungen am Board des betreffenden Satelliten. Die so erfasste Beschleunigungen beinhalten alle nicht gravitativen Störkräfte, die auf den Satelliten wirken, wie auch den Solardruck, und können bei der nachfolgenden Bahnberechnung direkt als die gesamte nicht gravitative Störbeschleunigung berücksichtigt werden. Diesen Messungen wird jedoch eine aufwendige Kalibrierung des Accelerometers direkt im Orbit vorausgesetzt.

3.1.5 Einfluss der atmosphärischen Reibung

Immer wenn wir die Bahnberechnung von niedrig fliegenden Satelliten durchführen, muss eine weitere nicht gravitative Störkraft berücksichtigt werden, die atmosphärische Reibung. Diese kommt durch Reibungseffekte mit der Hochatmosphäre zustande.

Dabei wird bei der Berechnung der Störbeschleunigung im Rahmen eines Makro-Modells die Satellitenoberfläche in mehrere einfache Grundelemente aufgeteilt, so dass die aerodynamischen Eigenschaften von jedem Oberflächenelement in der Berechnung berücksichtigt werden können. So gilt es nach Bruinsma et al. (2004) für die gesamte Störbeschleunigung, die der Satellit aufgrund der atmosphärischen Reibung erfährt:

$$\ddot{\vec{r}}_{air} = -1/2\rho \sum_{i=1}^k \left(C_{D_i} \frac{A_i}{m} (\vec{v} \cdot \vec{n}_i) \cdot \vec{v} + C_{L_i} \frac{A_i}{m} (\vec{v} \times \vec{n}_i) \times \vec{v} \right), \quad (3.22)$$

mit

- ρ - atmosphärische Dichte,
- A_i - Fläche eines Oberflächenelementes,
- C_{D_i} , C_{L_i} - Strömungswiderstands- und Auftriebskoeffizient des entsprechenden Oberflächenelementes,
- \vec{n}_i - Normalvektor des entsprechenden Oberflächenelementes,
- m - Masse des Satelliten und
- \vec{v} - Geschwindigkeitsvektor des Satelliten relativ zur Atmosphäre.

Der Geschwindigkeitsvektor \vec{v} lässt sich aus der Differenz zwischen dem Geschwindigkeitsvektor des Satelliten und dem Geschwindigkeitsvektor der Atmosphäre berechnen. Unter Annahme einer starren Atmosphäre, die sich mit der Erde mitdreht, gilt in diesem Fall nach Cappellari et al. (1976) für den Vektor \vec{v} :

$$\vec{v} = \vec{r} - \vec{\omega} \times \vec{r}, \quad (3.23)$$

mit dem geozentrischen Positionsvektor \vec{r} des Satelliten und dem Drehvektor der Erde $\vec{\omega}$.

Die Berechnung der atmosphärischen Dichte ρ erfolgt hingegen mit Hilfe von empirischen Modellen. Als Eingabewerte für solche Modelle dienen in der Regel die Flughöhe des Satelliten sowie die Daten über die geomagnetische und die Sonnenaktivität. Die letzteren werden benötigt um die Exosphärentemperatur berechnen zu können, die ihrerseits die Luftdichte direkt beeinflusst, sowie um die verschiedenen Dichteveriationen innerhalb der Exosphäre modellieren zu können. Im Rahmen der entsprechenden Berechnungen in dieser Arbeit wird das Dichtemodell DTM-94 verwendet (vgl. Berger et al., 1998).

Da die Bestimmung aller obigen Modellparameter nicht komplett fehlerfrei erfolgen kann, sowie weil das obige Modell (vgl. Formel 3.22) grundsätzlich nur eine Approximation der Störbeschleunigung darstellt, kann im Rahmen der Ausgleichung ein zusätzlicher Skalierungsfaktor (vgl. Formel 3.19) mitgeschätzt werden, um eventuelle Restfehler aufzufangen.

Eine Alternative zu der Modellierung der Störbeschleunigung stellt auch der Einsatz von Accelerometer Messungen dar. Wie bereits im vorherigen Kapitel 3.1.4 erwähnt, können auf diese Weise alle nicht gravitativen Störkräfte direkt berücksichtigt werden. Nachteil des Verfahrens ist jedoch nach wie vor, dass der Accelerometer im Orbit aufwendig kalibriert werden muss.

3.2 Geometrisches Modell

3.2.1 Koordinatentransformation zwischen einem erdfesten und einem inertialen System

Für eine präzise Bahnbestimmung ist das Kenntnis über die hochgenauen Koordinaten der Beobachtungsstationen von einer essentiellen Bedeutung. Doch bevor weiter die Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Stationskoordinaten besprochen werden, muss kurz das zugehörige Referenzsystem definiert werden.

Die Definition der Stationskoordinaten erfolgt in einem erdfesten äquatorialen Koordinatensystem ITRS (*I*nternational *T*errestrial *R*eference *S*ystem) der IERS. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt dabei im Massenmittelpunkt der Erde, die erste Achse e_x zeigt in Richtung des Schnittpunktes des Nullmeridians von Greenwich mit dem Himmelsäquator, die dritte Achse e_z ist durch die Rotationsachse definiert und die letzte Achse e_y vervollständigt das Rechtssystem. Der Achsendreibein ist fest mit der Erde verknüpft und rotiert mit der Erde mit.

Die Satellitenkoordinaten beziehen sich hingegen auf ein raumfestes zälestisches äquatoriales Koordinatensystem GCRS (*G*eo-centric *C*elestial *R*eference *S*ystem) der IERS. Der Koordinatenursprung liegt auch hier im Massenmittelpunkt, die erste und die dritte Achse e_x und e_z beziehen sich jedoch jeweils auf die Richtung zum mittleren Frühlingspunkt γ (Schnittpunkt des Himmelsäquators mit der Ekliptik zum Frühlingsanfang) und die mittlere Drehachse zum Zeitpunkt JD2000, die letzte Achse e_y vervollständigt das Rechtssystem. Der Zeitpunkt JD2000 definiert dabei das Julianische Datum zum 01.01.2000, 12h UT und ist gleich:

$$JD2000 = 2451545. \quad (3.24)$$

Der Achsendreibein ist gemäß der Definition eines inertialen Systems raumfest und rotiert nicht mit der Erde mit. Aufgrund der weiteren Differenzbeschleunigungen wegen der Rotation der Erde um die Sonne, sowie der Rotation des Sonnensystems um den galaktischen Mittelpunkt und generell im Bezug zum Massenmittelpunkt des Universums, kann hier jedoch nur von einem quasi-inertial System gesprochen werden. Dies kann aber an dieser Stelle vernachlässigt werden.

Da alle Berechnungen ausschließlich im raumfesten System GCRS stattfinden, müssen auch die Stationskoordinaten in dieses System transformiert werden. Nach Gérard und Brian (2010) gilt für eine Transformation der Koordinaten aus dem System ITRS in das System GCRS:

$$[GCRS] = Q(t)R(t)W(t) [ITRS], \quad (3.25)$$

mit den Transformationsmatrizen $Q(t)$, $R(t)$ und $W(t)$. Die Koordinatentransformation erfolgt dabei nach der neusten IAU 2006 Konvention über ein mittleres zälestisches Koordinatensystem mit dem mittleren zälestischen Pol (CIP) als e_z Achse und dem Nullmeridian des mittleren Äquators (CIO) als e_x Achse zur selben Referenzepoche (vgl. Gérard und Brian, 2010).

Der Ablauf des Koordinatenüberganges kann anhand der Abbildung 6 auf der nächsten Seite veranschaulicht werden.

So korrigiert die Transformationsmatrix $Q(t)$ die Effekte der Präzession und Nutation der Erdachse und beschreibt den Übergang zwischen dem *konventionellen zälestischen Referenzsystem GCRS* zur Referenzepoche JD2000 zum *mittleren zälestischen Referenzsystem*. Die Matrix $R(t)$ berücksichtigt die tägliche Rotation der Erde um die e_z - Achse und beschreibt den Koordinatenübergang zwischen dem *mittleren zälestischen Referenzsystem* und dem *mittleren terrestrischen Referenzsystem*. Schließlich beschreibt die Transformationsmatrix $W(t)$ den Effekt der Polwanderung und stellt einen Übergang zwischen dem *mittleren terrestrischen Referenzsystem* und dem *konventionellen terrestrischen Referenzsystem ITRS*.

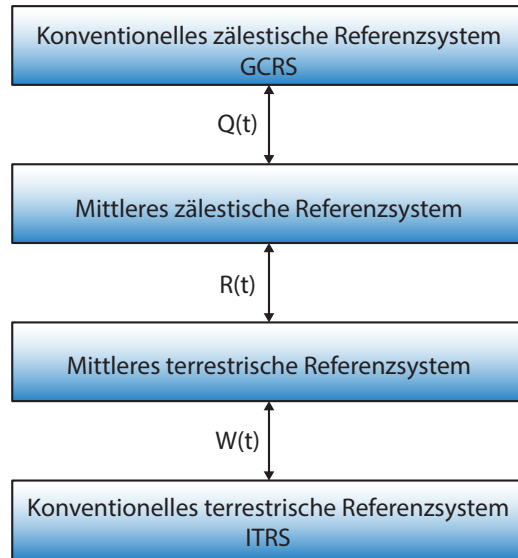


Abbildung 6: Koordinatenübergang zwischen ITRS und GCRS.

Alle Zeitangaben bei der Koordinatentransformation in der Formel (3.25) und bei der Berechnung der Präzession- und Nutationmatrix $Q(t)$, sowie der Polwanderungsmatrix $W(t)$ basieren auf der Terrestrischen Zeit (TT), und sind als Anzahl der Tage seit dem julianischen Datum JD2000 (vgl. Formel 3.24) in julianischen Jahrhunderten definiert (vgl. Gérard und Brian, 2010):

$$t = (\text{Julianisches Datum zur aktueller Epoche TT} - \text{JD2000}) \text{ in Tagen} / 36525. \quad (3.26)$$

Einzig für die Berechnung der Erdrotationsmatrix $R(t)$ wird die Universal Zeit UT1 benötigt.

Im Folgenden werden nun alle drei Transformationsmatrizen kurz beschrieben (vgl. Gérard und Brian, 2010):

1. Die Polwanderungsmatrix $W(t)$ setzt sich aus drei Rotationsmatrizen zusammen:

$$W(t) = R_3(-s') \cdot R_2(x_p) \cdot R_1(y_p), \quad (3.27)$$

mit den Polkoordinaten x_p und y_p , die von IERS herausgegeben werden, sowie dem sogenannten “TIO locator” s' (*Terrestrial Intermediate Origin*). Der Faktor s' beschreibt die Abweichung der Position des Nullmeridians in einem mittleren terrestrischen Referenzsystem zur aktuellen Epoche aufgrund der Polwanderung, und lässt sich mit Hilfe der Polkoordinaten x_p , y_p und deren Geschwindigkeiten \dot{x}_p , \dot{y}_p bestimmen:

$$s'(t) = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t (x_p \dot{y}_p - \dot{x}_p y_p) dt. \quad (3.28)$$

Der “TIO locator” s' berücksichtigt jedoch nur die langperiodische Schwankungen in der Polbewegung, wie die Chandler Periode und die jährliche Schwankungen. So kann der Faktor s' auch direkt vereinfacht bestimmt werden:

$$s'(t) = -0.0015(a_c^2/1.2 + a_a^2) \cdot t, \quad (3.29)$$

mit den Amplituden a_c und a_a , jeweils für die Chandler Periode und die jährliche Periode.

Durch das Einsetzen von aktuellen Mittelwerten für die Amplituden a_c und a_a vereinfacht sich die Formel (3.29) weiter zu einer einfachen zeitabhängigen linearen Funktion:

$$s'(t) = -47\mu \text{ arcsec} \cdot t, \quad (3.30)$$

innerhalb welcher zu jedem Zeitpunkt t ein Wert für den “*TIO locator*” s' interpoliert werden kann.

2. Die Berechnung der Erdrotationsmatrix $R(t)$ erfolgt mit Hilfe des Winkels *ERA* (**E**arth **R**otation **A**ngle), der die tägliche Rotation der Erde um die Drehachse beschreibt und den Übergang zwischen dem mittleren zälestischen Referenzsystem und dem mittleren terrestrischen Referenzsystem ermöglicht:

$$R(t) = R_3(-ERA). \quad (3.31)$$

Für die Berechnung des Winkels *ERA* wird die Anzahl der Tage T_u zwischen der aktuellen Epoche in UT1 und der Epoche JD2000 benötigt:

$$T_u = \text{Julianisches Datum zur aktueller Epoche UT1} - \text{JD2000}. \quad (3.32)$$

Es ergibt sich dann für den Winkel *ERA*, reduziert jeweils auf einen Umlauf (modulo 2π):

$$ERA(T_u) = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448 \cdot T_u). \quad (3.33)$$

3. Für die Präzession- und Nutationmatrix $Q(t)$ gilt:

$$Q(t) = R_3(-E) \cdot R_2(-d) \cdot R_3(E) \cdot R_3(s), \quad (3.34)$$

mit E und d als sphärische Koordinaten des mittleren zälestischen Pols in GCRS, so dass es für die kartesische Polkoordinaten X , Y , und Z gilt:

$$X = \sin d \cos E, \quad Y = \sin d \sin E, \quad Z = \cos d, \quad (3.35)$$

und s als die Abweichung zwischen der Richtung zum mittleren Frühlingspunkt zu der Referenzepeche und der Richtung zum mittleren Frühlingspunkt zu der aktuellen Epoche t im mittleren zälestischen Referenzsystem, infolge der Präzession und der Nutation.

Mit Hilfe den kartesischen Polkoordinaten X und Y kann die Matrix $Q(t)$ direkt aufgestellt werden:

$$Q(t) = \begin{pmatrix} 1 - aX^2 & -aXY & X \\ -aXY & 1 - aY^2 & Y \\ -X & -Y & 1 - a(X^2 + Y^2) \end{pmatrix} \cdot R_3(s), \quad (3.36)$$

mit $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{8}(X^2 + Y^2)$.

Die beiden Polkoordinaten X und Y lassen sich durch eine Reihenentwicklung mit Hilfe der Präzession- und Nutationmodellen nach der IAU 2006 Konvention bestimmen:

$$\begin{aligned} X = & -0,016617'' + 2004,191898''t - 0,4297829''t^2 \\ & -0,19861834''t^3 + 0,000007578''t^4 + 0,0000059285''t^5 \\ & + \sum_i [(a_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,0})_i \cos(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(a_{s,1})_i t \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,1})_i t \cos(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(a_{s,2})_i t^2 \sin(\text{ARGUMENT}) + (a_{c,2})_i t^2 \cos(\text{ARGUMENT})] \\ & + \dots, \end{aligned} \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} Y = & -0,0069510,025896''t - 22,4072747''t^2 \\ & + 0,00190059''t^3 + 0,001112526''t^4 + 0,0000001358''t^5 \\ & + \sum_i [(b_{c,0})_i \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,0})_i \sin(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(b_{c,1})_i t \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,1})_i t \sin(\text{ARGUMENT})] \\ & + \sum_i [(b_{c,2})_i t^2 \cos(\text{ARGUMENT}) + (b_{s,2})_i t^2 \sin(\text{ARGUMENT})] \\ & + \dots, \end{aligned}$$

mit den Fundamental Argumenten der Nutation Theorie (*ARGUMENT*), sowie den Amplituden $(a_{s,j})_i$, $(a_{c,j})_i$, $(b_{c,j})_i$, und $(b_{s,j})_i$ aus den Präzession und Nutation Reihen.

Weitere Einzelheiten zu der Koordinatentransformation sowie etwas ausführlichere Beschreibung einzelnen Transformationsschritten und den eingesetzten Parametern können unter anderem in den aktuellen IERS Konventionen 2010 (vgl. Gérard und Brian, 2010) gefunden werden.

3.2.2 Einfluss der Gezeiten auf die Stationskoordinaten

Wie bereits im Kapitel 3.1.3 beschrieben, verursachen gezeitenerzeugende Kräfte Deformationen und Landmassenverschiebungen der festen Erde. In Folge dessen unterliegen die Stationskoordinaten zeitlichen Variationen. In erster Reihe werden diese Änderungen durch direkte Deformationen der Erdoberfläche in Folge von Erdgezeiten verursacht. Aber auch die indirekten Effekte der Ozean-gezeiten in Form von veränderten Auflastkräften auf den Meeresboden und damit resultierenden Deformationen der Erdoberfläche führen zu zeitlich abhängigen Änderungen der Stationskoordinaten. Da die meisten geodätischen Beobachtungsverfahren jedoch hochgenaue Stationskoordinaten zum Beobachtungszeitpunkt erfordern, müssen diese um den Einfluss der Gezeiten korrigiert werden. Dies erfolgt in der Regel in Form von Verschiebungsvektoren, die an die konstante Stationskoordinaten angebracht werden, um die momentane Position der Beobachtungsstationen zu berechnen. Nachfolgend werden die Modelle zur Berechnung der Verschiebungsvektoren kurz vorgestellt.

Einfluss der Erdgezeiten

Landverschiebungen in Folge von Erdgezeiten werden nach Gérard und Brian (2010) mit Hilfe von Love und Shida Koeffizienten k_{lm} und l_{lm} modelliert. Diese sind sowohl breiten- als auch frequenzabhängig. Die Breitenabhängigkeit resultiert dabei durch die Erdabplattung und die Corioliskraft aufgrund der Erdrotation. Die Frequenzabhängigkeit wird hingegen durch indirekte Effekte der Erdgezeiten hervorgerufen. Im Gegensatz zu der Breitenabhängigkeit, die direkt in der Berechnung des Verschiebungsvektors berücksichtigt werden kann, erfordert die Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Love und Shida Koeffizienten, analog zu den Berechnungen im Kapitel 3.1.3 (Abschnitt Erdgezeiten), eine separate Berechnung von zusätzlichen Korrekturtermen, die anschließend an den Verschiebungsvektor angebracht werden können. Die Berechnung solcher zusätzlicher Korrekturterme kann jedoch sehr komplex ausfallen und soll an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden. Für die Berechnung des Hauptanteils des Verschiebungsvektors reichen hingegen die konstanten Love und Shida Koeffizienten. Die folgende Berechnung des Hauptanteils des Verschiebungsvektors wird exemplarisch für die Gezeiten mit Grad 2 und 3 durchgeführt.

Im Falle von Grad 2 Gezeiten gilt für den Verschiebungsvektor einer Beobachtungsstation nach Gérard und Brian (2010):

$$\Delta\vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_{\oplus}} \frac{R_e^4}{R_j^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left(\frac{3(\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - 1}{2} \right) + 3l_2 (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \left[\hat{R}_j - (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \cdot \hat{r} \right] \right\}, \quad (3.38)$$

mit:

- GM_j - Gravitationskonstante des Mondes (für $j = 2$) und der Sonne (für $j = 3$),
- GM_{\oplus} - Gravitationskonstante der Erde,
- \hat{R}_j , R_j - Ortsvektor vom Geozentrum zum Mond oder zur Sonne, sowie dessen Betrag,
- R_e - Erdradius am Äquator,
- \hat{r}_j , r_j - Ortsvektor vom Geozentrum zur Beobachtungsstation, sowie dessen Betrag,
- $h_2 = -0.0006$ - Love Koeffizient für Grad $l = 2$ und
- $l_2 = 0.0002$ - Shida Koeffizient für Grad $l = 2$.

Die Breitenabhängigkeit der Love und Shida Koeffizienten kann an dieser Stelle durch eine Addition eines zusätzlichen Terms zu den oben genannten konstanten Werten berücksichtigt werden (vgl. Gérard und Brian, 2010):

$$\begin{aligned} h_2(\phi) &= h_2 + h^{(2)} [(3 \sin^2 \phi - 1) / 2] \\ l_2(\phi) &= l_2 + l^{(2)} [(3 \sin^2 \phi - 1) / 2], \end{aligned} \quad (3.39)$$

mit $h^{(2)} = -0.0006$, $l^{(2)} = 0.0002$ und ϕ - geozentrische Stationsbreite.

Die Berechnung des Verschiebungsvektors im Falle der Gezeiten mit Grad 3 erfolgt analog, so dass es gilt (vgl. Gérard und Brian, 2010):

$$\begin{aligned} \Delta \vec{r} = \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_\oplus} \frac{R_\oplus^5}{R_j^4} \left\{ h_3 \hat{r} \left(\frac{5}{2} (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^3 - \frac{3}{2} (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + l_3 \left(\frac{15}{2} (\hat{R}_j \cdot \hat{r})^2 - \frac{3}{2} \right) \left[\hat{R}_j - (\hat{R}_j \cdot \hat{r}) \cdot \hat{r} \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3.40)$$

mit $h_3 = 0.292$ - Love Koeffizient, sowie $l_3 = 0.015$ - Shida Koeffizient für die Gezeiten mit Grad 3.

Die Breitenabhängigkeit der Love und Shida Koeffizienten kann in diesem Fall aufgrund eines vergleichsweise geringeren Einflusses auf die Genauigkeit vernachlässigt werden (vgl. Gérard und Brian, 2010).

Die Größenordnung des Verschiebungsvektors ist in den beiden obigen Beispielen sehr gering und liegt im Falle der Gezeiten mit Grad 2 bei maximal 0.4 mm in der radialen Richtung, sowie bei maximal 0.2 mm in der transversalen Richtung. Im Falle der Gezeiten mit Grad 3 liegen diese Werte jeweils bei 0.2 mm und 1.7 mm (vgl. Gérard und Brian, 2010).

Einfluss der Ozeangezeiten

Die Verschiebung einer Beobachtungsstation aufgrund der indirekten Effekte der Ozeangezeiten kann mit Hilfe einer Reihe harmonischer Funktionen bestimmt werden. Es gilt nach Gérard und Brian (2010) für eine Verschiebungskomponente Δc (in radialer, West - oder Süd - Richtung):

$$\Delta c = \sum_j A_{cj} \cos(\chi_j(t) - \phi_{cj}), \quad (3.41)$$

mit Amplitude A_{cj} und Phase ϕ_{cj} einer Tide j und der jeweiligen Verschiebungskomponente c , sowie $\chi_j(t)$ als astronomischer Argument der Tide j .

Der Argument der Tide $\chi_j(t)$ lässt sich analog der Formel (3.17) mit Hilfe von Gezeitenkatalogen berechnen. Die Amplituden A_{cj} und Phasen ϕ_{cj} für einen gegebenen Beobachtungsstandpunkt werden hingegen aus Ozeangezeitenmodellen, wie beispielsweise FES2012 (vgl. Carrère et al., 2012), abgeleitet. Dabei werden jedoch die Amplituden und Phasen von nur 11 Haupttiden aus dem langperiodischen, täglichen und halbtäglichen Band direkt berechnet. Die Amplituden und Phasen der kleineren Nebentiden können anschließend durch eine Interpolation zwischen den Haupttiden ermittelt werden. Dies ist besonders bei hohen Genauigkeiten bei der Berechnung der Verschiebungskomponenten Δc in einem Millimeter-Bereich wichtig, hier empfiehlt es sich möglichst alle kleineren Tiden bei der Berechnung zu berücksichtigen (vgl. Gérard und Brian, 2010).

Auch hier gilt die Empfehlung für die aktuellen IERS Konventionen 2010 (vgl. Gérard und Brian, 2010) für weiterführende Informationen zum Thema gezeitenbedingter Verschiebungen der Stationskoordinaten.

3.2.3 Einfluss der Lithosphärenbewegungen auf die Stationskoordinaten

Einen weiteren Einfluss auf die Stationskoordinaten üben die tektonischen Vorgänge der Erde aus. So besteht die Lithosphäre der Erde aus einem komplexen System mehrerer Platten, die sich in einer ständigen Bewegung befinden. Diese dynamische Bewegung der Erdplatten führt zwangsläufig dazu, dass die Stationskoordinaten einem konstanten Drift unterworfen sind. Dieser kann

bis zu mehreren Zentimetern im Jahr betragen und muss bei präzisen geodätischen Anwendungen berücksichtigt werden. Ein Beispiel eines solchen Driftes ist in der Abbildung 7 in Form von horizontalen Verschiebungsvektoren der DTRF2008 Referenzstationen gegeben. DTRF2008 ist eine Realisierung des ITRS, die von dem Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut (DGFI) entwickelt wurde (vgl. DGFI, 2010).

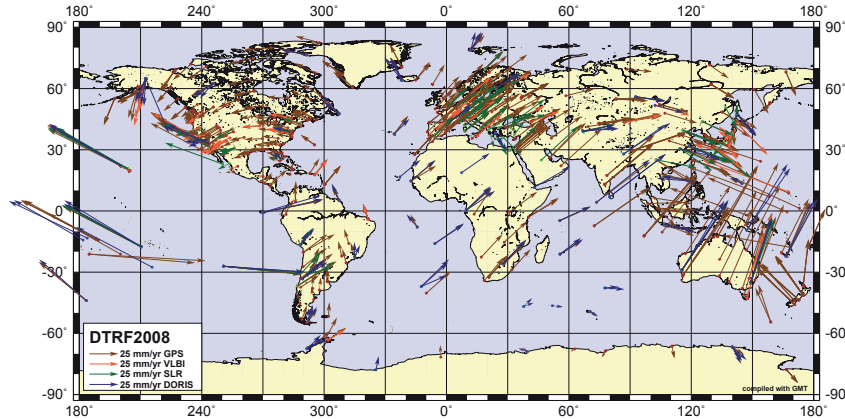


Abbildung 7: Verschiebungsvektoren der DTRF2008 Referenzstationen aufgrund der Plattenbewegungen der Erde. (Quelle: DGFI 2010).

Die Verschiebung der Stationskoordinaten aufgrund der Plattenbewegungen der Erde kann durch eine einfache Korrektur der bekannten Stationskoordinaten berücksichtigt werden. Dabei werden ausgehend von den bekannten Stationskoordinaten \bar{X}_0 zu einer Referenzeпоche t_0 die momentanen Stationskoordinaten \bar{X} zu der Epoche t_1 berechnet:

$$\bar{X} = \bar{X}_0 + \Delta\bar{x}(t_1 - t_0), \quad (3.42)$$

mit $\Delta\bar{x}$ - der Vektor mit der Änderungsrate der Koordinaten.

Als Grundlage für solche Berechnungen dienen Erdplattenmodelle, die Driftraten und -Richtungen für Punkte auf der Erdoberfläche liefern. Ein Beispiel eines aktuellen Erdplattenmodells stellt das Modell APKIM2005 dar, das aus 17 Hauptplatten besteht und eine Auflösung von $1^\circ \times 1^\circ$ bietet (vgl. Drewes, 2009). Die Plattenaufteilung dieses Modells wird in der Abbildung 8 dargestellt. Die schraffierten Bereiche stellen dabei Deformationszonen im Plattenrandbereichen dar.

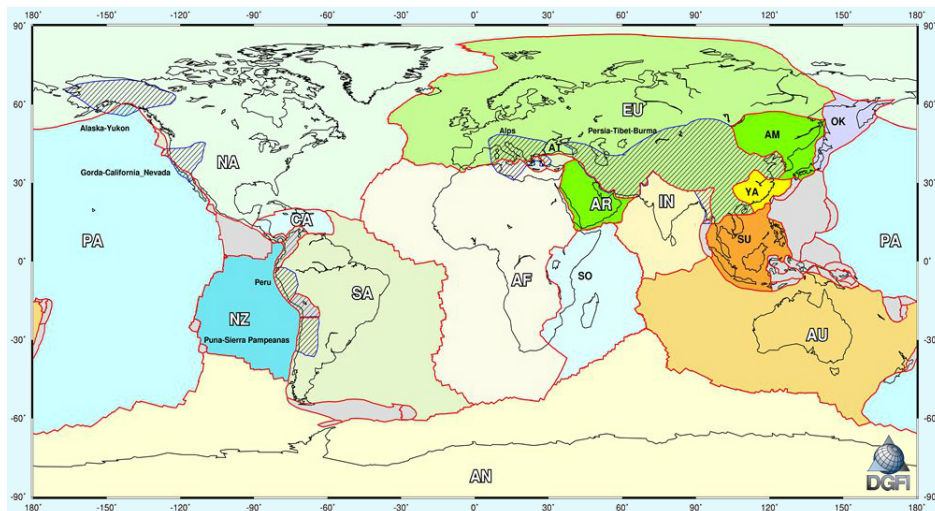


Abbildung 8: Erdplattenmodell APKIM2005. (Quelle: <http://www.dgfi.badw.de/>).

3.3 Beobachtungsmodell

3.3.1 GPS

NAVSTAR GPS (*NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System*) ist ein satellitengestütztes globales Navigationssystem, das eine dreidimensionale Koordinatenbestimmung ermöglicht. Ursprünglich als ein militärisches System entwickelt und gedacht, bekommt es heutzutage eine immer wachsende Bedeutung im zivilen Bereich, unter anderem auch bei vielen geodätischen Anwendungen. Insbesondere im Hinblick auf die zukünftige Modernisierungen wird diese Rolle in den kommenden Jahren weiter wachsen. Dies wird durch ein System von 24 Satelliten, die in einer Höhe von ca. 20200 km über die Erdoberfläche kreisen, ermöglicht. Die besagte Satellitenanzahl bezieht sich dabei auf die nominale Anzahl der Satelliten, die notwendig sind, um einen vollständigen Service zu ermöglichen. Die Satellitenkonfiguration besteht aus 6 Bahnebenen, die eine 55° Inklination gegenüber der Äquatorebene besitzen und jeweils 4 Satelliten pro Bahnebene beinhalten. Diese Konfiguration ermöglicht, dass zu jedem Zeitpunkt und an jedem Punkt der Erdoberfläche mindestens 4 Satelliten von einem Empfänger erfasst werden können. Dies stellt auch die Mindestanforderung dar, um eine zuverlässige dreidimensionale Punktbestimmung durchführen zu können.

Da die GPS Beobachtungen die Hauptbeobachtungsmethode bei Auswertungen in EPOS-OC sind, werden in diesem Kapitel die wichtigsten Grundlagen bei Messungen mit GPS vorgestellt, um einen besseren Überblick über diese Messmethode zu verschaffen.

Beobachtungsgrundlagen

Die grundlegende Positionsbestimmung mit GPS erfolgt durch die Auswertung von Code- und Phasenbeobachtungen. Dafür stehen aktuell 2 Trägerfrequenzen, L_1 und L_2 , zur Verfügung. Auf jeder der beiden Frequenzen wird mindestens eine Codesequenz ausgesendet, sogenannte C/A auf L_1 Trägerfrequenz und P-Code auf den beiden L_1 und L_2 Trägerfrequenzen. Sowohl C/A als auch P-Codesequenzen sind für jeden GPS Satelliten verschieden, wobei der P-Code nur autorisierten Nutzern, wie beispielsweise dem US Militär, vorbehalten ist, und nicht für normale geodätische Anwendungen zur Verfügung steht. Somit ist derzeit nur die Auswertung von C/A Code auf L_1 , und von Phasenbeobachtungen auf beiden Trägerfrequenzen möglich. Zukünftig werden jedoch noch eine weitere zivile Codesequenzen L2C an der L_2 Trägerfrequenz, sowie ein neues ziviles Signal L_5 dazu kommen, die zu einer Genauigkeitssteigerung in der Positionsbestimmung führen sollten.

Der Grundprinzip bei den Codebeobachtungen basiert auf der Messung der Signallaufzeit von dem Satelliten zum Empfänger. Um diese zu messen, wird zuerst in dem Empfänger eine Kopie der C/A Codesequenzen aller GPS Satelliten generiert. Nachdem der beobachtende Satellit anhand der C/A Code identifiziert wurde, wird die empfangene und aufgrund der Laufzeit phasenverschobene C/A Codesequenz mit der entsprechenden Kopie im Empfänger verglichen. Der Vergleich der beiden Codesequenzen erfolgt durch eine schrittweise Verschiebung der empfangenen Codesequenz entlang der generierten Codesequenz, bis die maximale Korrelation eintrifft. Die Phasenverschiebung, die zu dem Erreichen der maximalen Korrelation notwendig ist, stellt die Signallaufzeit dar. Diese multipliziert mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit) ergibt die sogenannte Pseudostrecke zwischen dem Satelliten und dem Empfänger. Der Begriff Pseudostrecke beruht darauf, dass die gemessene Strecke zahlreichen Fehlereinflüssen unterworfen ist, und somit nicht der exakten geometrischen Strecke zwischen dem Satelliten und dem Empfänger entspricht. So weisen unter anderem sowohl die Satelliten- als auch Empfängeruhren Fehler auf, wodurch die Signallaufzeit nicht exakt bestimmt werden kann. Diese Fehlereinflüsse auf die GPS Beobachtungen werden weiter unten im Abschnitt "GPS Fehlerhaushalt" auf Seite 29 etwas ausführlicher behandelt.

Mit Hilfe der berechneten Pseudostrecke und dem Kenntnis der Satellitenkoordinaten lassen sich die Koordinaten des Empfängers schließlich berechnen.

Die grundlegende Beobachtungsgleichung für die C/A Codebeobachtungen lautet an dieser Stelle nach Seeber (2003):

$$PR_i = |\bar{X}_i - \bar{X}_B| + cdt_u = c\tau_i, \quad (3.43)$$

mit:

- PR_i - gemessene Pseudostrecke zum i -ten GPS Satelliten,
- \bar{X}_i - Satellitenpositionsvektor,
- \bar{X}_B - Positionsvektor des Empfängers,
- dt_u - Uhrensynchronisationsfehler zwischen der Satelliten- und der Empfängeruhr,
- τ_i - Signallaufzeit und
- c - Lichtgeschwindigkeit.

Bei den Phasenbeobachtungen dient hingegen als Messgröße die Phasendifferenz zwischen der empfangenen phasenverschobenen Trägerwelle Φ_{CR} und der im Empfänger generierten Trägerwelle Φ_0 (vgl. Seeber, 2003):

$$\Phi_B = \Phi_{CR} - \Phi_0. \quad (3.44)$$

Die grundlegende Beobachtungsgleichung lautet in diesem Fall wie folgt (vgl. Seeber, 2003):

$$\Phi_{B_i} = \frac{2\pi}{\lambda} (|\bar{X}_i - \bar{X}_B| - N_{B_i}\lambda + cdt_u), \quad (3.45)$$

mit der Trägerwellenlänge λ und dem sogenannten Ambiguityterm N_{B_i} , der einen ganzzahligen Wert kompletter Wellenzyklen innerhalb der Pseudostrecke darstellt.

Die wesentliche Schwierigkeit bei der Auswertung der Beobachtungsgleichung in der Formel (3.45) stellt die Bestimmung des Ambiguityterms N_{B_i} dar, da bei der Bildung der Phasendifferenzen nur eine Phasenverschiebung innerhalb einer Wellenlänge gemessen wird. Die Bestimmung der ganzzahligen Ambiguity muss daher im Rahmen spezieller Verfahren, auch bekannt als Ambiguity-Fixierung, durchgeführt werden (vgl. Seeber, 2003). Diese werden weiter unten im Abschnitt "Ambiguity-Fixierung" auf Seite 27 etwas ausführlicher behandelt.

Lineare Kombinationen der Beobachtungen

Um das volle Potential der GPS Beobachtungen zu nutzen, kann es vorteilhaft sein nicht nur allein die originale Beobachtungen zu verwenden, sondern auch speziell gebildete lineare Kombinationen der Beobachtungen. Es können dabei zahlreiche lineare Kombinationen zwischen den Beobachtungen gebildet werden. Die Vorteile, die daraus entstehen, sind beispielsweise die Möglichkeit der Eliminierung einzelner Fehlereinflüsse, oder auch Bildung von neuen Beobachtungstypen mit einem verbesserten Rauschverhältnis oder einer größeren Wellenlänge. Insbesondere letzteres ist wichtig für die Lösung von Ambiguities (siehe Abschnitt "Ambiguity-Fixierung" auf Seite 27).

Die gebräuchlichsten linearen Kombinationen sind:

- Einzeldifferenzen,
- Doppeldifferenzen und
- Dreifachdifferenzen.

Die *Einzeldifferenzen* werden durch eine einfache Differenzbildung von Pseudostrecken entweder zwischen zwei Empfängern, zwei Satelliten, oder zwei Epochen gebildet. Bei einer Differenzbildung zwischen zwei Empfängern werden jeweils deren Pseudostrecken, die zur gleichen Epoche und zum

gleichen GPS Satelliten gemessen wurden, von einander abgezogen. Dadurch fehlt der Satellitenuhrenfehler weg, da beide Pseudostrecken den gleichen Fehler beinhalten. Im Falle der Differenzbildung zwischen zwei Satelliten, gemessen zur gleichen Epoche und am gleichen Empfänger, wird der Empfängeruhrenfehler eliminiert. Während bei einer Differenzbildung zweier Pseudostrecken eines Satelliten, die an zwei nacheinander folgenden Epochen an einem Empfänger gemessen wurden, fehlt beispielsweise bei einer statischen Phasenmessung der Ambiguityterm weg, da dieser über die Zeit konstant bleibt.

Die *Doppeldifferenzen* werden zwischen zwei Empfängern und zwei Satelliten gebildet. Im ersten Schritt werden Einzeldifferenzen zwischen zwei Empfängern für zwei verschiedene Satelliten gebildet. Danach erfolgt eine zweite Differenzbildung zwischen den beiden im ersten Schritt berechneten Einzeldifferenzen. Durch diese Differenzbildung werden Satelliten- und Empfängeruhrenfehler eliminiert. Die zugehörige Beobachtungsgröße wäre in diesem Fall (vgl. Seeber, 2003):

$$((PR_{1i}^p - PR_{1j}^p) - (PR_{1i}^q - PR_{1j}^q)), \quad (3.46)$$

wobei PR_{1i}^p eine Pseudostrecke zur Epoche 1 ist, die vom Empfänger i zum Satelliten p gemessen wurde.

Bei den *Dreifachdifferenzen* werden zweimal Doppeldifferenzen zu zwei verschiedenen Epochen gebildet, und anschließend von einander abgezogen. Die zugehörige Beobachtungsgröße wäre somit (vgl. Seeber, 2003):

$$((PR_{1i}^p - PR_{1j}^p) - (PR_{1i}^q - PR_{1j}^q)) - ((PR_{2,i}^p - PR_{2,j}^p) - (PR_{2,i}^q - PR_{2,j}^q)). \quad (3.47)$$

Neben den Uhrenfehlern wird hier bei einer statischen Phasenbeobachtung auch der Ambiguityterm eliminiert.

Neben den oben beschriebenen Kombinationen besteht auch die Möglichkeit lineare Kombinationen nur aus Beobachtungen eines gleichen Typs zu bilden, wie beispielsweise Differenzen zwischen den Phasenbeobachtungen beider Trägersignale L_1 und L_2 . Diese lineare Kombinationen werden mit zwei Integer Variablen n und m gebildet, so dass es gilt (vgl. Wübbena, 1989):

$$\Phi_{n,m}(t) = n\Phi_1(t) + m\Phi_2(t), \quad (3.48)$$

mit Φ_1 - Phasenbeobachtung auf L_1 und Φ_2 - Phasenbeobachtung auf L_2 .

Für die Frequenz der kombinierten Welle gilt dann (vgl. Seeber, 2003):

$$f_{n,m} = nf_1 + mf_2, \quad (3.49)$$

mit der Wellenfrequenz f_1 von L_1 und der Wellenfrequenz f_2 von L_2 .

So dass es für die Wellenlänge der kombinierten Welle folgt (vgl. Seeber, 2003):

$$\lambda_{n,m} = \frac{c}{f_{n,m}} = \frac{c}{nf_1 + mf_2}. \quad (3.50)$$

Die gebräuchlichsten Kombinationen, die durch die Formel (3.48) gebildet werden, sind die sogenannte *“wide lane”* Kombination L_Δ und die *“narrow lane”* Kombination L_Σ .

Die *“wide lane”* Kombination L_Δ wird durch eine Differenzbildung der Phasen Beobachtungen beider Trägerwellen gebildet, so dass es nach der Formel (3.48) gilt:

$$\Phi_{1,-1}(t) = \Phi_1(t) - \Phi_2(t). \quad (3.51)$$

In metrischen Einheiten ausgedrückt lautet die zugehörige Beobachtung (vgl. Keller, 2007):

$$L_\Delta = \frac{\lambda_\Delta}{2\pi} \Phi_{1,-1} = \frac{\lambda_\Delta}{2\pi} (\Phi_1(t) - \Phi_2(t)) = \frac{\lambda_\Delta}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} L_1 - \frac{2\pi}{\lambda_2} L_2 \right). \quad (3.52)$$

Durch das Einsetzen der Formel (3.50) in die obige Formel (3.52) ergibt sich schließlich (vgl. Keller, 2007):

$$L_{\Delta} = \frac{c}{2\pi(f_1 - f_2)} \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} L_1 - \frac{2\pi}{\lambda_2} L_2 \right) = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_1 - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_2. \quad (3.53)$$

Die Besonderheit der “wide lane” Kombination ist, dass die Wellenlänge des so gebildeten Signals mit ca. 86.2 cm um einiges größer ist, als die Wellenlänge der ursprünglichen Signale ($\lambda_1 = 19$ cm, $\lambda_2 = 24.4$ cm). Dies ermöglicht eine bessere Ambiguity-Lösung (vgl. Abschnitt “Ambiguity-Fixierung” auf dieser Seite). Der Nachteil liegt jedoch in einem etwa sechs mal größeren Rauschniveau (vgl. Seeber, 2003).

Die “narrow lane” Kombination L_{Σ} wird hingegen durch eine Addition der Phasenbeobachtungen beider Trägerwellen gebildet (vgl. Formel 3.48):

$$\Phi_{1,1}(t) = \Phi_1(t) + \Phi_2(t). \quad (3.54)$$

In metrischen Einheiten ausgedrückt, gilt es entsprechend (vgl. Keller, 2007):

$$L_{\Sigma} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{2\pi} \Phi_{1,1} = \frac{\lambda_{\Sigma}}{2\pi} (\Phi_1(t) + \Phi_2(t)) = \frac{\lambda_{\Sigma}}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} L_1 + \frac{2\pi}{\lambda_2} L_2 \right), \quad (3.55)$$

sowie nach dem Einsetzen der Formel (3.50) (vgl. Keller, 2007):

$$L_{\Sigma} = \frac{c}{2\pi(f_1 + f_2)} \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} L_1 + \frac{2\pi}{\lambda_2} L_2 \right) = \frac{f_1}{f_1 + f_2} L_1 + \frac{f_2}{f_1 + f_2} L_2. \quad (3.56)$$

Der Vorteil der “narrow lane” Kombination liegt in ihrem geringen Rauschniveau, allerdings ist sie aufgrund der kleinen Wellenlänge von ca. 10.7 cm weniger geeignet für die Ambiguity-Lösung (vgl. Seeber, 2003).

Weitere Besonderheit der beiden Kombinationen L_{Δ} und L_{Σ} ist, dass diese den gleichen Einfluss der ionosphärischen Fehler aufweisen, der bis auf das Vorzeichen des Fehlerterms übereinstimmt. Dadurch lässt sich der Einfluss der Ionosphäre durch eine einfache Mittelbildung zwischen L_{Δ} und L_{Σ} eliminieren. Die so entstandene Kombination wird auch als *ionosphäre freie Signal* bezeichnet (vgl. Seeber, 2003). Es gilt somit für das ionosphäre freie Signal L_3 (vgl. Keller, 2007):

$$L_3 = \frac{L_{\Delta} + L_{\Sigma}}{2} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2. \quad (3.57)$$

Die Kombination L_3 wird unter anderem auch bei EPOS-OC als ein Beobachtungstyp eingesetzt.

Neben den linearen Kombinationen der Phasenbeobachtungen ist es auch möglich lineare Kombinationen zwischen den Codebeobachtungen zu bilden. Derzeit ist dies jedoch nur mit P-Codebeobachtungen realisierbar, da die C/A Code nicht auf der L_2 Trägerfrequenz verfügbar ist, und aktuell noch wenige Satelliten über den neueren L2C Code verfügen.

Ambiguity-Fixierung

Wie bereits zuvor beschrieben, müssen bei der Auswertung der Phasenbeobachtungen die zugehörigen Ambiguitäten gelöst werden. Dies stellt eine der fundamentalen Aufgaben bei den GPS Auswertungen dar. Zur Lösung dieses Problems existieren mehrere Strategien und Algorithmen. Die bekanntesten davon sind (vgl. Seeber, 2003):

- Die geometrische Methode,
- Kombinierung von Code- und Phasenbeobachtungen und
- Ambiguity Suchalgorithmen.

Die *geometrische Methode* bedient sich nach Seeber (2003) der zeitlich variablen geometrischen Beziehung zwischen dem Empfänger und den GPS Satelliten. Nachdem die GPS Signale im Empfänger registriert und identifiziert wurden, wird die Anzahl der Wellenzyklen kontinuierlich gemessen und gezählt. Die Anfangsambiguität beim Messstart bleibt dabei über die Zeit hinweg konstant und kann als eine zusätzliche Variable geschätzt werden. Die Effizienz des Verfahrens wird durch eine längere Messdauer gestiegen. Falls der Empfänger zwischenzeitlich den Kontakt zu einem der Satelliten verliert, muss eine neue Anfangsambiguität für die nachfolgende Messung definiert und geschätzt werden. Dies stellt das sogenannte Cycle-Slip Problem dar und wird in dem nächsten Abschnitt "Cycle-Slips Korrektur" auf der nächsten Seite etwas genauer erläutert.

Der Vorteil dieser Methode liegt in einer einfachen Implementierung. Der Nachteil stellt jedoch die lange Beobachtungszeit, die für eine hohe Genauigkeit bei der Lösung der Ambiguitäten notwendig ist. Weitere Schwierigkeiten können auftreten, falls systematische Fehlereinflüsse auf Beobachtungen, wie beispielsweise Atmosphäre, Uhrenfehler etc., nicht ausreichend modelliert werden, so dass der verbleibende Fehleranteil in den Beobachtungen die Ambiguität-Lösung beeinflussen kann. Des Weiteren ist diese Methode für eine kinematische Anwendung nicht geeignet.

Die zweite Möglichkeit zur Lösung der Ambiguitäten durch eine *Kombinierung der Code- und Phasenbeobachtungen* erlaubt nach Seeber (2003) auch einen Einsatz bei kinematischen Anwendungen. So wird hier die Kombination aus den Code- und Phasenmessungen dazu benutzt, um die Ambiguität der Trägerwelle zu lösen. Als Phasenbeobachtungen wird in der Regel der "wide lane" Signal L_{Δ} benutzt, da die originale Signale L_1 und L_2 über eine relativ kurze Wellenlänge verfügen und sich daher wenig für die Lösung der Ambiguitäten nach diesem Verfahren eignen. Um auch den Einfluss der atmosphärischen Fehler zu eliminieren, werden als Codebeobachtungen nur solche Signale verwendet, die über identische Ausbreitungseigenschaften in der Atmosphäre verfügen, wie die jeweiligen Signale mit den Phasenbeobachtungen. Im Falle der "wide lane" Kombination L_{Δ} der Phasenbeobachtungen wäre es die "narrow lane" Kombination C_{Σ} der Codebeobachtungen. So gilt es für die Kombination der Code- und Phasenbeobachtungen nach diesem Verfahren (vgl. Seeber, 2003):

$$PR_{CR} - PR_{CD} = \lambda N + dT_A + d\varepsilon, \quad (3.58)$$

mit

- PR_{CR} - Pseudostrecke aus den Phasenbeobachtungen,
- PR_{CD} - Pseudostrecke aus den Codebeobachtungen,
- dT_A - verbleibende Restfehler (beispielsweise Verzögerungsfehler aufgrund der Elektronik),
- $d\varepsilon$ - Messrauschen.

Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass es komplett unabhängig von der Messgeometrie, den atmosphärischen Fehlern und den Uhrenfehlern ist, und auch im kinematischen Modus angewendet werden kann (vgl. Seeber, 2003).

Einige Probleme werden hier jedoch durch das Messrauschen $d\varepsilon$ verursacht. So liegt das Rauschen der Codemessungen um ein vielfaches höher als das Rauschen der Phasenmessungen. Als Konsequenz darauf müssen die Codemessungen so lange durchgeführt werden, bis das Rauschen der Code-Lösung unter das Niveau der halben Wellenlänge der Trägerphase fällt, da das Rauschen der Code-Lösung andernfalls die Bestimmung der Ambiguitäten unmöglich machen würde (vgl. Seeber, 2003).

Das letzte Verfahren mit *Ambiguity Suchalgorithmen* wurde nach Seeber (2003) mit Hinblick darauf entwickelt, um die notwendige Beobachtungsdauer für die Lösung der Ambiguitäten zu reduzieren. Die Grundidee basiert hier darauf, mittels eines speziellen Algorithmus nach optimalen Ambiguity-Kombinationen für die Signale zu suchen. Der Suchalgorithmus beginnt dabei mit einer gleitenden Anfangsambiguität-Lösung, die mit Hilfe von speziellen Optimierungstechniken auf diskrete Integer Werte verbessert wird. Alle möglichen Kombinationen werden hier aus einem vordefinierten Ambiguität-Raum durchsucht. Jeder zusätzliche GPS Satellit reduziert die Anzahl der

in Frage kommenden Möglichkeiten und verbessert die Effizienz des Algorithmus. Ein Beispiel eines solchen Algorithmus ist das LAMBDA Algorithmus (*Least Squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*), der an der Delft University of Technology entwickelt wurde (vgl. Teunissen, 1995).

Vorteile solcher Suchalgorithmen liegen unter anderem in einer schnellen Ambiguity-Lösung und einer Möglichkeit eines kinematischen Einsatzes. Die Nachteile sind jedoch Anfälligkeit gegenüber von systematischen Fehlereinflüssen, wie beispielsweise Atmosphäre, sowie Notwendigkeit von Messungen zu möglichst vielen GPS Satelliten, um die maximale Effizienz des Verfahrens zu erreichen (vgl. Seeber, 2003).

Neben den bereits besprochenen Verfahren, besteht auch noch die Möglichkeit mehrere Verfahren untereinander zu kombinieren, und so die Ambiguity-Lösung durch eine schrittweise Berechnung zu optimieren und zu verbessern (vgl. Seeber, 2003).

Cycle-Slips Korrektur

Ein Cycle-Slip entsteht, wenn die Verbindung zum GPS Satelliten während der Messphase kurzzeitig unterbrochen wird. Die Größe eines Cycle-Slips kann dabei von nur einem Zyklus bis hin zu tausenden betragen, in Abhängigkeit von der Dauer der Unterbrechung. Unabhängig von seiner Größe kann ein Cycle-Slip jedoch die Bestimmung der Ambiguity verfälschen und somit auch die Auswertung der Phasenbeobachtungen. Aus diesem Grund ist es wichtig während der Datenaufbereitung alle Cycle-Slips zu korrigieren. Eine Alternative zur Korrektur eines Cycle-Slips wäre aber auch die Bestimmung einer neuen Ambiguity für die nachfolgende Messung. Beide Fälle setzen jedoch eine erfolgreiche Identifizierung aller vorhandenen Cycle-Slips voraus. Zum Auffinden von Cycle-Slips existieren verschiedene Strategien. In der Regel werden dabei lineare Kombinationen von Phasenbeobachtungen gebildet und analysiert. Die Grundidee hier ist, dass die gebildeten linearen Kombinationen stets einen kontinuierlichen geglätteten Charakter aufweisen, der jedoch durch einen Cycle-Slip in Form einer lokalen Abweichung unterbrochen wird. Folgende drei Möglichkeiten zum Aufdecken von Cycle-Slips sind verbreitet (vgl. Seeber, 2003):

- Bildung von Einzel-, Doppel-, Dreifach- oder Vierfachdifferenzen und Untersuchen dieser auf sprungartige Abweichungen im zeitlichen Verlauf. Die Größe der Abweichungen steigt dabei mit dem Grad der Differenzen, so dass die Cycle-Slips besonders gut mit Differenzen höherer Grade identifiziert werden können.
- Nach der Bildung einer linearen Kombination wird ein glättendes Polynom an diese angepasst. An den Stellen mit Cycle-Slips weist der Polynom die größten Abweichungen zu dem zu untersuchenden Signal. Diese können anschließend durch eine einfache Differenzbildung zwischen den beiden aufgedeckt werden.
- Ein dynamisches Modell auf der Basis eines Kalman-Filters wird dazu benutzt, um eine Vorhersage über den Verlauf des Signals zu treffen. Der Vergleich zwischen dem original Signal und der Vorhersage gibt anschließend eine Auskunft über die vorhandenen Cycle-Slips.

GPS Fehlerhaushalt

Wie bereits vorher beschrieben, unterliegen alle GPS Beobachtungen einer Reihe von Fehlereinflüssen. Diese Fehler entstehen unter anderem dadurch, dass die GPS Beobachtungsmodelle die physikalische Realität nicht exakt widerspiegeln. So breiten sich die GPS Signale in Wirklichkeit nicht im Vakuum aus, sondern durchlaufen verschiedene atmosphärische Schichten, was die Ausbreitungsgeschwindigkeit direkt beeinflusst. Hier spielen vor allen die Ionosphäre und die Troposphäre der Erde eine große Rolle. Des weiteren kann die Newton'sche Physik die tatsächliche physikalische Realität nicht komplett widerspiegeln, da die Satellitenbewegung unter anderem auch relativistischen Effekten unterworfen ist. Ein weiterer Punkt wäre auch die Tatsache, dass das erdfeste Koordinatensystem kein richtiges inertiales System ist. Weitere Fehlerquellen kommen von der Satelliten- und Empfängerhardware, wie beispielsweise Uhrenfehler, sowie aufgrund der Messgeometrie, wie beispielsweise die Mehrwegeeffekte.

Die obigen Fehler lassen sich anhand ihrer Quelle in drei Hauptkategorien einordnen (vgl. Seeber, 2003):

- Satelliten Bahn- und Uhrenfehler,
- Signalausbreitungsfehler und
- Empfängerfehler.

Der Einfluss dieser Fehler wirkt sich direkt in der gemessenen Pseudostrecke aus, die dadurch verfälscht wird. Die ungefähre Größenordnung des so entstandenen Fehlers wird in der Tabelle 2 vorgestellt.

Tabelle 2: Einfluss der GPS Fehler auf die gemessene Pseudostrecke. (Quelle: Seeber, 2003).

Fehlerquelle	RMS Wert des Fehlers
Satellitenfehler	
Bahnfehler	1 - 2 m
Uhrenfehler	1 - 2 m
Signalausbreitungsfehler	
Ionosphärische Fehler (bei Messungen mit 2 Frequenzen)	cm - dm
Ionosphärische Fehler (bei Benutzung eines ionosphären Modells)	1 - 50 m (abhängig vom Modell)
Troposphärische Fehler (bei Benutzung eines troposphären Modells)	dm
Mehrwegeffekte	1 - 2 m
Empfängerfehler	
Rauschen	0.2 - 1 m
Signalverzögerungen aufgrund der Elektronik	dm - m
Abweichung des Antennenphasenzentrums	mm - cm

Im Rahmen einer Auswertung der GPS Beobachtungen können die GPS Fehler auf zwei Arten berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit davon stellt der Einsatz spezieller Modelle dar, die den jeweiligen Fehler approximieren und die Beobachtungen um den entsprechenden Betrag korrigieren sollen. Ein Beispiel dafür wären Ionosphären und Troposphären Modelle, die einen Rückschluss auf die Ausbreitungsverzögerung der GPS Signale entlang der Pseudostrecke geben. Die zweite Möglichkeit die GPS Fehler zu berücksichtigen, ist ein Schätzen von zusätzlichen Unbekannten für jede Fehlerquelle, und deren Bestimmung im Rahmen der Ausgleichung. Dies ist besonders dann hilfreich, wenn keine ausreichend genauen Modelle für eine Fehlerquelle vorhanden sind. Alternativ ist es auch möglich beide Verfahren zu kombinieren. Zusätzlich dazu können auch noch weitere Unbekannten unabhängig von den Fehlerquellen geschätzt werden. Diese sollen dann die eventuellen Restfehler aufgrund von nicht perfekten Modellen abfangen. Dies wird beispielsweise in EPOCH-OC auch umgesetzt.

3.3.2 Satellite Laser Ranging

Beim Satellite Laser Ranging werden Laufzeiten von Laserpulsen, die von einer Basisstation zu einem Satelliten geschickt werden, gemessen. Die daraus abgeleitete Strecke zwischen der Basisstation und dem Satelliten kann unter anderem dazu benutzt werden, um die exakte Position des Satelliten zu bestimmen. Der eigentliche Messvorgang wird in der nachfolgenden Abbildung 9 auf der nächsten Seite vorgestellt. So wird von einem Lasergenerator ein Impuls erzeugt, der über einen Transmitter zum Satelliten geschickt wird. Gleichzeitig dient dieser Laserimpuls zum Starten einer internen Zeitzähleinheit. Am Satelliten angekommen wird der Laserimpuls von einem angebrachten Reflektor zurückgeworfen. Der zurückgeworfene Signal wird schließlich von einem Detektor der Beobachtungsstation registriert und dient gleichzeitig zum Stoppen der internen Zeitzähleinheit. Zu den weiteren Komponenten der Station gehören unter anderem eine Datenaufzeichnungs- und

Auswerteeinheit, sowie auch eine Steuerungseinheit, die den Transmitter und Reflektor in Richtung des Satelliten auf der Basis einer Echtzeit-Bahnvorhersage ausrichten.

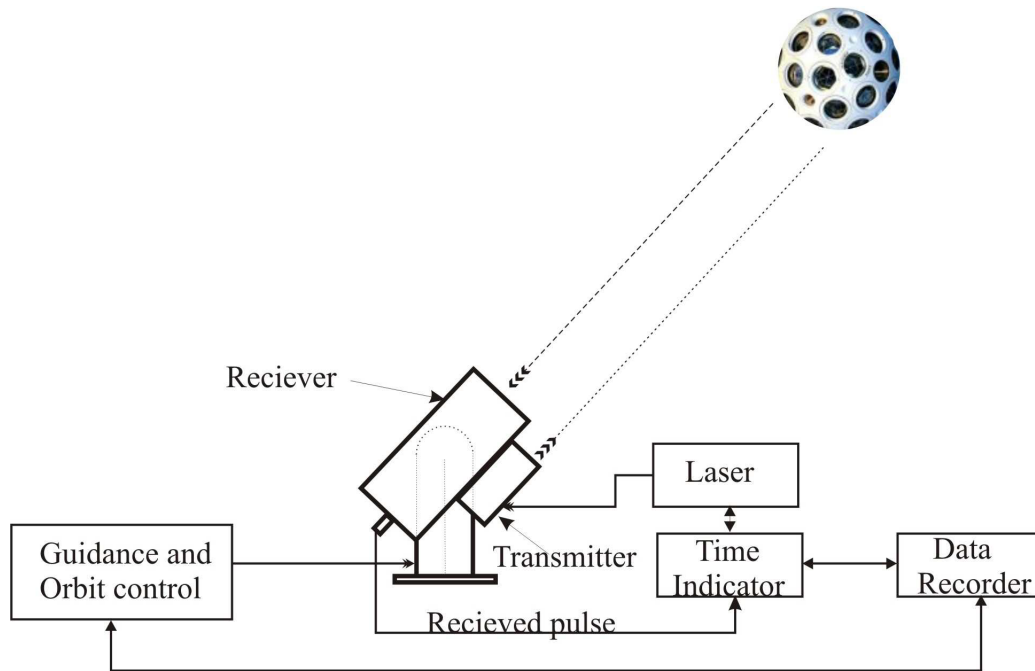


Abbildung 9: Messablauf beim Satellite Laser Ranging. (Quelle: Keller, 2007).

Anhand der gemessenen Beobachtungszeit Δt kann die Strecke d zwischen der Beobachtungsstation und dem Satelliten bestimmt werden. Die grundlegende Beobachtungsgleichung hierzu lautet:

$$d = \frac{\Delta t}{2} c, \quad (3.59)$$

mit c - Lichtgeschwindigkeit.

Die Formel (3.59) stellt jedoch nur eine stark vereinfachte Beobachtungsgleichung dar, ohne Berücksichtigung von messbedingten Korrekturen. Diese sind notwendig um die Messfehler aber auch die Positionen der Messpunkte im jeweiligen Koordinatensystem zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 10 auf der nächsten Seite).

Die korrigierte Beobachtungsgleichung lautet daher (vgl. Seeber, 2003):

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t + \Delta d_0 + \Delta d_S + \Delta d_b + \Delta d_r + \eta, \quad (3.60)$$

mit:

- Δd_0 - Exzentrizitätskorrektur der Basisstation,
- Δd_S - Exzentrizitätskorrektur des Satelliten,
- Δd_b - Signalverzögerung der Messeinheit,
- Δd_r - Refraktionskorrektur und
- η - verbleibende Restfehler und Messrauschen.

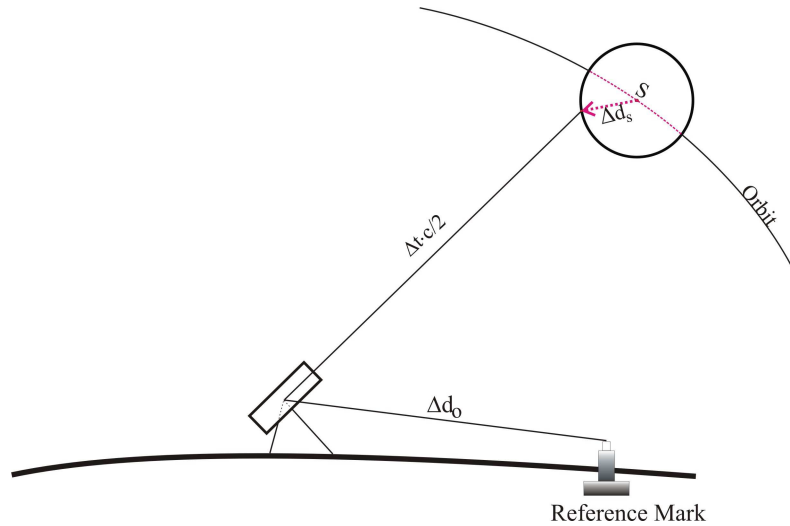


Abbildung 10: Messbedingte Korrekturen bei SLR. (Quelle: Keller, 2007).

Die Exzentrizitätskorrekturen Δd_0 und Δd_S beschreiben die Positionen der Messpunkte im lokalen Koordinatensystem des Satelliten oder der Beobachtungsstation und stellen damit einen Bezug zu den eigentlichen Referenzpunkten dar.

Die Signalverzögerung der Messeinheit Δd_b beschreibt eine Abweichung zwischen dem geometrischen Nullpunkt des Lasers und dem elektronischen Nullpunkt der Messungen. Sie wird meistens als eine konstante zeitliche Verzögerung des Messsignals, die von zusätzlichen Laserschwankungen überlagert wird, modelliert und kann durch eine Kalibrierung bestimmt werden (vgl. Seeber, 2003).

Mit der Refraktionskorrektur Δd_r werden dagegen Laufzeitverzögerungen des Laserimpuls korrigiert, die entlang der Messstrecke durch die Atmosphäre verursacht werden. Die größten Laufzeitverzögerungen werden dabei durch den Wasserdampf in der Troposphäre verursacht (vgl. Seeber, 2003). Ein einfaches Modell zur Berechnung der Refraktionskorrektur Δd_r , das auf einigen atmosphärischen Parametern basiert, die an der Beobachtungsstation gemessen werden, ist das Modell von Marini und Murray (vgl. Seeber, 2003; Marini und Murray, 1973):

$$\Delta d_r = \frac{f(\lambda)}{f(\varphi, H)} \cdot \frac{A + B}{\sin E + \frac{B/(A+B)}{\sin E + 0.01}}, \quad (3.61)$$

mit:

- $A = 0.002357P_0 + 0.000141e_0$,
- $B = (1.084 \cdot 10^{-8}) P_0 T_0 K + (4.734 \cdot 10^{-8}) \frac{P_0^2}{T_0} \frac{2}{(3-1/K)}$,
- $K = 1.163 - 0.00968 \cos 2\varphi - 0.00104T_0 + 0.00001435P_0$,

und:

- E - Elevationswinkel des Satelliten (in grad),
- P_0 - Luftdruck an der Beobachtungsstation (in millibar),
- T_0 - Lufttemperatur an der Beobachtungsstation (in Kelvin),
- e_0 - Wasserdampfdruck an der Beobachtungsstation (in millibar),
- φ - Breite der Station,
- $f(\lambda)$ - Laser Frequenzparameter und
- $f(\varphi, H)$ - Funktion der Beobachtungsstation.

Wobei:

$$f(\lambda) = 0.9650 + \frac{0.0164}{\lambda^2} + \frac{0.000228}{\lambda^4},$$

und

$$f(\varphi, H) = 1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00031H,$$

mit λ - Laserwellenlänge in micrometer und H - Stationshöhe in kilometer.

Etwas kompliziertere und aktuelle Modelle zur Berechnung von Laufzeitverzögerungen der Laserimpulse innerhalb der Atmosphäre sind das sogenannte *“mapping function”* (MF) Modell von Mendes et al. (2002), sowie das *“zenith delay”* (ZD) Modell von Mendes und Pavlis (2004).

Die Genauigkeit der Streckenmessung bei SLR liegt bei den aktuellen Systemen bei rund 1-3 cm. Eine neue Generation der SLR Systeme befindet sich jedoch bereits in der Entwicklung, diese sollen künftig eine Genauigkeit von ca. 1-3 mm in der Streckenmessung aufweisen (vgl. Seeber, 2003).

Die Vorteile der SLR-Beobachtungen liegen nach Seeber (2003) unter anderem in einem hohen Genauigkeitspotenzial, das auf guten Ausbreitungsbedingungen der Lichtimpulse basiert, Bestimmung von absoluten geozentrischen Koordinaten, sowie einer zusätzlichen Unterstützung bei Bahnrechnungsverfahren. Nachteile dagegen sind eine Abhängigkeit des Verfahrens von Wetterbedingungen, sehr hohe Kosten bei Basisstationen, sowie eine kaum vorhandene Mobilität der Messausrüstung und somit eine eingeschränkte operationelle Fähigkeit.

In EPOS-OC werden die SLR-Beobachtungen als ein zusätzlicher Beobachtungstyp bei Bahnrechnungen zwecks einer unabhängigen Qualitätskontrolle eingesetzt.

4 Bahnberechnung mit EPOS-OC

4.1 Berechnung der GPS Bahnen und Uhren

Bevor die Berechnung der Basislinien erfolgen kann, müssen die Bahnen der beiden LEO Satelliten hochgenau bestimmt werden. Dafür werden ihrerseits die hochgenauen GPS Bahnen benötigt.

Die Berechnung der GPS Bahnen in EPOS-OC erfolgt jeweils für einen Tag. Als Beobachtungen dienen GPS Code- und Phasemessungen zu den GPS Stationen auf der Erdoberfläche. Als ein zusätzlicher Beobachtungstyp werden auch SLR Beobachtungen genutzt, diese bekommen jedoch eine sehr kleine Gewichtung, um deren Einfluss in der Ausgleichung zu minimieren, da sie als unabhängige Qualitätskontrolle benutzt werden.

Im ersten Schritt der Berechnungen findet die Datenvorbereitung statt. Die GPS und SLR Daten werden für alle vorhandene Beobachtungsstationen und GPS Satelliten vom zentralen Server geholt. Aus der Liste der Beobachtungsstationen werden an dieser Stelle diejenige aus der weiteren Berechnung ausgeschlossen, deren Uhrenfehler eine vorgegebene maximale Schranke überschreiten. Es werden dabei Grenzwerte sowohl für den Drift als auch für den Offset der Uhren definiert.

Im nächsten Schritt der Berechnung der GPS Bahnen werden die Daten auf vorhandene Cycle-Slips untersucht, und diese falls möglich korrigiert.

Da für die Bahnbestimmung nicht alle GPS Beobachtungsstationen benötigt werden, und stattdessen eine möglichst gleichmässige Verteilung der Bodenstationen über die Erdoberfläche wichtig ist, wird eine Stationsoptimierung durchgeführt. Zu diesem Zweck wird die Erdoberfläche in mehrere Sektoren von gleicher Größe aufgeteilt. Die Verteilung der Bodenstationen vor der Stationsoptimierung wird unter anderem in der Abbildung 11 verdeutlicht. Man erkennt hier, dass die größte Konzentration der Beobachtungsstationen in Europa und Nordamerika ist.

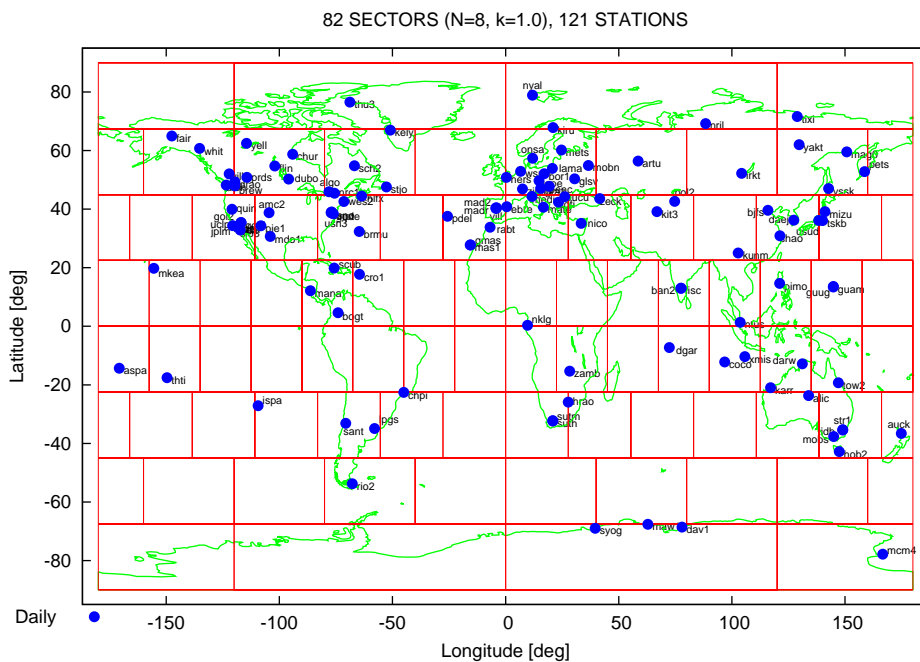


Abbildung 11: Verteilung der Beobachtungsstationen vor der Optimierung.

Infolge der Optimierung wird pro Sektor nur eine einzige Station ausgewählt, die innerhalb des Sektors über die maximale Anzahl der Beobachtungen verfügt, und nicht weniger als 10% der mittleren Anzahl der Beobachtungen aller Stationen hat. Den leeren Sektoren wird eine Station aus einem anderen Sektor zugeordnet, die innerhalb eines definierten Suchradius liegt und nicht bereits in ihrem eigenen Sektor ausgewählt wurde. Auch hier gilt als Auswahlkriterium die maximale Anzahl der Beobachtungen innerhalb des Suchradius, jedoch nicht weniger als 10% der

störbeschleunigungen nicht ausgeschlossen werden. Um diese auch aufzufangen und die Genauigkeit der Bahnberechnung zu erhöhen, werden sogenannte empirische Beschleunigungen eingeführt.

In EPOS-OC können verschiedene Modelle empirischer Beschleunigungen berücksichtigt werden. Als Bezugssystem für diese dient das Satellitendreibein mit dem Ursprung im Massenzentrum des Satelliten. Die erste Achse e_z des satellitengestützten Dreibeins entspricht dem Ortsvektor des Satelliten \vec{r}^0 in einem geozentrischen Koordinatensystem und zeigt somit in die radiale Richtung der Bahn. Die zweite Achse e_y ist definiert durch das Kreuzprodukt des Flugvektors und des Positionsvektors in einem geozentrischen Koordinatensystem: $e_y = \vec{v}^0 \times \vec{r}^0$, und zeigt somit in die Richtung der Bahnnormale. Schließlich entspricht die letzte und dritte Achse e_x dem Kreuzprodukt beider anderen Achsen: $e_x = e_z \times e_y$, und zeigt dabei in die ungefähre Flugrichtung (transversale Richtung). Die Ausrichtung der Achsen bezieht sich dabei immer auf den wahren, momentanen Zeitpunkt.

Bei der Bestimmung der empirischen Beschleunigungen im Rahmen der Berechnung der GPS Bahnen wird ein Modell periodischer Schwingungen verwendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass auf jede Achse des Satellitendreibeins eine periodische Störkraft wirkt, die einer Kosinus- und einer Sinus Schwingung entspricht. Diese Störkraft kann dann mit zwei Amplituden von jeweils einer Kosinus- und einer Sinusschwingung approximiert werden. Dabei wird in der Regel nur ein Satz der Amplituden definiert, der für die komplette Bahn gilt. Da die GPS Satelliten auf ihren hohen Bahnen eher geringeren Variationen der Störbeschleunigungen ausgesetzt sind, ist dies auch für eine hohe Bahngenauigkeit ausreichend.

Diese empirische Beschleunigungen werden jedoch numerisch nicht fest definiert und werden im Verlauf der Ausgleichung mitgeschätzt. Die Startwerte in der ersten Iteration werden meistens zu 0 gesetzt, da der Einfluss der Reststörkräfte in der Regel sehr gering ist, und in der Größenordnung von 10^{-6} m/s^2 liegt.

Auf die Modellierung der indirekten Sonneneinstrahlung durch die Erdreflexion und die thermische Strahlung der Erde (vgl. Kapitel 3.1.4) wird an dieser Stelle verzichtet, da die Modelle hierfür zu schlecht sind. Stattdessen wird deren Einfluss über die empirische Beschleunigungen approximiert.

4.2 Berechnung der Low Earth Orbit Bahnen

Nach einer erfolgreichen Berechnung der GPS Bahnen kann die Berechnung einer LEO Bahn beginnen. Als Beobachtungen dienen in erster Linie GPS Code und Phasen Messungen, die mit Hilfe des GPS Empfängers am Board des LEO Satelliten durchgeführt werden. Aber auch SLR-Messungen zu dem LEO Satellit von den entsprechenden Beobachtungsstationen, diese werden auch hier sehr gering gewichtet, damit sie keinen Einfluss auf die Bahnbestimmung ausüben können.

Die Berechnung einer täglichen LEO Bahn erfolgt stets in zwei Bahnbögen mit jeweils 14 Stunden Länge. So beginnt der erste Bogen um 23 Uhr des vorherigen Tages und endet um 13 Uhr an dem Berechnungstag. Der zweite Bogen beginnt dann um 11 Uhr des Berechnungstages und endet um 01 Uhr des nachfolgenden Tages. So entsteht immer eine zweistündige Bogenüberlappung. Dies ist notwendig, da infolge der Bahnintegration bedingt durch die Lösung des Anfangswertproblems Instabilitäten am Anfang und am Ende der Bahn entstehen können. Diese werden anschließend entfernt, indem ein Stück des Bahnbogen jeweils am Anfang und am Ende abgeschnitten wird. Darüber hinaus kann die Bogenüberlappung als zusätzliches Qualitäts- und Kontrollkriterium verwendet werden, indem die überlappenden Bogenstücke miteinander verglichen werden.

Im ersten Schritt der Bahnberechnung findet, analog zu der Berechnung der GPS Bahnen (vgl. Kapitel 4.1), die Datenvorbereitung statt. An dieser Stelle werden neben den Messdaten auch die zuvor berechneten hochgenauen GPS Bahnen vom zentralen Server geholt. Auch hier werden die Messdaten auf vorhandene Cycle-Slips untersucht, und diese falls möglich korrigiert.

Die Anfangswerte des LEO Satelliten für die Ausgleichung, bestehend aus der Anfangsposition und -geschwindigkeit, werden dem vorherigen Bogen entnommen. Alternativ kann der Vektor mit den Anfangswerten auch im Rahmen einer Bahnvorhersage generiert werden. Hierfür wird einfach ein Bahnbogen einer älteren Epoche bis zum gewünschten Zeitpunkt weiter integriert.

Nach der erfolgreichen Datenvorbereitung startet die Bahnberechnung des ersten Bogens mit einer Integrationsschrittweite von 30 Sekunden. Zu den Kräftenmodellen, die bei der Berechnung be-

rücksichtigt werden, zählen das vollständige Schwerefeld der Erde (vgl. Kapitel 3.1.1), Schwerefeld des Mondes, Gravitationsfelder der Sonne und der Planeten als Punktmasse (vgl. Kapitel 3.1.2), Atmosphärische Reibung (vgl. Kapitel 3.1.5), Strahlungsdruck der Sonne (vgl. Kapitel 3.1.4), sowie Erdzeiten und Ozeangezeiten (vgl. Kapitel 3.1.3). Die Entwicklung des Schwerefeldes der Erde erfolgt beispielsweise bei den Berechnungen der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen im Rahmen dieser Arbeit bis zum Grad und Ordnung $l = m = 120$. Während der Schwerefeld des Mondes im gleichen Beispiel mit dem Grad und Ordnung $l = m = 4$ entwickelt wird.

Auch hier, wie bereits bei der Berechnung der GPS Bahnen, werden die Restbeschleunigungen mit Hilfe der empirischen Beschleunigungen geschätzt. An dieser Stelle wird zwischen zwei Möglichkeiten unterschieden. Festlegung der empirischen Beschleunigungen für die operative Bahn, sowie Festlegung von empirischen Beschleunigungen für die Bahnabschnitte mit durchgeführten Manövern.

Beim ersten Fall dient als Modell für die empirischen Beschleunigungen das gleiche Modell wie zuvor bei der Berechnung der GPS Bahnen, nämlich das Modell periodischer Schwingungen, bei dem Amplituden einer Kosinus- und einer Sinusschwingung für jede Achse des satellitenfesten Bezugssystems (vgl. Kapitel 4.1) geschätzt werden. Im Gegensatz zu der Berechnung der GPS Bahnen werden hier mehrere Datensätze der empirischen Beschleunigungen definiert, die jeweils für einen Bahnabschnitt gültig sind. Dies ist notwendig, um stärkere Variationen der Restbeschleunigungen aufgrund der niedrigen Bahn möglichst genau zu modellieren. Innerhalb des jeweiligen Bahnabschnittes bleiben die festgelegten empirischen Beschleunigungen konstant. Bei den Berechnungen der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen im Rahmen dieser Arbeit werden die empirischen Beschleunigungen in Zeitschritten von ca. 45 Minuten definiert.

Im Falle der Satellitenmanöver werden für die betroffenen Bahnabschnitte Parameter in Form von Geschwindigkeitsinkrementen für jede Achse des satellitenfesten Bezugssystems definiert. Die Verteilung und die Definition dieser Parameter erfolgt nach einem festgelegten Algorithmus. Dieses wird weiter vorne im Kapitel 4.6 etwas ausführlicher behandelt.

Auf die direkte Modellierung der Sonneneinstrahlung infolge der Erdreflexion sowie der thermischen Erdstrahlung wird auch hier aufgrund von schlechten Modellen verzichtet, und stattdessen die Modellierung dieser Störkräfte über die empirischen Beschleunigungen bevorzugt.

Weiter unten werden die Ergebnisse der Bahnbestimmung für TerraSAR-X und TanDEM-X vorgestellt.

Berechnung der TanDEM-X und TerraSAR-X Bahnen

Die Berechnung der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen erfolgt sowohl im dynamischen Modus, mit Berücksichtigung aller Kräfte Modelle, als auch im kinematischen Modus, mit rein geometrischer Betrachtung der Messkonfiguration und ohne Berücksichtigung der Störkräfte. Der kinematische Modus dient dabei als Vergleich zum dynamischen Modus, um den Einfluss der Störkräfte, insbesondere durch die Manöver, auf die Bahnengenauigkeit abzuschätzen und zu verdeutlichen.

Der Analysezeitraum beträgt 3 Monate, vom 1. März 2012 bis 31 Mai 2012, und besteht somit aus 92 Tagen, die insgesamt 184 Bahnbögen beinhalten.

In nachfolgenden Abbildungen 13 und 14 auf Seite 41 werden die Residuen der Code- und Phasenbeobachtungen des TanDEM-X aus der dynamischen und kinematischen Bahnberechnung vorgestellt. Die Standardabweichungen und RMS-Werte der Beobachtungen folgen anschließend in den Abbildungen 15 und 16 auf Seite 42. Aufgrund der sehr kleinen Mittelwerte der Residuen (vgl. Abbildungen 13 und 14 auf Seite 41) sind die RMS-Werte an dieser Stelle nahezu identisch mit den Standardabweichungen.

Eine Auffälligkeit in den Daten der Abbildungen 13 und 14 stellen die sogenannten Datenlücken dar, die ein komplettes Fehlen eines Bahnbogenstückes signalisieren. Im Falle der dynamischen Berechnung des TanDEM-X betrifft es 3 Bahnbögen, während im Falle der kinematischen Berechnung 14 Bögen fehlen. Um einen besseren Vergleich zwischen der dynamischen und kinematischen Lösung zu ermöglichen, wurde die Auswertung der Ergebnisse auf die identische Bahnbögen in beiden

Lösungen reduziert, so dass die Ergebnisse in den Abbildungen 13 und 14 die gleichen Datenlücken aufweisen.

Für das Fehlen von Bahnbögen können mehrere Ursachen existieren. Die Hauptursache dafür ist auf die Manöver des Satelliten zurückzuführen (vgl. Abbildung 18 auf Seite 43). Während dieser Bahnänderungen erfolgt zwangsläufig eine Änderung der Störkraftbedingungen, die nicht exakt bestimmt werden kann und schlußendlich zu groben Positionsfehlern führen kann. Diese können wiederum zu großen Residuen in den Beobachtungen führen, und als Folge davon zu einer Eliminierung betroffener Beobachtungen im Rahmen einer internen Qualitätskontrolle. So stellt die Anzahl der verworfenen Beobachtungen, als Prozentsatz aller verfügbaren Beobachtungen, ein Qualitätskriterium für die Annahme einer Bahnlösung. Falls diese Anzahl der verworfenen Beobachtungen einen vorgegebenen Grenzwert überschreitet, wird die Bahn verworfen.

Zu den weiteren Qualitätskriterien gehören unter anderem Grenzwerte für die RMS-Werte der Code- und Phasenresiduen, Grenzwert für die Standardabweichung der bestimmten Position, maximale Zeitspanne zwischen dem letzten integrierten Punkt der Bahn und dem festgelegten Ende der Bahn, sowie minimale Anzahl der akzeptierten Beobachtungen. Ein Beispiel für solche einzuhaltende Qualitätsparameter ist in der Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Übersicht über die Qualitätsparameter für das Akzeptieren einer Bahn.

Parameter	Wert
RMS der Codebeobachtungen	70 cm
RMS der Phasenbeobachtungen	1 cm
Standardabweichung der Position	20 cm
Minimale Anzahl akzeptierter Beobachtungen	8000
Maximale Anzahl verworfener Beobachtungen	9 %
Maximale Zeitspanne zwischen dem letzten integrierten Punkt der Bahn und dem festgelegten Ende der Bahn	30 min

Mit Hilfe dieser Qualitätsparameter lassen sich auch die vielen Datenlücken in der kinematischen Lösung erklären. Da bei der kinematischen Lösung die zusätzlichen Störkräfte aufgrund der Manöver nicht berücksichtigt werden, führen sie zu groben Positionsfehlern in der Bahn. Dies wird auch in vielen Ausreißern in den Abbildungen 13 und 14 wiedergespiegelt. Als Folge der vielen Ausreißer kann eine umfangreiche Eliminierung von Beobachtungen stattfinden, die zu einer Verschlechterung der Zuverlässigkeit der Bahn und in Einzelfällen zu einem Abbruch der Bahnberechnung aufgrund der nicht erfüllten Qualitätsparameter führen kann. Dies wird auch bei der Betrachtung der Anzahl der akzeptierten Beobachtungen in der Abbildung 17 auf Seite 43 bestätigt. So weist die kinematische Lösung im Vergleich zur dynamischen eine geringere Anzahl der akzeptierten Beobachtungen.

Als Eliminierungskriterium für schlechte Beobachtungen dienen an dieser Stelle festgelegte Grenzen für Residuen. Ein Beispiel für solche Grenzen ist in der Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Maximale Residuen als Eliminierungskriterien für schlechte Beobachtungen.

Beobachtungstyp	Nummer der Iteration	Eliminierungskriterium [m]
Code	0	3000
Code	3	20
Code	4	10

So werden bei Code-Messungen vor der ersten Iteration alle Beobachtungen mit den Residuen, die aus der Berechnung mit den Anfangswerten resultieren und die Größe von 3000 m überschreiten, eliminiert. Ab der dritten Iteration beträgt die Grenze für das Eliminierungskriterium 20 m und ab der vierten Iteration 10 m. Für die Phasenbeobachtungen gibt es hingegen an dieser Stelle keine

festgelegten Grenzen, da in der Regel während der Eliminierung der Codebeobachtungen auch gleichzeitig die Phasenbeobachtungen an den gleichen Zeitpunkten eliminiert werden.

Zusätzlich zu diesen festen Grenzen als Eliminierungskriterien wird auch die statistische Verteilung betrachtet (vgl. Tabelle 5). So wird nach der ersten Iteration die Standardabweichung der ausgeglichenen Beobachtungen σ berechnet. Alle Codebeobachtungen, deren Residuen größer als $3 \cdot \sigma$ sind, werden eliminiert. Im Falle der Phasenbeobachtungen beträgt diese Grenze $6 \cdot \sigma$.

Tabelle 5: Eliminierungskriterien für schlechte Beobachtungen, berechnet als ein Vielfaches der σ .

Beobachtungstyp	Nummer der Iteration	Eliminierungskriterium ($x \cdot \sigma$)
Code	1	3
Phase	1	6

Die Ergebnisse der Auswertung der TerraSAR-X-Bahnen entsprechen im Wesentlichen den bereits oben vorgestellten Ergebnissen aus der Auswertung der TanDEM-X-Bahnen, und werden wie folgt zusammengefasst:

- Residuen der Codebeobachtungen in der Abbildung 19 auf Seite 44.
- Residuen der Phasenbeobachtungen in der Abbildung 20 auf Seite 44.
- Standardabweichungen und RMS-Werte der Codebeobachtungen in der Abbildung 21 auf Seite 45.
- Standardabweichungen und RMS-Werte der Phasenbeobachtungen in der Abbildung 22 auf Seite 45.
- Anzahl der akzeptierten Beobachtungen in der Abbildung 23 auf Seite 46.
- Übersicht über die Manövergeschwindigkeiten in der Abbildung 24 auf Seite 46.

Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse fällt auf, dass die TerraSAR-X-Bahnen deutlich weniger Lücken aufweisen, als die Bahnen des TanDEM-X. Insgesamt wurden nur 3 Bahnbögen während der kinematischen Bahnbestimmung nicht berechnet. Auch hier, wie bereits im Falle von TanDEM-X, beschränkt sich die Auswertung der Ergebnisse nur auf die gemeinsame Bahnbögen, so dass die Ergebnisse in den Abbildungen 19 und 20 die gleichen Datenlücken aufweisen.

Die Erklärung für diese vergleichsweise niedrigere Ausfallquote lässt sich aus der Abbildung 24 auf Seite 46 ableiten. Hier wird deutlich, dass TerraSAR-X in dem betroffenen Zeitraum viel weniger Manöver erfahren hat (vgl. TanDEM-X Manöver in der Abbildung 18 auf Seite 43), so dass diese Hauptstörquelle im Vergleich zu TanDEM-X geringer ausfällt, und die Bahnberechnung insgesamt stabiler verläuft.

Eine gesamte Auswertung der Code- und Phasenresiduen für beide Satelliten über den kompletten Analysezeitraum wird auch in der Tabelle 6 auf Seite 47 gegeben. Um einen besseren Vergleich zwischen den beiden Satelliten zu ermöglichen, wurden hier nur die gemeinsamen Bahnbögen berücksichtigt, die sich nach Abzug von Datenlücken aller Lösungen ergeben (insgesamt 16 Datenlücken).

Es fällt bei diesem Vergleich auf, dass der TanDEM-X insgesamt über weniger Beobachtungen verfügt als TerraSAR-X, bei nahezu gleicher Genauigkeit im dynamischen Modus. Dies lässt sich mit den Manöverdaten der beiden Satelliten korrelieren (vgl. Abbildungen 18 und 24). Da der TanDEM-X über mehr Manövern verfügt, ist seine Bahnberechnung im Vergleich zu TerraSAR-X größeren Fehlereinflüssen unterworfen. Dies wirkt sich in zusätzlichen verworfenen Beobachtungen, sowie einer verschlechterten Genauigkeit aus. Letzteres wird insbesondere beim Vergleich beider kinematischen Lösungen deutlich.

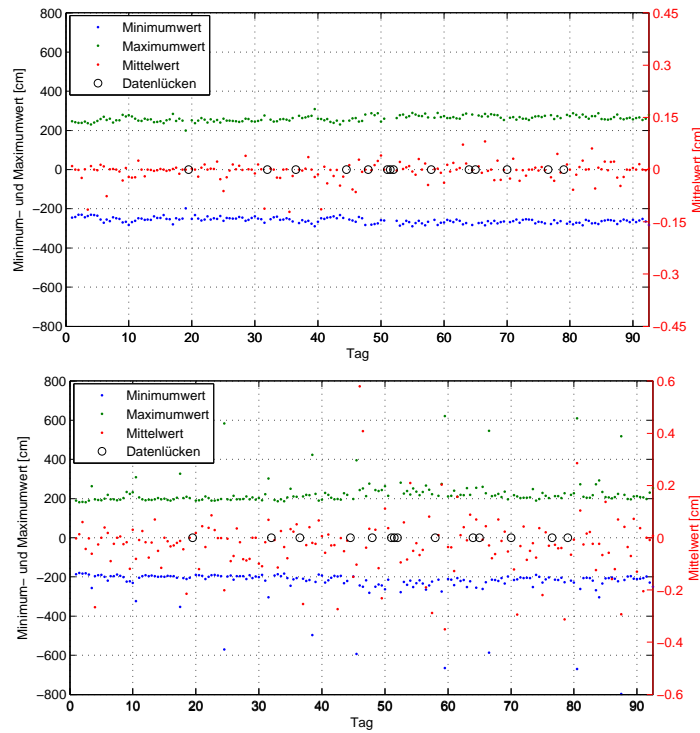


Abbildung 13: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

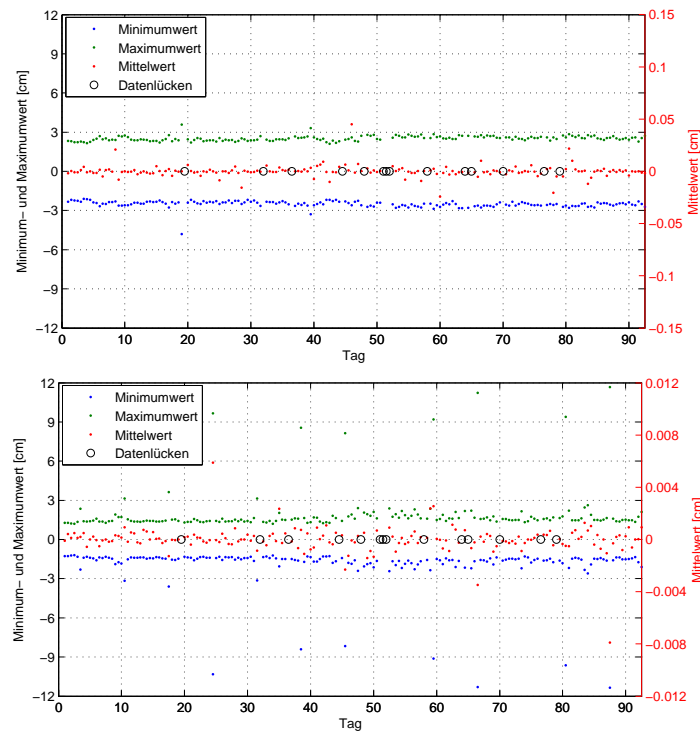


Abbildung 14: Residuen der Phasenbeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

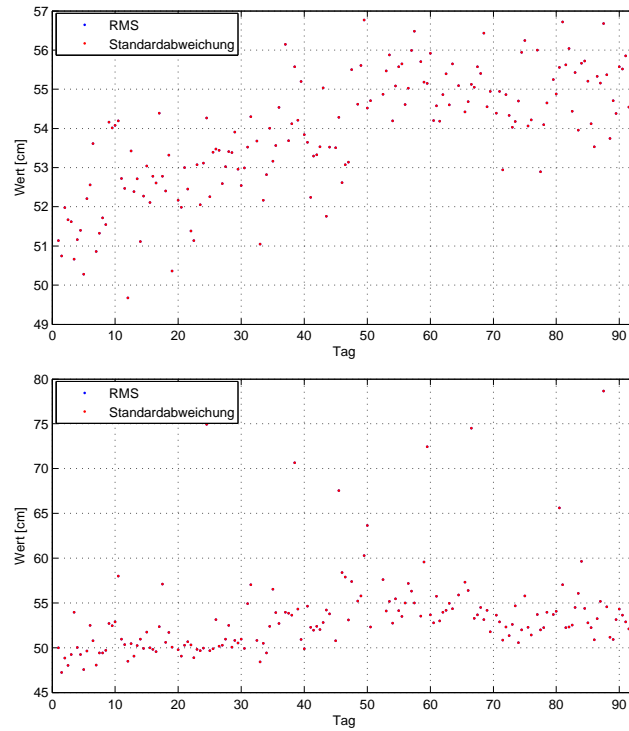


Abbildung 15: RMS und Standardabweichung der Codebeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

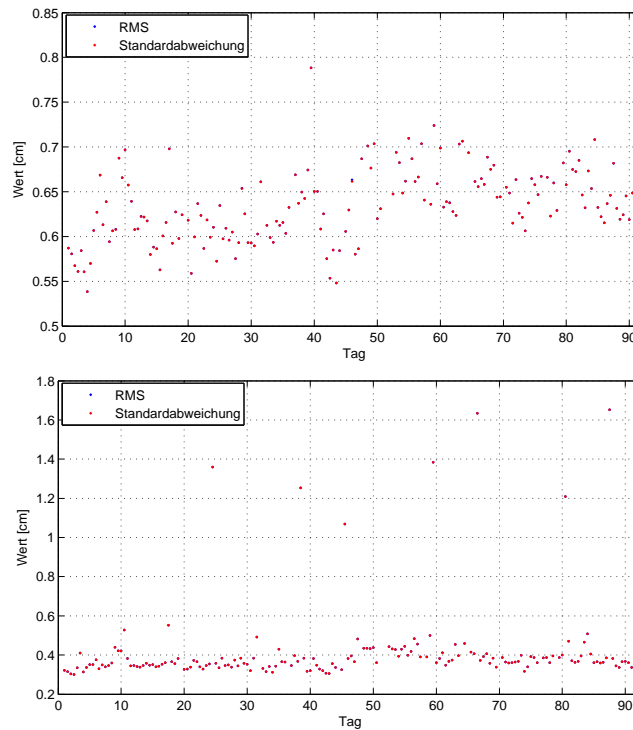


Abbildung 16: RMS und Standardabweichung der Phasenbeobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

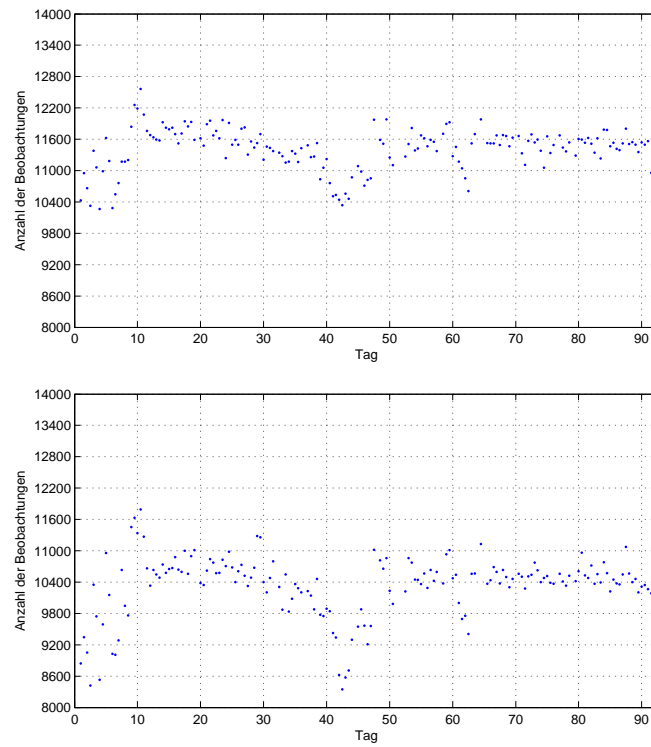


Abbildung 17: Anzahl der akzeptierten Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

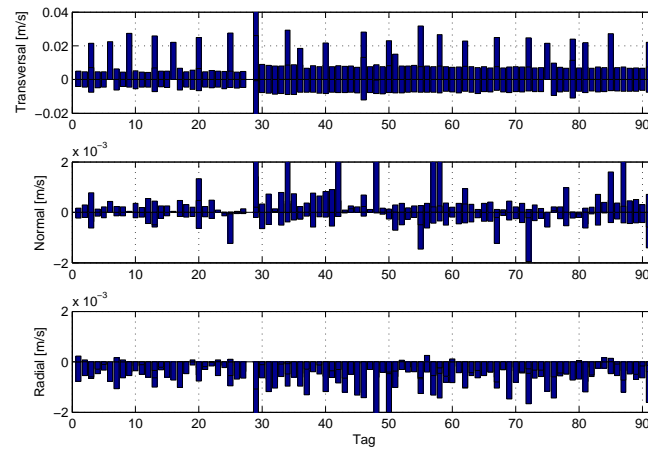


Abbildung 18: Manövergeschwindigkeiten des TanDEM-X entlang jeder Achse.

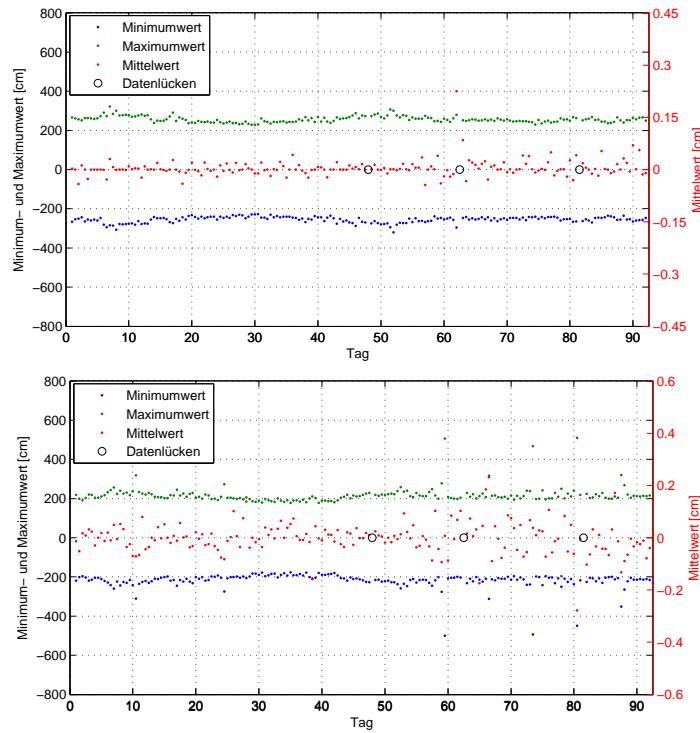


Abbildung 19: Residuen der Codebeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

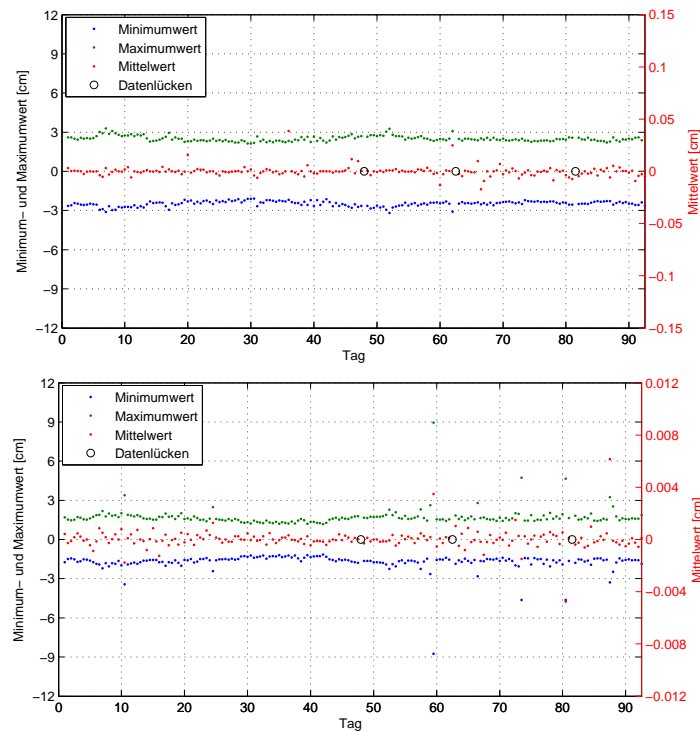


Abbildung 20: Residuen der Phasenbeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

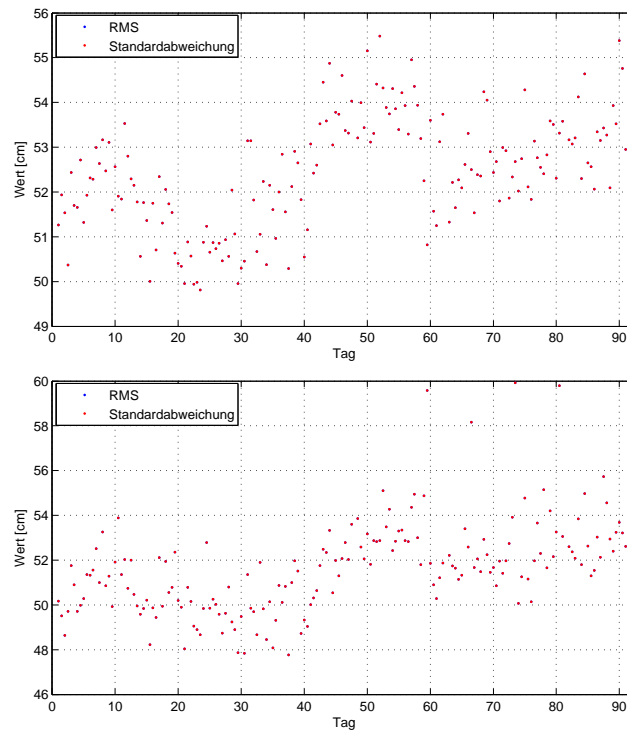


Abbildung 21: RMS und Standardabweichung der Codebeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

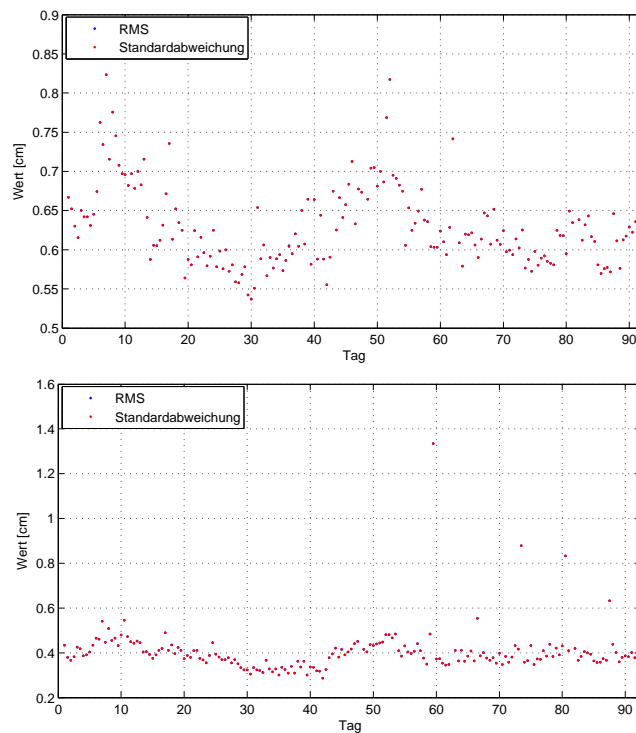


Abbildung 22: RMS und Standardabweichung der Phasenbeobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

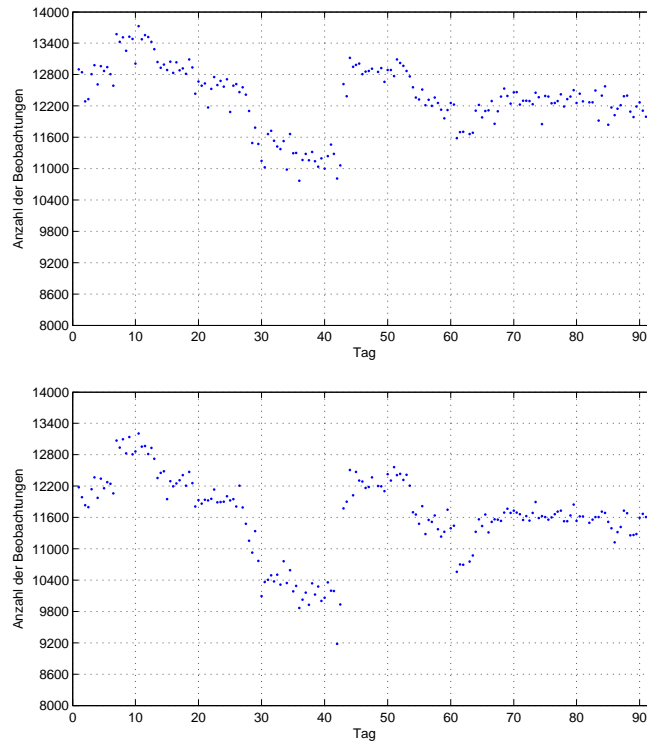


Abbildung 23: Anzahl der akzeptierten Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen (oben) und kinematischen (unten) Berechnung.

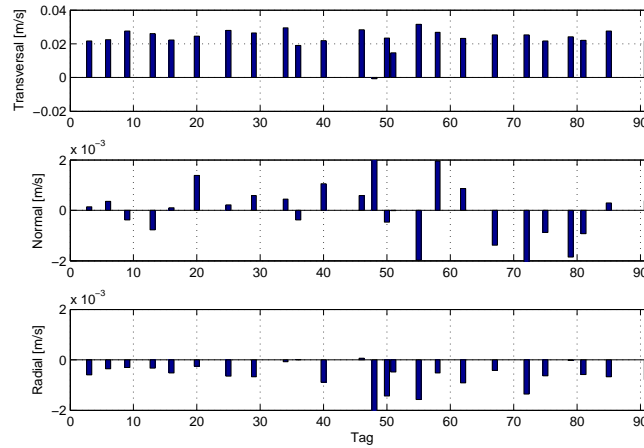


Abbildung 24: Manövergeschwindigkeiten des TerraSAR-X entlang jeder Achse.

Tabelle 6: Statistische Auswertung der Code- und Phasenresiduen von TanDEM-X und TerraSAR-X über den gesamten Analysezeitraum.

Residuen	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X dynamische Berechnung						
Code	309.14	-0.004	-289.37	53.90	53.90	1917637
Phase	3.58	0.000	-4.80	0.64	0.64	1917637
TanDEM-X kinematische Berechnung						
Code	621.33	-0.027	-797.43	53.78	53.78	1736341
Phase	11.66	0.000	-11.36	0.47	0.47	1736341
TerraSAR-X dynamische Berechnung						
Code	322.06	0.004	-307.92	52.44	52.44	2073334
Phase	3.29	0.000	-3.11	0.63	0.63	2073334
TerraSAR-X kinematische Berechnung						
Code	509.77	-0.001	-500.27	51.72	51.72	1954385
Phase	8.94	0.000	-8.76	0.42	0.42	1954385

4.3 Kombinierte Bahnlösung von zwei LEO Satelliten

Um die Basislinie zwischen zwei Satelliten hochgenau bestimmen zu können, reicht eine einfache Berechnung der Bahn beider beteiligten Satelliten nicht aus. Stattdessen wird eine kombinierte Bahnberechnung für beide Satelliten durchgeführt. Diese wird in mehrere Schritte aufgeteilt.

Im ersten Schritt findet eine erneute Berechnung der Bahn beider Satelliten im integrierten Modus statt. Dabei handelt es sich um eine simultane Berechnung der Bahnen beider Satelliten unter Verwendung von gemeinsamen Konfigurationsdateien sowie Ausgabedateien. Die eigentliche Berechnung der Bahnen entspricht der Beschreibung im Kapitel 4.2 mit einer Integrations-schrittweite der Bahn von 30 s. Im Zuge dieser ersten Berechnung finden bereits erste Eliminierungen schlechter Beobachtungen statt. Die Eliminierungskriterien sind vergleichbar mit denen bei der Berechnung der Einzelbahnen aus Tabellen 4 und 5 auf Seite 40.

Nach der erfolgreichen Dateneliminierung findet eine erneute Berechnung, diesmal mit den bereinigten Daten aus dem ersten Schritt statt.

Nun wird im dritten Schritt der Berechnung das Atmosphärenstörmodell durch 6 minütige empirische Beschleunigungen ersetzt. Dabei wird im Gegensatz zu den vorherigen Berechnungen ein Modell der linearen empirischen Beschleunigungen verwendet. Bei diesem Modell wird für jeden festgelegten Zeitpunkt und jede Koordinatenachse ein Beschleunigungswert sowie ein Sigma definiert. Die Sigma definiert dabei die maximale Verbesserung, die der Beschleunigungswert im Rahmen der Parameterschätzung erfahren werden kann. Die so definierten empirischen Beschleunigungen sind zwischen zwei Zeitpunkten nicht mehr konstant, sondern können innerhalb der Stützwerte des so gebildeten Polygons linear interpoliert werden. Dies erlaubt eine höhere Parameterdichte und eine bessere Approximation der Reststörbeschleunigungen im Vergleich zu einem Modell der periodischen empirischen Beschleunigungen.

Zugleich werden die empirische Beschleunigungen beider Satelliten durch zusätzliche Bedingungen aneinander gefesselt. Dabei wird angenommen, dass aufgrund der geringen Entfernung zwischen den beiden Satelliten, diese nahezu den gleichen Störkräften unterliegen.

Anschließend erfolgt eine erneute Berechnung mit den bereinigten Daten aus dem letzten Schritt.

Nun wird die Integrations-schrittweite der Bahn auf 1 Sekunde verkleinert. Die Verdichtung der Positionen der GPS Satelliten, deren Bahnen in einer Schrittweite von 30 Sekunden vorliegen, erfolgt an dieser Stelle durch eine einfache lineare Interpolation.

Im nächsten Berechnungsschritt wird die Eliminierung schlechter Beobachtungen ausgeschaltet. Dies ist für die anschließende Ambiguity-Fixierung notwendig, da hier keine zusätzlichen Datenlücken durch die automatische Eliminierung von Beobachtungen entstehen dürfen.

Und schließlich wird im letzten Schritt die Ambiguity-Fixierung durchgeführt und die endgültigen Bahnen der Satelliten werden bestimmt.

Weiter unten folgen nun die Ergebnisse einer kombinierten Bahnbestimmung für TerraSAR-X und TanDEM-X.

Kombinierte Berechnung der TanDEM-X und TerraSAR-X Bahnen

Die kombinierte Berechnung der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen erfolgt ausschließlich im dynamischen Modus. Der Analysezeitraum ist identisch mit dem aus der Einzelbahnbestimmung in dem Kapitel 4.2, es erstreckt sich vom 1. März 2012 bis zum 31 Mai 2012, und besteht somit aus 184 Bahnbögen.

Die Ergebnisse der Bahnberechnung werden in den weiter folgenden Abbildungen zusammengefasst:

- Residuen der Code- und der Phasenbeobachtungen in der Abbildung 25 auf der nächsten Seite.
- Standardabweichungen und RMS-Werte der Code- und Phasenbeobachtungen in der Abbildung 26 auf der nächsten Seite.
- Anzahl der akzeptierten Beobachtungen in der Abbildung 27 auf Seite 50.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die Größe der Residuen (vgl. Abbildung 25 auf der nächsten Seite) zwar mit den Ergebnissen der dynamischen Einzelbahnbestimmung (vgl. z.B. Abbildung 13 auf Seite 41 und Abbildung 19 auf Seite 44) vergleichbar und teilweise sogar kleiner ist, die Daten jedoch insgesamt mehr Datenlücken aufweisen als bei der Einzelbahnbestimmung. Die Anzahl der eliminierten Bahnbögen beläuft sich hier auf insgesamt 20 Bögen. Der Hauptgrund hierfür liegt nach wie vor in den Manövern der beiden Satelliten. Da bei der kombinierten Bahnberechnung die Bahnen beider Satelliten gemeinsam ausgewertet werden, müssen in jeder Iteration die Manöver beider Satelliten berücksichtigt werden, so dass der Gesamtstöreinfluss an dieser Stelle größer ist, als im Falle der Einzelbahnbestimmung. Als Folge davon ergibt sich eine größere Fehleranfälligkeit in der Bahnberechnung.

Eine gesamte Auswertung der Code- und Phasenresiduen aus der kombinierten Bahnberechnung zusammen mit den Ergebnissen der Einzelbahnberechnungen wird auch in der Tabelle 7 auf Seite 50 gegeben. Um auch hier einen besseren Vergleich zwischen allen Berechnungen zu ermöglichen, wurden hier nur die gemeinsamen Bahnbögen berücksichtigt, die sich nach Abzug von Datenlücken aller Lösungen ergeben (insgesamt 21 Datenlücken).

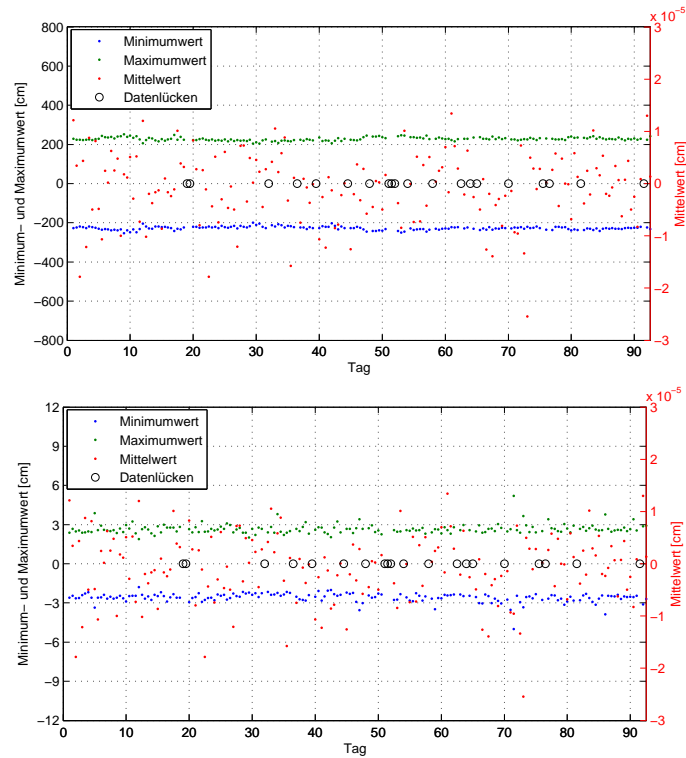


Abbildung 25: Residuen der Code- (oben) und Phasenbeobachtungen (unten) bei der kombinierten Berechnung der TanDEM-X-/TerraSAR-X-Bahnen.

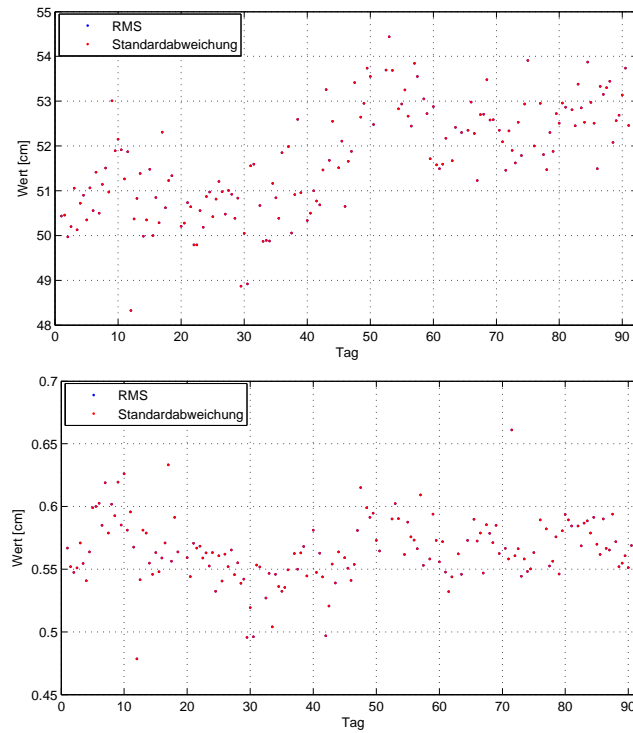


Abbildung 26: RMS und Standardabweichung der Code- (oben) und Phasenbeobachtungen (unten) bei der kombinierten Berechnung der TanDEM-X-/TerraSAR-X-Bahnen.

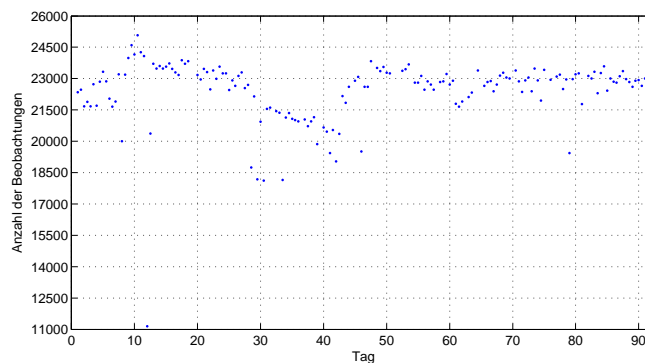


Abbildung 27: Anzahl der akzeptierten Beobachtungen bei der kombinierten Berechnung der TanDEM-X-/TerraSAR-X-Bahnen.

Tabelle 7: Statistische Auswertung der Code- und Phasenresiduen aus allen Berechnungen über den gesamten Analysezeitraum.

Residuen	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X dynamische Berechnung						
Code	289.55	-0.005	-289.22	53.91	53.91	1861317
Phase	2.85	0.000	-2.86	0.63	0.63	1861317
TanDEM-X kinematische Berechnung						
Code	621.33	-0.030	-797.43	53.85	53.85	1684556
Phase	11.66	0.000	-11.36	0.47	0.47	1684556
TerraSAR-X dynamische Berechnung						
Code	322.06	0.004	-307.92	52.43	52.43	2012410
Phase	3.29	0.000	-3.11	0.63	0.63	2012410
TerraSAR-X kinematische Berechnung						
Code	509.77	0.000	-500.27	51.73	51.73	1897266
Phase	8.94	0.000	-8.76	0.42	0.42	1897266
Kombinierte Berechnung TanDEM-X / TerraSAR-X						
Code	251.34	0.000	-253.42	51.77	51.77	3657215
Phase	5.19	0.000	-4.99	0.57	0.57	3657215

4.4 Schätzung der Bahngüten

4.4.1 Schätzung der Bahngüte der TerraSAR-X/TanDEM-X-Bahnen mit SLR Beobachtungen

Um die Genauigkeit einzelnen Bahnen besser beurteilen zu können, werden diese mit Hilfe der Satellite Laser Ranging Beobachtungen vermessen. Die SLR-Daten werden dabei vom International Laser Ranging Service (ILRS) (<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>) bereitgestellt.

Während dieser Bahnvermessung wird eine erneute vereinfachte Bahnberechnung gestartet, bei der jedoch keine Bahnintegration stattfindet, sondern lediglich die Residuen der SLR-Beobachtungen bestimmt werden. Als Eingabeparameter dienen die zuvor bestimmte Satellitenbahn und die SLR-Beobachtungen.

Da die SLR-Beobachtungen hochgenaue Messungen darstellen, ist anhand deren Residuen eine bedingte Aussage über die Genauigkeit einzelnen Bahnen möglich. Auf diese Weise können sowohl dynamische Bahnen mit den kinematischen, als auch die Einzelbahnen mit den Bahnen aus einer kombinierten Bahnberechnung verglichen werden.

Nach der Berechnung der SLR-Residuen wird eine statistische Auswertung dieser durchgeführt. Dabei werden minimale, maximale und Mittelwerte der Residuen, sowie deren Standardabweichung und RMS-Werte jeweils pro Bahnbogen und Beobachtungsstation berechnet und grafisch dargestellt. Ferner werden auch jeweilige globale Werte über alle Beobachtungsstationen berechnet und dargestellt.

Zu den Beobachtungsstationen gehören insgesamt 21 Stationen, die über die gesamte Erdoberfläche verteilt sind (*kursiv geschriebene* Namen sind die üblichen Stationsbezeichnungen in EPOS-OC):

- *Yarragadee* in Australien.
- *Washington* in den USA.
- *Zimmerwald* in der Schweiz.
- *Mount Stro* = Mount Stromlo Observatorium in Australien.
- *San Juan* in Argentinien.
- *Wettzell* in Deutschland.
- *Monument P* = Monument Peak in den USA.
- *Potsdam* in Deutschland.
- *Hartebeest* = Hartebeesthoek in Südafrika.
- *Graz* in Österreich.
- *Concepcion* in Chile.
- *Herstmonce* = Herstmonceux, England.
- *Changchun* in China.
- *Matera* in Italien.
- *Tanegashim* = Tanegashima, Japan.
- *San Fernan* = San Fernando, Spanien
- *Katzively* in der Ukraine.
- *Grasse* in Frankreich.
- *Riga* in Lettland.
- *Fort Davis* in den USA.
- *Koganei* in Japan.

Die Verteilung dieser Stationen wird auch in der weiter folgenden Abbildung 28 auf der nächsten Seite dargestellt.

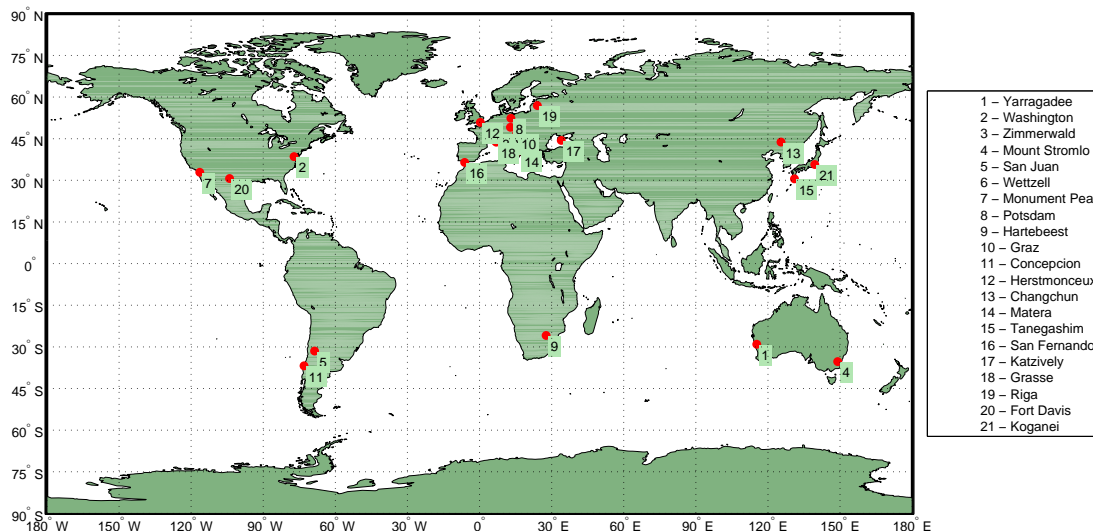


Abbildung 28: Verteilung der SLR-Stationen.

Die Darstellung der Ergebnisse der statistischen Auswertung der Vermessung der Bahnen erfolgt für den TanDEM-X in den Abbildungen 29 bis 38 auf den Seiten 52-54, für TerraSAR-X in den Abbildungen 39 bis 48 auf den Seiten 55-57, sowie im Falle der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen aus der kombinierten Bahnberechnung jeweils in den Abbildungen 49 bis 53 auf den Seiten 57-58 und in den Abbildungen 54 bis 58 auf den Seiten 58-59. Die erste Grafik in jeder Abbildung stellt den jeweiligen Gesamtwert über alle Stationen dar. Die Darstellung der Werte für die einzelne Beobachtungstationen erfolgt mit einer absteigenden Sortierung nach der Gesamtanzahl der akzeptierten Beobachtungen. Auf diese Weise lässt sich der Einfluss einer Station auf den Gesamtwert besser einschätzen.

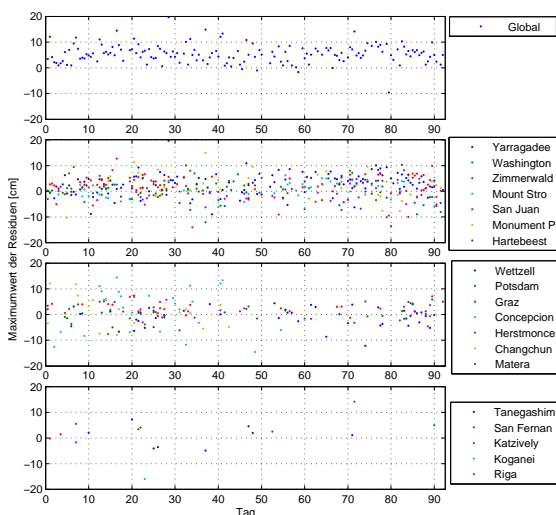


Abbildung 29: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.

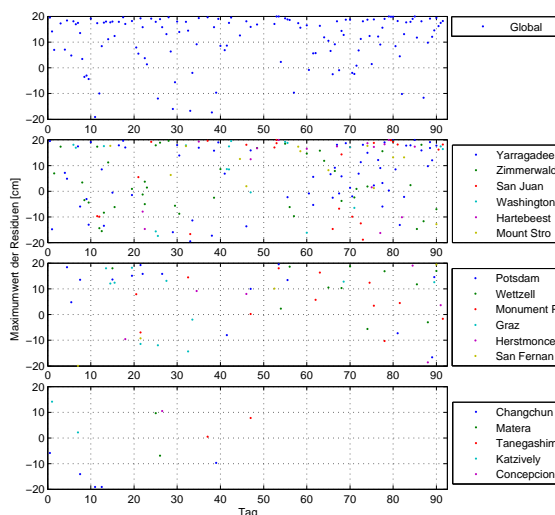


Abbildung 30: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.

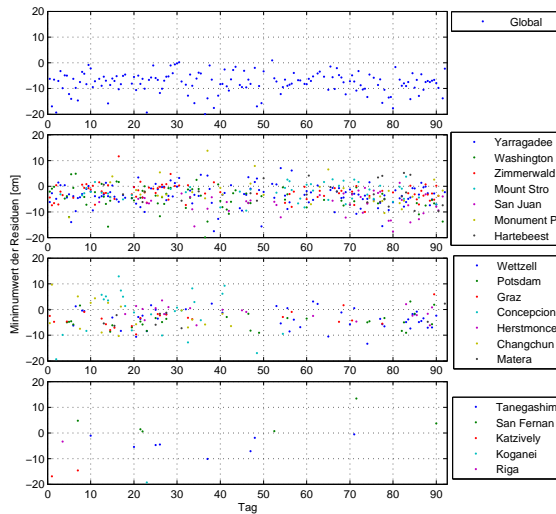


Abbildung 31: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.

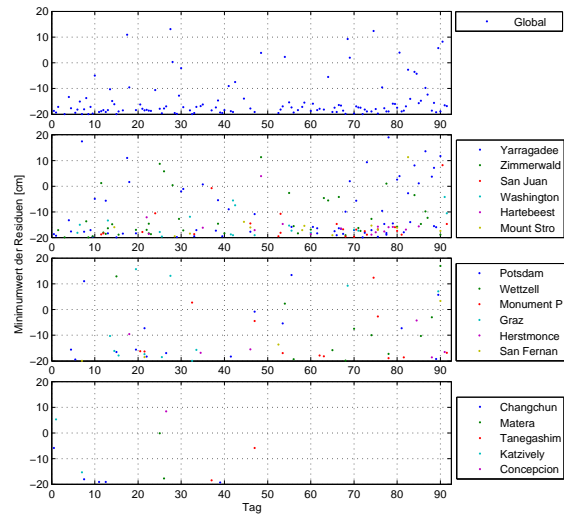


Abbildung 32: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.

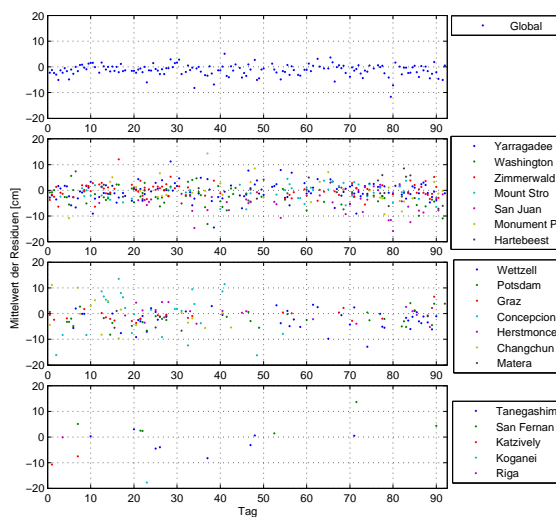


Abbildung 33: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.

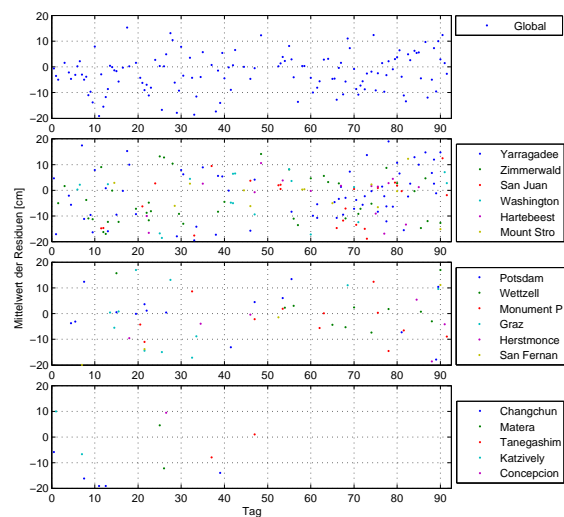


Abbildung 34: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.

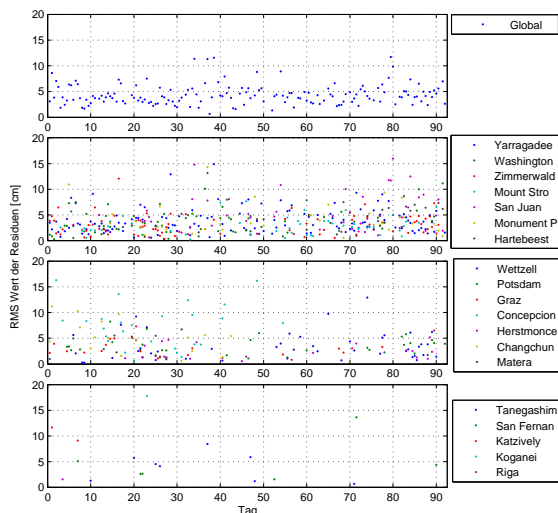


Abbildung 35: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.

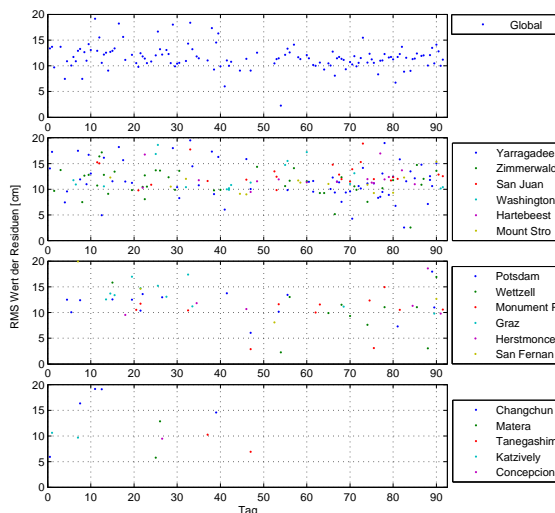


Abbildung 36: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.

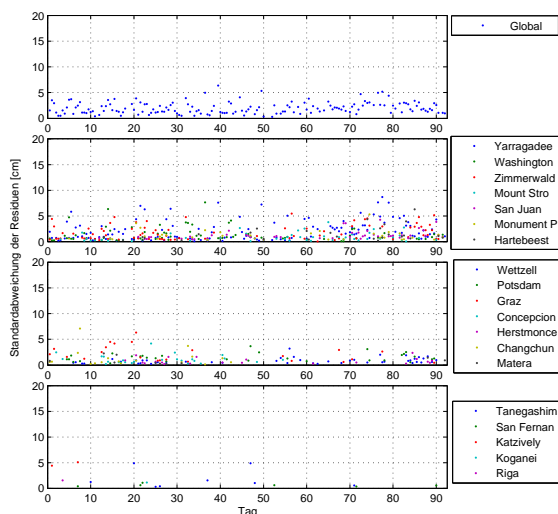


Abbildung 37: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung.

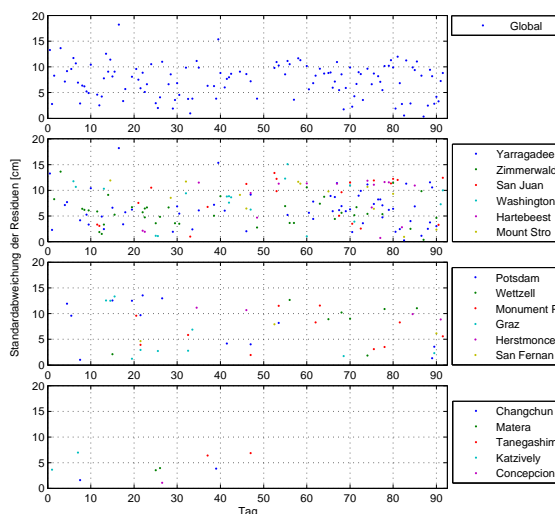


Abbildung 38: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung.

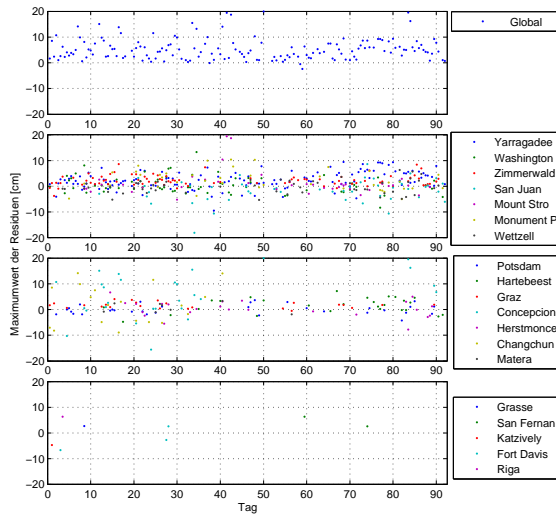


Abbildung 39: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.

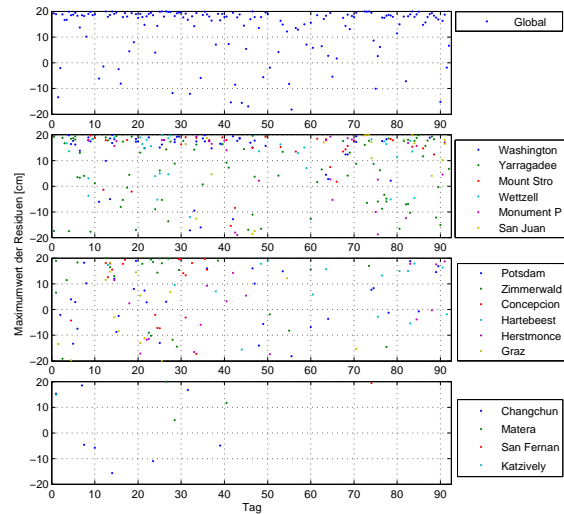


Abbildung 40: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.

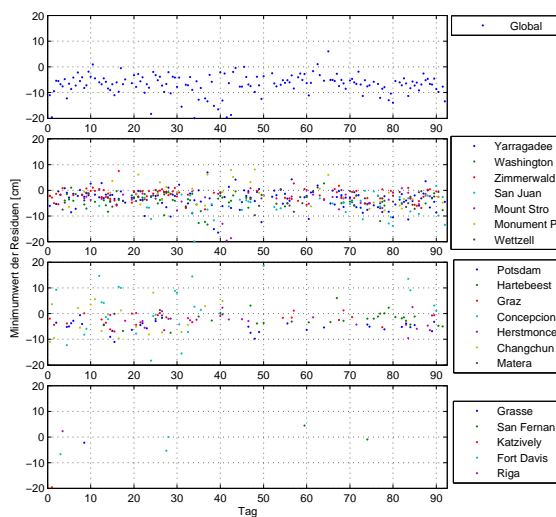


Abbildung 41: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.

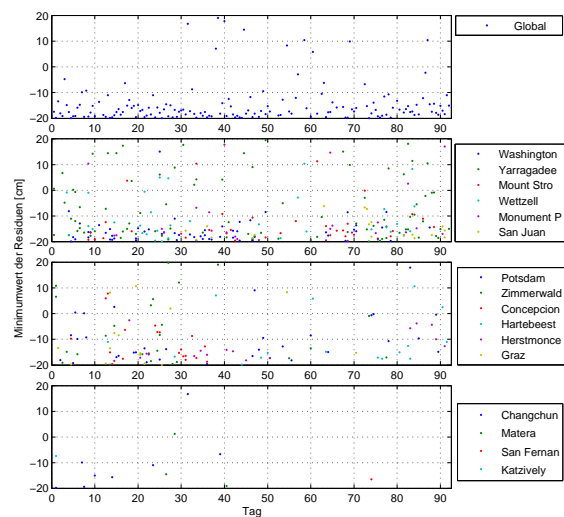


Abbildung 42: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.

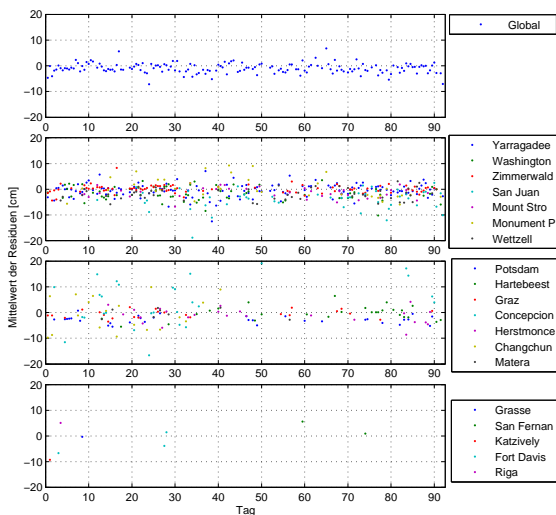


Abbildung 43: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.

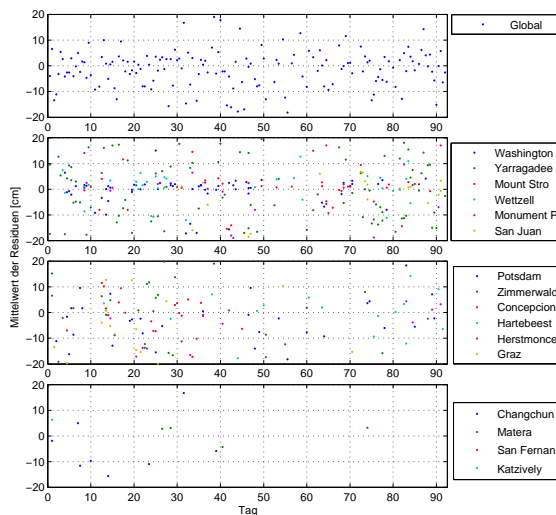


Abbildung 44: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.

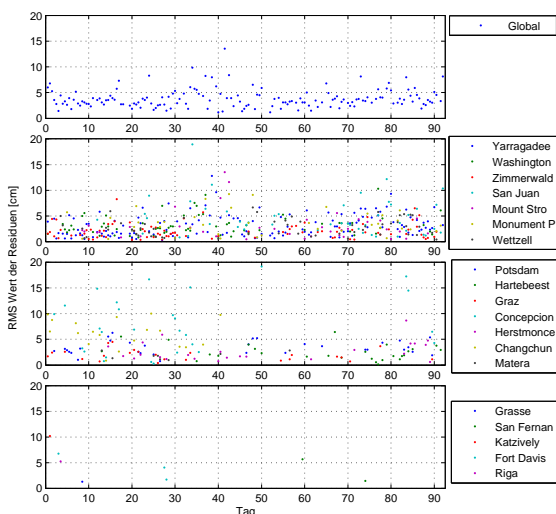


Abbildung 45: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.

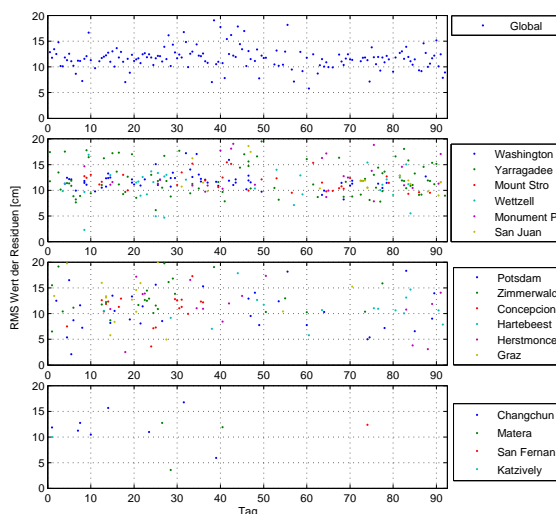


Abbildung 46: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.

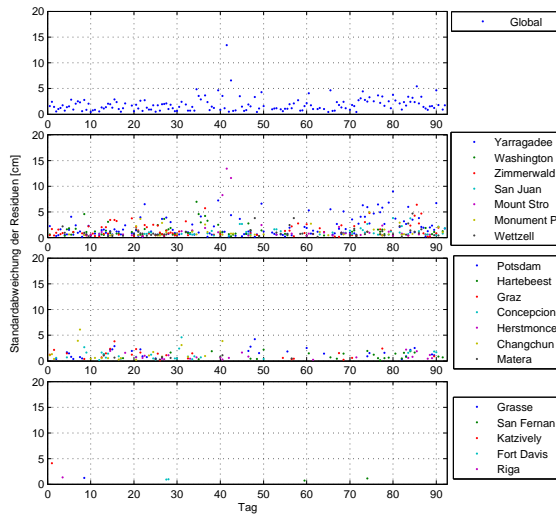


Abbildung 47: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung.

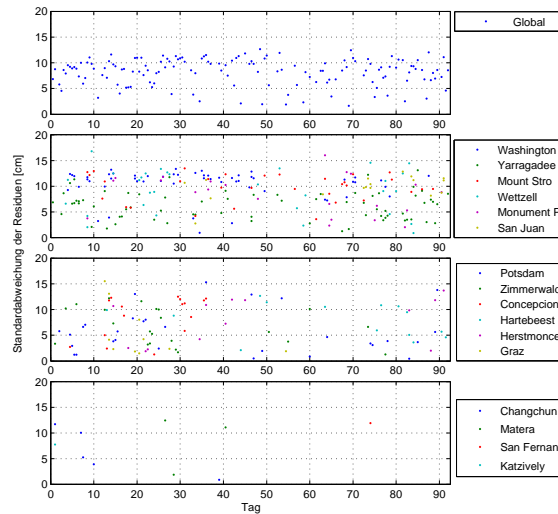


Abbildung 48: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung.

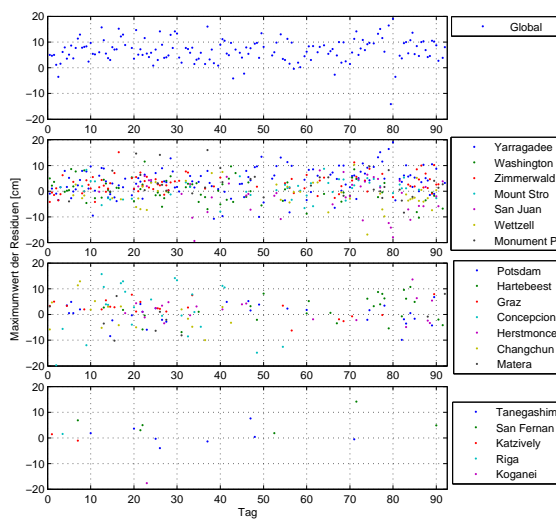


Abbildung 49: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

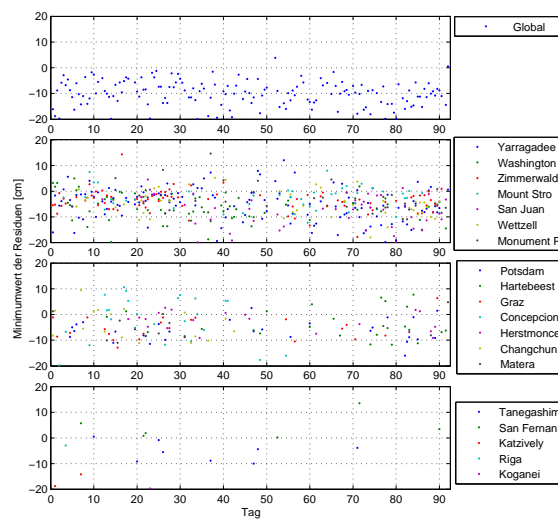


Abbildung 50: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

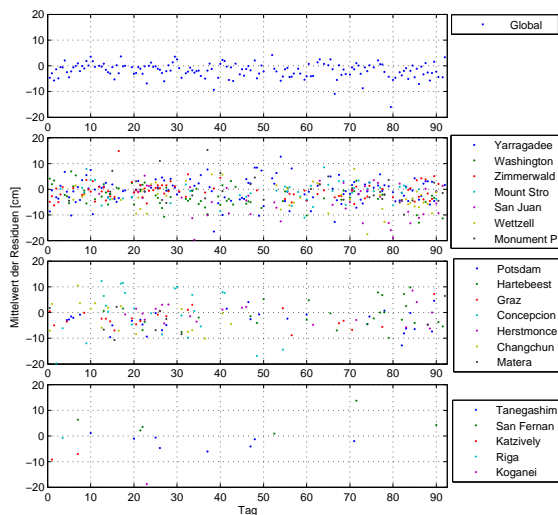


Abbildung 51: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

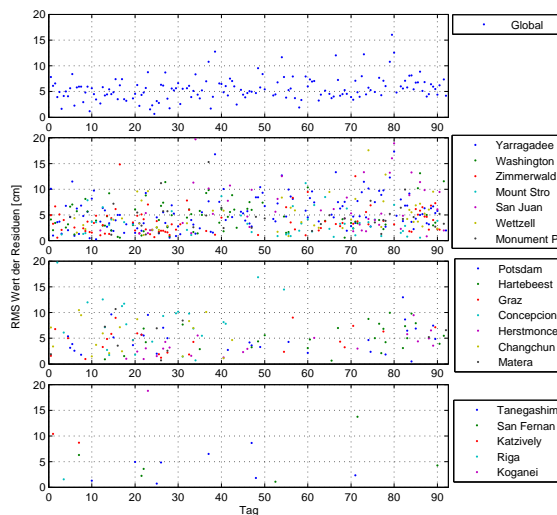


Abbildung 52: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

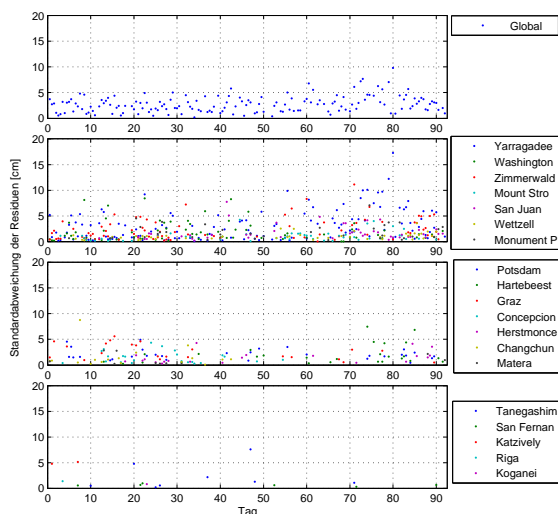


Abbildung 53: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

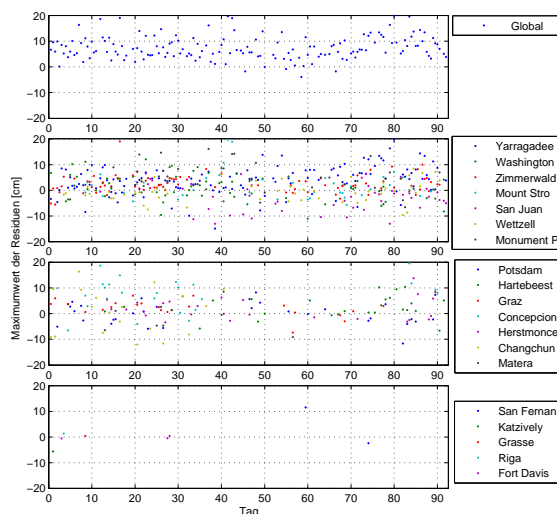


Abbildung 54: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

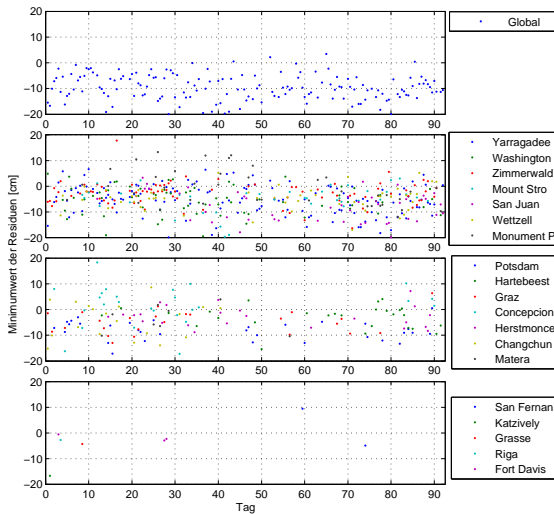


Abbildung 55: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

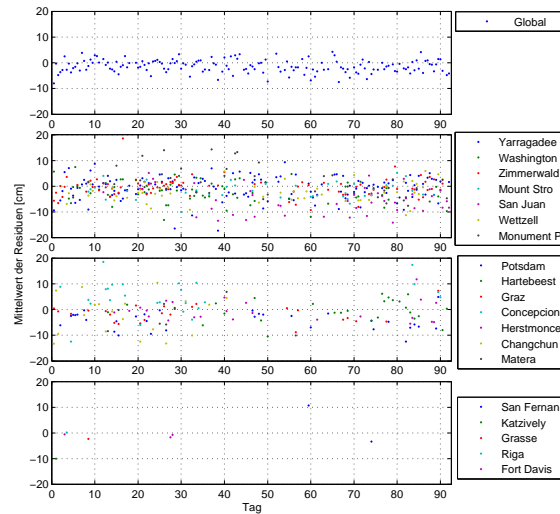


Abbildung 56: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

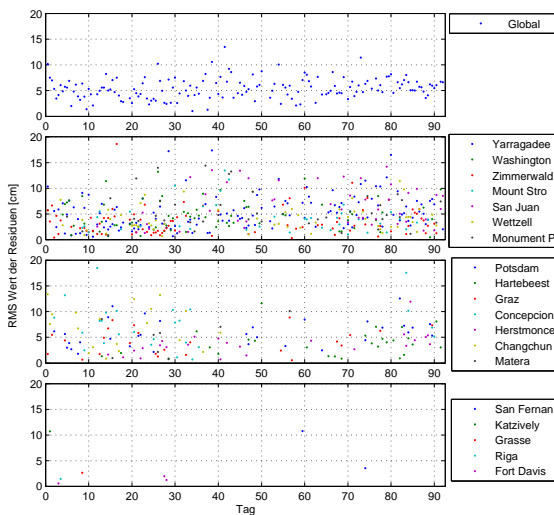


Abbildung 57: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

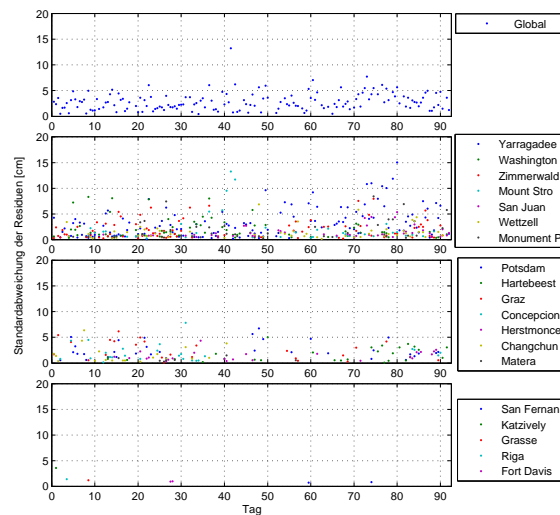


Abbildung 58: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die Datendichte der Ergebnisse der kinematischen Lösungen in beiden Fällen, sowohl bei TanDEM-X als auch bei TerraSAR-X, im Vergleich zu den dynamischen Lösungen geringer ausfällt. Die Gründe hierfür liegen in den lückenhaften kinematischen Bahnen. So sieht das Hauptkriterium für das Durchführen der Vermessung der Bahn mit den SLR-Beobachtungen eine lückenfreie Bahn vor. Da die kinematischen Bahnen jedoch in der Regel sehr fehleranfällig sind und zahlreiche Lücken aufweisen, werden diese zwischen den Lückenstellen in separate zusammenhängende Bahnabschnitte geteilt, um die obige Bedingung zu erfüllen. Für jeden dieser Bahnabschnitte wird anschließend eine getrennte Bahnvermessung durchgeführt. Damit jedoch ein Bahnabschnitt vermessen werden kann, muss es über eine Mindestlänge von 8 aneinander liegenden Punkten verfügen. In einigen Fällen kann dieses Kriterium aufgrund sehr

vieler Lücken in der kinematischen Bahn und der daraus resultierenden starken Zersplitterung der Bahn in kleinere Bahnabschnitte nicht erfüllt werden. Als Folge davon kann ein entsprechender Bahnbogen nicht mehr vermessen werden.

Bei solch einer Vermessung der kinematischen Bahnen kann es also vorkommen, dass pro Bahnbogen mehrere Bahnabschnitte berechnet werden. In diesem Fall wird der Globalwert in der statistischen Auswertung der Residuen (vgl. Abbildungen 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46 und 48) für den jeweiligen Bahnbogen aus dessen allen Bogenabschnitten berechnet. Die Ergebnisse der jeweiligen Stationen beinhalten hingegen die berechneten Werte aus allen Bogenabschnitten.

Um einen besseren Überblick über die obigen Ergebnisse zu bekommen, werden globale Werte über alle Bahnbögen berechnet und in der Tabelle 8 auf der nächsten Seite zusammengefasst. Dabei werden sowohl globale Gesamtwerte über alle Beobachtungsstationen als auch Werte für jede einzelne Station berechnet. Die Berechnung der Maximum- und Minimumwerte erfolgt als ein einfaches Maximum bzw. Minimum über alle betroffenen Residuen. Die Berechnung des Mittelwertes, des RMS-Wertes und der Standardabweichung erfolgt gewichtet nach Formeln (4.1):

$$\begin{aligned} \text{Mittelwert} &= \frac{\sum_{i=1}^n \text{mean}_i \cdot n_i}{n}, \\ \text{RMS} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{rms}_i^2 \cdot n_i}{n}}, \\ \text{Standardabweichung} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \text{std}_i^2 \cdot (n_i - 1)}{n - 1}}, \end{aligned} \tag{4.1}$$

mit n_i - Anzahl der Beobachtungen pro Bahnbogen, n - Gesamtanzahl der Beobachtungen und i - Bahnbogennummer.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der statistischen Auswertung wird auch die Gesamtanzahl der akzeptierten Beobachtungen in der Tabelle 8 dargestellt. Die Sortierung der Stationen erfolgt nach der Gesamtanzahl der akzeptierten Beobachtungen.

In den Ergebnissen der Tabelle 8 wird auch die schlechte Genauigkeit der kinematischen Bahnen deutlich. Dies ist unter anderem an größeren, im Vergleich zu den dynamischen Bahnen, RMS-Werten und Standardabweichungen erkennbar. Weitere Auffälligkeit in den Ergebnissen in der Tabelle 8 stellen die Standardabweichungen und RMS-Werte der Bahnen aus der kombinierten Bahnberechnung dar. Diese fallen größer aus, als die jeweiligen Ergebnisse der Einzelbahnberechnung im dynamischen Modus. Da dies im Widerspruch zu der Erwartung einer besseren Bahnengenauigkeit bei der kombinierten Bahnberechnung steht, bedarf es einer weiteren Untersuchung im Hinblick auf die absolute Bahnengenauigkeit der Bahnen aus einer kombinierten Bahnberechnung. Diese wird im nächsten Kapitel 4.4.2 durchgeführt.

Eine weitere grafische Übersicht der Ergebnisse aus der Tabelle 8 zum besseren Vergleich einzelnen Stationen untereinander findet sich auch in den Abbildungen 59-70 auf den Seiten 64-66.

Tabelle 8: Statistische Auswertung der Residuen der SLR-Beobachtungen für TanDEM-X und TerraSAR-X.

Station	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X dynamische Berechnung						
Alle Stationen	19.60	-1.30	-19.91	4.71	2.44	13287
Yarragadee	19.60	-0.72	-17.52	4.69	3.37	2974
Washington	10.06	-2.18	-19.91	4.87	2.44	2257
Zimmerwald	12.64	-0.06	-10.03	3.43	2.56	2070
Mount Stro	6.50	-0.87	-9.55	3.42	1.46	1058
San Juan	6.37	-5.36	-17.69	6.94	1.31	953
Monument P	14.90	-0.26	-12.18	4.48	1.73	681
Hartebeest	10.24	0.19	-9.79	4.43	2.22	656
Wetzell	4.36	-2.60	-13.25	4.36	1.15	617
Potsdam	5.87	-2.17	-9.04	3.86	1.70	593
Graz	7.43	-1.23	-9.63	3.77	3.09	472
Concepcion	14.42	0.24	-19.36	8.70	1.19	267
Herstmonce	6.81	-0.02	-6.13	2.90	1.05	245
Changchun	12.07	0.15	-10.33	6.84	1.66	152
Matera	5.01	-1.01	-7.31	3.21	1.40	138
Tanegashim	7.12	-1.94	-10.12	4.96	2.75	77
San Fernan	14.12	3.53	0.59	4.86	0.69	35
Katzively	-0.21	-9.61	-16.91	10.79	4.55	28
Koganei	-15.99	-17.74	-19.30	17.77	1.14	7
Riga	1.42	-0.18	-3.41	1.53	1.52	7
TanDEM-X kinematische Berechnung						
Alle Stationen	19.98	-1.59	-19.98	11.49	8.12	1227
Yarragadee	19.96	-1.14	LAS.95	11.32	7.16	307
Zimmerwald	19.63	-2.34	-19.98	11.09	6.41	198
San Juan	19.94	-1.08	-19.75	12.16	9.71	150
Washington	19.57	0.43	-19.65	11.55	8.85	127
Hartebeest	19.98	0.18	-18.96	11.72	9.79	110
Mount Stro	17.63	-1.02	-19.52	10.77	9.14	85
Potsdam	19.52	0.89	-19.41	11.98	9.05	58
Wetzell	18.69	0.51	-19.87	11.36	9.48	52
Monument P	17.93	-3.27	-18.88	10.75	7.83	48
Graz	18.16	-1.58	-19.94	13.63	6.70	26
Herstmonce	19.02	-2.76	-18.59	11.56	8.90	15
San Fernan	19.48	-1.02	-19.92	11.51	6.64	15
Changchun	-5.93	-14.91	-19.29	15.53	2.85	10
Matera	9.61	-3.85	-17.78	9.95	3.45	8
Tanegashim	7.80	-5.77	-18.47	9.52	5.98	8
Katzively	14.11	-0.44	-15.31	10.03	5.60	8
Concepcion	10.44	9.40	8.35	9.45	1.05	2

Station	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TerraSAR-X dynamische Berechnung						
Alle Stationen	19.99	-1.03	-19.98	4.07	2.31	13294
Yarragadee	9.47	-0.59	-16.55	3.97	3.06	3133
Washington	13.23	-1.39	-13.40	3.72	2.09	2206
Zimmerwald	8.63	-0.15	-7.49	2.44	2.03	1741
San Juan	8.63	-3.98	-19.98	5.55	1.62	1037
Mount Stro	19.41	-1.52	-19.59	4.38	3.45	896
Wetzell	6.27	-1.88	-9.74	3.25	1.48	894
Hartebeest	7.19	-0.24	-7.49	2.69	1.33	498
Potsdam	3.66	-2.74	-11.00	3.57	1.79	747
Monument P	10.34	-0.01	-7.89	4.15	1.81	744
Graz	4.09	-0.81	-7.00	2.42	1.70	409
Concepcion	19.99	4.87	-18.33	9.23	1.70	324
Herstmonce	6.67	-0.96	-9.54	3.09	1.11	303
Changchun	14.12	-0.36	-11.06	6.93	1.97	199
Matera	3.32	0.13	-4.49	2.01	0.83	89
Grasse	2.69	-0.40	-2.22	1.27	1.20	23
San Fernan	6.30	2.37	-1.01	3.39	1.00	19
Katzively	-4.71	-9.32	-19.63	10.19	4.11	16
Fort Davis	2.57	-1.87	-6.75	3.69	0.87	9
Riga	6.25	5.04	2.22	5.21	1.34	7
TerraSAR-X kinematische Berechnung						
Alle Stationen	19.99	-0.29	-20.00	11.64	8.87	1671
Washington	19.99	-0.11	-19.97	11.77	10.39	383
Yarragadee	19.98	0.27	-19.92	11.59	6.66	314
Mount Stro	19.80	1.03	-19.66	11.57	9.61	160
Wetzell	19.96	0.76	-20.00	11.53	9.28	127
Monument P	19.36	0.07	-19.77	11.82	9.21	119
San Juan	19.94	0.27	-19.32	11.49	9.70	113
Potsdam	18.90	-2.32	-19.68	10.81	6.79	99
Zimmerwald	19.97	1.14	-19.81	12.28	7.73	93
Concepcion	19.68	1.69	-19.65	11.58	9.30	76
Hartebeest	18.94	0.03	-19.82	11.18	8.57	62
Herstmonce	18.66	-3.36	-18.43	11.68	8.35	42
Graz	18.16	-2.87	-19.97	12.94	6.51	30
Changchun	18.45	-4.18	-19.89	11.80	7.95	26
Matera	19.95	-0.23	-19.10	11.48	10.32	14
San Fernan	19.46	3.23	-16.51	12.35	11.92	7
Katzively	14.88	6.31	-7.46	9.98	7.74	6

Station	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X kombinierte Bahnberechnung						
Alle Stationen	19.01	-1.85	-19.93	5.88	3.35	13238
Yarragadee	19.01	-1.00	-19.83	6.56	4.85	2973
Washington	11.53	-2.78	-19.79	5.66	3.12	2256
Zimmerwald	15.18	-1.05	-17.86	4.65	3.47	2070
Mount Stro	8.69	-1.08	-12.34	4.03	1.76	1058
San Juan	8.07	-4.65	-19.93	7.86	2.34	918
Monument P	16.01	-0.79	-11.04	5.57	2.59	681
Hartebeest	10.73	-0.93	-11.79	5.75	2.87	656
Wetzell	10.22	-3.96	-18.03	6.20	1.25	617
Potsdam	6.77	-3.21	-15.98	5.41	2.40	593
Graz	7.90	-2.48	-12.84	5.00	3.28	472
Concepcion	15.67	0.41	-19.69	9.02	1.74	255
Herstmonce	13.64	-0.36	-9.15	4.34	2.06	245
Changchun	12.84	-1.19	-11.07	5.97	1.96	152
Matera	8.03	-2.33	-11.04	5.76	1.89	138
Tanegashim	7.56	-2.78	-10.10	5.28	3.82	77
San Fernan	14.14	3.64	0.20	5.02	0.66	35
Katzively	1.44	-8.48	-18.79	9.84	4.79	29
Riga	1.51	-0.77	-3.00	1.56	1.36	7
Koganei	-17.66	-18.77	-19.72	18.79	0.81	6
TerraSAR-X kombinierte Bahnberechnung						
Alle Stationen	19.84	-1.58	-19.96	5.87	3.43	13234
Yarragadee	19.84	-1.04	-19.96	6.23	4.51	3113
Washington	12.03	-2.18	-19.53	5.71	3.62	2193
Zimmerwald	19.03	-0.74	-16.44	4.18	2.85	1741
San Juan	6.52	-5.27	-19.95	7.50	2.17	1026
Wetzell	8.38	-2.37	-17.03	4.55	1.98	894
Mount Stro	19.63	-1.97	-19.71	5.39	3.88	891
Potsdam	8.22	-4.00	-17.13	6.09	3.10	747
Monument P	16.10	0.98	-11.92	6.59	3.41	744
Hartebeest	10.41	-0.28	-15.38	5.10	2.42	498
Graz	8.26	-2.10	-13.01	4.95	3.46	409
Concepcion	19.48	5.74	-17.21	8.49	2.58	314
Herstmonce	13.71	-0.85	-8.88	4.18	1.76	303
Changchun	16.30	-2.06	-15.21	8.53	2.26	199
Matera	8.55	-0.78	-10.40	6.10	0.99	89
San Fernan	11.55	1.04	-4.90	6.70	0.76	19
Grasse	0.35	-2.36	-4.30	2.63	1.16	23
Katzively	-5.65	-10.08	-16.69	10.70	3.58	15
Fort Davis	0.35	-1.15	-2.99	1.54	0.88	9
Riga	1.33	0.20	-2.76	1.42	1.41	7

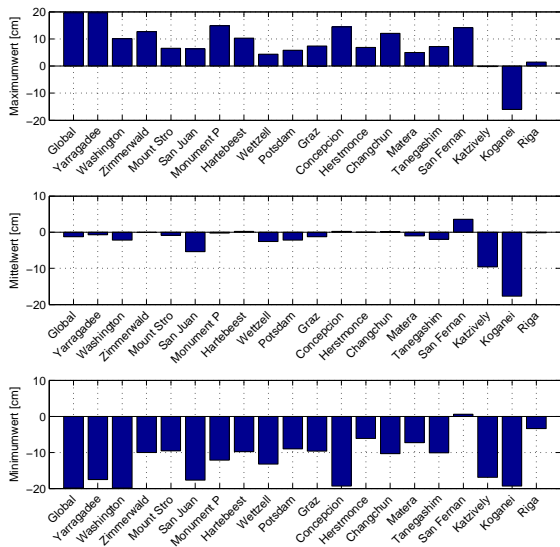


Abbildung 59: Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Dynamische Berechnung.

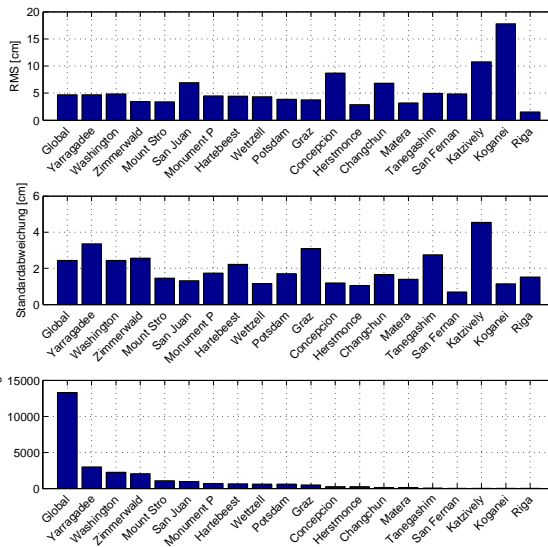


Abbildung 60: RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Dynamische Berechnung.

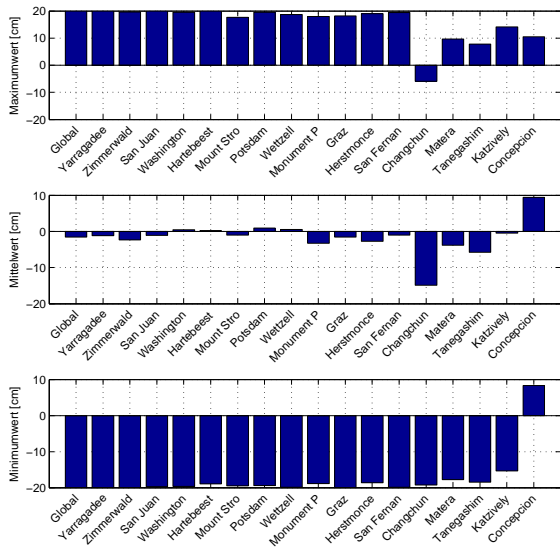


Abbildung 61: Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Kinematische Berechnung.

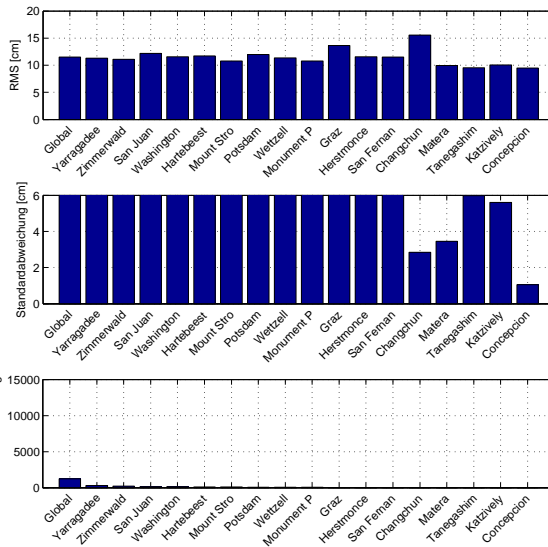


Abbildung 62: RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TanDEM-X. Kinematische Berechnung.

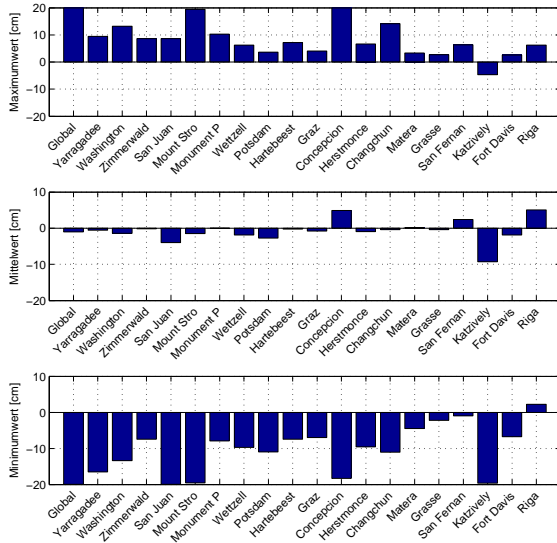


Abbildung 63: Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Dynamische Berechnung.

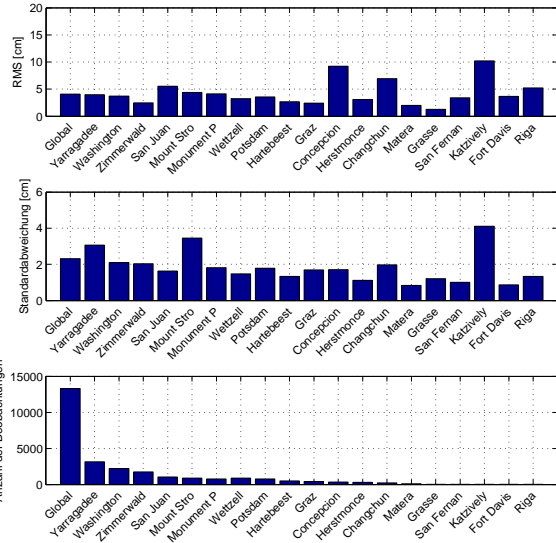


Abbildung 64: RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Dynamische Berechnung.

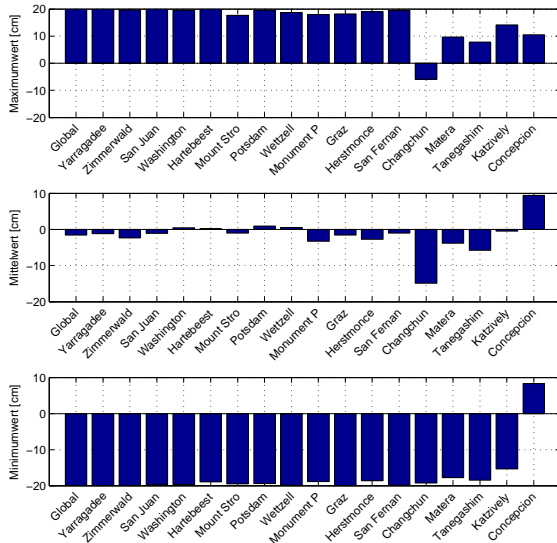


Abbildung 65: Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Kinematische Berechnung.

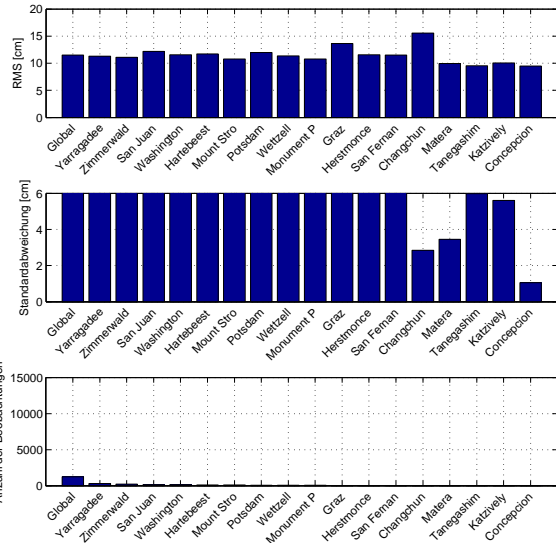


Abbildung 66: RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation bei TerraSAR-X. Kinematische Berechnung.

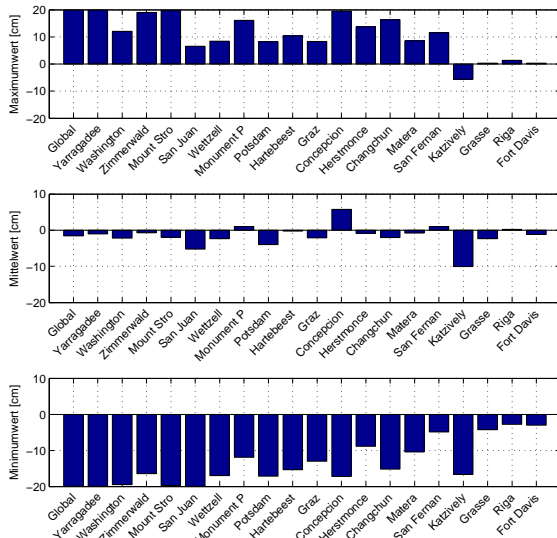


Abbildung 67: Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TanDEM-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.

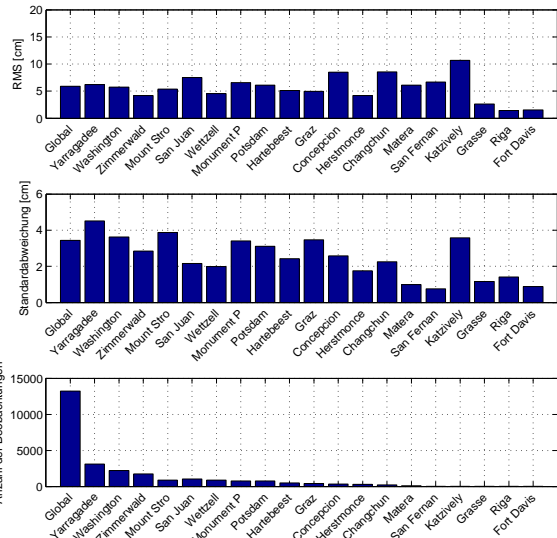


Abbildung 68: RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TanDEM-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.

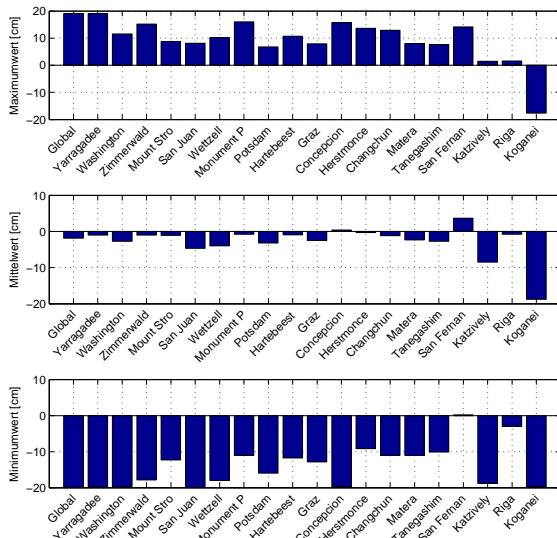


Abbildung 69: Globale Residuenwerte der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TerraSAR-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.

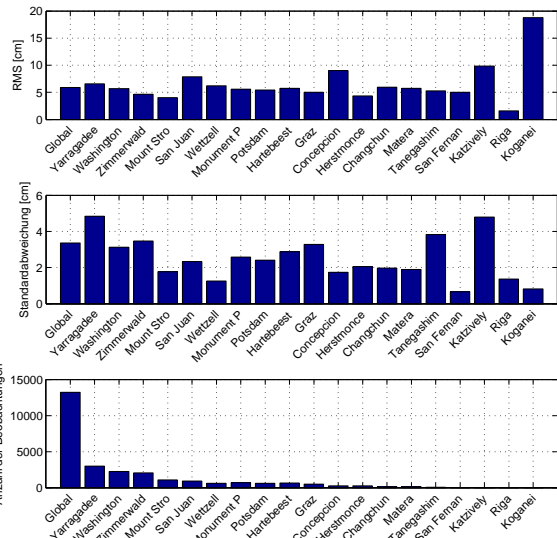


Abbildung 70: RMS, Standardabweichung und Anzahl der SLR-Beobachtungen pro Beobachtungsstation der TerraSAR-X-Bahn aus der kombinierten Berechnung.

In den obigen Abbildungen 59-70 wird insbesondere bei den Berechnungen im dynamischen Modus sichtbar, dass die Stationen Katzively und Koganai die größten Ausreißer in den Ergebnissen darstellen. Da hierfür ein Problem bei den beiden Stationen vermutet wird, werden diese aus der Statistikberechnung herausgenommen, um die Ergebnisse nicht weiter zu verfälschen. Die beiden

betroffenen Stationen fallen zwar in den kinematischen Berechnungen nicht weiter auf, jedoch ist der dynamische Modus der zuverlässigere und genauere, so dass vorwiegend auf dessen Grundlage die Stationen bewertet werden.

Nach der Eliminierung der beiden Stationen und einer erneut durchgeführten Statistikberechnung ergeben sich neue globale Werte, die der Tabelle 9 entnommen werden können.

Wie zu erwarten hat die Eliminierung der beiden Stationen Katzively und Koganai nur eine geringfügige Änderung der Ergebnisse der Bahnvermessung hervorgebracht, da beide Stationen über eine vergleichsweise sehr geringe Anzahl an Beobachtungen verfügen (vgl. Tabelle 8 auf Seite 61).

Die endgültigen Ergebnisse der Vermessung der TerraSAR-X- und TanDEM-X-Bahnen folgen weiter unten und werden in folgenden Abbildungen dargestellt:

- TanDEM-X in den Abbildungen 71-80 auf den Seiten 68-70.
- TerraSAR-X in den Abbildungen 81-90 auf den Seiten 70-72.
- TanDEM-X aus der kombinierten Bahnberechnung in den Abbildungen 91-95 auf den Seiten 73-74.
- TerraSAR-X aus der kombinierten Bahnberechnung in den Abbildungen 96-100 auf den Seiten 74-75.

Die Sortierung der Stationen erfolgt diesmal nach der Region, so dass diese in folgenden drei Gruppen zusammengefasst werden können:

1. Nord- und Südamerika: Washington, San Juan, Monument P, Conception, Fort Davis.
2. Europa: Zimmerwald, Wetzell, Potsdam, Graz, Herstmonce, Matera, San Fernan, Grasse, Riga.
3. Die übrigen Kontinente (Australien, Afrika), sowie Japan und Asien: Yarragadee, Mount Stro, Hartebeest, Changchun, Tanegashim.

Tabelle 9: Statistische Auswertung der Residuen der SLR-Beobachtungen für TanDEM-X und TerraSAR-X nach Eliminierung schlechter Stationen. Globale Werte über alle Stationen.

Rot markierte Werte entsprechen den Daten vor der Stationseliminierung.

Berechnung	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X						
Dynamische Berechnung	19.60 <i>19.60</i>	-1.27 <i>-1.30</i>	-19.91 <i>-19.91</i>	4.67 <i>4.71</i>	2.44 <i>2.44</i>	13252 <i>13287</i>
Kinematische Berechnung	19.98 <i>19.98</i>	-1.13 <i>-1.59</i>	-19.98 <i>-19.98</i>	11.50 <i>11.49</i>	8.13 <i>8.12</i>	1219 <i>1227</i>
TerraSAR-X						
Dynamische Berechnung	19.99 <i>19.99</i>	-1.02 <i>-1.03</i>	-19.98 <i>-19.98</i>	4.05 <i>4.07</i>	2.30 <i>2.31</i>	13278 <i>13294</i>
Kinematische Berechnung	19.99 <i>19.99</i>	0.02 <i>-0.29</i>	-20.00 <i>-20.00</i>	11.65 <i>11.64</i>	8.87 <i>8.87</i>	1665 <i>1671</i>
TanDEM-X aus der kombinierten Berechnung						
Dynamische Berechnung	19.01 <i>19.01</i>	-1.82 <i>-1.85</i>	-19.93 <i>-19.93</i>	5.86 <i>5.88</i>	3.35 <i>3.35</i>	13203 <i>13238</i>
TerraSAR-X aus der kombinierten Berechnung						
Dynamische Berechnung	19.84 <i>19.84</i>	-1.57 <i>-1.58</i>	-19.96 <i>-19.96</i>	5.87 <i>5.87</i>	3.43 <i>3.43</i>	13219 <i>13234</i>

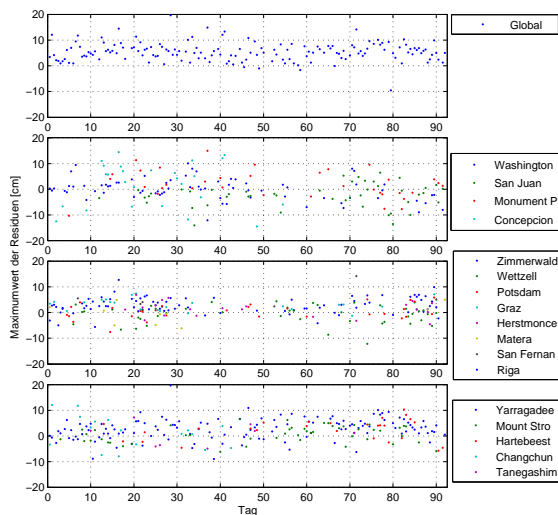


Abbildung 71: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

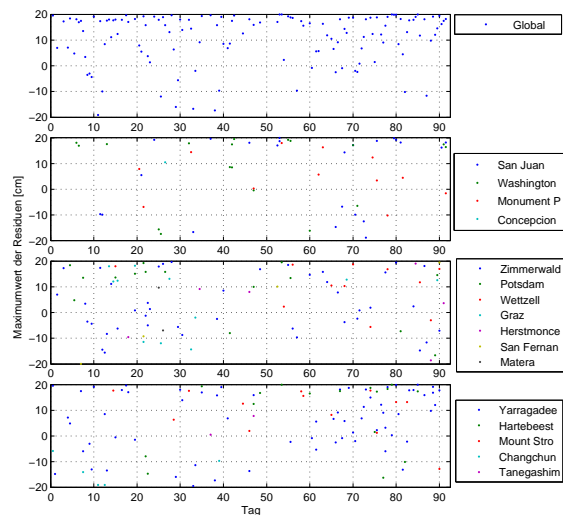


Abbildung 72: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

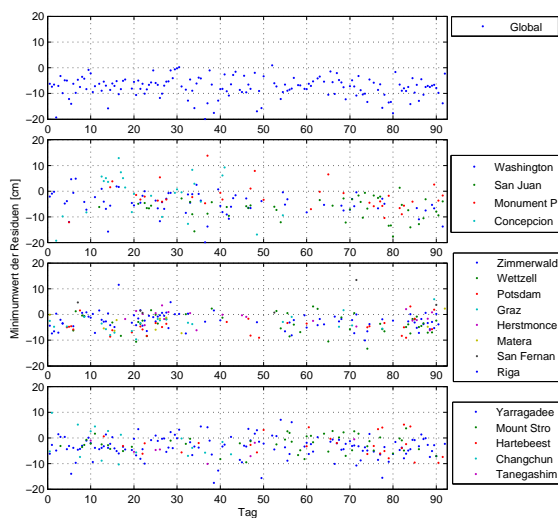


Abbildung 73: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

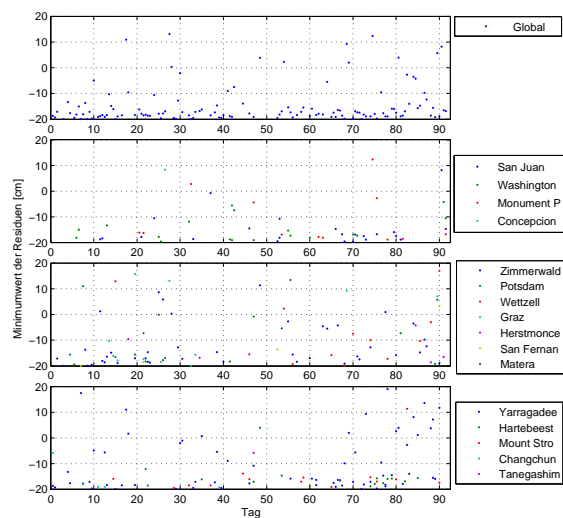


Abbildung 74: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

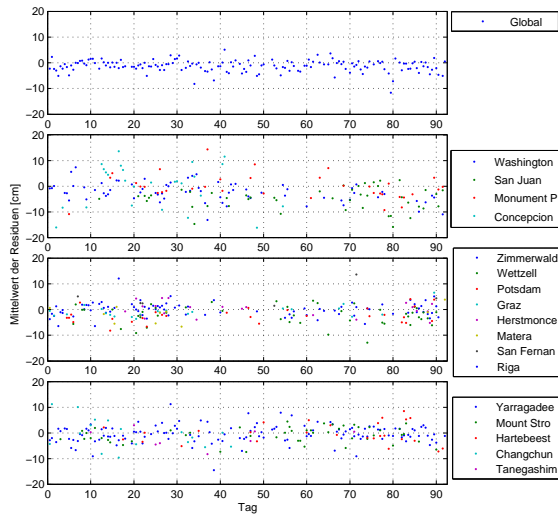


Abbildung 75: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

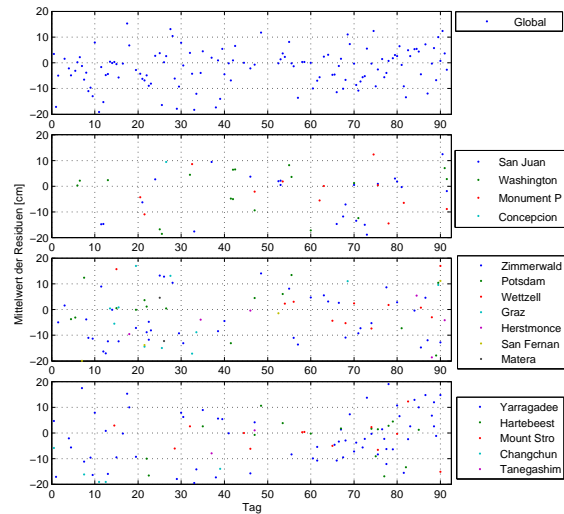


Abbildung 76: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

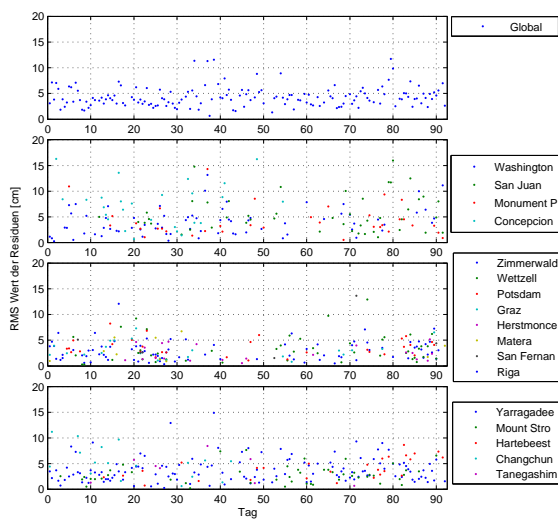


Abbildung 77: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

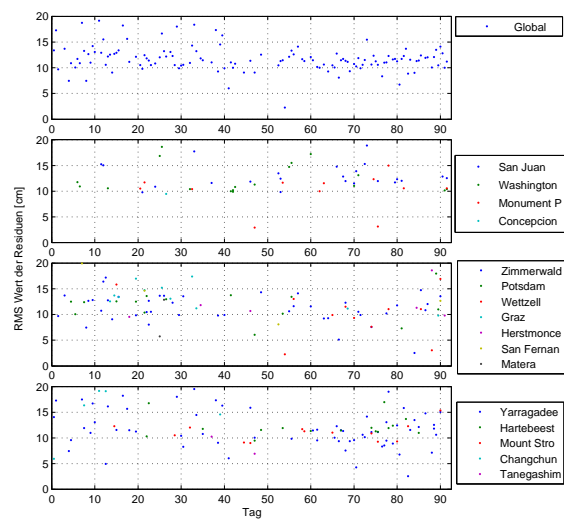


Abbildung 78: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

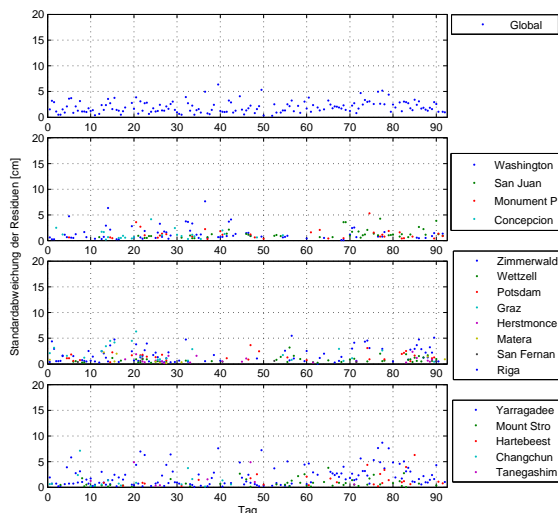


Abbildung 79: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

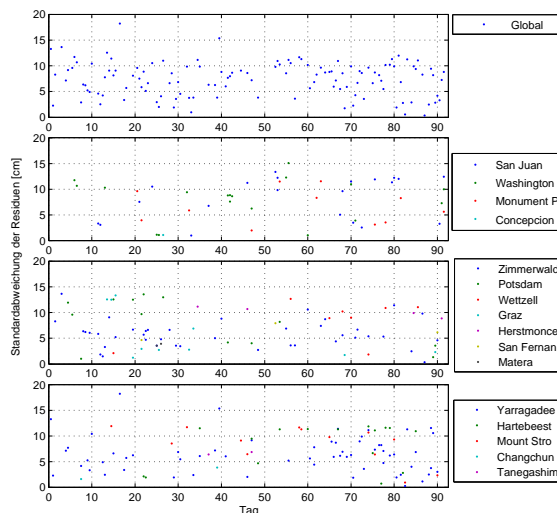


Abbildung 80: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TanDEM-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

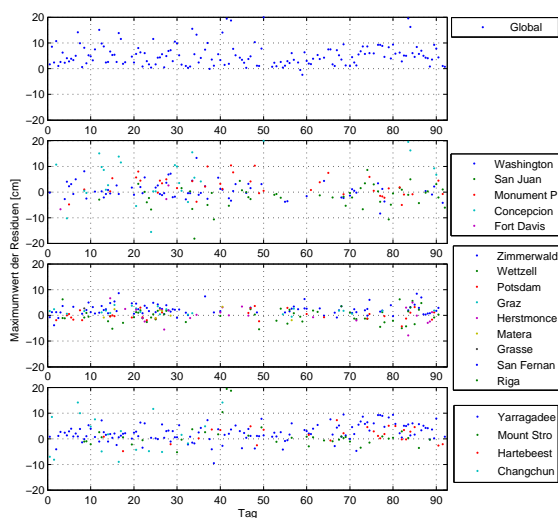


Abbildung 81: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

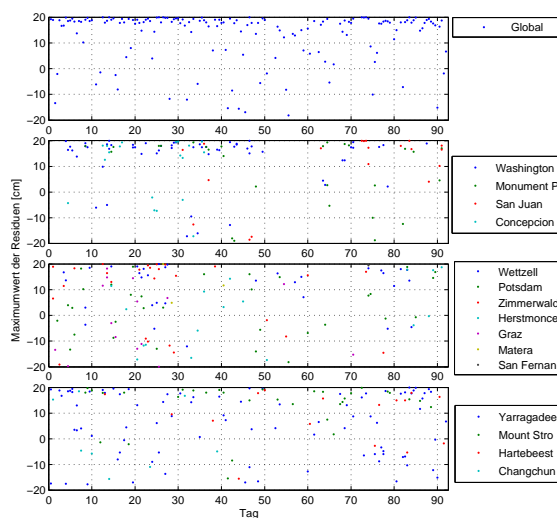


Abbildung 82: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

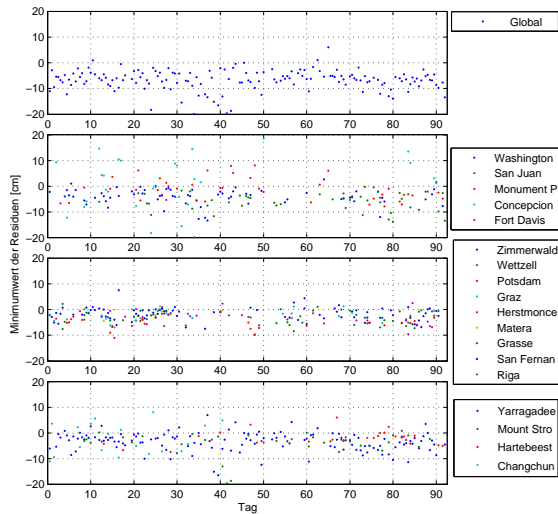


Abbildung 83: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

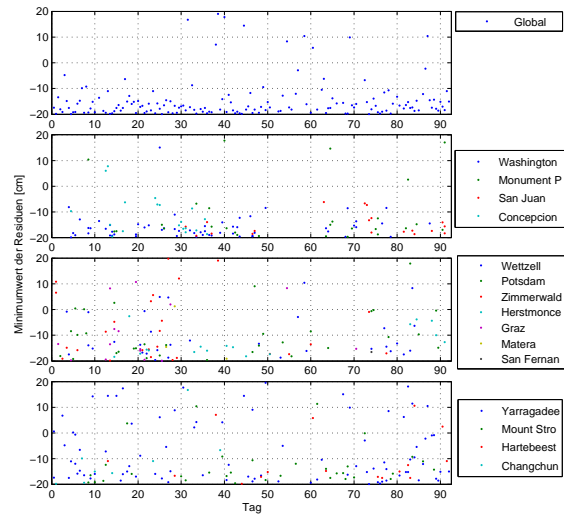


Abbildung 84: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

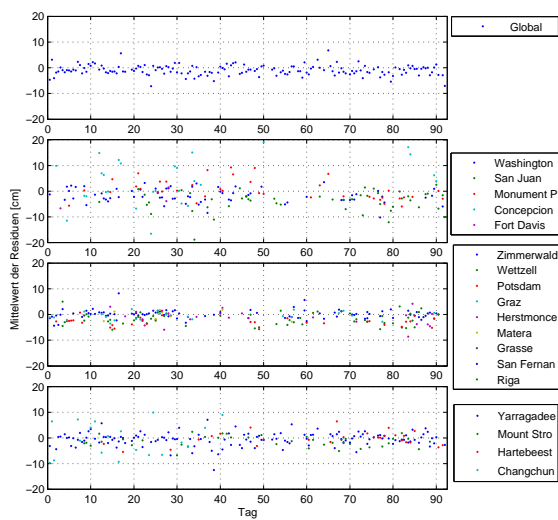


Abbildung 85: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

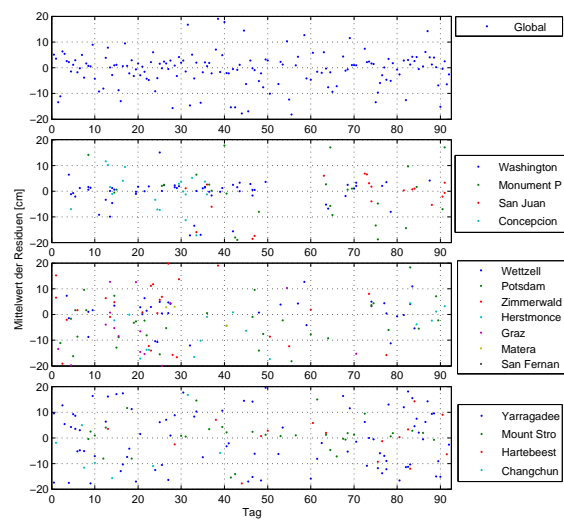


Abbildung 86: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

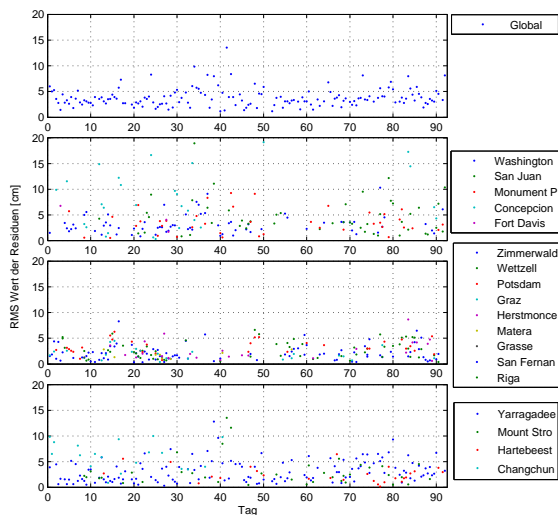


Abbildung 87: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

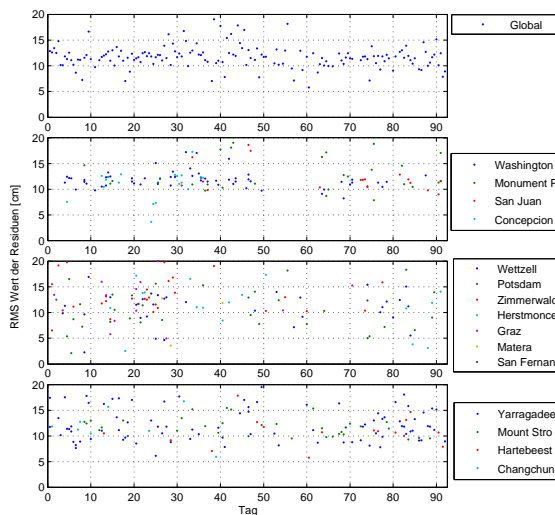


Abbildung 88: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

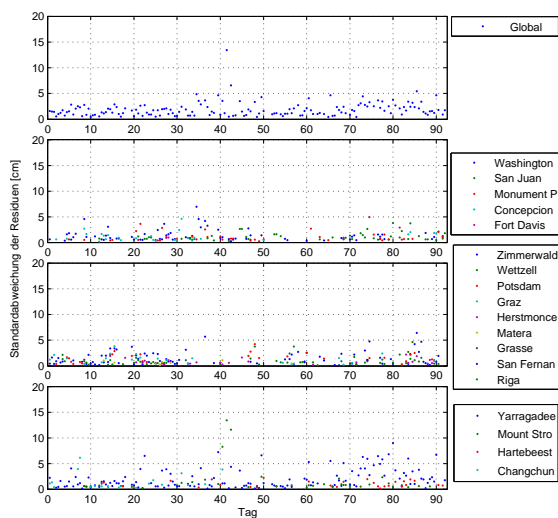


Abbildung 89: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der dynamischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

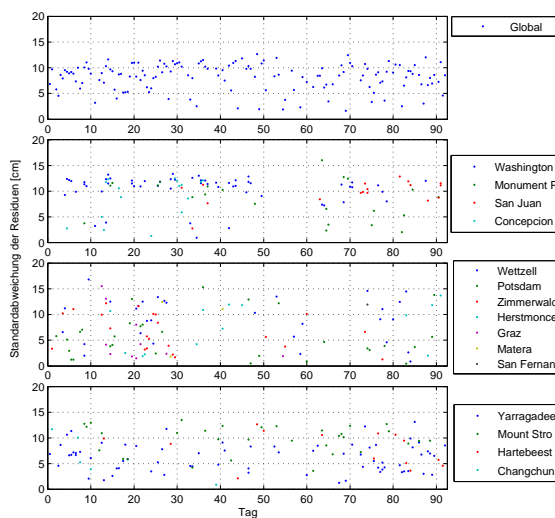


Abbildung 90: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen des TerraSAR-X bei der kinematischen Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

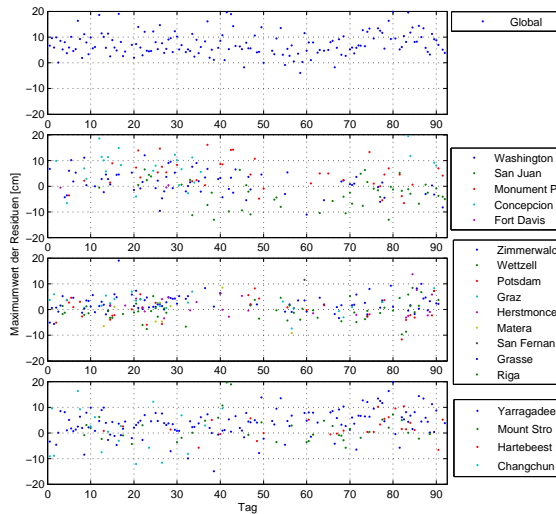


Abbildung 91: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

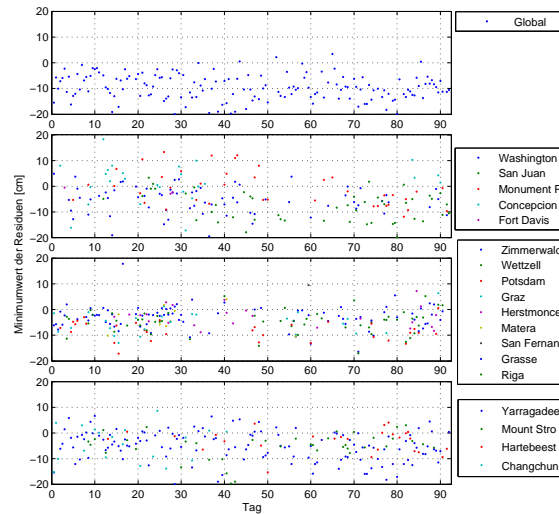


Abbildung 92: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

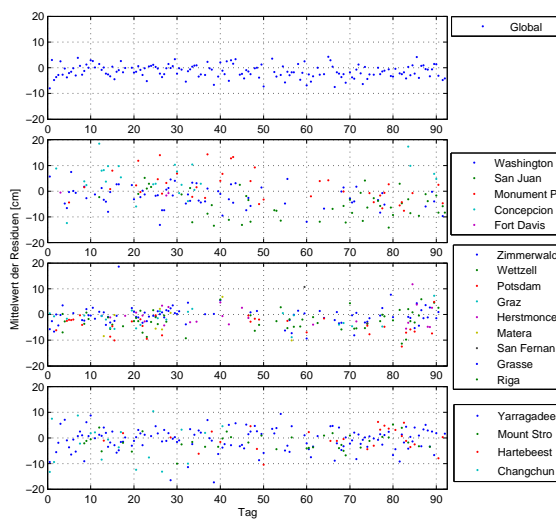


Abbildung 93: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

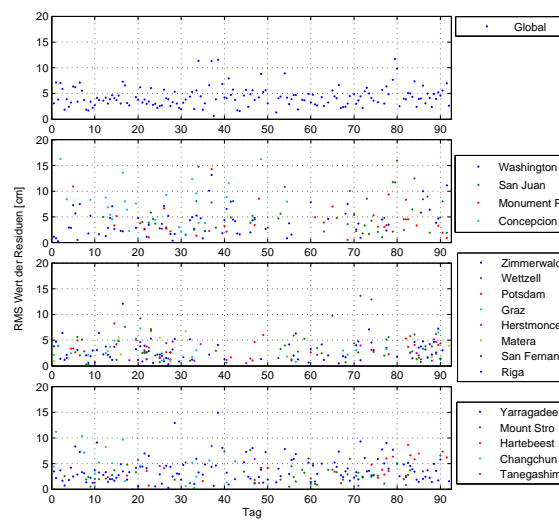


Abbildung 94: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

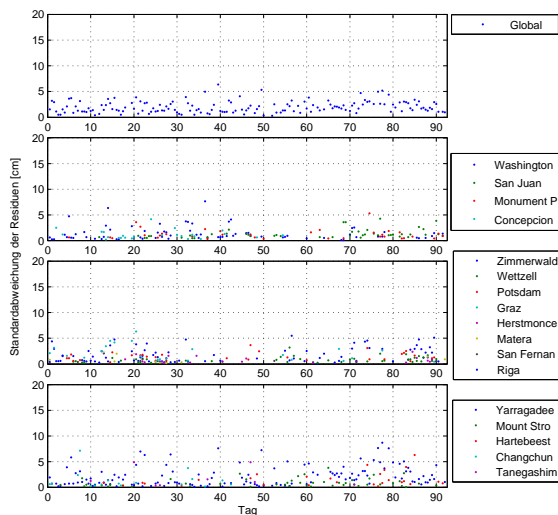


Abbildung 95: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

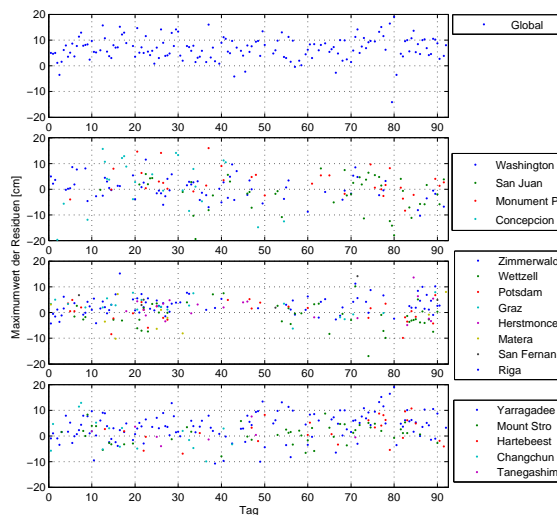


Abbildung 96: Maximale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

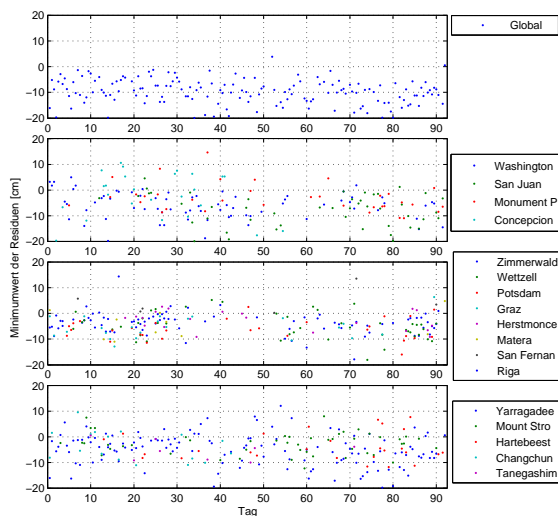


Abbildung 97: Minimale Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

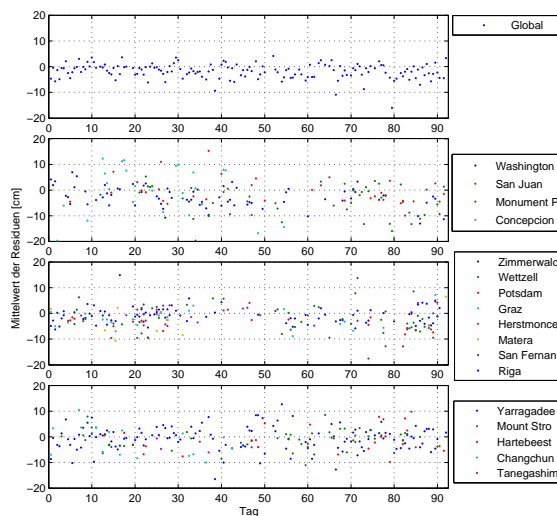


Abbildung 98: Mittelwerte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

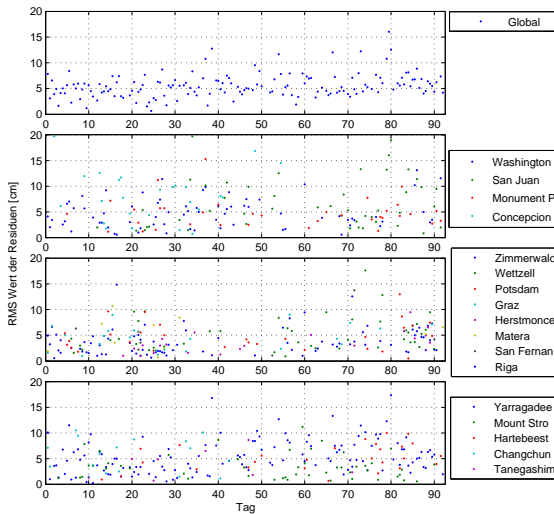


Abbildung 99: RMS-Werte der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

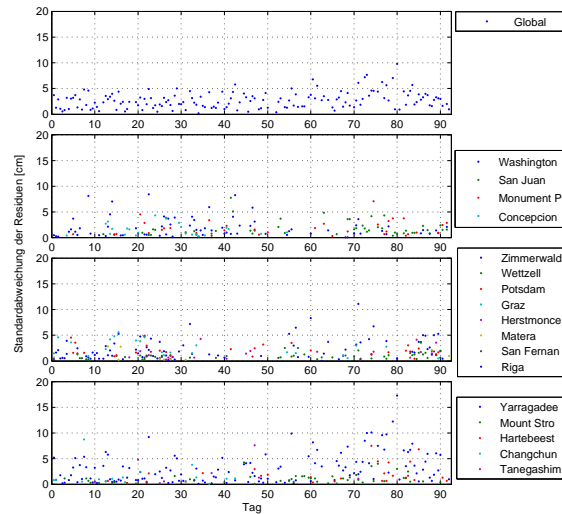


Abbildung 100: Standardabweichung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TerraSAR-X Bahn aus der kombinierten Berechnung nach Eliminierung schlechter Stationen.

4.4.2 Vergleich der Einzelbahnen und Bahnen aus der kombinierten Bahnberechnung

Wie bereits im vorherigen Kapitel 4.4.1 beschrieben, bedarf es einer weiteren Untersuchung der Bahnen aus der kombinierten Bahnberechnung, um deren absolute Genauigkeit zu testen. Zu diesem Zweck werden als erstes 4 ausgesuchte Bahnbögen der Einzelbahnen von TerraSAR-X und TanDEM-X genauer analysiert, indem ihre SLR-Residuen über den kompletten Bogenzeitraum angeschaut und mit denen aus einer kombinierten Bahnberechnung verglichen werden. Zusätzlich dazu werden Differenzen in der Satellitenposition gebildet, um eventuelle Bahnverschiebungen aufzudecken.

Als nächstes werden dann zusätzliche unabhängige Bahnen aus einer Berechnung mit einem anderen Programmpaket herausgesucht, um einen unabhängigen Vergleich zu ermöglichen. Dies sind die Bahnen aus der Berechnung mit dem Programm Bernese (Bernese GPS Software von dem Astronomischen Institut der Universität Bern) sowie Bahnen, die von dem German Space Operations Center (GSOC) aus einer eigenen Berechnung für diesen Vergleich zur Verfügung gestellt wurden.

Im Rahmen dieses unabhängigen Vergleichs werden die Bernese- und GSOC-Bahnen analog den EPOS-OC-Bahnen mit SLR-Beobachtungen vermessen (vgl. Kapitel 4.4.1), und SLR-Residuen analog der Tabelle 8 für jede Station berechnet. Parallel dazu werden die gleichen 4 Bahnbögen aus der Bernese und GSOC Berechnung analog dem Schritt 1 analysiert.

Für den Vergleich der Einzelbahnen und Bahnen aus einer kombinierten Bahnberechnung werden jeweils 2 Bahnbögen, die Manöver beinhalten, und 2 Bahnbögen ohne Manöver herausgesucht. Das sind im ersten Fall die Bahnbögen vom 09.03.2012, 11 Uhr sowie vom 14.05.2012, 11 Uhr. Und im zweiten Fall die Bahnbögen vom 28.03.2012 11, Uhr und vom 10.04.2012, 11 Uhr.

Für jeden Untersuchungsbogen und jeden Satellit werden dabei 3 Abbildungen erstellt, die die Ergebnisse des Bahnvergleichs repräsentieren. Die erste Abbildung stellt eine Übersicht aller SLR-Residuen des Bogens pro Beobachtungsstation ohne einen direkten zeitlichen Bezug, und konzentriert sich so allein auf die Größe der einzelnen Residuen. Die eventuell vorhandenen Spünge in dem Verlauf sind hier darstellungsbedingt und signalisieren einen Übergang zwischen verschiedenen Messepochen von unterschiedlichen Bahnumläufen. Die zweite Abbildung stellt hingegen eine zeitliche Übersicht aller SLR-Residuen des Bogens dar. Und schließlich stellt die dritte Abbildung jeweils die Koordinatendifferenzen zwischen der Bahn aus einer Einzelbahnbestimmung und der

Bahn aus einer kombinierten Bahnbestimmung im satellitengestützten Koordinatensystem dar. Die Definition des satellitengestützten Koordinatensystems im letzten Fall entspricht der Definition des satellitengestützten Bezugssystems für die empirische Beschleunigungen aus dem Kapitel 4.1.

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der Auswertung der SLR-Residuen und des Bahnvergleichs der EPOS-OC-Bahnen vorgestellt:

1. Bahnbögen mit Manöver:

- TanDEM-X, Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 77.
- TerraSAR-X, Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 78.
- TanDEM-X, Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr auf der Seite 79.
- TerraSAR-X, Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr auf der Seite 80.

2. Bahnbögen ohne Manöver:

- TanDEM-X, Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 81.
- TerraSAR-X, Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 82.
- TanDEM-X, Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr auf der Seite 83.
- TerraSAR-X, Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr auf der Seite 84.

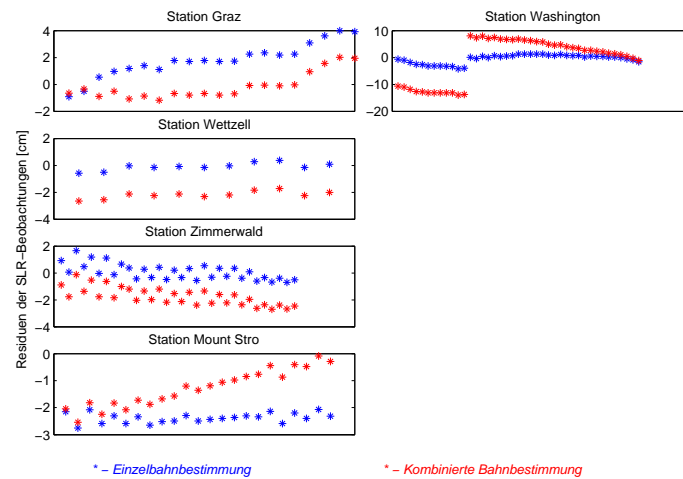


Abbildung 101: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.

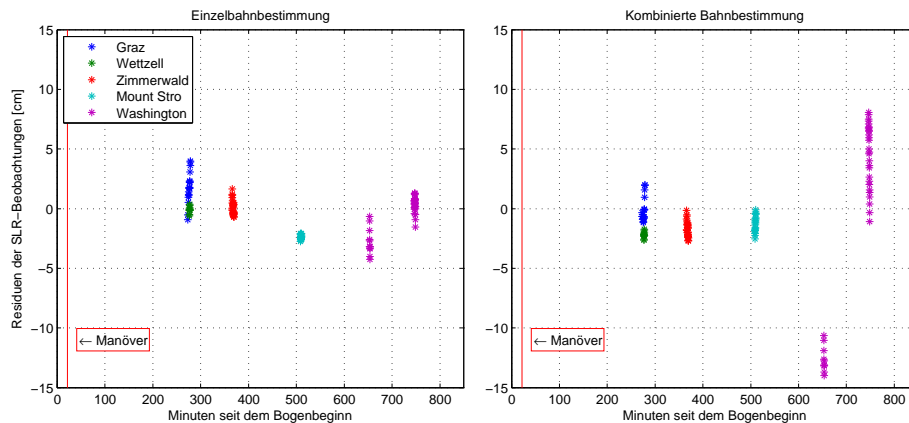


Abbildung 102: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.

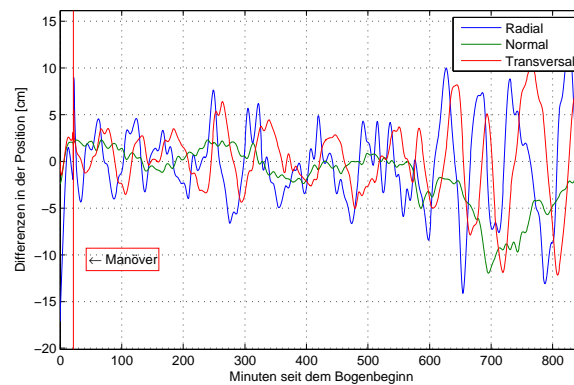


Abbildung 103: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.

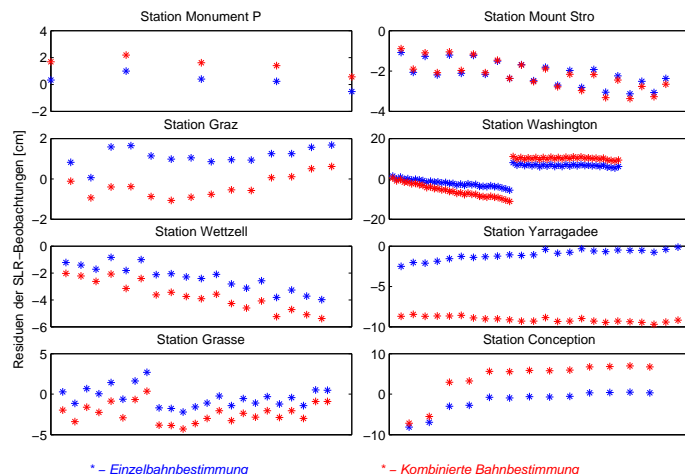


Abbildung 104: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.

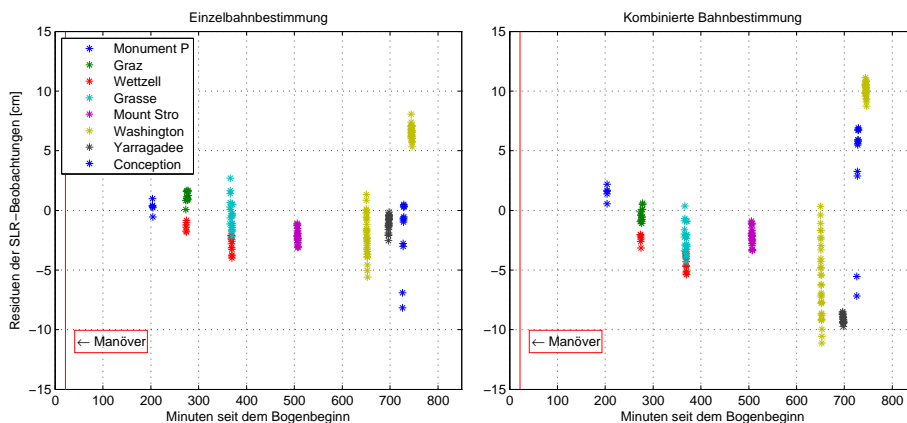


Abbildung 105: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.

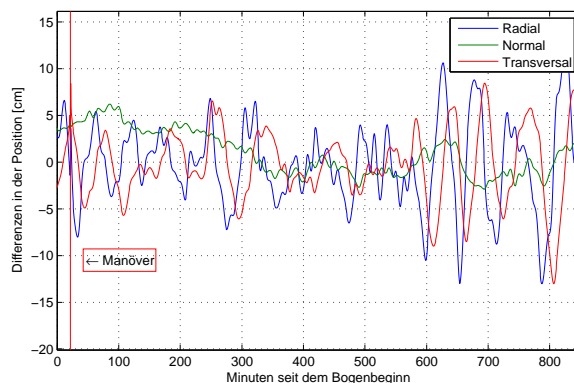


Abbildung 106: Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr.

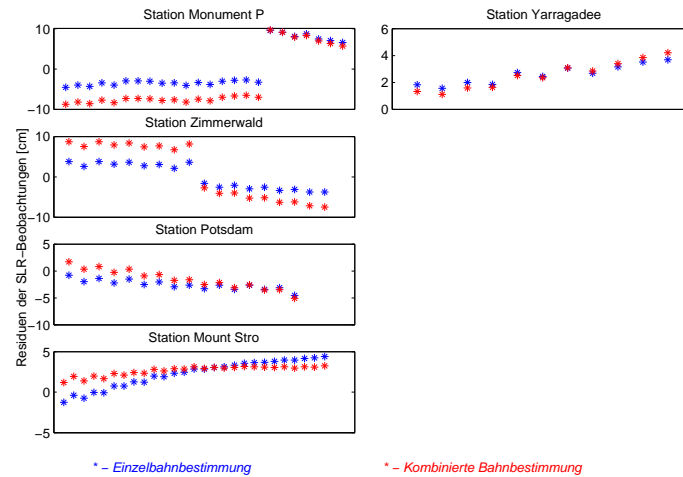


Abbildung 107: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.

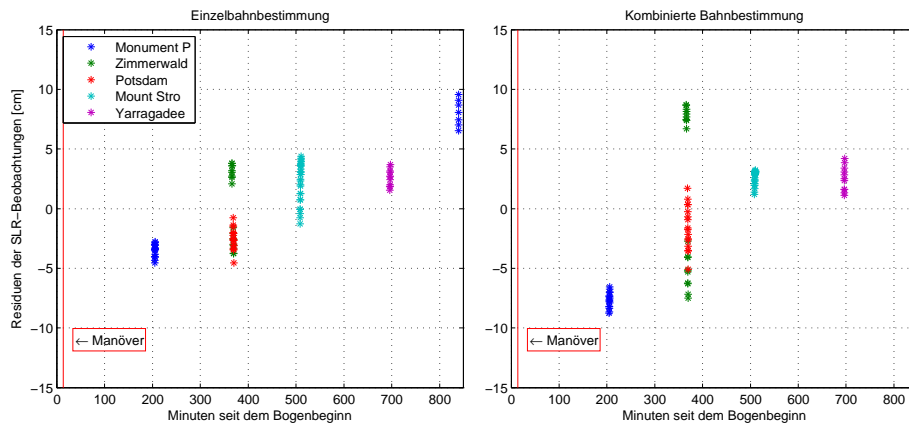


Abbildung 108: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.

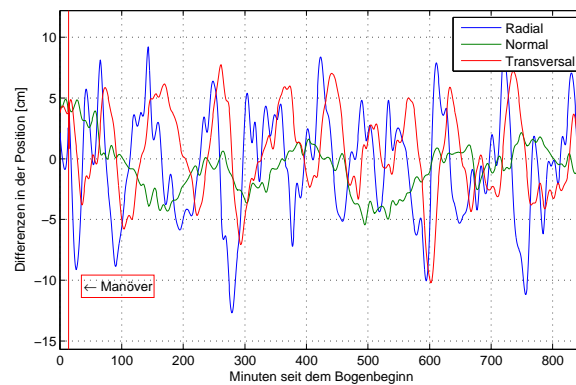


Abbildung 109: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.

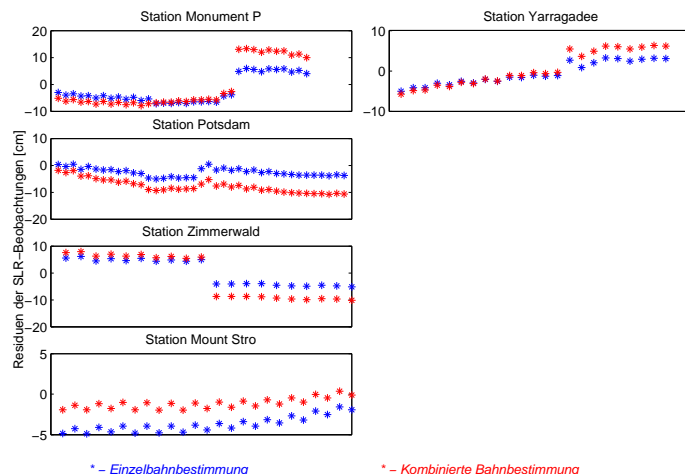


Abbildung 110: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.

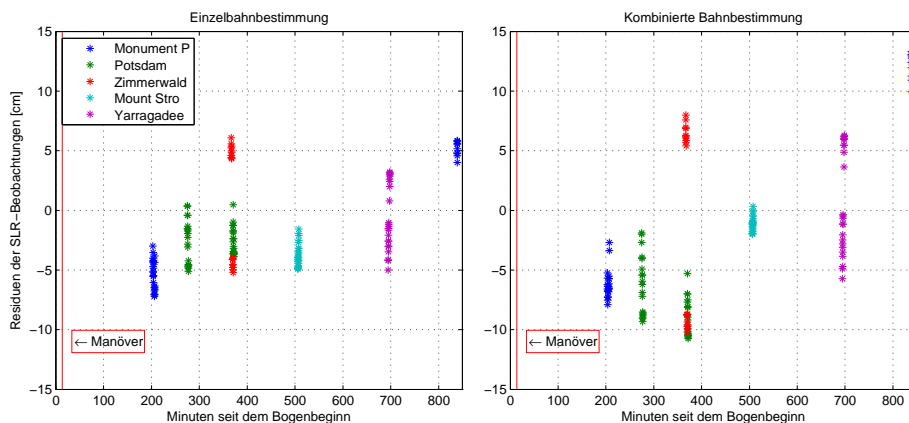


Abbildung 111: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.

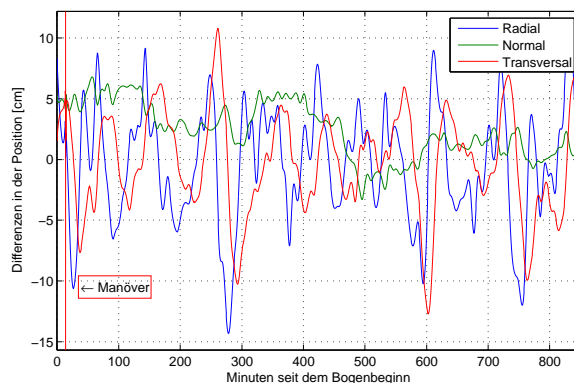


Abbildung 112: Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr.

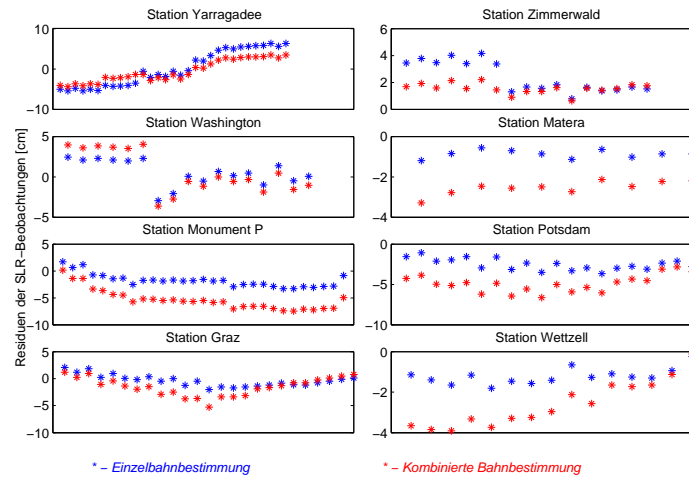


Abbildung 113: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.

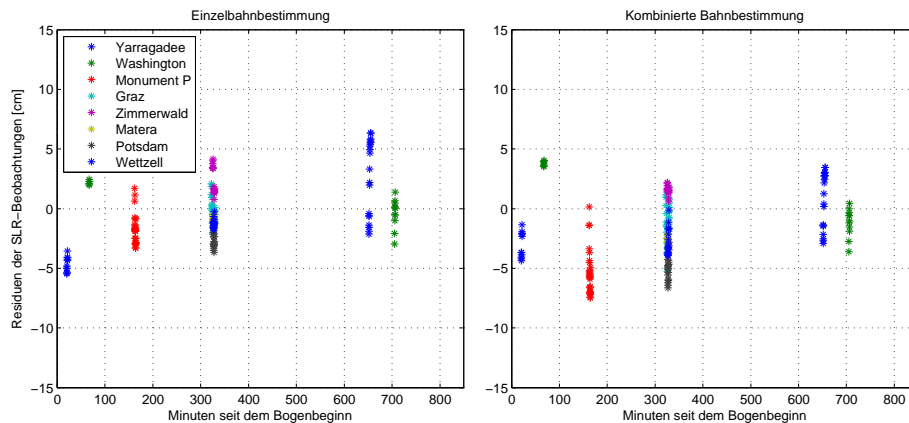


Abbildung 114: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.

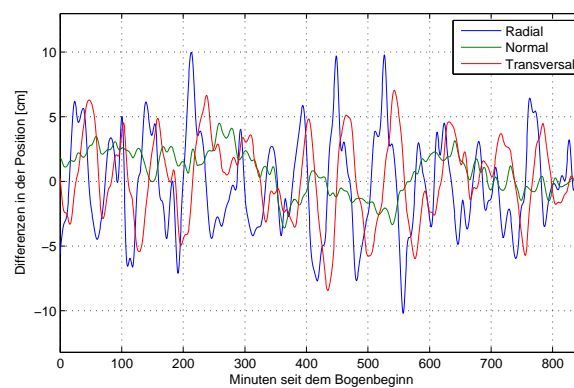


Abbildung 115: Differenzen der Positionen des der TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.

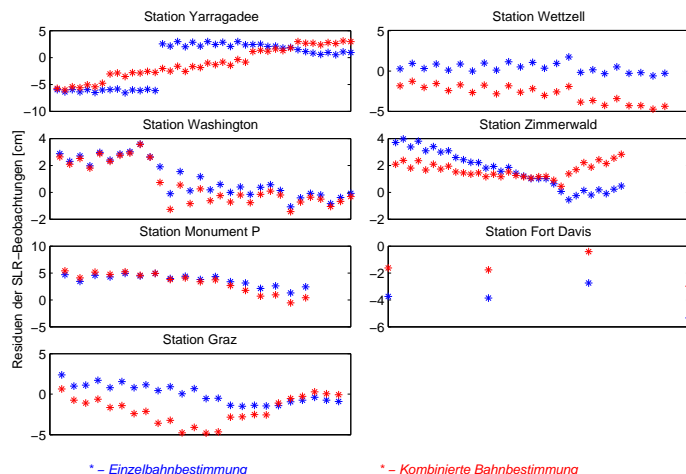


Abbildung 116: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.

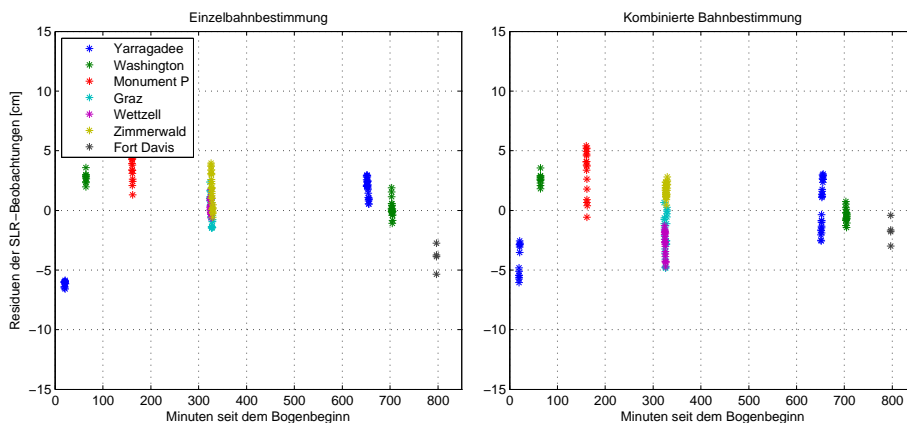


Abbildung 117: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.

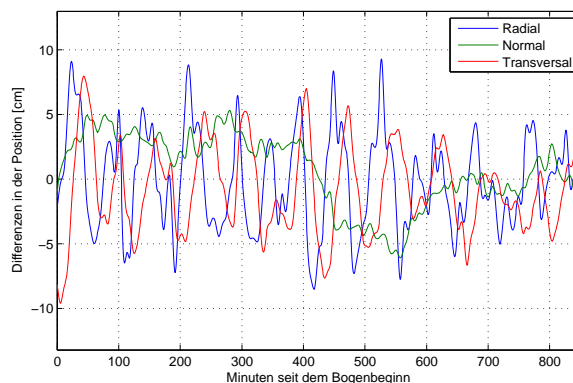


Abbildung 118: Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr.

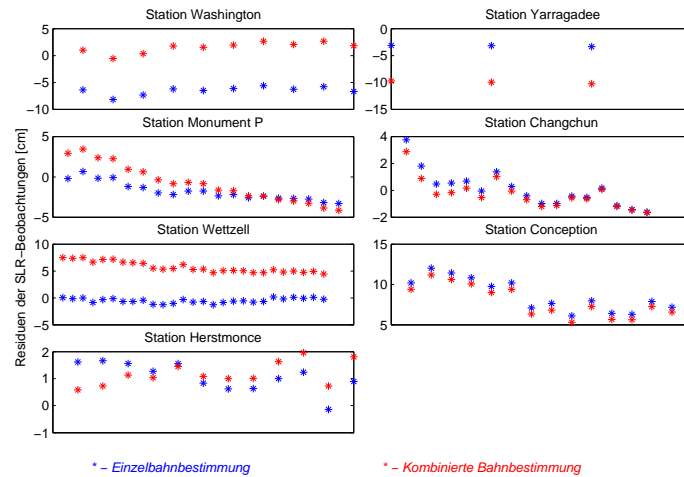


Abbildung 119: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.

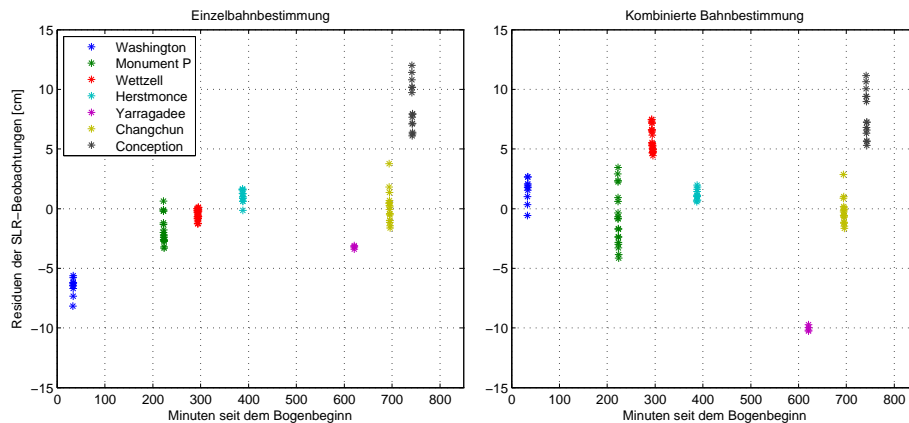


Abbildung 120: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.

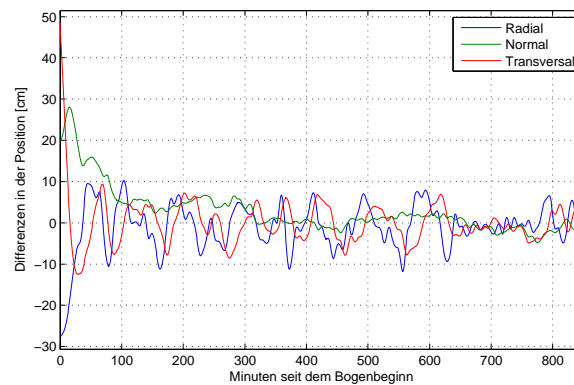


Abbildung 121: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.

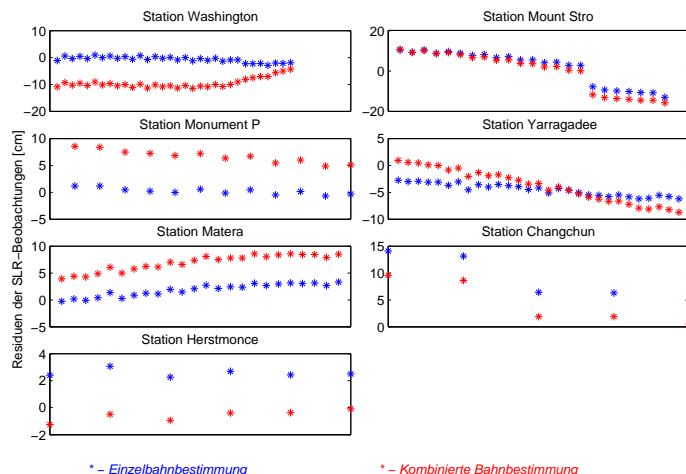


Abbildung 122: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.

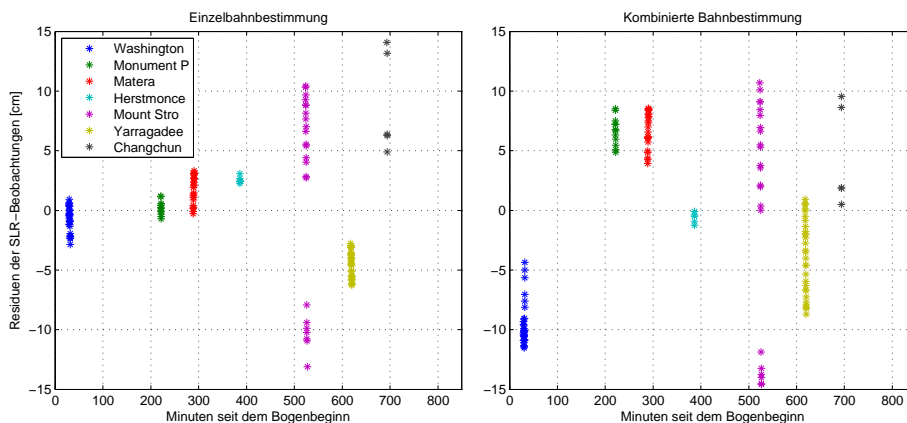


Abbildung 123: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TerraSAR-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.

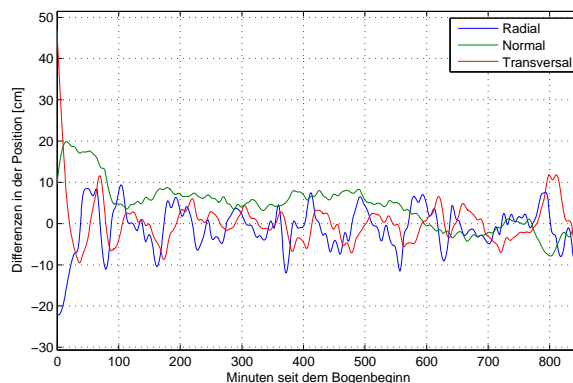


Abbildung 124: Differenzen der Positionen des TerraSAR-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr.

Aus den obigen Ergebnissen in den Abbildungen 101-124 folgt, dass die meisten SLR-Residuen aus der kombinierten Bahnberechnung im Vergleich zur Einzelbahnberechnung größer ausfallen. Da die SLR-Messungen als hochgenau gelten und eine Genauigkeitsreferenz für die Bahn bilden, folgt aus den größeren SLR-Residuen der kombinierten Bahnen eine schlechtere absolute Genauigkeit dieser. Einige relativ konstante Residuendifferenzen (siehe zum Beispiel Abbildung 122 auf der Seite 84) deuten gleichzeitig auf eine mögliche Verschiebung beider Bahnen gegeneinander an. Da jedoch vergleichbare Differenzen nicht bei allen Stationen nachgewiesen werden können, und einige Stationen sogar teils kleinere SLR-Residuen bei der kombinierten Bahnberechnung aufweisen (siehe z.B. Station Changchun in der Abbildung 122), kann an dieser Stelle nicht von einer systematischen Bahnverschiebung ausgegangen werden.

Bei der Betrachtung der Koordinatendifferenzen der Satelliten fällt weiter auf, dass die Differenzen einer periodischen Struktur mit der Frequenz eins pro Umlauf und einer Amplitude von ungefähr 5 bis 10 cm ähneln. Das legt eine periodische Verschiebung beider Bahnen gegeneinander nahe, die als eine Schwingung einer Bahn um die andere vorgestellt werden kann.

Weiter kann der Einfluss der Manöver als eine mögliche Ursache für die schlechtere Genauigkeit der kombinierten Bahnen ausgeschlossen werden, da die Manöver bei beiden Bahnbögen, sowohl vom 09.03.2012 11 Uhr als auch vom 14.05.2012 11 Uhr, am Anfang der Bahn stattfinden, die SLR-Messungen jedoch deutlich später durchgeführt werden (vgl. Abbildungen 102, 105, 108, 111). Darüber hinaus weisen die beiden anderen Bahnbögen vom 28.03.2012 11 Uhr und 10.04.2012 11 Uhr ähnliche Tendenzen in SLR-Residuen und Bahndifferenzen, obwohl diese keine Manöver besitzen.

Die Betrachtung der statistischen Auswertung der SLR-Residuen der ausgesuchten Bahnbögen in der Tabelle 10 bestätigt weiter die schlechtere absolute Genauigkeit der Bahnen aus der kombinierten Bahnberechnung. Dies wird besonders anhand der globalen Werte über alle Stationen deutlich.

*Tabelle 10: Statistische Auswertung der SLR-Residuen aus den untersuchten Bahnbögen.
Legende: TDX - TanDEM-X, TSX - TerraSAR-X, E - Einzelbahn, K - Bahn aus der kombinierten Berechnung.*

Station	Satellit	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
09.03.2012, 11 Uhr							
Alle Stationen	TDX E	3.98	-0.30	-4.24	1.69	1.10	127
	TDX K	8.05	-1.09	-13.99	4.81	4.60	127
	TSX E	8.06	-0.06	-8.18	3.29	2.78	181
	TSX K	11.11	-1.28	-11.13	6.38	4.96	181
Conception	TDX E	—	—	—	—	—	—
	TDX K	—	—	—	—	—	—
	TSX E	0.50	-1.78	-8.18	3.22	2.69	13
	TSX K	6.92	3.79	-7.18	5.89	4.50	13
Grasse	TDX E	—	—	—	—	—	—
	TDX K	—	—	—	—	—	—
	TSX E	2.69	-0.40	-2.22	1.27	1.20	23
	TSX K	0.35	-2.36	-4.30	2.63	1.16	23
Graz	TDX E	3.98	1.80	-0.93	2.19	1.25	20
	TDX K	2.01	-0.15	-1.18	0.97	0.96	20
	TSX E	1.67	1.12	0.06	1.19	0.41	14
	TSX K	0.61	-0.38	-1.08	0.65	0.52	14
Monument P	TDX E	—	—	—	—	—	—
	TDX K	—	—	—	—	—	—
	TSX E	0.98	0.28	-0.54	0.56	0.49	5

Station	Satellit	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
	TSX K	2.18	1.48	0.55	1.57	0.53	5
Mount Stro	TDX E	-2.07	-2.39	-2.75	2.39	0.18	23
	TDX K	-0.09	-1.28	-2.54	1.45	0.67	23
	TSX E	-1.09	-2.13	-3.13	2.21	0.59	23
	TSX K	-0.89	-2.18	-3.37	2.30	0.72	23
Washington	TDX E	1.30	-0.51	-4.24	1.74	1.66	41
	TDX K	8.05	-0.62	-13.99	8.12	8.09	41
	TSX E	8.06	1.98	-5.59	4.96	4.55	61
	TSX K	11.11	1.75	-11.13	8.47	8.28	61
Wettzell	TDX E	0.37	-0.09	-0.59	0.29	0.27	11
	TDX K	-1.73	-2.19	-2.65	2.21	0.26	11
	TSX E	-0.84	-2.36	-3.98	2.53	0.93	18
	TSX K	-2.03	-3.68	-5.39	3.83	1.06	18
Yarragadee	TDX E	—	—	—	—	—	—
	TDX K	—	—	—	—	—	—
	TSX E	-0.15	-1.05	-2.53	1.22	0.62	24
	TSX K	-8.49	-9.10	-9.72	9.11	0.32	24
Zimmerwald	TDX E	1.65	0.07	-0.70	0.59	0.58	32
	TDX K	-0.14	-1.75	-2.70	1.87	0.65	32
	TSX E	—	—	—	—	—	—
	TSX K	—	—	—	—	—	—
14.05.2012, 11 Uhr							
Alle Stationen	TDX E	9.56	0.49	-4.54	3.62	3.07	96
	TDX K	9.65	0.22	-8.76	5.25	4.56	96
	TSX E	6.07	-1.98	-7.20	4.10	3.29	141
	TSX K	13.33	-2.63	-10.75	6.91	5.46	141
Monument P	TDX E	9.56	-0.13	-4.54	5.30	5.30	24
	TDX K	9.65	-3.17	-8.76	7.72	7.03	24
	TSX E	5.83	-2.28	-7.20	5.45	4.95	34
	TSX K	13.33	-0.81	-7.90	8.44	8.40	34
Mount Stro	TDX E	4.40	2.24	-1.27	2.80	1.67	27
	TDX K	3.23	2.65	1.20	2.71	0.57	27
	TSX E	-1.56	-3.73	-4.92	3.84	0.94	25
	TSX K	0.34	-1.16	-1.98	1.32	0.64	25
Potsdam	TDX E	-0.77	-2.58	-4.54	2.73	0.90	16
	TDX K	1.71	-1.54	-5.07	2.36	1.79	16
	TSX E	0.47	-2.57	-5.11	2.99	1.52	39
	TSX K	-1.89	-7.68	-10.75	8.06	2.46	39
Yarragadee	TDX E	3.68	2.58	1.55	2.67	0.68	11
	TDX K	4.21	2.54	1.11	2.72	1.00	11
	TSX E	3.21	-0.59	-5.00	2.81	2.75	23
	TSX K	6.30	0.57	-5.73	4.28	4.24	23
Zimmerwald	TDX E	3.81	0.15	-3.78	3.08	3.08	18
	TDX K	8.71	1.25	-7.49	6.85	6.74	18
	TSX E	6.07	0.24	-5.21	4.78	4.77	20
	TSX K	7.97	-1.43	-10.21	8.08	7.95	20

Station	Satellit	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
28.03.2012, 11 Uhr							
Alle Stationen	TDX E	6.34	-0.53	-5.45	2.58	2.09	164
	TDX K	4.03	-2.06	-7.47	3.62	1.80	164
	TSX E	4.90	0.60	-6.60	2.69	2.12	169
	TSX K	5.40	-0.25	-6.04	2.63	1.78	169
Fort Davis	TDX E	—	—	—	—	—	—
	TDX K	—	—	—	—	—	—
	TSX E	-2.74	-3.93	-5.35	4.04	0.93	4
	TSX K	-0.42	-1.71	-2.99	1.94	0.91	4
Graz	TDX E	2.07	-0.38	-2.00	1.12	1.05	25
	TDX K	1.15	-1.49	-5.26	2.23	1.66	25
	TSX E	2.38	0.02	-1.49	1.14	1.14	24
	TSX K	0.65	-1.97	-4.84	2.56	1.63	24
Matera	TDX E	-0.57	-0.87	-1.20	0.89	0.19	10
	TDX K	-2.13	-2.54	-3.30	2.56	0.33	10
	TSX E	—	—	—	—	—	—
	TSX K	—	—	—	—	—	—
Monument P	TDX E	1.71	-1.79	-3.32	2.17	1.24	29
	TDX K	0.15	-5.38	-7.47	5.70	1.87	29
	TSX E	4.90	3.67	1.29	3.81	1.03	17
	TSX K	5.40	3.22	-0.58	3.72	1.85	17
Potsdam	TDX E	-1.10	-2.52	-3.66	2.61	0.70	20
	TDX K	-2.84	-4.91	-6.64	5.01	1.04	20
	TSX E	—	—	—	—	—	—
	TSX K	—	—	—	—	—	—
Washington	TDX E	2.46	0.52	-2.97	1.65	1.57	17
	TDX K	4.03	0.56	-3.62	2.60	2.54	17
	TSX E	3.59	1.03	-1.09	1.70	1.36	30
	TSX K	3.56	0.58	-1.43	1.63	1.52	30
Wetzell	TDX E	-0.25	-1.23	-1.81	1.28	0.38	15
	TDX K	-0.13	-2.60	-3.92	2.82	1.11	15
	TSX E	1.73	0.38	-0.63	0.70	0.58	23
	TSX K	-1.29	-2.84	-4.73	3.03	1.04	23
Yarragadee	TDX E	6.34	0.10	-5.45	4.36	4.36	31
	TDX K	3.46	-0.57	-4.37	2.75	2.69	31
	TSX E	2.94	-0.90	-6.60	4.00	3.90	40
	TSX K	3.05	-1.17	-6.04	3.06	2.83	40
Zimmerwald	TDX E	4.15	2.37	0.77	2.62	1.11	17
	TDX K	2.19	1.55	0.64	1.59	0.38	17
	TSX E	3.96	1.62	-0.57	2.11	1.35	31
	TSX K	2.82	1.64	0.44	1.73	0.54	31
10.04.2012, 11 Uhr							
Alle Stationen	TDX E	12.00	0.09	-8.18	4.08	1.04	103
	TDX K	11.16	2.27	-10.27	4.84	1.38	103
	TSX E	14.07	-0.07	-13.11	4.74	3.58	131
	TSX K	10.69	-1.19	-15.74	7.65	4.36	131
Changchun	TDX E	3.76	0.08	-1.63	1.31	1.30	17
	TDX K	2.87	-0.27	-1.64	1.10	1.07	17
	TSX E	14.07	8.95	4.88	9.74	3.85	5
	TSX K	9.53	4.48	0.51	5.87	3.79	5

Station	Satellit	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
Concepcion	TDX E	12.00	8.63	6.10	8.85	1.95	14
	TDX K	11.16	7.89	5.30	8.12	1.92	14
	TSX E	—	—	—	—	—	—
Herstmonce	TSX K	—	—	—	—	—	—
	TDX E	1.66	1.06	-0.14	1.18	1.51	12
	TDX K	1.96	1.18	0.58	1.25	0.42	12
Matera	TSX E	3.07	2.56	2.26	2.57	0.26	6
	TSX K	-0.10	-0.60	-1.25	0.71	0.39	6
	TDX E	—	—	—	—	—	—
Monument P	TDX K	—	—	—	—	—	—
	TSX E	3.32	1.83	-0.28	2.15	1.12	24
	TSX K	8.55	6.88	3.92	7.04	1.50	24
Mount Stro	TDX E	0.64	-1.80	-3.31	2.11	1.10	19
	TDX K	3.44	-0.82	-4.16	2.42	2.28	19
	TSX E	1.18	0.20	-0.71	0.60	0.57	12
Washington	TSX K	8.53	6.67	4.87	6.77	1.14	12
	TDX E	—	—	—	—	—	—
	TDX K	—	—	—	—	—	—
Wettzell	TSX E	10.42	1.71	-13.11	8.45	8.27	23
	TSX K	10.69	-0.27	-15.74	9.50	9.50	23
	TDX E	-5.63	-6.52	-8.18	6.56	0.71	10
Yarragadee	TDX K	2.67	1.52	-0.58	1.80	0.97	10
	TSX E	0.93	-0.73	-2.87	1.25	1.01	32
	TSX K	-4.37	-9.49	-11.51	9.67	1.84	32
Wettzell	TDX E	0.12	-0.51	-1.27	0.66	0.42	27
	TDX K	7.48	5.71	4.44	5.79	0.98	27
	TSX E	—	—	—	—	—	—
Yarragadee	TSX K	—	—	—	—	—	—
	TDX E	-3.11	-3.22	-3.39	3.23	0.10	4
	TDX K	-9.72	-10.04	-10.27	10.04	0.22	4
Yarragadee	TSX E	-2.79	-4.52	-6.25	4.66	1.11	29
	TSX K	0.93	-3.81	-8.72	4.87	3.03	29

Als nächstes werden die Bernese-Bahnen über denselben Analysezeitraum wie die EPOS-OC-Bahnen zuvor, vom 1. März 2012 bis zum 31. Mai 2012, analysiert. Hierfür ist zu beachten, dass im Rahmen der kombinierten Bahnberechnung in Bernese die TerraSAR-X-Bahn fixiert wird und nur die TanDEM-X-Bahn angepasst wird. Als Folge darauf müssen die SLR-Residuen für TerraSAR-X aus der Einzelbahnberechnung mit den SLR-Residuen aus der kombinierten Bahnberechnung übereinstimmen. Dies kann auch als eine zusätzliche Kontrolle der Berechnung betrachtet werden.

Eine Gesamtübersicht der statistischen Auswertung der Vermessung der Bernese-Bahnen wird in der Tabelle 11 auf der nächsten Seite vorgestellt.

Tabelle 11: Statistische Auswertung der SLR-Residuen aus der Vermessung der Bernese-Bahnen.

Station	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X aus der Einzelbahnberechnung						
Alle Stationen	18.81	-1.06	-19.15	3.77	2.04	13426
Yarragadee	8.76	0.39	-8.86	3.59	2.65	3011
Washington	5.96	-1.90	-8.32	3.32	1.87	2300
Zimmerwald	7.33	-1.17	-9.32	2.93	2.36	2103
Mount Stro	9.79	-0.10	-6.12	2.72	1.06	1058
San Juan	7.78	-1.64	-13.77	3.29	1.50	999
Hartebeest	7.77	0.02	-11.08	3.81	2.06	667
Monument P	12.92	-1.27	-7.10	3.22	1.34	633
Wetzell	4.82	-3.51	-10.53	4.52	1.29	617
Potsdam	3.41	-3.10	-11.94	4.05	2.07	609
Graz	4.38	-2.16	-7.89	2.86	1.62	472
Concepcion	18.81	-0.31	-19.15	11.21	1.88	256
Herstmonce	4.04	-2.51	-6.38	3.08	1.37	245
Changchun	11.55	0.22	-7.49	6.31	1.44	209
Matera	3.58	-1.94	-8.70	3.07	1.72	128
Tanegashim	5.23	-3.38	-10.93	5.33	2.LA	77
San Fernan	6.67	2.57	-3.00	3.80	0.63	35
Riga	8.67	6.72	3.96	6.86	1.40	7
TerraSAR-X aus der Einzelbahnberechnung						
Alle Stationen	19.92	-1.23	-19.29	4.10	2.43	13341
Yarragadee	10.42	0.42	-13.03	4.10	3.26	3170
Washington	5.84	-2.16	-11.03	3.64	1.86	2229
Zimmerwald	6.21	-1.57	-9.28	2.94	1.98	1765
San Juan	9.44	-1.48	-9.77	3.73	1.80	1082
Mount Stro	19.04	-0.43	-18.77	4.61	4.08	931
Wetzell	4.83	-3.55	-13.25	4.75	1.63	894
Potsdam	4.33	-3.84	-13.52	4.91	2.43	747
Monument P	5.14	-1.28	-6.71	2.90	1.16	672
Hartebeest	8.89	-0.18	-10.15	3.82	1.17	522
Graz	4.00	-2.56	-7.69	3.33	1.63	409
Herstmonce	2.25	-2.52	-7.85	3.19	1.19	303
Concepcion	19.92	3.06	-19.29	9.15	1.91	266
Changchun	13.78	-0.09	-8.96	6.23	1.49	208
Matera	0.91	-1.92	-5.83	2.55	0.47	89
Grasse	2.03	-2.37	-5.45	3.26	2.23	23
San Fernan	4.09	2.39	0.11	2.68	1.03	19
Riga	9.01	7.32	4.45	7.48	1.54	7
Fort Davis	-0.76	-2.69	-5.37	3.11	0.90	5

Station	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X aus der kombinierten Berechnung						
Alle Stationen	19.00	-1.40	-19.17	4.14	2.25	13364
Yarragadee	9.68	0.08	-12.67	4.41	3.34	3007
Washington	17.80	-2.11	-10.03	3.52	2.06	2274
Zimmerwald	6.91	-1.53	-9.14	3.17	2.25	2097
Mount Stro	6.44	-0.88	-7.23	2.87	1.08	1028
San Juan	7.96	-1.03	-10.22	3.31	1.33	999
Hartebeest	7.46	-0.25	-10.58	3.83	1.91	667
Monument P	14.15	-1.73	-7.06	3.28	1.30	633
Wetzell	6.06	-3.85	-12.37	4.98	1.15	617
Potsdam	3.48	-4.12	-13.08	4.93	2.02	609
Graz	4.47	-2.78	-7.79	3.47	1.72	472
Herstmonce	1.80	-2.46	-8.58	3.18	1.15	245
Concepcion	19.00	-0.72	-19.17	11.16	2.14	260
Changchun	11.45	-0.38	-9.67	6.43	1.53	209
Matera	1.94	-2.66	-7.05	3.30	0.76	128
Tanegashim	4.92	-4.84	-10.75	6.55	2.32	77
San Fernan	4.63	0.37	-8.66	4.33	0.73	35
Riga	8.34	6.24	3.70	6.39	1.38	7
TerraSAR-X aus der kombinierten Berechnung						
Alle Stationen	19.92	-1.21	-19.28	4.10	2.46	13268
Yarragadee	10.42	0.41	-13.03	4.10	3.26	3169
Washington	5.84	-2.18	-11.03	3.67	1.86	2198
Zimmerwald	6.21	-1.57	-9.28	2.95	1.98	1755
San Juan	9.44	-1.48	-9.77	3.73	1.80	1082
Mount Stro	19.04	-0.43	-18.77	4.61	4.08	931
Wetzell	4.83	-3.55	-13.25	4.75	1.63	894
Potsdam	4.33	-3.84	-13.52	4.91	2.43	747
Monument P	5.14	-1.28	-6.71	2.90	1.16	672
Hartebeest	19.92	0.32	-19.07	3.77	2.11	501
Graz	4.00	-2.56	-7.69	3.33	1.63	409
Herstmonce	2.25	-2.53	-7.85	3.20	1.19	303
Concepcion	19.92	3.06	-19.28	9.15	1.91	266
Changchun	13.78	-0.09	-8.96	6.23	1.49	208
Matera	0.91	-1.59	-4.70	2.17	0.45	79
Grasse	2.03	-2.37	-5.45	3.26	2.23	23
San Fernan	4.09	2.39	0.11	2.68	1.03	19
Riga	9.01	7.32	4.45	7.48	1.54	7
Fort Davis	-0.79	-2.71	-5.37	3.12	0.90	5

In den Ergebnissen der Tabelle 11 wird eine ähnliche Tendenz für die Verschlechterung der absoluten Position der TanDEM-X-Bahnen aus der kombinierten Berechnung deutlich, wie zuvor bei der Auswertung der EPOS-OC Ergebnisse (vgl. Tabelle 8 auf Seite 61). Dies kann, zumindest teilweise, auf die Verfahrensweise der Basislinienbestimmung mit Bernese zurückgeführt werden. Dadurch, dass die TerraSAR-X-Bahn während der kombinierten Bahnberechnung fixiert wird, und nur die TanDEM-X-Bahn angepasst wird, übertragen sich alle Unsicherheiten der beiden Bahnen auf die TanDEM-X-Bahn, wodurch die absolute Bahngenauigkeit der TanDEM-X künstlich verschlechtert wird.

Im Falle der TerraSAR-X-Bahnen bleiben die Ergebnisse wie erwartet nahezu konstant. Die kleinen Diskrepanzen bei dem globalen Wert, sowie bei einigen Stationen lassen sich durch eine geringere, im Vergleich zur Vermessung der Bahnen aus der Einzelbahnberechnung, Anzahl der akzeptierten Beobachtungen erklären. Der Grund für die geringere Anzahl der Beobachtungen trotz der identischen Bahn kann bei vereinzelt schlechten Beobachtungen liegen. So können deren SLR-Residuen nahe der Eliminierungsgrenze für schlechte Beobachtungen von 20 cm liegen, und diese teilweise übersteigen, so dass die entsprechenden Beobachtungen automatisch gestrichen werden.

Da die SLR-Residuen des TerraSAR-X sowohl aus der Einzelbahnberechnung als auch aus der kombinierten Bahnberechnung gleich sind, erübrigt sich die Betrachtung der 4 Untersuchungsbögen für diesen Satelliten. Die Ergebnisse der Analyse der 4 Untersuchungsbögen für TanDEM-X werden auf den folgenden Seiten dargestellt:

1. Bahnbögen mit Manöver:

- Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 92.
- Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr auf der Seite 93.

2. Bahnbögen ohne Manöver:

- Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 94.
- Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr auf der Seite 95.

Die Darstellung erfolgt analog zu der aus der Analyse der EPOS-OC-Bahnen in jeweils 3 Abbildungen pro Bahnbogen und besteht aus einer Übersicht der SLR-Residuen pro Beobachtungsstation, einer Gesamtübersicht aller SLR-Residuen pro Bahnbogen, sowie einer Übersicht der Koordinatendifferenzen der Bahnen aus der Einzelbahnberechnung und aus der kombinierten Bahnberechnung.

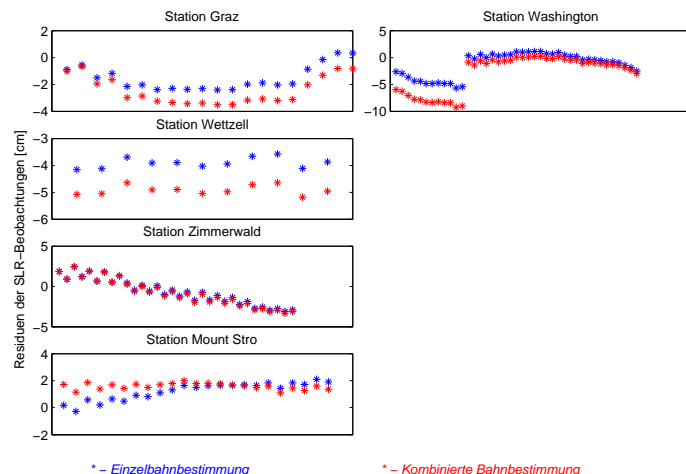


Abbildung 125: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen aus der Bernese Auswertung vom 09.03.2012, 11 Uhr.

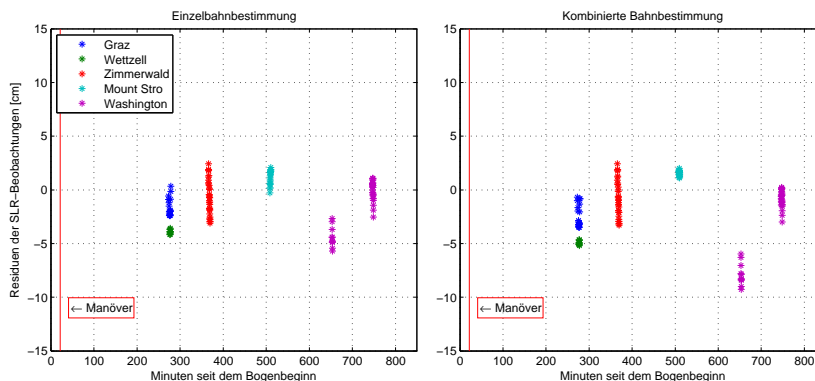


Abbildung 126: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen aus der Bernese Auswertung vom 09.03.2012, 11 Uhr.

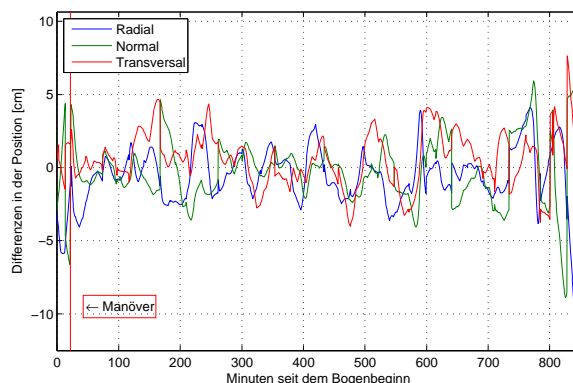


Abbildung 127: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

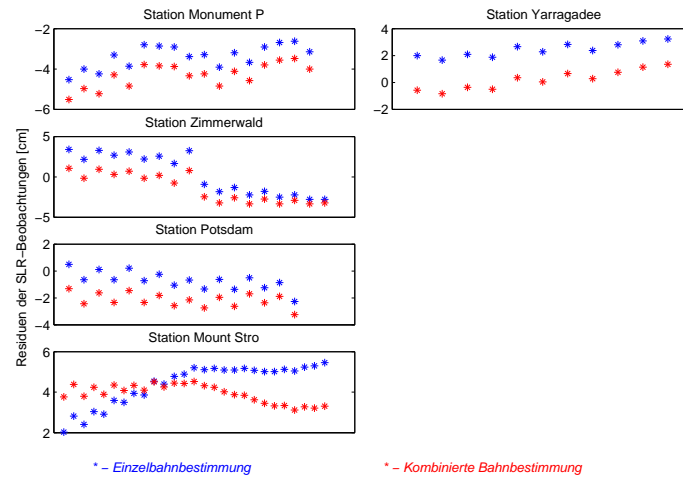


Abbildung 128: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

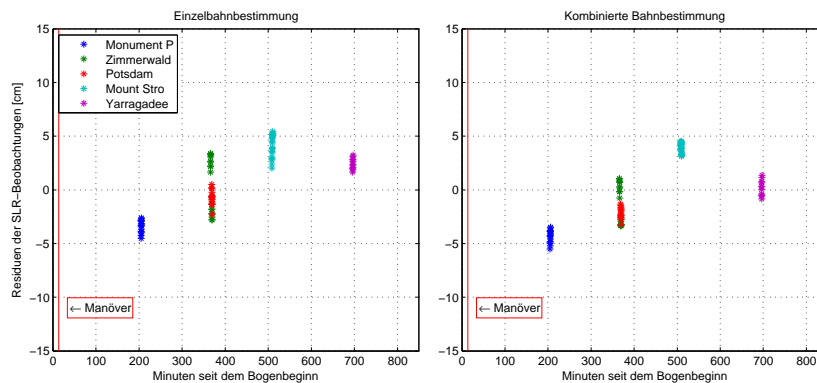


Abbildung 129: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

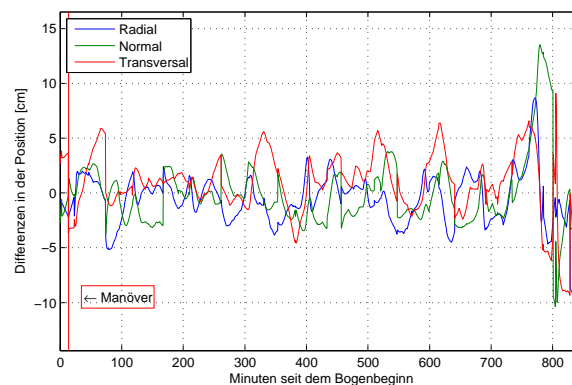


Abbildung 130: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

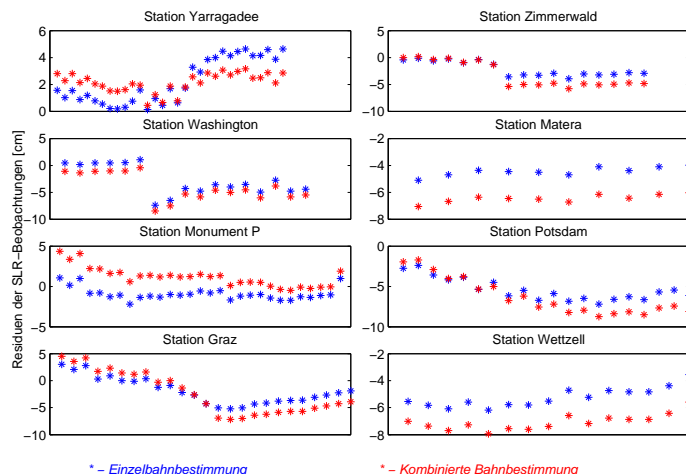


Abbildung 131: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

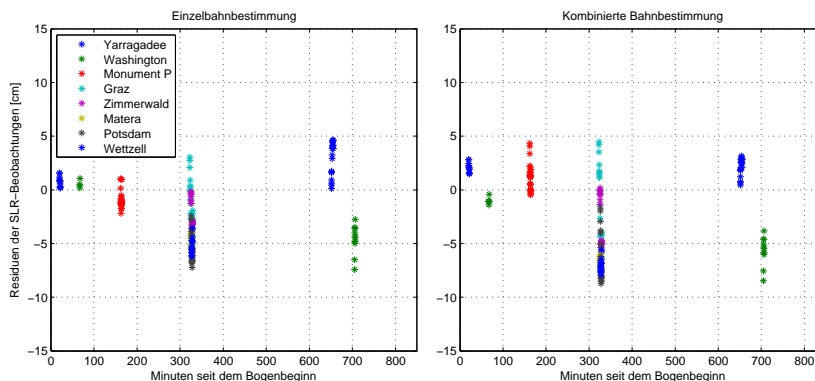


Abbildung 132: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

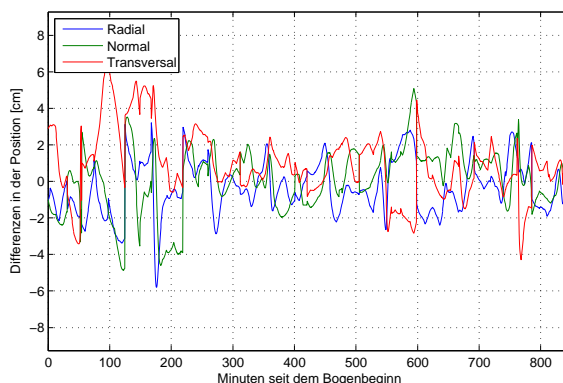


Abbildung 133: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

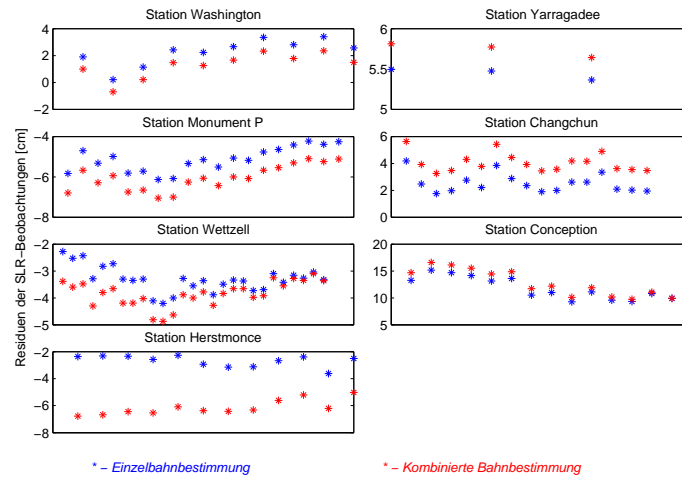


Abbildung 134: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

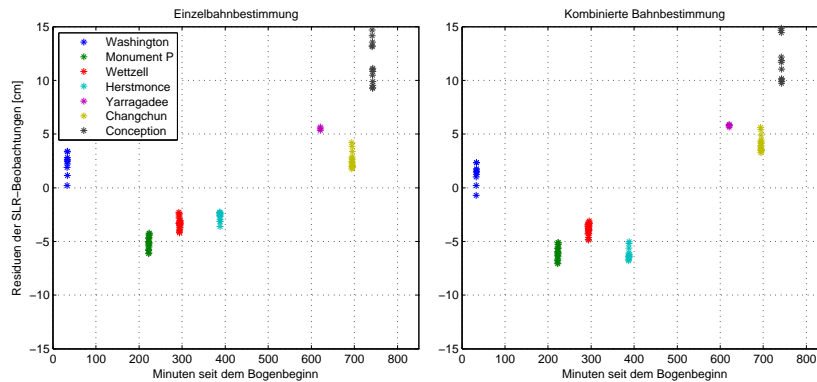


Abbildung 135: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

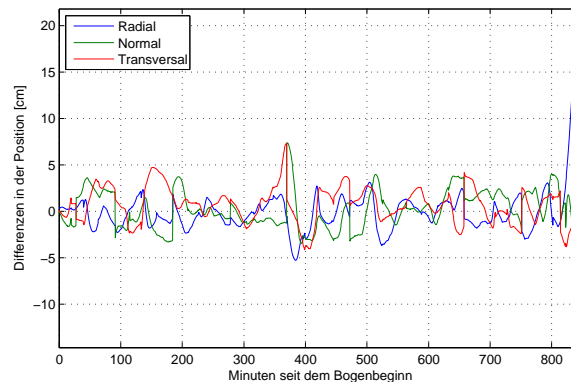


Abbildung 136: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der Bernese Auswertung.

Bei der Betrachtung der einzelnen SLR-Residuen (vgl. Abbildungen 125, 128, 131 und 134) wird eine ähnliche Tendenz wie in der Auswertung der EPOS-OC-Bahnen mit teils größeren SLR-Residuen deutlich. Auch die Koordinatendifferenzen (vgl. Abbildungen 127, 130, 133 und 136) weisen auf eine ähnliche periodische Bahnverschiebung hin, jedoch mit einer geringeren Amplitude bis maximal ca. 5 cm.

Als letztes werden die GSOC-Bahnen untersucht. Auch hier, analog zu den Bernese-Bahnen, wird die TerraSAR-X-Bahn fixiert und nur die TanDEM-X-Bahn erfährt eine Verbesserung während der kombinierten Bahnberechnung. Die Übersicht über die statistische Auswertung der Vermessung der GSOC-Bahnen kann der Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Statistische Auswertung der SLR-Residuen aus der Vermessung der GSOC-Bahnen.

Station	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X aus der Einzelbahnberechnung						
Alle Stationen	19.89	-1.07	-18.63	3.26	1.65	13577
Yarragadee	7.95	0.38	-5.61	2.81	2.22	3011
Washington	5.53	-1.87	-7.10	2.75	1.40	2334
Zimmerwald	5.82	LA.79	-5.64	2.37	1.90	2103
Mount Stro	4.37	-0.64	-5.11	2.08	0.92	1078
San Juan	5.12	-2.00	-6.84	2.71	1.02	1051
Hartebeest	7.64	-0.57	-10.00	3.49	1.75	667
Monument P	10.96	-1.10	-6.25	2.93	1.27	655
Wetzell	4.02	-3.24	-7.76	3.80	0.84	617
Potsdam	2.81	-2.89	-7.25	3.47	1.54	609
Graz	3.55	-2.19	-6.39	3.04	1.82	472
Concepcion	19.89	0.61	-18.63	10.78	1.70	267
Herstmonce	3.43	-1.61	-6.33	2.32	1.01	257
Changchun	14.29	-1.33	-10.16	6.06	1.40	209
Matera	0.36	-2.45	-5.57	2.77	0.56	128
Tanegashim	2.76	-3.58	-9.31	4.90	1.35	77
San Fernan	9.88	3.11	-6.81	6.16	0.67	35
Riga	7.75	5.49	3.22	5.66	1.37	7
TerraSAR-X aus der Einzelbahnberechnung						
Alle Stationen	19.86	-0.88	-19.69	3.31	1.82	13513
Yarragadee	7.63	0.48	-6.74	2.64	2.15	3170
Washington	7.15	-1.68	-7.19	2.61	1.20	2243
Zimmerwald	5.02	-0.94	-5.49	2.06	1.54	1765
San Juan	9.74	-2.08	-7.75	2.70	1.19	1126
Mount Stro	18.84	-0.58	-19.69	4.10	3.74	956
Wetzell	2.87	-2.66	-7.71	3.35	1.12	894
Potsdam	6.67	-2.79	-9.86	3.48	1.65	747
Monument P	5.22	-0.75	-6.50	2.85	0.86	692
Hartebeest	8.12	-0.60	-7.50	2.97	1.14	522
Graz	4.17	-2.17	-5.85	2.99	1.75	409
Concepcion	19.86	5.50	-17.69	10.23	1.89	324
Herstmonce	1.69	-1.90	-5.85	2.36	0.88	314
Changchun	14.46	-0.16	-9.24	6.65	1.39	208
Matera	2.41	-1.49	-3.17	1.77	0.53	89
Grasse	3.51	-2.22	-5.71	3.77	3.04	23
San Fernan	4.05	2.09	-0.11	2.40	1.15	19
Riga	7.07	5.84	3.07	5.99	1.32	7
Fort Davis	-0.16	-1.86	-3.58	2.20	0.89	5

Station	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X aus der kombinierten Berechnung						
Alle Stationen	17.73	-1.12	-19.66	3.19	1.59	13577
Yarragadee	8.27	0.28	-5.99	2.67	2.06	3011
Washington	6.24	-1.91	-6.72	2.77	1.41	2334
Zimmerwald	5.40	-0.83	-5.73	2.21	1.79	2103
San Juan	5.69	-2.09	-6.36	2.65	0.97	1051
Mount Stro	3.85	-0.75	-4.90	2.08	1.08	1078
Hartebeest	7.10	-0.66	-11.05	3.45	1.78	667
Monument P	11.75	-1.06	-6.18	2.87	1.16	655
Potsdam	2.98	-2.86	-7.23	3.43	1.51	609
Wettzell	3.69	-3.07	-7.47	3.69	0.82	617
Graz	4.60	-2.19	-6.34	3.00	1.70	472
Concepcion	17.73	0.11	-19.66	10.65	1.65	267
Herstmonce	1.83	-1.74	-6.30	2.23	0.97	257
Changchun	14.10	-0.96	-8.93	5.93	1.48	209
Matera	1.14	-2.11	-4.88	2.56	0.74	128
Tanegashim	2.55	-3.91	-8.82	5.18	1.55	77
San Fernan	8.26	2.97	-6.49	5.72	0.65	35
Riga	7.15	4.96	2.57	5.14	1.37	7
TerraSAR-X aus der kombinierten Berechnung						
Alle Stationen	20.00	-0.88	-19.69	3.31	1.82	13514
Yarragadee	7.63	0.48	-6.74	2.64	2.15	3170
Washington	7.15	-1.68	-7.19	2.61	1.20	2243
Zimmerwald	5.02	-0.94	-5.49	2.06	1.54	1765
San Juan	9.73	-2.08	-7.75	2.70	1.19	1126
Mount Stro	18.84	-0.58	-19.69	4.10	3.74	956
Wettzell	2.87	-2.66	-7.71	3.35	1.12	894
Potsdam	6.67	-2.79	-9.86	3.48	1.65	747
Monument P	5.20	-0.75	-6.50	2.85	0.86	692
Hartebeest	8.12	-0.60	-7.51	2.97	1.14	522
Graz	4.18	-2.17	-5.84	2.99	1.75	409
Concepcion	20.00	5.54	-17.70	10.28	1.89	325
Herstmonce	1.69	-1.90	-5.84	2.36	0.88	314
Changchun	14.46	-0.16	-9.23	6.65	1.39	208
Matera	2.42	-1.49	-3.17	1.77	0.53	89
San Fernan	4.05	2.09	-0.12	2.40	1.15	19
Grasse	3.51	-2.22	-5.72	3.77	3.04	23
Riga	7.07	5.85	3.08	5.99	1.32	7
Fort Davis	-0.16	-1.86	-3.58	2.20	0.89	5

Anders als bei der Vermessung der EPOS-OC- und Bernese-Bahnen zeigt die Auswertung der Vermessung der GSOC-Bahnen eine geringfügige Verbesserung der absoluten Position der TanDEM-X-Bahnen aus der kombinierten Bahnberechnung im Vergleich zu den Bahnen aus der Einzelbahnbestimmung. Im Falle der TerraSAR-X bleiben die Ergebnisse wie zu erwarten konstant. Weitere positive Auffälligkeit stellt die Anzahl der akzeptierten Beobachtungen dar. Diese entspricht bei der kombinierten Bahnberechnung, bis auf eine Ausnahme bei der Station Concepcion bei TerraSAR-X, für alle restlichen Stationen des jeweiligen Satelliten den Werten aus der Einzelbahnberechnung. Daraus folgt ein weitgehendes Fehlen von größeren Ausreißern in den SLR-Residuen, die am Eliminationskriterium scheitern. Dies unterstreicht weiter die vergleichsweise höhere absolute Genauigkeit der GSOC-Bahnen im Vergleich zu den EPOS-OC- und Bernese-Bahnen.

Aufgrund der identischen TerraSAR-X-Bahnen werden, wie bereits bei der Bernese Auswertung, nur die TanDEM-X-Bahnen der vier ausgesuchten Bahnbögen weiter untersucht. Die Ergebnisse dieser Analyse finden sich auf den folgenden Seiten:

1. Bahnbögen mit Manöver:

- Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 99.
- Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr auf der Seite 100.

2. Bahnbögen ohne Manöver:

- Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr auf der Seite 101.
- Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr auf der Seite 102.

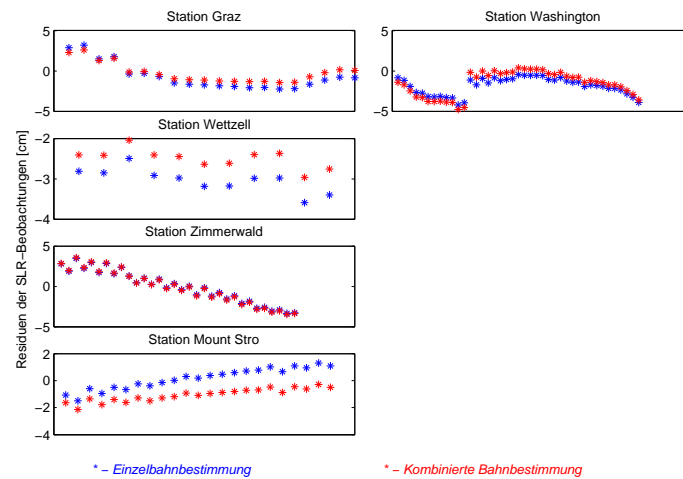


Abbildung 137: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

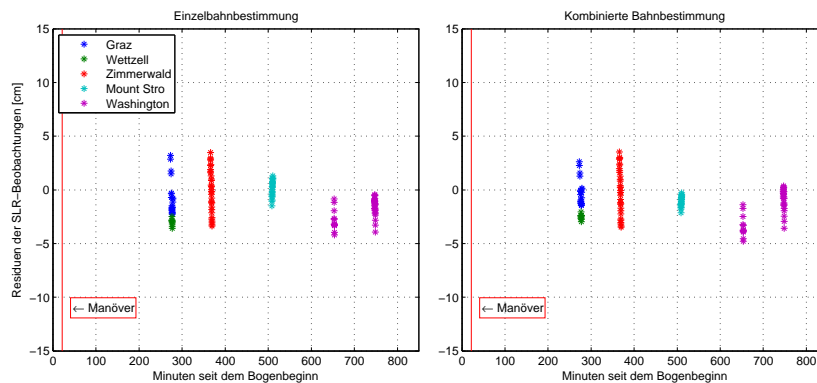


Abbildung 138: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

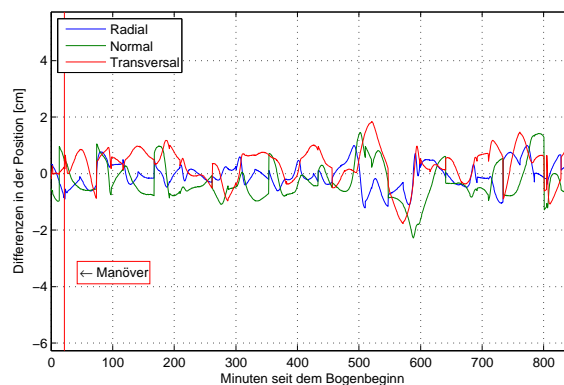


Abbildung 139: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 09.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

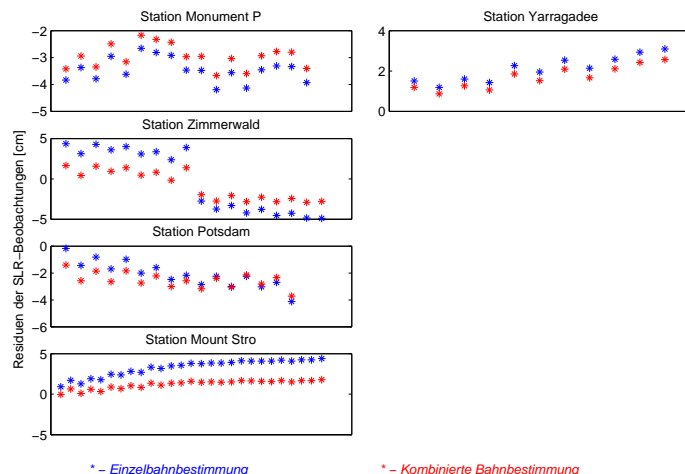


Abbildung 140: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

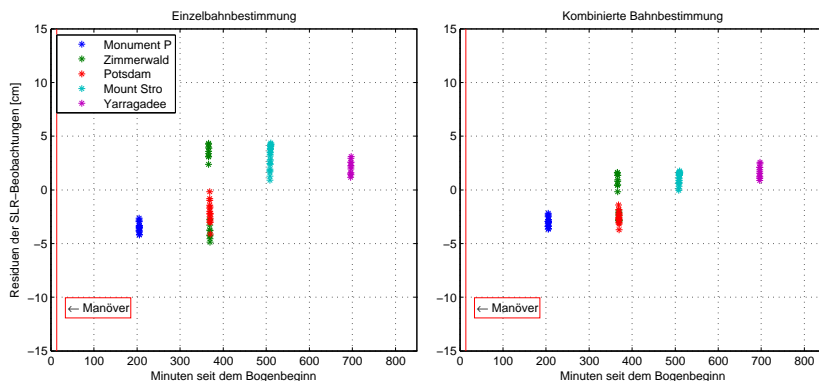


Abbildung 141: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

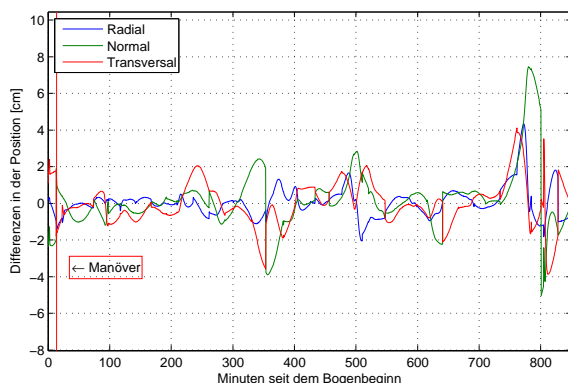


Abbildung 142: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 14.05.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

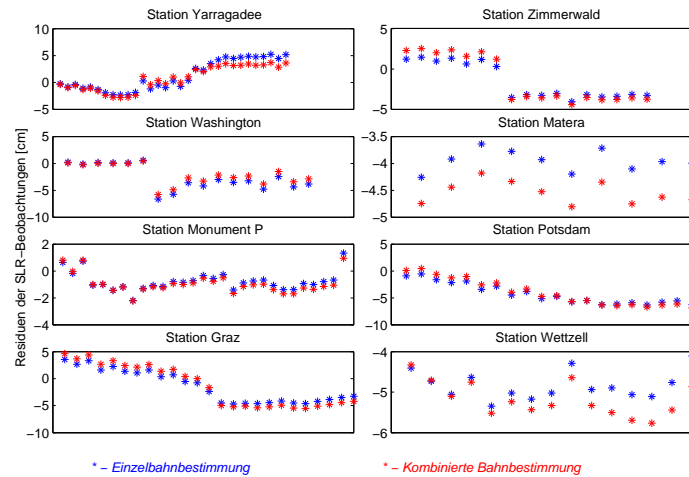


Abbildung 143: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

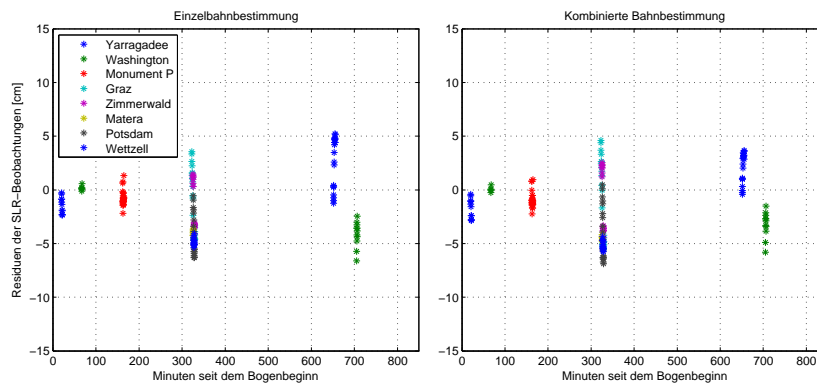


Abbildung 144: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

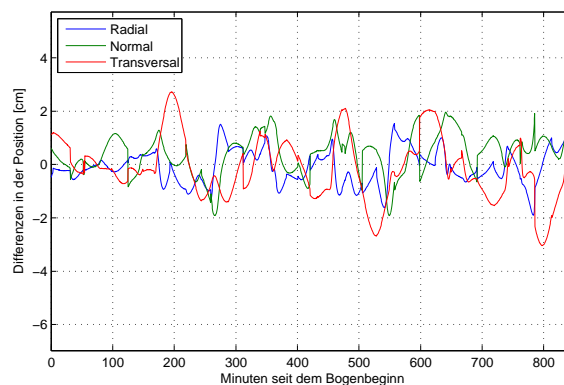


Abbildung 145: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 28.03.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

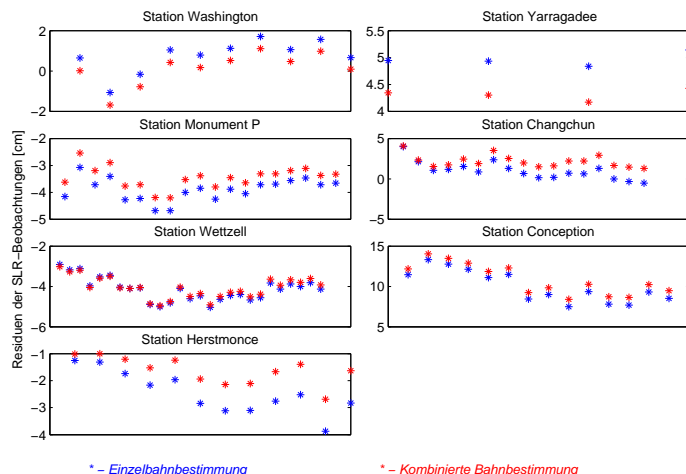


Abbildung 146: Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X pro Beobachtungsstation. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

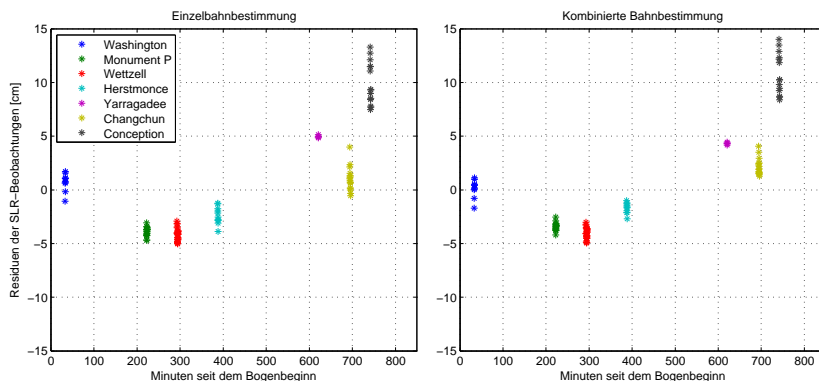


Abbildung 147: Übersicht aller Differenzen der SLR-Residuen zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung für TanDEM-X. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

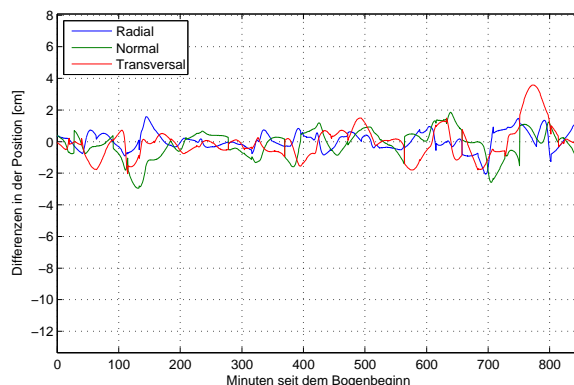


Abbildung 148: Differenzen der Positionen des TanDEM-X zwischen der Einzelbahnbestimmung und kombinierter Bahnbestimmung im satellitenfesten Dreibein. Bahnbogen vom 10.04.2012, 11 Uhr aus der GSOC Auswertung.

Die obige Analyse der vier Untersuchungsbögen zeigt weiter die gute absolute Genauigkeit der GSOC-Bahnen. Dies wird sowohl anhand den teils geringeren SLR-Residuendifferenzen zwischen der Einzelbahnberechnung und der kombinierten Bahnberechnung, als auch anhand der kleineren Positionsdifferenzen bestätigt. Letztere liegen mit durchschnittlich 2 cm um einen Faktor von ca. 2.5 mal niedriger als im Falle der EPOS-OC- und Bernese-Bahnen.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die kombinierte Bahnberechnung keineswegs automatisch zu einer Verschlechterung der absoluten Bahnposition führen kann. Dies wird am Beispiel der GSOC-Bahnen sichtbar. Vielmehr scheint diese Verschlechterung der absoluten Bahnposition software- und demzufolge verfahrensabhängig zu sein. Im Falle der EPOS-OC Auswertung kann eine Verschlechterung der absoluten Bahnposition nach der kombinierten Bahnberechnung als gegeben betrachtet werden.

In der weiter unten folgenden Tabelle 13 mit einer Zusammenfassung aller Globalwerte aus der statistischen Auswertung der SLR-Residuen wird diese Verschlechterung der Genauigkeit noch einmal deutlich. Die Größenordnung, mit der die Genauigkeit der kombinierten Bahnen aus der EPOS-OC Berechnung schlechter ausfällt, liegt hier bei ca. 1 cm. Eine mögliche Ursache hierfür kann in der gemeinsamen Ambiguity-Fixierung im Rahmen der kombinierten Bahnberechnung liegen. So könnte das Fixieren der Ambiguities auf ganzzahlige Werte dazu führen, dass die Fehler in den Phasenzentrumskorrekturen der Antennen der beiden Satelliten sich auf die Bahnen übertragen und so die Satellitenpositionen leicht verschieben.

Diese Genauigkeitsverschlechterung der absoluten Positionen der kombinierten Bahnen führt jedoch nicht zwingenderweise zu einer Verschlechterung der Genauigkeit der Basislinien, da hier die absolute Genauigkeit der Satellitenpositionen eine untergeordnete Rolle spielt, und nur die relative Position der beiden Satelliten zu einander von Bedeutung ist. Wie hoch die Genauigkeit der Basislinien letztendlich ist, wird im kommenden Kapitel 4.5 untersucht.

Tabelle 13: Globalwerte der SLR-Residuen der untersuchten Bahnen.

Bahnberechnung	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
EPOS-OC						
TanDEM-X						
Einzelbahnberechnung	19.60	-1.27	-19.91	4.67	2.44	13252
Kombinierte Bahnberechnung	19.01	-1.82	-19.93	5.86	3.35	13203
TerraSAR-X						
Einzelbahnberechnung	19.99	-1.02	-19.98	4.05	2.30	13278
Kombinierte Bahnberechnung	19.84	-1.57	-19.96	5.87	3.43	13219
Bernese						
TanDEM-X						
Einzelbahnberechnung	18.81	-1.06	-19.15	3.77	2.04	13426
Kombinierte Bahnberechnung	19.00	-1.40	-19.17	4.14	2.25	13364
TerraSAR-X						
Einzelbahnberechnung	19.92	-1.23	-19.29	4.10	2.43	13341
Kombinierte Bahnberechnung	19.92	-1.21	-19.28	4.10	2.46	13268

Bahnberechnung	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
GSOC						
TanDEM-X						
Einzelbahnberechnung	19.89	-1.07	-18.63	3.26	1.65	13577
Kombinierte Bahnberechnung	17.73	-1.12	-19.66	3.19	1.59	13577
TerraSAR-X						
Einzelbahnberechnung	19.86	-0.88	-19.69	3.31	1.82	13513
Kombinierte Bahnberechnung	20.00	-0.88	-19.69	3.31	1.82	13514

4.5 Untersuchung der Genauigkeit der Basislinien

Die Untersuchung der absoluten Positionsgenauigkeit der TanDEM-X und TerraSAR-X Satelliten im vorherigen Kapitel hat die schlechtere Genauigkeit der EPOS-OC-Bahnen aufgezeigt. Nun soll die Genauigkeit der Basislinien zwischen den beiden Satelliten überprüft werden. Da weder TanDEM-X noch TerraSAR-X über präzise Streckenmessgeräte zur Vermessung der Basislinie verfügen, kann leider keine Referenzmessung zur Bestimmung der absoluten Genauigkeit der Basislinie herangezogen werden. Stattdessen werden die Basislinien aus unterschiedlichen Berechnungen von EPOS-OC, Bernese und GSOC miteinander verglichen, um eine relative Genauigkeit der Basislinien im Hinblick auf die jeweils andere Lösung zu bestimmen.

Der Vergleich der Basislinien erfolgt durch eine einfache Differenzbildung der drei Basislinienkomponenten. Hierfür ist die genaue Definition der Basislinie notwendig. Bei der folgenden Untersuchung wird dies durch ein festes Koordinatensystem, das in das Massenzentrum von einem der Satelliten gelegt wird, definiert. Die Achsenausrichtung erfolgt jeweils in die radiale Richtung der Bahn, die Richtung der Bahnnormale und die Flugrichtung dieses Satelliten (transversal). Der dreidimensionale Positionsvektor des anderen Satelliten (gemessen zum Massenmittelpunkt) in diesem Bezugssystem stellt dann die Basislinie dar.

Weiter ist hier zu beachten, dass TanDEM-X und TerraSAR-X ihre Messungen mit Synthetic Aperture Radar durchführen, welches immer seitlich zur Flugrichtung misst, so dass nur die radiale und normale Richtung der Basislinie für spätere Auswertung und Weiterverarbeitung der Messungen, wie beispielsweise bei der Erzeugung eines digitalen Höhenmodells, von Bedeutung ist.

Nach der Bildung der Differenzen der Basislinienkomponenten wird eine statistische Auswertung derselben durchgeführt. Hierfür werden Maximal-, Minimal-, und Mittelwerte, sowie RMS-Werte und Standardabweichungen für jeden Bogen, sowie als Globalwert über den ganzen Zeitraum gebildet. Dabei erfolgt auch eine Filterung der Daten, bei der alle Bögen, deren Standardabweichungen der Basisliniendifferenzen in der radialen und normalen Richtung eine vorgegebene Schranke überschreiten, eliminiert werden. Die Eliminierungsgrenze für die radiale Richtung beträgt 2.2 mm , und für die normale Richtung 2.1 mm . Diese Grenzen stammen aus dem operationellen Modus von TerraSAR-X und TanDEM-X und sind als empirische Grenzwerte im Rahmen einer Auswertung der Basislinien über einen großen Zeitraum ermittelt worden. Es wird dabei die Annahme getroffen, dass nur die Basislinien einwandfrei sind, bei denen die Standardabweichungen der Basisliniendifferenzen in der radialen und normalen Richtung unterhalb dieser Grenzen liegen.

Von dem gesamten Berechnungszeitraum vom 1. März 2012 bis 31 Mai 2012 und 184 Bahnbögen können nach Abzug der 20 Datenlücken (vgl. Kapitel 4.3), sowie des letzten Bogens von dem 31 Mai 2012 23 Uhr, für den leider keine Bernese und GSOC Daten vorlagen, 163 Bahnbögen zur Bildung der Basisliniendifferenzen verwendet werden. Davon bleiben nach der Filterung der Daten im Falle des Vergleichs der EPOS-OC- und Bernese-Basislinien 100 Bahnbögen, im Falle des Vergleichs der EPOS-OC- und GSOC-Basislinien 97 Bahnbögen, und im Falle des Vergleichs der Bernese und GSOC-Basislinien 160 Bahnbögen. Um den Vergleich zu ermöglichen, werden bei der anschließenden statistischen Auswertung der Basisliniendifferenzen nur die gemeinsamen

Bahnbögen betrachtet, die nach der Filterung der Daten in jedem der drei Basislinienvergleiche vorhanden sind. Dies sind insgesamt 96 Bahnbögen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der insgesamt drei durchgeführten Basislinienvergleiche vorgestellt:

- EPOS-OC und Bernese in der Abbildung 149.
- EPOS-OC und GSOC in der Abbildung 150 auf der nächsten Seite.
- Bernese und GSOC in der Abbildung 151 auf der nächsten Seite.

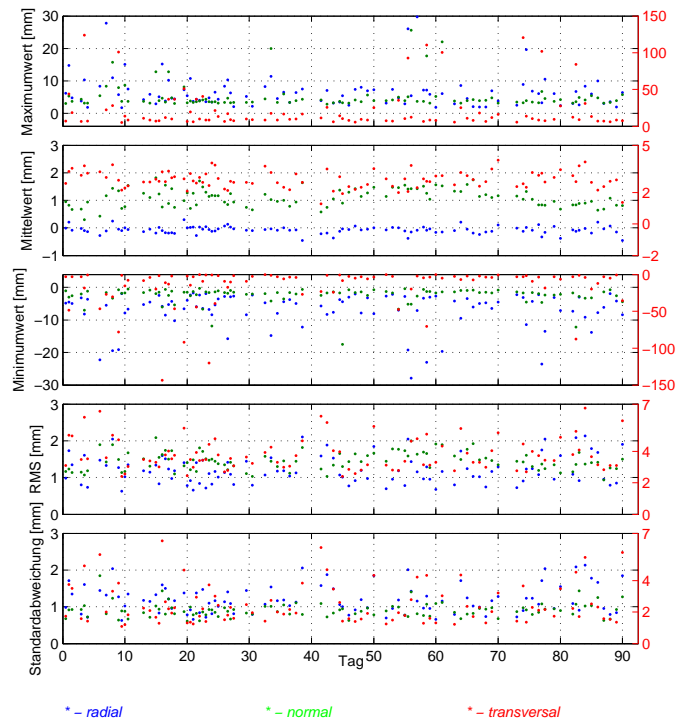


Abbildung 149: Statistische Auswertung der Differenzen der Basislinien von EPOS-OC und Bernese.

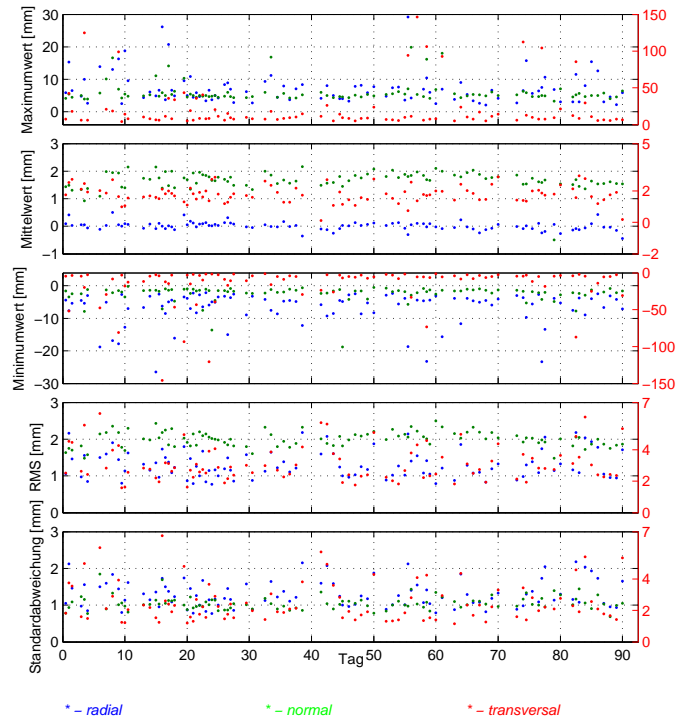


Abbildung 150: Statistische Auswertung der Differenzen der Basislinien von EPOS-OC und GSOC.

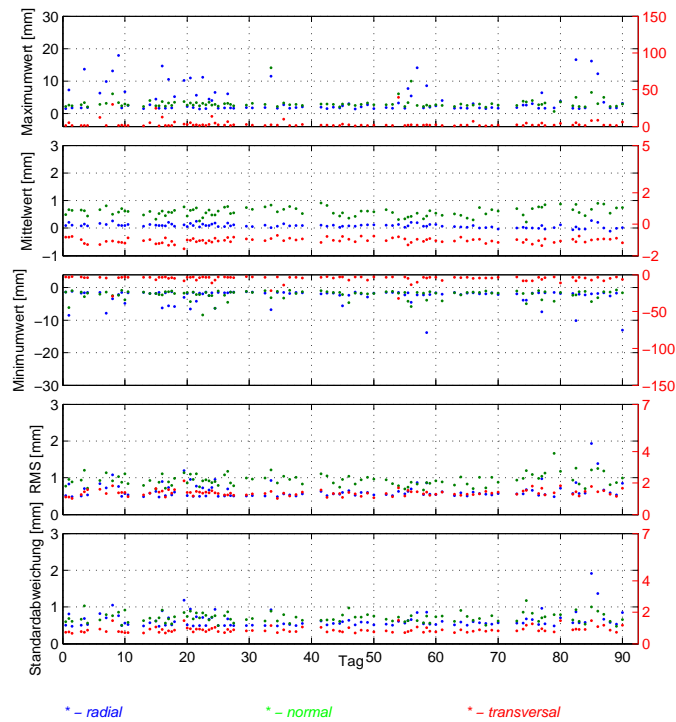


Abbildung 151: Statistische Auswertung der Differenzen der Basislinien von Bernese und GSOC.

Eine Übersicht über die Globalwerte, berechnet aus allen in die obige Statistik einbezogenen Bahnbögen, wird auch in der Tabelle 14 gegeben.

Tabelle 14: Statistische Auswertung der Basisliniendifferenzen über den gesamten Berechnungszeitraum.

Koordinatenachse	Maximumwert [mm]	Mittelwert [mm]	Minimumwert [mm]	RMS [mm]	Standardabweichung [mm]	Anzahl der Differenzen
EPOS-OC - Bernese						
Radial	31.60	-0.07	-53.89	1.27	1.27	96
Normal	25.59	1.10	-35.68	1.47	0.98	96
Transversal	386.00	2.81	-353.65	4.35	3.32	96
EPOS-OC - GSOC						
Radial	43.78	0.01	-48.20	1.36	1.36	96
Normal	19.82	1.67	-35.32	2.01	1.12	96
Transversal	399.66	1.78	-356.52	3.78	3.34	96
Bernese - GSOC						
Radial	17.90	0.08	-13.82	0.68	0.67	96
Normal	14.12	0.57	-8.41	0.96	0.77	96
Transversal	39.46	-1.04	-32.28	1.38	0.92	96

Aus den obigen Ergebnissen folgt, dass die Basisliniendifferenzen zwischen EPOS-OC- und GSOC-Basislinien, sowie zwischen EPOS-OC- und Bernese-Basislinien im Hinblick auf die Standardabweichungen und RMS-Werte in radialer und normaler Richtung groß ausfallen, während die Bernese- und GSOC-Basislinien bei gleicher Betrachtung kleine Differenzen aufweisen. Daraus folgt, dass die GSOC- und Bernese-Basislinien die beste Genauigkeit besitzen, während die Genauigkeit der EPOS-OC-Basislinien im gleichen Vergleich am schlechtesten ausfällt.

Der Grund für das schlechte Abschneiden der EPOS-OC-Basislinien liegt unter anderem in einer unzureichenden Manöverparametrisierung. Diese stellt nur eine grobe Approximation der wahren Bahnänderungen während eines Manövers dar, und kann zu größeren Positionsfehlern in der Bahn in dem entsprechenden Bahnabschnitt führen. Was in Folge die Genauigkeit der Basislinien beeinflussen kann. Diese Manöverparametrisierung in EPOS-OC wird nun im kommenden Kapitel 4.6 ausführlich untersucht.

4.6 Schätzung der Manöverparameter in EPOS-OC

Die Definition des Manövereinflusses auf die Bahn erfolgt in EPOS-OC in der Form einer zusätzlichen Störkraft, die auf einen Satelliten wirkt. Diese wird mit Hilfe von empirischen Beschleunigungen im Programm parametrisiert. Anders als bei der Definition der empirischen Beschleunigungen für die Berücksichtigung der Reststörkräfte (vgl. z.B. Kapitel 4.1), wird hier ein anderes Modell für die Definition derselben verwendet. So erfolgt die Definition der empirischen Beschleunigungen als konstante Geschwindigkeitsinkremente zu einem gegebenen Zeitpunkt in julianischen Tagen seit JD2000 (vgl. Formel 3.24). Diese Geschwindigkeitsinkremente können auch als eine Art Energieimpuls, den der Satellit durch einen Manöver erfährt, aufgefasst werden. Ein Beispiel der programminternen Definition der empirischen Beschleunigungen eines Manövers mit Geschwindigkeitsinkrementen in radialer, transversaler und normaler Richtung ist in der Abbildung 152 auf der nächsten Seite gegeben.

EMPICOE	POR	1	-0.000060000+0.50000000e+044475.563194444
EMPICOE	POT	1	0.029230000+0.50000000e+044475.563194444
EMPICOE	PON	1	0.000440000+0.50000000e+044475.563194444

v
 σ
 t

Abbildung 152: Auszug aus der EPOS-OC Konfigurationsdatei mit der aktuellen Manöverparametrisierung.

Der erste Eintrag “*EMPICOE*” gibt das Codewort an, welches angibt, dass die nachfolgende Angaben eine empirische Beschleunigung definieren. Der zweite Eintrag “*POR*” definiert die Art der empirischen Beschleunigung sowie die Bezugsachse des Satellitendreibens (vgl. Kapitel 4.1): R - radial, T - transversal, N - normal. Der nächste Wert definiert, ob die empirische Beschleunigung im Rahmen der Ausgleichung mitgeschätzt werden soll (Wert = 1), oder als ein fester Parameter festgelegt wird (Wert = 0). Die letzten drei Angaben dienen schließlich der eigentlichen Definition der empirischen Beschleunigung; der erste Eintrag definiert den Betrag des Parameters, in unserem Beispiel das Geschwindigkeitsinkrement des Manövers Δv in m/s , der zweite Eintrag legt das a priori σ fest, und der dritte Eintrag gibt den Zeitpunkt der empirischen Beschleunigung in julianischen Tagen seit JD2000 an. Das a priori σ beschreibt hierbei eine mögliche statistische Abweichung zwischen dem neu geschätzten Wert und dem Eingangswert der empirischen Beschleunigung Δv . In unserem Beispiel werden die empirischen Beschleunigungen durch die sehr großen a priori σ von $0.5 \cdot 10^4$ nahezu freigelassen.

Es werden somit für die Manöverparametrisierung in erster Linie die Daten über den Energieimpuls des Satelliten in Form von Geschwindigkeitänderungen, sowie den genauen Zeitpunkt des Manövers benötigt. Ferner spielt auch die Länge des Manövers eine nicht vernachlässigbare Rolle. So werden in der Regel für längere Manöver mehrere empirische Beschleunigungen definiert, um die durch das Manöver verursachte Störkraft besser approximieren zu können. Alle drei Angaben werden von GSOC in einem Katalog mit geplanten Manöverzeitpunkten, Manöverlängen und den Geschwindigkeitsinkrementen, die der Satellit erfahren soll, geliefert. Die Geschwindigkeitsinkremente der Manöver werden dabei durch eine Ausgleichung bestimmt, und weisen Standardabweichungen von weniger als $0.1 mm/s$ auf. Da die eventuellen Fehler im Rahmen der Ausgleichung sich jedoch teilweise auch auf andere Parameter verteilen, kann an dieser Stelle leider keine genaue Aussage über die endgültige Genauigkeit der Geschwindigkeitsinkremente getroffen werden. Die Erzeugung der einzelnen Manöver der beiden Satelliten findet dabei durch einen kontinuierlichen Schub über die gesamte Brenndauer statt.

Eine Standardparametrisierung der Manöver in EPOS-OC sieht eine einfache Definition der empirischen Beschleunigungen vor, wie es beispielsweise in der Abbildung 153 vorgestellt wird.

EMPICOE	POR	1	-0.000060000	99999.0	4475.562995185
EMPICOE	POT	1	0.029230000	99999.0	4475.562995185
EMPICOE	PON	1	0.000440000	99999.0	4475.562995185

Abbildung 153: Auszug aus der EPOS-OC Konfigurationsdatei mit der Standard Manöverparametrisierung.

Als Eingabewerte werden hier die Geschwindigkeitsinkremente und der Manöverzeitpunkt aus den GSOC Manöverdaten verwendet, und die Länge des Manövers wird nicht berücksichtigt. Jede empirische Beschleunigung wird durch ein sehr großes a priori σ freigelassen. Dies stellt nicht die aktuelle Manöverparametrisierung in EPOS-OC dar, welche sich durch mehrere verteilte empirische Beschleunigungen charakterisiert. Um jedoch die generelle Notwendigkeit einer zusätzlichen Manöverparametrisierung zu verdeutlichen, wird zuerst ein Test mit dieser Standardparametrisierung durchgeführt.

Für den folgenden und alle weiteren Testdurchläufe werden aus dem Berechnungszeitraum vom 1. März 2012 bis 31 Mai 2012 alle Bahnbögen selektiert, die Manöver enthalten, so dass ausschließlich nur diese Bahnbögen weiter untersucht werden. Auf diese Weise wird ein besserer

Vergleich zwischen verschiedenen Testdurchläufen ermöglicht. Im Falle vom TanDEM-X beläuft sich die Anzahl der Bahnbögen in dem entsprechenden Berechnungszeitraum auf 118, während TerraSAR-X 38 Bahnbögen mit Manövern im gleichen Zeitraum aufweist. Da jedoch alle TerraSAR-X Manöver zeitnah mit denen von TanDEM-X stattfinden, beläuft sich der Testumfang auf gesamt 118 Bahnbögen.

Zu den wesentlichen Kriterien der Untersuchung zählt die Anzahl der erfolgreich berechneten Bahnbögen. Eine erfolgreiche automatische Bahnprozessierung ist ein wesentlicher Faktor im operationellen Betrieb. Eine möglichst geringe Ausfallquote ist die primäre Zielsetzung an dieser Stelle. Insbesondere eine unzureichende oder fehlerhafte Manöverparametrisierung kann zu Problemen und Ausfällen während der Bahnbestimmung führen.

Der nächste wichtige Punkt der Untersuchung ist die erreichte Genauigkeit der Basislinien. Diese wird aufgrund des fehlenden Referenzvergleichs anhand der Vergleiche mit anderen Programmlösungen, explizit Bernese und GSOC, ähnlich den Berechnungen im Kapitel 4.5 ermittelt.

Wie bereits oben angedeutet, wird als erstes ein Test mit der Standard-Manöverparametrisierung durchgeführt. Hierbei werden die ausgesuchten 118 Bahnbögen mit der entsprechenden Manöverparametrisierung neu berechnet. Diese erste Berechnung verläuft jedoch bei rund 20 Bahnbögen fehlerhaft, was einer Fehlerquote von ca. 16,9% entspricht.

Nach der Bildung der Basisliniendifferenzen mit Bernese- und GSOC-Basislinien und Filterung der Daten, bleiben im Falle des Vergleichs mit Bernese insgesamt nur 4 Bahnbögen, im Falle des Vergleichs mit GSOC 3 Bahnbögen. Eine weitere statistische Untersuchung der Basisliniendifferenzen erübringt sich somit an dieser Stelle, aufgrund der geringen Stichprobenanzahl.

Diese erste Untersuchung verdeutlicht die Notwendigkeit einer zusätzlichen Manöverparametrisierung, da sowohl die Fehlerquote in der Bahnberechnung, als auch die Qualität der Basislinien einen stabilen Einsatz im operationellen Betrieb unmöglich machen.

Bei der nächsten Untersuchung wird die aktuelle Manöverparametrisierung der EPOS-OC näher betrachtet. Die Anzahl der Bögen, bei denen die Berechnung mit der aktuellen Manöverparametrisierung fehlschlägt, beläuft sich dabei auf insgesamt 18 Bahnbögen. Die daraus folgende Fehlerquote von ca. 15,3% ist zwar nicht wesentlich kleiner als dieselbe bei der Berechnung mit der Standard-Manöverparametrisierung, bei der anschließenden Berechnung der Basisliniendifferenzen bleiben jedoch nach der Filterung der Daten im Falle des Vergleichs mit Bernese-Basislinien 41 Bahnbögen, und im Falle des Vergleichs mit GSOC-Basislinien 38 Bahnbögen. Davon sind insgesamt 37 Bahnbögen in beiden Vergleichen verfügbar.

Ausgehend von diesen gemeinsamen 37 Bahnbögen wird eine weitere statistische Auswertung der Basisliniendifferenzen durchgeführt. Um den Einfluss der Manöver auf die Basisliniendifferenzen gezielt zu untersuchen, werden diesmal nur die Basisliniendifferenzen in dem unmittelbaren Bereich von -5 bis +5 Minuten um die Manöver untersucht. Dafür wird dieser Untersuchungsbereich insgesamt 21 Klassen mit einer Klassenbreite von 30 Sekunden aufgeteilt:

$$class_i =]t_{Manoever} - (315 s - 30 s \cdot n_i); t_{Manoever} - (315 s - 30 s \cdot (n_i + 1))], \quad (4.2)$$

mit $n_i = 0, 1, 2, \dots, 20$, $i = 1, 2, 3, \dots, 21$ und $t_{Manoever}$ - Zeitpunkt eines Manövers.

Jede Klasse erhält dabei von allen Bahnbögen die Basisliniendifferenzen, die in dem entsprechenden zeitlichen Bereich um einen Manöver liegen. Anschließend wird für jede Klasse die Standardabweichung und der RMS-Wert der Basisliniendifferenzen berechnet. Aus der Auswertung aller 21 Klassen ergibt sich schließlich eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf der Standardabweichungen und RMS-Werte der Basisliniendifferenzen im Bereich um einen Manöver. Die Ergebnisse dieser Auswertung werden in folgenden Abbildungen zusammen gefasst:

1. Basislinienvergleich zwischen EPOS-OC und Bernese in der Abbildung 154 auf der nächsten Seite.
2. Basislinienvergleich zwischen EPOS-OC und GSOC in der Abbildung 155 auf der nächsten Seite.
3. Basislinienvergleich zwischen Bernese und GSOC in der Abbildung 156 auf der nächsten Seite.

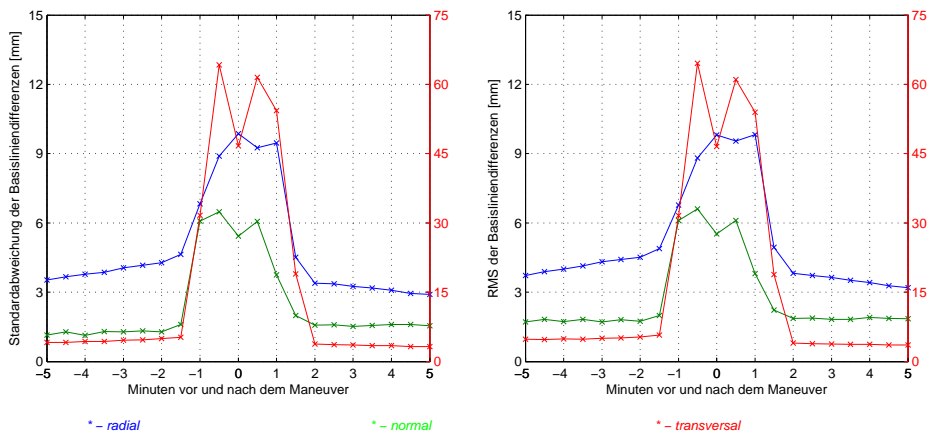


Abbildung 154: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und Bernese.

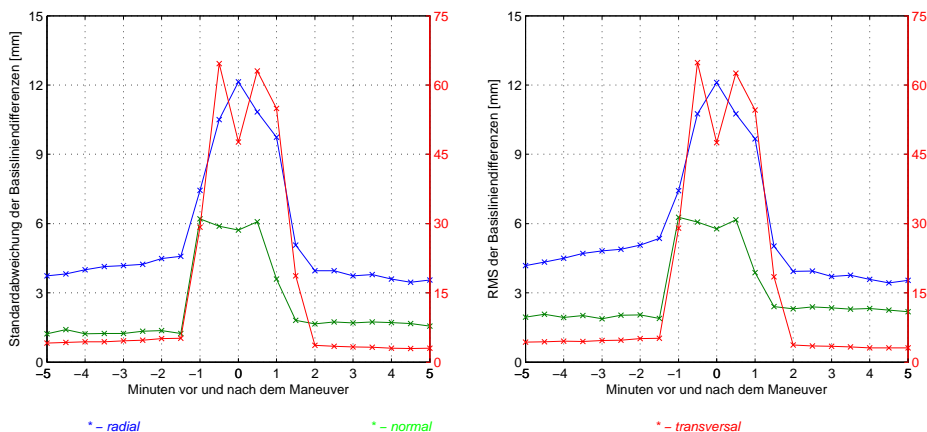


Abbildung 155: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und GSOC.

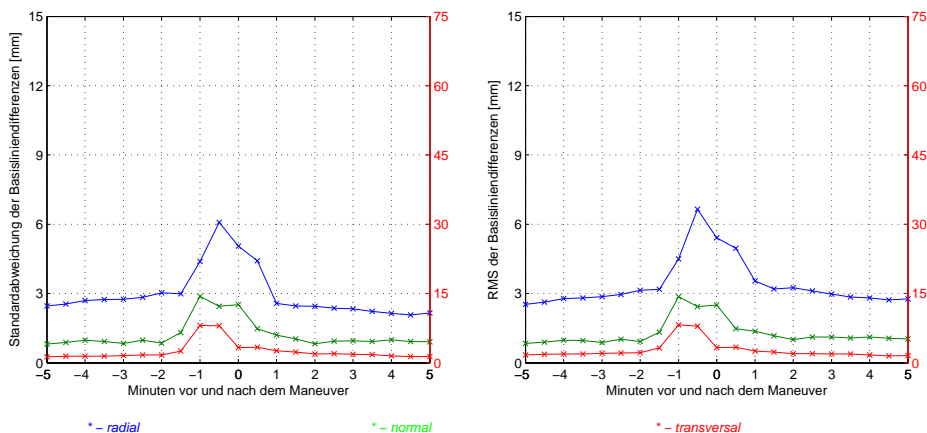


Abbildung 156: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich Bernese und GSOC.

In den obigen Ergebnissen wird der Einfluss der Manöver durch steigende Basisliniendifferenzen im unmittelbaren Manöverbereich deutlich sichtbar. Insbesondere die Ergebnisse aus den Vergleichen mit EPOS-OC Basislinien weisen steil steigende Werte aus. Im Gegensatz hierzu stehen die Ergebnisse aus dem Vergleich der Bernese- und GSOC-Basislinien. Obwohl auch hier der Einfluss der Manöver auf die Genauigkeit der Basislinien deutlich wird, fällt dieser vergleichsweise geringer aus. Nach wie vor muss aber auch hier bedacht werden, dass alle Untersuchungen der Basisliniendifferenzen verschiedener Lösungen in erster Linie nur Aussagen über die rein relative Genauigkeit der Basislinien beinhalten. Jedoch in Anbetracht der Untersuchungen der absoluten Genauigkeit der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen (vgl. Kapitel 4.4.2) und der Annahme dass die Wahrscheinlichkeit dessen, dass zwei unabhängige Lösungen gleich genau gut sind, statt gleich genau schlecht sind, höher ist, liegt die Schlussfolgerung nahe, dass EPOS-OC Basislinien über eine geringere Genauigkeit verfügen, als die Basislinien der beiden anderen Lösungen.

Unabhängig von den Unsicherheiten bei der Einschätzung der Genauigkeit der Basislinien, abgeleitet aus den Ergebnissen eines relativen Basislinienvergleichs, lässt sich jedoch mit Sicherheit sagen, dass die Manöver eines Satelliten einen nachweislichen Einfluss auf die spätere Genauigkeit der Basislinien besitzen.

Um diesen Einfluss weiter zu untersuchen, werden im nächsten Test 5 Bahnbögen ausgesucht, und deren Basisliniendifferenzen näher betrachtet. Damit für diesen Test eine mögliche repräsentative Stichprobe ausgewählt wird, werden zuerst alle betroffenen 118 Bahnbögen anhand der enthaltenen Manöver klassifiziert. Die Klassifizierung erfolgt dabei sowohl nach der Anzahl enthaltenen Manöver, als auch nach deren Manöverlänge und wird in der Tabelle 15 dargestellt.

In der letzten Tabellenspalte wird zugleich die Anzahl der fehlerhaften Bahnbögen in der Berechnung mit der aktuellen Manöverparametrisierung dargestellt. Diese zeigt keine bestimmten Manöverkonfigurationen auf, die besonders fehleranfällig sind, stattdessen ziehen sich die Fehler durch alle größeren Klassen (gemessen an der Bögenanzahl in der Klasse) hindurch. Wobei der Schwerpunkt insbesondere bei den Bahnbögen mit etwas größeren (Klassen 4 und 8) und kleineren (Klasse 2) Manövern liegt.

Tabelle 15: Klassifizierung der Bahnbögen mit Manövern.

Klassennummer	Anzahl der enthaltenen Manöver	Manöverlänge [s]	Bögenanzahl	Fehlerquote (Anzahl der fehlerhaften Bögen)
1	1	beliebig	5 (4.24%)	1
2	2	< 60	26 (22.03%)	4
3	2	60 – 120	36 (30.51%)	
4	2	120 – 180	36 (30.51%)	8
5	2	> 180	2 (1.69%)	
6	3	beliebig	1 (0.85%)	
7	4	2 mit je < 60 Sekunden Länge, 2 mit je 60 – 120 Sekunden Länge	2 (1.69%)	
8	4	2 mit je < 60 Sekunden Länge, 2 mit je > 120 Sekunden Länge	8 (6.78%)	4
9	4	> 60	1 (0.85%)	1
10	>4	beliebig	1 (0.85%)	
				$\Sigma = 18$

Ausgehend von dieser Klassifizierung werden für den nächsten Test zwei Bahnbögen aus jeweils zwei großen Klassen, sowie drei weitere aus Klassen mit einer vergleichsweise schwierigeren Manöverkonfiguration, wie beispielsweise überlange Manöver, ausgesucht:

1. Bahnbogen vom 30.04.2012, 23 Uhr mit zwei Manövern mit je ca. 14 und 11 Sekunden Länge (Klasse 2).
2. Bahnbogen vom 19.04.2012, 11 Uhr mit zwei Manövern mit je ca. 130 und 133 Sekunden Länge (Klasse 4).
3. Bahnbogen vom 02.04.2012, 23 Uhr mit vier Manövern mit je ca. 13, 18, 145 und 147 Sekunden Länge (Klasse 8).
4. Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr mit fünf kleinen Manövern mit je ca. 12, 16, 20, 20 und 39 Sekunden Länge, sowie einem langen Manövern mit ca. 153 Sekunden Länge (Klasse 10).
5. Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr mit zwei langen Manövern mit je ca. 203 und 217 Sekunden Länge (Klasse 5).

Die ersten beiden Bahnbögen spiegeln eine typische Konfiguration mit entweder wenigen kleinen oder wenigen mittelgroßen Manövern wieder. Der dritte Bahnbogen mit jeweils zwei kleinen und zwei mittelgroßen Manövern, der vierte Bahnbogen mit fünf sehr kleinen Manövern, sowie der fünfte Bahnbogen mit zwei überdurchschnittlich langen Manövern repräsentieren hingegen etwas seltenere Konfigurationen, die jedoch besonders kritisch für eine Manöverparametrisierung sind, und dementsprechend schwieriger zu schätzen sind.

Die Ergebnisse der Auswertung werden in weiter folgenden Abbildungen dargestellt:

1. Bahnbogen vom 30.04.2012, 23 Uhr in der Abbildung 157 auf der nächsten Seite.
2. Bahnbogen vom 19.04.2012, 11 Uhr in der Abbildung 158 auf der nächsten Seite.
3. Bahnbogen vom 02.04.2012, 23 Uhr in der Abbildung 159 auf Seite 114.
4. Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr in der Abbildung 160 auf Seite 114.
5. Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr in der Abbildung 161 auf Seite 115.

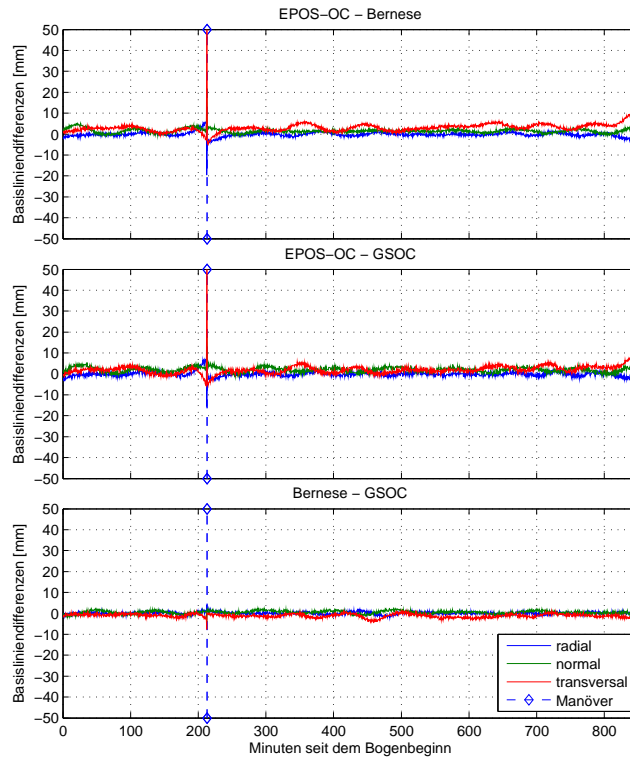


Abbildung 157: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 30.04.2012, 23 Uhr.

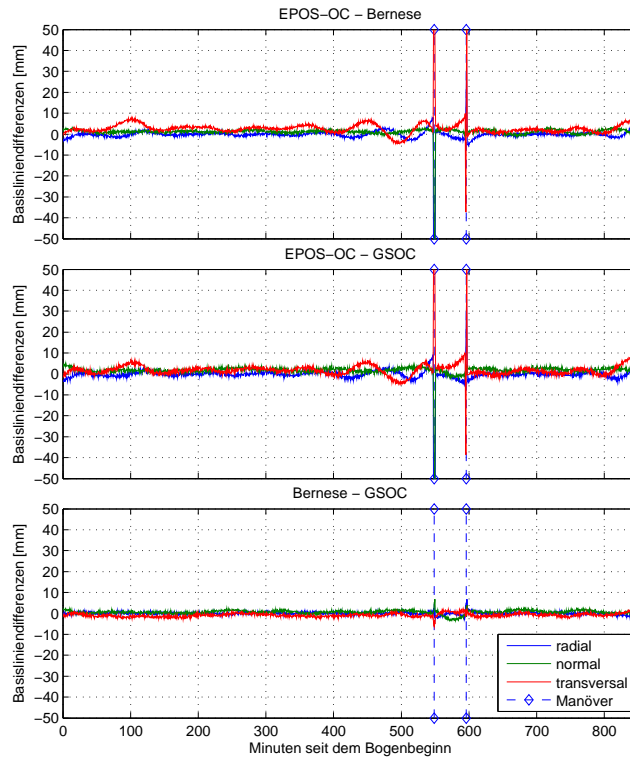


Abbildung 158: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 19.04.2012, 11 Uhr.

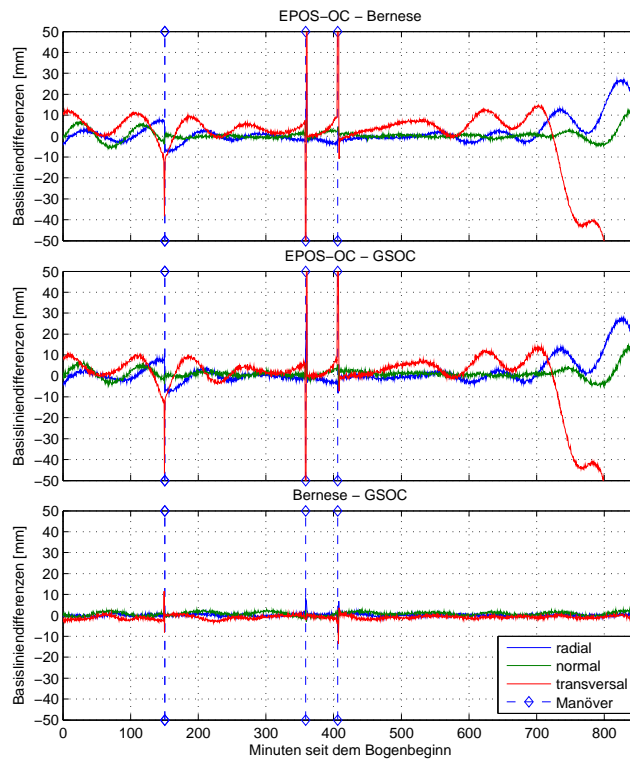


Abbildung 159: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 02.04.2012, 23 Uhr.

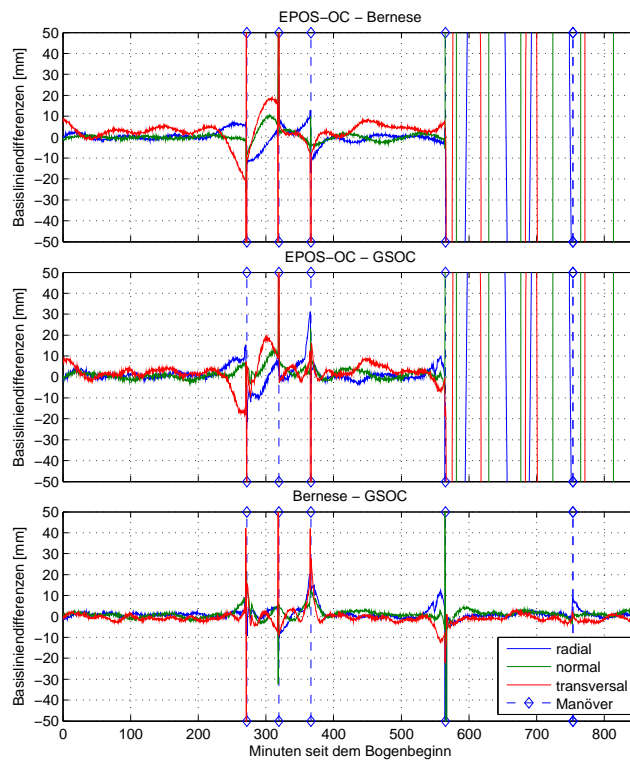


Abbildung 160: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr.

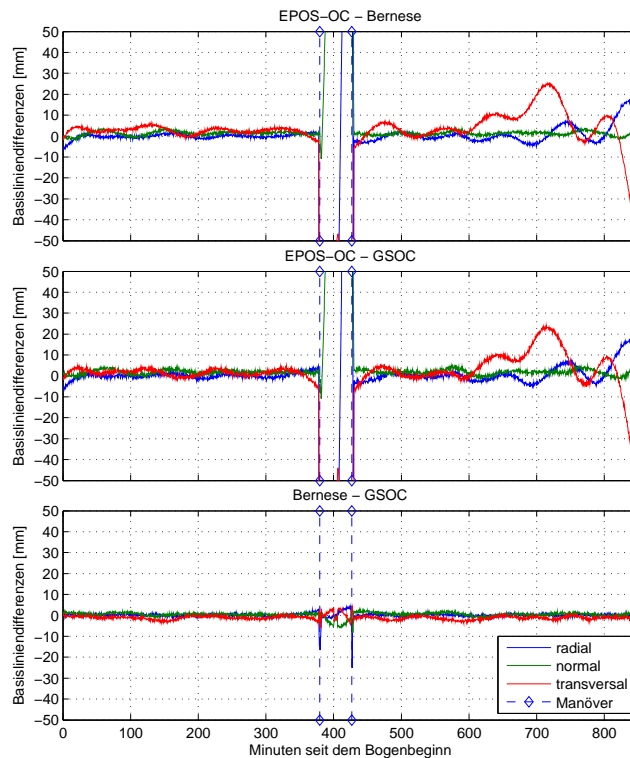


Abbildung 161: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr.

Bei der Betrachtung der obigen Ergebnisse fallen zwei wesentliche Merkmale in Bezug auf die Basislinienvergleiche mit EPOS-OC auf. Als erstes sind die starken Abweichungen in den Basisliniendifferenzen in dem unmittelbaren Bereich um ein Manöver, sowie geringere bis sehr starke (vgl. Abbildung 161) Schwingungen in dem größeren Bereich um ein Manöver herum auffällig. Des Weiteren fallen auch die stärkeren Schwingungen in den Basisliniendifferenzen gegen den Anfang oder das Ende eines Bogens (vgl. Abbildungen 159 - 161) auf. Dies lässt die Schlussfolgerung nahe, dass der Einfluss der Manöver sich nicht einzig auf den Bahnabschnitt im unmittelbaren Bereich um ein Manöver beschränkt, sondern auch die komplette Bahn betreffen kann. Insbesondere an dem Beispiel in der Abbildung 160 wird das Letztere deutlich. Da die Bahn kontinuierlich integriert wird, erfolgt eine Fortpflanzung und Aufsummierung aller Fehler, die durch Manöver verursacht werden. Dies kann entweder zu Instabilitäten in der Lösung der Bahn führen, die an den starken Schwingungen gegen das Ende der Bahn zu erkennen sind (vgl. z. B. Abbildung 159), oder zu einem Fehler in der Ambiguity-Fixierung und in Folge dessen zu einer grob abweichenden Bahn führen, wie es bei der Bahn in der Abbildung 160 der Fall ist.

Wie zu erwarten, beinhalten die drei letzten Bahnbögen die größten Abweichungen in den Basisliniendifferenzen in Bezug auf die Basislinienvergleiche mit EPOS-OC. Die Ergebnisse des Basislinienvergleichs zwischen den Bernese- und GSOC-Basislinien weisen hingegen bis auf den Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr (vgl. Abbildung 160) nur kleine Abweichungen auf.

Alle bislang vorgestellten Ergebnisse unterstreichen die Notwendigkeit einer neuer Manöverparametrisierung in EPOS-OC. Die Entwicklung des Konzepts einer neuen Manöverparametrisierung wird der Gegenstand des kommenden Kapitels 4.6.1 sein.

4.6.1 Entwicklung einer neuen Manöverparametrisierung

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, weist die aktuelle Manöverparametrisierung Defizite bei allen gängigen Manöverkonfigurationen auf, und bedarf einer grundlegenden Überarbeitung. Das Hauptziel der neuen Manöverparametrisierung sieht sowohl die Verbesserung der Bahnschätzung im Allgemeinen, als auch die Erhöhung der Ausfallsicherheit während der Bahnberechnung vor.

Insbesondere letzteres ist von einer enormen Wichtigkeit für einen möglichen reibungslosen operationellen Betrieb.

Da die Manöverparametrisierung in EPOS-OC grundsätzlich in der Form von zusätzlichen empirischen Beschleunigungen erfolgt, muss das neue Konzept auch auf speziell dafür definierten und auf einem bestimmten zeitlichen Raster platzierten empirischen Beschleunigungen basieren. Als Grundlage dafür dienen die Daten über die Manöverplanung in Form von Geschwindigkeitsinkrementen, Manöverlänge und dem Manöverstartpunkt, die von GSOC geliefert werden.

Bei der Entwicklung eines neuen Konzeptes der Manöverparametrisierung wird grundsätzlich zwischen drei verschiedenen Szenarien unterschieden, die als Grundlage unterschiedliche Manöverlängen besitzen. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass auch die unterschiedlichen Manöverkonfigurationen berücksichtigt werden. Bei der Definition der zeitlichen Punkte der empirischen Beschleunigungen muss zusätzlich die Integrationsschrittweite der Bahnbestimmung in EPOS-OC berücksichtigt werden. Da diese meistens 30 Sekunden beträgt, ist ein zeitliches Raster von 30 Sekunden sinnvoll.

Anhand der oben genannten Kriterien wird eine neue Manöverparametrisierung definiert. Diese wird in der Abbildung 162 auf Seite 118 vorgestellt. Die schwarzen Rechtecke stellen dabei jeweils ein Manöver dar, während die roten Linien dessen Approximation skizzieren, die durch die jeweilige Manöverparametrisierung erreicht wird. Es ergeben sich somit die drei folgende Szenarien:

a) Hier werden alle Manöver mit einer Länge von mindestens 60 Sekunden behandelt (vgl. Abbildung 162 a)). Bei der Parametrisierung wird zwischen empirischen Beschleunigungen innerhalb des Manövers, sowie vor und nach dem Manöver unterschieden.

Der erste Koeffizient P_1 und der letzte Koeffizient P_n innerhalb des Manövers werden jeweils exakt 15 Sekunden nach dem Anfang bzw. vor dem Ende des Manövers platziert. Der Abstand zwischen diesen beiden Koeffizienten P_1 und P_n wird dann gleichmässig auf die restliche innere Koeffiziente so verteilt, dass der Abstand zwischen zwei benachbarten Koeffizienten mindestens 30 Sekunden beträgt. Es wird dabei die Annahme getroffen, dass der Energieimpuls des Manövers sich konstant über die gesamte Manöverlänge auswirkt. Um dies zu berücksichtigen, wird der Energieimpuls über alle Koeffizienten $P_1 - P_n$ innerhalb des Manövers gleichmässig verteilt. Weiter werden diese empirischen Beschleunigungen mit einem kleinen a priori σ von 10^{-5} gefesselt, um zu gewährleisten, dass die vorhandene Störkraft in der erwarteten Größenordnung geschätzt wird.

Der erste vorhergehende Koeffizient P_{V1} , sowie der erste nachfolgende Koeffizient P_{N1} werden mit einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden zu dem jeweiligen ersten bzw. letzten Koeffizienten innerhalb des Manövers platziert. Diese werden mit einem a priori Wert = 0 geschätzt, da hier keine Störkraft durch das Manöver vorliegt, und somit der Erwartungswert einer möglichen Bahnstörung gleich Null ist. Diese beiden Koeffizienten werden jedoch mit einem a priori σ von 10^{-2} nahezu freigelassen. Dies ist notwendig um starke Sprünge innerhalb der Bahn zu vermeiden, die entstehen können, wenn zwei benachbarte empirische Beschleunigungen auf a priori Werte mit einer größeren Differenz dazwischen fixiert werden, was letztendlich zu Problemen in der Bahnintegration führen könnte. Gleichzeitig werden dadurch auch mögliche Reststörungen in der Bahn kurz vor und nach dem Manöver berücksichtigt und der Bahnverlauf etwas geglättet.

Die zwei letzten Koeffizienten P_{V2} und P_{N2} werden mit einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden zu dem jeweiligen ersten vorhergehenden bzw. nachfolgenden Koeffizienten platziert. Die beiden empirischen Beschleunigungen werden ebenfalls mit einem a priori Wert = 0 geschätzt. Anders als bei dem ersten vorhergehenden und dem ersten nachfolgenden Koeffizienten werden diese jedoch mit einem a priori σ von 10^{-6} stark gefesselt, um dadurch zu gewährleisten, dass die durch das Manöver verursachte Bahnstörung langsam komplett abschwingt und sich nicht weiter auf die restliche Bahn auswirkt.

Durch die obige Manöverparametrisierung wird eine gewisse Glättung bei der Approximation der durch ein Manöver entstehenden Störkraft erreicht, die notwendig ist, um mögliche starke Schwingungen in der Bahnlösung während der Bahnintegration zu vermeiden und so das Gesamtergebnis und die Ausfallsicherheit stabil zu halten. So sorgt insbesondere die Wahl der Position des ersten und des letzten Koeffizienten innerhalb des Manövers mit jeweils 15 Sekunden Abstand zu den Manövergrenzen für eine optimale Glättung von diesen.

b) Das zweite Szenario behandelt alle Manöver mit einer Länge von 30 bis 59 Sekunden (vgl. Abbildung 162 b)). Um auch hier eine gewisse Bahnglättung gewährleisten zu können, werden

alle inneren Koeffizienten so gelegt, dass sie einen Mindestabstand von 15 Sekunden zu den Manövergrenzen einhalten. Dadurch beträgt der mögliche Zeitraum für die Festlegung der inneren Koeffizienten jedoch nur noch maximal 29 Sekunden. Im Hinblick auf die weitere Beschränkung mit dem Mindestabstand von 30 Sekunden zwischen zwei empirischen Beschleunigungen, kann in diesem Szenario nur ein einziger Koeffizient P_M der empirischen Beschleunigungen innerhalb des Manövers definiert werden. Dieser wird in die Mitte des Manövers gelegt, und erhält als a priori Wert den Gesamtimpuls des Manövers, sowie wird mit einem a priori σ von 10^{-5} gefesselt.

Die Definition des ersten vorhergehenden Koeffizienten P_{V1} erfolgt in einem zeitlichen Abstand von genau 15 Sekunden vor dem Manöveranfang. Die sich daraus ergebende Schrittweite zwischen dem ersten vorhergehenden Koeffizienten P_{V1} und dem Koeffizienten innerhalb des Manövers P_M kann auf diese Weise zwar leicht die vorgegebene Rasterschrittweite von 30 Sekunden überschreiten, die Notwendigkeit der Glättung der Manövergrenzen aus den bereits oben genannten Gründen wiegt jedoch an dieser Stelle stärker. Im Gegensatz dazu erfolgt die Definition des ersten nachfolgenden Koeffizienten P_{N1} exakt 30 Sekunden nach dem Koeffizienten P_M , um ein mögliches schnelles Abschwingen der Störkraft nach dem Manöver zu erreichen. Die a priori Werte und a priori σ der beiden Koeffizienten P_{V1} und P_{N1} entsprechen exakt den Werten aus dem Szenario a).

Die beiden letzten Koeffizienten P_{V2} und P_{N2} werden analog dem Szenario a) mit einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden zu dem jeweiligen Koeffizienten P_{V1} und P_{N1} definiert. Auch hier entsprechen die a priori Werte und a priori σ den Werten aus dem Szenario a).

c) Das letzte Szenario behandelt alle kleinen Manöver mit einer Länge unter 30 Sekunden. Dieses Szenario ähnelt sehr stark dem Szenario b), mit dem einzigen Unterschied, dass auch der erste vorhergehende Koeffizient P_{V1} in einem zeitlichen Abstand von 30 Sekunden vor dem Koeffizienten innerhalb des Manövers P_M gesetzt wird. Dies ist notwendig, da andernfalls die Vorgabe eines 30 Sekunden Rasters bei der Festlegung der empirischen Beschleunigungen, aufgrund der geringen Manöverlänge in diesem Szenario, nicht erfüllt werden kann.

Schließlich werden die a priori Werte und a priori σ der Koeffizienten in diesem Szenario entsprechend dem Szenario b) definiert.

Bei der zeitlichen Definition der empirischen Beschleunigungen in allen Szenarien wird außerdem darauf geachtet, dass sich diese nicht mit den 6-minütigen empirischen Beschleunigungen, die als Ersatz für das atmosphärische Modell in der kombinierten Bahnberechnung dienen (vgl. Kapitel 4.3), überschneiden, da dies ansonsten zu Konflikten in der Berechnung führen könnte. Um dies zu verhindern, werden im Falle einer Überschneidung die betroffenen empirischen Beschleunigungen aus der Manöverparametrisierung auf der Zeitachse um 2 Sekunden verschoben.

Zum Schluss wird noch eine Übersicht aller empirischen Beschleunigungen und deren Eigenschaften in der Tabelle 16 auf Seite 119 vorgestellt.

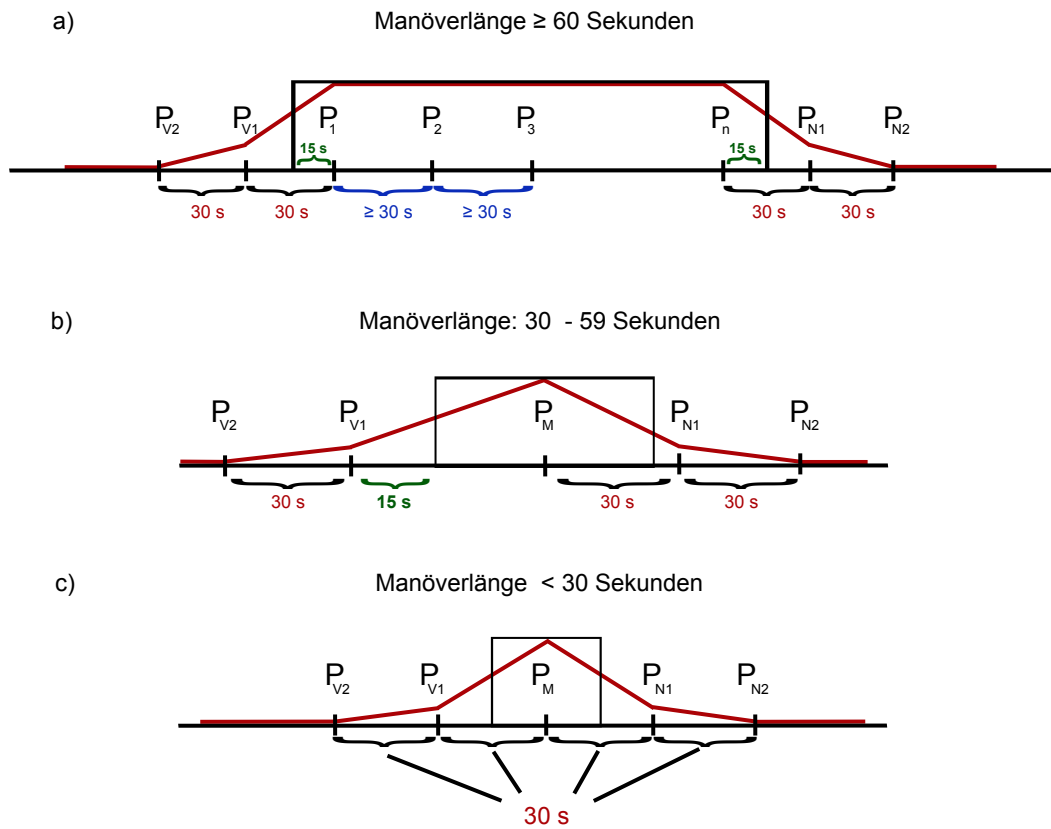


Abbildung 162: Neue Manöverparametrisierung in EPOS-OC.

Tabelle 16: Übersicht aller empirischen Beschleunigungen der neuen Manöverparametrisierung. Die Reihenfolge der Koeffizienten ist chronologisch.

Parametertyp	Anzahl der Parameter	Parameterposition	Parameter Wert	Parameter σ
Szenario a)				
Vorhergehende Parameter	2	P_{V2} : 30 s vor P_{V1} . P_{V1} : 30 s vor P_1 .	0	P_{V2} : 10^{-6} P_{V1} : 10^{-2}
Parameter während des Manövers	≤ 2	P_1 : 15 s nach dem Manöveranfang. P_n : 15 s vor dem Manöverende. $P_2 \dots P_{n-1}$: zwischen P_1 und P_n mit ≥ 30 s Abstand zu einander.	$\frac{1}{n} \cdot GSOC$	10^{-5}
Nachfolgende Parameter	2	P_{N1} : 30 s nach P_n . P_{N2} : 30 s nach P_{N1} .	0	P_{N1} : 10^{-2} P_{N2} : 10^{-6}
Szenario b)				
Vorhergehende Parameter	2	P_{V2} : 30 s vor P_{V1} . P_{V1} : 15 s vor dem Beginn des Manövers.	0	P_{V2} : 10^{-6} P_{V1} : 10^{-2}
Parameter während des Manövers	1	Mitte des Manövers	GSOC	10^{-5}
Nachfolgende Parameter	2	P_{N1} : 30 s nach P_M . P_{N2} : 30 s nach P_{N1} .	0	P_{N1} : 10^{-2} P_{N2} : 10^{-6}
Szenario c)				
Vorhergehende Parameter	2	P_{V2} : 30 s vor P_{V1} . P_{V1} : 30 s vor P_M .	0	P_{V2} : 10^{-6} P_{V1} : 10^{-2}
Parameter während des Manövers	1	Mitte des Manövers	GSOC	10^{-5}
Nachfolgende Parameter	2	P_{N1} : 30 s nach P_M . P_{N2} : 30 s nach P_{N1} .	0	P_{N1} : 10^{-2} P_{N2} : 10^{-6}

Der UNIX-Script mit der Implementierung der neuen Manöverparametrisierung kann im Anhang am Ende dieser Arbeit eingesehen werden.

In den kommenden zwei Kapiteln werden nun die Ergebnisse aus der Berechnung mit der neuen Manöverparametrisierung vorgestellt. Dabei wird der Schwerpunkt auf zwei Bereiche gelegt, die Stabilität der Berechnung, die sich durch die Anzahl der erfolgreich berechneten Bahnbögen charakterisiert, sowie die Genauigkeit der Berechnung, die durch die Genauigkeit der Basislinienberechnung wiederspiegelt wird.

4.6.2 Untersuchung der Stabilität der neuen Manöverparametrisierung

Als erstes wird die Stabilität der neuen Manöverparametrisierung untersucht. Dabei wird eine erneute Bahnberechnung der 118 Bahnbögen mit Manövern mit der neuen Manöverparametrisierung durchgeführt. Die Anzahl der Bahnbögen, bei denen diese Berechnung fehlschlägt, beläuft sich diesmal auf insgesamt 4 Bahnbögen, was einer Fehlerquote von 3,4% entspricht. Nach der Bildung der Basisliniendifferenzen und Filterung der Ergebnisse, bleiben im Falle des Vergleichs mit Bernese Basislinien 72 Bahnbögen, und im Falle des Vergleichs mit GSOC Basislinien 69 Bahnbögen übrig. Um einen besseren Vergleich mit den Ergebnissen vorheriger Auswertungen zu bekommen, werden die Ergebnisse aller Auswertungen in der Tabelle 17 auf der nächsten Seite zusammengefasst.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse aller Berechnungen.

Manöver- parametri- sierung	Fehlerquote in der Berechnung	Anzahl der Bahnbögen nach der Filterung der Basisliniendifferenzen Vergleich mit:		Gesamtanzahl der untersuchten Bahnbögen
		Bernese	GSOC	
Standard	16,9%	4	3	118
Aktuell	15,3%	41	38	118
Neu	3,4%	72	69	118

Aus den obigen Ergebnissen folgt eine signifikante Verbesserung der Bahnbestimmung mit der neuen Manöverparametrisierung. Insbesondere die deutlich niedrigere Fehlerquote in der Berechnung bringt eine höhere Stabilität für den operationellen Modus. Vor der Durchführung von weiteren Tests werden jedoch zuerst die 4 fehlgeschlagenen Bahnbögen etwas genauer untersucht, um die genaue Fehlerursache zu bestimmen, und gegebenenfalls die Manöverparametrisierung weiter optimieren zu können. In allen diesen 4 Fällen liegt der Fehler in den fehlerhaften TanDEM-X-Bahnen, so dass die gesamte Betrachtung nur auf diese gelegt wird.

1. Bahnbogen vom 19.03.2012, 23 Uhr.

Der erste fehlerhafte TanDEM-X Bahnbogen ist vom 19.03.2012, 23 Uhr und beinhaltet ein einziges kurzes Manöver von 11.4 Sekunden Länge. Die genauen Manöverdaten lauten wie folgt:

- Manöverstart in Minuten seit dem Bogenbeginn: 72.26 min.
- Manöverlänge: 11.4 Sekunden.
- Manövergröße:

Transversale Richtung: 0.02492 m/s
 Normale Richtung: 0.00133 m/s
 Radiale Richtung: -0.00052 m/s

Um den Verlauf der Bahnbestimmung zu untersuchen, werden die Residuen der Codebeobachtungen angeschaut. Neben dem Qualitätskriterium für die Ausgleichung lassen diese auch einen Rückschluss auf die Qualität und Anzahl der akzeptierten Beobachtungen zu. Nicht zuletzt weil die Eliminierung der schlechten Beobachtungen in EPOS-OC auch über eine Schranke für die Residuen der Codebeobachtungen erfolgt (vgl. Tabelle 4 auf Seite 39).

In der Abbildung 163 auf der nächsten Seite werden die Residuen der Codebeobachtungen nach den ersten vier Iterationen, sowie aus der Berechnung mit Anfangswerten (Iteration 0) dargestellt. Die rote Linie markiert dabei in jeder Grafik den Zeitpunkt des Manövers.

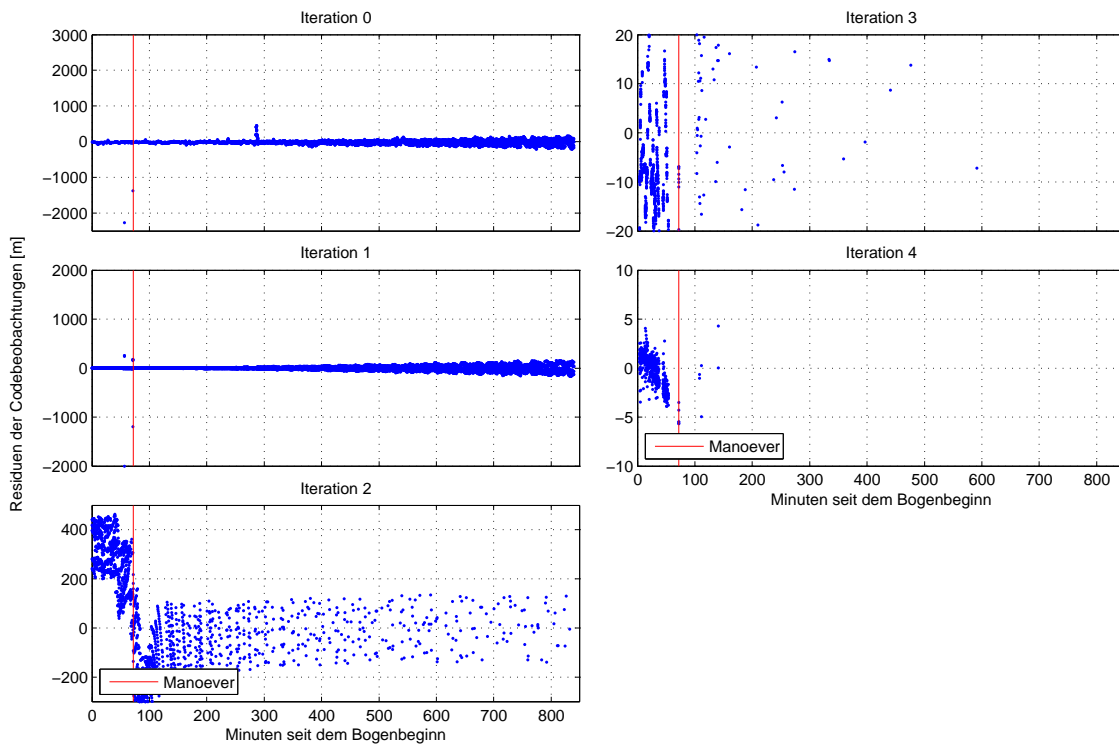


Abbildung 163: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 19.03.2012, 23 Uhr.

In der obigen Abbildung wird bereits nach der zweiten Iteration eine rapide Ausdünnung der Beobachtungen zum Ende des Bogens sichtbar. Die Eliminierung der Beobachtungen wird nach der dritten und vierten Iteration weiter so verstärkt, dass schließlich die Bahnberechnung nach der vierten Iteration abgebrochen wird.

Um zu überprüfen, ob die vorliegende Ergebnisse auf das Manöver zurückzuführen sind, wird ein weiterer Bahnbogen, der über eine ähnliche Manöverkonfiguration verfügt und dessen Berechnung erfolgreich war, ausgesucht und auf die gleiche Weise analysiert.

Als Vergleichsbahnbogen wird der Bahnbogen vom 06.03.2012, 11 Uhr ausgewählt. Die entsprechenden Manöverdaten lauten hier wie folgt:

- Manöverstart in Minuten seit dem Bogenbeginn: 33.70 min.
- Manöverlänge: 10.4 Sekunden.
- Manövergröße:

Transversale Richtung:	0.02248 m/s
Normale Richtung:	0.00043 m/s
Radiale Richtung:	-0.00077 m/s

Die Residuen der Codebeobachtungen für diesen Vergleichsbogen werden in der Abbildung 164 auf der nächsten Seite dargestellt. Neben den Iterationen 0 bis 4 wird hier auch die letzte Iteration Nr. 19 dargestellt.

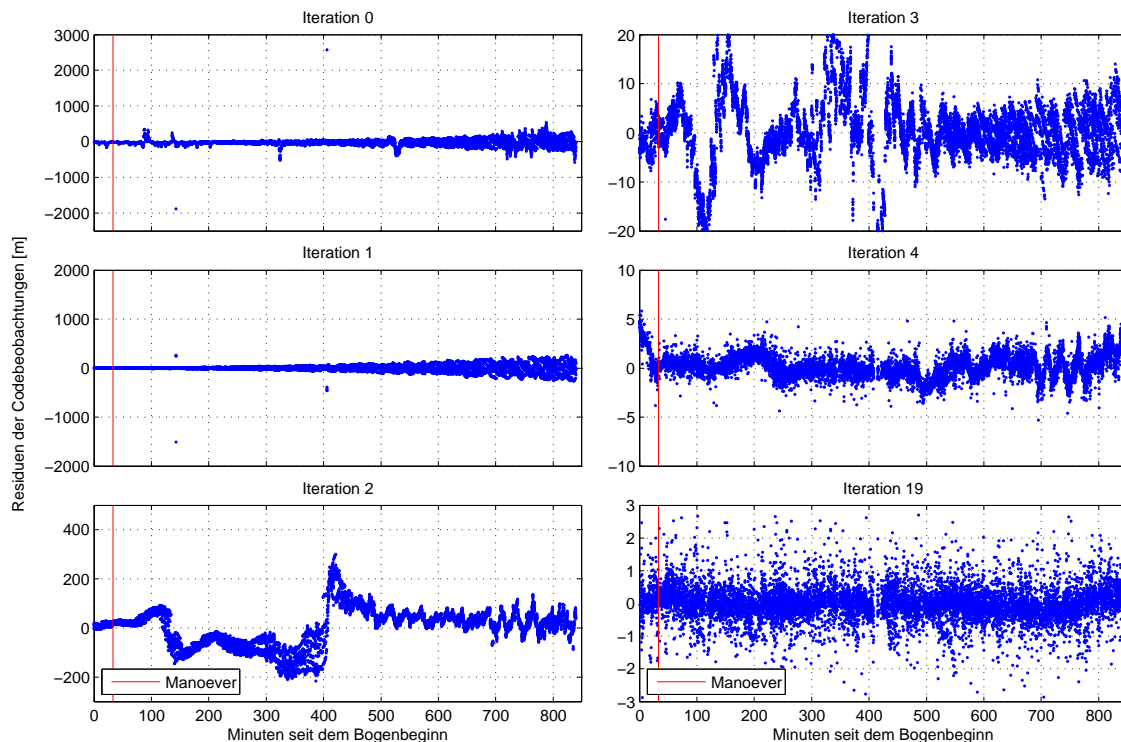


Abbildung 164: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Vergleichsbahnbogen am 06.03.2012, 11 Uhr.

Trotz einiger größeren Schwingungen in der Iteration 2 sind hier keine Auffälligkeiten im unmittelbaren Bereich des Manövers zu erkennen. Bei der näheren Betrachtung der Ergebnisse der beiden Auswertungen, fallen in der Iteration 1 der beiden Fälle einige größere Ausreißer auf, die in einer direkten Korrelation zu den Residuensprüngen in der nachfolgenden Iteration 2 zu stehen scheinen. Es liegt somit die Vermutung nahe, dass die oben beschriebenen Fehler auf einige schlechte Beobachtungen zurückzuführen sind.

Im Falle der Auswertung des Bahn Bogens vom 19.03.2012, 23 Uhr (vgl. Abbildung 163) liegen diese Ausreißer sehr nah an dem Manöver, so dass sie zu unmittelbaren Fehlern in der Manöverschätzung und in Folge darauf in der gesamten Bahnberechnung führen könnten. Dies wird dann in den nachfolgenden Iterationen durch die starke Verschlechterung der Bahn deutlich.

Im Gegensatz hierzu liegen die Ausreißer bei dem Vergleichsbogen (vgl. Abbildung 164) weiter von dem Manöver entfernt, so dass deren Einfluss auf die Genauigkeit geringere Folgen zu haben scheint. So besitzen die entsprechenden Abweichungen, die an den Schwingungen in der Iteration 2 zu erkennen sind, vergleichsweise geringere Größe und reichen nicht aus, um die Bahnintegration komplett zu stören.

Um diese Vermutung weiter zu überprüfen, wird eine erneute Berechnung des Bahn Bogens vom 19.03.2012, 23 Uhr durchgeführt. Diesmal wird jedoch ein zusätzliches Filter in die Berechnung nach der Iteration 1 eingebaut. Hierbei werden alle Beobachtungen, deren Residuen die Grenze von 200 m überschreiten eliminiert. Diese erneute Berechnung durchläuft ohne weitere Probleme mit einer erfolgreichen Bahnbestimmung. Die Residuen der Codebeobachtungen dieser neuen Berechnung für die Iterationen 0 bis 4, sowie der letzten Iteration Nr. 19, werden in der Abbildung 165 auf der nächsten Seite dargestellt.

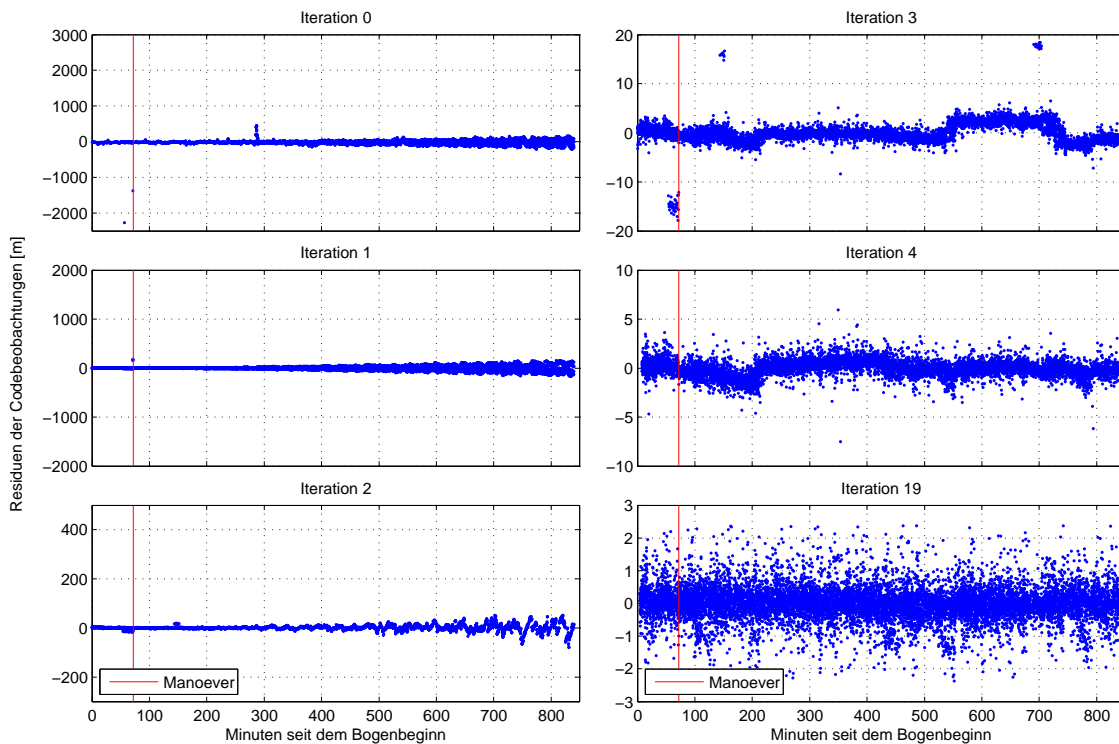


Abbildung 165: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 19.03.2012, 23 Uhr nach der Eliminierung der schlechten Beobachtungen.

Die Verbesserung der Bahngenauigkeit wird hier bereits ab der Iteration 2 deutlich. Nach der Eliminierung aller größeren Ausreißer in der vorherigen Iteration verschwinden auch alle größeren Störungen in den nachfolgenden Iterationen, so dass die Bahnlösung deutlich stabiler wird.

Eine nachfolgende Berechnung der kombinierten Bahn sowie die Bestimmung der Basislinien für diesen Bahnbogen verläuft schließlich auch fehlerfrei. Somit kann an dieser Stelle davon ausgegangen werden, dass die verursachten Fehler in diesem Fall auf die grob falschen Beobachtungen zurückzuführen sind, und nicht durch die Manöverparametrisierung verursacht worden sind.

2. Bahnbogen vom 20.04.2012, 23 Uhr.

Der zweite fehlerhafte TanDEM-X Bahnbogen ist vom 20.04.2012, 23 Uhr und beinhaltet ebenso nur ein einziges kurzes Manöver von 7.15 Sekunden Länge. Die genauen Manöverdaten lauten hier wie folgt:

- Manöverstart in Minuten seit dem Bogenbeginn: 23.36 min.
- Manöverlänge: 7.15 Sekunden.
- Manövergröße:

Transversale Richtung: 0.01512 m/s
 Normale Richtung: -0.00071 m/s
 Radiale Richtung: -0.00037 m/s

Auch hier werden als erstes die Residuen der Codebeobachtungen angeschaut, um eventuelle Auffälligkeiten aufzudecken. Diese werden in der Abbildung 166 auf der nächsten Seite für die Iterationen 0 bis 4 dargestellt.

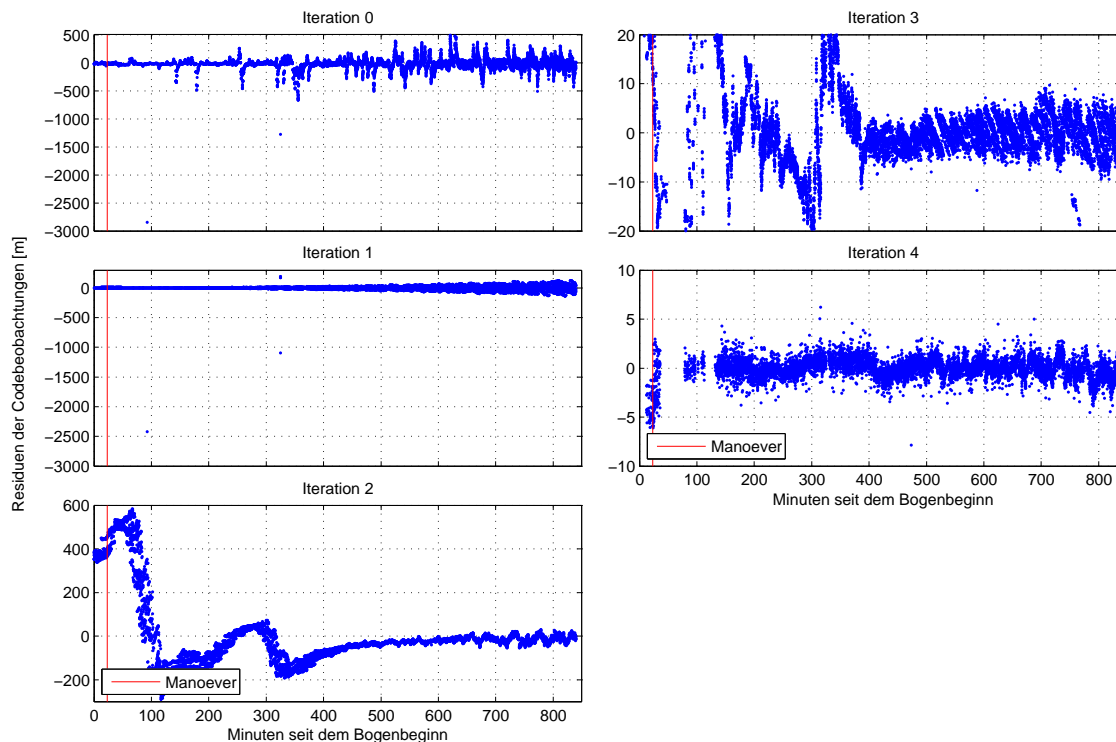


Abbildung 166: Residuen der Code Beobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 20.04.2012, 23 Uhr.

Der Fehler, der zu dem Abbruch der Bahnberechnung führt, wird in der Iteration 2 in Form einer großen Schwingung in der Residuenzeitreihe am Anfang des Bogens sichtbar. Diese großen Residuen führen in den folgenden zwei Iterationen zu einer größeren Eliminierung der Beobachtungen in dem entsprechenden Bereich, so dass die Berechnung nach der vierten Iteration aufgrund der großen Lücke in den Beobachtungen abbricht. Auch hier sind einige größere Ausreißer in den Residuen in der Iteration 1 vorhanden, die in einer Korrelation zu den Schwingungen in der nachfolgenden Iteration 2 zu stehen scheinen. Obwohl diese nicht in einem unmittelbaren Bereich um das Manöver liegen, ist insbesondere die Größe der ersten Ausreißer um einige Größenordnungen höher als bei dem vorher untersuchten Bahnbogen. Diese besonders großen Ausreißer scheinen für die starke Verschlechterung der Bahngenauigkeit am Anfang des Bogens verantwortlich zu sein. Um auch hier auszuschließen, dass die Abweichungen durch das Manöver hervorgerufen werden, wird auch hier ein Vergleichsbahnbogen für die Untersuchung herangezogen.

Als Vergleichsbahnbogen wird der Bahnbogen vom 20.05.2012, 23 Uhr ausgewählt. Die entsprechenden Manöverdaten lauten hier wie folgt:

- Manöverstart in Minuten seit dem Bogenbeginn: 17.47 min.
- Manöverlänge: 10.3 Sekunden.
- Manövergröße:

Transversale Richtung:	0.02178 m/s
Normale Richtung:	-0.00062 m/s
Radiale Richtung:	-0.00119 m/s

Die Residuen der Codebeobachtungen dieses Vergleichsbogens für die Iterationen 0 bis 4, sowie die letzte Iteration Nr. 19 werden in der Abbildung 167 auf der nächsten Seite dargestellt.

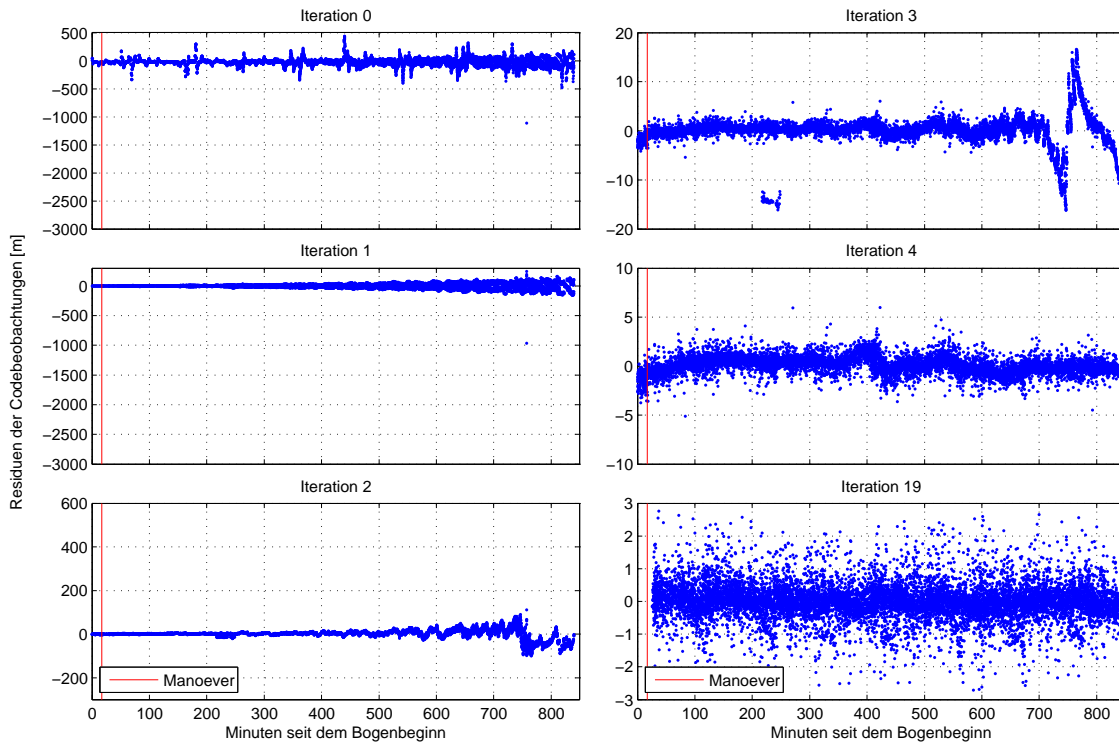


Abbildung 167: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Vergleichsbahnbogen am 20.05.2012, 23 Uhr.

Auch hier sind keine Auffälligkeiten in den Residuen in dem unmittelbaren Bereich um das Manöver erkennbar. Die einzige größere Abweichung in den Iterationen 2 und 3 liegt am Ende des Bogens und scheint mit den Ausreißer in dem gleichen Bereich in der Iteration 1 in Verbindung zu stehen.

Auch hier scheint der Fehler durch einige schlechte Beobachtungen verursacht worden zu sein.

Analog zu der vorherigen Untersuchung des ersten Bahn Bogens wird auch hier eine erneute Berechnung mit der identischen Filterfunktion wie im vorigen Bogen nach der ersten Iteration durchgeführt. Die Residuen der Codebeobachtungen für die Iterationen 0 bis 4, sowie die letzte Iteration Nr. 19 der neuen Berechnung werden in der Abbildung 168 auf der nächsten Seite dargestellt.

Wie bereits zuvor führt auch hier die Eliminierung aller schlechten Beobachtungen nach der ersten Iteration zu einer verbesserten und stabilen Bahnlösung. Die vorherigen starken Abweichungen am Anfang des Bogens verschwinden komplett. Eine nachfolgende Berechnung der kombinierten Bahn sowie die Bestimmung der Basislinien für diesen Bahnbogen verläuft ebenso fehlerfrei. Wie bereits in dem ersten Fall wird auch hier deutlich, dass der Fehler in der Bahnberechnung auf einige schlechte Beobachtungen zurückzuführen ist, und nicht durch die Manöverparametrisierung verursacht wurde.

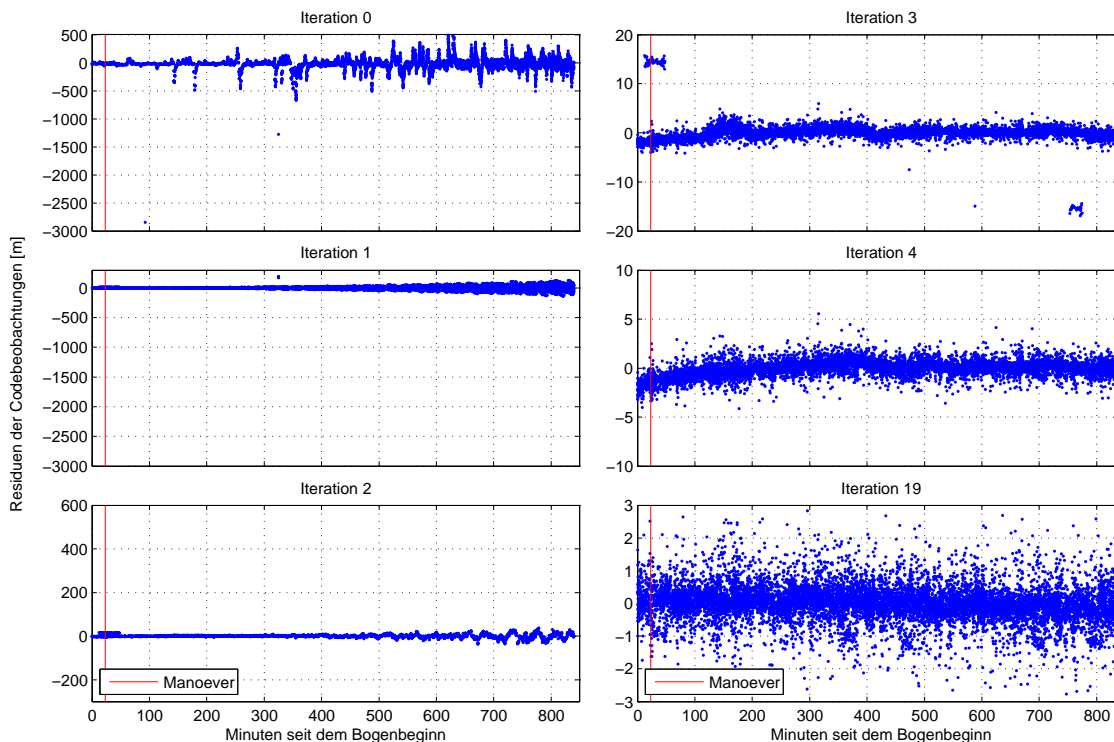


Abbildung 168: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 20.04.2012, 23 Uhr nach der Eliminierung der schlechten Beobachtungen.

3. Bahnbogen vom 21.04.2012, 11 Uhr.

Der dritte fehlerhafte TanDEM-X Bahnbogen ist vom 21.04.2012, 11 Uhr und beinhaltet zwei mittelgroße Manöver mit jeweils 135.52 und 126.97 Sekunden Länge. Die genauen Manöverdaten lauten hier wie folgt:

- Manöverstart in Minuten seit dem Bogenbeginn: 1: 513.11 min, 2: 560.60 min.
- Manöverlänge: 1: 135.52 Sekunden, 2: 126.97 Sekunden.
- Manövergröße:

Transversale Richtung:	-0.00801 m/s
1 : Normale Richtung:	0.00036 m/s ,
Radiale Richtung:	0.00006 m/s
Transversale Richtung:	0.00810 m/s
2 : Normale Richtung:	-0.00049 m/s
Radiale Richtung:	-0.00030 m/s

Die zugehörigen Residuen der Codebeobachtungen für die Iterationen 0 bis 4 werden in der Abbildung 169 auf der nächsten Seite dargestellt.

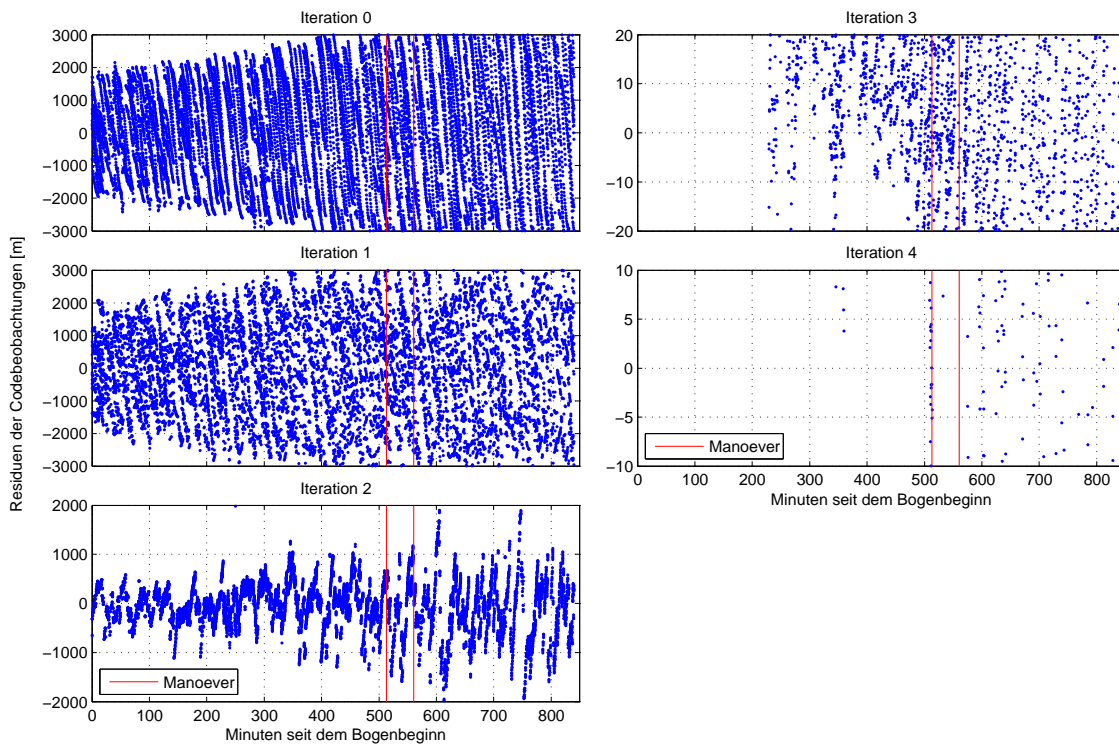


Abbildung 169: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 21.04.2012, 11 Uhr.

Aufgrund sehr großen Abweichungen in den Residuen sowie deren starken Streuung bereits in der Berechnung mit den Anfangswerten (Iteration 0), kann der Fehler nur in den Anfangswerten der Bahn liegen.

Um dies zu überprüfen wird eine erneute vorläufige Berechnung der Bahn mit hochgesetzten Grenzen für die Eliminierung der schlechten Beobachtungen (vgl. Tabelle 4 auf Seite 39) durchgeführt. Dabei werden die jeweiligen Grenzen um den Faktor 100 erhöht. Auf diese Weise wird verhindert, dass bereits in den ersten Iterationen sehr viele Beobachtungen eliminiert werden, und eine zumindest grobe Bahnbestimmung stattfinden kann. Da nach jeder Iteration neue Anfangswerte der Bahn berechnet werden, können die ursprünglichen fehlerhaften Anfangswerte mit jeder Iteration verbessert werden.

Anschließend werden die verbesserten Anfangswerte aus der letzten Iteration Nr. 19 anstelle der ursprünglichen fehlerhaften Anfangswerte verwendet, um eine erneute und endgültige Bahnberechnung durchzuführen. Die entsprechenden Residuen der Codebeobachtungen der neuen Berechnung für die Iterationen 0 bis 4, sowie die letzte Iteration Nr. 19 werden in der Abbildung 170 auf der nächsten Seite dargestellt. So verläuft die Berechnung mit den neuen Anfangswerten im Vergleich zu der ersten Berechnung deutlich stabiler und genauer. Die einzige größere Abweichung in den Residuen ab der Iteration 2 ist hier mit einer großen Wahrscheinlichkeit auf die Ausreißer in der vorherigen Iteration 1 zurückzuführen. Deren Einfluss reicht jedoch nicht aus, um die Bahnberechnung wirksam zu stören.

Eine Berechnung der kombinierten Bahn sowie die Bestimmung der Basislinien für diesen Bahnbogen verläuft anschließend auch fehlerfrei. Somit kann die Manöverparametrisierung als ursprüngliche Fehlerursache auch hier ausgeschlossen werden.

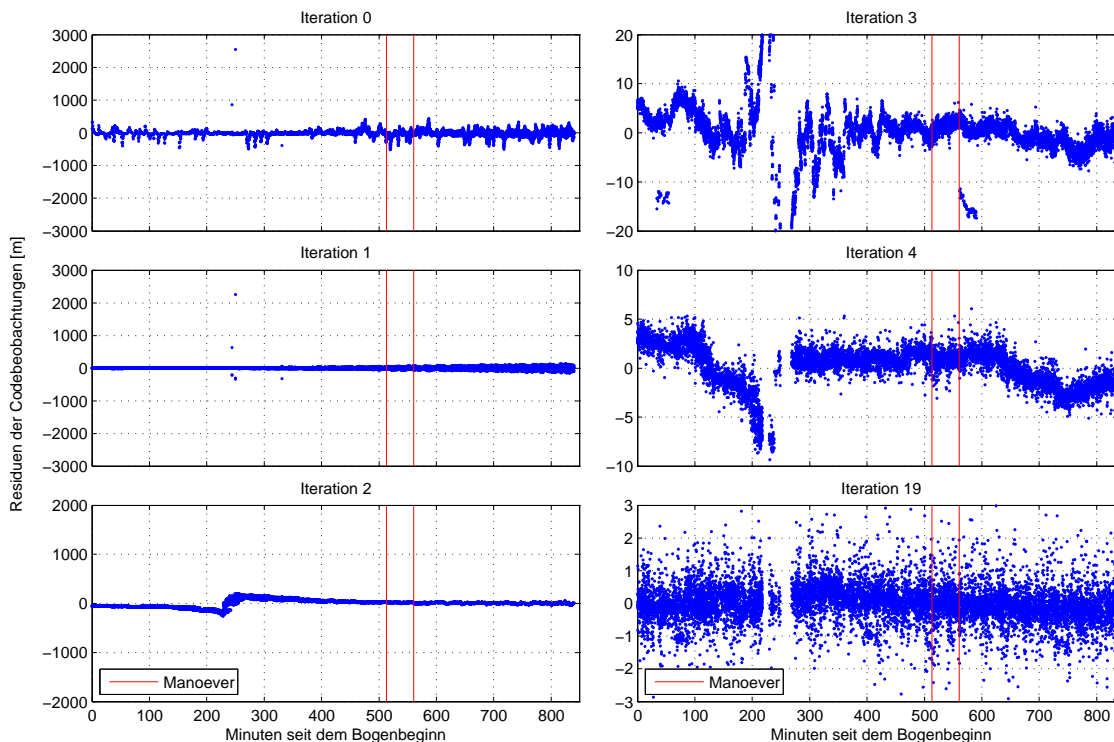


Abbildung 170: Residuen der Codebeobachtungen des TanDEM-X für den Bahnbogen am 21.04.2012, 11 Uhr aus der Berechnung mit neuen Anfangswerten.

4. Bahnbogen vom 06.05.2012, 11 Uhr.

Der letzte fehlerhafte TanDEM-X Bahnbogen ist vom 06.05.2012, 11 Uhr und beinhaltet zwei mittelgroße Manöver mit jeweils 126.85 und 107.83 Sekunden Länge.

Im Gegensatz zu den vorherigen drei Fällen findet hier grundsätzlich keine Bahnberechnung statt. Bei jedem Start von EPOS-OC stürzt das Programm umgehend mit einer nicht weiter definierten Fehlermeldung zu einem schwerwiegenden Fehler ab. Dies geschieht jedoch stets nur mit der aktuellen Version von EPOS-OC (6.69), während mit einer älteren Version von EPOS-OC dieser Bogen ohne weitere Schwierigkeiten berechnet wird. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass der Fehler eventuell durch einen oder mehrere programminterne Änderungen, gegebenenfalls aber auch durch Fehler in den einzulesenden Dateien, die erst mit eventuell geänderten Leseroutinen zum Vorschein kommen, verursacht wird. Da dies somit ein rein softwaretechnisches Problem ist, wird hier nicht weiter darauf eingegangen. Es kann somit auch hier die Manöverparametrisierung als Fehlerursache ausgeschlossen werden.

Zusammenfassend und im Rückblick auf die in diesem Kapitel erzielte Ergebnisse lässt sich sagen, dass kein einziger fehlerhafte Bahnbogen durch die neue Manöverparametrisierung zu Stande kommt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die ersten drei fehlgeschlagenen Bahnbogen nach den angebrachten Fehlerkorrekturen, und der vierte mit einer älteren EPOS-OC Version sich problemlos berechnen lassen, kann hier von einer 100%-en Erfolgsquote in der Berechnung in der untersuchten Testreihe von 118 Bahnbogen mit Manövern gesprochen werden.

4.6.3 Untersuchung der Genauigkeit der neuen Manöverparametrisierung

Als nächstes findet eine Überprüfung der Genauigkeit der neuen Manöverparametrisierung statt. Die erste Untersuchung hierfür basiert auf dem Vergleich der Basisliniendifferenzen mit Bernese und GSOC Lösungen. Wie bereits zuvor werden auch hier nur die Bahnbögen berücksichtigt, die in jedem Vergleich nach der Filterung der Daten vorhanden sind. Unter Berücksichtigung der Basislinienvergleiche aus der Berechnung mit der alten Manöverparametrisierung beläuft sich die Anzahl der Bahnbögen, die in jedem Vergleich vorhanden sind, auf insgesamt 31 Bahnbögen. Die statistische Auswertung der Basisliniendifferenzen wird in der Tabelle 18 vorgestellt.

Tabelle 18: Statistische Auswertung der Basisliniendifferenzen aus der Berechnung mit der alten und neuen Manöverparametrisierung.

Koordinatenachse	Maximumwert [mm]	Mittelwert [mm]	Minimumwert [mm]	RMS [mm]	Standardabweichung [mm]	Anzahl der Differenzen
Aktuelle Parametrisierung						
EPOS-OC - Bernese						
Radial	31.60	-0.07	-53.89	1.38	1.38	31
Normal	25.59	1.09	-35.68	1.53	1.07	31
Transversal	386.00	2.83	-250.77	4.94	4.05	31
EPOS-OC - GSOC						
Radial	43.78	0.06	-48.20	1.49	1.48	31
Normal	19.82	1.66	-35.31	2.03	1.17	31
Transversal	399.66	1.73	-257.39	4.40	4.05	31
Neue Parametrisierung						
EPOS-OC - Bernese						
Radial	13.01	-0.05	-22.63	1.26	1.26	31
Normal	25.78	1.08	-22.89	1.55	1.11	31
Transversal	34.94	2.83	-51.52	3.68	2.35	31
EPOS-OC - GSOC						
Radial	19.31	0.07	-22.59	1.34	1.34	31
Normal	26.34	1.66	-21.00	2.04	1.19	31
Transversal	23.25	1.74	-18.52	2.90	2.32	31
Vergleich Bernese - GSOC						
Radial	17.90	0.13	-13.82	0.81	0.80	31
Normal	9.98	0.58	-8.41	1.01	0.83	31
Transversal	39.46	-1.10	-32.28	1.48	1.00	31

Im Hinblick auf die RMS-Werte und Standardabweichungen der obigen Ergebnisse erfährt die Genauigkeit der Basislinien, berechnet mit der neuen Manöverparametrisierung, in transversaler Richtung eine deutliche Verbesserung. Während die Genauigkeit in radialer Richtung nur geringfügige Verbesserung und die Genauigkeit in normaler Richtung keine sichtbare Änderung erfahren. Dieser Trend lässt sich bei einer zusätzlichen Betrachtung der Manöver beider Satelliten (vgl. Abbildung 18 auf Seite 43 und Abbildung 24 auf Seite 46) erklären. So erfahren beide Satelliten in transversaler Richtung die stärksten Manöver, deren Größenordnung im Vergleich zu den beiden anderen Richtungen um einige Dimensionen höher liegt. Dadurch reagiert die transversale Richtung besonders sensitiv auf alle Änderungen in der Manöverschätzung, so dass hier die größten Änderungen in der Genauigkeit zu erwarten sind. Im Gegensatz dazu sind die Manöver in der radialen Richtung wesentlich kleiner und haben folglich weniger Einfluss auf die Bahnbestimmung, so dass alle Änderungen hier vergleichsweise gering ausfallen. Die Größenordnung der Manöver in normaler Richtung fällt, absolut betrachtet, noch kleiner als die aus radialer Richtung aus, so dass diese vergleichsweise den geringsten Einfluss auf die Bahnberechnung ausübt und dementsprechend kaum auf die Änderungen in der Manöverparametrisierung reagiert.

Insbesondere im Hinblick auf die deutliche Verbesserung in transversaler Richtung lassen die obigen Ergebnisse den Rückschluss auf eine verbesserte Manöverschätzung mit der neuen Manöver-

parametrisierung zu. Im Hinblick auf die Vergleichsergebnisse aus dem Vergleich zwischen Bernese und GSOC Lösungen bleibt jedoch an dieser Stelle noch genügend Verbesserungspotenzial vorhanden. Aber auch hier muss beachtet werden, dass alle hier erzielten Ergebnisse sich in erster Linie auf die relative Genauigkeit zwischen verschiedenen Lösungen beziehen, und nur indirekt auf die absolute Genauigkeit schließen lassen.

Im nächsten Test wird die Genauigkeit der Basislinien im unmittelbaren Bereich um die Manöver untersucht. Hierbei werden die Basisliniendifferenzen analog der Untersuchung im Kapitel 4.6 (vgl. z. B. Abbildung 154 auf Seite 110) im Bereich von 5 Minuten um die Manöver betrachtet. Da der Untersuchungsumfang diesmal mit 31 Bahnbögen anders ist, wird parallel auch eine erneute Auswertung der entsprechenden Bahnbögen aus der Berechnung mit der alten Manöverparametrisierung durchgeführt, um eine Referenzbasis für ein Vergleich zwischen den beiden Berechnungen zu haben. Die Ergebnisse dieser Auswertung werden in folgenden Abbildungen zusammengefasst:

1. Basislinienvergleich zwischen EPOS-OC und Bernese in den Abbildungen 171 und 172.
2. Basislinienvergleich zwischen EPOS-OC und GSOC in den Abbildungen 173 und 174 auf der nächsten Seite.
3. Basislinienvergleich zwischen Bernese und GSOC in der Abbildung 175 auf der nächsten Seite.

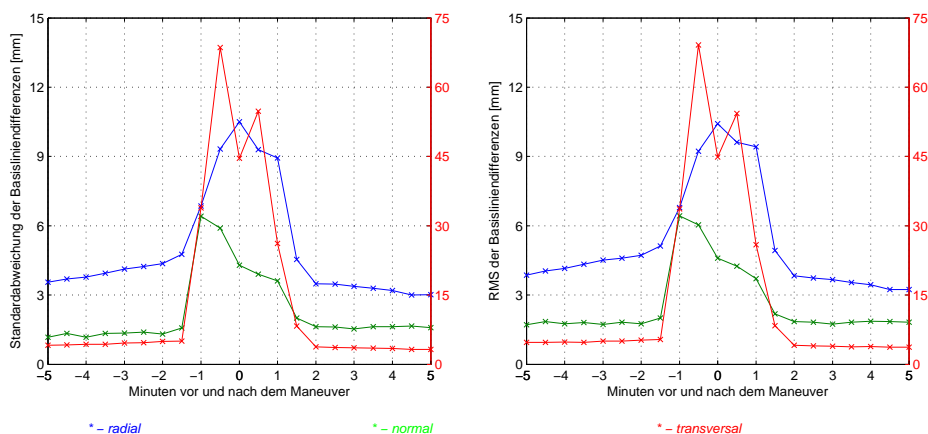


Abbildung 171: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und Bernese mit der aktuellen Manöverparametrisierung.

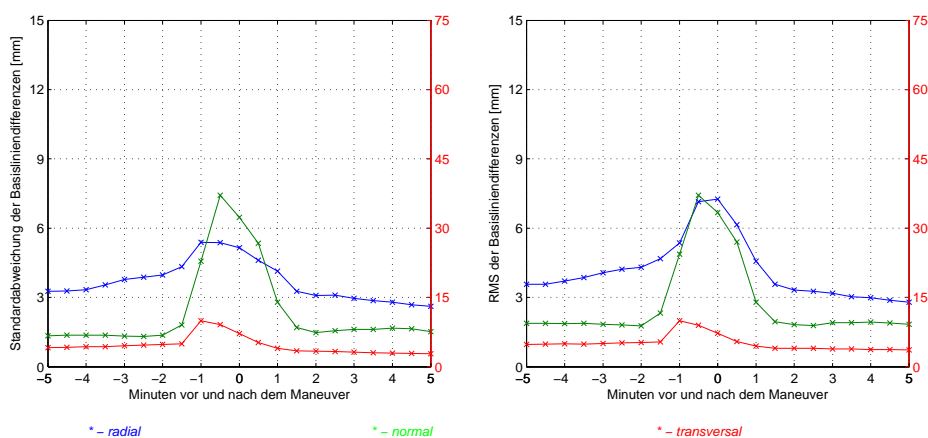


Abbildung 172: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und Bernese mit der neuen Manöverparametrisierung.

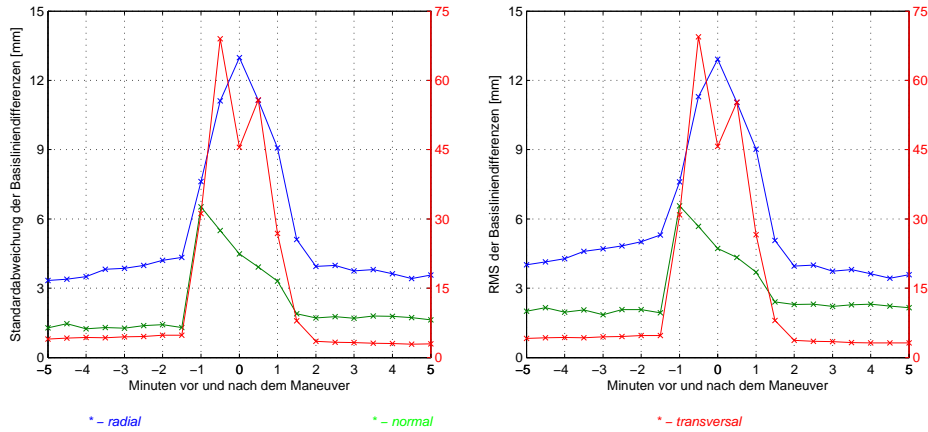


Abbildung 173: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und GSOC mit der aktuellen Manöverparametrisierung.

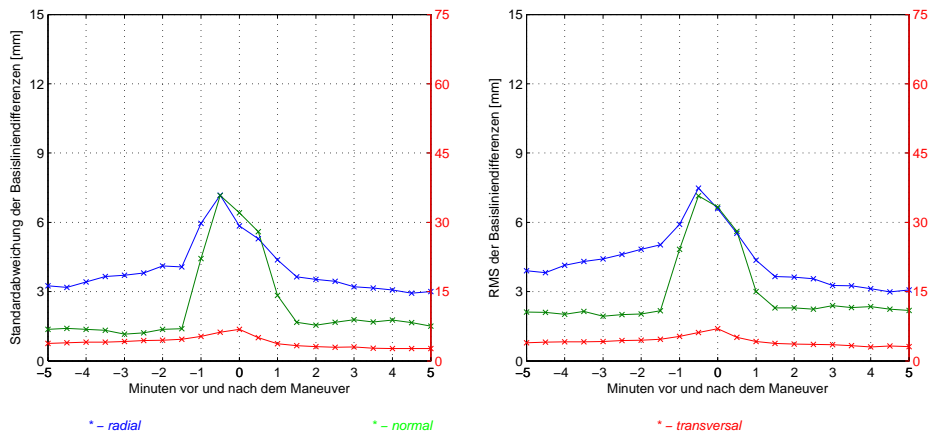


Abbildung 174: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich EPOS-OC und GSOC mit der neuen Manöverparametrisierung.

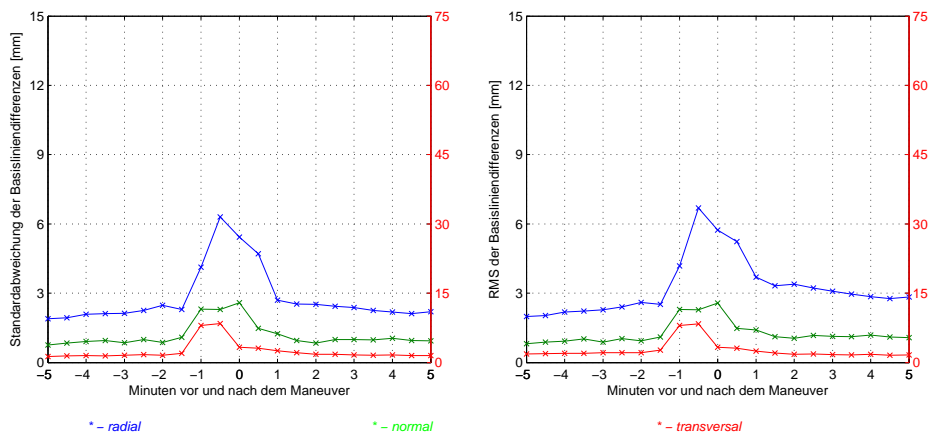


Abbildung 175: Standardabweichung (links) und RMS (rechts) der Basisliniendifferenzen im Bereich der Manöver. Basislinienvergleich Bernese und GSOC.

Die obigen Ergebnisse bestätigen den Trend aus der Auswertung der Basisliniendifferenzen in der Tabelle 18. Die größte Verbesserung in der relativen Genauigkeit erfolgt in der transversalen Richtung. So fallen die Basisliniendifferenzen im Falle des Vergleichs zwischen EPOS-OC und GS-OC (vgl. Abbildung 174) sogar geringer aus als im Falle des Vergleichs zwischen Bernese und GSOC Lösungen (vgl. Abbildung 175). Die Verbesserung der relativen Genauigkeit in radialer Richtung liegt ungefähr bei 50% und ist vergleichbar mit der relativen Genauigkeit zwischen Bernese und GSOC Lösungen. Im Gegensatz dazu weist die normale Richtung keine messbare Verbesserung der relativen Genauigkeit.

Aus diesen Ergebnissen folgt eine deutliche Genauigkeitssteigerung in der Bahnbestimmung in der transversalen und der radialen Richtung der Bahn unter dem Einsatz der neuen Manöverparametrisierung.

Als letzte Untersuchung zu der Genauigkeit der Basislinien werden die Basisliniendifferenzen von den 5 bereits zuvor ausgesuchten Bahnbögen betrachtet (vgl. Abbildungen 157-161 auf den Seiten 113-115). Die Ergebnisse dieser neuen Auswertung werden in den folgenden Abbildungen dargestellt:

1. Bahnbogen vom 30.04.2012, 23 Uhr in der Abbildung 176.
2. Bahnbogen vom 19.04.2012, 11 Uhr in der Abbildung 177 auf der nächsten Seite.
3. Bahnbogen vom 02.04.2012, 23 Uhr in der Abbildung 178 auf der nächsten Seite.
4. Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr in der Abbildung 179 auf Seite 134.
5. Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr in der Abbildung 180 auf Seite 134.

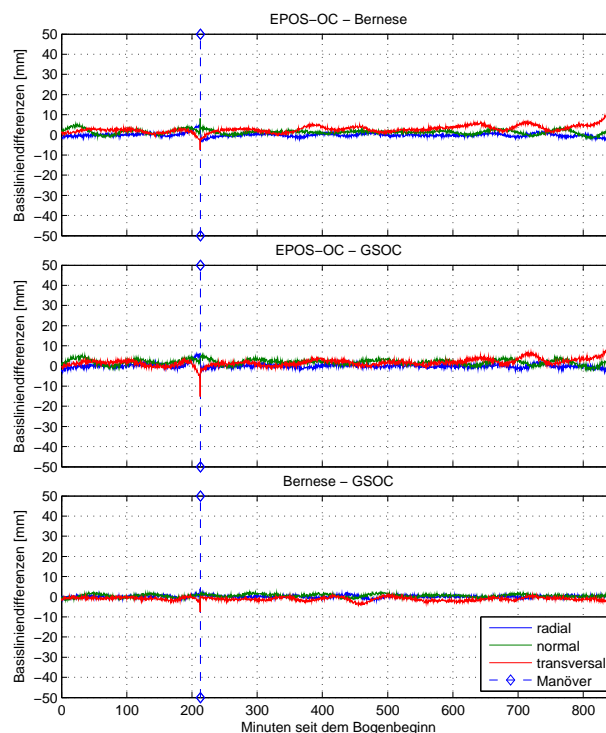


Abbildung 176: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 30.04.2012, 23 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.

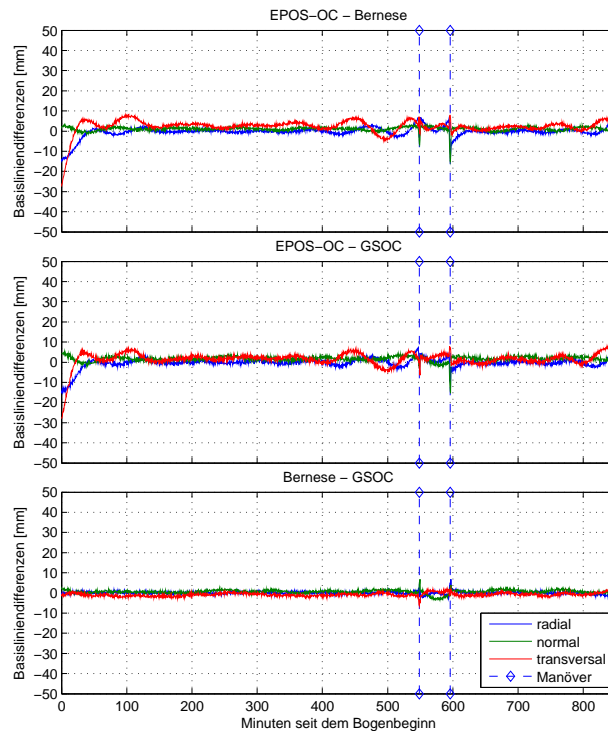


Abbildung 177: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 19.04.2012, 11 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.

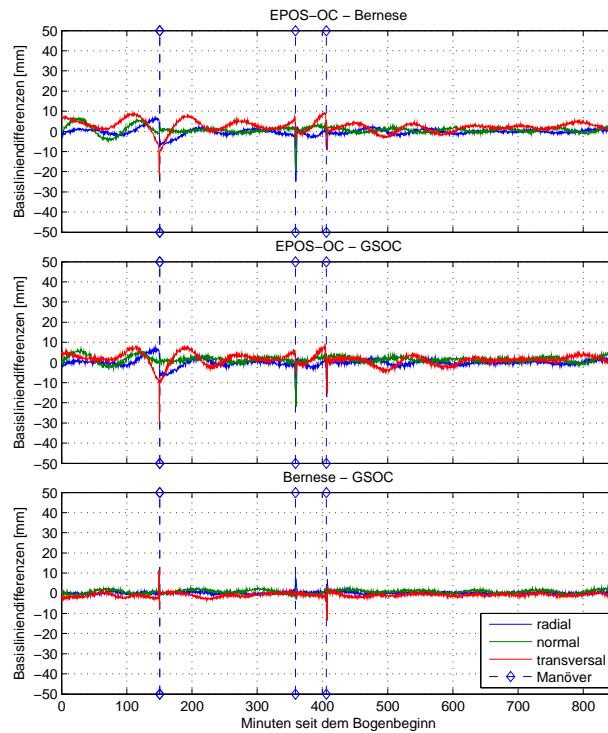


Abbildung 178: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 02.04.2012, 23 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.

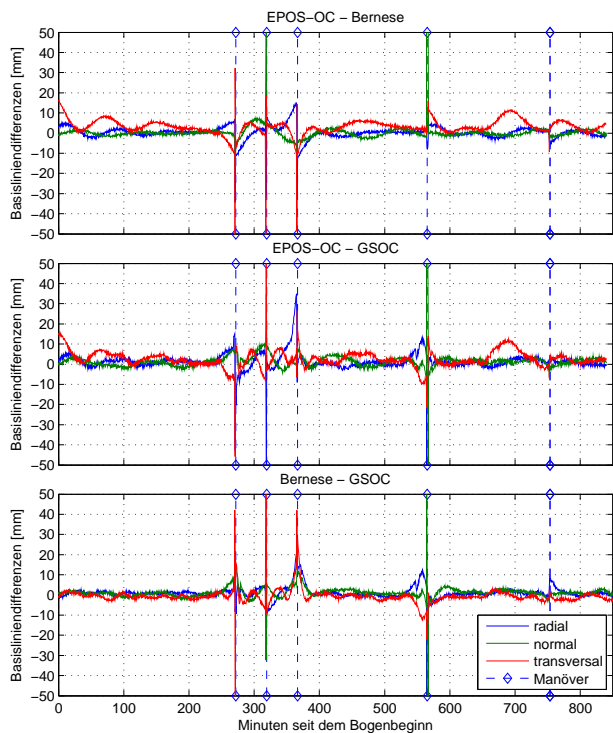


Abbildung 179: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.

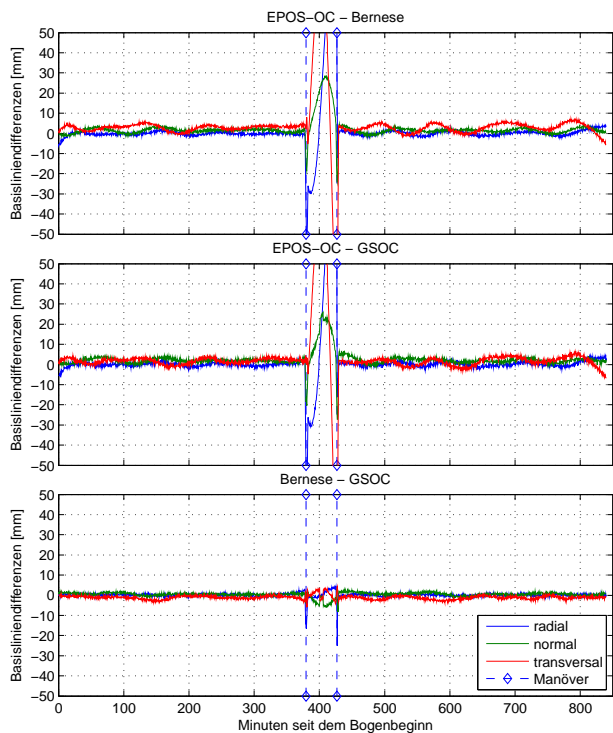


Abbildung 180: Basisliniendifferenzen für den Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr mit der neuen Manöverparametrisierung.

Auch diese Ergebnisse weisen eine Verbesserung gegenüber der ersten Auswertung aus der Berechnung mit der alten Manöverparametrisierung aus (vgl. Abbildungen 157-161). So sind unter anderem die starken Schwingungen am Ende der Bahnen der letzten drei Bögen (vgl. Abbildungen 178-180) komplett verschwunden, was auf eine Erhöhung der Stabilität der Bahnlösung schließen lässt. Ebenso fallen die Abweichungen im unmittelbaren Bereich um die Manöver geringer aus. Bei den ersten zwei Bahnbögen (vgl. Abbildungen 176 und 177) sind diese fast vollständig verschwunden. Der Bahnbogen vom 28.03.2012, 23 Uhr (vgl. Abbildung 179) weist zwar in diesem Bereich noch einige Restschwingungen auf, diese sind jedoch vergleichbar mit dem Referenzvergleich zwischen Bernese und GSOC, so dass hier von einer guten relativen Genauigkeit gesprochen werden kann. Einzig der letzte Bahnbogen vom 15.04.2012, 11 Uhr (vgl. Abbildung 180) weist im unmittelbaren Bereich um die Manöver noch größere Abweichungen aus. Diese fallen zwar geringer aus, als im Falle der Berechnung mit der alten Manöverparametrisierung (vgl. Abbildung 161), sind aber nach wie vor deutlich größer als im Falle der entsprechenden Vergleichslösung zwischen Bernese und GSOC.

Aus diesen Ergebnissen geht eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit der Basislinien insbesondere bei kleineren und mittelgroßen Manövern hervor. Bei der Schätzung von langen Manövern, wie im Falle des Bahnbogens vom 15.04.2012, 11 Uhr mit einer Manöverlänge von jeweils mehr als 200 Sekunden, wird zwar ebenfalls eine positive Veränderung sichtbar, diese fällt jedoch vergleichsweise geringer aus und lässt noch genügend Verbesserungspotential offen.

Bislang wurde nur die relative Genauigkeit der Basislinien untersucht. Im folgenden abschließenden Test wird nun die absolute Bahngenauigkeit der beiden Satelliten nach der Berechnung mit der neuen Manöverparametrisierung überprüft. Hierbei werden die Satellitenbahnen analog zu den Berechnungen im Kapitel 4.4 mit SLR-Beobachtungen vermessen und deren Residuen gebildet. Anschließend erfolgt dann eine statistische Auswertung aller berechneten Residuen der SLR-Beobachtungen. Der Testumfang umfasst dabei die gleichen 31 Bahnbögen, die bereits zuvor auf die Genauigkeit der Basislinien untersucht worden sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in der Tabelle 19 auf der nächsten Seite vorgestellt.

Die Genauigkeiten der Bahnen, die mit der neuen Manöverparametrisierung berechnet wurden, fällt in diesen Ergebnissen ähnlich mit der Genauigkeit der Bahnen, die mit der alten Manöverparametrisierung berechnet wurden, aus. Eine Verbesserung der absoluten Positionsgenauigkeit nach der Umstellung auf die neue Manöverparametrisierung kann somit ausgeschlossen werden. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die SLR-Messungen nur zeitweise durchgeführt werden, und im Bezug auf die komplette Bahn nur vereinzelte Messepochen bilden, die eine sehr geringe zeitliche Überdeckung haben. Insbesondere falls die SLR-Beobachtungen nicht in einem unmittelbaren zeitlichen Bereich um einen Manöver liegen, lassen sich die Änderungen der Bahn in Folge einer geänderten Manöverparametrisierung nur bedingt auflösen, da diese in den meisten Fällen nur einen lokalen Charakter mit Schwerpunkt auf den Manöverzeitpunkt besitzen.

Tabelle 19: Statistische Auswertung der Residuen der SLR-Beobachtungen der TanDEM-X- und TerraSAR-X-Bahnen aus unterschiedlichen Berechnungen.

Bahnberechnung	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
Alte Manöverparametrisierung						
TanDEM-X						
Einzelbahnberechnung	12.07	-1.21	-16.91	4.54	2.49	2609
Kombinierte Bahnberechnung	15.11	-1.46	-18.79	5.56	3.05	2610
TerraSAR-X						
Einzelbahnberechnung	14.12	-1.02	-19.63	3.90	2.19	2466
Kombinierte Bahnberechnung	16.30	-1.43	-17.98	5.58	3.43	2462
Neue Manöverparametrisierung						
TanDEM-X						
Einzelbahnberechnung	12.03	-1.15	-16.85	4.46	2.44	2609
Kombinierte Bahnberechnung	16.30	-1.39	-19.30	5.53	3.12	2610
TerraSAR-X						
Einzelbahnberechnung	14.12	-0.91	-19.63	3.76	2.18	2466
Kombinierte Bahnberechnung	16.18	-1.43	-17.43	5.66	3.54	2461

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nach den vielen durchgeführten Untersuchungen lassen sich einige Schlussfolgerungen bilden. So weisen die Bahnen von TanDEM-X und TerraSAR-X, gemessen an der Größe der SLR-Residuen, eine hohe absolute Positionsgenauigkeit im Bereich von ca. 2-3 cm (vgl. Tabelle 21). Gleichzeitig erfolgt jedoch eine Verschlechterung dieser Genauigkeit um ca. 1 cm nach der Durchführung der kombinierten Bahnberechnung, die für die Bestimmung der Basislinien unabdingbar ist. Als einer der Gründe hierfür wird die Ambiguity-Fixierung vermutet. So könnte das gemeinsame Fixieren der Ambiguities auf ganzzahlige Werte während der kombinierten Bahnberechnung dazu führen, dass die Fehler in den Phasenzentrumskorrekturen der Antennen der beiden Satelliten sich auf die Bahnen übertragen und so die Satellitenpositionen leicht verschieben. Dies lässt sich jedoch leider nicht ohne weiteres nachprüfen.

Nach der Umstellung auf die neu entwickelte Manöverparametrisierung konnte zwar keine Verbesserung der absoluten Satellitenposition durch SLR nachgewiesen werden, dies lässt sich jedoch dadurch erklären, dass die Änderung der Manöverparametrisierung hauptsächlich nur einen lokal begrenzten Einfluss auf die Bahn in den Manöverbereichen ausübt.

Tabelle 21: Zusammenfassung der statistischen Auswertungen der Residuen der SLR-Beobachtungen für TanDEM-X und TerraSAR-X.

Bahnberechnung	Maximumwert [cm]	Mittelwert [cm]	Minimumwert [cm]	RMS [cm]	Standardabweichung [cm]	Anzahl der Beobachtungen
TanDEM-X						
Einzelbahnberechnung	19.60	-1.27	-19.91	4.67	2.44	13252
Kombinierte Bahnberechnung	19.01	-1.82	-19.93	5.86	3.35	13203
TerraSAR-X						
Einzelbahnberechnung	19.99	-1.02	-19.98	4.05	2.30	13278
Kombinierte Bahnberechnung	19.84	-1.57	-19.96	5.87	3.43	13219

Die Verschlechterung der absoluten Position hat allerdings keinen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Basislinien. Aus diesem Grund und weil für das interferometrische Auswerten der SAR-Aufnahmen in erster Reihe die Basislinien wichtig sind, spielt die absolute Positionsgenauigkeit der Satelliten eine untergeordnete Rolle.

Die Verbesserung der Genauigkeit der Basislinien nach der Umstellung auf die neue Manöverparametrisierung kann durch die relativen Vergleiche mit Bernese und GSOC Lösungen als gegeben betrachtet werden. So weisen die entsprechenden Basisliniendifferenzen sowohl lokale Verbesserungen im Manöverbereich (vgl. Abbildungen 176-180), als auch eine allgemeine Genauigkeitsverbesserung, die durch eine statistische Auswertung der Basisliniendifferenzen deutlich wird (vgl. Tabelle 22 auf der nächsten Seite). Insbesondere in der transversalen Richtung wird eine Verbesserung von bis zu 85% deutlich.

Tabelle 22: Zusammenfassung der statistischen Auswertungen der Basisliniendifferenzen aus der Berechnung mit der alten und neuen Manöverparametrisierung.

Rot markierte Werte entsprechen der Berechnung mit der alten Manöverparametrisierung.

Koordinatenachse	Maximumwert [mm]	Mittelwert [mm]	Minimumwert [mm]	RMS [mm]	Standardabweichung [mm]	Anzahl der Differenzen
Vergleich EPOS-OC - Bernese						
Radial	13.01 31.60	-0.05 -0.07	-22.63 -53.89	1.26 1.38	1.26 1.38	31 31
Normal	25.78 25.59	1.08 1.09	-22.89 -35.68	1.55 1.53	1.11 1.07	31 31
Transversal	34.94 386.00	2.83 2.83	-51.52 -250.77	3.68 4.94	2.35 4.05	31 31
Vergleich EPOS-OC - GSOC						
Radial	19.LA 43.78	0.07 0.06	-22.59 -48.20	1.34 1.49	1.34 1.48	31 31
Normal	26.34 19.82	1.66 1.66	-21.00 -35.31	2.04 2.03	1.19 1.17	31 31
Transversal	23.25 399.66	1.74 1.73	-18.52 -257.39	2.90 4.40	2.32 4.05	31 31
Vergleich Bernese - GSOC						
Radial	17.90	0.13	-13.82	0.81	0.80	31
Normal	9.98	0.58	-8.41	1.01	0.83	31
Transversal	39.46	-1.10	-32.28	1.48	1.00	31

Auch eine signifikante Verbesserung der Stabilität bei der Bahnberechnung nach der Umstellung auf die neue Manöverparametrisierung kann nachgewiesen werden. Diese wirkt sich sowohl in einer Steigerung der Anzahl der Basisliniendifferenzen, die nach der Filterung für einen relativen Basislinienvergleich übrig bleiben, von bis zu 90% aus, als auch in einer um den Faktor von ca. 4.5 niedrigeren Fehlerquote in der Berechnung (vgl. Tabelle 23).

Tabelle 23: Fehlerquoten in der Bahnberechnung mit der neuen und alten Manöverparametrisierung.

Manöverparametrisierung	Fehlerquote in der Berechnung	Anzahl der Bahnbögen nach der Filterung der Basisliniendifferenzen		Gesamtanzahl der untersuchten Bahnbögen
		Vergleich mit:		
		Bernese	GSOC	
Alt	15,3% (18 Bahnbögen)	41	38	118
Neu	3,4% (4 Bahnbögen)	72	69	118

Da die Ursache für den Berechnungsfehlschlag von den insgesamt vier betroffenen Bahnbögen jedoch nicht in der neuen Manöverparametrisierung zu liegen scheint, kann in der ausgewählten Testreihe von einer nahezu 100%-ger Erfolgsquote in der Berechnung gesprochen werden.

Trotz den signifikanten Verbesserungen in der Basisliniengenauigkeit und der Stabilität der Bahnberechnung dank der neuen Manöverparametrisierung, scheint an dieser Stelle noch genügend Verbesserungspotential vorhanden zu sein, der in den obigen Ergebnissen deutlich wird. Einer der limitierenden Faktoren hierfür könnte in der Beschränkung der Parametrisierungsschrittweite auf 30 Sekunden bei der Bildung von empirischen Beschleunigungen liegen. Dies lässt nur einen beschränkten Spielraum für eine hoch präzise Approximierung der Strörkraft aufgrund der Manöver zu. Weitere Limitierungen werden durch die implizite Bahnglättung verursacht. So können keine

scharfen Grenzen bei der Manöverapproximierung gebildet werden, wodurch eine Teilverteilung der Störkraft, die durch ein Manöver verursacht wird, auf die benachbarte Bahnabschnitte stattfindet.

Abschließend lässt sich sagen, dass die neue Manöverparametrisierung signifikante Verbesserung mit sich bringt, die Genauigkeit der Basislinien gesteigert wird, und der operationelle Ablauf der Basislinienberechnung zuverlässiger wird. Die Möglichkeiten für weitere Verbesserungen mit EPOS-OC stehen offen.

Anhang

Grundlage für das folgende UNIX-Script bildet die Routine mit der alten Manöverparametrisierung, die durch das neue Verfahren ausgetauscht wurde und das Script dahingehend angepasst wurde.

```
1: #!/bin/sh
2: echo
3: PROC_NAME=`basename $0`
4: if [ $# -ne 1 ]
5: then
6:     echo
7:     echo " USAGE : $PROC_NAME <EPOSIN>"
8:     echo " *** Exit $PROC_NAME"
9:     echo
10:    exit 1
11: fi
12: echo " Start $PROC_NAME $*"
13: echo
14:
15: # Shell zur Aufstellung einer Parametrisierung von Manoevern
16: #
17: # Eingabe:
18: # Dateien:
19: #   EPOSIN ... EPOSIN
20: #   MANFILE ... Manöverdatei von ~ppr
21: #
22: # Ausgabe:
23: # Dateien:
24: #   EPOSIN ... modifiziertes EPOSIN
25: #
26: # Sub-Shell-Aufrufe:
27: #   st_rtnjd2
28: #   st_rtnord
29: #   jd2_2_yyddsssss
30: #   y4doy_2_yymmdd
31: #
32: # Autor: RK 2011/04/04
33: # Modifikation: RK 2011/07/21 Neue a-priori Sigmas
34: #               GM 2011/09/15 Use TDT maneuver epoch instead of UTC
35: #               RK 2011/10/28 kl. Formataenderung
36: #               AR 2013/01/29 Neue Manöverparametrisierung
37: #
38: # release no:   1.5
39: # release date: 2013/01/29
40:
41: # Joblog
42: THIS_DIR=`pwd`
43: JOBLOG=$THIS_DIR/$$.JOBLOG
44: cat /dev/null >$JOBLOG
45: echo "-----" >>$JOBLOG
46: date "+Start $PROC_NAME $* am %d.%m.%y %H:%M:%S auf `hostname`" >>$JOBLOG
47:
48: # Temporaere Dateien aufräumen
49:
50: trap "cd $THIS_DIR ; /bin/rm -f $THIS_DIR/zz?.$$ ; exit" EXIT INT KILL
51:
52: # Prelude
53:
54: prelude_file=$CHAMP_CMD/.the_prelude
55: if [ ! -f $prelude_file ]
56: then
57:     echo "\007\nERROR inside `basename $0` $prelude_file does not exist!\n"
58:     exit
59: fi
60: . $prelude_file
61:
62: _CFG_FILE_2_cfg_file_
63:
```

```

64:
65: # Spezifikationen
66:
67: EPOSIN=$1
68: T0=`ZEITRAUM_2_t0_t1 $EPOSIN | awk '{print $1}'`
69: T1=`ZEITRAUM_2_t0_t1 $EPOSIN | awk '{print $2}'`
70: #4063.45833333333348491578 4064.04201388888895962737
71: cp -p $EPOSIN $EPOSIN.$$
72:
73: MANFILE=`_the_alias_of MANEUVERS`
74:
75:
76: # Erste EMPICOEF-P0R pro Manoever im gesuchten Zeitraum suchen
77: cat /dev/null > zz1.$$
78: /bin/grep "^EMPICOEF P0R" $MANFILE | awk '{t=1*substr($0,45) ; if ((t>=t0) && (t<=
    t1)) print $0 }' t0=$T0 t1=$T1 >> zz1.$$
79: #EMPICOEF P0R 1 -0.000210000 99999.0 4063.581095880
80: #EMPICOEF P0R 1 -0.000160000 99999.0 4063.614028750
81: #123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
82: # 1 2 3 4 5 6
83:
84: # Darueberliegende Eintraege ausgeben
85: ANZ=`cat zz1.$$ | wc -l`
86: COUNT=1
87: cat /dev/null > zz2.$$
88: while [ $COUNT -le $ANZ ]
89: do
90: PATTERN=`head -$COUNT zz1.$$ | tail -1`
91: sed -n "/$PATTERN/{g;p};h" $MANFILE >> zz2.$$
92: #Manoever 20110216 01:55:40.5 5.55 -0.000210000 0.012240000 -
    0.000670000
93: #Manoever 20110216 02:43:05.9 5.80 -0.000160000 -0.013000000
    0.000910000
94: #1 2 3 4 5 6 7
95: COUNT=`expr $COUNT + 1`
96: done
97: sed "s%^ %g" zz2.$$ > zz3.$$
98:
99: # Neue Manoeverparameter festlegen
100: COUNT=1
101: while [ $COUNT -le $ANZ ]
102: do
103: ACTMAN=`head -$COUNT zz2.$$ | tail -1`
104:
105: # Echter Beginn der Manoever
106: YMMDD=`echo $ACTMAN | awk '{print $2}' | cut -c3-8`
107: XJD2=`st_rtnjd2 $YMMDD`
108: HH=`echo $ACTMAN | awk '{print $3}' | cut -c1-2`
109: NN=`echo $ACTMAN | awk '{print $3}' | cut -c4-5`
110: SEC=`echo $ACTMAN | awk '{print $3}' | cut -c7-10`
111: XJD2=`echo "$XJD2 + $HH / 24. + $NN / 1440 + $SEC / 86400" | bc -l`
112:
113: # Echter Beginn der Manoever in TT (from zz1.$$ file)
114: XJD2=`head -$COUNT zz1.$$ | tail -1 | cut -c45-58`
115:
116: # Manoeverlaenge in s
117: MAN_LENGTH=`echo $ACTMAN | awk '{print $4}'`
118: IML=`echo $ACTMAN | awk '{print int($4)}'`
119: # Manoeverende
120: XJD2_MANEND=`echo "$XJD2 + $MAN_LENGTH / 86400" | bc -l`
121:
122: # Manoevergroesse
123: DVR=`echo $ACTMAN | awk '{print $5}'`
124: DVT=`echo $ACTMAN | awk '{print $6}'`
125: DVN=`echo $ACTMAN | awk '{print $7}'`
126:
127: #Definition der Manoeverpunkte.
128: IXJD2_A=`echo $XJD2 | awk '{print int($1 * 86400. + 15.)}'` #Anfangspunkt=
    erster Punkt waehrend des Manoevers 15 sec. nach
129: XJD2_A=`echo "$IXJD2_A / 86400." | bc -l` #dem Manoeveranfang
130: IXJD2_M=`echo $XJD2 $MAN_LENGTH | awk '{print int($1 * 86400. + $2 / 2.)}'`
131: XJD2_M=`echo "$IXJD2_M / 86400." | bc -l` #
    Mittelpunkt des Manoevers, fuer Manoever < 60 sec. wichtig.
132:
133: if [ $IML -lt 60 ]; then #wenn der Manoever < 60 sec.,
    wird der Anfangspunkt in die Mitte
134: XJD2_A=$XJD2_M #des Manoevers gesetzt.

```

```

135:     fi
136:
137:     #Vorhergehende Punkte.
138:     #Erster vorhergehender Punkt.
139:     if [ $IML -lt 30 ]; then
140:     IXJD2_15V=`echo $XJD2_A | awk '{print int($1 * 86400. - 30.)}'` #bei
        Manoeverlaenge < 30 sec., 30 sec. vor dem Anfangspunkt.
141:     else
142:     IXJD2_15V=`echo $XJD2 | awk '{print int($1 * 86400. - 15.)}'` #sonst 15
        sec. vor dem Manoeveranfang.
143:     fi
144:     XJD2_15V=`echo "$IXJD2_15V / 86400." | bc -l`
145:
146:     IXJD2_15V2=`echo $XJD2_15V | awk '{print int($1 * 86400. - 30.)}'` #zweiter
        vorhergehender Punkt.
147:     XJD2_15V2=`echo "$IXJD2_15V2 / 86400." | bc -l`
148:
149: #Berechnung des Zeitpunktes fuer den naechsten Punkt des 6 min Rasters.
150: IXJD2_15V_360=`echo $XJD2_15V | awk '{print int($1 * 240.)}'`
151: IXJD2_15V2_360=`echo $XJD2_15V2 | awk '{print int($1 * 240.)}'`
152: IXJD2_A_360=`echo $XJD2_A | awk '{print int($1 * 240.)}'`
153: XJD2_15V_360=`echo "$IXJD2_15V_360 / 240." | bc -l`
154: XJD2_15V2_360=`echo "$IXJD2_15V2_360 / 240." | bc -l`
155: XJD2_A_360=`echo "$IXJD2_A_360 / 240." | bc -l`
156:
157: #Berechnung der zeitlichen Differenz zwischen dem Manoeverpunkt und dem naechsten
        Punkt des 6 min Rasters. Differenz in 1 sec Einheiten.
158: IDI6_V=`echo $XJD2_15V $XJD2_15V_360 | awk '{print int(($1-$2)*86400.+0.0000001
        )}'`
159: IDI6_V2=`echo $XJD2_15V2 $XJD2_15V2_360 | awk '{print int(($1-$2)*86400.+
        0.0000001)}'`
160: IDI6_A=`echo $XJD2_A $XJD2_A_360 | awk '{print int(($1-$2)*86400.+0.0000001)}'`
161: #Ueberpruefen ob der Punkt auf dem 6 min Raster liegt, falls ja verschieben um 2
        sec
162: if [ $IDI6_V -eq 0 ]; then
163: XJD2_15V=`echo "($IXJD2_15V + 2.) / 86400." | bc -l`
164: fi
165: if [ $IDI6_V2 -eq 0 ]; then
166: XJD2_15V2=`echo "($IXJD2_15V2 + 2.) / 86400." | bc -l`
167: fi
168: if [ $IDI6_A -eq 0 ]; then
169: IXJD2_A=`echo $XJD2_A | awk '{print int($1 * 86400. + 2.)}'`
170: XJD2_A=`echo "$IXJD2_A / 86400." | bc -l`
171: fi
172: #####
173: ##### Manoeverparameter vor dem Manoever #####
174: #####
175: YYDDSSSSS=`jd2_2_yyddsssss $XJD2_15V2`
176: YY=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $1}'`
177: DDD=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $2}'`
178: SSSS=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $3}'`
179: YYMMDD=`y4doy_2_yymmdd "20"$YY $DDD`
180: HH=`echo $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int($1/3600)}'`
181: NN=`echo $HH $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int(($2-$1*3600)/60)}'`
182: SEC=`echo $HH $NN $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",$3-$2*60-$1*3600}'`
183: XJD2_15V2=`echo $XJD2_15V2 | awk '{printf "%14.9f\n",$1}'`
184: echo "          Zusaetzlicher Manoeverparameter vor dem Manoever :    "$
        XJD2_15V2" = "$YYMMDD" "$HH":"$NN":"$SEC >> zz3.$$
185: echo "EMPICOEF POR 1      0.000000000+0.10000000e-05"$XJD2_15V2 >> zz3.$$
186: echo "EMPICOEF POT 1      0.000000000+0.10000000e-05"$XJD2_15V2 >> zz3.$$
187: echo "EMPICOEF PON 1      0.000000000+0.10000000e-05"$XJD2_15V2 >> zz3.$$
188:
189: YYDDSSSSS=`jd2_2_yyddsssss $XJD2_15V`
190: YY=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $1}'`
191: DDD=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $2}'`
192: SSSS=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $3}'`
193: YYMMDD=`y4doy_2_yymmdd "20"$YY $DDD`
194: HH=`echo $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int($1/3600)}'`
195: NN=`echo $HH $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int(($2-$1*3600)/60)}'`
196: SEC=`echo $HH $NN $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",$3-$2*60-$1*3600}'`
197: XJD2_15V=`echo $XJD2_15V | awk '{printf "%14.9f\n",$1}'`
198: echo "          Manoeverparameter vor dem Manoever :    "$XJD2_15V" = "$
        YYMMDD" "$HH":"$NN":"$SEC >> zz3.$$
199: echo "EMPICOEF POR 1      0.000000000+0.10000000e-01"$XJD2_15V >> zz3.$$
200: echo "EMPICOEF POT 1      0.000000000+0.10000000e-01"$XJD2_15V >> zz3.$$
201: echo "EMPICOEF PON 1      0.000000000+0.10000000e-01"$XJD2_15V >> zz3.$$
202: #####
203: ##### Manoeverparameter waehrend des Manoevers #####

```

```

204: #####
205: #Anzahl der 30 sec Laengen im Manoever, gerechnet ab 15-en Sekunde seit dem
      Manoeveranfang bis 15 sec. vor dem Manoeverende.
206: #Gangzaehlicher Wert. Anzahl der Punkte waehrend des Manoevers = Steps +1.
207: if [ $IML -gt 30 ]; then
208: Steps=`echo $MAN_LENGTH | awk '{print int(($1 - 30.) / 30.)}'`
209: else
210: Steps=0
211: fi
212:
213: #a priori Werte der Manoeverparameter waehrend des Manoevers. Gleichmaessige
      Verteilung des Impulses auf alle Punkte: Wert=GSOC/N.
214: #Mit N=Steps+1 - Anzahl der Punkte waehrend des Manoevers.
215: DVR_P=`echo "$DVR / ($Steps + 1.)" | bc -l`
216: DVT_P=`echo "$DVT / ($Steps + 1.)" | bc -l`
217: DVN_P=`echo "$DVN / ($Steps + 1.)" | bc -l`
218:
219: if [ $Steps -gt 0 ]; then #bei einer Manoeverlaenge > 60 sec. und mindestens
      2 Punkten waehrend des Manoevers.
220: #exakter Abstand zwischen den Punkten waehrend des Manoevers, bei einer
      gleichmaessigen Punktverteilung.
221: StepL=`echo $MAN_LENGTH $Steps | awk '{print int(($1 - 30.) / $2)}'`
222: else
223: StepL=0 #bei nur einem Manoeverpunkt.
224: fi
225: IXJD2_A=`echo $XJD2_A | awk '{print int($1 * 86400.)}'`
226:
227: #Definition der Punkte waehrend des Manoevers
228: for i in `seq 0 $Steps`;
229: do
230:
231: IXJD2_P=`echo "$IXJD2_A + $StepL * $i" | bc -l`
232: XJD2_P=`echo "$IXJD2_P / 86400." | bc -l`
233:
234: IXJD2_P360=`echo $XJD2_P | awk '{print int($1 * 240.)}'` #Berechnung des
      naechsten Punkten des 6 minuetigen Rasters
235: XJD2_P360=`echo "$IXJD2_P360 / 240." | bc -l`
236: #zeitliche Differenz zwischen dem Manoeverpunkt und dem naechsten Punkt des 6
      min Rasters. Differenz in 1 sec Einheiten.
237: IDI6_P=`echo $XJD2_P $XJD2_P360 | awk '{print int(($1-$2)*86400.+0.0000001)
      }'`
238: #Ueberpruefen ob der Punkt auf dem 6 min Raster liegt, falls ja verschoben um
      2 sec
239: if [ $IDI6_P -eq 0 ]; then
240: XJD2_P=`echo "($IXJD2_P + 2.) / 86400." | bc -l`
241: fi
242: Count=`echo "$i + 1." | bc -l`
243:
244: YYDDSSSSSS=`jd2_2_yyddssssss $XJD2_P`
245: YY=`echo $YYDDSSSSSS | awk -F: '{print $1}'`
246: DDD=`echo $YYDDSSSSSS | awk -F: '{print $2}'`
247: SSSS=`echo $YYDDSSSSSS | awk -F: '{print $3}'`
248: YYMMDD=`y4doy_2_yymmdd "20"$YY $DDD`
249: HH=`echo $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int($1/3600)}'`
250: NN=`echo $HH $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int(($2-$1*3600)/60)}'`
251: SEC=`echo $HH $NN $SSSS | awk '{printf "%02.0f\n", $3-$2*60-$1*3600}'`
252: XJD2_P=`echo $XJD2_P | awk '{printf "%14.9f\n", $1}'`
253: echo " Manoeverparameter waehrend des Manoevers Nr.: $Count : "$
      XJD2_P" = "$YYMMDD" "$HH":"$NN":"$SEC >> zz3.$$
254: echo $DVR_P $XJD2_P | awk '{printf "EMPICOEF POR 1 %14.9f+0.10000000e-04%
      14.9f\n", $1, $2}' >> zz3.$$
255: echo $DVT_P $XJD2_P | awk '{printf "EMPICOEF POT 1 %14.9f+0.10000000e-04%
      14.9f\n", $1, $2}' >> zz3.$$
256: echo $DVN_P $XJD2_P | awk '{printf "EMPICOEF PON 1 %14.9f+0.10000000e-04%
      14.9f\n", $1, $2}' >> zz3.$$
257: done
258: #####
259: ##### Manoeverparameter nach dem Manoever #####
260: #####
261: IXJD2_15N=`echo "$IXJD2_P + 30." | bc -l` #erster nachfolgender Punkt, 30 sec
      . nach dem letzten Punkt waehrend des Manoevers.
262: XJD2_15N=`echo "$IXJD2_15N / 86400." | bc -l`
263:
264: IXJD2_15N2=`echo $XJD2_15N | awk '{print int($1 * 86400. + 30.)}'` #
      zweiter nachfolgender Punkt.
265: XJD2_15N2=`echo "$IXJD2_15N2 / 86400." | bc -l`
266:
267: #Berechnung der naechsten Punkte des 6 minuetigen Rasters

```



```

268: IXJD2_15N_360=`echo $XJD2_15N | awk '{print int($1 * 240.)}'`
269: IXJD2_15N2_360=`echo $XJD2_15N2 | awk '{print int($1 * 240.)}'`
270: XJD2_15N_360=`echo "$IXJD2_15N_360 / 240." | bc -l`
271: XJD2_15N2_360=`echo "$IXJD2_15N2_360 / 240." | bc -l`
272: #Zeitliche Differenz zwischen dem Manoeverpunkt und dem naechsten Punkt des 6
    min Rasters. Differenz in 1 sec Einheiten.
273: IDI6_N=`echo $XJD2_15N $XJD2_15N_360 | awk '{print int(($1-$2)*86400.+0.0000001
    )}'`
274: IDI6_N2=`echo $XJD2_15N2 $XJD2_15N2_360 | awk '{print int(($1-$2)*86400.+
    0.0000001)}'`
275: #Ueberpruefen ob der Punkt auf dem 6 min Raster liegt, falls ja verschieben um
    2 sec.
276: if [ $IDI6_N -eq 0 ]; then
277:   XJD2_15N=`echo "($IXJD2_15N - 2.) / 86400." | bc -l`
278:   fi
279:   if [ $IDI6_N2 -eq 0 ]; then
280:     XJD2_15N2=`echo "($IXJD2_15N2 - 2.) / 86400." | bc -l`
281:     fi
282:
283: YYDDSSSSS=`jd2_2_yyddsssss $XJD2_15N`
284: YY=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $1}'`
285: DDD=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $2}'`
286: SSSS=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $3}'`
287: YYMMDD=`y4doy_2_yymmdd "20"$YY $DDD`
288: HH=`echo $SSSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int($1/3600)}'`
289: NN=`echo $HH $SSSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int(($2-$1*3600)/60)}'`
290: SEC=`echo $HH $NN $SSSSS | awk '{printf "%02.0f\n", $3-$2*60-$1*3600}'`
291: XJD2_15N=`echo $XJD2_15N | awk '{printf "%14.9f\n", $1}'`
292: echo "      Manoeverparameter nach dem Manoever :      "$XJD2_15N" = "$
    YYMMDD" "$HH":"$NN":"$SEC >> zz3.$$
293: echo "EMPICOF POR 1      0.000000000+0.10000000e-01"$XJD2_15N >> zz3.$$
294: echo "EMPICOF POT 1      0.000000000+0.10000000e-01"$XJD2_15N >> zz3.$$
295: echo "EMPICOF PON 1      0.000000000+0.10000000e-01"$XJD2_15N >> zz3.$$
296:
297: YYDDSSSSS=`jd2_2_yyddsssss $XJD2_15N2`
298: YY=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $1}'`
299: DDD=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $2}'`
300: SSSS=`echo $YYDDSSSSS | awk -F: '{print $3}'`
301: YYMMDD=`y4doy_2_yymmdd "20"$YY $DDD`
302: HH=`echo $SSSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int($1/3600)}'`
303: NN=`echo $HH $SSSSS | awk '{printf "%02.0f\n",int(($2-$1*3600)/60)}'`
304: SEC=`echo $HH $NN $SSSSS | awk '{printf "%02.0f\n", $3-$2*60-$1*3600}'`
305: XJD2_15N2=`echo $XJD2_15N2 | awk '{printf "%14.9f\n", $1}'`
306: echo "      Zusaetzlicher Manoeverparameter nach dem Manoever :      "$
    XJD2_15N2" = "$YYMMDD" "$HH":"$NN":"$SEC >> zz3.$$
307: echo "EMPICOF POR 1      0.000000000+0.10000000e-05"$XJD2_15N2 >> zz3.$$
308: echo "EMPICOF POT 1      0.000000000+0.10000000e-05"$XJD2_15N2 >> zz3.$$
309: echo "EMPICOF PON 1      0.000000000+0.10000000e-05"$XJD2_15N2 >> zz3.$$
310:
311: COUNT=`expr $COUNT + 1`
312: done
313: if [ $ANZ -gt 0 ]; then
314: IOB=`/bin/grep -n "^EMPICOF P0" $EPOSIN | head -1 | awk -F: '{print $1}'`
315: IOBm1=`expr $IOB - 1`
316: IOE=`/bin/grep -n "^EMPICOF P0" $EPOSIN | tail -1 | awk -F: '{print $1}'`
317: sed "$IOB,$IOE d" $EPOSIN \
318: | sed "$IOBm1 r zz3.$$" > zz4.$$ ; mv zz4.$$ $EPOSIN
319: diff $EPOSIN $EPOSIN.$$
320: else
321: echo "Keine Manoever gefunden"
322: fi
323: # Aufraeumen
324:
325: cd $THIS_DIR
326: date "+ Ende $PROC_NAME $* am %d.%m.%y %H:%M:%S auf `hostname`" >>$JOBLOG
327: cat $JOBLOG > joblog_$PROC_NAME
328: cat $JOBLOG >> Joblog
329:
330: rm -f $JOBLOG
331:
332: # Ende
333:
334: echo
335: echo " Ende $PROC_NAME $*"
336: echo

```


Literaturverzeichnis

Berger C., Biancale R., Ill M., Barlier F. (1998). *Improvement of the empirical thermospheric model DTM: DTM94 – a comparative review of various temporal variations and prospects in space geodesy applications*. Journal of Geodesy, Vol. 72, Ausgabe 3, Seiten 161-178.

Bruinsma S., Tamagnan D., Biancale R. (2004). *Atmospheric densities derived from CHAMP/STAR accelerometer observations*. Planetary and Space Science Vol. 52, Ausgabe 4, Seiten 297–312.

Cappellari J. O., Velez C. E., Fuchs A. J. (1976). *Mathematical theory of the Goddard trajectory determination system*. NASA Technical Report, NASA-TM-X-71106.

Carrère L., Lyard F., Cancet M., Guillot A., Roblou L. (2012). *FES2012: A new global tidal model taking advantage of nearly 20 years of altimetry*. Proceedings of meeting "20 Years of Altimetry".

DGFI (2010). *Jahresbericht des Deutschen Geodätischen Forschungsinstitutes für 2010*. <http://www.dgfi.badw.de/>.

Doornbos E. (2001). *Modeling of non-gravitational forces for ERS-2 and ENVISAT*. Wissenschaftliches Bericht an Delft Institute for Earth-Oriented Space Research, Delft University of Technology.

Drewes H. (2009). *The Actual Plate Kinematic and crustal deformation Model (APKIM2005) as basis for a non-rotating ITRF*. International Association of Geodesy Symposia, Springer Verlag, Vol. 134, Seiten 95-99.

Eanes R. J., Schutz B., Tapley B. (1983). *Earth and ocean tide effects on Lageos and Starlette*. Proceedings of the Ninth International Symposium on Earth Tides. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. Seiten 239-250.

Eshagh M. und Najafi Alamdari M. (2006). *The effect of solid tide in geopotential field of an elastic and inelastic earth*. Journal of the Earth & Space Physics, Vol. 32, Ausgabe 3, Seiten 1-9.

Fienga A., Laskar J., Morley T., Manche H., Kuchynka P., Le Poncin-Lafitte C., Budnik F., Gastineau M. und Somenzi L. (2009). *INPOP08, a 4-D planetary ephemeris: from asteroid and time-scale computations to ESA Mars Express and Venus Express contributions*. Astronomy und Astrophysics, Vol. 503, Ausgabe 3, Seiten 1675-1686.

Folkner W. M., Williams J. G. und Boggs D. H. (2008). *The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421*. IPN Progress Report 42–178.

Gérard P., Brian L. (2010). *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Note Nr. 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. <http://www.iers.org>.

Hartmann T. und Wenzel H. (1995). *The HW95 tidal potential catalogue*. Geophysical Research Letters, Vol. 22, Ausgabe 24, Seiten 3553–3556.

Keller W. (2007). *Overview of Space Geodesy Techniques*. Vorlesungsscript am Geodätischen Institut, Universität Stuttgart.

Krieger G., Fiedler H., Zink M., Hajnsek I., Younis M., Huber S., Bachmann M., Hueso Gonzalez J., Werner M., Moreira A. (2007). *TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry*. Proceedings of the IET International Conference on Radar Systems (RADAR), Seite 5.

Marini J. W. und Murray C. W. (1973). *Correction of Laser Range Tracking Data for Atmospheric Refraction at Elevations Above 10 Degrees*. NASA Goddard Space Flight Center X-591-73-351.

Mendes V. B., Prates G., Pavlis E. C., Pavlis D. E., Langley R. B. (2002). *Improved mapping functions for atmospheric refraction correction in SLR*. Geophysical Research Letters, Vol. 29, Ausgabe 10, Seiten 53-1:53-4.

Mendes V. B. und Pavlis E. C. (2004). *High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths*. Geophysical Research Letters, Vol. 31, Ausgabe 14.

Pitjeva E. V. (2009). *Ephemerides EPM2008: The updated model, constants, data*. Veröffentlicht in "Journées 2008 Systèmes de référence spatio-temporels", M. Soffel und N. Capitaine, Lohrmann-Observatorium und Observatoire de Paris.

Seeber G. (2003). *Satellite Geodesy*. Walter de Gruyter Verlag.

Sneeuw N. (2006). *Physical Geodesy*. Vorlesungsscript am Geodätischen Institut, Universität Stuttgart.

Sneeuw N. (2006) (2). *Dynamic Satellite Geodesy*. Vorlesungsscript am Geodätischen Institut, Universität Stuttgart.

Teunissen P. J. G. (1995). *The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation*. Journal of Geodesy, Vol. 70, Ausgabe 1-2, Seiten 65-82.

Wahr J. M. (1981). *The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic, and oceanless Earth*. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 64, Ausgabe 3, Seiten 705-727.

Wübbena G. (1989). *The GPS adjustment software package GEONAP, Concepts and models*. Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Physical science laboratory in Las Cruces, Vol. 1, Seiten 452-461.



ISSN 1610-0956