

Geodätisches Institut Lehrstuhl für Geodäsie (Grundlagen)

Entwickeln einer Methodik zur universellen Höhenüberwachung von Küstenpegeln (NN-SAT)

BMBF-Förderkennzeichen 03K/S005 bzw. 03K/S006 Laufzeit 1.11.1998 - 31.10.2002





Abschlußbericht



Bundesanstalt für Gewässerkunde

| 1 | Inha | lt | | | | | | |
|--|--|---|--|--|--|--|--|--|
| 1 | Inhal | t | 1 | | | | | |
| 2 | Einle | itung | 3 | | | | | |
| 3 | Örtliche Arbeiten auf den Stationen, Netz, Daten- und Auswertezentrum, Messkampagnen | | | | | | | |
| 3.1 | GPS- | Permanentstationsnetz und örtliche Arbeiten auf den Stationen | 4 | | | | | |
| 3.2 | Dater | nmanagement | 7 | | | | | |
| 3.3 | Durch | nführung von Messkampagnen | 8 | | | | | |
| 4 | Integ | ration GPS/GLONASS | 9 | | | | | |
| 5 | Ausw | vertearbeiten der GPS-Messkampagnen und GPS-Permanentnetze | 9 | | | | | |
| 5.1 Auswertung des EUREF-SAPOS-Netzes 5.1.1 Zielstellung 5.1.2 Netzaufbau und Realisierung 5.1.3 Auswertung | | | | | | | | |
| 5 | .1.5 | Zusammenfassung der Untersuchungen zur globalen und kontinentalen Höhenüberwachung | 20 | | | | | |
| 5.2 5 5 5 5 | Ausw .2.1 .2.2 .2.3 .2.4 | ertung des Experimentes "NN-SAT '99" Zielstellung Netzaufbau und Realisierung Auswertung Ergebnisse mit WaSoft | 20 20 20 21 21 | | | | | |
| 5 5 | .2.5 .2.6 | Ergebnisse mit der Berner Software Zusammenfassung der Ergebnisse des Experimentes "NNSAT `99" | 24 25 | | | | | |
| 5.3 5 5 5 5 | Ausw .3.1 .3.2 .3.3 .3.4 | uswertung des 10-wöchigen Datensatzes aus dem Jahr 2000 Zielstellung Datensatz und Realisierung Ergebnisse Zusammenfassung der Ergebnisse des 10-wöchigen Datensatzes aus dem | | | | | | |
| 5.4 | Ausw | Jahr 2000 ertung von GPS-Kampagnen zur Höhenbestimmung von Küstenpegeln und | 30 | | | | | |
| 5 5 5 5 | Pege .4.1 .4.2 .4.3 5.4.3. 5.4.3. 5.4.3. 5.4.4. 5.4.4. 5.4.4. .4.5 | In im Küstenvorfeld Einführung GPS-Auswertestrategie und Rechenstellen Die Kampagnen Außenems 1999 und Außenems 2001 1 Beschreibung der Kampagnen 2 Ergebnisse Die Kampagne Außenelbe 2001 1 Beschreibung der Kampagne 2 Ergebnisse Beurteilung der Pegelkampagnen und Schlußfolgerungen | 31 32 34 .34 .35 42 .42 .43 48 | | | | | |
| 5 | .4.6 | Integration der GPS-Höhen in das Landessystem | 49 | | | | | |
| 6 | GPS | und Radiometrie | 55 | | | | | |
| 6.1 6 6 6 6 | Theo .1.1 .1.2 .1.3 .1.4 | rie Troposphärische Laufzeitkorrektur Das Modell der horizontal geschichteten Troposphäre Mapping Funktionen Geneigte Troposphäre (Gradientenmodell) | 55 55 56 57 57 | | | | | |

| 6.2 Wass | erdampfradiometrie | 59 |
|-----------|---|----|
| 6.3 Erget | onisse zur Messungsdurchführung und Auswertung der | |
| Radio | ometerbeobachtungen | 60 |
| 6.3.1 | Kalibrierung der meteorologischen Sensoren | 61 |
| 6.3.2 | Validierung der meteorologischen Messungen mit Daten des DWD | 63 |
| 6.3.3 | Untersuchung der WVR-Daten auf Störungen | 68 |
| 6.3.4 | Untersuchungen des Einflusses von Regen auf die WVR-Daten | 70 |
| 6.3.5 | Untersuchungen des Einflusses von Messungen im Umkreis der Sonne | 70 |
| 6.3.6 | Vorbehandlung der Radiometerdaten bzw. Filterung der errechneten SWD | |
| | bzw. ZWD | 70 |
| 6.3.7 | Inversionskoeffizienten | 73 |
| 6.3.8 | Vergleich der Radiometer | 74 |
| 6.3.9 | Vergleich GPS – Radiometer | 75 |
| 6.3.10 | Kalibrierung der Klinometer | 78 |
| 6.3.11 | Gradientenberechnung | 79 |
| 6.3.12 | Untersuchung verschiedener Ansätze zur Integration von Resultaten der | |
| | meteorologischen Daten in die GPS-Auswertung | 84 |
| 6.4 Zusai | mmenfassung der Radiometriearbeiten | 86 |
| 7 Zusa | mmenfassung der Ergebnisse | 87 |
| 8 Abbil | dungsverzeichnis | 88 |
| 9 Litera | atur | 91 |
| 10 Anha | ing | 94 |
| | | |
| 10.1 | Anhang – GPS-Permanentnetze | 94 |
| 10.2 | Anhang – Troposphäre | 96 |

2 Einleitung

Höhenänderungen an Küstenpegeln können durch lokale, kontinentale und globale Effekte hervorgerufen werden. Hierzu ergeben sich durch satellitengestützte Messverfahren und eine darauf aufbauende neue geodätische Infrastruktur der deutschen Landesvermessungsbehörden neue Ansätze für die Höhenüberwachung von Küstenpegeln.

Das BMBF-Projekt "NN-SAT" (Förderkennzeichen 03KIS005 u. 03KIS006) wurde als Verbundvorhaben vom Geodätischen Institut der TU Dresden und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bearbeitet. Die Projektarbeit wurde unterstützt durch das Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG), der Landesbetrieb für Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), die Forschungsstelle Küste Norderney des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie (NLÖ) und die Vermessungs- und Katasterbehörde Osnabrück.

Die TU Dresden bearbeitete schwerpunktmäßig den kontinentalen und regionalen Aspekt im Anschluss an global überwachte geodätische Fundamentalstationen unter Nutzung der vorhandenen permanenten GPS-Infrastruktur von EUREF (European Permanent Network (EPN), BKG (German Reference Network (GREF)) und LGN (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS), Anteil Niedersachsen) (Augath et al, 2001). Der Schwerpunkt lag dabei in der verbesserten Erfassung der troposphärischen Refraktion mittels Mikrowellenradiometern. Daneben wurden auch die Einflüsse der GPS-Signalgualität auf den Messstandorten, des Abstandes der Zwischenstationen und der verbesserten Mehrdeutigkeitsbestimmung auf die Höhengenauigkeit untersucht. Von der BfG wurden in unterschiedlichen Testgebieten an der Nordsee verschiedene Strategien zur Bestimmung und Überwachung von Höhen mit GPS im lokalen Bereich durchgeführt und analysiert. Ihr oblag auch die Optimierung des Überganges von global-kartesischen Koordinaten physikalische Küstenbereich. auf Höhen im Als Eraebnis haben sich vielversprechende Ansätze für die satellitengestützte Höhenüberwachung ergeben.

3 Örtliche Arbeiten auf den Stationen, Netz, Daten- und Auswertezentrum, Messkampagnen

3.1 GPS-Permanentstationsnetz und örtliche Arbeiten auf den Stationen

Das Gebiet des Projektes NN-SAT erstreckt sich im westlichen Niedersachsen in etwa von Osnabrück bis zur ostfriesischen Nordseeküste.

Aus diesem Bereich liegen GPS-Daten und meteorologische Messdaten unterschiedlicher Institutionen und Stationen vor. Die GPS-Daten stammen von den 14 Permanentstationen des niedersächsischen SAPOS-Netzes im Projektgebiet, von **EUREF-Permanentnetzes** umliegenden Stationen des und von GPS-Messkampagnen der Bundesanstalt für Gewässerkunde und des Geodätischen Institutes der TU Dresden. Des Weiteren liegen Messungen der zwei Wasserdampfradiometerstationen vor. Außerdem sind umfangreiche meteorologische Datensätze von ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes und des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie vorhanden. Eine Übersicht mit den verschiedenen Stationen im Projektgebiet befindet sich in Abbildung 2.

Das SAPOS-Netz im Projektgebiet wurde in den Jahren 1999 und 2000 von der LGN modernisiert und verdichtet. Im Frühjahr 2000 war der Ausbau vollständig abgeschlossen. Die GPS-Permanentstationen sind mit modernen 12-Kanalempfängern und zugehörigen Antennen der Typen Microcentered L1/L2 oder Choke-Ring L1/L2 der Firma Trimble ausgestattet.

Sämtliche eingesetzte Antennen wurden an der LGN Hannover und der TU Dresden kalibriert (Wagner, 2002).

Nach vergleichenden Tests zwischen den Antennentypen Choke-Ring L1/L2 und L1/L2-Mirocentered Permanent der Firma Trimble, wurde beschlossen, an den Standorten Carolinensiel, Norderney und Osnabrück die qualitativ etwas hochwertigeren Antennen des Typs Choke-Ring L1/L2 einzusetzen (Broßmann, 1999).



Abbildung 1: Ergebnisse der Phasenmehrwegeuntersuchung der GPS-Standorte auf Norderney, alte SAPOS-Station (0644) - rechts, neue SAPOS-Station (0670 hier test) - links

Sämtliche SAPOS-Stationen im Projektgebiet wurden nach dem Dresdener Modell (Wildt, Wanninger 1998) und (Augath u.a., 2002) einer intensiven Qualitätskontrolle unterzogen. Es zeigte sich, dass die SAPOS-Station Norderney 0644 außergewöhnlich starke Mehrwegeeffekte aufwies. Aus diesem Grund wurde eine Verlegung dieser Station erforderlich. Nach Vergleich der Datenqualität verschiedener Standorte und der auftretenden Mehrwegefehler fiel die Wahl auf den Standort "Kooperative Gesamtschule Norderney" (0670).



Die Ergebnisse der Mehrwegeuntersuchungen dieser beiden Stationen (0644 und 0670) sind in Abbildung 1 dargestellt.

Abbildung 2: Übersichtskarte Projektgebiet NN-SAT, EUREF-/SAPOS-Stationen u. Stationen der BfG- und TUD-Kampagnen, genutzte meteorologische Stationen von DWD und NLÖ, Radiometerstandorte



Abbildung 3: Neuer GPS-Standort Norderney, Wasserwerk "Weiße Düne", hier im Bau



Abbildung 4: Geodynamische GPS-Permanentstation "Weiße Düne"

Die beiden Wasserdampfradiometer des Projektes mit zugehörigen meteorologischen Sensoren wurden an den Standorten "Vermessungs- und Katasterbehörde Osnabrück" und "Kooperative Gesamtschule Norderney" betrieben.

Diese Standorte befinden sich in unmittelbarer Nähe der GPS-Permanentstationen, was logistische und finanzielle Vorteile hat.

In den Jahren 2001 und 2002 wurde auf der Insel Norderney ein Standort für eine GPS-Station gesucht, die den Anforderungen für geodynamische Untersuchungen genügt. Auf dem Gelände des Wasserwerkes "Weiße Düne" der Stadtwerke Norderney wurde ein solcher Standort gefunden. Die bereits bestehende Infrastruktur einer Luftüberwachungsstation des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie konnte dabei mit benutzt werden. Für die GPS-Station wurde ein ca. 2,20 m hoher, isolierter Betonpfeiler errichtet. Für den Betrieb eines Wasserdampf-

radiometers wurden ebenfalls die notwendigen Voraussetzungen geschaffen.

Durch Bohrprofile in der Nähe befindlicher Brunnen ist die Zusammensetzung des Untergrundes bekannt. Der Standort kann als geologisch stabil betrachtet werden. In der Nähe der Station befindet sich ebenfalls ein Grundwasserpegel. Mögliche Auswirkungen von Grundwasserschwankungen auf die Höhenkomponente können so künftig untersucht werden.

Wie bereits erwähnt, wurden im Rahmen des Projektes verschiedene GPS-Kampagnen und GPS-Permanentnetze ausgewertet. Diese sind im einzelnen in Tabelle 1 aufgeführt.

| Pkt. | Aufgabe | Umfang | Status | Software | Zweck |
|------|--|---|---|---|--|
| 1 | Auswertung des Experimentes "NN- SAT '99" | 10 Tage | abge- schlossen | WaSoft, BSW | Untersuchung eines verdichteten SAPOS- Netzes auf Höhengenauigkeit |
| 2 | Auswertung eines 10-wöchigen Datensatzes | 10 Wochen | abge- schlossen | WaSoft, BSW | Untersuchung SAPOS- Kette / Küste direkt auf Höhengenauigkeit |
| 3 | Auswertung eines EUREF-SAPOS- Netzes | 30 Monate | abge- schlossen | BSW | Lagerung des Projekt- netzes, Erzeugen von Troposphärenpara- metern zum Vergleich mit Radiometermes- sungen |
| 4 | Auswertung der GPS-Messungen auf Pegelstationen | Je einige Tage | abge- schlossen | Geonap, BSW, Geo- Genius, GP- Survey | Bestimmung der NN- Höhen von Küstenpegeln im Anschluss an SAPOS und andere lokale Bezugspunkte |
| 5 | Auswertung der Basislinie Osnabrück – Norderney unter Verwendung von Radiometer- messungen | Daten von ca. 200 Tagen, Tests mit 10 Tagen | erste Erfahrungen und Ergebnisse | WaSoft, BSW | Untersuchung zur Höhengenauigkeit bei Verwendung von Wasserdampfradio- metermessungen |

Tabelle 1: Übersicht der im Rahmen des Projektes ausgewerteten GPS-Kampagnen und -Netze

3.2 Datenmanagement

Das Management der vorliegenden umfangreichen Datensätze verschiedenster Art und die umfangreichen Auswertearbeiten erforderten die Einrichtung eines Datenund Auswertezentrums am Geodätischen Institut der TU Dresden.

Die GPS-Messdaten der eigenen Kampagnen, des SAPOS-Netzes Niedersachsen und des EUREF-Permanentnetzes werden in einer institutseigenen Struktur vorgehalten, die sich an das Datenarchiv des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie anlehnt. Zur GPS-Auswertung erforderliche Produkte des IGS (International GPS-Service for Geodynamics) und anderer Institutionen werden darin eingegliedert. Die

Datenbeschaffung erfolgte via Internet oder CD. Die meteorologischen Daten der Radiometerstationen, des DWD und des NLÖ sowie die Radiosondendaten des BADC (British Atmospheric Data Centre) sind von geringerem Umfang und können auf CD gehalten werden.

Die Ergebnisse der umfangreichen Berechnungen befinden sich ebenfalls in einer gesonderten Datenstruktur.

Der Datenbestand ist somit übersichtlich und leicht zugänglich. Er wurde und ist regelmäßig auf anderen Datenträgern zu sichern.

3.3 Durchführung von Messkampagnen

Im Rahmen des Projektes führte das Geodätische Institut der TU Dresden die Feldkampagne "NN-SAT 99" durch. Von Seiten der BfG (Bundesanstalt für Gewässerkunde) Koblenz wurden die Daten der drei Messkampagnen Außenems 1999, Außenems 2001 und Außenelbe 2001 beigesteuert. Auf diese wird in einem gesonderten Kapitel eingegangen.

In Tabelle 2 sind die GPS-Permanentstationen aller Feldkampagnen dargestellt.

Die Kampagne der TU Dresden diente der örtlichen Erzeugung zusätzlicher Testdaten für die Optimierung der Mehrdeutigkeitsbestimmung. Im Zeitraum vom 09.09.1999 bis zum 20.09.1999 fand sie im Raum Weser-Ems in Zusammenarbeit mit dem LGN Hannover statt.

| Name | SAPOS-ID | 4-buchstabiger Kode |
|---------------|-----------|---------------------|
| Aurich | 0646 | AURI |
| Borkum | 0674 | BORK |
| Carolinensiel | 0667 | CARO |
| Cloppenburg | 0659 | CLOP |
| Cuxhaven | 0641 | CUXH |
| Damme | 0668 | DAMM |
| Emden | 0647 | EMDN |
| Esterwegen | 0669 | ESTR |
| Fürstenau | 0673 | FUER |
| Helgoland | 0714 | HELG |
| Leer | 0645 | LEER |
| Meppen | 0643/0683 | MEPP/MPEN |
| Norderney | 0644/0670 | NNEY/NONE |
| Nordhorn | 0658 | NOHO |
| Oldenburg | 0656 | OLDN |
| Osnabrück | 0642 | OSNA |
| Westerbork | | WSRT |
| Wilhelmshaven | 0648 | WLHV |

Tabelle 2: Übersicht der im Projektgebiet befindlichen GPS-Permanentstationen mit zugehörigen Abkürzungen

Ziel war das Simulieren eines verdichteten SAPOS-Netzes mit einem mittleren Stationsabstand von 20 Kilometern. Dieses Szenario entsprach einem seinerzeit angedachten kombinierten SAPOS/WSV-Netz. Die zu besetzenden Messpunkte wurden auf Festpunkten der LGN so gewählt, dass sich die Strecke zwischen zwei benachbarten SAPOS-Stationen halbiert. Zusätzlich durfte die Punktumgebung nur geringe Abschattungen und keine möglichen Quellen von Mehrwegeeffekten aufweisen. Als Ergebnis stehen zehn mal 23,5 Stunden Messdaten von insgesamt 19 Stationen für Untersuchungen zur Verfügung.

4 Integration GPS/GLONASS

Im Rahmen des Projektes sollte in einem Arbeitspaket untersucht werden, ob die Integration von GLONASS-Satelliten zu einer Steigerung der Höhengenauigkeit führt. Die Untersuchungen wurden mit Hilfe von MAN-GPS/GLONASS-Empfängern durchgeführt, die auf Sensoren der Fa. Javad zurückgreifen. Es fanden mehrwöchige Messreihen auf Stationen mit bekannten Koordinaten im Entfernungsbereich 10-50 km statt (Dieter, 2001). Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der GeoGenius-Software der Fa. Terrasat (jetzt TRIMBLE). Leider weisen die GLONASS-Satelliten traditionell eine geringe Lebensdauer auf und können offenbar aufgrund der begrenzten finanziellen Möglichkeiten Russlands nicht im erforderlichen Umfang ersetzt werden. Zum Zeitpunkt der Untersuchungen existierten nur noch 7 statt der ursprünglich 24 Satelliten. Deswegen wundert es auch nicht, dass mit den kombinierten Datensätzen keine Steigerung der Höhengenauigkeit nachzuweisen war. Mit der vollen Konfiguration von GLONASS oder später mit dem europäischen GALILEO-System ist eine Verbesserung zu erwarten.

5 Auswertearbeiten der GPS-Messkampagnen und GPS-Permanentnetze

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der im Kapitel 3 beschrieben Netze und Kampagnen dargestellt werden.

Im Rahmen des Projektes "NN-SAT" war eine große Anzahl von GPS-Auswertearbeiten erforderlich. Zum besseren Verständnis werden diese in drei Abschnitte eingeteilt. Zunächst wird die Auswertung eines kombinierten EUREF-/SAPOS-Netzes vorgestellt. Diese Rechenarbeiten dienten der Lagerung des Projektnetzes im Bezugssystem ITRS und damit dem globalen Anschluss des Projektgebietes sowie dem Erzeugen von Troposphärenparametern zum Vergleich mit Radiometermessungen.

Die Darstellung der Arbeiten zum Thema "verbesserte Mehrdeutigkeitsbestimmung und Höhengenauigkeit" schließt sich an. Dieser Abschnitt umfasst die Auswertung der Kampagne "NN-SAT '99" der TU Dresden und Rechenarbeiten im SAPOS-Netz des Projektgebietes im Jahr 2000. Im letzten Abschnitt werden Kampagnen zur Pegelhöhenbestimmung im Anschluss an SAPOS und andere lokale Bezugspunkte beschrieben.

5.1 Auswertung des EUREF-SAPOS-Netzes

5.1.1 Zielstellung

Diese Berechnungen dienten der Zielstellung, die GPS-Stationen des NN-SAT-Netzes in der aktuellen Realisierung des ITRS zu lagern und mit GPS den absoluten totalen troposphärischen Laufzeitfehler in Zenitrichtung (ZTD) zu berechnen. Dieser soll dann mit dem Wert aus Wasserdampfradiometermessungen verglichen und einer gegenseitigen Validierung zugeführt werden.

Die Überwachung des SAPOS-Permanentstationsnetzes im Bereich Weser-Ems wurde durch Einbindung in das internationale Bezugssystem ITRS über das EUREF-Permanentnetz gewährleistet. Diese Berechnungen stellten Koordinaten- und Geschwindigkeitssätze in der jeweiligen Realisierung des ITRS zur Verfügung. Außerdem wurden mit GPS geschätzte Werte der absoluten troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (ZTD) zur Verfügung gestellt. Diese Werte konnten zur Validierung der Wasserdampfradiometermessungen eingesetzt werden.

5.1.2 Netzaufbau und Realisierung

Das sich aus den obigen Anforderungen ergebende Netz umfasst neben den SAPOS-Stationen des Projektgebietes ausgewählte Stationen des EUREF-Permanentnetzes.

Die Ausdehnung des Netzes ergab sich aus dem Stand der Wissenschaft für die zuverlässige Troposphärenschätzung mit auf Doppeldifferenzbasis arbeitender GPS-Software. Demzufolge sollte das Netz eine Mindestausdehnung von 500 km bzw. 800 km aufweisen (Bevis, 1992 und Kruse, 2000).

Ein weiteres Kriterium stellte das Vorhandensein von Kalibrierdaten für die auf den EPN-Stationen verwendeten Antennen dar. Die Auswahl der EUREF-Stationen erfolgte so, dass möglichst nur Antennentypen vorkommen, für die individuelle oder typenspezifische Kalibrierdatensätze der Antennenphasenzentrumsfehler vorliegen. Auf in unmittelbarer Nähe des Projektgebietes gelegene EUREF-Stationen konnte jedoch nicht verzichtet werden (HELG, KOSG, WSRT). Für diese Antennensysteme wurden Korrekturdatensätze anderer Institutionen eingesetzt.

Nach den Anforderungen wurde ein kontinentales Netz mit einer Ausdehnung von ca. 2500 km \times 2500 km gebildet und ausgewertet. Es ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die Berechnungen umfassten einen Zeitraum von Juni 1999 bis September 2001 (Weid, 2001). Die Lagerung des Netzes erfolgte auf ausgewählten Stationen des EUREF-Permanentnetzes.

Die Auswertung wurde IGS-konform mit Sessionen der Länge von 24 Stunden durchgeführt.



Abbildung 5: Netz des kombinierten EUREF-SAPOS-Netzes, die Stationen im Weser-Ems-Gebiet sind nicht einzeln beschriftet, dazu siehe Abbildung 2.

5.1.3 Auswertung

Die Auswertung des Netzes erfolgte mit der Berner Software, Version 4.2 unter Berücksichtigung des Standes der Wissenschaft für die hochpräzise Koordinatenschätzung in kontinentalen Netzen (Rothacher et al., 1997).

Zur Bildung der Einfachdifferenzfiles fand der Algorithmus "VARY-SO" Verwendung. Damit wurde der Gegebenheit des Wechsels von geringen und großen Stationsabständen im Netz Rechnung getragen. Dieser Algorithmus wird in Kapitel 5.3.2 erläutert.

Zur Lösung der Mehrdeutigkeitsunbekannten kam die Strategie QIF zum Einsatz. Die Troposphärenmodellierung erfolgte mit dem Apriori - Modell von Saastamoinen unter Verwendung der Mappingfunktionen New Mapping Functions (NMF) hydrostatisch und nicht-hydrostatisch (Mendes, 1999). Die Troposphärenparameter wurden absolut mit der Mappingfunktion NMF hydrostatisch geschätzt. Zur Koordinatenschätzung hatten die Troposphärenparameter eine Gültigkeitsdauer von einer Stunde, bei der Troposphärenschätzung hingegen eine Gültigkeit von einer halben Stunde.

Endgültige, präzise Bahndaten des IGS wurden zur Minimierung des Einflusses der Orbitfehler verwendet. In der Sessionslösung erfolgte eine elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen mit dem Sinusquadrat des Zenitwinkels als Gewichtungsfunktion. Zur Modellierung von Auflastdeformationen durch Ozeangezeiten (OTL) fanden das Modell CSR 4 und GOTH00_2 Verwendung. Als Korrekturparameter für die Antennenphasenzentrumsfehler kamen in den ersten Berechnungen (Weid, 2001) relative Korrekturmodelle zur Anwendung. Bei der endgültigen Auswertung wurden Korrekturmodelle auf Absolutniveau (Wagner, 2002) eingesetzt.

Die Lösungen der Sessionen einer GPS-Woche wurden anschließend zu Wochenlösungen zusammengefasst. Die so erzeugten Koordinatensätze fanden zur Fixierung aller Stationen auf diesen Koordinaten bei der Schätzung des absoluten troposphärischen Laufzeitfehlers in Zenitrichtung Verwendung.

Die Auswertung erfolgte für die Koordinatenbestimmung und zur Schätzung des zenitalen troposphärischen Laufzeitfehlers in je vier Varianten. In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Lösungen aufgeführt und kurz erläutert.

Die Lösung A_C stellt das Resultat eines Zwischenschrittes im Auswerteprozess (Floatlösung) dar und ist nur für Zwecke der Vollständigkeit mit aufgeführt. Die Festsetzung der Mehrdeutigkeitsunbekannten ist hier noch nicht erfolgt. Die Versionen C1, C2 und C3 der Sessionslösungen setzen die Lösung der Mehrdeutigkeiten voraus und unterscheiden sich in der angewandten Elevationsmaske und der möglichen zusätzlichen Schätzung eines Paares horizontaler troposphärischer Gradientenparameter pro Session.

Die Lösungen zur Troposphärenschätzung variieren in den folgenden Parametern: verwendete Höhenwinkelmaske, mit oder ohne Schätzung eines Paares horizontaler troposphärischer Gradienten und dem Korrekturmodell für Auflastdeformationen durch Ozeangezeiten.

| Variante | Auswerteziel | Auswerteparameter |
|----------|--------------|---|
| A_C/A_ | Koordinaten | Floatlösung, 5° Elevation, keine horizontal. trop. Gradienten |
| C1 | Koordinaten | 5° Elevation keine horizontalen trop. Gradienten |
| C2 | Koordinaten | 5° Elevation, ein horizontaler trop. Gradient |
| C3 | Koordinaten | 10° Elevation, ein horizontaler trop. Gradient |
| T1 | Troposphäre | 5° Elevation, CSR4, |
| T2 | Troposphäre | 10° Elevation, CSR4 |
| Т3 | Troposphäre | 5° Elevation, CSR4, ein horizontaler trop. Gradient |
| T4 | Troposphäre | 5° Elevation, GOTH00 2, ein horizontaler trop. Gradient |

Tabelle 3: Übersicht der Varianten der einzelnen Sessionslösungen zur Bestimmung von Koordinaten und Troposphärenfehler

5.1.4 Ergebnisse

Wiederholbarkeiten¹ der Koordinatenkomponenten

Die Wiederholbarkeiten der Wochenlösungen des Netzes für die jeweiligen Koordinatenkomponenten in den vier Lösungsvarianten sind in den Darstellungen Abbildung 6 bis Abbildung 8 dargestellt.

Die Abbildungen umfassen den gesamten Auswertezeitraum von Juni 1999 bis September 2001. Die Wechsel der Referenzrahmen sind als vertikale Striche in den Graphen eingetragen.



Abbildung 6: Netzwiederholbarkeit der Wochenlösungen, Nordkomponente

In sämtlichen Darstellungen ist ersichtlich, dass die Beträge der Wiederholbarkeiten der Floatlösung am größten sind. Die Lösungen mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten unterscheiden sich geringer. Die Varianten C2 und C3 weisen die besten Ergebnisse bei den Lagekomponenten auf. Die bedeutet, dass sich die Schätzung von horizontalen troposphärischen Gradienten vorwiegend auf die Lage auswirkt. Die Höhe ist bei allen drei C-Lösungen gleich genau.

Deutlich ist die um Faktor zwei bis drei schlechtere Wiederholbarkeit der Höhenkomponente zu erkennen. Des Weiteren ist festzustellen, dass die GPS-Lösung nicht immer zu einem befriedigenden Ergebnis führt. Dieses kann mit an einigen Tagen aufgetretenen Datenproblemen einiger Stationen begründet werden.

Die Mittelwerte der Wiederholbarkeiten mit zugehöriger Standardabweichung der einzelnen Lösungsvarianten in Tabelle 4 machen deutlich, dass die Wiederholungsgenauigkeiten der Lösungen nur gering variieren. Die C2-Lösung erzielt die besten Ergebnisse und sollte künftig genutzt werden. Einschränkend muss jedoch gesagt werden, dass die Auswertung mit Gradientenschätzung nur bei Netzen sehr großer Ausdehnung sinnvoll ist.

¹ Wiederholbarkeit (vom Englischen repeatability) entspricht der Wiederholungsgenauigkeit



Abbildung 7: Netzwiederholbarkeit der Wochenlösungen, Ostkomponente



Abbildung 8: Netzwiederholbarkeit der Wochenlösungen, Höhenkomponente

| | Nord [mm] | | Ost | [mm] | Höhe [mm] | |
|----|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----------|
| | Mittel | Standabw. | Mittel | Standabw. | Mittel | Standabw. |
| C1 | 1.2 | 0.4 | 1.1 | 0.7 | 3.2 | 1.1 |
| C2 | 0.9 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | 3.1 | 1.6 |
| C3 | 0.9 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | 3.2 | 1.5 |

Tabelle 4: Mittlere Netzwiederholbarkeiten der Koordinatenkomponenten für die einzelnen Lösungsvarianten, in Millimeter

Die Mittelwerte der Wiederholbarkeiten mit zugehöriger Standardabweichung des Mittels der C2-Lösung sind in Tabelle 5 tabellarisch für die einzelnen Stationen des

NN-SAT-Netzes aufgeführt. Auf eine Darstellung der Lösungen C1 und C3 soll verzichtet werden, da diese ähnlich ausfallen.

In der Tabelle 5 wird ersichtlich, dass die mittlere Wiederholbarkeiten der Ostkomponente besser als die der Nordkomponente ausfällt. Beide Beträge liegen unter 1 mm. Die mittleren Wiederholbarkeiten der Höhe streuen stärker und schwanken zwischen 2,7 mm und 3,9 mm.

| | Nord | | С | Ost | | Höhe | |
|-----------------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--|
| | Mittel | Standabw. | Mittel | Standabw. | Mittel | Standabw. | |
| Osnabrück | 0.8 | 0.3 | 0.7 | 0.3 | 2.8 | 1.1 | |
| Emden | 0.9 | 0.3 | 0.7 | 0.3 | 3.4 | 1.3 | |
| Aurich | 0.9 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 3.1 | 1.2 | |
| Leer | 0.9 | 0.4 | 0.7 | 0.5 | 3.3 | 1.6 | |
| Norderney (neu) | 0.9 | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 3.5 | 2.8 | |
| Wilhelmshaven | 0.9 | 0.4 | 0.8 | 0.4 | 3.6 | 2.1 | |
| Carolinensiel | 0.8 | 0.3 | 0.6 | 0.3 | 3.3 | 1.1 | |
| Hohenbühnstorf | 0.8 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 2.9 | 1.4 | |
| Nordhorn | 0.8 | 0.3 | 0.7 | 0.3 | 3.1 | 1.4 | |
| Fürstenau | 0.8 | 0.3 | 0.7 | 0.3 | 2.9 | 1.1 | |
| Esterwegen | 0.8 | 0.3 | 0.7 | 0.3 | 2.7 | 1.2 | |
| Damme | 0.8 | 0.3 | 0.7 | 0.3 | 3.0 | 1.2 | |
| Cloppenburg | 0.8 | 0.4 | 0.7 | 0.3 | 2.8 | 1.1 | |
| Borkum | 0.9 | 0.4 | 0.6 | 0.3 | 3.0 | 1.0 | |
| Helgoland | 0.8 | 0.4 | 0.7 | 0.3 | 3.9 | 1.5 | |
| Meppen | 1.0 | 0.6 | 0.8 | 0.3 | 3.0 | 1.1 | |
| Oldenburg | 0.9 | 0.4 | 0.7 | 0.3 | 2.8 | 1.0 | |

Tabelle 5: Mittlere Wiederholbarkeiten der Koordinatenkomponenten der einzelnen Stationen, in Millimeter, C2-Lösung

Koordinatenzeitreihen der Station Osnabrück

In den berechneten Koordinaten sind der Einfluss der Plattentektonik sowie zweimal vorgenommene Referenzrahmenwechsel enthalten. Um Aussagen über die Koordinaten der einzelnen Stationen sowie deren Änderung treffen zu können, sind diese aus der jeweiligen Realisierung des ITRS in das europäische Bezugssystem ETRS89 transformiert worden. Dadurch konnte der Einfluss der Plattentektonik beseitigt werden. Die Koordinatensprünge zwischen den einzelnen Referenzrahmen ließen sich jedoch nicht vollständig beseitigen. Als Beispiel sind in den folgenden Darstellungen Abbildung 9 bis Abbildung 11 die Koordinatenverläufe der Station Osnabrück dargestellt. Die Änderungen des Referenzrahmens sind eingetragen. Deutlich wird, dass besonders bei der Höhe im Falle einer Änderung der ITRS-Realisierung Sprünge auftreten.

Für die Analyse der Daten im Rahmen des Projektes NN-SAT ist dies nicht ausreichend, da ein Ziel des Projektes die Analyse hinsichtlich eventuell auftretender regionaler Höhenänderungen im Bereich Weser-Ems war.



Abbildung 9: Hochwert im ETRS89, aus Wochenlösungen der Station Osnabrück



Abbildung 10: Rechtswert ETRS89, aus Wochenlösungen der Station Osnabrück

Die alleinige Betrachtung der ellipsoidischen Höhen der Stationen reicht nicht aus. Zur Beseitigung der Sprünge in den Zeitreihen werden die täglichen Höhendifferenzen zwischen der SAPOS-Station Osnabrück und den anderen Stationen des Netzes gebildet.

Die Station Osnabrück wurde gewählt, da sie sich in einem geologisch stabilen Gebiet befindet. Mit dieser Herangehensweise lassen sich für die Höhe Änderungsraten bezüglich dieser Station bestimmen.



Abbildung 11: Höhe im ETRS89, aus Wochenlösungen der Station Osnabrück

Tägliche Höhendifferenzen der Stationen zur Station Osnabrück

In diesem Abschnitt sollen die täglichen Höhendifferenzen zwischen der SAPOS-Station Osnabrück und den anderen Stationen des NN-SAT-Netzes untersucht werden. Zu klären ist auch die Herkunft der in den Darstellungen ersichtlichen Effekte. Es ist zu untersuchen, ob dabei auch Anteile der Station Osnabrück enthalten sind.



Abbildung 12: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück – Emden

Die Höhendifferenzen zwischen Osnabrück und den SAPOS-Stationen Carolinensiel, Emden und Wilhelmshaven sind in den Darstellungen Abbildung 12 bis Abbildung 13 enthalten. Durchgeführte Antennenwechsel sowie Antennenhöhenänderungen, die bei einigen Stationen (siehe Wilhelmshaven) des Netzes für zusätzliche Sprünge sorgten, sind eingezeichnet. Weiterhin sind eine mittlere Kurve, aus der ein saisonaler Einfluss zu erkennen ist, sowie ein linearer Trend dargestellt.

Die erzeugten Zeitreihen sind zwar zu kurz, um Aussagen bezüglich eventueller Höhenänderungen treffen zu können. Es zeigen sich jedoch bereits saisonale Effekte (siehe Abbildung 12).



Abbildung 13: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück - Carolinensiel



Abbildung 14: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück – Wilhelmshaven

Die Werte für die Trends der einzelnen Stationen sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Diese wurden erst bei ungestörtem Kurvenverlauf (Störungen aufgrund von Antennenwechsel etc.) berechnet. Dadurch waren bei einigen Stationen nur kurze Zeitabschnitte zur Bestimmung des Trends vorhanden (siehe Spalte Anzahl der Sessionen). Eine Aussage zur Qualität der Station soll mit der Standardabweichung der Differenz der täglichen Höhen zur mittleren Kurve gegeben werden.

| | Höhenänderung Standardabw. vom Mittel der | | Anzahl der | |
|-----------------|---|---------------|----------------------------------|-----------|
| | mm/a | Fehler [mm/a] | Diff. zur geglätteten Kurve [mm] | Sessionen |
| Emden | 3.2 | 0.3 | 5.1 | 870 |
| Aurich | 1.5 | 0.4 | 4.7 | 598 |
| Leer | 1.1 | 0.3 | 4.7 | 745 |
| Norderney (neu) | 2.5 | 0.5 | 6.0 | 685 |
| Wilhelmshaven | 0.6 | 0.4 | 5.7 | 754 |
| Caroliniensiel | 2.0 | 0.4 | 5.9 | 769 |
| Hohenbühnstorf | -2.3 | 0.4 | 4.1 | 548 |
| Nordhorn | -3.0 | 0.5 | 3.8 | 485 |
| Fürstenau | -2.2 | 0.4 | 3.5 | 514 |
| Esterwegen | 0.0 | 0.3 | 3.7 | 665 |
| Damme | 1.4 | 0.3 | 2.9 | 588 |
| Cloppenburg | 1.0 | 0.3 | 3.6 | 673 |
| Borkum | -1.8 | 0.8 | 4.5 | 390 |
| Helgoland | -0.9 | 0.3 | 4.6 | 684 |
| Meppen | -2.3 | 0.5 | 4.2 | 484 |
| Oldenburg | -0.4 | 0.2 | 4.4 | 833 |

Tabelle 6: Höhenänderung bezüglich Osnabrück mit Angabe der verwendeten Sessionen, Angaben in Millimeter pro Jahr bzw. Millimeter

Zur Abschätzung der Aussagefähigkeit der Darstellungen der Höhendifferenzen wurden die geglätteten Kurven in ein Diagramm gezeichnet. Dadurch ist erkennbar, dass nicht alle Merkmale der Kurve auf die Station selbst zurückzuführen sind, sondern mitunter von der Station Osnabrück herrühren.



Abbildung 15: Darstellung einiger mittlerer Höhendifferenzen zu Osnabrück zum Vergleich

5.1.5 Zusammenfassung der Untersuchungen zur globalen und kontinentalen Höhenüberwachung

Diese Berechnungen dienten der Zielstellung, die GPS-Stationen des NN-SAT-Netzes in der aktuellen Realisierung des internationalen Bezugssystems ITRS zu lagern und mit GPS den absoluten totalen troposphärischen Laufzeitfehler in Zenitrichtung zu berechnen. Diese Werte fanden auch bei der Validierung der Wasserdampfradiometermessungen Verwendung.

Gemäß den Anforderungen wurde ein kontinentales Netz mit einer Ausdehnung von ca. 2500 km \times 2500 km gebildet und ausgewertet. Die Berechnungen umfassten einen Zeitraum von Juni 1999 bis September 2001. Zur Auswertung kamen Sessionen mit einer Länge von 24 Stunden. Die Lagerung des Netzes zur Festlegung des globalen Anschlusses erfolgte auf ausgewählten Stationen des EUREF-Permanentnetzes.

Die täglichen Lösungen wurden zu Wochenlösungen zusammengefasst. Die Wiederholbarkeiten der Koordinatenkomponenten fanden als Maß der inneren Genauigkeit in der Analyse Verwendung. Es zeigt sich, dass die Floatlösungen deutlich ungenauer als die Lösungen mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten sind. Die Auswerteoption "Schätzung horizontaler troposphärischer Gradienten" hat vor allem auf die Lagekomponenten Auswirkungen. Die erreichten Wiederholbarkeiten der Wochenlösungen sind für die horizontalen Komponenten besser als ein Millimeter. Für die Höhe betragen diese 2,7 bis 3,9 Millimeter.

In den berechneten Koordinaten sind der Einfluss der Plattentektonik und Sprünge aufgrund von Referenzrahmenwechseln enthalten. Zur Analyse der Koordinaten der einzelnen Stationen wurden diese in den Referenzrahmen ETRS89 rücktransformiert. Die Beseitigung der verbliebenen Sprünge der Vertikalkomponente erfolgte eine Differenzbildung zwischen der jeweiligen Höhe der Station Osnabrück und den anderen Stationen des Netzes. So konnten Änderungsraten der Höhenkomponente bezüglich der Station Osnabrück bestimmt werden. Diese erzeugten Zeitreihen sind zwar noch zu kurz, um eventuelle Aussagen treffen zu können. Saisonale Effekte können jedoch bereits erkannt werden.

5.2 Auswertung des Experimentes "NN-SAT '99"

5.2.1 Zielstellung

Das Experiment "NN-SAT '99" diente der Simulation eines verdichteten SAPOS-Netzes mit einem mittleren Stationsabstand von 20 Kilometern im Gebiet Weser-Ems. Ziel war es, durch verkürzte Stationsabstände eine möglichst hohe Quote an gelösten Mehrdeutigkeiten zur Verfügung zu stellen und damit eine Steigerung der Höhengenauigkeit zu erreichen.

5.2.2 Netzaufbau und Realisierung

Das für das Experiment verwendete Netz ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Verdichtungsstationen sind mit dem Symbol für "GPS-KAMPAGNEN" eingezeichnet. Der entstandene Datensatz umfasst aus Kostengründen 10 Sessionen a` 23.5 Stunden und enthält die Daten von 11 SAPOS und 8 Verdichtungsstationen. Die statistische Aussagekraft der Ergebnisse ist aufgrund des Datenumfanges begrenzt. Sie lassen jedoch trotzdem einige wichtige Schlussfolgerungen zu.

Als problematisch erwies sich ein Mix von 9- und 12-Kanalempfängern. Bei der gewählten Elevationsmaske von 5° fehlen auf mit 9-Kanalempfängern besetzten Stationen dadurch mindestens 4 % der Beobachtungen.

5.2.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte unabhängig mit den zwei Softwarepaketen Berner Software Vers. 4.2 (BSW) und WaSoft bei identischen Auswerteoptionen. Beide Programme unterscheiden sich u.a. in der Strategie zur Lösung der Mehrdeutigkeiten. Ein direkter Vergleich der gelösten Mehrdeutigkeiten ist daher nicht möglich. Die Wiederholbarkeiten der Höhe als Maß der inneren Genauigkeit können jedoch verglichen werden.

Als Auswerteoptionen zur Berechnung der Sessionslösung wurden die folgenden Varianten getestet:

- 10° Elevationsmaske mit 8 Troposphärenparametern pro Session

- 7° Elevationsmaske mit 12 Troposphärenparametern pro Session

- 5° Elevationsmaske mit 24 Troposphärenparametern pro Session

Identisch ansonsten waren die Berechnung einer Lösung unter Verwendung der gelösten Mehrdeutigkeiten, Eliminierung schlechter Beobachtungen durch Residuentest, elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen und Verwendung einer modernen Mapping Funktion mit gebrochenen Sinustermen für die Umrechnung der troposphärischen Laufzeitfehler vom Zenit auf den aktuellen Höhenwinkel.

Bei den getesteten Auswertevarianten erwies sich bei der Berner Software eine Elevationsmaske von 5° und 24 Troposphärenparametern als leicht vorteilhaft gegenüber der Variante 7° Elevationsmaske mit 12 Troposphärenparametern. Bei WaSoft war das genau umgekehrt. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten waren geringfügig und nicht signifikant. Die Option 10° Höhenwinkelmaske mit 8 zu schätzenden Troposphärenparametern erwies sich als die deutlich schlechteste. Allerdings waren die Unterschiede ebenfalls nicht signifikant. Auf weitere Ausführungen zu diesem Thema wird hier verzichtet, da diese Feststellungen im Einklang mit den Stand der internationalen Forschung stehen und auch im Rahmen der Pegel-kampagnen nochmals darauf eingegangen wird.

Für die Auswertung des Experimentes wurde das Netz in zwei Teile, Ost- und Westnetz, untergliedert. Diese stellen weitgehend unabhängige Verbindungen Osnabrück - Nordseeküste dar.

Die Auswertung dieser Stränge erfolgte als:

a) verdichtetes SAPOS-Netz (TUD) mit Feld- und SAPOS-Stationen (�)

b) reines SAPOS-Netz (SAPOS) mit SAPOS-Stationen (□) und

c) Osnabrück – SAPOS-Station direkt (direkt) ohne Zwischenstationen (**A**).

Die mit den zwei Programmpaketen erzielten Ergebnisse werden im folgenden dargestellt und anschließend verglichen.

5.2.4 Ergebnisse mit WaSoft

Mehrdeutigkeitslösung

Der von WaSoft eingesetzte Algorithmus zur Mehrdeutigkeitslösung bedingt eine "Verkettung" von Stationen ausgehend von einer zentralen Basislinie. Dabei werden die auf einer Station festgesetzten Mehrdeutigkeiten bei der Lösung der nächsten Basislinie eingeführt. Als Endergebnis befinden sich die Stationen des Netzes auf einem einheitlichen Mehrdeutigkeitsniveau. Die Prozentzahl der gelösten Mehrdeutigkeiten entspricht dem Verhältnis von Beobachtungen mit festgesetzten Mehrdeutigkeiten zur Gesamtzahl der Beobachtungen. Mit zunehmender Entfernung von der zentralen Basislinie nimmt die Zahl der festgesetzten Mehrdeutigkeiten ab, da Beobachtungsverluste durch Abschattungen, Empfängerprobleme u.ä. bzw. nicht festgesetzte Mehrdeutigkeiten auf Zwischenstationen auch zu Verlusten auf den weiter außen liegenden Stationen führen. Beobachtungen ohne festgesetzte Mehrdeutigkeiten werden eliminiert.

In Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Mehrdeutigkeitslösung als 10-Tagesmittel pro Station im Ostnetz dargestellt. Abbildung 17 stellt den gleichen Sachverhalt für das Westnetz dar.

Die Stationen ALFF, BOES, LEHE, HOHE, WACH, RAUF und OSMO sind die für das Experiment betriebenen Feldstationen. Aus diesem Grund liegt auch nur ein Wert für die Mehrdeutigkeiten vor.



Abbildung 16: Mehrdeutigkeitslösung im Oststrang, Experiment NNSAT'99, Auswertung mit WaSoft



Abbildung 17: Mehrdeutigkeitslösung im Weststrang, Experiment NNSAT'99, Auswertung mit WaSoft

Der Grad der gelösten gelösten Mehrdeutigkeiten befindet sich mit über 90 % auf sehr hohem Niveau. Die "außen" gelegenen Stationen (OSNA, NNEY und CARO) weisen im Vergleich mit den zentral gelegenen Stationen eine geringere Rate an festgesetzten Mehrdeutigkeiten auf. Deutlich sichtbar ist der Verlust an gelösten Ambiguitäten auf den SAPOS-Stationen durch Einsatz von 9-Kanalempfängern auf den Verdichtungsstationen beim Vergleich der Varianten SAPOS und TUD.

Im Falle der Basislinienweisen Berechnung (direkt) ist die Mehrdeutigkeitslösung der küstennahen Stationen i.d.R. besser als bei Verwendung der Zwischenstationen des Experimentes.

Eine verbesserte Mehrdeutigkeitslösung durch Zwischenpunkte kann aus diesem Grund in beiden Teilnetzen nicht festgestellt werden.

Wiederholbarkeit der Höhenkomponente als Maß der inneren Genauigkeit

Zur Untersuchung auf die Höhengenauigkeit wird die Wiederholbarkeit der Höhenkomponente über die 10 Tage herangezogen. In Abbildung 18 sind die erzielten Höhenwiederholbarkeiten für die SAPOS-Stationen im Ost- und Westnetz ohne die zwischengelegenen Feldstationen für die drei Berechnungsvarianten dargestellt. Zusätzlich wird das einfache arithmetische Mittel der Wiederholbarkeiten aller Stationen angegeben. Dies erlaubt einen schnellen Überblick.

In der Grafik ist gut ersichtlich, dass die Höhengenauigkeiten stationsabhängig sind. Eine eventuelle Abhängigkeit von der Entfernung von der Ausgangsstation Osnabrück (OSNA) ist in diesem Entfernungsbereich nicht erkennbar. Dies gilt für alle drei Netzvarianten. Im Diagramm wird ersichtlich, dass die Genauigkeit des verdichteten Netzes (TUD) die beste ist. Es folgen das SAPOS-Netz und die Variante mit basislinienweiser Auswertung. Die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Bei den weiter entfernt von Osnabrück liegenden Stationen ist der Genauigkeitsunterschied zwischen der basislinienweisen Lösung und den anderen zwei Lösungsvarianten größer. Es könnte sich hierbei um einen softwarebedingten Effekt handeln, da er bei der Berner Software nicht auftritt.

Ein Zusammenhang zwischen dem Grad der gelösten Mehrdeutigkeiten und der Höhenwiederholbarkeit konnte nicht gefunden werden. Vielmehr zeigt sich, dass die innere Genauigkeit der Höhenkomponente durch stationsabhängige Effekte beeinflusst wird.



Abbildung 18: Wiederholbarkeiten der Höhe, Experiment NNSAT '99, für die Auswerteoptionen verdichtetes SAPOS-Netz (TUD), SAPOS-Netz (SAPOS) und basislinienweise (direkt), Ergebnisse mit WaSoft

5.2.5 Ergebnisse mit der Berner Software

Mehrdeutigkeitslösung

Die Auswertung mit der Berner Software basiert auf der Bildung von Einfachdifferenzdateien zwischen den Stationen eines Netzes. Aufbauend auf diesen einfachen Differenzen werden im Auswerteprozess doppelte Differenzen gebildet, mit denen die Parameterschätzung erfolgt.

Für die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten stehen unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung. Aufgrund der vorliegenden Netzgröße können zwei Algorithmen Verwendung finden. Dies sind der QIF- und Sigma (L5/L3)- Algorithmus. Mit beiden erfolgte die Auswertung des SAPOS- und des verdichteten SAPOS-Netzes während des Experimentes "NN-SAT '99". Bei der basislinienweisen Auswertung wurde aufgrund der größeren Stationsabstände und des daraus resultierenden größeren ionosphärischen Restfehlers der QIF-Algorithmus eingesetzt.

In sind die Ergebnisse der Mehrdeutigkeitslösung im SAPOS- und verdichteten SAPOS-Netz dargestellt. Die Ergebnisse der basislinienweisen Lösung entfallen, da sie nahezu identisch mit den Ergebnisse der QIF-SAPOS-Variante sind.

Die Angaben sind nicht mit denen von WaSoft vergleichbar. Die Prozentzahl gibt an, wie viele Mehrdeutigkeitsparameter im Bezug auf deren Gesamtzahl einer Einfachdifferenzdatei festgesetzt wurden.

In der Darstellung wird deutlich, dass bei dieser Netzkonfiguration mit dem Sigma-Algorithmus ca. 7% mehr Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden können. Die Unterschiede zwischen Verdichtungs- und SAPOS-Netz fallen bei der Variante Sigma geringfügiger aus als bei QIF.

Folglich ist auch die Anzahl der Mehrdeutigkeitsparameter in beiden Netzkonfigurationen unterschiedlich. Aus diesem Grund ist ein Vergleich nicht aussagekräftig.



Abbildung 19: Mehrdeutigkeitslösung sessionsweise für gesamtes Netz, mit QIF- und Sigma (L5/L3)-Strategie in Verdichtungs- (Verd.-) und SAPOS-Netz (SAPOS), Berner Software

Wiederholbarkeit der Höhenkomponente als Maß der inneren Genauigkeit

In Abbildung 20 sind die aus der Berner Software stammenden Höhenwiederholbarkeiten für die SAPOS-Stationen im Ost- und Westnetz ohne zwischengelagerte Feldstationen für die drei Netzkonfigurationen dargestellt. Nachfolgend ist das einfache arithmetische Mittel der Wiederholbarkeiten aller Stationen angegeben.



Abbildung 20: Wiederholbarkeiten der Höhe, Experiment NNSAT '99, für die Auswerteoptionen verdichtetes SAPOS-Netz (TUD), SAPOS-Netz (SAPOS) und basislinienweise (direkt), Ergebnisse der Berner Software

Wie bei den Ergebnissen mit WaSoft zeigt sich der Einfluss stationsabhängiger Fehler auf die Höhengenauigkeiten. Eine eventuelle Abhängigkeit von der Entfernung zur Ausgangsstation Osnabrück (OSNA) ist ebenfalls nicht erkennbar. Dies gilt für alle drei Netzvarianten.

Die Höhenwiederholbarkeit im verdichteten Netzes (TUD) ist die beste. Die zwei anderen Netzkonfigurationen folgen mit nahezu identischer Genauigkeit der Höhenkomponente. Die Unterschiede der Wiederholbarkeiten zwischen den einzelnen Netzkonfigurationen sind jedoch nicht signifikant und können deshalb für weitere Betrachtungen wegen des hohen Aufwandes nicht empfohlen werden.

5.2.6 Zusammenfassung der Ergebnisse des Experimentes "NNSAT `99"

Das Experiment "NNSAT `99" diente der Simulation eines verdichteten SAPOS-Netz mit einem mittleren Stationsabstand von 20 km. Es wurde ein Datensatz von 10 Sessionen à 23,5 h erzeugt und ausgewertet.

Zur Auswertung konnten drei unterschiedliche Netzkonfigurationen gebildet werden. Die erste Variante stellte eine basislinienweise Auswertung Osnabrück – Station dar. Darüber hinaus konnte das SAPOS-Netz im Projektgebiet Weser-Ems in zwei Stränge von Osnabrück zur Küste unterteilt werden. Diese zwei Stränge wurden mit und ohne zusätzliche Feldstationen des Experimentes ausgewertet.

Die Auswertung erfolgte mit den zwei wissenschaftlichen Softwarepaketen Berner Software Version 4.2 und WaSoft Version 1. Als optimale Optionen erwiesen sich eine Elevationsmaske von unter 10°, die Schätzung von 12 oder 24 absoluten Troposphärenparametern pro Session mit elevationsabhängiger Gewichtung der Beobachtungen.

Die Ergebnisse der Mehrdeutigkeitslösung beider Programmpakete können nicht verglichen werden. Dies liegt an der unterschiedlich realisierten Zählweise in den Programmen.

Bei Betrachtung der gelösten Mehrdeutigkeiten pro Variante zeigte sich, dass die mit 9-Kanalempfängern ausgerüsteten zusätzlichen Feldstationen zu einem Verlust von ca. 4% an möglichen Beobachtungen führen. Daraus resultieren an den SAPOS-Stationen im verdichten Netz weniger Beobachtungen mit festgesetzten Mehrdeutigkeitsparametern. Die Quote der gelösten Mehrdeutigkeiten befindet sich mit über 80% bzw. 90% bei einer Elevationsmaske von 5° in allen Varianten auf sehr hohem Niveau.

Bei Betrachtung der Wiederholbarkeiten der Höhenkomponente als Maß der inneren Genauigkeit zeigen sich Einflüsse von stationsabhängigen Fehlern. Eine Abhängigkeit der Höhengenauigkeit von der Entfernung zur Ausgangsstation ist in diesem Entfernungsbereich nicht erkennbar.

Die Netzkonfiguration mit Zwischenstationen liefert bei beiden Softwarepaketen eine geringfügig bessere Höhenwiederholbarkeit. Die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant, da der Stichprobenumfang zu gering ist. Ein Zusammenhang zwischen der Quote der gelösten Mehrdeutigkeiten und der Wiederholbarkeit der Höhe besteht nicht.

5.3 Auswertung des 10-wöchigen Datensatzes aus dem Jahr 2000

5.3.1 Zielstellung

Diese Auswertung dieses Datensatzes aus einem Teil des SAPOS-Netzes in der Region Weser-Ems diente zur Klärung der Frage: "Ist das Verwenden von Stationen des SAPOS-Netzes als Verdichtungsstationen sinnvoll für die Bestimmung der Höhe von Küstenpegeln?". Die hier vorgestellten Arbeiten sind als Fortsetzung des Experimentes "NN-SAT '99" zu sehen.

5.3.2 Datensatz und Realisierung

Die Daten stammen vom Frühjahr/Sommer 2000 und beginnen mit der Inbetriebnahme der SAPOS-Station Fürstenau durch die LGN. Mit dieser Station war das SAPOS-Netz im Weser-Ems-Gebiet vollständig und es konnten beginnend in Osnabrück zwei unabhängige Teilnetze mit SAPOS-Stationen zur Küste gebildet werden. Die Station Osnabrück wurde stets als Datumsstation verwendet. Die Station Norderney in diesem Datensatz ist eine andere als 1999 (NONE/ 0670 statt NNEY/ 0644).

Es wurde ein Stichprobenumfang von 10 Wochen gewählt. Dieser ist wesentlich umfassender als der des Experimentes "NNSAT '99". Von diesem Datensatz konnten letztlich 64 Sessionen ausgewertet werden.

Die Auswertung des Datensatzes erfolgte mit den zwei Netzkonfigurationen "basislinienweise Osnabrück – Küste" und "Osnabrück – Küste über zwischengelagerte SAPOS-Stationen in zwei Strängen" analog zum Experiment "NNSAT '99".

Die Auswertung der Daten gestaltete sich sehr umfangreich.

Zur Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen des Experimentes "NNSAT '99" wurden die Berechnungen mit den beiden Softwarepaketen Berner Software Version 4.2 und WaSoft Version 1 unter Verwendung identischer Auswerteoptionen (siehe Kapitel 5.2) durchgeführt.

Darüber hinaus erfolgten zusätzliche Untersuchungen mit der Berner Software. Dies waren Verwendung des Algorithmus VARY-SO statt OBS-MAX zur Basislinienbildung, der Einsatz von Antennenphasenmodellen auf Relativ- und Absolutniveau, eine Auswertung mit Schätzung von relativen statt absoluten Troposphärenparametern und zwei Elevationsmasken 5° und 10°.

Der Algorithmus VARY-SO wurde entwickelt, damit die Basislinienbildung hauptsächlich von Osnabrück über die Zwischenstationen zur Küste erfolgt. Hierbei sollen Datenverluste einzelner Stationen berücksichtigt werden. Der Algorithmus OBS-MAX ist der Standard-Algorithmus der Berner Software und bildet die Basislinien in diesem Netz aufgrund des geringen Stationsabstandes ohne geometrische Struktur.

Zur Beurteilung der einzelnen Auswertevarianten werden die Größen Wiederholbarkeit der Höhe (Standardabweichung der Höhe einer einzelnen Session) als Maß der inneren Genauigkeit, die ellipsoidische Höhe der Neupunkte und die Quote der Mehrdeutigkeitslösung bei unterschiedlicher Netzkonfiguration und Basislinienbildung sowie deren Auswirkung auf die zwei vorher genannten Größen betrachtet.

5.3.3 Ergebnisse

Die einzelnen Varianten zur Auswertung mit zugehörigen Abkürzungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Aufgeführt sind Software, die Netzbildung, Algorithmus zur Basislinienbildung bzw. absolute oder relative Troposphärenschätzung, eingesetzte Phasenzentrumskorrekturen und Elevationsmaske.

| Variante | Erklärung |
|----------|--|
| BS-N05V1 | Berner Software, mit SAPOS-Stationen, VARY-SO, abs. PCV, 05° |
| | Elevationsmaske |
| BS-N10V1 | Berner Software, mit SAPOS-Stationen, VARY-SO, abs. PCV, 10° |
| | Elevationsmaske |
| BS-N05O | Berner Software, mit SAPOS-Stationen, OBS-MAX, abs. PCV, 10° |
| | Elevationsmaske |
| BS-N05V2 | Berner Software, mit SAPOS-Stationen, VARY-SO, rel. PCV, 10° |
| | Elevationmaske |
| BS-N100 | Berner Software, mit SAPOS-Stationen, OBS-MAX, abs. PCV, 10° |
| | Elevationsmaske |
| BS-D05A | Berner Software, ohne SAPOS-Stationen, abs. Trop., abs. PCV, 05° |
| | Elevationsmaske |
| BS-D10A | Berner Software, ohne SAPOS-Stationen, abs. Trop., abs. PCV, 10° |
| | Elevationsmaske |
| BS-D05R | Berner Software, ohne SAPOS-Stationen, rel. Trop., abs. PCV, 05° |
| | Elevationsmaske |
| WS-D05 | WaSoft, ohne SAPOS-Stationen, abs. Trop., 05° Elevationsmaske |
| WS-N05 | WaSoft, mit SAPOS-Stationen, abs. Trop., 05° Elevationsmaske |

Tabelle 7: Erläuterung der in den nachfolgenden Darstellungen verwendeten Auswertevarianten Mehrdeutigkeitslösung bei unterschiedlicher Netzkonfiguration und Basislinienbildung

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der Mehrdeutigkeitsfestsetzung in Abhängigkeit von durchschnittlicher Basislinienlänge und Algorithmus zur Basislinienbildung dargestellt werden.

Die Resultate sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Deutlich wird, dass bei Verwendung von zwischengelegenen SAPOS-Stationen und Einsatz des Algorithmus VARY-SO die mittlere Basislinienlänge deutlich verkürzt ist. Der Algorithmus VARY-SO ist bei derartigen Netzkonfigurationen besser geeignet als OBS-MAX.

Die Quote der durchschnittlich gelösten Mehrdeutigkeiten kann mit der eingesetzten SIGMA-Strategie auf beiden Frequenzen (L5 und L3) um 3 bis 4 % verbessert werden. Ein Vergleich der Ergebnisse der Mehrdeutigkeitslösung in den zwei Netzkonfigurationen ist nur begrenzt aussagefähig, da sich die Algorithmen unterscheiden. Die Entfernungen bei der "basislinienweisen Osnabrück – Küste" sind für die Strategie SIGMA nicht geeignet. Es muss auf die Strategie QIF zurückgegriffen werden, die wiederum bei kürzeren Entfernungen nicht optimal ist (siehe Kapitel 5.2.5). Prozentual werden bei der basislinienweisen Auswertung weniger Mehrdeutigkeitsparameter festgesetzt als bei Verwendung von Zwischenstationen. Eine Entfernungsabhängigkeit ist nicht erkennbar. Die wenigsten Mehrdeutigkeiten wurden auf der längsten Baislinie festgesetzt.

| | Algorithmus, | Mittlere | Prozentual festgesetzte |
|---------------|--------------|------------------|--------------------------|
| | Frequenz | Basislinienlänge | Mehrdeutigkeitsparameter |
| West, VARY-SO | SIGMA, L5 | 48 km | 96,7 % |
| West, OBS-MAX | SIGMA, L5 | 72 km | 92,8 % |
| Ost, VARY-SO | SIGMA, L5 | 48 km | 96,6 % |
| Ost, OBS-MAX | SIGMA, L5 | 65 km | 93,9 % |
| West, VARY-SO | SIGMA, L3 | 48 km | 88,9 % |
| West, OBS-MAX | SIGMA, L3 | 72 km | 84,9 % |
| Ost, VARY-SO | SIGMA, L3 | 48 km | 88,0 % |
| Ost, OBS-MAX | SIGMA, L3 | 65 km | 84,7 % |
| OSNA-LEER | QIF, L1&L2 | 116 km | 78,7 % |
| OSNA-WLHV | QIF, L1&L2 | 140 km | 75,0 % |
| OSNA-AURI | QIF, L1&L2 | 140 km | 82,1 % |
| OSNA-CARO | QIF, L1&L2 | 160 km | 75,8 % |
| OSNA-NONE | QIF, L1&L2 | 172 km | 77,8 % |
| OSNA-HELG | QIF, L1&L2 | 214 km | 72,9 % |

Tabelle 8: Ergebnisse der Basislinienbildung und gelöste Mehrdeutigkeitsparameter, Ost bzw. West sind die Teilnetze unter Verwendung von zwischengelegenen SAPOS-Stationen, die mit OSNA beginnenden Zeilen bedeuten Osnabrück-Station direkt

Wiederholbarkeiten der Höhenkomponente

Die Ergebnisse der Höhenwiederholbarkeit, als Maß der inneren Höhengenauigkeit, für die einzelnen Stationen sind in Abbildung 21 dargestellt.

Es wird deutlich, dass in dieser Netzausdehnung kein Zusammenhang zwischen der Entfernung von der Datumsstation und der Genauigkeit der Höhenkomponente vorliegt. Der Einfluss stationsabhängiger Fehler wird erneut sichtbar. Dies entspricht den Ergebnissen des Experimentes "NNSAT '99" (Kapitel 5.2).

Die mit WaSoft erzielten Resultate sind etwas schlechter als die der Berner Software. WaSoft schneidet bei der basislinienweisen Auswertung deutlich schlechter ab als bei Verwendung zwischengelagerter SAPOS-Stationen. Zudem scheint eine Abhängigkeit vom Stationsabstand vorzuliegen. Dabei handelt es sich jedoch um einen softwarebedingten Effekt.

Die Ergebnisse der Berner Software beider Netzkonfigurationen sind fast identisch. Es treten bei beiden Elevationsmasken 5° und 10° nur geringe Unterschiede auf.

Die beiden zur Basislinienbildung verwendeten Algorithmen erzielen fast identische Höhengenauigkeiten.

Die Verwendung von Daten mit Elevationsmaske 5° erwies sich als leicht vorteilhaft gegenüber der Elevationsmaske von 10°. Dies gilt für beide Netzkonfigurationen.

Der Einsatz von Antennenphasenmodellen auf Absolut- oder Relativniveau führt nur zu geringen Unterschieden in der Höhengenauigkeit.

Die Schätzung von absoluten Troposphärenparametern ist im Fall der basislinienweisen Auswertung besser als die relative Troposphärenfehlerschätzung.



Abbildung 21: Wiederholbarkeiten der Höhe unterschiedlicher Stationen im SAPOS-Netz Weser-Ems für die unterschiedlichen Auswertestrategien mit Station Osnabrück als Datumsstation

Ellipsoidische Höhen der Neupunkte

In diesem Abschnitt sollen die die ellipsoidische Höhe der Neupunkte für die unterschiedlichen Auswertevarianten mit der Berner Software dargestellt werden. Die Resultate sind Tabelle 9 aufgelistet. Die Zeilen 1 bis 8 enthalten die zur jeweiligen Lösung gehörenden Höhen, die Zeilen 9 bis 12 Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Varianten. In der 2. Spalte ist angegeben, zwischen welchen Zeilen die Differenzen gebildet wurden.

| | Variante | LEER | AURI | WLHV | CARO | NONE | HELG |
|----|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 116 km | 140 km | 140 km | 160 km | 172 km | 214 km |
| 1 | BS-N05V1 | 65,6624 | 65,6641 | 59,8712 | 52,9314 | 54,0279 | 48,3832 |
| 2 | BS-N10V1 | 65,6659 | 65,6638 | 59,8727 | 52,9343 | 54,0297 | 48,3844 |
| 3 | BS-N05O | 65,6624 | 65,6641 | 59,8713 | 52,9315 | 54,0278 | 48,3835 |
| 4 | BS-N05V2 | 65,6722 | 65,6756 | | 52,9342 | 54,0296 | |
| 5 | BS-N100 | | | 59,8728 | 52,9328 | | 48,3852 |
| 6 | BS-D05A | 65,6624 | 65,6622 | 59,8710 | 52,9315 | 54,0282 | 48,3839 |
| 7 | BS-D10A | 65.6649 | 65.6630 | 59,8725 | 52,9342 | 54,0295 | 48,3858 |
| 8 | BS-D05R | 65,6744 | | 59.8856 | 52.9361 | 54.0320 | 48.3925 |
| 9 | 6-8 | -0,0120 | | -0,0140 | -0,0046 | -0,0038 | -0,0086 |
| 10 | 6-7 | -0,0027 | -0,0008 | -0,0015 | -0,0027 | -0,0013 | -0,0019 |
| 11 | 1-2 | -0,0035 | 0,0003 | -0,0015 | -0,0029 | -0,0018 | -0,0012 |
| 12 | 1-4 | -0,0098 | -0,0115 | | -0,0028 | -0,0017 | |

Tabelle 9: ausgeglichene ellipsoidische Höhen für ausgewählte SAPOS-Stationen nach unterschiedlichen Auswertestrategien mit Station Osnabrück als Datumsstation

Die beiden zur Basislinienbildung eingesetzten Algorithmen VARY-SO und OBS-MAX liefern identische Ergebnisse (Zeilen1 und 3).

Die Neupunkthöhen sind bei der Schätzung von absoluten Troposphärenparametern niedriger als bei der relativen Troposphärenschätzung (Zeile 9). Es treten Differenzen von bis zu 1,4 cm auf.

In den Zeilen 10 und 11 sind die Differenzen der Lösungen zwischen 5°- und 10°-Elevationsmaske dargestellt. Die Höhen der 5°-Lösungen sind geringer als die Resultate mit 10°. Die Höhendifferenzen variieren in Abhängigkeit von der Station bis zu 3,5 mm.

Die Unterschiede zwischen den Lösungen mit absluten und relativen Antennenkorreturmodellen sind in der 12. Zeile enthalten. Bei baugleichen Antennen (CARO u. NONE) sind die Differenzen deutlich geringer als bei der Kombination verschiedener Antenenntypen (LEER und AURI). Die Höhen der Neupunkte sind bei Verwendung von absoluten Korrekturparametern geringer als bei Parametern auf Relativniveau.

5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des 10-wöchigen Datensatzes aus dem Jahr 2000

Dieser Datensatz aus einem Teil des SAPOS-Netzes in der Region Weser-Ems wurde ausgewertet, um die Ergebnsise des Experimentes "NN-SAT '99" zu überprüfen. Ausgewählte Stationen an der Küste oder in Küstennähe wurden dabei von der Station Osnabrück aus bestimmt.

Zur Auswertung konnten zwei unterschiedliche Netzkonfigurationen gebildet werden. Die erste Variante stellte eine basislinienweise Auswertung Osnabrück – Station dar. Darüber hinaus erfolgte eine Netzbildung von Osnabrück zur Küste über die zwischengelagerten SAPOS-Stationen in zwei Strängen" analog zum Experiment "NNSAT '99". Der Datensatz umfaßte 64 Sessionen.

Die Auswertung erfolgte mit den zwei wissenschaftlichen Softwarepaketen Berner Software Version 4.2 und WaSoft Version 1.

Durch Verwendung des im Rahmen des Projektes entwickelten Algorithmus zur Basislinienbildung konnte die durchschnittliche Basislinienlänge deutlich verkürzt und die Quote der Mehrdeutigkeitslösung erhöht werden. Auf die erzielte innere Genauigkeit der Vertikalkomponente oder die ellipsoidischen Höhen der Neupunkte hatte dies jedoch keinen Einfluss.

Durch Einbeziehung von zwischengelegenen Stationen des niedersächsischen SAPOS-Netzes konnten mehr Mehrdeutigkeitsparameter festgesetzt werden als bei der basislinienweisen Auswertung. Ein Zusammenhang zwischen der Quote der gelösten Mehrdeutigkeiten und der Wiederholbarkeit der Höhe besteht in diesem Netz nicht.

Bei Betrachtung der Wiederholbarkeiten der Höhenkomponente als Maß der inneren Genauigkeit zeigen sich Einflüsse von stationsabhängigen Fehlern. Eine Abhängigkeit der Höhengenauigkeit von der Entfernung zur Ausgangsstation ist nicht erkennbar. Die Resultate des Experimentes "NN-SAT '99" werden somit bestätigt.

Die Verwendung von Daten aus dem Elevationsbereich unter 10° ermöglicht trotz der schlechteren Signalqualität eine bessere Dekorrelation von Troposphäre und Höhe (Görres, 1996). Die Genauigkeit der Vertikalkomponente kann so gesteigert werden.

Der Einsatz von Antennenkorrekturparametern auf Absolutniveau statt Relativniveau führt zu anderen Höhen der Neupunkte. Auf die innere Genauigkeit hat dies keine Auswirkung.

5.4 Auswertung von GPS-Kampagnen zur Höhenbestimmung von Küstenpegeln und Pegeln im Küstenvorfeld

5.4.1 Einführung

In diesem Kapitel werden drei GPS-Kampagnen zur Bestimmung und Überprüfung der Höhe von Küstenpegeln und deren Ergebnisse vorgestellt (siehe Kapitel 3.3). Dazu finden die Daten der drei Kampagnen Außenems 1999, Außenems 2001 und Außenelbe 2001 Verwendung.

Diese Projekte wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz in Zusammenarbeit mit den zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämtern und z.T. anderen Behörden durchgeführt. Die Kampagnen erforderten regionale Netze mit einer Ausdehnung von maximal 42×49 km und umfassen GPS-Punkte auf Pegeln, SAPOS-Stationen und Nivellementpunkten, die als Passpunkte zum Übergang auf amtliche physikalische Höhen dienten.

Die auf den Pegeln befindlichen Punkte wiesen zum Teil schwierige Umgebungsbedingen auf (Aufbauten). Diese führten zu unvermeidlichen Signalstörungen (Mehrwegefehler, Diffraktion). Die Stationen wurden deshalb für Kontrollzwecke und zur Vermeidung von Ausfällen doppelt besetzt.

Da es sich um einzelne Messkampagnen handelte, ist der Stichprobenumfang mit vier bis acht Sessionen begrenzt.

Die Auswertung erfolgte mit unterschiedlichen wissenschaftlichen und kommerziellen Softwarepaketen und möglichst identischen und optimalen Auswerteoptionen. Die Berechnungen wurden in der BfG und am Geodätischen Institut der TU Dresden durchgeführt. Diese umfangreichen Auswertungen sollen nach Vergleich und Analyse der Resultate Richtlinien für die zukünftige Pegelhöhenbestimmung mit GPS liefern.

Eine Übersicht der Kampagnen findet sich in Tabelle 10.

| | Außenems 1999 | Außenems 2001 | Außenelbe 2001 |
|--------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Anzahl der Stationen | 10 (org.18) | 10 | 18 |
| Beobachtungszeiten gesamt (h) | ca. 85 | ca. 131 | ca. 90 |
| Anzahl der Sessionen | 4 | 6 | 8 |
| Elevationsmaske (°) | 10 | 5 | 5 |
| Aufzeichnungsintervall (Sekunden) | 15 | 15 | 15 |
| Netzausdehnung (N-S und W-O) | 42 km x 49 km | 42 km x 49 km | 17 km x 37 km |
| Zeitraum | 1216.07.1999 | 30.05 04.06.2001 | 2226.10.2001 |

Tabelle 10: Übersicht der GPS-Pegelkampagnen

5.4.2 GPS-Auswertestrategie und Rechenstellen

Die Beobachtungsdaten der einzelnen Kampagnen lagen, auf die jeweiligen Sessionen zugeschnitten, im RINEX-Format vor.

Antennenhöhen, Stationsbezeichnungen, Empfänger- und Antennentypen wurden in Vorbereitungsschritten mit den Programmen TEQC und WaRinex vereinheitlicht bzw. korrigiert.

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben, erfolgten die Berechnungen mit unterschiedlichen Programmpaketen. Als wissenschaftliche Software fanden GEONAP-S und die Berner Software Version 4.2 Verwendung. GPSurvey Version 2.35 und GeoGenius Version 2.00 kamen als Vertreter der kommerziellen Software zum Einsatz. Des Weiteren war eine Auswertung mit dem Programm Trimble Geomatics Office geplant. Aufgrund verschiedener organisatorischer Schwierigkeiten konnte diese nicht stattfinden.

In den Kampagnen dienten die Resultate einer Auswertevariante mit dem Programmpaket GEONAP-S als Referenzlösung.

Auf eine Vorstellung der einzelnen Auswerteprogramme soll an dieser Stelle verzichtet werden. Es sei lediglich erwähnt, dass die wissenschaftlichen Softwarepakete mehr Auswerteoptionen als die kommerziellen Programme ermöglichen.

| Institution | | Software |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| Bundesanstalt Koblenz | für Gewässerkunde (BfG), | Bernese GPS Software 4.2 (BSW) |
| Bundesanstalt Koblenz | für Gewässerkunde (BfG), | GeoGenius 2.0 (GG) |
| Bundesanstalt Koblenz | für Gewässerkunde (BfG), | GEONAP-S (GN) |
| Technische Geodätisches I | Universität Dresden, nstitut | GPSurvey 2.35 (GP) |
| Wasser- und Sachbereich 4 | Schifffahrtsamt Hamburg, | Trimble Geomatics Office (TGO) |

Tabelle 11: beteiligte Auswerteprogramme und Institutionen

Vorgaben für die Optionen zur Auswertung

Wie bereits erwähnt, erfolgten die Auswertearbeiten mit identischen Vorgaben für alle Softwarepakete. Im einzelnen waren dies:

- Verwendung präziser IGS-Bahndaten,
- Einführen absoluter azimut- und elevationsabhängiger Antennenkorrekturen aus Kalibiermessungen (Quelle: GEO++[®] GNPCV Datenbank),
- Elevationswinkel: 5 bis 10 Grad,
- elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen,
- Korrektur des troposphärischen Laufzeitfehlers mit dem Standardmodell und anschließender Schätzung von absoluten Troposphärenparametern, Verwendung einer Mapping Funktion mit gebrochenen Sinustermen, die auch für große Zenitwinkel gültig ist (>80°),
- Einheitlicher Lagerungspunkt im ITRF96 bzw. ITRF97, nach Auswertung Rücktransformation der Koordinaten nach ETRS89
- Koordinatenschätzung durch die ionosphärenfreie Linearkombination L₀/L3 nach der Mehrdeutigkeitslösung,
- Gemeinsame Ausgleichung der Sessionsergebnisse und Zusammenfassung zu einer Multisessionslösung (Gesamtlösung).

Weitere zusätzliche Auswerteoptionen

Bei einigen Programmen wurden darüber hinaus weitere Berechnungsoptionen getestet. Dabei handelte es sich um die folgenden Änderungen:

- Test eines anderen Troposphärenmodells (Davis statt Saastamoinen) mit GG bei der Kampagne Außenems 2001,
- Auswertung mit einer zusätzlichen Elevationsmaske von 10° (GG u. BSW) bei der Kampagne Außenelbe 2001,
- Schätzung relativer statt absoluter Troposphärenparameter (BSW) bei der Kampagne Außenems 2001,
- Verwendung von rein elevationsabhängigen Antennenphasenzentrumskorrekturen anstatt elevations- u. azimuthabhängiger Werte (BSW) bei der Kampagne Außenems 2001,
- Verwendung von Korrekturen für Ozeanauflastdeformationen (BSW) bei den 2001-Kampagnen,
- Auswertung mit der Option Wackelturm bei der Kampagne Außenelbe, um die Eigenbewegung der Bauwerke mit zu berücksichtigen (GN)
- Erzeugen einer Sessionlösung ohne elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen bei einer Elevationsmaske von 10° (BSW) für die Kampagnen des Jahres 2001.

Ergebnisse und Analyse

Zur Analyse der Ergebnisse dienten die folgenden Größen: Höhen der Geonap-Referenzlösung, Höhendifferenz zur Referenzlösung, Höhen der einzelnen Sessionen für die Referenzlösung, Standardabweichung der ausgeglichenen Höhe und Abweichungen der Höhendifferenz benachbarter Punkte vom nivellitischen Wert. Die Kampagnen an der Außenems lagen zu zwei unterschiedlichen Epochen vor. Die Höhen dieser Pegelpunkte konnten zusätzlich auf mögliche Veränderungen hin untersucht werden. Als letzter Schritt erfolgte der Übergang von GPS- auf die amtlich-physikalischen Gebrauchshöhen. Dazu wurde das Quasigeoidmodell EGG97 und eine Anpassung an den Landeshorizont mittels bivariatem Polynomansatz verwendet.

5.4.3 Die Kampagnen Außenems 1999 und Außenems 2001

5.4.3.1 Beschreibung der Kampagnen

Die Kampagnen an der Außenems dienten zur Höhenbestimmung der Pegel Emshörn, Dukegat und Knock. Die Pegel befinden sich am Hauptfahrwasser zwischen Emden – Knock und der Insel Borkum. Eine Übersicht der Kampagnen befindet sich in Abbildung 22.

In der Kampagne "Außenems 1999" wurden die Pegelhöhen parallel hydrostatisch und über GPS bestimmt. Mit den genauen hydrostatischen Ergebnissen stehen für Vergleichszwecke "quasi-wahre" NN-Höhen zur Verfügung. Der größte Schleifenwiderspruch des hydrostatischen Nivellements betrug bei einem Umfang von 35,6 km –9.1 mm.

Für die Überführung der ellipsoidischen GPS-Höhen in das schwerebezogene Höhensystem der Landesvermessung war eine umfangreiche Netzkonfiguration mit 18 Stationen erforderlich. Der Übergang von GPS-Höhen in das Gebrauchshöhensystem erfolgte mit dem Quasigeoidmodell EGG97.



Abbildung 22: Netzkonfiguration der Kampagnen an der Außenems

Für die hier vorgestellten Auswertungen fand nur ein optimiertes, aus 10 Punkten bestehendes, Netz Verwendung (Abbildung 22). Die drei Seepegel als Neupunkte

wurden zur Vermeidung von Ausfällen und zu Kontrollzwecken mit jeweils zwei GPS-Empfängern besetzt. Das optimierte Netz umfasste somit neben den Pegelpunkten die SAPOS-Stationen Aurich, Borkum, Emden-Knock und Norderney.

Die SAPOS-Station Emden (0641) wurde in beiden Kampagnen als Datumspunkt verwendet.

Die Pegelpunkte waren mit Empfängern des Typs Trimble 4000SSi und Antennen der Baureihe Trimble L1/L2 Microcenterd Compact bestückt.

Die Kampagne im Jahr 2001 diente dem Ziel, die Reproduzierbarkeit der mit GPS bestimmten Höhen zu beurteilen. Das Netzdesign entsprach dem optimierten Netz von 1999. Die SAPOS-Station auf Norderney wurde zwischenzeitlich verlegt (alt: 0644, neu: 0670). Die eingesetzten Empfänger- und Gerätetypen auf den Pegelpunkten waren identisch mit denen der Kampagne 1999. Auf den SAPOS-Stationen befanden sich andere Antennentypen oder diese wurden zwischenzeitlich mit Radomen ausgestattet.

Im Jahr 1999 bestand die Kampagne aus 4 Sessionen. 2001 waren es 6 Sessionen. Die Sessionen umfassten je einen Zeitraum von 24 Stunden.

5.4.3.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Ergebnisse vorgestellt und beurteilt werden. Eine Übersicht der einzelnen Lösungen dieser Kampagnen befindet sich in Tabelle 12.

| Variante | Software | Ele. [°] | Troposphären- parameter | Ozeanauf- last | weitere Besonderheiten | |
|---------------|-----------|----------|----------------------------|-------------------|--|--|
| BS05_AT | BSW | 05 | absolut | nein | | |
| BS05_RT | BSW | 05 | relativ | nein | | |
| BS05_E_AT | BSW | 05 | absolut | nein | nur elevationsabhängige PCVs | |
| BS05_OTL_AT | BSW | 05 | absolut | ja | | |
| BS05_E_OTL_AT | BSW | 05 | absolut | ja | nur elevationsabhängige PCVs | |
| BS05_OTL_RT | BSW | 05 | relativ | ja | | |
| BS10_RT | BSW | 10 | relativ | nein | | |
| BS10_AT | BSW | 10 | absolut | nein | | |
| BS10_AT | BSW | 10 | absolut | nein | | |
| BS10_O_AT | BSW | 10 | absolut | nein | ohne elevationsabh. Gewichtung d. Beob. | |
| BS10_O_AT | BSW | 10 | absolut | nein | keine elevationsabh. Gewichtung d. Beob. | |
| GN10 | Geonap | 10 | absolut | nein | | |
| GN10 | Geonap | 10 | absolut | nein | | |
| GN05 | Geonap | 05 | absolut | nein | REFERENZLÖSUNG | |
| GG05_SAAS | GeoGenius | 05 | unbekannt | nein | | |
| GG05_DAVIS | GeoGenius | 05 | unbekannt | nein | | |
| GG10_SAAS | GeoGenius | 10 | unbekannt | nein | | |
| GG10_DAVIS | GeoGenius | 10 | unbekannt | nein | | |
| GP05 | GPSurvey | 05 | unbekannt | nein | | |
| GP10 | GPSurvey | 10 | unbekannt | nein | | |

Tabelle 12: Übersicht über die Lösungen der Kampagnen Außenems

Höhen der Referenzlösung

Bei diesen Kampagnen wurde für den Vergleich der Ergebnisse die Lösung der Kampagne 2001 des Programmsystems Geonap mit einer Höhenwinkelmaske von 5° als Referenzlösung verwendet. Die Höhen dieser Lösung sind in Tabelle 13 einzusehen.

| 0301 | 0302 | 0341 | 0342 | 0351 | 0352 | AURI | BORK | EMDN | N'ney |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 53.8325 | 53.7843 | 53.4218 | 53.4024 | 51.2538 | 51.2597 | 65.6786 | 54.2235 | 56.9730 | 54.0428 |

Tabelle 13: Höhen der Referenzlösung für Kampagnen Außenems 1999 und 2001 (Geonap, 5° Elevationsmaske, 2001) in Metern
Höhendifferenzen der Lösungen zur Referenzlösung

Die Abweichungen der Höhen der unterschiedlichen Lösungen zur Referenzlösung sollen als erstes untersucht werden. In Tabelle 14 werden diese Höhenunterschiede dargestellt. Die maximalen Abweichungen sind fett hervorgehoben. Die Differenzen variieren je nach Lösungsvariante und Software. Es überwiegen die negativen Werte, d.h., die Referenzlösung liegt höher als die anderen Varianten. Die Höhen aus Lösungen unterschiedlicher Elevationsmasken unterscheiden sich. Bei den Lösungen aus der Berner Software und GPSurvey liegen die Höhen der 5°-Lösung unter denen mit 10°-Höhenwinkelmaske. Bei Geonap hingegen sind die Höhen der 5°-Lösung größer als die der 10°-Lösung. Die Resultate der Berechnungen mit GeoGenius sind nicht eindeutig, d.h., die 10°-Lösungen sind je nach Punkt tiefer oder höher als die 5°-Lösungen.

Die Beträge der Höhendifferenzen zeigen stationsabhängige Charakteristika. Dies ist bei allen 3 Punktepaaren ersichtlich.

Des Weiteren ist erkennbar, dass die Lösungen des Jahres 1999 von denen des Jahres 2001 abweichen. Die mit der Verlegung der Station Norderney verbundene Änderung der Antennenhöhe ist klar ersichtlich.

Die größten Differenzen traten bei den Lösungen von 1999 an den Stationen Borkum und Aurich auf. Ein möglicher Grund dafür sind andere Antennen auf diesen SAPOS-Stationen.

| Variante | Jahr | 0301 | 0302 | 0341 | 0342 | 0351 | 0352 | AURI | BORK | N'ey |
|---------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| BS05_AT | 2001 | -0.0049 | 0.0001 | -0.0073 | -0.0031 | -0.0130 | -0.0035 | -0.0120 | -0.0073 | -0.0030 |
| BS05_RT | 2001 | -0.0049 | 0.0000 | -0.0072 | -0.0031 | -0.0129 | -0.0034 | -0.0123 | -0.0069 | -0.0025 |
| BS05_E_AT | 2001 | -0.0046 | 0.0004 | -0.0068 | -0.0026 | -0.0122 | -0.0032 | -0.0122 | -0.0087 | -0.0030 |
| BS05_OTL_AT | 2001 | -0.0041 | 0.0007 | -0.0067 | -0.0027 | -0.0124 | -0.0030 | -0.0119 | -0.0071 | -0.0028 |
| BS05_E_OTL_AT | 2001 | -0.0043 | 0.0004 | -0.0066 | -0.0026 | -0.0122 | -0.0033 | -0.0120 | -0.0070 | -0.0028 |
| BS05_OTL_RT | 2001 | -0.0042 | 0.0005 | -0.0067 | -0.0027 | -0.0125 | -0.0031 | -0.0123 | -0.0069 | -0.0025 |
| BS10_RT | 2001 | -0.0035 | 0.0031 | -0.0054 | -0.0012 | -0.0126 | -0.0019 | -0.0142 | -0.0055 | 0.0000 |
| BS10_AT | 2001 | -0.0034 | 0.0033 | -0.0050 | -0.0009 | -0.0124 | -0.0017 | -0.0140 | -0.0053 | -0.0002 |
| BS10_AT | 1999 | -0.0160 | 0.0008 | -0.0136 | -0.0050 | -0.0183 | -0.0153 | -0.0164 | -0.0206 | -2.6759 |
| BS10_O_AT | 1999 | -0.0164 | -0.0035 | -0.0114 | -0.0057 | -0.0150 | -0.0127 | -0.0256 | -0.0171 | -2.6760 |
| BS10_O_AT | 2001 | -0.0039 | 0.0027 | -0.0045 | -0.0035 | -0.0077 | -0.0015 | -0.0094 | -0.0040 | -0.0081 |
| GN10 | 2001 | -0.0007 | -0.0017 | -0.0019 | -0.0023 | -0.0040 | -0.0053 | -0.0112 | -0.0062 | -0.0066 |
| GN10 | <mark>1999</mark> | -0.0138 | -0.0080 | -0.0086 | -0.0015 | -0.0159 | -0.0112 | -0.0196 | -0.0177 | -2.6742 |
| GG05_SAAS | 2001 | -0.0114 | -0.0012 | -0.0149 | -0.0136 | -0.0111 | -0.0058 | -0.0027 | -0.0119 | -0.0114 |
| GG05_DAVIS | 2001 | -0.0125 | -0.0024 | -0.0152 | -0.0110 | -0.0090 | -0.0066 | -0.0022 | -0.0115 | -0.0087 |
| GG10_SAAS | 2001 | -0.0129 | -0.0041 | -0.0152 | -0.0114 | -0.0100 | -0.0056 | -0.0029 | -0.0149 | -0.0146 |
| GG10_DAVIS | 2001 | -0.0119 | -0.0043 | -0.0140 | -0.0107 | -0.0095 | -0.0056 | -0.0026 | -0.0156 | -0.0150 |
| GP05 | 2001 | 0.0007 | 0.0017 | -0.0058 | -0.0039 | -0.0051 | -0.0023 | -0.0059 | -0.0019 | 0.0013 |
| GP10 | 2001 | 0.0029 | 0.0058 | -0.0033 | -0.0010 | -0.0027 | 0.0002 | -0.0080 | -0.0006 | 0.0055 |

Tabelle 14: Kampagnen Außenems 1999 und 2001, ellipsoidische Höhendifferenzen zur Referenzlösung Geonap 5° in Metern

Da eine Vielzahl von unterschiedlichen Lösungen berechnet wurden, sollen diese im folgenden für die jeweilige Software verglichen werden.

Zunächst galt es zu klären, ob bei dieser Netzausdehnung die Schätzung absoluter oder relativer Troposphärenparameter vorzuziehen ist. Dazu werden die Varianten AT und RT verglichen.

In Tabelle 14 ist ersichtlich, dass sich die Endhöhen nur geringfügig unterscheiden. Beide Lösungen liefern identische Ergebnisse, obwohl nach der Theorie bei dieser Netzgröße die Schätzung relativer Troposphärenparameter anzuwenden wäre. Als nächstes soll der Einfluss azimut-elevationsabhängiger Antennenkorrekturparameter im Vergleich zu rein-elevationsabhängigen Korrekturen untersucht werden. Die Lösungen der elevationsabhängigen Parameter sind mit E gekennzeichnet. Es zeigt sich, dass Differenzen von ca. 1 mm bei der Station Borkum auftreten können, die aber wiederum von der Lösungsstrategie abhängig ist. Die eingesetzten Antennentypen weisen folglich keine signifikanten azimutalen Asymmetrien des Phasenzentrums auf. Die Verwendung elevationsabhängiger Antennenkorrekturparameter wäre ausreichend.

Die Auswerteoption mit und ohne "elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen" wurde durch die 10°-Lösungen mit der Berner Software überprüft. Es ergeben sich Unterschiede von einigen Millimetern. Das Maximum beträgt ca. 9 mm (Station Borkum).

Die Effekte von Auflastdeformationen durch die Ozeangezeiten können in der Berner Software durch Modelle korrigiert werden (mit OTL bezeichnet).

Die dadurch auftretenden Höhenänderungen sind nicht signifikant (< 1 mm). In diesem Netz kann auf diese Korrekturen verzichtet werden.

Die Auswahl des richtigen Troposphärenmodells bei GeoGenius machte eine Auswertung mit den zwei Standardmodellen von Saastamoinen und Davis erforderlich. Es treten Höhenunterschiede von 1 bis 2 Millimetern auf. Bei den 5°-Lösungen sind die Unterschiede etwas größer als bei den 10°-Lösungen. Dies ist mit den unterschiedlichen Mapping-Funktionen der Modelle zu begründen. An dieser Stelle kann keine Einschätzung gegeben werden, welches Modell das bessere ist.



Abbildung 23: Sessionsresiduen (Höhe) der Geonap-Lösung mit 10° Elevationsmaske, Außenems 1999

Residuen der Höhen der einzelnen Sessionen für die Geonap-Referenzlösung

Da die Standardabweichungen der ausgeglichenen Höhe allein nicht aussagekräftig sind, werden an dieser Stelle die Sessionsresiduen der Geonap-Referenzlösungen der zwei Emskampagnen analysiert. In Abbildung 23 und Abbildung 24 sind diese grafisch dargestellt. Deutlich erkennbar sind die stations- und sessionsspezifische Besonderheiten. Einzelne Residuen weisen Beträge von mehr als 5 mm auf. Das Maximum beträgt ca. 15 mm in der Kampagne 1999 (Abbildung 23). Es wird deutlich, dass aufgrund des geringen Datenumfanges die Höhenbestimmung sehr problematisch ist. Von einer weiteren Verkürzung der Beobachtungszeit sollte aus diesem Grund abgesehen werden. Vielmehr wäre eine Erweiterung des Datenumfanges anzustreben.



Abbildung 24: Sessionsresiduen der Referenzlösung (Geonap, 5°-Elevationsmaske), Außenems 2001

Standardabweichungen der ausgeglichenen Höhen

Die Standardabweichungen der mittleren ellipsoidischen Höhen der Neupunkte sind in Tabelle 15 dargestellt. Diese Werte sind als Maß der inneren Genauigkeit der GPS-Lösungen anzusehen. In der rechten Spalte ist das Mittel für alle Stationen der jeweiligen Lösungsvariante angegeben und in der letzten Zeile die mittlere Standardabweichung aller Lösungen eines Punktes. Die Maximalwerte der Lösungen sind in den Zeilen fett hervorgehoben.

Die geringsten Standardabweichungen treten am Pegel Knock (0341/0342) auf. Auf diesem Pegel befinden sich die wenigsten Aufbauten, die als mögliche Störquellen

der Signale in Frage kommen. Die Standardabweichungen der Pegel Dukegat und Emshörn sind dagegen größer. Auf diesen Pegel befinden sich diverse Mastaufbauten für Laterne, Windmesser und Datenübertragung. Es ist daher anzunehmen, dass somit auch mehr stationsabhängige Fehler der GPS-Signale auftreten (z.B. Mehrwegeeffekte und Signalbeugungen). In Tabelle 15 wird außerdem deutlich, dass sich die Höhengenauigkeiten benachbarter Pegelpunkte deutlich unterscheiden (Ausnahme GN).

Die innere Höhengenauigkeit der Kampagne 1999 ist schlechter als die der Kampagne 2001. Dies ist teilweise mit dem geringeren Stichprobenumfang zu begründen, d.h. die insgesamt zur Verfügung stehende Beobachtungszeit war geringer.

Beim Vergleich der unterschiedlichen Programmpakete wird deutlich, dass die innere Höhengenauigkeit der Resultate aus BSW und GP besser ist als die aus GN und GG. Am schlechtesten schneidet hier die Lösung GG ab.

Bei der GG-Lösung zeigt sich, dass die Ergebnisse des Troposphärenmodells Davis etwas besser sind als die des Modells Saastamoinen.

Die gewählte Elevationsmaske hat auf die Standardabweichungen bei verschiedenen Programmen einen unterschiedlichen Einfluss. So sind diese bei den BSW- und GP-5°-Ergebnissen geringer als bei 10°. Die Genauigkeit der Geonap-Resultate ist bei beiden Elevationsmasken identisch. Bei GG sind die 10°-Lösungen besser als die mit 5° Elevationsmaske.

| Variante | Jahr | 0301 | 0302 | 0341 | 0342 | 0351 | 0352 | AURI | BORK | N'ey | Mittel |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| BS10_RT | 2001 | 2.7 | 1.1 | 0.8 | 0.7 | 1.9 | 1.0 | 2.2 | 1.3 | 1.3 | 1.4 |
| BS10_AT | 2001 | 2.6 | 0.9 | 0.8 | 0.6 | 2.0 | 1.0 | 2.2 | 1.1 | 1.3 | 1.4 |
| BS10_AT | 1999 | 2.2 | 2.2 | 3.7 | 0.9 | 1.9 | 1.5 | 3.4 | 1.9 | 2.8 | 2.3 |
| BS10_O_AT | 2001 | 3.0 | 2.1 | 0.8 | 0.7 | 2.9 | 1.2 | 2.2 | 1.8 | 1.7 | 1.8 |
| BS10_O_AT | 1999 | 2.6 | 2.1 | 3.3 | 0.9 | 0.8 | 3.7 | 2.5 | 2.6 | 4.0 | 2.5 |
| BS05_AT | 2001 | 2.5 | 1.1 | 0.5 | 0.5 | 2.2 | 1.1 | 1.8 | 1.1 | 1.3 | 1.4 |
| BS05_RT | 2001 | 2.5 | 1.1 | 0.5 | 0.5 | 2.1 | 1.1 | 1.8 | 1.1 | 1.2 | 1.3 |
| BS05_E_AT | 2001 | 2.3 | 1.0 | 0.5 | 0.5 | 1.8 | 1.3 | 1.8 | 1.0 | 1.2 | 1.3 |
| BS05_OTL_AT | 2001 | 2.6 | 1.6 | 0.8 | 0.9 | 2.2 | 1.3 | 1.8 | 1.1 | 1.3 | 1.5 |
| BS05_E_OTL_AT | 2001 | 2.5 | 1.4 | 0.8 | 0.9 | 1.9 | 1.3 | 1.8 | 1.1 | 1.3 | 1.4 |
| BS05_OTL_RT | 2001 | 2.7 | 1.6 | 0.7 | 0.9 | 2.1 | 1.2 | 1.8 | 1.1 | 1.2 | 1.5 |
| GN05 | 2001 | 2.0 | 2.1 | 1.9 | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 1.8 | 1.9 | 1.8 | 2.0 |
| GN10 | 2001 | 2.0 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| GN10 | 1999 | 3.8 | 3.9 | 3.8 | 3.8 | 3.9 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| GG05_SAAS | 2001 | 2.6 | 3.9 | 4.9 | 3.3 | 4.0 | 4.7 | 3.2 | 2.6 | 2.7 | 3.5 |
| GG05_DAVIS | 2001 | 2.9 | 5.0 | 4.7 | 2.5 | 3.5 | 4.1 | 3.1 | 2.9 | 3.4 | 3.6 |
| GG10_SAAS | 2001 | 2.6 | 3.9 | 4.9 | 3.3 | 4.0 | 2.8 | 2.9 | 1.9 | 1.7 | 3.1 |
| GG10_DAVIS | 2001 | 2.5 | 3.3 | 2.4 | 1.6 | 2.8 | 2.6 | 3.1 | 1.7 | 2.2 | 2.5 |
| GP05 | 2001 | 2.1 | 2.0 | 0.7 | 0.5 | 1.5 | 1.1 | 1.3 | 2.3 | 2.2 | 1.5 |
| GP10 | 2001 | 2.5 | 2.3 | 0.8 | 0.6 | 1.7 | 1.2 | 1.4 | 2.7 | 2.7 | 1.8 |
| Mittel | | 2.6 | 2.2 | 2.0 | 1.4 | 2.4 | 2.0 | 2.3 | 1.9 | 2.1 | |

Tabelle 15: Kampagnen Außenems, Standardabweichungen der ellipsoidischen Höhen der Neupunkte bei unterschiedlichen Auswertevarianten mit unterschiedlichen Softwarepaketen in Millimetern

Höhendifferenzen benachbarter Pegelpunkte

Als weitere Kontrolle der Rechenergebnisse wurde der während der GPS-Messung nivellierte Höhenunterschied zwischen den Gewindebolzen der beiden GPS-Antennen mit den Höhenunterschieden der GPS-Auswertungen verglichen. Die Ergebnisse des Feinnivellements sind dabei die Sollwerte, die der GPS-Lösungen die Ist-Werte. In Tabelle 16 werden die ergebenden Fehler der Höhendifferenzen zweier benachbarter Neupunkte dargestellt. In den drei rechten Spalten folgen der gemittelte Höhenfehler pro Lösung mit zugehöriger Standardabweichung. Die Spalte SD2 enthält die Standardabweichungen aus quasi-wahren Beobachtungen. Mögliche Systematiken in den Datensätzen können daran erkannt werden, wenn sich die beiden Werte der Standardabweichungen deutlich unterscheiden.

Die Standardabweichungen der Geonap-Lösungen des Jahres 2001 unterscheiden sich deutlich.

Allerdings ist der Stichprobenumfang zu gering, um Aussagen über eventuelle Systematiken zu treffen. Im allgemeinen kann daher festgestellt werden, dass keine Systematik in den Höhendifferenzen zusammengehöriger Pegelpunkte erkennbar ist. Ersichtlich wird, dass die Fehler der Höhendifferenzen je nach Punktepaar differieren. Daran kann die Qualität der Station abgelesen werden. Demnach treten auf dem Pegel Knock die geringsten Fehler auf. Aufgrund der geringeren Störeffekte war auch die Höhengenauigkeit der Höhe auf diesen Pegelpunkten am besten. Über die Ursache wurde bereits geschrieben. Die Fehler auf den anderen zwei Pegeln sind größer.

Keine Änderungen der Abweichungen von der nivellitischen Sollhöhendifferenz sind zwischen 1999 und 2001 festzustellen.

Die Ergebnisse des Softwarepaketes GeoGenius weisen die geringsten Fehler auf. Der Maximalwert von 0,0129 m tritt bei der BSW-Lösung 1999 auf.

| | | Emshörn | Knock | Dukegat | | | |
|---------------|------|-----------|-----------|-----------|------------|--------|--------|
| Variante | Jahr | 0301-0302 | 0341-0342 | 0351-0352 | Mittel (M) | SD(M) | SD2 |
| BS05_AT | 2001 | 0.0011 | -0.0001 | 0.0054 | 0.0021 | 0.0029 | 0.0032 |
| BS05_RT | 2001 | 0.0010 | -0.0002 | 0.0054 | 0.0021 | 0.0029 | 0.0032 |
| BS05_E_AT | 2001 | 0.0011 | -0.0001 | 0.0049 | 0.0020 | 0.0026 | 0.0029 |
| BS05_OTL_AT | 2001 | 0.0009 | -0.0003 | 0.0053 | 0.0020 | 0.0029 | 0.0031 |
| BS05_E_OTL_AT | 2001 | 0.0008 | -0.0003 | 0.0048 | 0.0018 | 0.0027 | 0.0028 |
| BS05_OTL_RT | 2001 | 0.0008 | -0.0003 | 0.0053 | 0.0019 | 0.0030 | 0.0031 |
| BS10_RT | 2001 | 0.0027 | -0.0001 | 0.0066 | 0.0031 | 0.0034 | 0.0041 |
| BS10_AT | 2001 | 0.0028 | -0.0002 | 0.0066 | 0.0031 | 0.0034 | 0.0041 |
| BS10_AT | 1999 | 0.0129 | 0.0043 | -0.0011 | 0.0054 | 0.0071 | 0.0079 |
| BS10_O_AT | 1999 | 0.0090 | 0.0014 | -0.0018 | 0.0029 | 0.0055 | 0.0054 |
| BS10_O_AT | 2001 | 0.0027 | -0.0033 | 0.0021 | 0.0005 | 0.0033 | 0.0027 |
| GN10 | 2001 | -0.0049 | -0.0047 | -0.0054 | -0.0050 | 0.0004 | 0.0050 |
| GN10 | 1999 | 0.0019 | 0.0028 | 0.0006 | 0.0018 | 0.0011 | 0.0020 |
| GN05 | 2001 | -0.0039 | -0.0043 | -0.0041 | -0.0041 | 0.0002 | 0.0041 |
| GG05_SAAS | 2001 | 0.0063 | -0.0030 | 0.0012 | 0.0015 | 0.0047 | 0.0041 |
| GG05_DAVIS | 2001 | 0.0062 | -0.0001 | -0.0017 | 0.0015 | 0.0042 | 0.0037 |
| GG10_SAAS | 2001 | 0.0049 | -0.0005 | 0.0003 | 0.0015 | 0.0029 | 0.0028 |
| GG10_DAVIS | 2001 | 0.0037 | -0.0010 | -0.0002 | 8000.0 | 0.0025 | 0.0022 |
| GP05 | 2001 | -0.0029 | -0.0024 | -0.0013 | -0.0022 | 0.0008 | 0.0023 |
| GP10 | 2001 | -0.0010 | -0.0020 | -0.0012 | -0.0014 | 0.0005 | 0.0015 |

Tabelle 16: Kampagnen Außenems 1999 u. 2001, Fehler der Höhendifferenzen zweier benachbarter Pegelpunkte (Differenz aus GPS-Höhenunterschied (Ist) und nivellitischem Höhenunterschied (Soll)) bei unterschiedlichen Auswertevarianten mit unterschiedlichen Softwarepaketen, in Metern

Höhenvergleich der Pegelpunkte zu unterschiedlichen Epochen

In Tabelle 17 sind für die Jahre 1999 und 2001 für drei identische Lösungsvarianten die Höhen der Stationen mit der zugehörigen Differenz dargestellt. In Abbildung 25 erfolgt eine grafische Darstellung der Höhenunterschiede zwischen 1999 und 2001 für ausgewählte Stationen mit den drei Lösungen.



Abbildung 25: Höhendifferenzen ausgewählter Stationen der Kampagnen Außenems 1999 und 2001, in Metern

| | | Ems | hörn | Kno | ock | Dukegat | | | | | |
|-----------|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Variante | Jahr | 0301 | 0302 | 0341 | 0342 | 0351 | 0352 | AURI | BORK | EMDN | N'ey |
| BS10_AT | 1999 | 53.8165 | 53.7851 | 53.4082 | 53.3974 | 51.2355 | 51.2444 | 65.6622 | 54.2029 | 56.9730 | 51.3669 |
| BS10_AT | 2001 | 53.8291 | 53.7876 | 53.4168 | 53.4015 | 51.2414 | 51.2580 | 65.6646 | 54.2182 | 56.9730 | 54.0426 |
| Differenz | | -0.0126 | -0.0025 | -0.0086 | -0.0041 | -0.0059 | -0.0136 | -0.0024 | -0.0153 | 0.0000 | -2.6757 |
| BS10_O_AT | 1999 | 53.8161 | 53.7808 | 53.4104 | 53.3967 | 51.2388 | 51.2470 | 65.6530 | 54.2064 | 56.9730 | 51.3668 |
| BS10_O_AT | 2001 | 53.8286 | 53.7870 | 53.4173 | 53.3989 | 51.2461 | 51.2582 | 65.6692 | 54.2195 | 56.9730 | 54.0347 |
| Differenz | | -0.0125 | -0.0062 | -0.0069 | -0.0022 | -0.0073 | -0.0112 | -0.0162 | -0.0131 | 0.0000 | -2.6679 |
| GN10 | 1999 | 53.8187 | 53.7763 | 53.4132 | 53.4009 | 51.2379 | 51.2485 | 65.6590 | 54.2058 | 56.9730 | 51.3686 |
| GN10 | 2001 | 53.8318 | 53.7826 | 53.4199 | 53.4001 | 51.2498 | 51.2544 | 65.6674 | 54.2173 | 56.9730 | 54.0362 |
| Differenz | | -0.0131 | -0.0063 | -0.0067 | 0.0008 | -0.0119 | -0.0059 | -0.0084 | -0.0115 | 0.0000 | -2.6676 |

Tabelle 17: Kampagnen Außenems 1999 u. 2001, Epochenvergleich der Höhen der Neupunkte, in Metern

Ersichtlich ist, dass sich die Höhendifferenzen von Punkt zu Punkt unabhängig von Software und Lösungsstrategie unterscheiden. Benachbarte Pegelpunkte weisen Unterschiede von bis zu 10 mm auf. Der Punkt 342 mit der kleinsten Standardabweichung der Höhe weist die geringste Höhendifferenz zwischen den Epochen. Die Höhenunterschiede 1999-2001 der beiden Punkte 0341/0342 (Knock) differieren am wenigsten. Diese Pegelstationen schnitten bereits bei der Betrachtung der Höhendifferenzen benachbarter Punkte und bei Betrachtung der Standardabweichung der ausgeglichenen Höhen am besten ab.

Daraus ist zu schlussfolgern, dass die GPS-Beobachtungen auf dem Pegel Knock geringeren stationsabhängigen Fehlern unterliegen als die der anderen Pegel Dukegat und Emshörn.

Die Genauigkeit der Höhenbestimmung mit dem gegebenen Stichprobenumfanges ist zu gering, um bei vorliegendem Epochenabstand Rückschlüsse auf eventuell vorliegende Höhenänderungen zu treffen. Es wäre außerdem hilfreich neben den messtechnisch bedingten Fehler externe Einflüsse, auch auf die Höhe wirkende Effekte zu berücksichtigen. Dazu zählen u.a. das Verhalten des Bauwerkes, Bodenbewegungen aufgrund von Erdgasentnahme, der Grundwasserspiegel und unmodellierte Gezeiteneffekte.

Zusammenfassung der Kampagnen Außenems 1999 und 2001

Bei der Analyse aller Ergebnisse zeigte sich, dass der Stichprobenumfang der einzelnen Kampagnen sehr gering war. Bei zukünftigen Wiederholungsmessungen sollte folglich der Beobachtungszeitraum ausgeweitet werden. Eine Wiederholung der Kampagnen in regelmäßigen Abständen oder permanente Beobachtung wird angeraten.

Für Testzwecke ist geplant, über einen bestimmten Zeitraum an der Außenems GPS-Permanentbeobachtungen durchzuführen.

Die eingesetzten Softwarepakete lieferten in allen Kampagnen ähnliche Ergebnisse. Die ausgeglichen Höhen der Neupunkte unterschieden sich nur geringfügig. Die sich aus der Netzausgleichung ergebende Standardabweichung der Höhe beträgt 5 mm und besser, wobei allerdings unerklärliche Ausreißer auftreten.

Die Höhenabweichungen aus GPS und Feinnivellement benachbarter Punkte auf Pegeln zeigen Unterschiede zwischen den Punkten, den Kampagnen und den Resultaten der jeweiligen Software auf. Größenordnungsmäßig liegen sie unter 15 mm.

Die Höhenwertänderungen von 1999 bis 2001 an der Außenems sind wegen ihrer Inhomogenität nur schwer interpretierbar. Aussagen über mögliche Höhenänderungen können aufgrund von derzeit nur zwei Messkampagnen mit kurzem Zeitabstand nicht getroffen werden.

5.4.4 Die Kampagne Außenelbe 2001

5.4.4.1 Beschreibung der Kampagne

Eine 3D-Modellierung zur Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe machte es erforderlich, aktuelle Pegelhöhen im Deutschen Haupthöhennetz 1992 für fünf Navigationsbaken und den ehemaligen Leuchtturm Großer Vogelsand zu bestimmen. Diese Objekte befinden vor den Inseln Scharhörn und Neuwerk am Fahrrinnenrand der Außenelbe.

Die Messkampagne fand vom 22.10.-26.10. 2001 statt. Das Netz umfasste 17 Stationen in Niedersachsen und Schleswig-Holstein sowie die SAPOS-Station Cuxhaven (Abbildung 26). Die Punkte auf den Baken und auf dem Leuchtturm waren doppelt besetzt. Um die Zahl der Stützpunkte für die Höhenintegration in der Nähe der Navigationsbaken zu erhöhen, wurden geeignete Festpunkte auf Neuwerk mit dem Festland durch ein Feinnivellement eingewogen.

Auf den Feldstationen kamen Empfänger des Typs Trimble 4000 SSi und Antennen des Typs Trimble L1/L2 Microcentered Compact zum Einsatz.

Für die Auswertung stand ein Datensatz von 8 Sessionen a` 12 Stunden zur Verfügung. Für den Punkt 0502 lagen wegen eines technischen Defektes lediglich 4 Sessionen vor.

Die Station 0701 wurde als Datumsstation verwendet.



Abbildung 26: Netzkonfiguration der Kampagne Außenelbe 2001

5.4.4.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der Kampagne Außenelbe 2001 nach den in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Kriterien beurteilt werden. Eine Übersicht der einzelnen Lösungen befindet sich in Tabelle 18. Die Anzahl der unterschiedlichen Lösungsvarianten war geringer als bei den Kampagnen an der Außenems, da die Erkenntnisse dieser Auswertungen berücksichtigt werden konnten. Außerdem stand eine Auswertesoftware weniger zur Verfügung.

Als Referenzlösung wird die Lösung des Softwarepaketes Geonap mit einer Elevationsmaske von 5° und der Auswerteoption "Wackelturm" verwendet. Mit dieser Option soll die Eigenbewegung der Baken berücksichtigt werden. Diese Modellierungsmöglichkeit bietet nur das Programm Geonap.

| Variante | Software | Ele. [°] | Ozeanauflast | Weitere Besonderheiten |
|----------|-----------|----------|--------------|---|
| BS05 | BSW | 05 | nein | |
| BS05OTL | BSW | 05 | ja | |
| BS05FTL | BSW | 05 | nein | Floatlösung |
| BS07 | BSW | 07 | nein | |
| BS10 | BSW | 10 | nein | |
| BS10O | BSW | 10 | nein | ohne elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen |
| GN05W | Geonap | 05 | nein | mit Option Wackelturm, REFERENZLÖSUNG |
| GN05 | Geonap | 05 | nein | |
| GN07W | Geonap | 07 | nein | mit Option Wackelturm |
| GN07 | Geonap | 07 | nein | |
| GG05 | GeoGenius | 05 | nein | |
| GG07 | GeoGenius | 07 | nein | |
| GG10 | GeoGenius | 10 | nein | |

Tabelle 18: Übersicht über die Lösungen der Kampagne Außenelbe 2001

Höhen der Referenzlösung

Bei dieser Kampagne wurde die Lösung mit dem Programmsystem Geonap und einer Höhenwinkelmaske von 5° als Referenzlösung (GN05W) verwendet. Die Höhen dieser Lösung sind in Tabelle 19 einzusehen.

| Pkt. | 0101 | 0102 | 0201 | 0202 | 0301 | 0302 | 0401 | 0402 | 0501 | 0502 | 0601 | 0602 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Höhe | 63.3962 | 63.4042 | 63.6833 | 63.6722 | 85.1317 | 85.1274 | 63.6623 | 63.6474 | 62.9031 | 62.8872 | 62.6415 | 62.6321 |
| Pkt. | 0641 | 0701 | 0702 | 0703 | 0704 | 0705 | | | | | | |
| Höhe | 72,7651 | 49.7777 | 43.5419 | 45.1394 | 41.7788 | 48.7851 | | | | | | |

Tabelle 19: Höhen der Referenzlösung (Geonap 05° Elevationsmaske mit Option Wackelturm) in Metern, Kampagne Außenelbe

Höhendifferenzen zur Referenzlösung

In Tabelle 20 sind die Abweichungen der ausgeglichenen Höhen der unterschiedlichen Lösungsvarianten zur Referenzlösung dargestellt. Die mittleren Differenzen aller Stationen sind in der Zeile "Mittel" enthalten. Sie dienen der Einschätzung einer Auswerteoption und sollen stationsabhängigen Effekte eliminieren.

Ähnlich den Ergebnissen der Kampagnen an der Außenems, variieren die Differenzen je nach Auswertevariante und eingesetzter Software.

Die maximalen Höhendifferenzen der jeweiligen Lösung zur Referenzlösung betragen ca. 1,7 cm. Die Varianten GG05 und GG07 weichen davon jedoch stark ab. Im folgenden sollen die Lösungen der einzelnen Softwarepakete verglichen werden.

| Pkt. | BS10 | BS100 | BS07 | BS05 | BS05 OTL | GN05 | GN07W | GN07 | GG10 | GG07 | GG05 |
|--------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0101 | -0.0090 | -0.0045 | -0.0089 | -0.0083 | -0.0081 | -0.0049 | 0.0000 | -0.0053 | 0.0002 | -0.0113 | -0.0140 |
| 0102 | -0.0008 | 0.0048 | 0.0001 | 0.0003 | 0.0006 | 0.0022 | -0.0027 | -0.0006 | -0.0017 | -0.0211 | -0.0191 |
| 0201 | -0.0044 | 0.0009 | -0.0032 | -0.0034 | -0.0030 | -0.0011 | 0.0005 | -0.0002 | -0.0103 | -0.0483 | -0.0475 |
| 0202 | -0.0013 | 0.0039 | -0.0013 | -0.0011 | -0.0008 | 0.0049 | -0.0029 | 0.0023 | 0.0013 | -0.0197 | -0.0157 |
| 0301 | 0.0043 | 0.0065 | 0.0029 | 0.0031 | 0.0033 | -0.0007 | -0.0030 | -0.0036 | -0.0116 | -0.0260 | -0.0256 |
| 0302 | 0.0026 | 0.0063 | 0.0001 | 0.0006 | 0.0008 | -0.0007 | -0.0022 | -0.0030 | -0.0106 | -0.0267 | -0.0235 |
| 0401 | -0.0109 | -0.0023 | -0.0086 | -0.0081 | -0.0080 | -0.0001 | -0.0023 | -0.0024 | -0.0027 | -0.0241 | -0.0224 |
| 0402 | -0.0035 | 0.0072 | -0.0010 | -0.0006 | -0.0005 | 0.0037 | -0.0014 | 0.0022 | -0.0050 | -0.0236 | -0.0215 |
| 0501 | 0.0025 | 0.0034 | 0.0023 | 0.0021 | 0.0023 | 0.0021 | -0.0008 | 0.0013 | -0.0049 | -0.0226 | -0.0211 |
| 0502 | 0.0105 | 0.0173 | 0.0113 | 0.0113 | 0.0114 | 0.0079 | -0.0013 | 0.0060 | 0.0154 | 0.0099 | 0.0130 |
| 0601 | -0.0004 | 0.0000 | -0.0003 | -0.0002 | -0.0002 | 0.0032 | -0.0015 | 0.0017 | -0.0064 | -0.0277 | -0.0250 |
| 0602 | -0.0112 | -0.0110 | -0.0114 | -0.0114 | -0.0113 | -0.0050 | -0.0022 | -0.0071 | -0.0012 | -0.0246 | -0.0170 |
| 0641 | 0.0040 | 0.0023 | 0.0030 | 0.0025 | 0.0024 | -0.0006 | -0.0010 | -0.0015 | -0.0022 | -0.0242 | -0.0224 |
| 0702 | 0.0038 | 0.0022 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0030 | 0.0001 | -0.0009 | -0.0013 | -0.0016 | -0.0015 | -0.0013 |
| 0703 | -0.0008 | 0.0008 | -0.0009 | -0.0008 | -0.0007 | -0.0005 | -0.0024 | -0.0028 | -0.0035 | -0.0012 | -0.0005 |
| 0704 | -0.0049 | -0.0011 | -0.0035 | -0.0030 | -0.0030 | -0.0006 | -0.0022 | -0.0030 | -0.0044 | 0.0013 | 0.0017 |
| 0705 | 0.0019 | -0.0011 | 0.0019 | 0.0020 | 0.0022 | -0.0004 | -0.0009 | -0.0012 | -0.0085 | -0.0070 | -0.0069 |
| Mittel | -0.0010 | 0.0020 | -0.0008 | -0.0007 | -0.0005 | 0.0005 | -0.0015 | -0.0010 | -0.0032 | -0.0166 | -0.0149 |

Tabelle 20: Kampagne Außenelbe 2001, ellipsoidische Höhendifferenzen der Neupunkte zur Referenzlösung (GN05W), bei unterschiedlichen Auswertevarianten mit unterschiedlichen Softwarepaketen, in Metern

Die zusätzlichen Lösungen des Programmpaketes Geonap weisen erwartungsgemäß die geringsten Differenzen zur Referenzlösung auf. Hierbei weichen die Ergebnisse unterschiedlicher Elevationsmasken und ohne die Option "Wackelturm" stärker voneinander ab als die Resultate jeweils mit Berücksichtigung der Turmauslenkungen.

Besonders große Differenzen ergeben sich bei den mit GeoGenius berechneten Lösungen.

Besonders betrifft dies die Lösungen mit den Elevationsmasken von 5° und 7°. Die Differenzen sind sehr groß. Sie sollten als Indiz für Modellierungsprobleme in der Software gedeutet werden.

Die Unterschiede Berner Software – Referenzlösung liegen in der Größenordnung der Geonap-Resultate. Die größten Beträge der Differenzen treten bei der 10°-Lösung ohne elevationsabhängige Gewichtung auf. Die Lösungen mit Elevationsmasken von 5° und 7° unterscheiden sich nur geringfügig. Die Verwendung von Korrekturen für die Ozeanauflastdeformation hat lediglich geringfügige, nicht signifikante Änderungen zur Folge. In diesem Netz kann auf den Einsatz dieser Korrekturen verzichtet werden.

Höhenresiduen der einzelnen Sessionen für die Geonap-Referenzlösung

In Abbildung 27 sind die Sessionsresiduen der Geonap-Referenzlösungen für die Kampagne Außenelbe 2001 dargestellt. Analog den Ergebnissen den Kampagnen an der Außenems sind die stations- und sessionsspezifischen Besonderheiten erkennbar.



Abbildung 27: Sessionsresiduen (Höhe) der GEONAP 5°-Netzlösung (mit Option Wackelturm), Kampagne Außenelbe 2001

Die Beträge der Residuen sind größer als bei den Kampagnen Außenems 1999 und 2001. Die Ursache ist vor allem in der kürzeren Sessionslänge zu suchen.

Analog den Kampagnen an der Außenems wird deutlich, dass aufgrund des geringen Datenumfanges die Höhenbestimmung sehr problematisch ist. Daraus ergibt sich die Forderung, bei zukünftigen Kampagnen längere Beobachtungszeiten vorzusehen.

Standardabweichungen der ausgeglichenen Höhen

Die Standardabweichungen der ausgeglichenen ellipsoidischen Höhen der Punkte als Maß der inneren Genauigkeit sind in Tabelle 21 aufgeführt. Die Tabelle enthält die gleichen Angaben wie Tabelle 15. Ledigleich sind Zeilen und Spalten vertauscht. Die Standardabweichungen haben im allgemeinen größere Beträge als bei den Ems-Kampagnen. Dies ist mit dem geringeren Zeitumfang pro Sessionen zu erklären. Die Maxima pro Auswertevariante sind in Tabelle 15 hervorgehoben.

Die durchschnittlichen Standardabweichungen der Stationen differieren stark. Das Maximum tritt erwartungsgemäß mit 7,1 mm an der Station 0502 mit der kürzesten Beobachtungszeit (4 Sessionen) auf. An der Station 0201 ist dieser Wert ebenfalls sehr groß. Hier könnte die Ursache eine vorhandene Richtfunkantenne oberhalb der GPS-Antenne sein.

| Pkt. | BS05 | BS07 | BS10 | BS100 | BS05 OTL | GN05W | GN05 | GN07 | GN07W | GG10 | GG07 | GG05 | Mittel |
|--------|------|------|------|-------|-------------|-------|------|------|-------|------|------|------|--------|
| 0101 | 5.7 | 5.7 | 5.8 | 7.7 | 5.7 | 4.3 | 4.6 | 4.7 | 4.4 | 3.3 | 11.7 | 11.9 | 6.3 |
| 0102 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 2.7 | 1.6 | 3.9 | 4.3 | 4.4 | 4.0 | 4.5 | 11.9 | 11.7 | 4.4 |
| 0201 | 2.8 | 2.8 | 3.2 | 3.2 | 2.7 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.0 | 4.0 | 21.3 | 26.5 | 6.9 |
| 0202 | 2.6 | 2.6 | 3.1 | 3.0 | 2.6 | 4.1 | 4.4 | 4.5 | 4.2 | 4.3 | 12.0 | 11.5 | 4.8 |
| 0301 | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 1.9 | 1.6 | 3.5 | 4.1 | 4.2 | 3.6 | 4.0 | 13.6 | 14.1 | 4.4 |
| 0302 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 3.5 | 4.1 | 4.3 | 3.7 | 3.7 | 15.5 | 13.4 | 4.4 |
| 0401 | 2.2 | 2.3 | 2.7 | 2.5 | 2.2 | 4.0 | 4.4 | 4.5 | 4.1 | 3.5 | 10.9 | 11.0 | 4.4 |
| 0402 | 2.4 | 2.4 | 2.7 | 2.5 | 2.4 | 3.7 | 4.1 | 4.3 | 3.9 | 2.7 | 12.0 | 11.8 | 4.5 |
| 0501 | 2.9 | 2.9 | 2.7 | 2.4 | 2.9 | 4.1 | 4.5 | 4.6 | 4.2 | 4.7 | 13.1 | 13.2 | 5.0 |
| 0502 | 8.7 | 8.9 | 8.9 | 7.6 | 8.7 | 6.5 | 6.7 | 6.9 | 6.6 | 3.1 | 5.3 | 3.5 | 7.1 |
| 0601 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 2.9 | 2.7 | 4.5 | 4.7 | 4.8 | 4.6 | 3.0 | 11.6 | 11.4 | 4.8 |
| 0602 | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 3.1 | 2.4 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5 | 2.7 | 18.7 | 12.1 | 5.3 |
| 0641 | 1.9 | 1.9 | 2.0 | 1.7 | 1.9 | 3.4 | 4.0 | 4.2 | 3.6 | 2.8 | 10.1 | 9.7 | 3.8 |
| 0702 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.0 | 4.2 | 4.8 | 4.9 | 4.2 | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 3.2 |
| 0703 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.2 | 1.8 | 3.7 | 4.3 | 4.4 | 3.8 | 3.1 | 2.9 | 2.7 | 2.8 |
| 0704 | 2.3 | 2.2 | 2.3 | 2.1 | 2.3 | 3.6 | 4.2 | 4.3 | 3.7 | 4.6 | 5.9 | 5.8 | 3.5 |
| 0705 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.1 | 2.4 | 3.6 | 4.2 | 4.3 | 3.7 | 1.8 | 2.0 | 2.0 | 2.8 |
| Mittel | 2.9 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 2.8 | 4.1 | 4.5 | 4.7 | 4.3 | 3.4 | 10.6 | 10.2 | |

Tabelle 21: Kampagne Außenelbe 2001, Standardabweichungen der mittleren ellipsoidischen Höhen der Neupunkte bei unterschiedlichen Auswertevarianten mit unterschiedlichen Softwarepaketen, in Millimetern

Beim Vergleich der Programmpakete fällt auf, dass die größten Beträge bei den GeoGenius-Lösungen unterhalb von 10° Elevationsmaske auftreten. Dies deutet wiederum auf Modellierungsprobleme der Software hin.

Alle anderen Lösungsvarianten liegen in der gleichen Größenordnung. Bei Geonap und der Berner Software sind die Lösungen mit geringerer Elevationsmaske die mit den geringsten Standardabweichungen, d.h. mit der besten inneren Genauigkeit. Diese Unterschiede sind jedoch aufgrund des geringen Stichprobenumfanges nicht signifikant.

Höhendifferenzen benachbarter Pegelpunkte

Die Abweichungen der nivellitischen und mit GPS bestimmten Höhenunterschiede sind in Tabelle 22 zusammengefasst. Analog den Resultaten der Kampagnen "Außenems" sind die Ergebnisse aufgrund des geringen Stichprobenumfanges schwer interpretierbar. Analog den Interpretationen der Kampagnen "Außenems" sind große Differenzen ein Indiz für starke stationsabhängige Fehler auf mindestens einem Punkt der Gruppe. Die Maximalbeträge der Abweichungen sind in Tabelle 22 hervorgehoben.

Geringe Abweichungen (< 7 mm) weisen die Punktgruppen 0301-0302 und 0401-0402 auf. Deutlich größer sind die Unterschiede der Gruppen 0101-0102, 0201-0202 und 0501-0502. Besonders große Differenzen von teilweise > 20 mm ergeben sich bei der Punktgruppe 0601-0602. Daraus folgt, dass bei dieser Punktgruppe starke stationsabhängige Fehlereinflüsse auftreten.

In Tabelle 22 sind analog den Ausführungen zu den Kampagnen an der Außenems die Standardabweichung des gemittelten Höhenfehlers und die Standardabweichung aus quasi-wahren Beobachtungen gegeben. Die Standardabweichungen der Geonap-Lösungen mit der Option Wackelturm und der Lösung GG07 unterscheiden für sich deutlich. Der Stichprobenumfang ist jedoch zu gering, um Aussagen über eventuelle Systematiken zu treffen. Im allgemeinen kann daher festgestellt werden, dass keine Systematik in den Höhendifferenzen zusammengehöriger Pegelpunkte erkennbar ist.

| Pkte. | BS10 | BS10O | BS07 | BS05 | BS05 OTL | GN05W | GN05 | GN07W | GN07 | GG10 | GG07 | GG05 |
|---------------|---------|---------|---------|---------|-------------|---------|---------|---------|----------------------|---------|---------|---------|
| 0101- 0102 | 0.0104 | 0.0115 | 0.0112 | 0.0108 | 0.0109 | 0.0022 | 0.0093 | -0.0005 | 0.0069 | 0.0003 | -0.0076 | -0.0029 |
| 0201- 0202 | -0.0133 | -0.0134 | -0.0145 | -0.0141 | -0.0142 | -0.0164 | -0.0104 | -0.0198 | -0.0139 | -0.0048 | 0.0122 | 0.0154 |
| 0301- 0302 | -0.0052 | -0.0037 | -0.0063 | -0.0060 | -0.0060 | -0.0035 | -0.0035 | -0.0027 | -0.0029 | -0.0025 | -0.0042 | -0.0014 |
| 0401- 0402 | 0.0053 | 0.0074 | 0.0055 | 0.0054 | 0.0054 | -0.0021 | 0.0017 | -0.0012 | 0.0025 | -0.0044 | -0.0016 | -0.0012 |
| 0501- 0502 | -0.0052 | 0.0007 | -0.0042 | -0.0040 | -0.0041 | -0.0132 | -0.0074 | -0.0137 | -0.0085 | 0.0071 | 0.0193 | 0.0209 |
| 0601- 0602 | -0.0242 | -0.0244 | -0.0245 | -0.0246 | -0.0245 | -0.0134 | -0.0216 | -0.0141 | -0.0222 | -0.0082 | -0.0103 | -0.0054 |
| Mittel | -0.0054 | -0.0036 | -0.0055 | -0.0054 | -0.0054 | -0.0077 | -0.0053 | -0.0087 | <mark>-0.0064</mark> | -0.0021 | 0.0013 | 0.0042 |
| StAbw. | 0.0125 | 0.0134 | 0.0130 | 0.0129 | 0.0129 | 0.0076 | 0.0106 | 0.0082 | 0.0108 | 0.0053 | 0.0118 | 0.0110 |
| StAbw2 | 0.0126 | 0.0128 | 0.0131 | 0.0129 | 0.0129 | 0.0104 | 0.0110 | 0.0115 | 0.0117 | 0.0053 | 0.0108 | 0.0109 |

Tabelle 22: Kampagne Außenelbe 2001, Fehler der Höhendifferenzen zweier benachbarter Neupunkte (Differenz aus GPS-Höhenunterschied und nivellitischem Höhenunterschied (Soll)) bei unterschiedlichen Auswertevarianten mit unterschiedlichen Softwarepaketen, in Metern

Nach den in der Tabelle dargestellten Fehlerbeträgen können die Punktepaare in drei Gruppen eingeteilt werden. Die Fehler der Punktegruppen 0301/0302 und 0401/0402 sind am geringsten. Die Paare 0101/0102 und 0501/0502 weißen teilweise erhebliche Abweichungen vom Soll auf.

Bei den Punktgruppen 0201/0202 und 0601/0602 sind fast alle Fehler sehr groß und deren Beträge übersteigen bei Geonap und Berner Software sogar die Grenze von 2 cm.

Zusammenfassung der Kampagne Außenelbe 2001

Bei der Analyse aller Ergebnisse zeigten sich viele Ähnlichkeiten mit den Resultaten der Kampagnen Außenems 1999 und 2001. Die Schlussfolgerungen sind daher identisch und können hier verkürzt wiedergegeben werden. Der Stichprobenumfang der Kampagne war sehr gering. Für zukünftige Wiederholungen sollte eine Ausweitung des Beobachtungszeitraumes erfolgen.

Die eingesetzten Softwarepakete lieferten in allen Kampagnen ähnliche Ergebnisse. Die ausgeglichen Höhen der Neupunkte unterschieden sich nur geringfügig.

Bei dieser Kampagne betrug die Länge der Sessionen 12 Stunden. Daraus ergibt sich bei der Netzausgleichung eine höhere Standardabweichung der Höhe als bei den Ems-Kampagnen. Sie beträgt 9 mm und besser. Bei einzelnen Stationen und Auswertevarianten ist diese Standardabweichung deutlich schlechter.

Die Höhenabweichungen aus GPS und Feinnivellement benachbarter Punkte auf Pegeln zeigen Unterschiede zwischen den Punkten, den Kampagnen und den Resultaten der jeweiligen Software auf. Diese Abweichungen liegen, von unerklärlichen Ausreißern abgesehen, unter 15 mm

5.4.5 Beurteilung der Pegelkampagnen und Schlußfolgerungen

Im Rahmen der Projektes NNSAT wurden drei GPS-Kampagnen Außenems und Außenelbe. Die Kampagnen (1999 und 2000) hatten eine möglichst exakte Höhenbestimmung mehrerer Pegelstationen zum Ziel. Dabei wurden zusätzlich Höhenfestpunkte sowie umliegende SAPOS-Referenzstationen eingebunden.

Die Daten lagen im empfängerunabhängigen Datenformat RINEX 2 vor und können so ohne Mehraufwand für eventuell später erforderliche Nachberechnungen verwendet werden.

Die Sessionslänge wurde pro Kampagne einheitlich gewählt. Bei zukünftigen Kampagnen sollte eine Sessionsgröße von einheitlich 24 Stunden 0:00 bis 23:59 UTC gewählt werden. Dadurch können ohne Mehrarbeit Daten externer Institutionen (z.B. EUREF) verwendet werden.

Während der Kampagne sollten auch Beobachtungen aus dem niedrigen Elevationsbereich aufgezeichnet werden. Diese sind trotz der oftmals geringeren Signalqualität zur Dekorrelation Troposphäre-Höhe für die präzise Höhenbestimmung erforderlich.

Die GPS-Kampagnen wurden mit 9-Kanalempfängern und Antennen der Firma Trimble durchgeführt. Für zukünftige Feldkampagnen sollte die Verwendung von 12-Kanalempfängern angestrebt werden, da bei sonst Beobachtungen im Bereich niedriger Höhenwinkel verloren gehen. Moderne 12-Kanalempfänger zeichnen sich darüber hinaus durch einen geringeren Stromverbrauch aus. Außerdem erlauben größere Datenspeicher den autonomen Betrieb der Empfänger über größere Zeiträume. Um eventuellen Ausfällen vorzubeugen, sollten die Neupunkte wieder redundant besetzt werden.

In den Kampagnen kamen auf den Feldstationen einheitliche GPS-Antennen zum Einsatz.

Da in der Regel die Phasenzentrumsvariationen eines Antennentyps wenig differieren, wurden Typmittel der Firma Geo++ zur Korrektur dieser Fehlerterme benutzt. Die Phasenzentrumsvariationen der eingesetzten Antennentypen weisen nur geringe azimutale Asymmetrien auf. Bei der Verwendung von Korrekturen für die Antennenphasenzentrumsvariationen sind elevationsabhängige Terme ausreichend.

Bei der Analyse aller Ergebnisse zeigte sich, dass der Stichprobenumfang der einzelnen Kampagnen sehr gering war. Bei zukünftigen Wiederholungsmessungen sollte folglich der Beobachtungszeitraum ausgeweitet werden. Eine Wiederholung der Kampagnen in regelmäßigen Abständen, ggf. jährlich ist anzuraten.

Die Analyse der Ergebnisse zeigte stationsabhängige Effekte der Höhengenauigkeit. Um die Ursache für diese Charakteristika aufzudecken, sollte im Rahmen der Auswertearbeiten eine Stationsvalidierung durchgeführt werden.

Bei der Auswertung von Netzen dieser Größenordnung in den betreffenden geografischen Regionen kann auf die Einführung von Korrekturen für die Ozeanauflastdeformationen verzichtet werden. Trotz der geringen Netzausdehnung ist es möglich, absolute statt relativer Troposphärenparameter zu schätzen.

In früheren Zeiten war für die Bestimmung der Pegelhöhen stets ein eigenes Netz erforderlich. Soweit für den Übergang von ellipsoidischen Höhen auf amtlichphysikalische Höhen keine Passpunkte erforderlich, nur ein Epochenvergleich angestrebt wird und die SAPOS-Stationen günstig zu den Neupunkten gelegen sind, ist die alleinige Verwendung von Stationen des SAPOS-Netzes der Landesvermessung ausreichend.

5.4.6 Integration der GPS-Höhen in das Landessystem

Als Ergebnis einer GPS-Auswertung erhält man für jeden Beobachtungspunkt einen Satz dreidimensionaler kartesischer und ellipsoidischer Koordinaten im Bezugssystem der Satelliten (WGS 84). Die ellipsoidische Höhe ist dabei rein geometrisch definiert als der entlang der Ellipsoidnormalen gemessene vertikale Abstand vom Ellipsoid und ohne jeglichen Bezug zum Schwerefeld der Erde. Im Gegensatz dazu sind die von der Landesvermessung bereitgestellten nivellitischen Höhen in schwerebezogenen, d.h. physikalischen Bezugssystemen definiert. Für die praktische Nutzung müssen die GPS-Höhen somit in ein geeignetes physikalisches Höhenbezugssystem überführt werden.

Der Übergang der ellipsoidischen Höhen in das physikalisch definierte Höhensystem der Landesvermessung kann unter Nutzung eines Quasigeoidmodells in Kombination mit einer Anpassung an den Landeshorizont erfolgen (Bengel, Sudau, 1998). Im Rahmen einer Parameterschätzung (Gauß-Markoff-Modell) werden dabei sowohl die Differenzen zwischen dem GPS-System und dem gravimetrischen System (GRS 80) als auch der lokale Unterschied zwischen dem Quasigeoid und der amtlichen Höhenbezugsfläche durch einen bivariaten Polynomansatz n-ten Grades ermittelt. Wie aus Abbildung 28 ersichtlich, gelten die nachstehenden funktionalen Zusammenhänge:

$$H^{NN} = h^{GPS} - \zeta^{Grav} - \Delta \zeta - \Delta^{NN}$$

mit: H^{NN} = normal-orthometrische Höhe (physikalische Höhe) h^{GPS} = ellipsoidische GPS – Höhe (geometrische Höhe) ζ^{Grav} = Höhenanomalie $\Delta \zeta$ = Systemdifferenz zwischen WGS 84 und GRS 80 Δ^{NN} = Anpassung an den Landeshorizont



Abbildung 28: Funktionale Zusammenhänge zwischen geometrischen (GPS) und physikalischen (Quasigeoid) Bezugssystemen

Entscheidend für die Qualität der Integration ist die Anzahl und Verteilung der Stützpunkte. Die "Rauhigkeit" des Quasigeoides und die Ausdehnung des Gebietes sind dabei die ausschlaggebenden Faktoren.

Um die Leistungsfähigkeit der präzisen GPS-Höhenmessungen und – kontrollen zu untersuchen, wurden in der Kampagne Außenems 1999 die Höhen der Pegel Knock, Dukegat und Emshörn parallel hydrostatisch und GPS-mäßig bestimmt. Die hydrostatisch bestimmten Höhen können aufgrund ihrer Genauigkeit stochastisch als "quasi-wahre Werte" ("Soll-Höhen") betrachtet werden.



Abbildung 29: Quasigeoidverlauf im Messgebiet Außenems 1999

Die Differenzen der mittels GPS und Quasigeoid bestimmten "Ist"-Höhen zu den Sollwerten kann als Maß für die Beurteilung der Güte der Höhenbestimmung herangezogen werden. Für die Berechnung der schwerefeldbezogenen Höhen wurde das European Gravimetric Geoid 97 (EGG 97) verwendet. Den Quasigeoidverlauf im Messgebiet zeigt



Abbildung 30: Abweichungen der Ist-Höhen von den hydrostatischen Soll-Höhen

In Abbildung 30 sind die Abweichungen der Ist-Höhen zu den Sollwerten dargestellt. Die Mehrzahl der Abweichungen liegt unter 10 mm. Die maximale Abweichung nimmt einen Betrag von 16mm an, die minimale Abweichung beträgt – 2 mm. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs ist es jedoch nicht empfehlenswert, aus diesen Werten eine Standardabweichung zu berechnen.

Eine theoretische Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit kann mittels des Varianzenfortpflanzungsgesetzes durchgeführt werden. Setzt man für die Genauigkeit des EGG 97 eine Standardabweichung von $\sigma_{EGG} \approx 15$ mm (TORGE, Denker, 1999, S. 165) und für die Genauigkeit der ellipsoidischen GPS-Höhe von $\sigma_{GPS} \approx 5$ mm an, so ergibt sich aufgrund des Varianzenfortpflanzungsgesetzes eine Standardabweichung von

$$\sigma_{NN} = \sqrt{\sigma_{GPS}^2 + \sigma_{EGG}^2} = 15.8 mm$$

Dieser Wert zeigt, dass die quasi-wahren Abweichungen ein gutes Maß sind, die Qualität der Messung / des Ergebnisses zu beurteilen.



Abbildung 31: Quasigeoidverlauf im Messgebiet

Für die Kampagne Außenelbe 2001 standen als Vergleichswerte für die physikalischen Höhen hydrostatisch bestimmte Werte aus dem Jahre 1990 zur Verfügung. Die Differenzen zu den mittels GPS und Quasigeoid bestimmten Höhen streuen im Bereich von +26 Millimeter und – 29 Millimeter, wobei die Werte keinerlei örtliche Systematiken aufweisen. Höhenwertdifferenzen von mehr als 20 Millimeter könnten auf eine tatsächliche vertikale Bewegung (Hebung oder Senkung) des Bauwerkes (Pegel, Bake, LT) hindeuten.



Abbildung 33: Quasigeoidverlauf im Messgebiet

Eindeutige Aussagen können aber in diesem Fall nicht gemacht werden, da die verschiedenen Einflussfaktoren wie Messmethoden, Auswerteverfahren, Netzgestalt, Rauhigkeit des Quasigeoids im Messgebiet, tatsächliche Vertikalbewegungen, etc. nicht voneinander trennbar sind.

Die Erfahrungen der Kampagne Außenelbe 2001 haben gezeigt, dass bei der Modellierung des Schwerefeldes und der Restanpassung an den Landeshorizont noch Entwicklungs- und Forschungsbedarf besteht. Im Gegensatz zur Außenems weist das Quasigeoid im Bereich der Außenelbe eine große Rauhigkeit auf (s. Abbildung 31).

Die Höhenanomalien (ζ) differieren in der Größenordnung von max. 68,4 cm. Auffallend ist der " ζ -Sattel" der Linie Neuwerk – Friedrichskoog im Zentrum des Messgebietes (s. Abbildung 33). Dagegen liegen die ζ -Werte in Cuxhaven und an der Bake Z um ca. 8 cm tiefer. Zum westlichen und östlichen Rand des Messgebietes steigen die Höhenanomalien wieder stark an.

Bei der Auswahl von Stützpunkten ist diesem Quasigeoidverlauf Rechnung zu tragen. Es genügt nicht, die Auswahl nur unter geometrischen Aspekten zu treffen, sondern entscheidend ist, dass die Stützpunkte die Feinstruktur des Quasigeoides repräsentieren. Aus diesem Grund wurde das Stützpunktfeld über das Messgebiet hinaus süd-östlich bis Esensham und nord-östlich bis nach Schleswig-Holstein erweitert (Abbildung 34).



Abbildung 34: Quasigeoidverlauf im erweiterten Stützpunktnetz

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei einem gleichförmigen Verlauf des Quasigeoides eine Integration der geometrischen GPS-Höhen in das physikalische Höhensystem der Landesvermessung mit einer Genauigkeit von ≈1,5 bis 2 cm möglich ist. Die Überführung der Höhen ist dabei sehr aufwendig. Entscheidend für die Genauigkeit sind eine genügende Anzahl Stützpunkte, die die Feinstruktur des Quasigeoides repräsentieren. Die z.Zt. verfügbaren Modelle bedürfen einer Weiterentwicklung, um das Genauigkeitsniveau signifikant verbessern zu können.

6 GPS und Radiometrie

6.1 Theorie

6.1.1 Troposphärische Laufzeitkorrektur

Die Satellitensignale durchqueren auf ihrem Weg zum Empfänger die Atmosphäre, d. h. Luftschichten unterschiedlichen Elektronengehalts und unterschiedlicher Dichte. Diese beeinflussen das Signal auf unterschiedliche Art und Weise und führen zu einer Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. –richtung. Aufgrund der unterschiedlichen Beeinflussung der Mikrowellen und der guten räumlichen Aufteilung der Atmosphäre in Ionosphäre und Troposphäre, wird dieser Einfluss in ionosphärische und troposphärische Refraktion unterschieden. Die ionosphärische Refraktion ist frequenzabhängig und lässt sich durch Zweifrequenzmessung nahezu eliminieren. Der Einfluss der Troposphäre ist frequenzunabhängig und kann folglich nicht durch Messung auf zwei Frequenzen korrigiert werden.

Die troposphärische Laufzeitverzögerung ΔL ergibt sich durch Integration entlang des Signalweges S zu:

$$\Delta L = 10^{-6} \int_{S} N ds, \qquad (1)$$

wobei *N* die Refraktion darstellt. Diese ist im Wesentlichen von den meteorologischen Parametern Luftdruck, Temperatur und Wasserdampfpartialdruck abhängig und wie folgt definiert.

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}$$
(2)

mit

*P*_d - Luftdruck der trockenen (dry) Luft [hPa]

e - Wasserdampfdruck [hPa]

T - Temperatur [K]

Die Konstanten k_1 , k_2 und k_3 sind mehrfach empirisch im Labor bestimmt und von verschiedenen Autoren veröffentlicht worden. Aus Gleichung (2) ist zu erkennen, dass der Luftdruck der trockenen Luft P_d bekannt sein muss. Im gemessenen Luftdruck *P* ist jedoch der Wasserdampfdruck *e* enthalten. Mit $P_d = P - e$ lässt sich die Gleichung (2) umstellen und in einen trockenen (dry) bzw. hydrostatischen und einen feuchten (wet) bzw. nicht hydrostatischen Anteil zerlegen [Mendes, 1999].

$$N = k_1 \frac{P}{T} + k_4 \frac{e}{T^2} = N_d + N_w$$
 (3)

Wie die Brechzahl *N* wird auch die troposphärische Laufzeitverzögerung (engl. Path Delay) in einen trockenen (hydrostatischen) Anteil ΔL_d und einen feuchten (nicht hydrostatischen) Anteil ΔL_w zerlegt und ergibt sich somit zu:

$$\Delta L = \Delta L_d + \Delta L_w. \tag{4}$$

mit

$$\Delta L_d = 10^{-6} \int_S N_d ds \tag{5}$$

$$\Delta L_w = 10^{-6} \int_S N_w ds \tag{6}$$

Die für die Brechzahl *N* benötigten meteorologischen Parameter lassen sich nur bedingt mit Wetterballons, die nicht auf jeder Wetterstation durchgeführt werden, bestimmen. Deshalb finden zur Modellierung die gemessenen Bodendaten von Temperatur, Luftdruck und relativer Luftfeuchtigkeit sowie deren vertikale Änderungsrate Verwendung.

6.1.2 Das Modell der horizontal geschichteten Troposphäre

Neben der Schätzung des troposphärischen Path Delays aus den GPS-Beobachtungen ist die Verwendung von Troposphärenmodellen mit den gemessenen Bodendaten der meteorologischen Parameter eine weitere Möglichkeit der Bestimmung der troposphärischen Laufzeitverzögerung. Diese Modellierung wird ebenfalls getrennt für den hydrostatischen und den nicht hydrostatischen Anteil durchgeführt. Voraussetzung dafür ist die Annahme einer horizontalen Schichtung der Troposphäre. Für den hydrostatischen Path Delay in Zenitrichtung sei dafür beispielhaft das Modell von Saastamoinen angegeben.

$$\Delta L_h^z = \frac{0.002277 \cdot P_S}{\left(1 - 0.0026 \cdot \cos(2\varphi) - 0.00000028 \cdot H_S\right)} \tag{7}$$

mit *P_s* - Luftdruck an der Beobachtungsstation [hPa]

*H*_s - Höhe der Beobachtungsstation [m]

φ - geographische Breite der Station [°]

Die Bestimmung des nicht-hydrostatischen Anteils der troposphärischen Laufzeitverzögerung mit Modellen ist aufgrund dessen hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität des troposphärischen Wasserdampfes relativ ungenau. Aus diesem Grund bietet es sich an, für die Bestimmung des Wasserdampfgehaltes Mikrowellenradiometer eingesetzt werden.

Da die Modelle alle von einer horizontalen Schichtung der Troposphäre ausgehen, sind nur vertikale Gradienten der meteorologischen Parameter und damit der Refraktion vorhanden. Damit lässt sich eine Laufzeitverzögerung in beliebiger Elevation mittels sogenannter Mapping Funktionen berechnen.

6.1.3 Mapping Funktionen

Diese werden wie auch die Laufzeitverzögerung selbst in hydrostatische und nicht hydrostatische Mapping Funktionen unterschieden.

$$\Delta L = \Delta I_{\hbar}^{z} \cdot m_{h}(\varepsilon) + \Delta I_{\hbar h}^{z} \cdot m_{h h}(\varepsilon)$$
⁽⁸⁾

Die wichtigsten Mapping Funktionen basieren auf einem fortgesetzten Bruch der Sinusfunktion (Gleichung 9) und unterscheiden sich lediglich durch die bestimmten bzw. zu bestimmenden Koeffizienten a, b und c.

$$m(\varepsilon) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\sin \varepsilon + c}}$$
(9)

Als Beispiele sind hier die Mapping Funktionen von Niell, Herring oder auch Ifadis zu nennen. Diese bieten bis zu Elevationen von 3° eine sehr gute Genauigkeit. Für weiterführende Informationen sei auf *Mendes (1999)* verwiesen.

6.1.4 Geneigte Troposphäre (Gradientenmodell)

Die Annahme einer horizontalen Schichtung ist für beide Anteile und vor allem beim nicht hydrostatischen Anteil nur bedingt und beim Durchzug einer Wetterfront gar nicht gegeben. Das führt zum Modell einer geneigten Troposphärenschichtung und damit zu einer azimutal asymmetrischen Troposphäre (siehe Abbildung 35). Mathematisch lässt sich dieser Sachverhalt mit horizontalen Gradienten in Nord- und Ostrichtung (G_n bzw. G_e) der troposphärischen Laufzeitverzögerung beschreiben.

Diese und die Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung ΔL^z stehen mit dem Azimut A_0 und der Neigung β der Troposphäre nach Abbildung 36 wie folgt in Zusammenhang.

$$A_{0} = \arctan\left(\frac{G_{e}}{G_{n}}\right)$$
(10)
$$\beta = \arctan\left(\frac{G}{\Delta L_{h}^{z}}\right),$$
(11)

mit $G = \sqrt{G_n^2 + G_e^2}$.



Abbildung 35: Modell einer geneigten Troposphäre (Hugentobler et al., 2001)

Mathematisch lässt sich dieser Sachverhalt mit horizontalen Gradienten in Nord- und Ostrichtung (G_n bzw. G_e) der troposphärischen Laufzeitverzögerung beschreiben.

Diese und die Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung ΔL^z stehen mit dem Azimut A_o und der Neigung β der Troposphäre nach Abbildung 36 wie folgt in Zusammenhang.

$$A_{0} = \arctan\left(\frac{G_{e}}{G_{n}}\right)$$
(10)
$$\beta = \arctan\left(\frac{G}{\Delta L_{h}^{z}}\right),$$
(11)

mit $G = \sqrt{G_n^2 + G_e^2}$.

Eine Laufzeitverzögerung ergibt sich damit zu:

$$\Delta L(\varepsilon, \alpha) = \Delta L_{sym} + \Delta L_{asym}$$
(12)

mit

$$\Delta L_{sym}(\varepsilon) = m_{sym}(\varepsilon) \cdot \Delta L^{z}$$
⁽¹³⁾

$$\Delta L_{asym} = m_{asym} \left(\varepsilon \right) \cdot \left(G_n \cdot \cos \alpha + G_e \cdot \sin \alpha \right)$$
(14)



Abbildung 36: Winkel der geneigten Troposphäre

Dabei ist ΔL_{sym} der Anteil einer horizontal geschichteten Troposphäre als Produkt aus einer symmetrischen Mapping Funktion m_{sym} und der Laufzeitverzögerung ΔL^z in Zenitrichtung. G_n und G_e sind die jeweiligen Gradienten in Nord- bzw. Ostrichtung, α das Azimut in das die Troposphäre geneigt ist und m_{asym} eine Gradientenmapping-Funktion. Dieses allgemeine Modell kann sowohl für den hydrostatischen als auch für den nicht hydrostatischen Anteil verwendet werden.

Zur genaueren Erfassung der Variabilität des nicht hydrostatischen Anteils wird jedoch dieses einfache Modell um die jeweiligen Änderungsraten V_L , \dot{G}_n und \dot{G}_e der drei Größen ΔL^z , G_n und G_e erweitert.

$$\Delta L(\varepsilon,\alpha) = m_{sym}(\varepsilon) \cdot \Delta L^{z} + V_{L} \cdot \Delta t + m_{asym}(\varepsilon) \cdot \left(G_{n} \cdot \cos\alpha + G_{e} \cdot \sin\alpha + \dot{G}_{n} \cdot \Delta t \cdot \cos\alpha + \dot{G}_{e} \cdot \Delta t \cdot \sin\alpha\right)$$
(15)

Zur Bestimmung der nicht hydrostatischen Gradienten werden die Ergebnisse der Wasserdampfradiometerbeobachtungen eines Hemisphärenscans einer MKQ-Schätzung zugeführt. Dafür wurden die Modelle von Davis (1992), Herring (1992), MacMillan und Ma (1997) sowie der Berner Software (Hugentobler et al., 2001) verwendet. Für die hydrostatischen Gradienten des hydrostatischen Anteils der troposphärischen Laufzeitverzögerung werden horizontale Luftdruckgradienten mit um die Beobachtungsstation verteilten Luftdruckmessstationen des DWD ermittelt, aus denen sich diese dann bestimmen lassen (Gäde, 2002).

6.2 Wasserdampfradiometrie

Die Wasserdampfradiometrie ist ein passives Messverfahren. Sie beruht auf der Messung der Intensität der elektromagnetischen Strahlung, die von einem Wasserdampfmolekül emittiert wird. Diese ist direkt proportional zum integrierten Wasserdampfgehalt der Atmosphäre. Damit kann unmittelbar auf die nicht hydrostatische troposphärische Laufzeitverzögerung geschlossen werden (Bürki und Kahle, 1995). Da das Flüssigwasser und der Sauerstoff ebenfalls Strahlung auf der selben Frequenz emittieren, wird auf zwei Frequenzen (23,8 bzw. 31,5 GHz) gemessen. Damit lässt sich deren Einfluss weitestgehend eliminieren (Kruse, 2000). Das Messergebnis sind die sogenannten Helligkeitstemperaturen. Für die Messung der Helligkeitstemperaturen werden im Radiometer WVR II je Frequenz drei verschiedene Strahlungsquellen angemessen. Neben der eigentlich zu bestimmenden Helligkeitstemperatur des Himmels werden die sogenannten Heißund Kaltlasten einer Referenzrauschdiode bestimmt. Dies wird zur internen Kalibrierung der Messwerte durchgeführt, da diese einer Drift unterliegen.

Die gemessene Helligkeitstemperatur der Atmosphäre sowie die Heiß- und Kaltlast mit den dazugehörigen Spannungen lassen sich in folgender Gleichung zusammenschreiben (Puliafito und Bürki, 1991).

(17)

$$T_B = T_A + (T_H - T_A) \cdot \gamma, \tag{16}$$

mit

sowie

 $\gamma = \frac{V_B - V_A}{V_H - V_A},$

| T _B | - | gemessene Helligkeitstemperatur des Himmels [K], |
|----------------|---|---|
| T _H | - | gemessene Heißlasttemperatur der Rauschdiode [K], |
| T_A | - | gemessene Kaltlasttemperatur der Rauschdiode [K], |
| V_B | - | gemessene Antennenspannung [V], |
| V_H | - | gemessene Heißlastspannung [V] und |
| V_A | - | gemessene Kaltlastspannung [V]. |

Da diese Gleichung jedoch nur bei nicht auftretenden Reflexionen und Verlusten an den Bauteilen gilt, werden nur scheinbare Helligkeitstemperaturen gemessen, die noch mit den sogenannten "Tippingkurven" kalibriert werden müssen. Zur genaueren Beschreibung dieses Verfahrens sei auf *Somieski (2000)* verwiesen.

Die Berechnung der nicht hydrostatischen Laufzeitverzögerung ΔL_{nh} erfolgt über den sogenannten PTX-Algorithmus, der wie folgt definiert ist (Kruse, 2000):

$$\Delta L_{nh} = c_{eff} \Big[1 + a_1 \Big(P_0 - \overline{P}_0 \Big) + a_2 \Big(T_{0,\max} - \overline{T}_{0,\max} \Big) + a_3 \Big(X - \overline{X} \Big) \Big] \cdot \Big(1 + 6 \cdot 10^{-5} T_0 \Big) X$$
(18)

| mit | P_0 | - | Luftdruck an der Beobachtungsstation [hPa], |
|-----------------------------------|-------------------------|---------|---|
| | $\overline{P_0}$ | - | Jahresmittel des Luftdrucks [hPa], |
| | $T_{0,\max}$ | - | Tagesmaximum der Temperatur an der Beobachtungsstation [K], |
| | $\overline{T}_{0,\max}$ | - | Jahresmittel der Tagesmaximaltemperaturen [K], |
| | C _{eff} | - | effektiver Inversionskoeffizient und |
| a ₁ , a ₂ , | a_3 | restlic | he Inversionskoeffizienten. |

Die beobachtete Helligkeitstemperatur ist dabei in der Größe X enthalten. Die benötigten Inversionskoeffizienten werden mittels Radiosondendaten der nächstgelegenen Stationen Essen und Emden bestimmt.

6.3 Ergebnisse zur Messungsdurchführung und Auswertung der Radiometerbeobachtungen

Für die externe Bestimmung der troposphärischen Laufzeitbestimmung sind neben den eigentlichen Radiometerbeobachtungen zusätzlich die meteorologischen Größen Luftdruck, Temperatur und relative Luftfeuchte zu bestimmen. Deshalb waren die dafür notwendigen Sensoren zu kalibrieren. Außerdem fand eine ausführliche Validierung der aufgezeichneten Wetterdaten durch Vergleich mit Daten des DWD statt. Bei der Radiometerbeobachtung gibt es eine Vielzahl von Einflussgrößen, die nicht vernachlässigbar sind. Daraus ergaben sich Ausschlusskriterien bzw. Filter auf die noch gesondert eingegangen wird. Der Vergleich der mit Radiometrie und meteorologischer Datenerfassung bestimmten troposphärischen Laufzeitverzögerung mit der aus der GPS-Auswertung ermittelten sollen die Ergebnisse der Wasserdampfradiometer validiert werden.

6.3.1 Kalibrierung der meteorologischen Sensoren

Elektronische Sensoren zum Erfassen der meteorologischen Daten Luftdruck, Temperatur und relativer Luftfeuchte können ein Driftverhalten aufweisen. Aus diesem Grund sollten in regelmäßigen Abständen (z.B. 1-2 Jahre) Kontrollkalibrierungen stattfinden. Nachdem die meteorologischen Sensoren zu Beginn der Messungen 1999 kalibriert wurden, fand im Dezember 2001 eine Wiederholungskalibrierung beim DWD in Potsdam statt. In den Darstellungen Abbildung 37 und Abbildung 38 sind die Kalibrierergebnisse der Temperatur- und Feuchtesensoren dargestellt.

Dabei stellen die einzelnen Punkte die Messwerte der Kalibrierung und die Linien die daraus ermittelten Korrekturkurven für die Verbesserung der gemessenen Wetterdaten dar. Weiterhin sind zu Vergleichszwecken die Kurven der Temperatur aus der Kalibrierung im Dezember 1999 dargestellt. Für die relative Feuchte liegen für die Kalibrierung von 1999 keine Vergleichswerte vor.

Die Temperaturkalibrierung stimmt im Hinblick auf die 1999 durchgeführte Kalibrierung, bei der nur ein Wert für die Temperatur kalibriert wurde, gut mit den jetzigen Werten überein. Bei der Feuchte treten, vor allem beim Sensor der Meteo-Unit erhebliche Abweichungen auf.



Abbildung 37: Ergebnisse der Temperaturkalibrierung 2001



Abbildung 38: Ergebnisse der Feuchtekalibrierung 2001

Das Verhalten der Luftdrucksensoren ist besonders wichtig, da sich der hydrostatische Anteil der troposphärischen Refraktion allein aus Luftdruckmessungen errechnen lässt. Die angestrebte Genauigkeit sollte besser als 0,5 hPa sein. Deshalb wurde eine temperaturabhängige Kalibrierung der Drucksensoren in einem Labor des Deutschen Kalibrierdienstes (DKD) bei der Firma WIKA in Klingenberg/ a. Main durchgeführt. In den Diagrammen Abbildung 39 und Abbildung 40 sind die unterschiedlichen Messreihen aus den Jahren 2001 und 1999 sowie die der Werkskalibrierung des Sensors der Meteo-Unit dargestellt.

Werden die unterschiedlichen Skalierungen der y-Achsen berücksichtigt, ist die starke Temperaturabhängigkeit des Sensors PTB100B der Meteo-Unit zu erkennen.



Abbildung 39: Ergebnis der temperaturabhängigen Drucksensorkalibrierung der Meteo-Unit (Norderney)

Die Abweichungen bewegen sich jedoch innerhalb der Genauigkeitsangaben von ± 2 hPa bei einem Temperaturbereich von -20 °C bis +40 °C. Der Sensor PMT16A der MAWS (Manual Automatic Weather Station) hingegen zeigt eine vergleichsweise hohe Temperaturstabilität. Die Abweichungen von einer von allen Werten ermittelten



mittleren Kurve beträgt nicht mehr als 0,05 hPa. Wie auch beim PTB100B liegen die Abweichung in den vom Hersteller angegebenen Genauigkeitsgrenzen von \pm 0,3 hPa.

Abbildung 40: Ergebnis der temperaturabhängigen Drucksensorkalibrierung der MAWS (Osnabrück)

6.3.2 Validierung der meteorologischen Messungen mit Daten des DWD

Die Radiometerstationen wurden soweit möglich permanent betrieben. Eine Überprüfung der meteorologischen Messwerte hinsichtlich Sensorfehlfunktionen oder standortbedingter Beeinträchtigungen ist in Fernwartung nicht möglich. Nahegelegene Wetterstationen anderer Institutionen (z. B. DWD) bieten jedoch die Möglichkeit, die Messwerte zu vergleichen und ggf. Unregelmäßigkeiten zu identifizieren. Außerdem sollte festgestellt werden, inwieweit bei ausgefallener Datenerfassung der Meteo-Unit bzw. der MAWS eine Verwendung der Daten des DWD möglich ist. Dieses wurde mit nur wenige hundert Meter entfernten Wetterstationen des DWD durchgeführt. Dabei stellten sich vor allem bei der Temperaturmessung standortspezifische Besonderheiten heraus.



Abbildung 41: Temperaturdifferenz zw. DWD und Meteo-Unit auf Norderney im Dez. '99 bzw. Jun. – Okt. '01

Bei beiden Temperaturvergleichen (Osnabrück bzw. Norderney) ist auffällig, dass die Differenzkurven im Sommer einen anderen Verlauf sowie eine deutlich höhere Streuung aufweisen als im Winter. In den Darstellungen Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die Differenzen von Norderney und Osnabrück dargestellt.



Abbildung 42: Temperaturdifferenz zw. DWD und MAWS in Osnabrück im Dez. '99 bzw. Jun. – Sept. '01

Dieses ist mit den Standorten der Temperaturfühler zu begründen. In Osnabrück steht die MAWS auf dem Pappdach des Katasteramtes, welches bei Sonnenschein zu zusätzlicher thermischer Strahlung führt. Da der Fühler jedoch in einer Höhe von 1,5 m über dem Pappdach aufgebaut ist, kann entsprechende Luftbewegung (Wind) trotzdem für repräsentative Temperaturwerte sorgen. Auf Norderney hingegen war der Temperaturfühler direkt an der Dachkante am Mast des Radiometers befestigt. Der Aufstieg von durch die Mauer aufgeheizter Luft bewirkt hier teilweise eine starke Verfälschung der Temperatur. In der folgenden Abbildung 43 ist ein Ausschnitt der Temperaturmessreihen vom DWD und der Meteo-Unit dargestellt.



Abbildung 43: Temperaturverlauf vom 20.7. – 8.8.2001 auf Norderney

Darin sind deutlich die unterschiedlichen Temperaturspitzen zur Mittagszeit sowie das annähernd gleiche Temperaturniveau in der Nacht ersichtlich. Es ist auch zu erkennen, dass es Tage gibt, an denen keine Unterschiede auftreten. Das wiederum zeigt, dass der Sensor bei entsprechendem Standort durchaus korrekte Werte messen könnte. Werden die berechneten Mittelwerte der Differenzen zum DWD für die Meteo-Unit bzw. der MAWS mit den Kalibrierwerten von 1999 in Abbildung 37 ($\Delta_{Meteo-Unit} = -0.5$ °C bzw. $\Delta_{MAWS} = 0.01$ °C) verglichen, so ist eine Übereinstimmung festzustellen. Damit konnten die Temperaturwerte des DWD ohne weitere Verbesserung übernommen werden.

Beim Luftdruck ist zuvor noch der Druckunterschied wegen des Höhenunterschiedes der Drucksensoren zu berücksichtigen. Unter Verwendung und Umstellung der internationalen Höhenformel ergeben sich, dem Höhenunterschied $h_2 - h_1$ entsprechend, nach Gleichung (2.1) folgende Druckunterschiede in hPa (siehe Tabelle 23).

$$\Delta p_{h_1 - h_2} = p_n \left(\left(1 - \frac{6.5 \cdot h_1}{288000m} \right)^{5.255} - \left(1 - \frac{6.5 \cdot h_2}{288000m} \right)^{5.255} \right)$$
(2.1)

mit

pn

Druck auf der Erdoberfläche = 1013,25 hPa (Jahresmittel in Meereshöhe bei 15°C)

| Station | Höhenunterschied [m] (Sensor der Meteo-Unit- DWD_Sensor) | Druckunterschied [hPa] |
|-----------|--|---------------------------|
| Norderney | -0,84 | 0,10 |
| Osnabrück | 11,90 | -1,41 |

Tabelle 23: Druckunterschiede wegen Höhenunterschied der Sensoren

Im Ergebnis sind für die Stationen unterschiedliche Kurvenverläufe erkennbar. Neben einer erheblich höheren Streuung der Differenzen des Sensors der Meteo-Unit gegenüber der MAWS ist auch eine im Verlauf sich ändernde Druckdifferenz erkennbar. Dieses ist mit der durch die Kalibrierung festgestellten hohen Temperaturabhängigkeit des PTB100B zu erklären.



Abbildung 44: Verlauf der Druckdifferenz und der Temperatur, Meteo-Unit, Norderney 28.6. – 23.10.2001

In der Abbildung 44 ist neben der Druckdifferenz die Temperatur für den Zeitraum von Ende Juni bis Ende Oktober 2001 der Station auf Norderney dargestellt. Deutlich ist ersichtlich, dass bei steigender Temperatur auch die Druckdifferenz größer wird. Es ist teilweise sogar der Tagesgang der Temperatur in der Druckdifferenzkurve zu erkennen.

Da der Sensor jedoch in einem geschlossenen und beheizten Gebäude gestanden hat, ist die gemessene Außentemperatur nicht gleich der Sensortemperatur. Des Weiteren kommt der Einfluss der Sonneneinstrahlung hinzu, die den Raum durch das Fenster (nach Süden gerichtet) bei Sonnenschein stark aufgeheizt hat.

Somit ist eine nachträgliche Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur des Sensors auch nur bedingt und eine Aussage zu einer eventuellen zeitlichen Veränderung des Sensors im Zeitraum vom Dezember 1999 bis Dezember 2001 gar nicht möglich.

Da der Sensor jedoch in einem geschlossenen und beheizten Gebäude gestanden hat, ist die gemessene Außentemperatur nicht gleich der Sensortemperatur. Des Weiteren kommt der Einfluss der Sonneneinstrahlung hinzu, die den Raum durch das Fenster (nach Süden gerichtet) bei Sonnenschein stark aufgeheizt hat. Somit ist eine nachträgliche Berücksichtigung des Einflusses der Temperatur des Sensors auch nur bedingt und eine Aussage zu einer eventuellen zeitlichen Veränderung des Sensors im Zeitraum vom Dezember 1999 bis Dezember 2001 gar nicht möglich.

Nach Abzug des Druckunterschiedes wegen des Höhenunterschiedes verbleiben Differenzen zwischen 0 hPa und 2 hPa. Dieses stimmt bei der Annahme, dass die Temperatur aufgrund der Heizung im Gebäude nicht unter 15 °C gesunken war, mit den Kalibrierwerten überein. Da sich keine weiteren Rückschlüsse zur Temperatur des Drucksensors der Meteo-Unit ziehen lassen, wurden die Druckwerte des Deutschen Wetterdienstes unter Berücksichtigung des Höhenunterschiedes zur



Abbildung 45: Verlauf der Druckdifferenz zwischen DWD- und MAWS-Sensor in Osnabrück, Dez. 1999 bis Sept.2001

GPS-Antenne (-0,37 hPa) für die fehlenden Daten auf Norderney übernommen. In Osnabrück ist aus dem Verlauf der Differenzen zum DWD keine Veränderung zu erkennen. Nach Abzug des Druckunterschiedes wegen der Höhendifferenz verbleibt ein Unterschied von +0,32 \pm 0,16 hPa (Abbildung 45). Dieser weicht unter Berücksichtigung, dass der Luftdruck vorwiegend zwischen 980 hPa und 1020 hPa schwankte, um ca. +0,2 hPa bis +0,3 hPa vom Kalibrierwert 2001 und um 0,0 hPa bis +0,1 hPa vom Kalibrierwert 1999 ab. Da keine Drift in der Differenz zu erkennen ist, aber aufgrund der gerade genannten Abweichungen auch nicht gesagt werden kann, dass die Kalibrierung von 1999 fehlerhaft war, werden für die Wetterdaten der Meteo-Unit von 1999 und 2000 die Kalibrierwerte von 1999 und für 2001 die der Kalibrierung vom Dezember 2001 verwendet. Eine Darstellung für Osnabrück ist im Anhang zu finden.

Weil für die Kalibrierung kein konstanter Wert bestimmt wurde und die Kalibrierkurven von 1999 und 2001 sich auch unterscheiden, ist für die Umrechnung des DWD-Drucks auf die Antennenhöhen ein Vergleich mit den kalibrierten und höhenkorrigierten Werten der MAWS bzw. der Meteo-Unit durchgeführt worden. Als Ergebnis stellte sich im Mittel ein Wert von -0,78 \pm 0,17 hPa heraus, der an die Werte des Drucks vom DWD anzubringen war.



Abbildung 46: Mittlerer Tagesluftdruck und mittlere Änderungsrate des Luftdrucks der Stationen Norderney und Osnabrück

Die Ergebnisse des Vergleichs der relativen Luftfeuchte (rF) streuen sehr stark, was aber aufgrund der Messgenauigkeit der Feuchtesensoren auch nicht anders zu erwarten war. Da die relative Luftfeuchte für die Auswertung keine Bedeutung hat, sei darauf nicht näher eingegangen. Zur Charakterisierung des Wetters wurden aus den Wetterdaten der einzelnen Tagesdateien statistische Angaben ermittelt. Dazu zählen u. a. die Mittelwerte der einzelnen meteorologischen Parameter über den ganzen Tag, Tagesmaxima, Tagesminima sowie die mittlere Änderungsrate (Gradient) der einzelnen Messwerte.

In der Abbildung 46 ist der Verlauf des Luftdrucks der Stationen Norderney und Osnabrück über den Zeitraum von Dezember 1999 bis September 2001 dargestellt. Die hier mit Gradient bezeichneten Werte stellen die Gradienten der meteorologischen Werte dar.

Der Vergleich des Luftdrucks zeigt, dass sich die Luftdruckkurven vom Kurvenverlauf her im Wesentlichen gleichen, jedoch die mittleren Änderungsraten an den beiden Stationen teilweise verschieden sind.

Deutlich ist in Abbildung 46 bei den Änderungsraten erkennbar, dass sich der Luftdruck in den Herbst- und Wintermonaten stärker ändert als im Sommer. Außerdem ist in der Luftdruckkurve selbst der rasche Druckabfall von 10 bis 20 hPa für das Zentrum eines Tiefdruckgebietes mehrfach zu beobachten.

In den Abbildungen zur Temperatur (im Anhang) ist deutlich der Jahresgang zu erkennen. Die Sommer-Winterdifferenz beträgt hierbei im Mittel ca. 22° C.

Auf Norderney ist im Vergleich zu Osnabrück an der geringeren Streuung der Temperatur um den Mittelwert deutlich die dämpfende Wirkung des Wassers (Nordsee) sichtbar. Die Temperaturgradienten sind, wie die Temperatur selbst, im Sommer größer als im Winter, was mit der größeren Tages-Nacht-Temperaturdifferenz begründet werden kann. Dieses fällt auf Norderney aufgrund der dämpfenden Wirkung des Meeres geringer aus als in Osnabrück. Der Absolutbetrag der Temperaturgradienten hat zahlenmäßig ungefähr die selbe Größenordnung wie die Druckgradienten (ca. 0,1 - 0,5 [°C/Tag bzw. hPa/Tag]).

Die relative Luftfeuchte ist in den Herbst- und Wintermonaten aufgrund von häufiger auftretendem Niederschlag größer als in den Sommermonaten. Weiterhin ist auch hier im Vergleich zu Osnabrück in den Sommermonaten der Einfluss des Meeres zu sehen. Während in Osnabrück die relative Luftfeuchte im Sommer deutlich unter 60% gefallen ist, sank diese im Mittel auf Norderney kaum unter 70%. Für die Feuchtegradienten ist ein den Temperaturgradienten ähnliches jahrestypisches Verhalten zu beobachten, wobei hier die Feuchte in den Sommermonaten im Mittel kleiner ist als im Winter. Allerdings beträgt der Absolutbetrag ca. das zehnfache von dem der Temperatur.

Die Abbildungen für die Temperatur und die relative Luftfeuchte sind im Anhang zu finden.

6.3.3 Untersuchung der WVR-Daten auf Störungen

Bei der Auswertung der WVR-Daten stellt sich die Frage bis zu welcher Elevation Beobachtungen zur Berechnung des SWD bzw. ZWD verwendet werden sollen. Durch Beobachtungen niedriger Elevationen, die durch reflektierte Strahlung der Erdoberfläche nicht repräsentativ für die Atmosphäre sind, wird der Anstieg der Tippingkurve und die damit verbundene Heißlastkorrektur beeinflusst. Die Tippingkurve ist eine Gerade, die durch die Helligkeitstemperaturen (siehe Theorie), aufgetragen über die Luftmasse (m $\approx 1/sin(\epsilon)$, definiert ist. In der

Abbildung 47 ist das für einen Azimutscan dargestellt.

Der lineare Zusammenhang zwischen den linearen Helligkeitstemperaturen eines Azimutscans ist jedoch nur im Idealfall, d. h. bei symmetrischer, homogener Wasserdampfverteilung in der Troposphäre, gegeben. Da diese aber vorhanden sind, ist es schwierig abzuschätzen, ab welchen Elevationswinkel die Beobachtungen nicht mehr von der Erdoberfläche beeinflusst werden. Der errechnete, nicht hydrostatische Path Delay sollte sich jedoch ab einen bestimmten Elevationswinkel kaum noch ändern. Somit wurde aus dem Vergleich der mit unterschiedlicher Elevationsmaske berechneten Anstiegen der Tippingkurve, deren Fehler sowie den ZTD's geschlussfolgert, nur Beobachtungen mit einem Mindestelevationswinkel von 27° in die Auswertung einzubeziehen. Die Abbildung 48 stellt den Vergleich der ZTD's graphisch dar.



Abbildung 47: Verlauf der Tippingkurve bei unterschiedlichen Elevationswinkeln



Abbildung 48: Vergleich der ZWD bei unterschiedlichen Elevationswinkeln

6.3.4 Untersuchungen des Einflusses von Regen auf die WVR-Daten

Das Prinzip der Wasserdampfradiometrie führt nur bei einer sauberen und trockenen Hornantenne zu fehlerfreien Ergebnissen. Aufgrund von Regentropfen auf der Hornantenne sind die gemessenen Werte unbrauchbar. Eine Auswertung mit Regendaten zeigte, dass die errechneten Laufzeitverzögerungen erheblich streuen bzw. negativ oder unrealistisch groß werden. Demzufolge sind die Daten bei Regen von der Auswertung auszuschließen (Schmidt, 2001). Dafür kommen an den Radiometern Regensensoren zum Einsatz, welche die Tropfenbildung auf der Frontseite des Radiometers registrieren. Auf Norderney war dieser jedoch erst ab 2001 installiert. Mit den Sensoren wird in den Rohdaten ein entsprechender Flag gesetzt, womit eine nachträgliche Eliminierung möglich ist.

Bei Regen werden jedoch nicht nur die zu dieser vom Regensensor registrierten Zeit gemessenen Daten verfälscht. Das herannahende bzw. abziehende Regengebiet führt auch zur Verfälschung der unmittelbar vor bzw. nach dem Regen aufgezeichneten Messwerte. Dafür kommt jedoch ein Filter für Grobausreißer (VBF-Filter) zur Anwendung auf den in Kapitel 6.3.6 noch näher eingegangen wird.

6.3.5 Untersuchungen des Einflusses von Messungen im Umkreis der Sonne

Misst das Radiometer direkt Richtung Sonne, wird das Signal bis zu 60 K verfälscht. Selbst bei einer Messung von 10° neben der Sonne wird die Helligkeitstemperatur um 1 K falsch bestimmt (Solheim, 2001). Deshalb sind alle Beobachtungen, die im Umkreis von 15° um die Sonne gemessen wurden, eliminiert worden. Dies geschieht durch Vergleichen der lokalen Sonnenkoordinaten (Azimut, Elevation) mit der Ausrichtung des Radiometers. Aufgrund des Sonnenstandes betrifft das in den Sommermonaten ca. 70 und in den Wintermonaten ca. 30 Beobachtungen pro Tag (Gäde, 2002).

6.3.6 Vorbehandlung der Radiometerdaten bzw. Filterung der errechneten SWD bzw. ZWD

Um Fehler bei den errechneten nicht hydrostatischen Path Delays zu vermeiden, sind vorweg eine Reihe von Filter- bzw. Eliminierungsschritte notwendig. Dazu zählt die Glättung der sogenannten Heiß- und Kaltlasten der Radiometer mit einem MEDIAN- und einem MEAN-Filter, da diese durch bauteilbedingte Rauschen stark streuen und zu Fehlern in den berechneten Delays führen.

In Abbildung 49 sind beispielhaft dafür die Kaltlastspannungen auf den Frequenzen 23,8 GHz u. 31,5 GHz für einen Tag mit und ohne Glättung dargestellt. Als Filtergrößen wurden ein Medianfilter der Länge 10 und ein gewichteter Mittelwertfilter der Länge 100 als optimal befunden und eingesetzt. Es ist deutlich erkennbar, dass Ausreißer beseitigt und das starke Rauschen verringert werden konnten.



Abbildung 49: gefilterte und ungefilterte Kaltlastspannungen auf beiden Frequenzen, 4.12.99, Station Osnabrück, Radiometer OR

In Abbildung 50 sind die Ergebnisse der in Zenitrichtung umgerechneten Radiometermessungen als ZWD dargestellt. Der mittlere ZWD (mit XM angegeben) vergrößert sich durch das Filtern um 0,15 cm. Dieser Betrag erscheint gering. Bei der Umrechnung auf niedrige Elevationen erreicht er jedoch ein Vielfaches (z.B. 5° Elevation ca. 1,8 cm). Eine Verringerung der Streuung des ZWD ist deutlich erkennbar. Als Maß ist in Abbildung 50 die Standardabweichung SD des Mittels XM angegeben.

Die verbleibende Streuung der ZWD ist auf andere Fehlereinflüsse und horizontale Asymmetrien der Wasserdampfverteilung zurückzuführen.



Abbildung 50: Zenit Wet Path Delay (ZWD) aus ungefilterten und gefilterten Referenzspannungen und Temperaturen für 4.12.99, Station Osnabrück, Radiometer OR

Weiterhin sind, wie bereits erläutert, die Daten während Regens (mit SCHWETT gekennzeichnet), die im Umkreis der Sonne sowie die Daten die unterhalb einer
bestimmten Elevation gemessen wurden zu eliminieren. Außerdem wird durch das Programm WVRProc bei der Auswertung eine Grobausreißersuche (VBF-Filter) in jedem Azimutscan der verbliebenen Radiometerdaten vorgenommen, wodurch u. a. die in Kapitel 6.3.4 angesprochenen Daten bei auf- bzw. abziehenden Regen eliminiert werden. Nach der Berechnung der Wet Delays (SWD bzw. ZWD) sind jedoch immer noch unrealistische Werte vorhanden. Dazu zählen Daten die größer als 35 cm oder kleiner als 0 cm sind bzw. mehr als das dreifache der Standardabweichung eines ausgleichenden Polynoms von diesem abweichen. Auch diese Daten werden eliminiert. In den Darstellungen Abbildung 51 und Abbildung 52 ist die Anzahl der Beobachtungen während der einzelnen Auswertungsschritte in Osnabrück bzw. Norderney für den Zeitraum 1999 bis 2000 dargestellt. Die Darstellungen für 2001 sind im Anhang aufgeführt.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass aufgrund des fehlenden Regensensors eine Eliminierung der Daten während Regens mit dem Programm SCHWETT für Norderney erst ab 2001 möglich war, so dass diese Daten durch das VBF-Filter eliminiert werden mussten.

Es ist zu erkennen, dass an einem Tag maximal zwischen 5600 und 5700 Beobachtungen des Wasserdampfradiometers möglich sind.

Abweichungen davon sowie Komplettausfälle (Tage ohne Daten) hängen mit Stromausfällen oder Hardwareproblemen des Radiometers selbst zusammen. Besonders erwähnt seien hier bei Osnabrück die Ausreißer am 26.03.2000 (51629 MJD) und am 17.04.2000 (51651 MJD).



Abbildung 51: Anzahl der Beobachtungen während der einzelnen Auswertungsschritte, Osnabrück, 1999-2000

Am 26.03.2000 ist die Systemzeit des Steuerrechners automatisch von Winterzeit auf Sommerzeit umgestellt worden, was am 17.04.2000 dann manuell wieder korrigiert wurde. Für Norderney geschah dies bereits am 6.04.2000 (51640 MJD). Für den Sprung vom 29.2.2000 (51603 MJD) auf den 1.03.2000 (51604 MJD) von 100 Beobachtungen weniger pro Tag sowie für die am 22.06.2000 (51517 MJD) ca.



1000 mehr aufgezeichneten Beobachtungen konnte keine Begründung gefunden werden.

Abbildung 52: Anzahl der Beobachtungen während der einzelnen Auswertungsschritte (Norderney, 1999-2000)

Auffällig ist weiterhin, dass ab dem 22.04.2000 (51656 MJD) plötzlich mehr als 700 Beobachtungen (ca. 12%) und ab dem 25.07.2000 (51750 MJD) mehr als 1700 Beobachtungen (ca. 30%) wegen zu niedrigem Elevationswinkel eliminiert wurden. Als Grund hierfür ist die Einstellung der Steuerungsdatei des WVR zu nennen, die von diesen Tagen an auf Elevationswinkel bis runter zu 20° bzw. 15° eingestellt war. Zu der Eliminierung der Beobachtungen im Umkreis der Sonne sei auf Abschnitt 5 verwiesen. An der deutlich geringeren Anzahl der Beobachtungen nach der VBF-Filterung an Regentagen ist zu erkennen, dass, wie in Kapitel 4 beschrieben, nicht nur die Daten während es regnete verfälscht sind. Die Eliminationsrate bei der Filterung nach der Berechnung der Delays (Grobausreißer, 3 Sigma Ausreißer) beträgt dann i. d. R. deutlich weniger als 10 %.

6.3.7 Inversionskoeffizienten

Zur Auswertung der Wasserdampfradiometerdaten werden die sogenannten Inversionskoeffizienten c_{eff} , a_1 , a_2 und a_3 benötigt (siehe Theorie). Die Berechnung der täglichen Inversionskoeffizienten erfolgt mittels Radiosondendaten. Da für Norderney und Osnabrück keine Radiosondendaten vorhanden sind, werden hierfür die der Stationen Emden-Königspolder und Essen verwendet. Dazu sind zuerst alle vier Koeffizienten für Essen und Emden berechnet worden. Die Koeffizienten c_{eff} und a_3 ergeben sich dann für Norderney und Osnabrück aufgrund der bei *Somieski* (2000) dargestellten Breitenabhängigkeit durch lineare Inter- bzw. Extrapolation.



Abbildung 53: Inversionskoeffizient c_{eff} der vier Stationen von Okt. 1999 bis Dez. 2001

Für die Koeffizienten a_1 und a_2 wurden diejenigen der nächstgelegenen Station (für Osnabrück von Essen und für Norderney von Emden) übernommen, da für diese keine Abhängigkeit von der Breite erkennbar ist (Somieski, 2000). In der Abbildung 53 ist beispielhaft der Koeffizient c_{eff} dargestellt. Die Darstellungen der anderen drei Koeffizienten sind im Anhang aufgeführt.

6.3.8 Vergleich der Radiometer

Bereits im Jahr 2000 war eine Kampagne zum Vergleich europäischer Radiometer in Onsala/Schweden durch Parallelmessung mit dem dortigen Radiometer geplant. Ziel sollte sein, geräte- und softwarespezifische Unterschiede der eingesetzten Instrumente zu erkennen und ggf. zu bestimmen. Diese Kampagne konnte nicht verwirklicht werden. Statt dessen erfolgte im Juni 2001 an der ETH Zürich eine Parallelmessung der beiden Projektradiometer OR und YE. Das Ziel war die Bestimmung des Geräteoffsets der beiden Instrumente. Im Falle des Vorhandenseins eines konstanten Offsets, kann dieser an die Messdaten angebracht und auf eine Schätzung der Radiometeroffsets in der GPS-Auswertung verzichtet werden.

Die Abbildung 54 macht deutlich, dass die Differenz zwischen den beiden Radiometern nicht konstant ist und stark variieren kann. Zu erkennen sind im Wesentlichen vier Abschnitte in der Differenzkurve sowie teilweise beträchtliche Lücken. Der Grund hierfür sind während der Kampagne durchgeführte Einstellungsund Reparaturarbeiten an den Radiometern. Für die bezeichneten drei Abschnitte lassen sich sehr gut Mittelwerte festlegen. Der nicht nummerierte Abschnitt zwischen dem 2. und dem 3. ist aufgrund von Regenwetter wenig aussagekräftig. Der dritte Abschnitt umfasst nur vier zusammenhängende Tage und der Mittelwert weist für die Festlegung eines konstanten Offset zwischen den beiden Radiometern eine relativ große Standardabweichung auf. Somit kann dafür kein Wert festgelegt werden.

Aufgrund dessen ist trotz Einführung der Radiometerdaten die zusätzliche Schätzung eines Troposphärenparameters pro Session im GPS-Auswerteprozess nötig.



Abbildung 54: ZWD-Differenz zwischen ORANGE (OR) und YELLOW (YE) während des Parallelbetriebs

6.3.9 Vergleich GPS – Radiometer

Eine Möglichkeit zur Kontrolle der Radiometerergebnisse ist der Vergleich der Werte der totalen troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (ZTD) aus Messungen von Radiometer und Luftdruck mit den Resultaten der Troposphärenparameterschätzung aus einer GPS Auswertung. Dafür standen allerdings nur bei der Koordinatenberechnung stündlich geschätzte Troposphärenparameter (C1) sowie halbstündliche mit festgehaltenen Stationskoordinaten geschätzte Troposphärenparameter (T1) zur Verfügung. Die Darstellungen in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. bis Abbildung 55 zeigen die Differenzen der ZTD (C1 – WVR) der unterschiedlichen Stationen Osnabrück und der neuen und alten GPS-Station auf Norderney für den Zeitraum bis 2000. Bei allen drei Stationen sind in den Differenzkurven Ausreißer zu beobachten. Nach genauem Betrachten der Werte der drei Stationen ist aber erkennbar, dass diese nicht von der GPS-Lösung, sondern ausschließlich von den Radiometermessungen stammen. Damit kann dies, trotz aller Filterungen, nur mit immer noch fehlerhaften Messwerten des Radiometers begründet werden. Aufgrund dessen sind alle Werte außerhalb einer 3-Sigma-Grenze eliminiert und Standardabweichung und Mittelwert erneut berechnet worden.



Abbildung 55: ZTD-Differenz zwischen GPS und WVR/Luftdruck (Norderney Dez.'99 bis Juni.'00)



Abbildung 56: ZTD-Differenz zwischen GPS und WVR/Luftdruck (Norderney Dez.'99 bis Juni.'00)

Eine weitere Besonderheit ist in der Differenzkurve der Station OSNA zu erkennen. Diese weist eine Drift auf, die theoretisch nicht auftreten sollte. Zu erkennen ist jedoch, dass diese erst ab April eintrat. Deshalb sind für den gesamten Zeitraum die Monatsmittel der ZTD-Differenz gebildet worden, die in Tabelle 24 zusammengefasst dargestellt sind. In der zweiten Zeile stehen die Mittelwerte nach eliminierten Ausreißern und in den Klammern ist die Anzahl der Werte angegeben, aus denen der Mittelwert bestimmt wurde.

| | Station | OSNA | NONE |
|-------|---------|------|------|
| Monat | | [mm] | [mm] |

| | 00.00 40.00 (450) | |
|---------------|----------------------|----------------------|
| Dezember 99 | -29,09 ± 12,36 (458) | -49,89 ± 19,96 (437) |
| | -29.99 ± 8.53 (447) | -48.00 ± 12.80 (417) |
| Januar '00 | -27,09 ± 17,18 (254) | |
| | -26.94 ± 9.90 (238) | |
| Februar '00 | -24,09 ± 11,33 (441) | |
| | -24.02 ± 9.52 (435) | |
| März ´00 | -21,26 ± 13,94 (551) | |
| | -21.28 ± 11.10 (537) | |
| April ´00 | -4,65 ± 13,54 (151) | -54,77 ± 15,27 (272) |
| | -5.72 ± 8.64 (147) | -53.65 ± 12.16 (268) |
| Mai ´00 | -7,46 ± 11,55 (614) | -47,31 ± 16,55 (729) |
| | -7.51 ± 10.76 (611) | -46.58 ± 13.22 (717) |
| Juni ´00 | 10,87 ± 22,33 (489) | -48.56 ± 16.63 (766) |
| | 11.94 ± 18.86 (478) | -48.46 ± 13.94 (752) |
| Juli ´00 | 23,25 ± 16,12 (431) | |
| | 23.42 ± 14.97 (428) | |
| August '00 | 29.62 ± 19.17 (573) | |
| - | 29.53 ± 17.49 (567) | |
| September '00 | 33.25 ± 33.18 (252) | |
| | 33.38 ± 24.16 (235) | |

Tabelle 24: Monatsmittelwerte für ZTD- Differenzen der Stationen OSNA und NONE, Originalwerte in der jeweils oberen Spalte, nach Ausreißerbeseitigung untere Zeile



Abbildung 57: ZTD-Differenz zwischen GPS und WVR/Luftdruck (Osnabrück '01) Eine Begründung für diese Drift kann ein aufgetretener Hardwarefehler des Radiometers sein. Als weiterer Einfluss ist die Verschmutzung der Linsen der Antennen zu nennen. Im Juli 2000 wurde eine dicke Staubschicht auf der Linse festgestellt, die zur Verfälschung des Messsignals führte.

Da in der Stadt die Luft im Allgemeinen verschmutzter ist als an der Küste, trat in Norderney dieses nur vermindert auf. Ab August 2000 sind die Linsen der Hornantennen dann regelmäßig gereinigt worden. Die nach der Reparatur des Radiometers in Osnabrück ab Juni 2001 aufgezeichneten Daten weisen im Vergleich zu GPS keine Drift mehr auf. Die Streuung ist mit der vor dem Hardwarefehler vergleichbar. Allerdings ist die absolute Differenz mit ca. 13 mm kleiner geworden. Der Vergleich zur halbstündlichen Troposphärenschätzung (T1) mit festgehaltenen Stationskoordinaten zeigt, dass aufgrund der größeren Anzahl an Parametern die auch die Anzahl der Ausreißer größer wird, aber an der Absolutdifferenz sich kaum etwas ändert.



Abbildung 58: ZTD-Differenz zwischen GPS und WVR/Luftdruck (Norderney '01)

6.3.10 Kalibrierung der Klinometer

Ganz entscheidend für die Größe des nicht hydrostatischen Delays ist die Genauigkeit des Elevationswinkels. Dieser hat vor allem im unteren Elevationswinkelbereich entscheidende Auswirkungen auf den Verlauf der Tippingkurve und die damit verbundene Heißlastkorrektur. Der Elevationswinkel ist von der Genauigkeit des Klinometers (Flüssigkeitsneigungssensor) abhängig. Dies bedingt die Notregelmäßig durchzuführender Kalibriermessungen. wendigkeit Nach den durchgeführten Kalibrierungen, die zu Beginn der Messungen im Herbst 1999, einem Defekt des Radiometers auf Norderney im April 2000 sowie einem Klinometerwechsel beim Radiometer in Osnabrück im November 2000 stattfanden, wurden die Klinometer im Mai 2002 vor dem Umbau der Radiometer OR und YE nochmals kalibriert. Die Kurven sind in der Abbildung 59 dargestellt. Deutlich ist der Soll-Ist-Nullpunkt bei ca. 50° zu erkennen. Je größer bzw. kleiner der Elevationswinkel wird um so größer werden die Abweichungen, was wie bereits erwähnt vor allem im unteren Elevationswinkelbereich kritisch ist.



Abbildung 59: Klinometerkalibrierkurven der Radiometer ORANGE (Osnabrück) und YELLOW (Norderney)

Deutlich sind die Unterschiede sowie die Veränderungen bei den einzelnen Klinometern zu erkennen. Eine Vernachlässigung dessen wirkt sich entscheidend auf den ZWD aus. Dementsprechend ist für die einzelnen Jahre jeweils eine andere Klinometerkalibrierdatei anzubringen. Die Klinometerkalibrierung von OR Nov./2000 ist jedoch nicht verwendet worden, da das Radiometer damit nur 2 Tage in Betrieb war und dann abermals zerlegt und repariert werden musste.

6.3.11 Gradientenberechnung

Wie in der Theorie erläutert wurden für beide Anteile (hydrostatisch bzw. nicht hydrostatisch) horizontale Gradienten der troposphärischen Laufzeitverzögerung berechnet. Dabei ist die Scanreihenfolge, d.h. in welcher Reihenfolge die entsprechenden Azimute angefahren wurden, ganz entscheidend für die Repräsentativität der berechneten Gradienten.

Die Darstellungen in Abbildung 60 und Abbildung 61 machen dies deutlich. So sind in der ersten Konfiguration (von 1999 bis 2000) acht Azimute in der Reihenfolge (bei Nord beginnend in Richtung Ost) 0°, 90°, 180°, 270°, 315°, 225°, 135° und 45° und in der zweiten (2001) sechs Azimute (0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300°) gemessen worden. Bei gleichmäßiger Verteilung des Wasserdampfes in der Troposphäre lässt sich mit den in alle Richtungen gemessenen Laufzeitverzögerungen eine horizontale Fläche erzeugen, die bildlich betrachtet eine Schicht der Troposphäre darstellt.



Abbildung 60: 22-minütiger Hemisphärenscan mit 8 Azimuten vom 22.03.2000, ca. 10:45 Uhr

Bei inhomogener Verteilung des Wasserdampfgehaltes variieren dementsprechend auch die Laufzeitverzögerungen. Nach der Theorie entsteht hierdurch eine Fläche, die entsprechend der Wasserdampfverteilung geneigt ist Aufgrund der sich teilweise rasch ändernden Wasserdampfverteilung kommt es bei der Scanreihenfolge der ersten Konfiguration oft zu keiner gleichmäßig geneigten, homogenen Fläche, für welche die geschätzten Gradienten repräsentativ sind (siehe Abbildung 60).

Daran ist zu erkennen, dass für die Schätzung über 22 Minuten bei der ersten Scan-Konfiguration die zeitlichen Änderungen der einzelnen Parameter unbedingt erforderlich sind, um die teilweise starke Variabilität des Wasserdampfes besser zu erfassen. Dagegen entstehen mit der 2. Scanreihenfolge keine solch inhomogene Flächen (siehe Abbildung 61).

Abbildung 61 zeigt sehr anschaulich ein Beispiel für eine geneigte Troposphärenschichtung. Eine äquivalente Darstellung für eine horizontale Schichtung ist im Anhang aufgeführt.



Abbildung 61: 17-minütiger Hemisphärenscan mit 6 Azimuten vom 06.07.2001, ca. 1:45 Uhr

Bei der Berechnung der horizontalen Gradienten entstehen als vergleichbare Größe die Neigung sowie das Azimut in die der entsprechende Anteil der Troposphäre geneigt ist. Die Darstellungen Abbildung 62 bis Abbildung 65 zeigen die Häufigkeit der vorkommenden Azimute der geneigten, nicht hydrostatischen bzw. hydrostatischen Troposphäre der jeweiligen Station.



Abbildung 62: Häufigkeit der Azimute der nicht hydrostatischen Troposphäre (Osnabrück)



Abbildung 64: Häufigkeit der Azimute der hydrostatischen Troposphäre (Osnabrück)



Abbildung 63: Häufigkeit der Azimute der nicht hydrostatischen Troposphäre (Norderney)



Abbildung 65: Häufigkeit der Azimute der hydrostatischen Troposphäre (Norderney

Deutlich sind die unterschiedlichen Azimute der Neigungen zu erkennen. Dieses gilt sowohl für den Vergleich zwischen den Stationen als auch für die Gegenüberstellung zwischen hydrostatischen und nicht hydrostatischen Anteil. Während die hydrostatische Troposphäre meist nach Norden, Nordwest bzw. Nordost geneigt ist, dominieren beim nicht hydrostatischen Anteil die Neigungen in Richtung Nordost bzw. Südwest. Außerdem zeigt sich beim nicht hydrostatischen Anteil aufgrund des wesentlich größere Variabilität. Wasserdampfes eine Die Neigungen der entsprechenden Troposphärenanteile ist ebenfalls sehr unterschiedlich. Die Neigungen sind meistens kleiner als 0,02° hydrostatischen und variieren vergleichsweise gering gegenüber den nicht hydrostatischen Neigungen. Diese wiederum können Werte bis zu 30° annehmen. Dieses resultiert aus den Absolutbeträgen der Gradienten selbst, die für den hydrostatischen Anteil i. d. R. kleiner als 1 mm sind und beim nicht hydrostatischen Anteil 2 bis 3 cm groß werden können.



Abbildung 66: Vergleich der Nordgradienten aus BSW, WVR und Luftdruck (Osnabrück)



Abbildung 67: Vergleich der Ostgradienten aus BSW, WVR und Luftdruck (Osnabrück)

Diese so berechneten Gradienten lassen sich, wie auch die ZTD, mit den geschätzten Gradienten aus der GPS-Auswertung mit der Berner Software vergleichen.

In den Abbildungen sind zum einen die Gradienten aus der Berner Software und zum anderen nur der hydrostatische Anteil aus den Luftdruckdaten sowie die Summe der beiden Anteile aus der Wasserdampfradiometrie und den Luftdruckgradienten für die Station Osnabrück dargestellt. Die Abbildungen für Norderney sind im Anhang aufgeführt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die unterschiedlichen Lösungen zwar die gleiche Größenordnung aufweisen, aber nur abschnittsweise den gleichen Verlauf haben. Der Gründe hierfür sind einerseits die starke Variabilität des nicht hydrostatischen Anteils und andererseits die unsichere Schätzung der Gradienten in einem GPS-Netz der vorliegenden Ausdehnung. Damit kann jedoch gezeigt werden, dass die mit WVR und Luftdruck bestimmten Gradienten durchaus plausibel und damit verwendbar sind.

6.3.12 Untersuchung verschiedener Ansätze zur Integration von Resultaten der meteorologischen Daten in die GPS-Auswertung

Um die Höhengenauigkeit weiter zu steigern, wurden die Ergebnisse aus der Radiometerdaten- sowie der Wetterdatenmessung in die GPS-Auswertung integriert. Dabei kamen die Ansätze mit dem Modell symmetrische und asymmetrische Troposphäre zum Einsatz (Schmidt, 2001).

Die ersten Ergebnisse waren unbefriedigend. Dies war auf eine seinerzeit fehlende Vorbehandlung der Daten zurückzuführen (Kapitel 6.3.6).

Bei Verwendung gefilterter Rohdaten verbesserten sich die Resultate (Broßmann, Schmidt 2001). Die innere Genauigkeit bei Verwendung von WVR-Daten liegt nun im Bereich der reinen GPS-Lösung. Die Berechnungen fanden sowohl mit der Berner Software als auch mit WaSoft statt. Die WaSoft-Ergebnisse waren etwas schlechter als die der Berner Software. Dies ist darin begründet, dass eine Verwendung von WVR-Daten bei WaSoft nicht vorgesehen ist.

Im folgenden soll die Anpassung der Auswerteoptionen der Berner Software für die Höhenauswertung und den Einsatz von WVR-Daten kurz beschrieben werden. Anschließend werden die Resultate dargestellt.

Die Berner Software bietet die Möglichkeit, Residuen kontrollieren zu lassen. Übersteigen die Residuen einen bestimmten Grenzwert, so können die zugehörigen Beobachtungen von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden. Das Rauschen der Beobachtungen nimmt normalerweise mit zunehmendem Zenitwinkel zu. Deren Residuen werden größer. Wird der Grenzwert zu klein gewählt, so fallen vorwiegend Daten im unteren Elevationsbereich heraus. Diese Beobachtungen sind aber für die Höhenbestimmung (Dekorrelation Troposphäre-Höhe) wichtig. Bei der Berner Software erwies sich der empfohlene Grenzwert als zu gering. Bei der reinen GPS-Auswertung wurden ca. 3% der Daten markiert. Bei Verwendung von Radiometerdaten stieg dieser Wert auf etwa 9%!



Abbildung 68: Koordinatenwiederholbarkeiten, Station Norderney, 10 Tage Dez. '99

Mit einem anderen Betrag für die Fehlergrenze konnte die Anteil markierter Beobachtungen auf unter 1% gesenkt werden.

In den folgenden zwei Diagrammen Abbildung 68 und Abbildung 69 sind die Wiederholbarkeiten und erzielten ellipsoidischen Höhen der Station Norderney dargestellt. Zu unterscheiden ist zwischen den GPS-Standardlösungen (mit G bezeichnet) und den Lösungen mit Radiometerdaten (mit W bezeichnet). Die Lösungen wurden für die zwei Elevationsmasken 5° und 10° berechnet. Die Lösung mit dem empfohlenen Grenzwert zur Ausreißersuche trägt eine "2" im Namen, die Berechnung mit modifizierter Ausreißergrenze eine "4". Das B am Ende der Bezeichnung steht für die Nutzung von Korrekturwerten für Ozeanauflastdeformationen.

Die zweite Option betrifft das Verwenden von Korrekturwerten für gezeitenbedingte Auflastdeformationen. Bei der GPS-Standardauswertung werden diese Effekte teilweise durch geschätzte Troposphärenparameter (häufig 12 oder 24 pro 24 h). "absorbiert". Bei der Nutzung von WVR-Daten wird hingegen nur ein Parameter als Radiometeroffset angesetzt.

Die Wiederholbarkeit soll hier als Maß der inneren Genauigkeit dienen. Die Stichprobe des Datensatzes vom Dezember 1999 ist gering. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind daher als Trend zu sehen. In Abbildung 68 wird ersichtlich, dass die Einführung von Radiometerdaten in die GPS-Auswertung gleiche Genauigkeiten wie die GPS-Standardlösung bei der Nord- und Vertikalkomponente liefert. Die Ostkomponente ist mit Radiometerdaten um den Faktor 1,5 schlechter als ohne. Bei den Wiederholbarkeiten der Höhe wird deutlich, dass die 5°-Lösungen mit WVR-Daten erst bei Einsatz der modifizierten Ausreißergrenze besser als die entsprechende 10°-Lösung werden. Die Resultate unter Verwendung der Optionen Ozeanauflastkorrektur und modifizierte Ausreißergrenze erreichen die besten Ergebnisse bei einer Elevationsmaske von 5°.



Abbildung 69: Höhe der Station Norderney, 10 Tage Dez. '99

In den Berechnungen wurde die Koordinate der Station Osnabrück quasifest gehalten. D.h., die Höhe von Norderney repräsentiert den Höhenunterschied der zwei Stationen.

Wie in Abbildung 69 ersichtlich, unterscheiden sich die Ergebnisse der beiden Lösungen mit 5°-Elevationsmaske kaum. Die 10°-Lösungen hingegen liegen um etwa 2 mm auseinander.

Diese Berechnungen hätten mit den gesamten Datensätzen durchgeführt werden müssen. Dabei wären alle unter 6.3.4 bis 6.3.6 sowie 6.3.11 aufgeführten Aspekte zu berücksichtigen gewesen. Die Auswertungen sollten künftig so erfolgen.

6.4 Zusammenfassung der Radiometriearbeiten

Zur Verwendung der Radiometerdaten in der GPS-Auswertung wurde ein Ansatz gewählt, der unabhängig von den GPS-Auswerteprogrammen ist. Die GPS-Daten werden dabei im empfängerunabhängigen RINEX-Format mit den gemessenen Werten korrigiert und anschließend in die GPS-Prozessierung eingeführt.

Die Berechnungen erfolgten unabhängig voneinander mit den beiden wissenschaftlichen Softwarepaketen Berner Software, Vers. 4.2 und WaSoft. Die Ergebnisse beider Programme sind ähnlich, wobei die Berner Software etwas besser abschneidet.

Die Ursache dafür ist in den umfangreicheren Möglichkeiten zur Programmsteuerung zu finden.

Die ersten Resultate waren noch unbefriedigend, da Schritte zur Vorbehandlung der Daten fehlten. Das Konzept der Auswertung bestand darin, pro Radiometerstation einen Troposphärenparameter als Geräteunbekannte mitzuschätzen.

Die innere Genauigkeit der Höhenkomponente bei Verwendung von Radiometerdaten liegt nach den vorgenommenen Änderungen im Bereich der reinen GPS-Auswertung. Die Horizontalkomponenten jedoch sind noch etwas schlechter

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Ansätze zur Troposphärenmodellierung kamen noch nicht alle zum Einsatz. Diese lassen jedoch bei Verwendung von Radiometerdaten eine Verbesserung der Genauigkeit aller Koordinatenkomponenten erwarten.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im BMBF-Projekt "NN-SAT" wurde eine Reihe von Untersuchungen zur Höhenüberwachung im kontinentalen, regionalen und lokalen Maßstab durchgeführt und analysiert.

Die Auswertungen im **kontinentalen** Rahmen (SAPOS/EUREF) ergaben eine Variation der Tageslösungen von +/- 1 cm, sowie der Wochenlösungen von 3..4 mm. Die erzeugten Zeitreihen zeigten Sprünge bei Änderung der Sensoren (Antennenwechsel) und saisonale Effekte auf. Für die Ableitung von signifikanten Trends der verwendeten Stationen ist der Umfang der Zeitreihen noch zu gering.

Das im **regionalen** Netz durchgeführte Experiment "NN-SAT'99" zur Simulation eines verdichteten GPS-Netzes zeigte eine hohe Quote der Mehrdeutigkeitslösung. Eventuelle Abhängigkeiten der Höhengenauigkeit vom durchschnittlichen Stationsabstand, von der Anzahl der gelösten Mehrdeutigkeiten oder der Entfernung vom Datumspunkt konnten in diesem Entfernungsbereich nicht gefunden werden. Es stellte sich aber heraus, dass sich die stationsabhängige Signalqualität stark auf die innere Genauigkeit der Höhe auswirkt. Die Auswirkungen auf die äußere Genauigkeit bedürfen weiterer Untersuchungen. Stationen mit starken Mehrwegeeinflüssen sollten verlegt oder ihre Daten im Nachhinein korrigiert werden. Als optimal erwies sich die Verwendung von Daten ab 5..8 Grad Elevation im Auswerteprozess.

Die Höhenübertragung im Bereich Osnabrück – Küste ist mit einer Wiederholgenauigkeit von 4 bis 6 mm möglich. Das Präzisionsnivellement hingegen erreicht aufgrund der Fehlerfortpflanzung nur eine Genauigkeit von 8 mm.

In **lokalen** Höhenmessungen auf Küstenpegeln konnte aus der Netzausgleichung eine Standardabweichung der Höhenkomponente von 5 mm erreicht werden. Dabei traten allerdings noch unerklärliche Ausreißer auf.

Das GPS scheint für die Höhenüberwachung geeignet zu sein. Der Übergang zu Höhen der Landesvermessung ist zur Zeit zumindest im Küstenbereich noch problematisch.

Bei der Analyse aller Ergebnisse zeigte sich, dass der Stichprobenumfang der einzelnen Kampagnen sehr gering war. Bei zukünftigen Wiederholungsmessungen sollte folglich der Beobachtungszeitraum ausgeweitet werden. Zusätzlich sollten die Ergebnisse von Messkampagnen mit Resultaten von Permanentmessungen verglichen werden.

Einen weiteren Schwerpunkt stellte die Erfassung und Modellierung der troposphärischen Refraktion dar. Für künftige Auswertungen wurden neue Ansätze zur Troposphärenmodellierung entwickelt und stehen zur Verfügung.

Bisher liegt die innere Genauigkeit der Höhenkomponente bei Verwendung von Radiometerdaten im Bereich der reinen GPS-Auswertung. Die neuen Modellierungsansätze für die Verwendung von Radiometerdaten lassen jedoch eine Steigerung der Genauigkeit aller Koordinatenkomponenten erwarten.

8 Abbildungsverzeichnis

| Abbildung 1: Ergebnisse der Phasenmehrwegeuntersuchung der GPS-Standorte | |
|---|----|
| auf Norderney, alte SAPOS-Station (0644) - rechts, neue SAPOS-Station | |
| (0670 hier test) - links | 4 |
| Abbildung 2: Übersichtskarte Projektgebiet NN-SAT, EUREF-/SAPOS-Stationen u | |
| Stationen der BfG- und TUD-Kampagnen, genutzte meteorologische Stationer | n |
| von DWD und NLÖ, Radiometerstandorte | 5 |
| Abbildung 3: Neuer GPS-Standort Norderney, Wasserwerk "Weiße Düne", hier im | |
| Bau | 6 |
| Abbildung 4: Geodynamische GPS-Permanentstation "Weiße Düne" | 6 |
| Abbildung 5: Netz des kombinierten EUREF-SAPOS-Netzes, die Stationen im | |
| Weser-Ems-Gebiet sind nicht einzeln beschriftet, dazu siehe Abbildung 2 | 11 |
| Abbildung 6: Netzwiederholbarkeit der Wochenlösungen, Nordkomponente | 13 |
| Abbildung 7: Netzwiederholbarkeit der Wochenlösungen, Ostkomponente | 14 |
| Abbildung 8: Netzwiederholbarkeit der Wochenlösungen. Höhenkomponente | 14 |
| Abbildung 9: Hochwert im ETRS89, aus Wochenlösungen der Station Osnabrück. | 16 |
| Abbildung 10: Rechtswert ETRS89, aus Wochenlösungen der Station Osnabrück. | 16 |
| Abbildung 11: Höhe im ETRS89, aus Wochenlösungen der Station Osnabrück | 17 |
| Abbildung 12: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück – Emden | 17 |
| Abbildung 13: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück - Carolinensiel | 18 |
| Abbildung 14: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück – Wilhelmshaven | 18 |
| Abbildung 15: Darstellung einiger mittlerer Höhendifferenzen zu Osnabrück zum | |
| Vergleich | 19 |
| Abbildung 16: Mehrdeutigkeitslösung im Oststrang, Experiment NNSAT'99, | |
| Auswertung mit WaSoft | 22 |
| Abbildung 17: Mehrdeutigkeitslösung im Weststrang, Experiment NNSAT'99, | |
| Auswertung mit WaSoft | 22 |
| Abbildung 18: Wiederholbarkeiten der Höhe, Experiment NNSAT '99, für die | |
| Auswerteoptionen verdichtetes SAPOS-Netz (TUD), SAPOS-Netz (SAPOS) | |
| und basislinienweise (direkt), Ergebnisse mit WaSoft | 23 |
| Abbildung 19: Mehrdeutigkeitslösung sessionsweise für gesamtes Netz, mit QIF- | |
| und Sigma (L5/L3)-Strategie in Verdichtungs- (Verd) und SAPOS-Netz | |
| (SAPOS), Berner Software | 24 |
| Abbildung 20: Wiederholbarkeiten der Höhe, Experiment NNSAT '99, für die | |
| Auswerteoptionen verdichtetes SAPOS-Netz (TUD), SAPOS-Netz (SAPOS) | |
| und basislinienweise (direkt), Ergebnisse der Berner Software | 25 |
| Abbildung 21: Wiederholbarkeiten der Höhe unterschiedlicher Stationen im | |
| SAPOS-Netz Weser-Ems für die unterschiedlichen Auswertestrategien mit | |
| Station Osnabrück als Datumsstation | 29 |
| Abbildung 22: Netzkonfiguration der Kampagnen an der Außenems | 34 |
| Abbildung 23: Sessionsresiduen (Höhe) der Geonap-Lösung mit 10° | |
| Elevationsmaske, Außenems 1999 | 37 |
| Abbildung 24: Sessionsresiduen der Referenzlösung (Geonap, 5°- | |
| Elevationsmaske), Außenems 2001 | 38 |
| Abbildung 25: Höhendifferenzen ausgewählter Stationen der Kampagnen | |
| Außenems 1999 und 2001, in Metern | 41 |
| Abbildung 26: Netzkonfiguration der Kampagne Außenelbe 2001 | 43 |
| Abbildung 27: Sessionsresiduen (Höhe) der GEONAP 5°-Netzlösung (mit Option | |
| Wackelturm), Kampagne Außenelbe 2001 | 45 |

| Abbildung 28: Funktionale Zusammenhänge zwischen geometrischen (GPS) und | |
|--|-----|
| physikalischen (Quasigeoid) Bezugssystemen | 50 |
| Abbildung 29: Quasigeoidverlauf im Messgebiet Außenems 1999 | 51 |
| Abbildung 30: Abweichungen der Ist-Höhen von den hydrostatischen Soll-Höhen | 51 |
| Abbildung 31: Quasigeoidverlauf im Messgebiet | 52 |
| Abbildung 32: Quasigeoidverlauf im Messgebiet | 52 |
| Abbildung 33: Quasigeoidverlauf im Messgebiet | 53 |
| Abbildung 34: Quasigeoidverlauf im erweiterten Stützpunktnetz | 54 |
| Abbildung 35: Modell einer geneigten Troposphäre (Hugentobler et al., 2001) | 58 |
| Abbildung 36: Winkel der geneigten Troposphäre | 59 |
| Abbildung 37: Ergebnisse der Temperaturkalibrierung 2001 | 61 |
| Abbildung 38: Ergebnisse der Feuchtekalibrierung 2001 | 62 |
| Abbildung 39: Ergebnis der temperaturabhängigen Drucksensorkalibrierung der | |
| Meteo-Unit (Norderney) | 62 |
| Abbildung 40: Ergebnis der temperaturabhängigen Drucksensorkalibrierung der | |
| MAWS (Osnabrück) | 63 |
| Abbildung 41: Temperaturdifferenz zw. DWD und Meteo-Unit auf Norderney im | |
| Dez. ´99 bzw. Jun. – Okt. ´01 | 63 |
| Abbildung 42: Temperaturdifferenz zw. DWD und MAWS in Osnabrück im Dez. '99 | 9 |
| bzw. Jun. – Sept. ´01 | 64 |
| Abbildung 43: Temperaturverlauf vom 20.7. – 8.8.2001 auf Norderney | 64 |
| Abbildung 44: Verlauf der Druckdifferenz und der Temperatur, Meteo-Unit, | |
| Norderney 28.6. – 23.10.2001 | 65 |
| Abbildung 45: Verlauf der Druckdifferenz zwischen DWD- und MAWS-Sensor in | ~ ~ |
| Osnabrück, Dez. 1999 bis Sept.2001 | 66 |
| Abbildung 46: Mittlerer Tagesluftdruck und mittlere Anderungsrate des Luftdrucks | ~- |
| der Stationen Norderney und Osnabruck | 67 |
| Abbildung 47: Verlauf der Tippingkurve bei unterschiedlichen Elevationswinkeln | 69 |
| Abbildung 48: Vergleich der ZWD bei unterschiedlichen Elevationswinkeln | 69 |
| Abbildung 49: gefilterte und ungefilterte Kaltlastspannungen auf beiden | 74 |
| Frequenzen, 4.12.99, Station Osnabruck, Radiometer OR | 71 |
| Abbildung 50: Zenit Wet Path Delay (ZVVD) aus ungefliterten und gefliterten | |
| Referenzspannungen und Temperaturen für 4.12.99, Station Osnabruck, | 74 |
| Radiometer OR | 71 |
| Abbildung 51: Anzani der Beobachtungen wahrend der einzeinen | 70 |
| Ausweitungsschnitte, Osnabruck, 1999-2000 | 12 |
| Augustung 52: Anzahl der Beobachlungen wahrend der einzeinen | 70 |
| Auswenungsschnite (Norderney, 1999-2000) | 13 |
| Abbildung 53. Inversionskoemzieht c _{eff} der vier Stationen von Okt. 1999 bis Dez. | 71 |
| Abbildung 54: ZWD Differenz zwischen ORANGE (OR) und VELLOW (VE) | 14 |
| wöhrend des Derellehetriche | 75 |
| Abbildung 55: 7TD Differenz zwiechen CDS und W//P/Luftdruck (Nordernov | 75 |
| Doz '00 | 76 |
| Abbildung 56: 7TD-Differenz zwischen GPS und WVR/Luftdruck (Norderney | 10 |
| Dez '90 bie Juni '00) | 76 |
| Abbildung 57: 7TD-Differenz zwischen GPS und W/V/R/Luftdruck (Ospabrück (01) | 77 |
| Abbildung 58: ZTD-Differenz zwischen GPS und W/VR/Luftdruck (Norderney (01). | 78 |
| Abbildung 59: Klinometerkalibrierkurven der Radiometer ORANGE (Ospabrück) | 10 |
| und YELLOW (Norderney) | 79 |
| | .0 |

| Abbildung 60: 22-minütiger Hemisphärenscan mit 8 Azimuten vom 22.03.2000, ca. |
|--|
| Abbildung 61: 17-minütiger Hemisphärenscan mit 6 Azimuten vom 06.07.2001, ca. 1:45 Uhr |
| Abbildung 62: Häufigkeit der Azimute der nicht hydrostatischen Troposphäre (Osnabrück) |
| Abbildung 63: Häufigkeit der Azimute der nicht hydrostatischen Troposphäre (Nordernev) |
| Abbildung 64: Häufigkeit der Azimute der hydrostatischen Troposphäre (Osnabrück) |
| Abbildung 65: Häufigkeit der Azimute der hydrostatischen Troposphäre (Norderney82 Abbildung 66: Vergleich der Nordgradienten aus BSW, WVR und Luftdruck |
| (Osnabrück) |
| (Osnabrück) |
| Abbildung 69: Höhe der Station Norderney, 10 Tage Dez. '99 |
| Abbildung 70: Tägliche Höhendifferenz im ETRS89, OSNA – AON, in Metern |
| Abbildung 72: Tägliche Höhendifferenz im ETRS89, OSNA – NLEO, in Metern 95 Abbildung 73: Tägliche Höhendifferenz im ETRS89, OSNA – BORK, in Metern |
| Abbildung 75: Mittlere Temperatur und deren Gradienten der Station Norderney 96 Abbildung 76: Mittlere Temperatur und deren Gradienten der Station Osnabrück 96 |
| Abbildung 77: Mittlere Feuchte und deren Gradienten der Station Norderney |
| Abbildung 79: Anzani der Beobachtungen wahrend der einzelnen Auswertungsschritte (Osnabrück, 2001) |
| Abbildung 80: Anzahl der Beobachlungen wahrend der einzeinen Auswertungsschritte (Norderney, 2001) |
| Abbildung 81: Inversionskoeffizient a ₁ von Essen und Emden |
| Abbildung 83: Inversionskoeffizient a ₃ von Essen und Emden |
| Abbildung 85: Vergleich der Nordgradienten aus BSW, WVR und Luftdruck (Norderney) 99 |
| Abbildung 86: Vergleich der Ostgradienten aus BSW, WVR und Luftdruck (Norderney) |

9 Literatur

Arndt, K. (2000): Untersuchungen zur Steigerung der Höhengenauigkeit in regionalen GPS-Permanentstationsnetzen, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Dresden, 2000.

Augath,W. (1999): High-Precision-Positioning Services (HPPS) on their Impact on Geodynamics. Proceedings of the 2. Int. Symposium: Geodynamics of the Alps-Adria Area by Means of Terrestrial and Satellite Methods.; Dubrovnik; Edited by K. Colic and H. Moritz, Zagreb and Graz, 1999; P. 49-58.

Augath, W. u.a..(2002): SAPOS 2002 Symposium: Qualitätssicherung bei Referenzstationen und in Referenzstationsnetzen. SAPOS-Symposium 2002, Hannover, 21.-23.05.2002.

Augath,W., Broßmann, M., Schlüter, W., Sudau, A., Winter, R.(2000).: The Project NNSAT Precise Height Supervision of Tide Gauges with GPS, Tenth General Assembly of the Wegener Project, WEGENER 2000, San Fernando, Cadiz, Spain, September 18-22, 2000.

Augath, W., Broßmann, M., Schlüter, W., Sudau, A., Winter, R.(2001): The Project NNSAT-Precise Height Supervision of Tide Gauges with GPS. SCRM, Helsinki, Finnland, September, 2001.

Bengel, W. ,Sudau, A.,1998: GPS-Höhenmessungen im Raum Mainz-Wiesbaden; Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), Jg.105,H8-9, S.284-290

Bevis, M., Businger, S., Herring, T., Rocken, C., Anthes, R., Ware, R. (1992): GPS meteorology remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, J. Geophys. Res., 97, No. D14, 15787-15801, 1992.

Beyer, A.. (1999): Untersuchungen zur Integration von Mikrowellenradiometerbeobachtungen in die GPS-Auswertung, Diplomarbeit, unveröffentlicht, Dresden, 1999.

Beyer, A. (1999): Weitere Untersuchungen im Testnetz Wettzell - Zürich, internes Papier des GI der TUD, unveröffentlicht, Dresden, 1999.

Broßmann, M. (1999): Untersuchungen zum Vergleich der Antennentypen L1/L2 Choke Ring und Micro-centered L1/L2 der Firma Trimble, internes Papier des GI der TUD, unveröffentlicht, Dresden, 1999.

Broßmann, M., Schmidt, N. (2001): GPS-Auswertung der Basislinie Osnabrück-Norderney unter Verwendung von Daten zweier Wasserdampfradiometer mit der Berner Software Vers. 4.2 und WaSoft Vers. 2, Arbeitsbericht, internes Papier des GI der TUD, unveröffentlicht, Dresden, 2001.

Broßmann, M., Schmidt, N. (2001): Weiterführende Untersuchungen zur Integration von Wasserdampfradiometerdaten in die GPS-Auswertung, Arbeitsbericht, internes Papier des GI der TUD, unveröffentlicht, Dresden, 2001.

Broßmann, M., Sudau, A.: Entwickeln einer universellen Höhenüberwachung von Küstenpegeln (NN-SAT), Ehrenkolloquium Prof. Dr. Wolfgang Augath, in POSNAV 2003, DGON Symposium Positionierung und Navigation, 18. bis 19. März 2003, Dresden, Tagungsband, Gemeinsame Ausgabe Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. Bonn und Schriftenreihe des Geodätischen Instituts 3, 2003

CAPTEC (1999): WVR II, Mikrowellen-Wasserdampf-Radiometer für die Anwendung in der Geodäsie, Gesamtdokumentation, Biel, 1999.

Davis, J.L., Elgered, G., Niel, A.E., Kuehn, C. E. (1993): Ground based measurements of gradients in the 'wet' radio refractivity of air, Radio Science, Vol. 28, No. 6, pp 1003-1018, 1993.

Dieter, A. (2001): Untersuchungen der GPS / GLONASS-Empfänger der Firma MAN (unveröffentlicht), Dresden, 2001.

Gäde, A. (2002): Untersuchungen zur troposphärischen Laufzeitverzögerung und deren Korrektur, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Dresden, 2002.

Görres, B. (1996): Bestimmung von Höhenänderungen in regionalen Netzen mit dem Global Positioning System, Bonn (1996), Dissertation.

Herring, T.A. (1992): Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, in Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, edited by J.C. de Munk and T.A. Spoelstra, pp. 157-164, Netherlands Geod. Comm., Delft, 1992.

Hugentobler, Schaer, Fidez (2001). Bernese GPS-Software, Version 4.2, Astronomical Institute, University of Berne, 2001.

Kruse, L. (2000): Spatial and temporal distribution of atmospheric water vapor using space geodetic technique. Dissertation, ETH Zürich, Nr. 13639, 2000.

Mac Millan, D.S., Ma, C. (1997): Atmospheric gradients and the VLBI terrestrial and celestial reference frames, Geophysical Research Letters, Vol. 24, No. 4, pp. 453-456, 1997.

Mendes, V. (1999): Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques, PhD dissertation, Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Fredricton, 1999.

Paschke, T. (1998): Untersuchungen zur Ableitung hochpräziser Höhenänderungen aus Daten permanenter GPS-Stationen der Landesvermessung in Niedersachsen, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Dresden, 1998.

Rothacher, M. ; Springer, T.A.; Schaer, S.; Beutler, G. (1997): Processing strategies for Regional GPS Networks. Invited Paper auf der IAG-Generalversammlung in Rio de Janeiro, 3. - 9. September 1997, Springer Verlag.

Schmidt, N. (2001): Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der troposphärischen Laufzeitverzögerung und deren Korrektur, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Dresden, 2001.

Somieski, A. (2000): Betrieb von Wasserdampfradiometern und Untersuchungen zur geographischen und jahreszeitlichen Variation der Inversionskoeffizienten in der Mikrowellenradiometrie, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Dresden, 2000.

Torge, H., Denker, H. (1999): Zur Verwendung des Europäischen Gravimetrischen Quasigeoides EGG 97 in Deutschland; Zeitschrift für Vermessungswesen (ZfV), Jg.124, H.5, S. 154-165.

Wagner, H. (2002): Untersuchung zum Einfluss der Antennenkalibrierwerte auf die Höhenübertragung mit GPS, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Dresden, 2002.

Wanninger, L. (2000): Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen, Habilitation, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 508, München, 2000.

Wanninger, L., Böhme, J. (1999): GPS-Antennenkalibrierungen am Geodätischen Institut der TU Dresden, In: Campbell, J., Görres, B.: Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen, Geodätisches Institut, Universität Bonn, 28. April 1999.

Wanninger, L., Frevert, V., Wildt, S. (1999): Mitigation of Signal Diffraction Effects on Precise GPS-Positioning. Poster presented at the XXII. General Assembly of the IUGG, Birmingham, 1999.

Weid, U. (2001): Auswertung von GPS-Messungen der EUREF/ SAPOS-Teilnetze des Projektes "NN-SAT" und Analyse der Ergebnisse, Diplomarbeit (unveröffentlicht), Dresden, 2001.

Wildt, S., Wanninger, L. (1998): Validierung von GPS/GLONASS-Referenzstationen. Proc. DGON-Seminar SATNAV 98, Dresden, S. 83-93, 1998.

10 Anhang



10.1 Anhang – GPS-Permanentnetze

Abbildung 70: Tägliche Höhendifferenz im ETRS89, OSNA – AURI, in Metern



Abbildung 71: Tägliche Höhendifferenz im ETRS89, OSNA – NONE, in Metern







Abbildung 73: Tägliche Höhendifferenz im ETRS89, OSNA – BORK, in Metern





10.2 Anhang – Troposphäre







Abbildung 76: Mittlere Temperatur und deren Gradienten der Station Osnabrück



Abbildung 77: Mittlere Feuchte und deren Gradienten der Station Norderney



Abbildung 78: Mittlere Feuchte und deren Gradienten der Station Osnabrück



Abbildung 79: Anzahl der Beobachtungen während der einzelnen Auswertungsschritte (Osnabrück, 2001)



Abbildung 80: Anzahl der Beobachtungen während der einzelnen Auswertungsschritte (Norderney, 2001)



Abbildung 81: Inversionskoeffizient a_1 von Essen und Emden



Abbildung 82: Inversionskoeffizient a2 von Essen und Emden



Abbildung 83: Inversionskoeffizient a3 von Essen und Emden



Abbildung 84: 17-minütiger Hemisphärenscan mit 6 Azimuten vom 06.07.2001, ca. 10:45 Uhr



Abbildung 85: Vergleich der Nordgradienten aus BSW, WVR und Luftdruck (Norderney)



Abbildung 86: Vergleich der Ostgradienten aus BSW, WVR und Luftdruck (Norderney)