

# Nachweis von Höhenänderungen aufgrund atmosphärischer Druckvariationen aus GPS-Messungen

Klaus Kaniuth und Sandra Huber

## Zusammenfassung

Atmosphärische Luftdruckanomalien können Höhenänderungen von mehreren Zentimetern verursachen. Diese Auflasteffekte werden bei der GPS-Auswertung im Allgemeinen noch nicht modelliert, obgleich sie die heute erzielbare Genauigkeit der Höhenbestimmung merklich überschreiten können. Um den Effekt quantitativ nachzuweisen, wird ein 29 Permanentstationen umfassendes europäisches GPS-Netz analysiert. Die Höhenschätzungen aus täglichen Netzausgleichungen samt Kovarianzmatrix werden als korrelierte Beobachtungen in eine Ausgleichung eingeführt, in der für mittlere ellipsoidische Höhen, lineare Höhengeschwindigkeiten, episodische Höhenänderungen aufgrund von Antennenwechseln sowie für Druckauflastkoeffizienten gelöst wird. Aus über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren verteilten Datensätzen ergeben sich für Festlandstationen signifikante vertikale Auflasteffekte von bis zu 0,5 mm/hPa Druckänderung, während Stationen auf Inseln wie Helgoland überhaupt nicht beeinflusst werden. Datenauswahl, Analysestrategie und Ergebnisse werden ausführlich diskutiert.

## Summary

*Atmospheric pressure anomalies may cause height variations as large as several centimetres. These loading effects are not modelled yet in the GPS processing although they might exceed the presently achievable height determination accuracy. In order to quantitatively assess the effect a European GPS network comprising 29 permanent stations is analysed. The height estimates resulting from daily network adjustments including the covariance matrix are introduced as correlated observations into a further adjustment. This adjustment solves for mean ellipsoidal heights, linear vertical velocities, episodic height variations due to antenna changes and for pressure loading coefficients. Significant vertical loading displacements of up to 0.5 mm/hPa pressure variation result from data distributed over more than three years for continental sites, whereas island sites such as Helgoland do not experience any loading effect at all. Data selection, analysis strategy and results are discussed in detail.*

## 1 Einleitung

Die steigende Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Global Positioning Systems (GPS) sowie Weiterentwicklungen in der Datenmodellierung erlauben es, geophysikalische Phänomene durch die Analyse der Zeitreihen von GPS-Positionsbestimmungen mit zunehmend höhe-

rer zeitlicher Auflösung und Genauigkeit zu studieren. Zu untersuchende langfristige Phänomene sind z.B. postglaziale Landhebungen und Meeresspiegelveränderungen, die allerdings beide Genauigkeiten der Höhenbestimmung im mm-Bereich erfordern. Die Höhe ist aber noch nicht mit derselben Genauigkeit bestimmbar wie die horizontalen Komponenten der GPS-Positionierung. Die Gründe hierfür sind kürzlich von Rothacher (2002) ausführlich diskutiert worden. Einerseits bestehen hohe mathematische Korrelationen zwischen den in der Auswertung zu bestimmenden Höhen-, Troposphären- und Uhrenparametern, andererseits beeinträchtigt eine Reihe von Fehlereinflüssen die Bestimmung genauer Höhen und ihrer zeitlichen Variationen. Neben der Variabilität der troposphärischen Refraktion gehören hierzu auch stations- und antennenabhängige Effekte (Johansson 1998).

Höhenbestimmungen werden außerdem durch nicht ausreichend genau modellierbare, zeitlich veränderliche Auflasteffekte beeinflusst (siehe Haas 1996). Hierzu gehören nicht nur die durch die Ozeangezeiten, sondern auch die durch Veränderungen der Schnee- und Eisbedeckung sowie der Wasserstände auf den Kontinenten verursachten Auflasten. Die größten Beträge von mehreren cm erreichen jedoch die vertikalen Deformationen durch atmosphärische Druckauflasten, die aber bis heute bei der GPS-Auswertung meist nicht modelliert werden. In einigen mehr theoretisch ausgelegten Arbeiten werden die Auflasteffekte aus globalen Druckverteilungen und Greenschen Funktionen berechnet (z. B. Sun et al. 1995); es gibt aber auch eine Reihe von Analysen, die darauf abzielen, die Effekte in VLBI- und GPS-Ergebnissen aufzuzeigen. Van Dam und Herring (1994) konnten eine hohe Korrelation zwischen mit VLBI bestimmten Basislinienlängenänderungen und Druckvariationen nachweisen. MacMillan und Gipson (1994) wie auch Haas et al. (1997) haben vertikale Auflastkoeffizienten direkt aus VLBI-Messungen und lokalen Druckdaten abgeleitet. Im Gegensatz dazu konnten in GPS-Ergebnissen zunächst keine eindeutigen Korrelationen zwischen Höhen- und Druckänderungen nachgewiesen werden (van Dam et al. 1994). In neueren Analysen, in denen zuerst einzelne lange Basislinien und anschließend ein Netz großer Nord-Süd-Ausdehnung ausgewertet wurden, konnten die vertikalen Auflasteffekte auch bei GPS aufgezeigt werden (Häfele und Kaniuth 2002, Kaniuth und Häfele 2002). In diesem Beitrag werden die Untersuchungen fortgeführt, und es werden vertikale Auflastkoeffizienten aus einem umfangreichen Datensatz eines europäischen Netzes von GPS-Permanentstationen abgeleitet.

## 2 Analyisierte Datensätze

Angesichts der erzielbaren Wiederholungsgenauigkeit täglicher Höhenbestimmungen in kontinentalen und globalen GPS-Netzen von etwa  $\pm 5$  mm und der Größenordnung der vertikalen Auflasteffekte von 0,5 mm/hPa Druckänderung ist die Auswahl der zu analysierenden Stationen und Messperioden von Bedeutung. Da große Luftdruckanomalien und schnelle -variationen im Vergleich zu mittleren Breiten vermehrt in hohen geografischen Breiten auftreten, sollte das Netz eine möglichst große Nord-Süd-Ausdehnung und eine gute Verteilung vor allem in Skandinavien aufweisen. Es wurde deshalb das in Abbildung 1 dargestellte Netz festgelegt, das 29 Stationen des europäischen permanenten GPS-Netzes umfasst. Die angegebenen Stationsbezeichnungen sind die offiziellen vom International GPS Service (IGS) verwendeten Identifikationen. An Luftdruckinformationen standen folgende Datensätze zur Verfügung:

- Tägliche auf Meereshöhe bezogene Mittelwerte für ein globales Gitter von  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  des National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, Colorado (USA);
- Lokale Druckmessungen hoher zeitlicher Auflösung, aus denen Tagesmittelwerte gerechnet wurden, für 10 Stationen des ausgewählten Netzes.

Für die Festlegung der in dieser Arbeit auszuwertenden Perioden wurden folgende Gesichtspunkte berücksichtigt:

- Abdeckung von Bereichen möglichst großer regionaler Druckanomalien;
- Erfassung von Zeiträumen schneller Variationen der Druckanomalien;
- Vermeidung von Datenlücken in den GPS-Messungen so weit wie möglich;
- Gute Verteilung über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren, da auch tektonische Höhenbewegungen mitbestimmt werden mussten.

Nach Sichtung der Datenverfügbarkeit der ausgewählten GPS-Stationen sowie der Druckdaten von Anfang 1999 bis Herbst 2002 wurden die in Tabelle 1 ausgewiesenen Perioden festgelegt. Die Tatsache, dass die dritte Periode Anfang 2000 wesentlich mehr Beobachtungstage, aber weniger Stationen als alle anderen umfasst, ist darauf zurückzuführen, dass dieser Datensatz aus Kaniuth und Häfele (2002) übernommen und nicht erweitert wurde. Große Druckanomalien und -variationen traten vor allem in den Winter- und Frühjahrsperioden auf. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen für zwei der insgesamt 111 ausgewerteten Tage die Druckanomalien im Bereich des Netzes, die in diesem Fall aus den Druckfeldern von NCAR gegenüber 1013,25 hPa in Meereshöhe berechnet sind. Die Darstellungen belegen deutlich, dass in diesem Netz große relative Druckänderungen von bis zu 70 hPa vorkommen können. Tabelle 2 weist für jede beteiligte Station einige relevante Daten aus, nämlich die Zahl der verfügbaren

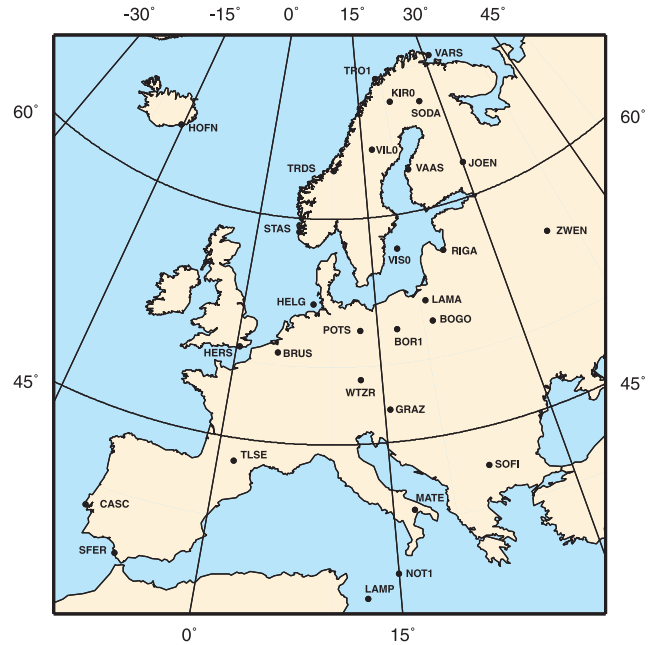


Abb. 1: Analyisiertes GPS-Netz

Tab. 1: Analyisierte Perioden, Anzahl der Tage und der beteiligten Stationen

Periode	Tage	Stationen
1999 15.03. – 23.03.	9	27
1999 24.11. – 01.12.	8	29
2000 23.01. – 23.02.	32	16
2000 24.09. – 04.10.	11	25
2001 06.02. – 18.02.	13	28
2001 30.09. – 10.10.	11	29
2002 22.02. – 01.03.	8	28
2002 19.03. – 26.03.	8	29
2002 01.09. – 11.09.	11	29

Beobachtungstage sowie die Extremwerte der Druckanomalien relativ zum Referenzdruck, auf den sich die in der Ausgleichung zu berechnenden mittleren Höhen beziehen werden. Da die Stationen hier von Nord nach Süd aufgelistet sind, ist die Abhängigkeit der Größe der Druckanomalien von der geografischen Breite offensichtlich.

## 3 Auswertung

Die Auswertung der GPS-Daten bis zur täglichen Netzausgleichung wurde mit der aktuellen Version 4.2 der Berner Software (Hugentobler et al. 2001) durchgeführt, die zweite Differenzen der Phasenmessungen ausgleicht. Da hierbei absolute Lageinformation verloren geht, wurde jeweils ein Punkt durch Einführung einer Pseudo-Beobachtung genähert auf seine Position im ITRF2000 bezogen (<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/ITRF2000>). Die Satellitenbahnen, die Offsets der Satellitenuhren gegen

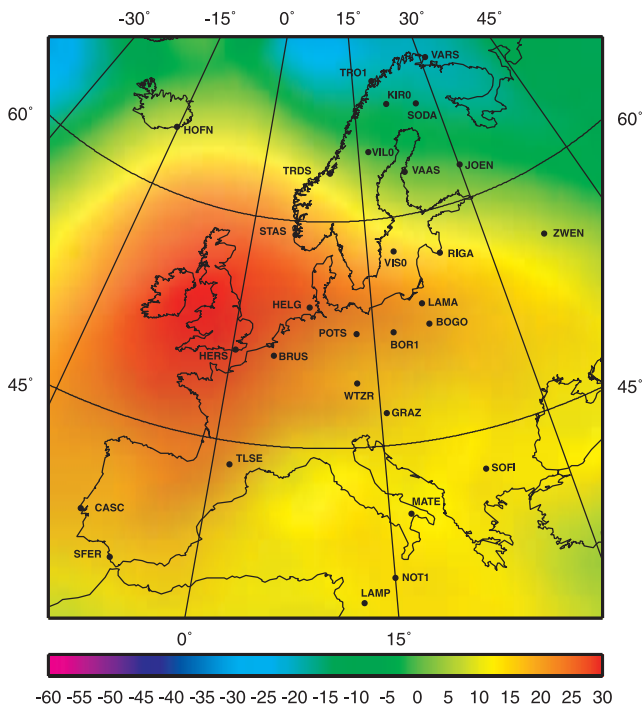


Abb. 2: Druckanomalien am 17.2.2001 [hPa]

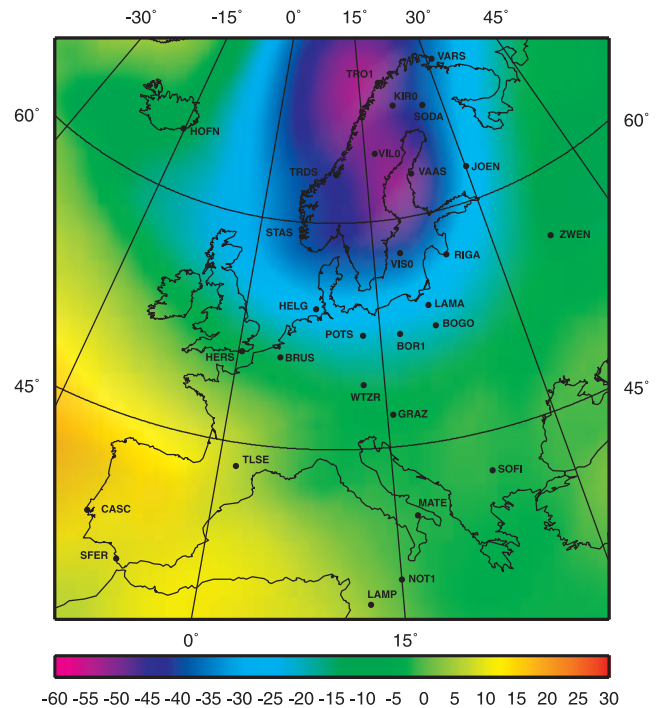


Abb. 3: Druckanomalien am 23.2.2002 [hPa]

Tab. 2: Analyisierte Stationen, Anzahl der Beobachtungstage, Referenzdruck  $P_0$  und größte Druckanomalien  $\Delta P_{\min}$ ,  $\Delta P_{\max}$  [hPa]

Station	Tage	$P_0$	$\Delta P_{\min}$	$\Delta P_{\max}$
VARs	63	992,5	- 44,4	19,2
TRO1	77	996,8	- 50,3	23,1
KIRO	111	955,1	- 51,1	24,7
SODA	107	977,9	- 45,8	23,0
VIL0	111	960,6	- 51,0	24,9
HOFN	78	1003,4	- 37,6	20,5
TRDS	64	975,8	- 48,6	23,2
VAAS	107	1006,3	- 48,9	23,1
JOEN	103	999,7	- 40,6	24,4
STAS	65	1000,7	- 42,3	22,6
VISO	111	1003,7	- 40,1	24,1
RIGA	109	1009,1	- 36,2	25,9
ZWEN	104	989,0	- 23,8	27,6
HELG	70	1007,5	- 31,2	30,9
LAMA	78	991,1	- 20,5	24,3
BOGO	79	995,5	- 14,6	27,9
POTS	79	992,6	- 12,8	30,8
BOR1	111	998,5	- 20,0	23,9
HERS	110	1004,1	- 15,5	34,0
BRUS	79	995,5	- 12,9	32,5
WTZR	79	936,1	- 7,8	29,1
GRAZ	110	950,5	- 6,7	26,0
TLSE	103	988,4	- 9,8	22,9
SOFI	58	886,3	- 10,1	23,7
MATE	79	950,8	- 11,8	23,3
CASC	100	1004,1	- 2,2	26,3
NOT1	94	998,2	- 9,8	18,3
SFER	98	1003,0	- 3,8	18,8
LAMP	93	1006,4	- 7,0	18,3

GPS-Zeit und die Erdorientierungsparameter wurden vom IGS übernommen. Die Charakteristika der Datenmodellierung, soweit sie für die Höhenbestimmung von Bedeutung sind, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Prädiktion der troposphärischen Laufzeitverzögerung nach dem Modell von Saastamoinen (1973) und der Abbildungsfunktion von Niell (1996); Schätzen restlicher Zenitverzögerungen für Intervalle von jeweils zwei Stunden;
- Keine Schätzung horizontaler Troposphärengradienten, da Ausgleichungen aller Datensätze mit Gradientenschätzung sogar zu einer geringfügigen Verschlechterung der täglichen Wiederholungsgenauigkeiten führten;
- Modellierung der Erdzeiten entsprechend den Standards des International Earth Rotation Service (IERS) (McCarthy 1996) und der Auflasteffekte der Ozeangezeiten nach dem Modell FES 95.2 (Le Provost et al. 1998);
- Minimaler Höhenwinkel in der Netzausgleichung 10°; keine elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen, um höchstmögliche Genauigkeit der Höhenbestimmung und Dekorrelation von Höhen und Troposphärenparametern zu erreichen.

Als Ergebnis der insgesamt 111 täglichen Netzausgleichungen von maximal 29 Stationen lagen damit Koordinatensätze (X, Y, Z) samt jeweils vollbesetzter Kovarianzmatrix COV (X, Y, Z) vor. Diese Lösungen wurden als korrelierte Beobachtungen in eine gemeinsame Ausgleichung eingeführt, in die außerdem die täglichen Druckanomalien  $\Delta P$  je Station eingebracht wurden, um nach vertikalen Auflastkoeffizienten lösen zu können.

Nach einer Transformation der X, Y, Z in ellipsoidische Höhen H wurde auf Differenzen  $\Delta H$  übergegangen, um kleine im mm-Bereich liegende Datumsdifferenzen zwischen den täglichen Lösungen zu eliminieren. Entsprechend wurde die Kovarianzmatrix der X, Y, Z in eine Kovarianzmatrix COV ( $\Delta H$ ) ellipsoidischer Höhenunterschiede transformiert, aus der durch Invertierung eine vollbesetzte Gewichtsmatrix W berechnet wird. In der Gesamtausgleichung wurde dann für folgende Parameter gelöst:

- Mittlere ellipsoidische Höhen  $H_0$ , die sich auf die Referenzepeche 2001.0 und auf den jeweiligen in Tabelle 2 angegebenen Referenzdruck  $P_0$  beziehen;
- Vertikale Auflastkoeffizienten  $\Delta H_p$  [mm/hPa] als Funktion der Druckanomalien  $\Delta P = P - P_0$ ;
- Lineare Höhenbewegungen VH, da sich die ausgewerteten Datensätze über mehr als drei Jahre verteilen und insbesondere der Nordteil des Netzes postglaziale Hebungen erfährt;
- Unstetigkeiten  $\Delta H_A$  der mittleren Höhe  $H_0$  aufgrund von Veränderungen der Antennenkonfiguration wie z.B. Austausch der Antenne selbst oder Modifikation der Montierung.

Die drei erst genannten Parametertypen mussten für alle 29 Stationen angesetzt werden, während Unbekannte des Typs  $\Delta H_A$  nur für drei Stationen gelöst werden mussten. In Noto (Stationsbezeichnung NOTO  $\rightarrow$  NOT1) und Toulouse (TOUL  $\rightarrow$  TLSE) sind die Antennenaufstellungen geändert worden. Auf der Station HOFN ist eine Trimble-Antenne des Typs TRM22020.00+GP mit konischem Radom durch eine Chokering-Antenne TRM29659.00 ohne Radom auf demselben Marker ersetzt worden. Während eine tatsächliche Höhenänderung wegen Änderung der Montierung durch eine neue Antennenhöhe erfasst wird, führen Konfigurationswechsel wie Aufbau oder Abbau

eines Radoms meist zu Unstetigkeiten in den Höhen-schätzungen von mehreren Zentimetern (Kaniuth und Stuber 2002, Kaniuth und Huber 2003). Für Noto liegt eine Zentrierungsmessung NOTO  $\rightarrow$  NOT1 vor, die mit einigen Millimetern Genauigkeit spezifiziert ist und mit entsprechendem Gewicht als Beobachtung in die Ausgleichung eingeführt wurde. Um auch für die beiden anderen Antennenwechsel zusätzliche lokale Informationen zu erhalten, wurden zusätzlich zu dem hier ausgewerteten Netz einzelne Basislinien GRAS (Grasse/Frankreich)  $\rightarrow$  TOUL/TLSE und REYK (Reykjavik/Island)  $\rightarrow$  HOFN jeweils etwa zehn Tage unmittelbar vor und nach dem Konfigurationswechsel ausgewertet. Die daraus resultierenden ellipsoidischen Höhenunterschiede zwischen TOUL und TLSE bzw. den beiden Antennenmontierungen in HOFN konnten ebenfalls als a priori Information in die Netzausgleichung eingeführt werden. Dies setzt lediglich voraus, dass Änderungen in den Umgebungseinflüssen, wie z.B. Mehrwegeeffekten, und tektonische Höhenbewegungen während des kurzen Zeitraums von etwa drei Wochen vernachlässigt werden können.

Die hier angesetzte Verbesserungsgleichung für einen gemessenen ellipsoidischen Höhenunterschied  $\Delta H^{ik}$  zwischen zwei Stationen i und k lautet dann unter Weglassung von Indizes für die Beobachtungsepeche:

$$H_0^i - H_0^k + \Delta P^i \cdot \Delta H_p^i - \Delta P^k \cdot \Delta H_p^k + (T - T_0) \cdot (VH^i - VH^k) + [\Delta H_A^i - \Delta H_A^k] = \Delta H^{ik} + v^{ik}$$

Das Normalgleichungssystem hat Rangdefekte, die durch Einführen von a-priori-Information oder Ansetzen von Bedingungsgleichungen beseitigt werden können. Dies können z.B. eine mittlere Höhe und lineare Höhenbewegung eines Punktes oder Summenbedingungen über mehrere Punkte sein. Der strukturelle Aufbau der Ausgleichung ist in Abbildung 4 dargestellt.

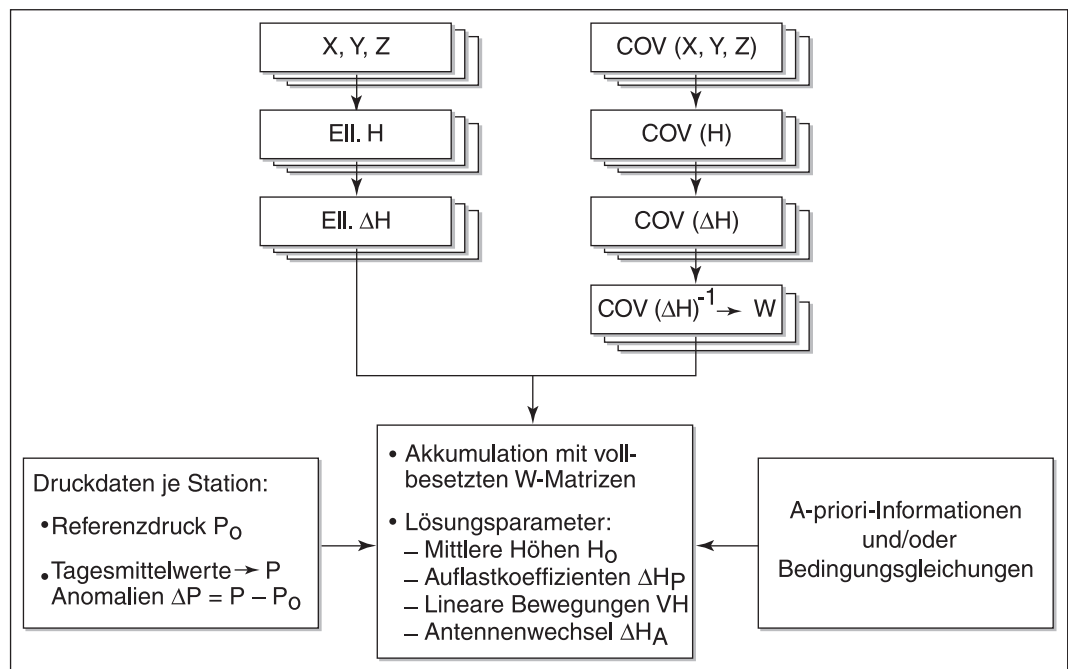


Abb. 4: Schematische Darstellung des Ausgleichungsprogramms zur Schätzung von Druckauflastkoeffizienten



#### 4 Ergebnisse

Die Rangdefekte des Normalgleichungssystems wurden nicht durch Fixieren von Höhe und Höhengeschwindigkeit einer einzelnen Station beseitigt, und zwar aus zweierlei Gründen: Erstens beziehen sich die Höhen im ITRF2000 nicht notwendigerweise auf den in dieser Arbeit festgelegten Referenzdruck, und zweitens würde das Festhalten einer Station deren individuellen Positions- und Geschwindigkeitsfehler voll auf das Netz übertragen. Beide Nachteile werden durch Auffelderung auf mehrere Stationen, d. h. Einführung einer Summenbedingung für deren Höhen und Höhengeschwindigkeiten, wesentlich gemildert, vorausgesetzt, die ausgewählten Stationen sind mit hoher Genauigkeit gegeben. Es wurden deshalb folgende Kriterien für die Auswahl herangezogen:

- Kleine Standardabweichungen im ITRF2000, nämlich etwa 3 mm für die Höhe zur Bezugsepoche 1997.0 und etwa 0,3 mm/a für die Höhengeschwindigkeit;
- Grundlage der ITRF-Koordinaten nicht allein GPS, sondern mindestens ein weiteres unabhängiges Raumbeobachtungsverfahren wie Satellite Laser Ranging (SLR) und Very Long Baseline Interferometry (VLBI).

Diese Kriterien werden von den sechs Stationen GRAZ, HERS, MATE, NOT1, POTS und WTZR erfüllt, durch deren Höhen und Höhengeschwindigkeiten somit das Datum für unsere Netzausgleichung realisiert wurde. Die aus der gemeinsamen Ausgleichung aller Datensätze resultierenden Druckauflastkoeffizienten  $\Delta H_p$  sind für alle Stationen, bei denen der Schätzwert den zweifachen mittleren Fehler übersteigt, in Tabelle 3 ausgewiesen.

Tab. 3: Vertikale Druckauflastkoeffizienten  $\Delta H_p$  und mittlere Fehler [mm/hPa]

Station	$\Delta H_p$	Station	$\Delta H_p$
VARS	- 0,21 ± 0,10	RIGA	- 0,41 ± 0,10
TRO1	- 0,36 ± 0,08	ZWEN	- 0,28 ± 0,10
KIRØ	- 0,33 ± 0,06	LAMA	- 0,40 ± 0,12
SODA	- 0,45 ± 0,07	BOGO	- 0,39 ± 0,10
VILØ	- 0,43 ± 0,06	POTS	- 0,35 ± 0,10
TRDS	- 0,45 ± 0,07	BOR1	- 0,35 ± 0,10
VAAS	- 0,54 ± 0,06	WTZR	- 0,34 ± 0,11
JOEN	- 0,43 ± 0,06	GRAZ	- 0,36 ± 0,12
STAS	- 0,26 ± 0,07	TLSE	- 0,65 ± 0,13
VISØ	- 0,23 ± 0,06	SFER	- 0,56 ± 0,20

Demnach ergaben sich für nahezu ein Drittel des Netzes keine ausreichend gesicherten  $\Delta H_p$ . Die Ausgleichungsergebnisse für diese Stationen können zusammenfassend folgendermaßen interpretiert werden:

- Hauptsächlich im Südteil des Netzes sind die Amplituden der Druckanomalien nicht groß genug, um Auflasteffekte deutlich nachzuweisen; dies wird auch durch höhere Korrelationen zwischen geschätzter mittlerer Höhe  $H_0$  und  $\Delta H_p$  belegt. Vereinzelt scheint

auch der Datenumfang noch nicht ganz ausreichend zu sein.

- Einige Stationen in Insel- oder Küstenlage zeigen keine deutlichen vertikalen Auflasteffekte, obgleich sie teils großen Druckanomalien ausgesetzt sind: Markante Beispiele hierfür sind HELG und HOFN. Dieses Ergebnis unterstützt die Hypothese, dass der Ozean als inverses Barometer reagiert: Atmosphärische Druckänderungen werden durch Bewegung der Ozeanmassen kompensiert, so dass keine Druckauflast auf den Meeresboden übertragen wird.

Es sei darauf hingewiesen, dass sich auch für zwei in Tabelle 3 enthaltene küstennahe Stationen, nämlich STAS und VISØ, merklich kleinere Auflastkoeffizienten ergaben als für Inlandstationen. Ein Beispiel für die vor allem in hohen Breiten vorkommenden Höhenänderungen durch atmosphärische Druckvariationen ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Grafik zeigt für die Station VAAS die aus den Ausgleichungsergebnissen für die mittlere Höhe  $H_0$ , die lineare Höhengeschwindigkeit  $VH$  und den Druckkoeffizienten  $\Delta H_p$  sowie den täglichen Druckanomalien berechnete ellipsoidische Höhe zwischen dem 23.1.2000 und 23.2.2000; die gesamte Druckänderung während dieses Zeitraums betrug 62 hPa.

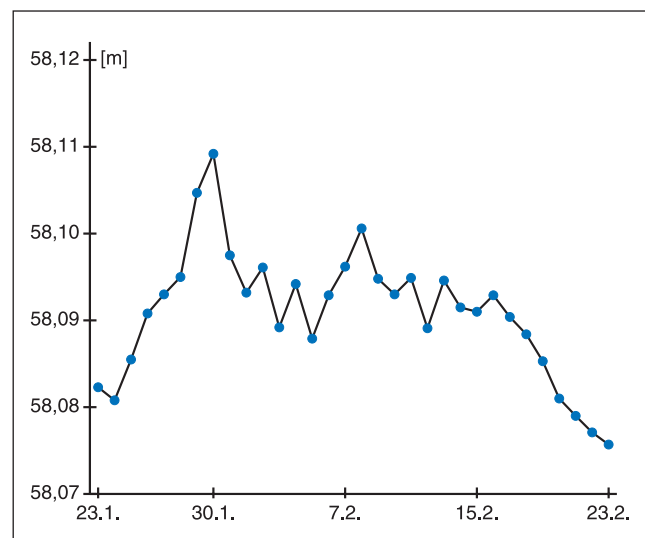


Abb. 5: Höhenänderungen der Station VAAS aufgrund von Druckvariationen im Zeitraum 23.1.–23.2.2000

Die Höhengeschwindigkeiten aller Stationen ergaben sich mit Koeffizienten  $< 0,2$  nahezu unkorreliert von den Auflastkoeffizienten  $\Delta H_p$ . Dies kann auch als Anzeichen dafür gewertet werden, dass die Ergebnisse nicht durch säkulare Luftdruckänderungen verfälscht sein können. Die vertikalen Bewegungen der Stationen in Mittel- und Südeuropa sind sehr klein; im Gegensatz dazu unterliegt Skandinavien postglazialer Landhebung (Milne et al. 2001). Ein Vergleich der hier erhaltenen Höhengeschwindigkeiten in Fennoskandia mit dem ITRF2000 macht wenig Sinn, da viele Stationen in dieser Region im ITRF noch nicht gut bestimmt sind. Unsere Ergebnisse werden

deshalb in Tabelle 4 den aus Milne et al. (2001) entnehmbaren gegenübergestellt. Diese Arbeit basiert auf einem geophysikalischen Modell, das durch GPS-Ergebnisse gestützt wurde; die in der Tabelle angegebenen Werte sind grobe Interpolationen aus einer grafischen Darstellung. Angesichts der Fehlermaße ist die Übereinstimmung überwiegend gut.

Tab. 4: Höhenbewegungen in Fennoskandia und Vergleichswerte aus einem Modell von Milne et al. (2001) [mm/a]

Station	diese Arbeit	Milne
VARS	6,3 ± 1,6	5
TRO1	2,2 ± 1,5	2
KIRØ	9,3 ± 1,3	8
SODA	4,1 ± 1,3	9
VILØ	10,1 ± 1,4	9
TRDS	7,1 ± 1,2	5
VAAS	10,6 ± 1,2	11
JOEN	7,1 ± 1,2	7
VISØ	3,4 ± 1,0	3

## 5 Schluss

Die Ergebnisse belegen, dass es möglich ist, in GPS-Messungen die durch atmosphärische Druckauflasten verursachten Höhenänderungen nachzuweisen. Einige der in dieser Arbeit ausgewerteten Datensätze sind unter dem Gesichtspunkt hoher Druckanomalien ausgewählt worden. Diese Perioden konzentrieren sich auf die Wintermonate November bis März. Während dieser Zeit könnten GPS-Antennen mit Schnee bedeckt gewesen sein, was zu Verfälschungen der Höhenschätzwerte führen kann (Jaldehyg et al. 1996). Ein weiterer Effekt, der bisher nicht modelliert wird, sind Auflaständerungen aufgrund von Wasserstandsänderungen (van Dam et al. 2001), die allerdings sehr großräumig und langperiodisch sind und deshalb die vorliegenden Ergebnisse nicht beeinträchtigen dürften. Abgesehen von lokalen Messungen auf einigen Stationen basierten die verwendeten Druckdaten auf Tagesmittelwerten für ein  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ -Gitter. Deshalb ist eine Weiterführung der Untersuchungen mit zeitlich und räumlich höherer Auflösung der Druckdaten vorgesehen. Es ist zudem beabsichtigt, das GPS-Netz zu erweitern und vertikale Auflastkoeffizienten als neuen Parametertyp in die GPS-Software aufzunehmen.

## Dank

Die in dieser Arbeit ausgewerteten GPS-Messungen sowie Produkte des IGS standen in Datenzentren des IGS zur Verfügung. Das Finnische Geodätische Institut stellte meteorologische Daten für drei Permanentstationen bereit.

## Literatur

- Haas, R.: Untersuchungen zu Erddeformationsmodellen für die Auswertung von geodätischen VLBI-Messungen. Deutsche Geodätische Kommission C466, 1996.
- Haas, R., Scherneck, H.-G., Schuh, H.: Atmospheric loading corrections in geodetic VLBI and determination of atmospheric loading coefficients. Proc. 12th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Statens Kartverk, Hønefoss, Norwegen, S. 122–132, 1997.
- Häfele, P., Kaniuth, K.: Analysis of time series of GPS height estimates with regard to atmospheric pressure loading. Vertical Reference Systems, IAG Symposia 124, S. 97–100, Springer, 2002.
- Hugentobler, U., Schaer, S., Fridez, P. (Eds.): Bernese GPS software version 4.2. Astron. Inst. Universität Bern, 2001.
- Jaldehyg, R.T.K., Johansson, J.M., Davis, J.L., Elósegui, P.: Geodesy using the Swedish permanent GPS network: Effects of snow accumulation on estimates of site position. Geophys. Res. Lett. 23, S. 1601–1604, 1996.
- Johansson, J.M.: GPS antenna and site effects. Advances in Positioning and Reference Frames, IAG Symposia 118, S. 229–236, Springer, 1998.
- Kaniuth, K., Häfele, P.: Effects of atmospheric pressure loading on the EUREF network. Mitt. des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie 23, S. 100–104, 2002.
- Kaniuth, K., Huber, S.: An assessment of radome effects on height estimates in the EUREF network. Proc. EUREF Symposium 2002, Mitt. des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (im Druck), 2003.
- Kaniuth, K., Stuber, K.: The impact of antenna radomes on height estimates in regional GPS networks. Vertical Reference Systems, IAG Symposia 124, S. 101–106, 2002.
- Le Provost, C., Lyard, F., Molines, J.M., Genco, M.L., Rabilloud, F.: A hydrodynamic ocean tide model improved by assimilating a satellite altimeter-derived data set. J. Geophys. Res. 103, S. 5513–5529, 1998.
- MacMillan, D.S., Gipson, J.M.: Atmospheric pressure loading parameters from Very Long Baseline Interferometry observations. J. Geophys. Res. 99, S. 18081–18087, 1994.
- McCarthy, D.D. (Ed.): IERS conventions 1996. IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris, 1996.
- Milne, G.A., Davis, J.L., Mitrovica, J.X., Scherneck, H.-G., Johansson, J.M., Vermeer, M., Koivula, H.: Space-geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Fennoscandia. Science 291, S. 2381–2385, 2001.
- Niell, A.E.: Global mapping functions for the atmospheric delay at radio wavelengths. J. Geophys. Res. 101 (B2), S. 3227–3246, 1996.
- Rothacher, M.: Estimation of station heights with GPS. Vertical Reference Systems, IAG Symposia 124, S. 81–90, 2002.
- Saastamoinen, J.: Contribution to the theory of atmospheric refraction, part II: Refraction corrections in satellite geodesy. Bull. Geod. 107, S. 13–34, 1973.
- Sun, H.-P., Ducarme, B., Dehant, V.: Effect of the atmospheric pressure on surface displacements. J. Geod. 70, S. 131–139, 1995.
- van Dam, T.M., Blewitt, G., Heflin, M.B.: Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations. J. Geophys. Res. 99, S. 23939–23950, 1994.
- van Dam, T.M., Herring, T.A.: Detection of atmospheric pressure loading using Very Long Baseline Interferometry measurements. J. Geophys. Res. 99, S. 4505–4517, 1994.
- van Dam, T., Wahr, J., Milly, P.C.D., Smakin, A.B., Blewitt, G., Laval-lée, D., Larson, K.M.: Crustal displacement due to continental water loading. Geophys. Res. Lett. 28, S. 651–654, 2001.

## Anschrift der Autoren

Klaus Kaniuth  
Sandra Huber  
Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)  
Marshallplatz 8  
D-80539 München  
mailer@dgfi.badw.de