

Qualitätskontrolle von GPS-Permanentstationen für die Wettervorhersage

GFZ Potsdam: G. Gendt, M. Ramatschi, Ch. Reigber
TU Dresden: S. Wildt

Einleitung

In einem Gemeinschaftsprojekt mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) untersucht das GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) die Verwendbarkeit von GPS gestützten Wasserdampfbestimmungen zur Wettervorhersage.

Bei dieser Near-Real-Time Anwendung von bodengestützten GPS Messungen ist eine grundlegende Abschätzung der Stationsgüte und der möglichen Fehlerquellen unerlässlich. Somit bestand ein grundlegendes Interesse daran, die Messwerte der Stationen einer eingehenden Datenanalyse zu unterziehen mit dem Ziel eines einheitlichen Qualitätsstandards. Aufgrund der reichhaltigen Erfahrungen des Geodätischen Institutes der TU Dresden auf dem Gebiet der Stationsvalidierung wurde ein Unterauftrag mit dem Ziel einer Untersuchung der etwa 70 für das Projekt relevanten Stationen des GASP-Netzes des GFZ vergeben.

Während der Untersuchungen zur Stationsqualität sollten sowohl Einempfänger- wie auch Mehrempfängerkonzepte zum Tragen kommen, um die unterschiedlichen Maßnahmen (stationsbezogene oder netzbezogene Ermittlung der einzelnen Parameter) realisieren zu können. Hierfür stand das Dresdner Stationsvalidierungsmodell zur Verfügung, welches für jede Station ein spezielles Protokoll erstellt [Augath et al. 2002]. Aufgabe dieser Qualitätskontrolle ist die Gewinnung von Informationen zur Datengüte einer Referenzstation. Damit sollen neben den bekannten Größen wie Punktstabilität und Abschattungsverhältnisse zusätzliche Kriterien geschaffen werden, mit denen eine bessere Einschätzung der Datenzustände möglich wird. Da die Informationen direkt aus Messdaten gewonnen werden, lassen sich deutlich zuverlässigere Aussagen bezüglich der zu erwartenden Datenqualität treffen. Höchste Genauigkeitsforderungen sind nur realisierbar, wenn eine permanente und durchgreifende Untersuchung der Messwerte stattfindet.

Grundlagen der Wasserdampfbestimmung

Das Globale Positioning System (GPS) wird seit Beginn der 1990er Jahre zur Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre genutzt [Tralli et al. 1992; Bevis et al. 1992; Rocken et al. 1993]. Die Trägerwellen (f_i) L1 und L2, die von den GPS-Satelliten (*sat*) ausgesandt werden, erfahren auf dem Weg zu dem am Boden befindlichen Empfänger (*rec*) eine Laufzeitverzögerung durch die Ionosphäre und die neutrale Atmosphäre:

$$L_i(f_i) = R_{geo} - \Delta_{ion}(f_i)_{rec}^{sat} + \Delta_{trop}_{rec}^{sat} + c \cdot (\Delta t_{rec} - \Delta t^{sat}) - \frac{c}{f_i} N_i + err_i; i = 1, 2$$

R_{geo} - geometrischer Abstand sat-rec, c - Lichtgeschwindigkeit,
 Δt - Uhrkorrektur, N_i - Ambiguity, err_i - restliche Fehler

Durch die beiden unterschiedlichen Frequenzen der Trägerwellen kann die dispersive, ionosphärische Refraktion herausgerechnet werden. Die Refraktion der neutralen Atmosphäre, die sich aus den Anteilen trockene Luft, Wasserdampf, Wolken und Regen zusam-

mensetzt, kann nicht direkt aus den Messungen abgeleitet werden, sondern sie wird über eine Ausgleichung über alle Parameter gewonnen. Die totale atmosphärische Verzögerung (Delay) des GPS-Signals kann unterteilt werden in die beiden Anteile:

$$\Delta t_{rec}^{sat} = ZHD_{rec} \cdot m_{hyd}^{sat}(elev) + ZWD_{rec} \cdot m_{wet}^{sat}(elev)$$

mit ZHD und ZWD - hydrostatischer bzw. feuchter Anteil im Zenit, m_{hyd} und m_{wet} - hydrostatische bzw. feuchte Mapping-Funktion. Die Summe dieser Verzögerungen ist der Zenith Path Delay ZPD. Der zur atmosphärischen Masse proportionale ZHD beträgt im Zenith etwa 2500 mm, der stark variable wasserdampfabhängige ZWD kann bis zu 400 mm betragen. Der Einfluss von Wolken and Regen ist normalerweise klein und kann mit GPS nicht berechnet werden, in extremen Wetterlagen beträgt ihr Einfluss max. 10% des ZWD, normalerweise aber weniger als 5% [Solheim et al. 1999].

Der mit Millimetergenauigkeit aus den GPS Daten bestimmte ZPD wird unter zu Hilfenahme der am Beobachtungsort herrschenden Druck- und Temperaturverhältnisse in den integrierten Wasserdampf (IWV; als 'precipitable water vapor' (PWV) in mm) konvertiert. Als erstes wird der Bodendruck verwendet, um den ZHD-Wert zu berechnen und ihn vom ZPD zu subtrahieren. Der resultierende ZWD wird mit dem Faktor $\Pi(T_m)$ (etwa 1/6) in PWV umgerechnet. Für die Konvertierung muss die mittlere Temperatur der Atmosphäre bekannt sein. Verwendet man Vorhersagemodelle für T_m , so ist der Konversionsfehler kleiner als 1%, und bei einer Regression aus der Oberflächentemperatur erhält man als typischen Fehler etwa 2% [Bevis et al. 1992].

Bodenstationsnetz in Deutschland

Die räumliche Auflösung der Bestimmung des Wasserdampfes mit Hilfe von GPS-Messungen über einer einzelnen Bodenstation beträgt etwa 7 bis 15 Kilometer. Zur operationellen, kontinuierlichen Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfes wird somit ein dichtes Bodenstationsnetz benötigt, dass im Teilprojekt 1 von GASP (GPS Atmosphere Sounding Project) in Deutschland realisiert wurde [s. auch Reigber et al. 2002]. Ein großer Teil des Stationsnetzes wird von den einzelnen Landesvermessungsbehörden bereitgestellt, die unter dem Namen SAPOS ein Referenzstationsnetz in Deutschland betreiben. Von den über 200 möglichen SAPOS Stationen wurden bisher etwa 120 Stationen in das Projekt GASP eingebunden. Daneben betreibt das GFZ

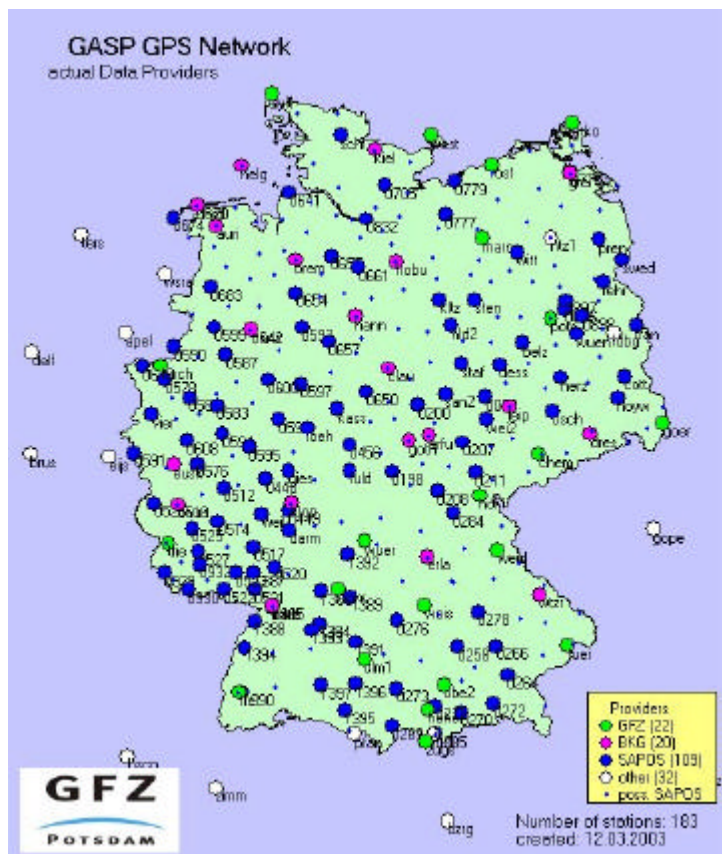


Abb. 1: Stationsnetz des Projektes GASP (Stand: März 2003)

etwa 20 GPS Stationen an Standorten des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Aufgrund der vorherrschenden Westwind-Wetterlage ist es sinnvoll, auch nichtdeutsche GPS Stationen, z. B. aus dem EUREF Stationsnetz einzubeziehen. Insgesamt besteht das Bodenstationsnetz aus etwa 180 Stationen, die stündlich ihre Daten mittels Internettechnologien an das GFZ melden.

Die Anforderungen beim DWD an die Bereitstellung der Ergebnisse für die numerische Wettervorhersage liegt momentan bei etwa 45 Minuten nach Abschluss der Messungen der letzten Stunde. Für die bereits recht große Stationsanzahl mussten daher effektive Methoden entwickelt und implementiert werden, die vor allem eine Parallelisierung der Verarbeitung auch unter Nutzung mehrerer Rechner gestatten. Da diese Auswertung etwa 20 Minuten in Anspruch nimmt wird mit der Analyse der Daten nach etwa 25 nach der vollen Stunde begonnen.

Die Daten werden in einem gleitenden Fenster von 12 Stunden verarbeitet, wobei in einer NRT-Anwendung die jeweils letzte Stunde das entscheidende Produkt darstellt. Als Voraussetzung für die NRT-Analysen müssen Vorhersagen der Satellitenpositionen mit möglichst hoher Genauigkeit (10-20 cm) bekannt sein. Unter Nutzung globaler GPS-Daten berechnet das IGS-Analysezentrum am GFZ mehrmals täglich diese Vorhersagen, in jüngster Zeit sogar alle drei Stunden. Die in NRT erzeugten Ergebnisse des gesamten GPS-Netzes werden unmittelbar dem DWD zur weiteren Verarbeitung übermittelt. Die zeitliche Auflösung der Produkte beträgt derzeit 30 Minuten.

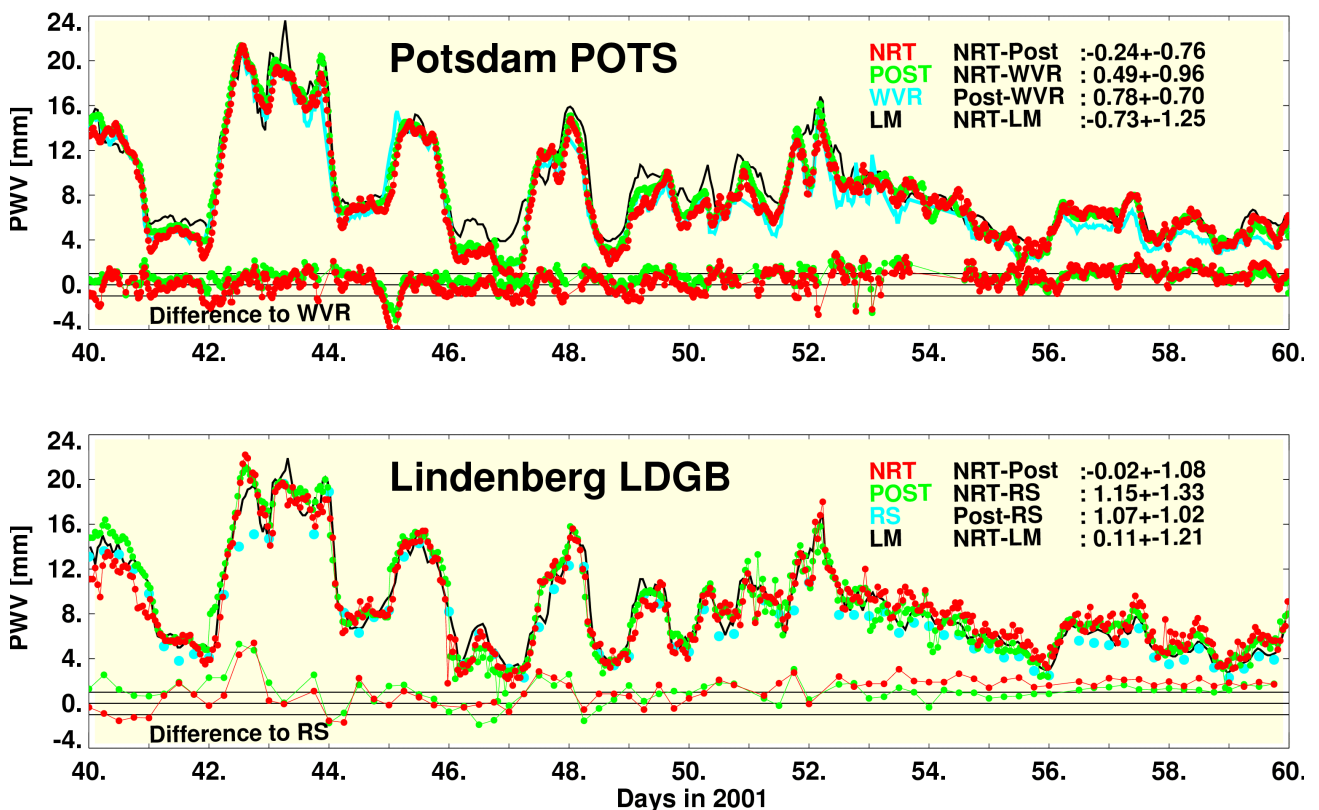


Abb.2: Vergleich von Wasserdampfneigen an den Stationen Potsdam und Lindenberg, die aus GPS (NRT und Post-Prozessierung), Radiosonden und Wasserdampfradiometer gewonnen wurden.

Die aus GPS Messungen bestimmten Wasserdampfgehalte können mittels unabhängiger Messmethoden validiert werden (Abb. 2). Hierfür wurden Vergleiche mit Wasserdampfradiometern, Radiosonden und Ergebnissen aus dem Lokalen Modell des DWD durchgeführt. Ein Vergleich mit einem Wasserdampfradiometer ist direkt in Potsdam möglich. Hier betreibt der DWD eine solche Station in nur 500m zum GPS Messpunkt. Die Differenzen liegen sowohl im Bias als auch in der Streuung bei 1 mm und darunter; die beiden Techniken stimmen damit im Bereich ihrer Fehler miteinander überein.

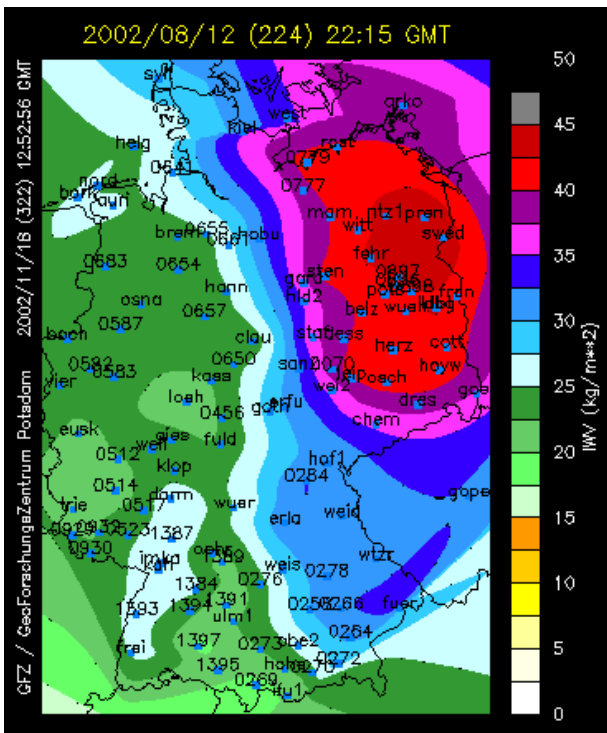


Abb. 3: Darstellung der aus GPS-Messungen gewonnenen Wasserdampfverteilung über Deutschland zur Zeit der Flutkatastrophe 2002, alle berücksichtigten GPS-Stationen sind markiert.

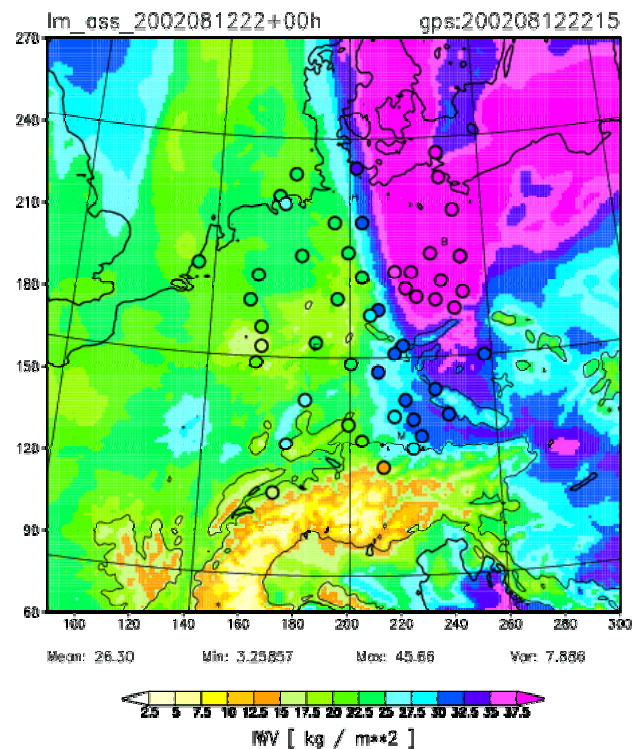


Abb. 4: Vergleich des lokalen Modells (LM) des DWD mit dem aus GPS-Messungen gewonnenen Wasserdampf (schwarze Kreise) während der Flutkatastrophe im August 2002.

Ein Vergleich mit Radiosonden ist an der Station Lindenberg möglich. Die Differenzen sind dabei geringfügig größer, allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass die Radiosonden vom Wind abgetrieben werden können und so die Messorte nicht identisch sein müssen. Am größten sind die Abweichungen zum lokalen Modell des DWD, die aber mit Werten von 1.5 bis 2.5 mm noch zufriedenstellend sind. Diese Übereinstimmung spiegelt sich auch in Abb. 3 und Abb. 4 wieder. Hier sind jeweils zeitgleich die Ergebnisse der Wasserdampfbestimmung aus den GPS-Messungen mit dem Lokalen Modell des DWD während der grossen Flutkatastrophe im August 2002 in Deutschland dargestellt. Gut zu erkennen ist der Frontenverlauf in Nord-Süd-Richtung.

Stationsvalidierung

Die Validierung der Stationen untergliedert sich in zwei prinzipiell unterschiedliche Bereiche. Einige Informationen lassen sich direkt aus den Messdaten einer einzelnen Station gewinnen. Dazu zählen

- Datenverfügbarkeit/-vollständigkeit
- Phasenunterbrechungen
- Mehrwegeausbreitung auf dem Code

Für weitere Größen müssen die Daten der Referenzstationen zusammengefasst werden. Es erfolgt eine netzweise Auswertung. Dabei erhält man Aussagen zu folgenden Punkten:

- Mehrwegeausbreitung und Signalbeugung auf der Trägerphase
[s.a. Wanninger u. Wildt, 1997]

Die Analyse der Stationen des GASP-Netzes erforderte neben der Eindeutigkeit der Fehlerzuordnung auch eine Sicherheit bzgl. der Größe der Einflüsse. Diese wird erreicht durch die Wiederholung der Untersuchung an mehreren Messtagen (bis zu 14 Tage pro Station). Die Ergebnisse dieser Einzeltage werden dann bei genügender Übereinstimmung zu einer Gesamtlösung zusammengefasst. Für die Bestimmung der Einflussgrößen reichen i.A. Daten mit 60s Aufzeichnungsrate oder auch dünner. Im Einzelfall kann es jedoch vorkommen, dass dadurch eine leichte Interpretationsverschiebung zustande kommt. Hiervon können die Darstellungen zur Beobachtungsvollständigkeit und den Cycle slips betroffen sein.

Datenverfügbarkeit / Datenvollständigkeit

Diese Ergebnisse werden für jede Station einzeln übereinandergelegt. Damit ist ein Vergleich der einzelnen Tage möglich. Die Kurven sollten alle dicht beieinander liegen. Im Folgenden ist ein Beispiel für die gestörte Station 0897 angegeben (Auswahl: 6 Tage).

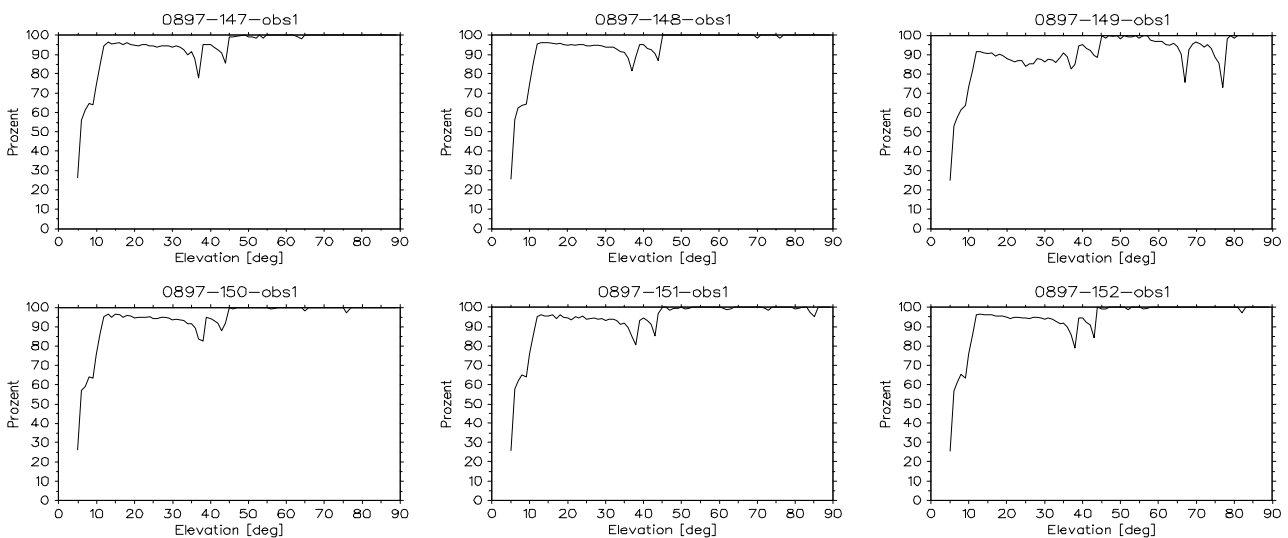


Abb. 5: Tägliche Wiederholbarkeit der Vollständigkeit an Beobachtungsdaten

Wichtig ist natürlich an dieser Stelle der Vergleich mit der Vollständigkeit an Stundenlösungen. Erst dann kann eine Suche nach möglichen Ursachen beginnen. In Abb. 6 links ist die Zusammenfassung für die Station 0897 angegeben. Die Störungen treten also nicht nur sporadisch auf sondern haben ihre Ursache in den Eigenschaften der Station. Die rechte Abbildung zeigt dieselben Ergebnisse für die Station PREN. Hier kann von einer

guten Qualität ausgegangen werden. Es treten keine Störungen durch Abschattungen auf. Lediglich am Tag 151 sind Einflüsse zu erkennen, die zu einer teils deutlichen Reduzierung der möglichen Anzahl an Beobachtungen führen. Dies scheint jedoch nur ein temporäres Problem zu sein.

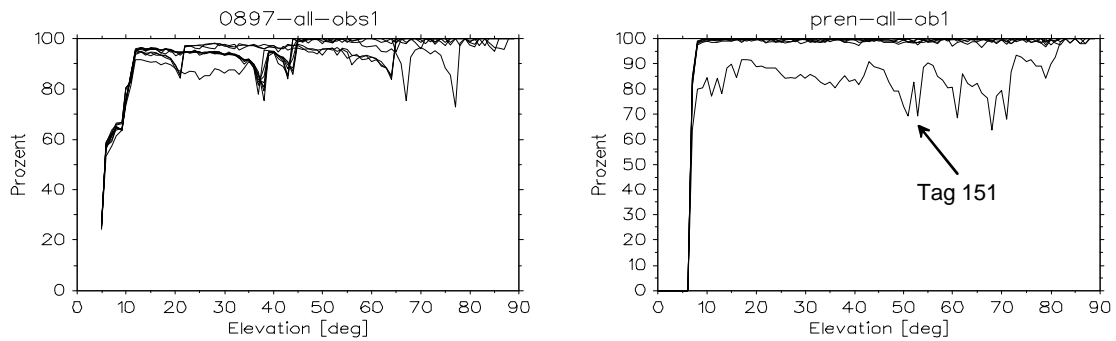


Abb. 6: Zusammenfassung für die Stationen POTS und PREN

Phasenunterbrechungen

Der Vergleich unterschiedlicher Empfängertypen erschwert die Interpretation der Ergebnisse. Hier gibt es möglicherweise unterschiedliche Effekte bei den einzelnen RINEX-Wandlern, die die Anzahl der markierten Cycle-slips wesentlich beeinflussen. Im Allgemeinen sind die Stationen kaum gestört, da sie sich meist auf Dächern mit geringen Abschattungen befinden. Die Darstellungen der einzelnen Messtage werden ebenfalls zu einer Gesamtdarstellung zusammengefasst.

Mehrwegeausbreitung auf dem Code

Sämtliche Ergebnisse eines Tages werden elevationsabhängig sortiert und zusammengefasst. Es entsteht eine Darstellung, welche die durchschnittlichen Fehler im jeweiligen Elevationsbereich wiedergibt. Ein Beispiel für eine solche Darstellung ist in Abb. 7 zu finden.

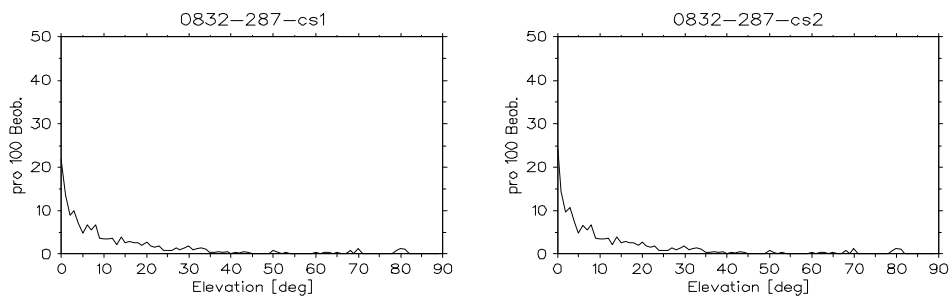


Abb. 7: Mittlere Codemehrwegeeffekte für POTS auf beiden Frequenzen

Scheinbar niedrige Mehrwegeefflüsse sind nur dann realistisch, wenn keine Glättung der Codemesswerte mit Hilfe der Trägerphasenmessungen stattfindet. Das Codemessrauschen ist für jeden Empfänger unterschiedlich. Es liegt jedoch meist bei etwa 2-3dm. Wie schon angesprochen kann der Vergleich unterschiedlicher Empfänger Fehlinterpretationen verursachen, wenn teilweise bereits geglättete Messwerte zur Auswertung gelangen. Indiz hierfür kann ein Messrauschen von deutlich unter den angegebenen Werten sein.

Mehrwegeausbreitung und Signalbeugung auf der Trägerphase

Für die Bestimmung der Mehrwege- und Beugungseffekte genügt es, wenn in der Nähe der zu untersuchenden Stationen mindestens zwei Stationen mit nachweisbar sehr geringen oder nicht vorhandenen Störungen liegen. Die einzelne Bestimmung erfolgt zweistufig. Für die Ermittlung der Einflüsse auf allen Stationen wurde das Verfahren nach [Wanninger u. Wildt 1997] angewandt. Das im folgenden beschriebene Verfahren hingegen ist die Basis für die Echtzeitbestimmung dieser Einflüsse.

Für die eigentliche Bestimmung der Effekte werden Doppeldifferenzresiduen verwendet, die nach der Mehrdeutigkeitsfestsetzung ermittelt werden. Diese Residuen sind die Eingangsgrößen für den Algorithmus. Bei doppelten Differenzen besteht das Problem der eindeutigen Zuordnung eines Fehlers zu den Messungen eines Satelliten auf einer Station. Gelten hier bestimmte Annahmen, kann diese Zuordnung unter statistischen Gesichtspunkten vorgenommen werden. Das Zuordnungsproblem wird durch die folgenden Schritte angegangen:

1. Zuordnung der Einflüsse zu den Satelliten. Bei Erfolg liegen pro Basislinie für jeden Satelliten in jeder Epoche Korrekturwerte vor. (Reduktion des Doppeldifferenzproblems auf ein Einfachdifferenzproblem)
2. Zuordnung der Einflüsse zu einer Station. Bei Erfolg liegen pro Station für jeden Satelliten in jeder Epoche Korrekturwerte vor. (Auflösung des Einfachdifferenzproblems)

Grundvoraussetzung vor Anwendung des Verfahrens ist, dass in den Doppeldifferenzresiduen im wesentlichen nur noch Mehrwege- und Beugungseffekte sowie Messrauschen enthalten sind. Deshalb ist bei langen Basislinien die ionosphärenfreie Linearkombination $L0$ zu wählen.

Die Grundlagen der Zuordnung sollen nun im folgenden beschrieben werden. Zum besseren Verständnis wird von einer graphischen Darstellung ausgegangen. Von 6 Satelliten sind in der Epoche X 2 Satelliten mit Mehrwegeeffekten belastet.

Dargestellt sind angenommene Kurvenverläufe von Doppeldifferenzresiduen $\nabla\Delta F_{ab,f}^{Bi}$.

Die Differenzbildung wird dabei nach folgendem Muster vorgenommen

$$\nabla\Delta F_{ab,f}^{Bi} = \Delta F_{ab,f}^i - \Delta F_{ab,f}^B = (F_{b,f}^i - F_{a,f}^i) - (F_{b,f}^B - F_{a,f}^B)$$

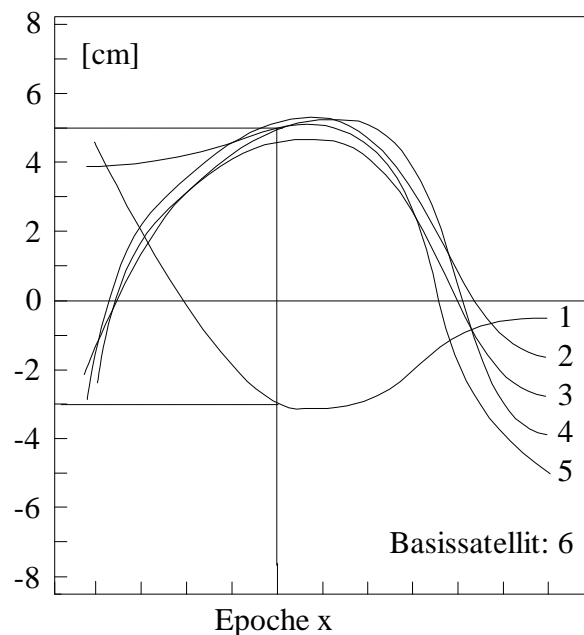


Abb. 8 Prinzipdarstellung zur Zuweisung der Mehrwegeeffekte zu einem Satelliten

Die Besonderheit dieser Differenzbildung besteht darin, dass die Residuen F eines gewählten Basissatelliten B (= Satellit 6) immer von den Werten der übrigen Satelliten i (= Satelliten 1-5) abgezogen werden. Der Einfluss des Basissatelliten geht also immer mit gleichem Vorzeichen ein. Natürlich kann die Differenzbildung alternativ auch andersherum durchgeführt werden. Hierbei ist lediglich auf konsequente Anwendung zu achten.

Unterstellt man nun, wie in obiger Abbildung angenommen, dass neben dem Basissatelliten nur noch ein weiterer Satellit (1) von Mehrwegeeffekten betroffen ist, ergibt sich der etwa gleichartige Verlauf mehrerer Kurven (die übrigen Satelliten 2-5) unter Berücksichtigung des Messrauschens der jeweiligen Frequenz f (f steht hier auch für mögliche Linearkombinationen LK der Originalfrequenzen, z.B. für die ionosphärenfreie Linearkombination $L0$). Dabei ist es unerheblich, ob sich von Epoche zu Epoche deutliche Verschiebungen der Mehrwegebeeinflussung ergeben. Es interessiert lediglich der Zustand innerhalb einer einzelnen Epoche (x). Liegen also pro Epoche eine genügend große Anzahl an doppelten Differenzen sehr dicht beieinander, so können daraus folgende Überlegungen abgeleitet werden:

1. Die Satelliten, deren Doppeldifferenzen sehr dicht beieinander liegen, weisen alle etwa denselben Mehrwegeeffekt auf. Je mehr Satelliten hierbei zusammentreffen, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Einfluss Null beträgt. Aufgrund verschiedener Einstrahlrichtungen ist es unwahrscheinlich, dass alle diese Satelliten den gleichen, von Null verschiedenen, Einfluss aufweisen. Läge dieser Fall vor, könnte er durch das Verfahren nicht aufgedeckt werden. Es käme zu einer Fehlzuweisung.
2. Der Mehrwegeeinfluss des Basissatelliten ergibt sich als negatives Mittel aller dieser m unbeeinflussten Satelliten (im Beispiel -5cm):

$$\Delta M_{ab,f}^B = -\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \nabla \Delta F_{ab,f}^{Bn} \quad (\text{im Beispiel } m=4)$$

3. Ist der Mehrwegeeinfluss des Basissatelliten bekannt, können nun die Einflüsse der r anderen Satelliten abgeleitet werden (für Sat. 1 im Beispiel: $-3+(-5)=-8\text{cm}$).

$$\Delta M_{ab,f}^n = \nabla \Delta F_{ab,f}^{Bn} + \Delta M_{ab,f}^B \quad \text{für } n=1 \text{ bis } r \quad (\text{im Beispiel } r=1)$$

Im Idealfall liegen nun Korrekturwerte für jeden Satelliten auf einer Basislinie vor. Das Doppeldifferenzproblem wurde damit auf ein Einfachdifferenzproblem zurückgeführt. Dieses soll nun seinerseits durch die folgende Überlegung aufgelöst werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass für den zu untersuchenden Satelliten die basislinienweise ermittelten Mehrwegeeffekte für ein ganzes Netz an Stationen vorliegen.

Findet sich im Stationsnetz eine Station mit mindestens 2 abgehenden Basislinien, auf denen der zu untersuchende Satellit nahezu keinen Einfluss aufweist, ist der Schluss gerechtfertigt, dass diese Station für diesen Satelliten als unbelastet betrachtet werden kann (Stationen B, C, D). Die gefundenen Einflüsse werden also den übrigen Stationen zugewiesen. Damit wird nun auch das Einfachdifferenzproblem aufgelöst. In der folgenden Abbildung sind fiktive Werte dieses Satelliten für alle Basislinienlösungen angegeben.

Nach den getroffenen Vorüberlegungen können nun Korrekturen berechnet werden. Diese können dann an den originalen Messwerten angebracht werden. Werden Korrekturen für abgeleitete Messgrößen ermittelt, so können diese zwar in einen Wert umgerechnet werden, der einem Originalmesswert zugerechnet werden kann. Mithilfe dieser verbesserten Werte darf dann jedoch auch nur eine Koordinatenlösung für die entsprechende Linearkombination ermittelt werden, da in diesen Korrekturwerten Bestandteile beider Originalmessgrößen enthalten sind, die nicht explizit zu trennen sind. Es ist darauf zu achten, dass der abgeleitete Korrekturwert vor der Anwendung entsprechend umgerechnet werden muss.

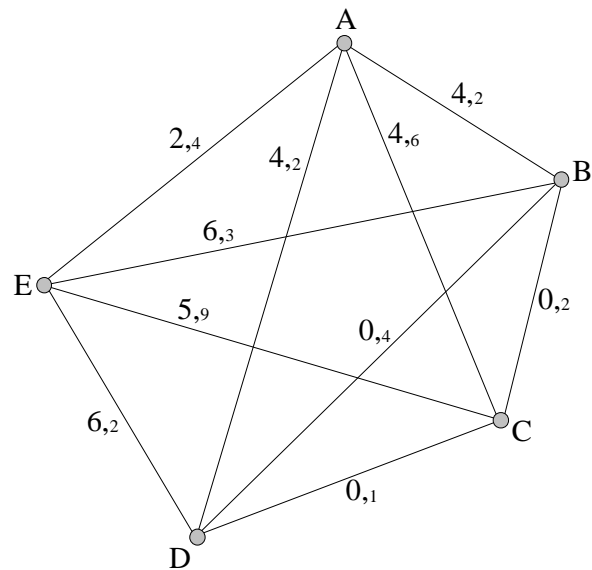


Abb. 9: Fiktive absolute Mehrwegeeinflüsse eines ausgewählten Satelliten je Basislinie (Ziel: Zuweisung der Effekte zu einer Station)

Unter Verwendung des angegebenen Verfahrens zur Bestimmung von Mehrwegekorrekturen wurde folgende Vorgehensweise realisiert. Zuerst wurden die Messungsresiduen ausgewählter Stationen und Zeitabschnitte vor jeglicher Manipulation ermittelt und die Standardabweichung berechnet. Danach erfolgte die Bestimmung der Mehrwegeeffekte aus den Messungsresiduen innerhalb des Referenzstationsnetzes. Die gefundenen Korrekturen wurden an den originalen Rinexdateien angebracht. Dafür wurden die L0-Korrekturwerte durch den Wellenlängenfaktor

$$Wf = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

geteilt, in Wellenzyklen umgerechnet und dem L1-Phasenmesswert zugeschlagen. Es erfolgte eine komplett neue Auswertung mit den korrigierten Daten. Im Anschluss wurde

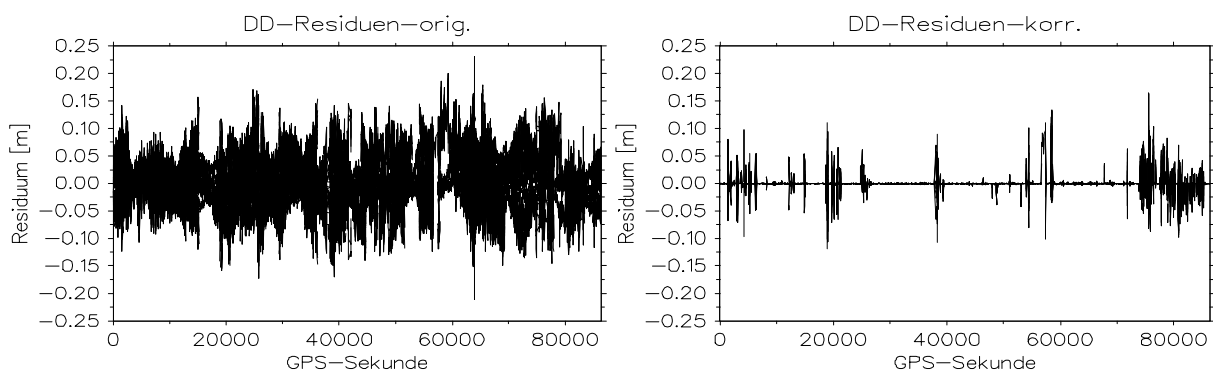


Abb. 10 Doppeldifferenzresiduen (L0) vor und nach Mehrwegekorrektur

wieder die Standardabweichung der Doppeldifferenzresiduen berechnet (siehe auch obige Abbildung). Hier ergab sich eine signifikante Verbesserung. Für einen Beispieldatensatz reduzierte sich die Standardabweichung von ursprünglich 42,3mm auf 6,9mm. Restein-

flüsse verbleiben in den Epochen, in denen keine eindeutige Zuordnung der Fehler gewährleistet war. Hier besteht jedoch noch die Möglichkeit, dass sich durch eine weitere Anpassung der Grenzwerte während der Auswertung diese Restfehler weiter reduzieren lassen. Alternativ können auch Korrelationen zu Nachbarepochen berücksichtigt werden.

Literatur:

- Augath, W., T. Blumenbach, S. Wildt (2002): *Qualitätssicherung bei Referenzstationen und in Referenzstationsnetzen*, In: Tagungsband zum 4. SAPOS-Symposium vom 21.-23.05.2002 in Hannover, S.114-123, Hrsg.: Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen, Mai 2002.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, R. H. Ware: GPS meteorology remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 97, No D14, 15787-15801, 1992 .
- Reigber, Ch., G. Gendt, G. Dick, M. Tomassini: Near-real-time water vapor monitoring for weather forecasts. *GPS World*, January 2002, 18-27.
- Rocken C., R. Ware, T. Van Hove, F. Solheim, Ch. Alber, J. Johnson, M. Bevis, S. Businger: Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Let.*, 20, No 23, 2631-2634, 1993.
- Solheim, F. S., J. Vivekanandan, R. H. Ware, C. Rocken: Propagation delays induced in GPS Signals by Dry Air, Water Vapor, hydrometeors and other particulates. submitted to *J. Geophys. Res.*, 104, No. D8, 9663-9670, 1999.
- Tralli, M. D., S. M. Lichten, T. A. Herring: Comparison of Kalman filter estimates of zenith atmospheric path delays using Global Positioning System and very long baseline interferometry. *Radio Science*, 27, No 6, 999-1007, 1992.
- Wanninger, L., S. Wildt (1997): *Identifikation von Mehrwegeeffekten in GPS-Referenzstationsbeobachtungen*, In: Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), S. 12-15, Heft 1/1997