

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

TU Dresden: Michael Broßmann

1 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. S006) wurde als Verbundvorhaben von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Geodätischen Institut der TU Dresden bearbeitet. Die Projektarbeit wurde unterstützt durch das Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG), die 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 Aspekt im Anschluss an global überwachte geodätische Fundamentalstationen unter Nutzung der regionalen GPS-Infrastruktur von EUREF, BKG und LGN. Der Schwerpunkt lag dabei in der verbesserten Erfassung der troposphärischen Refraktion mittels Mikrowellenradiometern. Daneben wurden auch die Einflüsse der GPS-Signalqualität auf den Messstandorten, des Abstandes der Zwischenstationen und der verbesserten Mehrdeutigkeitsbestimmung auf die Höhengenaugigkeit 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 auf physikalische Höhen im Küstenbereich. Als Ergebnis haben sich vielversprechende Ansätze für die satellitengestützte Höhenüberwachung ergeben.

2 Projektgebiet und Infrastruktur

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 16 Permanentstationen des niedersächsischen SAPOS-Netzes im Projektgebiet, von ausgewählten Stationen des EUREF-Permanentnetzes, dem Feldexperiment „NNSAT '99“ des Geodätischen Institutes der TU Dresden und von drei GPS-Messkampagnen der Bundesanstalt für Gewässerkunde.

Des Weiteren liegen Messungen von zwei Wasserdampfradiometerstationen vor. Diese Stationen waren mit Mikrowellenradiometern des Typs WVR II (CAPTEC 1999) und zusätzlichen meteorologischen Sensoren ausgerüstet. Außerdem sind umfangreiche meteorologische Datensätze von ausgewählten Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie vorhanden. Eine Übersicht über die verschiedenen Stationen im Projektgebiet befindet sich in Abbildung 1.

Das SAPOS-Netz im Projektgebiet wurde in den Jahren 1999 und 2000 modernisiert und verdichtet. Im Frühjahr 2000 war der Ausbau vollständig abgeschlossen. Die GPS-Permanentstationen sind mit modernen 12-Kanalempfängern und zugehörigen

Antennen der Typen Micro-centered L1/L2 oder Choke-Ring L1/L2 der Firma Trimble ausgestattet.

Sämtliche eingesetzte Antennen wurden bei der LGN Hannover und der TU Dresden relativ kalibriert (Wanninger, Böhme, 1999). Die individuellen Kalibrierwerte wurden auf Absolut-Niveau umgerechnet und bei den Auswertungen verwendet. Für Antennen des umliegenden EUREF-Permanentnetzes (EPN) lagen keine individuellen Kalibrierergebnisse vor. Die Auswahl der Stationen des EPN erfolgte so, dass nur Antennentypen vorkommen, für die typenspezifische Kalibrierdatensätze der Antennenphasenzentrumsfehler vorlagen. Für diese fanden Typenmittel der Kalibrierungen einer Baureihe der TU Dresden oder des National Geodetic Survey Verwendung.

Sämtliche SAPOS-Stationen im Projektgebiet wurden nach dem Dresdener Modell (Wildt, Wanninger 1998) einer intensiven Qualitätskontrolle unterzogen. Es zeigte sich, dass die SAPOS-Station Norderney außergewöhnlich starke Mehrwegeeffekte aufwies. Aus diesem Grund wurde eine Verlegung dieser Station erforderlich.

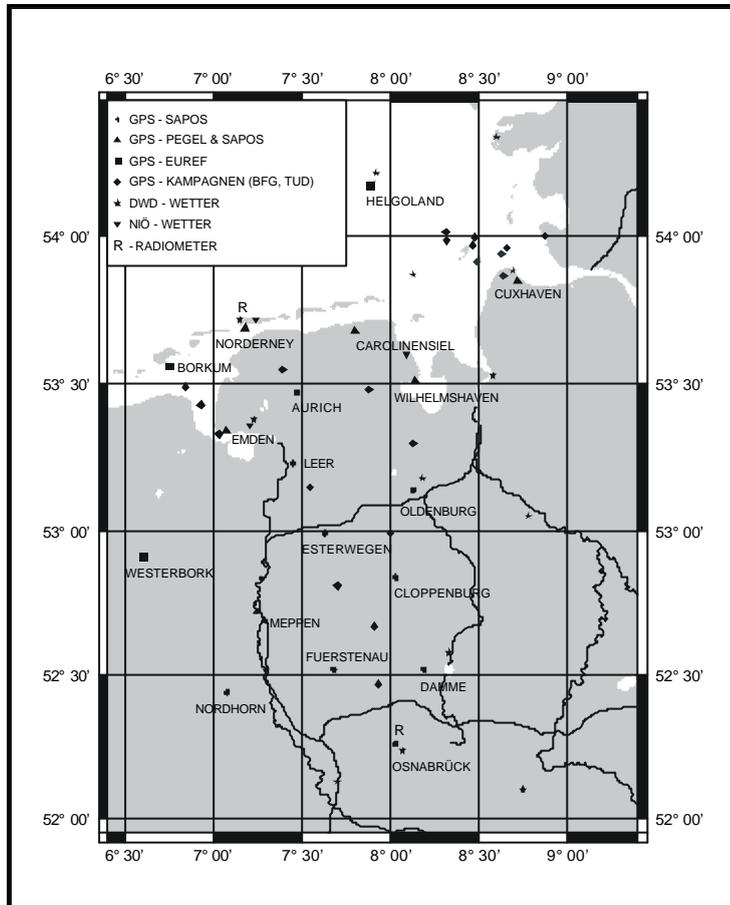


Abbildung 1: Übersichtskarte des Projektgebietes mit GPS-, meteorologischen und Radiometerstationen

3 Die Ergebnisse der GPS-Netze und Messkampagnen

Aus der vorhandenen GPS-Infrastruktur wurden unterschiedliche Subnetze selektiert, für die entsprechenden Kampagnen verdichtet („NN-SAT ,99“, Außenems 1999, Außenems 2001 und Außenelbe 2001) und ausgewertet.

3.1 Auswertungen eines kombinierten EUREF-/SAPOS-Netzes

Die Überwachung des SAPOS-Permanentstationsnetzes im Bereich Weser-Ems wurde durch Einbindung in das internationale Bezugssystem ITRS über das EUREF-Permanentnetz (EPN) gewährleistet.

Diese Berechnungen stellen Koordinatensätze in der jeweiligen Realisierung des ITRS zur Verfügung. Außerdem werden zur Validierung der Wasserdampfradiometer mit GPS geschätzte Werte der absoluten troposphärischen Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung zur Verfügung gestellt.

Die Ausdehnung des Netzes soll eine zuverlässige Schätzung der troposphärischen Laufzeitverzögerung mit GPS ermöglichen. Bevis (1992) und Kruse (2000) schlagen dazu eine Ausdehnung von mindestens 500 km bzw. 800 km vor.

Ein weiteres Kriterium stellte das Vorhandensein von Kalibrierdaten für die auf den EPN-Stationen verwendeten Antennen dar.

Nach den Anforderungen wurde ein kontinentales Netz mit einer Ausdehnung von ca. 2500 km × 2500 km gebildet und ausgewertet (Weid, 2001).

Die Berechnungen umfassten den Zeitraum von Juni 1999 bis September 2001. Die Lagerung des Netzes erfolgte auf ausgewählten Stationen des EUREF-Permanentnetzes.

In den berechneten Koordinaten sind der Einfluss der Plattentektonik sowie zweimal vorgenommene Referenzrahmenwechsel enthalten. Um nun Aussagen über die Koordinaten der einzelnen Stationen sowie deren Änderung treffen zu können, sind diese aus dem jeweiligen ITRS ins ETRF89 transformiert worden. Dadurch konnte der Einfluss der Plattentektonik beseitigt werden. Die Koordinatensprünge zwischen den einzelnen Referenzrahmen ließen sich jedoch nicht vollständig beseitigen. Damit auch diese Koordinatensprünge für die Betrachtung der Höhe eliminiert werden, ist Osnabrück als Referenzstation zur Bildung der täglichen Höhendifferenz zu den anderen Stationen verwendet worden. Dadurch lassen sich nun Änderungsraten bezüglich der Station Osnabrück bestimmen. Die erzeugten Zeitreihen sind jedoch zu kurz, um eventuelle Aussagen treffen zu können. Saisonale Effekte sind jedoch ersichtlich (Abbildung 2).

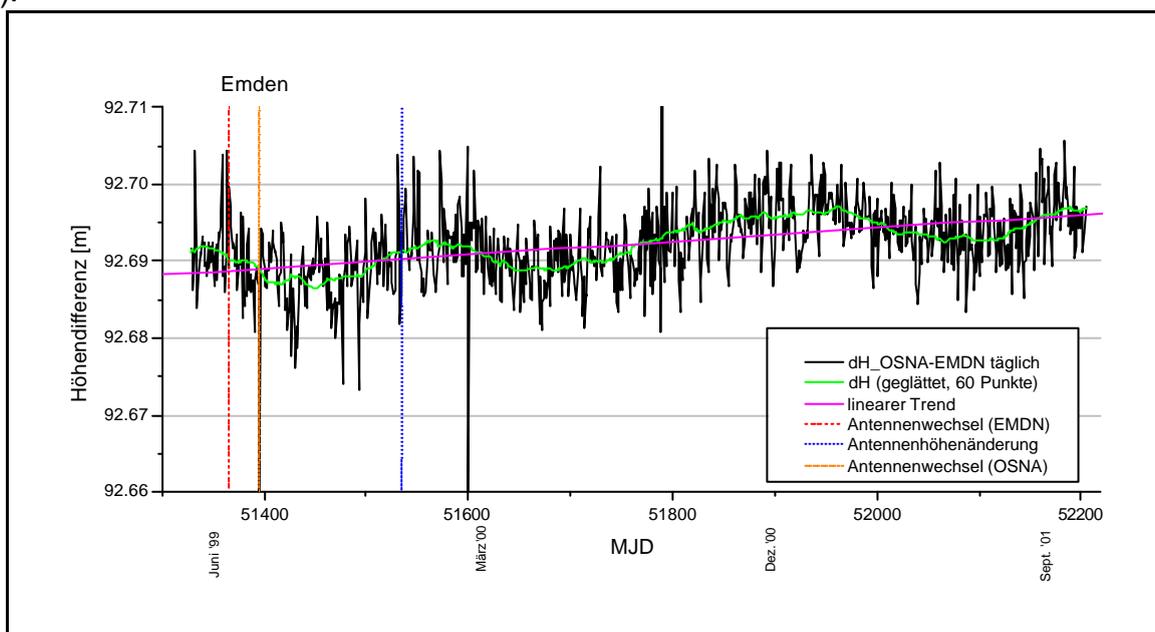


Abbildung 2: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück – Emden (OSNA – EMDN)

Als Beispiel sind in Abbildung 2 und Abbildung 3 die Höhendifferenzen zwischen Emden bzw. Wilhelmshaven und Osnabrück dargestellt. Außerdem wurden durchgeführte Antennenwechsel sowie Antennenhöhenänderungen eingetragen, die bei einigen Stationen (siehe Wilhelmshaven) des Netzes für zusätzliche Sprünge sorgten. Weiterhin sind eine mittlere Kurve, aus der ein saisonaler Einfluss zu erkennen ist, sowie ein linearer Trend eingezeichnet.

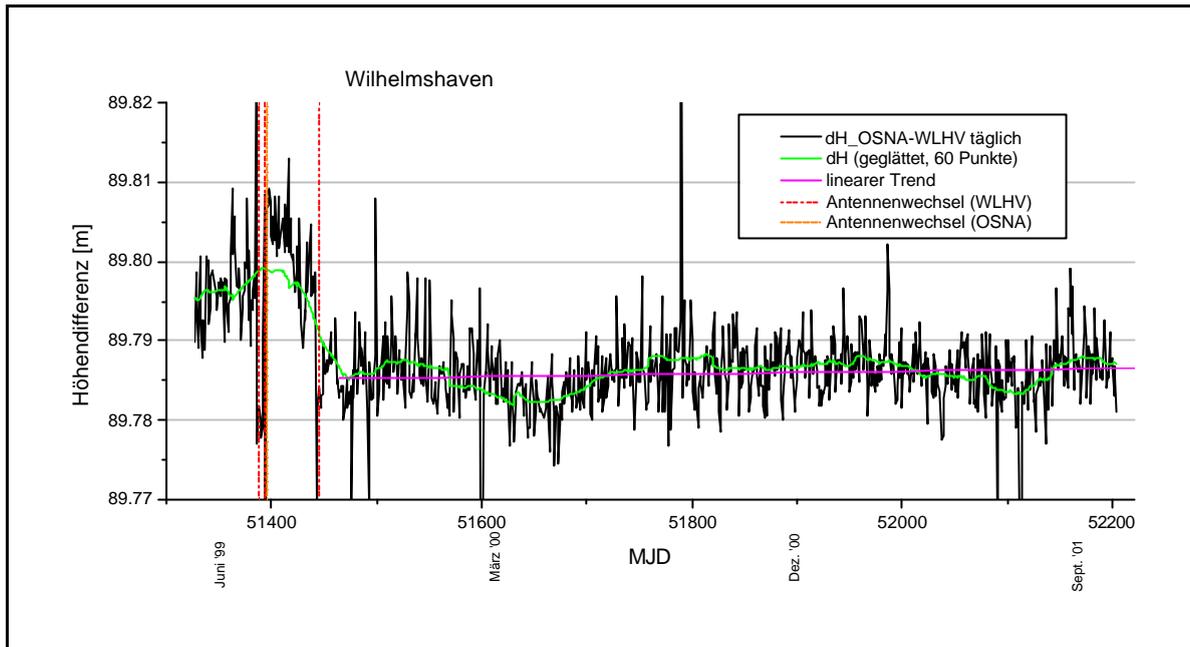


Abbildung 3: Tägliche Höhendifferenz Osnabrück - Wilhelmshaven (OSNA – WLHV)

3.2 Das Experiment „NNSAT '99“

Diese Kampagne der TU Dresden diente der örtlichen Erzeugung zusätzlicher Testdaten für die Optimierung der Mehrdeutigkeitsbestimmung zur Verbesserung der Höhengengenauigkeit. Sie umfasst einen Zeitraum von 10 Tagen und fand im Raum Weser-Ems in Zusammenarbeit mit dem LGN Hannover statt.

Ziel war das Simulieren eines verdichteten SAPOS-Netzes mit einem mittleren Stationsabstand von 20 km. Der Abstand ergab sich aus den damaligen Planungen der WSV für Zwecke der Gewässervermessung entlang der Bundeswasserstraßen ein SAPOS-Subnetz mit einem mittleren Stationsabstand von 20 km aufzubauen.

Angestrebt wurde, durch die verkürzten Basislinienlängen, die Quote der festgesetzten Mehrdeutigkeiten zu erhöhen und das Netz auf eine eventuell verbesserte Höhengengenauigkeit hin zu untersuchen.

Die zu besetzenden Messpunkte wurden auf Festpunkten der LGN so gewählt, dass sich die Strecke zwischen zwei benachbarten SAPOS-Stationen auf etwa 20 km halbiert. Die zusätzlichen Punkte wurden so gewählt, dass sie eine hohe Datenqualität aufwiesen (keine Abschattungen oder mögliche Mehrwegequellen).

Als problematisch erwies sich ein Mix aus 9- und 12-Kanalempfängern. Bei der gewählten Elevationsmaske von 5° fehlten auf mit 9-Kanalempfängern besetzten Feldstationen mindestens 4 % bis 10 % der Beobachtungen (Arndt, 2000).

Die Auswertung erfolgte unabhängig mit den zwei Softwarepaketen Berner Software Vers. 4.2 (Hugentobler, 2001) und WaSoft (Wanninger, 2000) mit identischen Auswertoptionen. 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 (Standardabweichung einer einzelnen Session) können verglichen werden.

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 Quote der Mehrdeutigkeitslösung befindet sich mit über 80% bzw. 90% mit beiden Softwarepaketen auch ohne Zwischenstationen bereits auf sehr hohem Niveau. Durch die Verwendung der zusätzlichen Stationen kann diese leicht erhöht werden (Arndt, 2000).

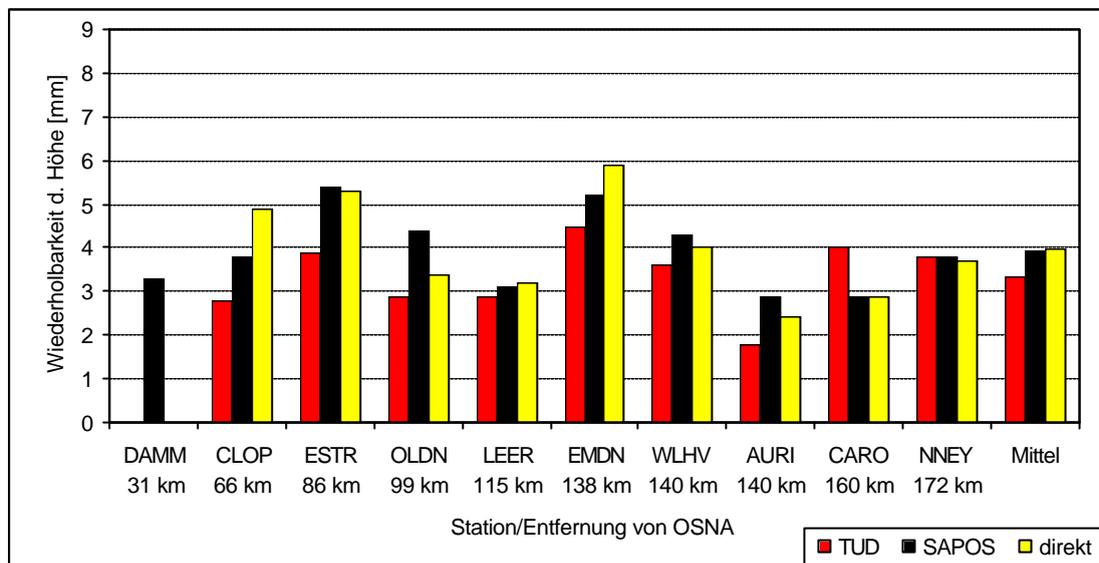


Abbildung 4: Wiederholbarkeiten der Höhe, Experiment NNSAT '99, für die Auswertoptionen verdichtetes SAPOS-Netz (TUD), SAPOS-Netz (SAPOS) und basislinienweise (direkt), Ergebnisse der Berner Software

Die mit der Berner Software erzielten Höhenwiederholbarkeiten sind in Abbildung 4 dargestellt. Es wird deutlich, dass eine Abhängigkeit der Höhengenaugkeit von der Entfernung zur Ausgangsstation nicht vorhanden ist. Vielmehr zeigt sich eine Abhängigkeit von stationsabhängigen Effekten. Die Netzkonfiguration mit Zwischenstationen liefert bei beiden Softwarepaketen die beste Höhenwiederholbarkeit. Die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant, da der Stichprobenumfang (10 Sessions) zu gering ist. Ein Zusammenhang zwischen der Quote der gelösten Mehrdeutigkeiten und der inneren Höhengenaugkeit konnte nicht nachgewiesen werden.

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

In diesem Kapitel werden drei GPS-Kampagnen zur Bestimmung und Überprüfung der Höhe von Küstenpegeln und deren Ergebnisse vorgestellt (siehe Abbildung 1). Dazu finden die Daten der drei Kampagnen Außenems 1999, Außenems 2001 und Außenelbe 2001 Verwendung. Diese Projekte wurden von der BfG 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 Nivellementpunkte, die als Passpunkte zum Übergang auf amtliche / physikalische Höhen dienen.

Die auf den Pegeln befindlichen Punkte wiesen zum Teil schwierige Umgebungsbedingungen 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 Sessions begrenzt.

Die Auswertung erfolgte mit unterschiedlichen wissenschaftlichen und kommerziellen Softwarepaketen sowie 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 und –überwachung mit GPS liefern.

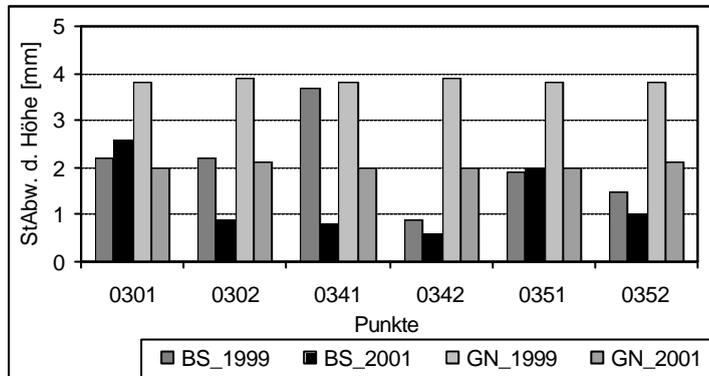


Abbildung 5: Standardabweichungen der ausgeglichenen Höhen, Ergebnisse der Berner Software (BS) und Geonap (GN) der Kampagnen Außenems 1999 und 2001

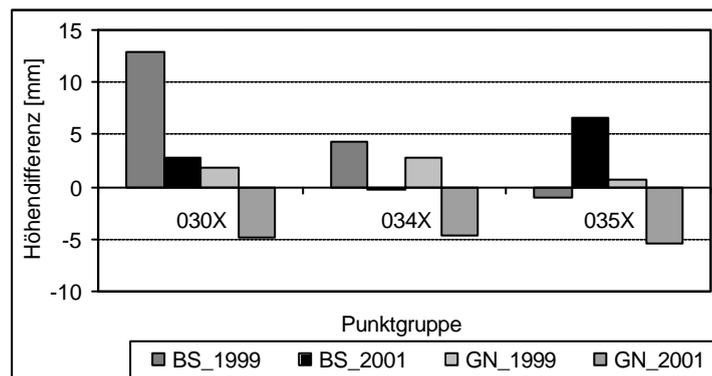


Abbildung 6: Abweichungen der Höhendifferenzen zweier benachbarter Punkte auf Pegeln aus GPS und Nivellement, Ergebnisse der Berner Software (BS) und Geonap (GN) der Kampagnen Außenems 1999 und 2001

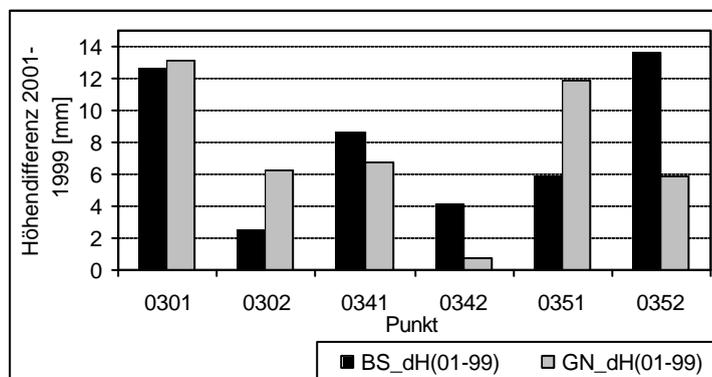


Abbildung 7: Epochenvergleich der Höhen, Ergebnisse der Berner Software (BS) und von Geonap (GN), Kampagnen Außenems 1999 und 2000

Zur Analyse der Ergebnisse wurden die folgenden Größen begutachtet: Höhendifferenz zu einer 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.

Der Übergang von GPS- auf Gebrauchshöhen erfolgte mit dem Quasigeoidmodell EGG97 und einer Anpassung an den Landeshorizont mittels bivariatem Polynomansatz.

Die eingesetzten Softwarepakete lieferten in allen Kampagnen ähnliche Ergebnisse. Die ausgeglichenen Höhen der Neupunkte unterschieden sich nur geringfügig. Die sich aus der Netzausgleichung ergebende Standardabweichung der Höhe beträgt 5 mm und besser, wobei immer unerklärliche Ausreißer auftreten. Für den Übergang auf physikalische Höhen nach dem oben beschriebenen Verfahren ergibt sich eine Standardabweichung von 9 mm. Voraussetzung dafür ist ein gleichförmiger Verlauf des Geoides.

Die Resultate der Kampagnen Außenelbe und Außenems sind ähnlich, weshalb hier nur die Ergebnisse der Kampagnen Außenems 1999 und 2001 dargestellt werden.

In Abbildung 5 sind die Standardabweichungen der sechs Pegelpunkte dargestellt, die für alle Punkte kleiner 5 mm ist. Sie fallen je nach Kampagne, Station und Software verschieden aus. Die Höhenabweichungen aus GPS und Feinnivellement benachbarter Punkte auf Pegeln sind in Abbildung 6 dargestellt. Deutlich werden erneut Unterschiede zwischen den Punkten, den Kampagnen und den Resultaten der jeweiligen Software, größenordnungsmäßig unter 15 mm.

Der Epochenvergleich der Höhen der Pegelpunkte ist in Abbildung 7 veranschaulicht. Die Charakteristika sind ähnlich der Höhengenaugigkeit. Die Höhenwertänderungen an der Außenems sind wegen ihrer Inhomogenität nur schwer interpretierbar. Aussagen über mögliche Höhenänderungen können aufgrund von derzeit nur zwei Messkampagnen nicht getroffen werden.

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 wird angeraten.

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

4 Wasserdampfradiometrie und Integration in die GPS-Auswertung

Die Genauigkeit der Höhenkomponente bei der präzisen Positionierung mit GPS hängt vor allem von der Satellitenkonfiguration, der troposphärischen Refraktion und den stationsabhängigen Fehlereinflüssen ab. Um eine Höhenübertragung im Millimeterbereich zu gewährleisten, müssen mögliche Fehlereinflüsse minimiert bzw. eliminiert werden.

Ein Schwerpunkt der Projektarbeit lag in der Bestimmung der troposphärischen Laufzeitverzögerung. Zum Bestimmen der troposphärischen Refraktion wurden Wasserdampfradiometer mit zusätzlichen meteorologischen Sensoren eingesetzt.

4.1 Grundlagen

4.1.1 Troposphärischer Laufzeitfehler und Troposphärenmodellierung

Die Satellitensignale durchqueren auf ihrem Weg zum Empfänger die Atmosphäre, d. h. Luftschichten unterschiedlichen Elektronengehalts und unterschiedlicher Dichte. Diese beeinflussen das Signal auf verschiedene Art und Weise und führen zu einer Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. -richtung. Aufgrund der guten räumlichen Aufteilung der Atmosphäre in Ionosphäre und Troposphäre wird dieser Einfluss in ionosphärische und troposphärische Refraktion unterschieden. Während sich die ionosphärische Refraktion aufgrund der Zweifrequenzmessung nahezu eliminieren lässt, ist der Einfluss der Troposphäre frequenzunabhängig. Die troposphärische Laufzeitverzögerung DL ergibt sich durch Integration entlang des Signalweges S zu:

$$\Delta L = 10^6 \int_S N ds, \quad (1)$$

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

Die Brechzahl N und die troposphärische Laufzeitverzögerung (engl. Path Delay) können in einen trockenen (hydrostatischen) Anteil DL_h und einen feuchten (nicht-hydrostatischen) Anteil DL_{nh} zerlegt werden. Der hydrostatische Anteil ist nur vom

Luftdruck, der nicht-hydrostatische Anteil von Temperatur und Wasserdampfpartialdruck abhängig (Mendes, 1999).

Somit ergibt sich:

$$\Delta L = \Delta L_h + \Delta L_{nh}. \quad (2)$$

Oft wird zur Berechnung der troposphärischen Laufzeitverzögerung aus meteorologischen Bodendaten von einer horizontalen Schichtung der Troposphäre ausgegangen. Diese Annahme, der symmetrischen Troposphäre, 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, zur sogenannten asymmetrischen Troposphäre. In Abbildung 8 ist ein Beispiel für die asymmetrische Verteilung des feuchten Anteils der Laufzeitverzögerung dargestellt.

Mathematisch lässt sich die gesamte Laufzeitverzögerung in einen symmetrischen DL_{sym} und einen asymmetrischen Anteil DL_{asym} aufspalten. Der asymmetrische Anteil der Laufzeitverzögerung lässt sich dabei mit horizontalen Gradienten in Nord- und Ostrichtung (G_n bzw. G_e) beschreiben.

Eine Laufzeitverzögerung ergibt sich damit in Abhängigkeit von Elevation ε und Azimut α zu:

$$\Delta L(\mathbf{e}, \mathbf{a}) = \Delta L_{sym} + \Delta L_{asym} \quad (3)$$

mit

$$\Delta L_{sym}(\mathbf{e}) = m_{sym}(\mathbf{e}) \cdot \Delta L^z \quad (4)$$

$$\Delta L_{asym} = m_{asym}(\mathbf{e}) \cdot (G_n \cdot \cos \alpha + G_e \cdot \sin \alpha). \quad (5)$$

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

Zur Bestimmung der nicht-hydrostatischen Gradienten werden die Ergebnisse der Wasserdampfradiometerbeobachtungen eines Hemisphärenscans einer MKQ-Schätzung zugeführt. Dazu wurden die Modelle von Davis (1992), Herring (1992), MacMillan und Ma (1997) sowie der Berner Software (Hugentobler et al., 2001) verwendet.

4.1.2 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 bzw. den integrierten Wasserdampf geschlossen werden (Kruse, 2000). 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. 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 Heiß- und Kaltlasten einer Referenzrauschdiode bestimmt. Dies wird zur internen Kalibrierung der Messwerte durchgeführt, da diese einer Drift unterliegen.

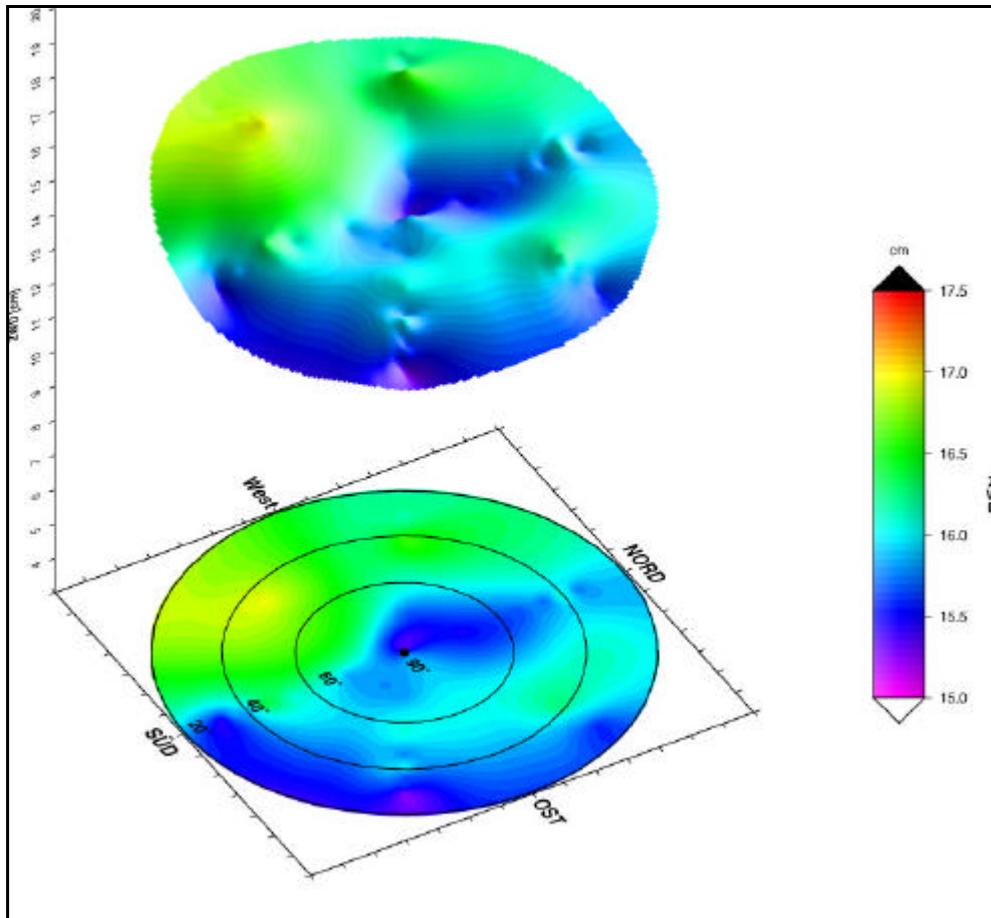


Abbildung 8: 17-minütiger Hemisphärenscan mit 6 Azimuten vom 06.07.2001, ca. 1:45 Uhr, deutliche Asymmetrie im nicht-hydrostatischen Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung

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

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

- mit
- P_0 - Luftdruck an der Beobachtungsstation [hPa],
 - \bar{P}_0 - Jahresmittel des Luftdrucks [hPa],
 - $T_{0,max}$ - Tagesmaximum der Temperatur an der Beobachtungsstation [K],
 - $\bar{T}_{0,max}$ - Jahresmittel der Tagesmaximaltemperaturen [K],
 - c_{eff} - effektiver Inversionskoeffizient und
 - a_1, a_2, a_3 restliche Inversionskoeffizienten.

Die beobachtete Helligkeitstemperatur ist dabei in der Größe X enthalten.

Die benötigten Inversionskoeffizienten werden mittels Daten von Radiosondenaufstiegen bestimmt. Für die Berechnungen konnte auf die Datenbank des British Atmospheric Data Centre (BADC) zurückgegriffen werden.

Die Inversionskoeffizienten sind abhängig von der geographischen Breite und der Jahreszeit (Somieski, 2000). In

Abbildung 9 sind die Werte für den effektiven Koeffizienten c_{eff} für vier Stationen im Projektgebiet von Dezember 1999 bis Oktober 2001 dargestellt.

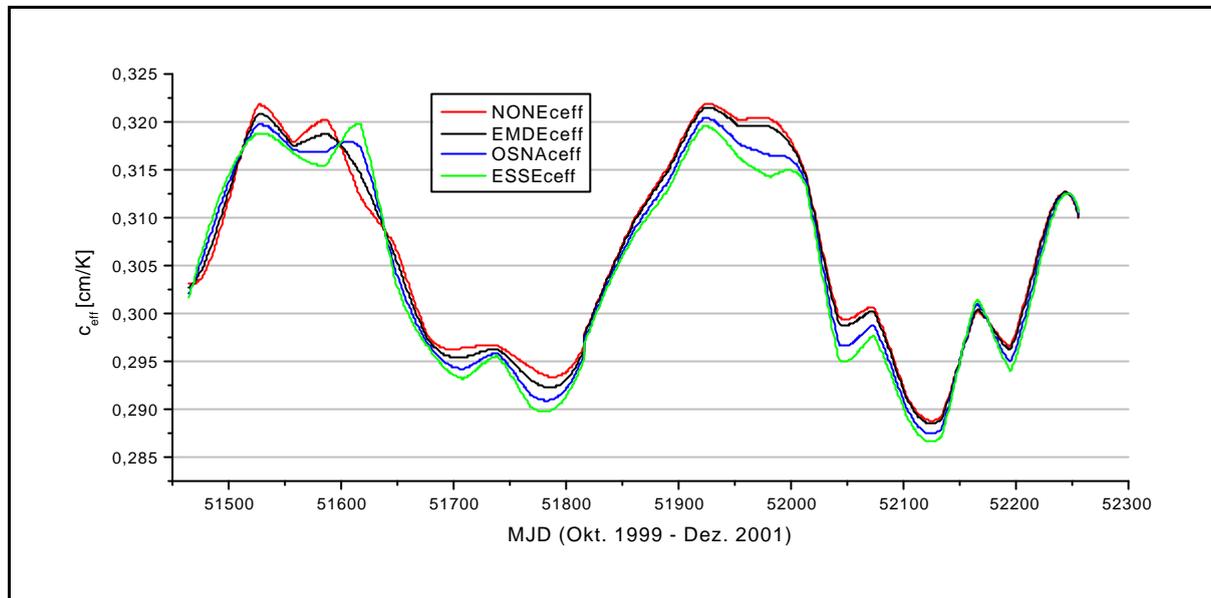


Abbildung 9: Verlauf des effektiven Koeffizienten c_{eff} Oktober 1999 bis Dezember 2001 für die Stationen Essen, Osnabrück, Emden und Norderney

4.2 Radiometerauswertung und Ergebnisse

4.2.1 Vorarbeiten zur Radiometerauswertung

Die eigentliche Radiometerauswertung erfordert eine Reihe von Vorarbeiten. Dazu zählen im Einzelnen: die Kalibrierung der meteorologischen Sensoren und der geräteinternen Klinometer, die Validierung der meteorologischen Messwerte mit Daten nahegelegener Stationen des DWD, Erkennen und Ausschluss von Daten mit Regeneinfluss, die Berechnung der aktuellen Inversionskoeffizienten, Glättung der Referenzmessgrößen Heiß- und Kaltlastspannung, die Bestimmung von Geräteoffsets der Radiometer durch Parallelmessung, Untersuchung der Radiometerstandorte auf mögliche Störquellen und Gerätefehlfunktionen durch Auswerten mit unterschiedlichen Elevationsmasken und Vergleich der messtechnisch bestimmten Laufzeitverzögerungen mit denen aus der GPS-Auswertung eines großräumigen GPS-Netzes.

In Abbildung 10 ist die Differenz des troposphärischen Laufzeitfehlers aus Radiometrie und GPS für die Station Norderney dargestellt. Verglichen werden die Unterschiede der stündlichen Mittelwerte beider Verfahren.

4.2.2 Ergebnisse der Gradientenberechnung

Wie bereits erläutert, wurden für den nicht-hydrostatischen Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung horizontale Gradienten berechnet (Gäde, 2001).

Die Ergebnisse sind in den Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt.

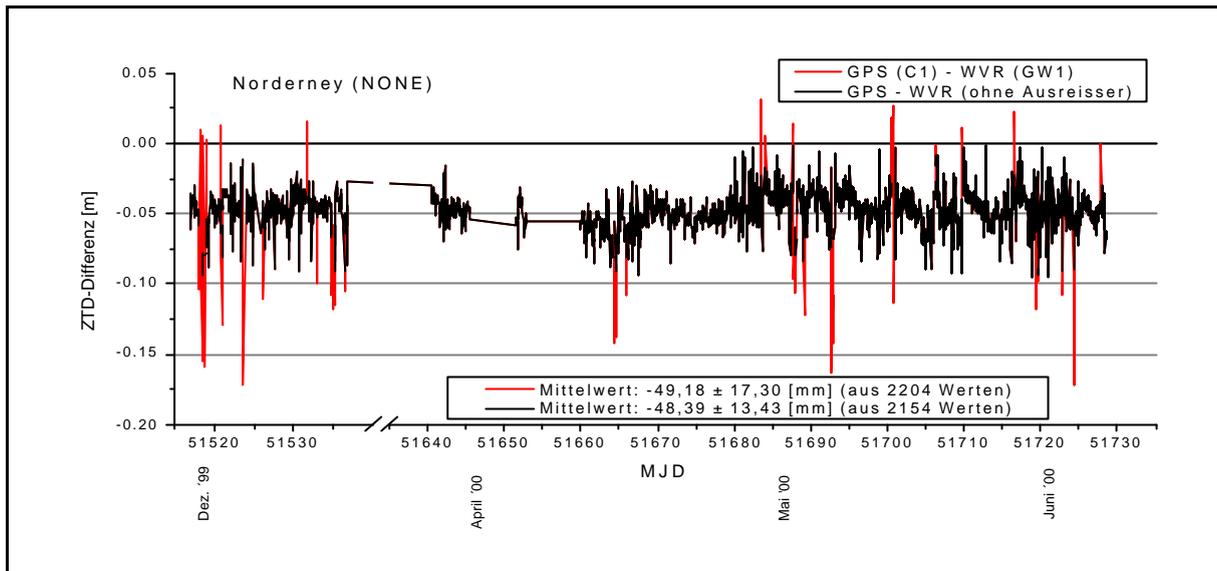


Abbildung 10: Differenz des troposphärischen Laufzeitfehlers in Zenitrichtung aus der GPS-Auswertung und aus meteorologischen Messungen (Radiometer und Luftdruck) für die Station Norderney, Dezember 1999 bis Juni 2000

Die durchschnittliche Wasserdampfverteilung weist an beiden Standorten verschiedene Charakteristiken auf, was auf die unterschiedliche geographische Lage der Stationen zurückzuführen ist. In Norderney treten vorwiegend Gradienten mit südlichen bis östlichen Richtungen auf. Dies ist mit der Insellage zu begründen. Von West bis Nordost erstreckt sich die Nordsee und die Insel befindet sich in Richtung Südwest bis Ost. Für die Station Osnabrück kann eine solche Aussage nicht getroffen werden.

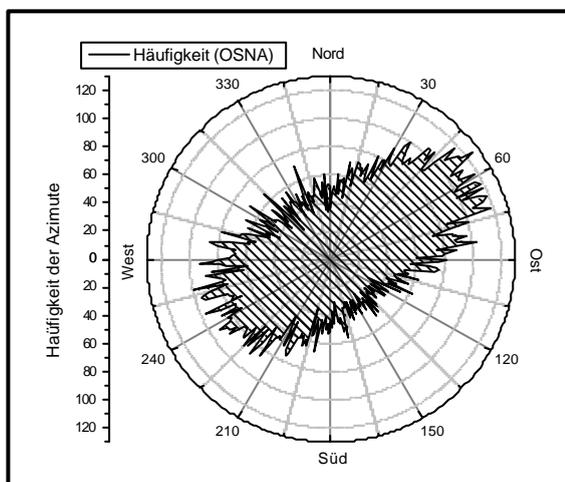


Abbildung 11: Häufigkeit der Azimute, Station Osnabrück

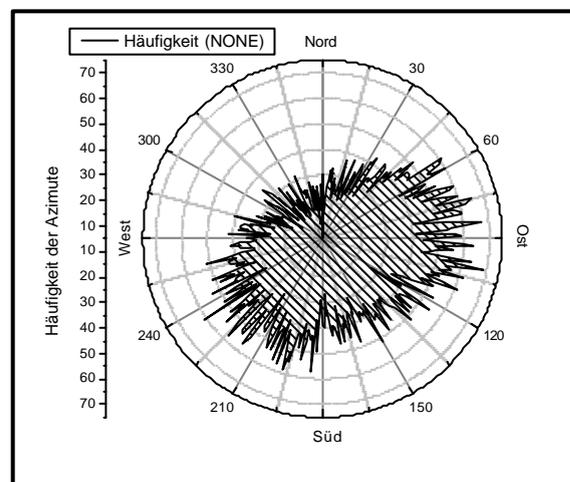


Abbildung 12: Häufigkeit der Azimute, Station Norderney

4.2.3 Integration der Radiometerdaten in die GPS-Auswertung

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 unbefriedigend, da Schritte zur Vorbehandlung der Daten fehlten. Der GPS-Auswerteprozess musste angepasst werden. 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. In Abbildung 13 ist dies mit den Ergebnissen eines Datensatzes vom Dezember 1999 dargestellt.

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.

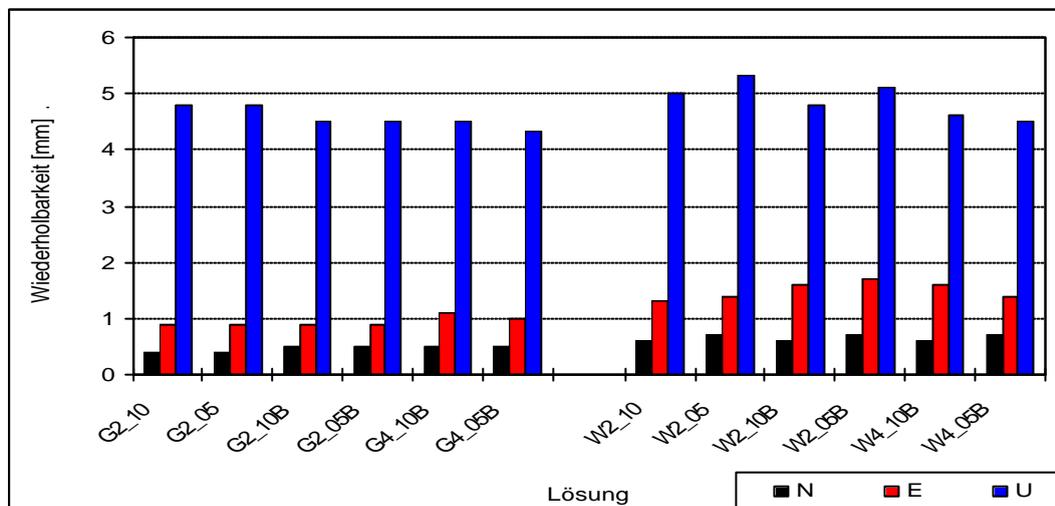


Abbildung 13: Koordinatenwiederholbarkeiten aus den Auswertungen mit und ohne Radiometerdaten (mit: W, ohne: G), Ansatz symmetrische Troposphäre, Station Norderney, 10 Tage Dez. '99

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

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

Die Auswertungen im kontinentalen Rahmen ergaben eine Variation der Tageslösungen von +/- 1 cm. Die erzeugten Zeitreihen zeigten Sprünge bei Änderung der Sensoren (Antennenwechsel) und saisonale Effekte auf. Für die Ableitung von Trends 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 Höhengenaugigkeit vom Stationsabstand, von der Anzahl der gelösten Mehrdeutigkeiten oder der Entfernung konnten nicht gefunden werden. Es stellte sich aber heraus, dass sich die stationsabhängige Signalqualität stark auf die innere Genauigkeit der Höhe auswirkt. Als optimal erwies sich die Verwendung von Daten ab 5..8 Grad Elevation im Auswerteprozess.

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

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

GPS scheint für die Höhenüberwachung geeignet zu sein. Der Übergang zu Höhen der Landesvermessung ist zur Zeit 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. Die Ergebnisse der Messkampagnen sind mit den Resultaten aus Permanentmessungen zu vergleichen. Einen weiteren Schwerpunkt stellte die Erfassung und Modellierung der troposphärischen Refraktion dar. Neue Ansätze zur Troposphärenmodellierung wurden entwickelt, kamen jedoch in der GPS-Auswertung noch nicht zum Einsatz.

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

6 Literatur

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

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

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.

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

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, Fredericton 1999

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

Wanninger, L. (2000): Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationennetzen, 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.

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.