

---

## ÜBER DIE EINMESSUNG VON GRAVIMETERSTATIONEN MIT GPS

H. Lichtenegger, G. Kraiger

TU Graz

---

### Kurzfassung

Die Arbeit berichtet über eine Machbarkeitsstudie zum Einsatz von GPS für die relative Positionierung bei gravimetrischen Aufnahmen im Gebirge. Dabei wird vorausgesetzt, daß bis zu 15 km lange Basislinien innerhalb einer Beobachtungssession von maximal einer halben Stunde mit einer Höhengenaugkeit von  $\pm 10$  cm bestimmbar sind. In einem praktischen Test wurde eine solche Basislinie nach verschiedenen Kriterien ausgewertet. Als Ergebnis folgt, daß bei gewissenhafter Beobachtungsplanung die geforderte Genauigkeit bei Beobachtungszeiten zwischen 15 und 30 Minuten mit Einfrequenzempfängern erreicht wird. GPS stellt also auch in diesem Anwendungsgebiet eine äußerst wirtschaftliche Alternative zur klassischen Vermessungsmethodik dar.

### Abstract

The paper reports on a feasibility study for relative positioning by GPS in the context of gravimetric surveys in mountainous areas. Thereby, a height accuracy of  $\pm 10$  cm for baselines up to 15 km and for sessions lasting less than half an hour is required. In a practical test such a baseline was processed by applying different strategies. The results show that under realistic conditions the demanded accuracy is achieved with single frequency receivers within 15–30 minutes. Thus, GPS is a very economic alternative to traditional surveying methods also in such applications.

### 1. Problemstellung

Bekanntlich sind gemessene Schwerewerte wie alle geophysikalischen Meßgrößen vom jeweiligen Meßort abhängig. Die relativen Koordinatenunterschiede zwischen den Meßorten stellen daher Eingangsparemeter für die Korrektur der rohen Meßwerte dar. Die Koordinaten werden aber auch benötigt, um das Ergebnis der Aufnahmen in Karten und Plänen darzustellen oder in ortsbezogenen Datenbanken abzuspeichern, siehe etwa (Hofmann-Wellenhof und Lichtenegger, 1990).

Die Bestimmung geodätischer Koordinaten stellte in der Vergangenheit häufig ein nicht unerhebliches Problem dar. Dies gilt vor allem für gravimetrische Aufnahmen in topographisch schwierigem Gelände oder in Gegenden ohne ausreichende geodätische Unterlagen. Es liegt daher nahe, diese Schwierigkeiten durch den Einsatz von GPS zu umgehen. Dabei wird vorausgesetzt, daß Basislinien bis zu 15 km bei Beobachtungszeiten von maximal 30 Minuten mit einer Höhengenaugkeit von  $\pm 10$  cm bestimmt werden können.

In der vorliegenden Arbeit werden vorerst allgemein jene technischen und wirtschaftlichen Fragen behandelt, welche für die geplanten GPS Messungen im Hochgebirgsbereich relevant sind. Berücksichtigt wird dabei auch, daß für die Messungen eine Unterstützung durch den Einsatz von Hubschraubern vorgesehen ist. Bezüglich Details wird allerdings auf die Literatur, etwa (Hofmann-Wellenhof et al., 1992), verwiesen. Das Schwergewicht der Arbeit liegt in der Diskussion der Ergebnisse einer Testmessung. Diese lassen eine Reihe von quantitativen Aussagen zu.

## 2. Technische Aspekte

### 2.1 Instrumentarium

Für die vorausgesetzte (Höhen-) Genauigkeit von  $\pm 10$  cm kommen nur Empfänger in Betracht, welche die Trägerwellenphase messen. Allerdings genügen Einfrequenzgeräte, da die ionosphärische Refraktion auch ohne Verwendung einer zweiten Trägerfrequenz ausreichend genau modelliert werden kann. Weiters spricht für Einfrequenzempfänger, daß auch mit diesen die Phasenambiguitäten in den angenommenen Beobachtungsintervallen genügend genau bestimmt werden können.

Der Vollständigkeit halber wird noch erwähnt, daß genauigkeitsmindernde Faktoren wie "Selective Availability" und "Anti-Spoofing" unter den gegebenen Voraussetzungen nicht beachtet werden müssen.

### 2.2 Beobachtung

*Methodik.* Für die Einmessung der Gravimeterpunkte kommt das relative statische Verfahren in Betracht. Die Referenzstation wird hierzu an leicht zugänglichen (Tal-) Punkten eingerichtet. Während der GPS Messungen erfolgen die Ablesungen am Gravimeter sowie die Einmessung der Nahzone für die topographische Reduktion. Denkbar ist, auch diese Einmessung mit GPS im kinematischen Modus auszuführen. In einem solchen Fall wird der Gravimeterpunkt nur zu Beginn und am Ende des Beobachtungszeitraumes jeweils für etwa fünf Minuten besetzt und in der Zwischenzeit die Nahzoneneinmessung durchgeführt.

*Planung.* Besondere Bedeutung bei GPS Messungen in topographisch schwierigem Gelände kommt der Planung zu. Vor allem ist der Verlauf des natürlichen Horizonts für die geplanten Gravimeterpunkte entweder aus Karten oder in kritischen Fällen durch eine Begehung zu erfassen, um Abschattungen der Satellitensignale berücksichtigen zu können. Die Wahl der Zeiträume für Beobachtung und Stationswechsel erfolgt mit Hilfe von Sichtbarkeitsdiagrammen. Zu den Beobachtungszeiten sollten mindestens vier Satelliten sichtbar sein und der die Geometrie der Satellitenkonstellation beschreibende PDOP-Faktor unter 5 liegen.

*Durchführung.* Für die Durchführung der Beobachtungen sind die üblichen Regeln zu beachten. Bedeutsam ist die Ausschaltung von Signalreflexionen etwa durch Parken des Hubschraubers in einer Entfernung von mindestens 20 m von der Antenne. Für die Datenaufzeichnung wird eine Meßrate von 20 Sekunden empfohlen. Zur Erfassung der Meteorologie sind Messungen der Feucht- und Trockentemperatur sowie des Luftdruckes vorzusehen. Die Führung eines Feldbuches kann für die Auswertung hilfreich sein und sollte deshalb routinemäßig erfolgen.

### 2.3 Auswertung

*Datentransfer.* Die Speicherkapazität der Empfänger erfordert im allgemeinen eine tägliche Übertragung der Daten auf Disketten. Hierzu wird ein Laptop mit RS-232 Schnittstelle benötigt. Um ein etwaiges Fehlverhalten der Empfänger zu erkennen, sollte man an den Datentransfer eine Grobkontrolle der Daten anschließen. Dies kann automatisiert und daher ohne besondere Vorkenntnisse des Operators erfolgen.

*Basislinienauswertung.* Die Auswertung der Basislinien ist von der verwendeten Software abhängig und soll daher hier nicht weiter verfolgt werden. Im folgenden wird angenommen, daß als Ergebnis der Auswertung die Komponenten des Basislinienvektors im GPS Referenzsystem vorliegen.

*Transformationen.* Das GPS Referenzsystem ist identisch dem Geodätischen Weltsystem WGS-84 und stellt ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem mit geozentrischem Ursprung und Orientierung der Achsen im erdfesten Äquatorsystem dar. Die Koordinaten in diesem System werden mit  $(X, Y, Z)$  bezeichnet. Um daraus die Koordinaten  $(X, Y, Z)_T$  im System der Österreichischen Landesvermessung, das heißt bezogen auf das nationale Datum MGI, zu erhalten, ist eine Datumstransformation durchzuführen. Diese wird durch die räumliche Drehstreckung

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_T = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} + (1 + dm) \begin{bmatrix} 1 & \alpha_3 & -\alpha_2 \\ -\alpha_3 & 1 & \alpha_1 \\ \alpha_2 & -\alpha_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

beschrieben, wobei mit  $c_i$  die Komponenten des Verschiebungsvektors, mit  $\alpha_i$  differentielle Drehungen um die Koordinatenachsen und mit  $(1 + dm)$  der Maßstabsfaktor bezeichnet sind. Bei Datumstransformationen über das gesamte Bundesgebiet können für die Parameter die numerischen Werte der Tab. 1 eingesetzt werden.

|                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| $c_1 = -586 \pm 3 \text{ m}$    | $\alpha_1 = 5.1'' \pm 0.1''$ |
| $c_2 = -89 \pm 3 \text{ m}$     | $\alpha_2 = 1.4'' \pm 0.1''$ |
| $c_3 = -468 \pm 3 \text{ m}$    | $\alpha_3 = 5.4'' \pm 0.1''$ |
| $dm = -1.1 \pm 0.3 \text{ ppm}$ |                              |

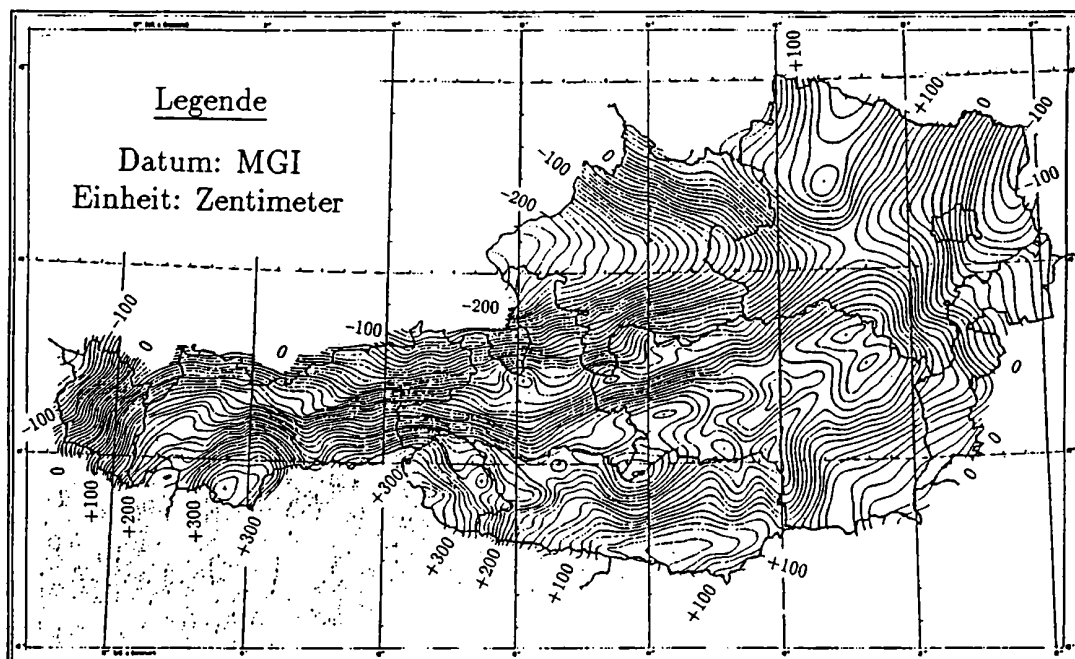
Tabelle 1: Parameter für die Transformation WGS-84  $\Rightarrow$  MGI

Zur Kontrolle der Datumstransformation sollten im Meßgebiet außer dem Referenzpunkt noch zwei weitere leicht zugängliche Punkte mit bekannten Gebrauchskoordinaten und -höhen beobachtet werden. Da diese Beobachtungen auch in Schlechtwetterperioden ausgeführt werden können, beeinträchtigen sie nicht den Fortschritt der Gravimetermessungen.

Die Transformation der kartesischen Koordinaten  $(X, Y, Z)$  in die ellipsoidischen Koordinaten  $(\varphi, \lambda, h)$  und weiter in die Gebrauchskoordinaten  $(x, y)$  bzw.  $H$  wird mit bekannten Beziehungen durchgeführt, siehe etwa (Lichtenegger, 1993). Diese können symbolisch in der Form

$$\begin{aligned} (X, Y, Z) &\iff (\varphi, \lambda, h) \\ (\varphi, \lambda) &\iff (x, y) \\ h &\iff H \end{aligned}$$

angeschrieben werden. Zur Transformation der ellipsoidischen Höhe  $h$  in die Gebrauchshöhe  $H$  wird die Geoidundulation  $N$  benötigt. Diese ist für das österreichische Geoid mit einer Genauigkeit von etwa 5 cm auf 100 km bekannt, vgl. (Sünkel et al., 1987). Die Undulationen können berechnet oder auch aus Karten wie zum Beispiel in Fig. 1 entnommen werden.



Figur 1: Das Geoid von Österreich nach (Sünkel et al., 1987)

### 3. Wirtschaftliche Aspekte

#### 3.1 Zeitfaktor

GPS ist zeit- sowie wetterunabhängig und benötigt keine Sichtverbindung zwischen den Punkten. Daraus folgt eine Reduktion des Zeitfaktors für die Beobachtungen. Dies gilt auch im Fall von Hubschraubereinsätzen, obwohl diese im Gebirge ohnehin nur bei Tag und bei Schönwetter möglich sind. Der Grund liegt darin, daß bei den Einmessungen nach klassischen Methoden von Festpunkten der Landesvermessung ausgegangen wird, welche im allgemeinen in extremen Gebirgslagen situiert sind. Und gerade in diesen Lagen treten häufig Nebel oder Turbulenzen auf, die einen Hubschraubereinsatz auch bei allgemeiner Schönwetterlage dort nicht zulassen. Weiters erschweren lokale Nebelbildungen im Bereich der Anschlußpunkte deren Anzielung und damit die Orientierung der Einmessung.

Auch bezüglich des Zeitaufwandes für die Auswertung ist GPS den klassischen Verfahren überlegen, benötigt doch eine Basislinienauswertung einschließlich der Transformationen nur etwa 10 Minuten.

### 3.2 Genauigkeitsfaktor

Bezüglich der Genauigkeit ist zu bemerken, daß Festpunkte der Landesvermessung im Gebirgsbereich höhenmäßig nur trigonometrisch eingemessen sind. Die realistische Nachbarschaftsgenauigkeit liegt daher im Bereich von etwa  $\pm 20$  cm und damit unter der angestrebten Genauigkeit. Die GPS Messungen hingegen stützen sich auf nur einen Referenzpunkt, der wegen seiner Tallage meist noch Nivellementanschluß besitzt und damit die Ableitung orthometrischer Höhen erlaubt. Ein weiterer Vorteil liegt darin, daß GPS Ergebnisse bei Vorliegen eines vernünftigen PDOP-Faktors und bei mehr als vier beobachteten Satelliten eine zum Vergleich mit terrestrischen Einmessungen höhere Zuverlässigkeit aufweisen.

### 3.3 Kostenfaktor

Hinsichtlich der Kosten muß zwischen Investitionskosten und Betriebskosten unterschieden werden.

Derzeit werden geeignete Einfrequenzempfänger einschließlich Software um etwa 150 000.- Schilling pro Stück angeboten. Damit entspricht der Preis für die mindestens zwei erforderlichen Empfänger in etwa jenem für eine geodätische Totalstation zur kombinierten Richtungs- und Streckenmessung. Für kurzzeitige Anwendungen ist auch eine Ausleihe in Betracht zu ziehen. Neben kommerziellen Firmen bieten sich hierzu kostengünstig auch universitäre Institutionen an.

Die Betriebskosten von GPS sind gegenüber jenen bei der klassischen Einmessung wesentlich geringer. Dies resultiert aus der Einsparung an Personal und aus einer geringeren Qualifikationsanforderung. Der Empfänger an der Referenzstation benötigt Betreuung überhaupt nur zu Kontrollzwecken. Diese könnte ohne zusätzlichen Personalaufwand auch durch den Leiter des Meßtrupps erfolgen, welcher auch für die Kontrolle und Sicherung der Meßdaten zuständig sein sollte.

## 4. Testmessung

### 4.1 Testanordnung

Um auch quantitative Aussagen bezüglich eines GPS Einsatzes zu erhalten, wurde im Bereich von Graz eine etwa 15 km lange Basislinie ausgewählt. Die beiden Endpunkte der Basislinie, nämlich der Pfeiler 5 auf dem Dach des Geodäsiegebäudes und der KT-Stein 192-190 sind bekannt, ihre Gebrauchskoordinaten  $(x, y)$  im Meridianstreifen-system M34, ihre Gebrauchshöhen  $H$  und ihre Undulationen  $N$  sind in der Tab. 2 aufgelistet. Letztere wurden von H. Sünkel berechnet und zur Verfügung gestellt, vergleiche hierzu auch Fig. 1.

| Punkt      | x [m]        | y [m]      | H [m]  | N [m] |
|------------|--------------|------------|--------|-------|
| Pfeiler 5  | 5 214 277.68 | -66 769.36 | 378.13 | 0.61  |
| KT 192-190 | 5 199 789.62 | -71 857.14 | 317.18 | 0.38  |

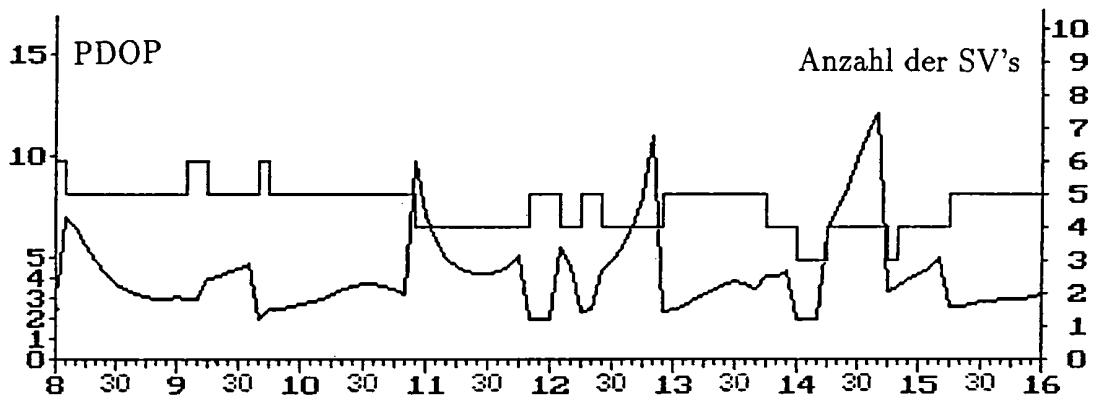
Tabelle 2: Gebrauchskoordinaten der Basislinienendpunkte

Mit Hilfe der Undulationen erhält man ellipsoidische Höhen  $h = H + N$ , welche für die Berechnung kartesischer Raumkoordinaten benötigt werden. Das mit den Parametern des Bessel-Ellipsoids erhaltene Ergebnis ist in Tab. 3 ausgewiesen.

| Punkt      | X [m]        | Y [m]        | Z [m]        |
|------------|--------------|--------------|--------------|
| Pfeiler 5  | 4 194 799.87 | 1 159 715.93 | 4 646 469.76 |
| KT 192-190 | 4 206 322.93 | 1 157 792.07 | 4 636 504.39 |

Tabelle 3: Kartesische Raumkoordinaten der Basislinienendpunkte bezogen auf MGI

Die Beobachtungen erfolgten am 6. April 1993 mit institutseigenen Ashtech P-12 Empfängern, wobei eine Datenaufzeichnungsrate von 15 Sekunden und eine untere Grenze von  $15^\circ$  für die Höhenwinkel gewählt wurden. Zur Gewinnung eines ausreichenden Testdatensatzes erfolgten die Beobachtungen über einen Zeitraum von 2.5 Stunden. Zur Wahl des Beobachtungsfensters diente das in Fig. 2 dargestellte Sichtbarkeits- und PDOP-Diagramm. Tatsächlich wurden die Beobachtungen zwischen 8:20 und 10:50 Ortszeit durchgeführt.



Figur 2: PDOP und Anzahl der Satelliten in Funktion der Ortszeit für Graz am 6. April 1993 bei einer Höhenmaske von  $15^\circ$

Aus der Fig. 2 kann abgelesen werden, daß der PDOP-Faktor während der Beobachtungen immer unter 5 lag. Durchgehend waren fünf, in kurzen Intervallen sogar sechs Satelliten sichtbar.

Die Auswertung der Beobachtungen erfolgte mit der Ashtech-Software GPPS nach verschiedenen Kriterien. Das Ergebnis wird nachfolgend diskutiert.

#### 4.2 Ergebnis

*Gesamtlösung.* Bei der Basislinienberechnung muß ein Punkt als Referenzpunkt vorgegeben werden. Um die Frage der hierfür notwendigen Genauigkeit zu klären, wurde der Pfeilerpunkt als Referenzpunkt gewählt und vorerst seine kartesischen Raumkoordinaten aus der GPS-Codelösung mit jenen verglichen, welche sich aus den MGI-Koordinaten nach Tab. 3 über eine Datumstransformation ergeben. Mit ausreichender Genauigkeit braucht dabei nur der Verschiebungsvektors nach Tab. 1 berücksichtigt zu werden. Das Ergebnis ist in Tab. 4 enthalten.

| Pfeiler 5             | X [m]     | Y [m]     | Z [m]     |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| MGI mit Translation   | 4 195 386 | 1 159 805 | 4 646 938 |
| WGS-84 aus Codelösung | 4 195 394 | 1 159 815 | 4 646 948 |

Tabelle 4: Vergleich kartesischer Raumkoordinaten

Aus dem Vergleich der kartesischen Raumkoordinaten folgt, daß diese absolut im System WGS-84 auf wenige Meter bestimmbar sind. Im nächsten Schritt wurden die Koordinaten des Referenzpunktes systematisch der Lage und Höhe nach um 150 m geändert und die Wirkungen auf den Basislinienvektor berechnet. Diese sind in Tab. 5 in Form von lokalen Lageverschiebungen ( $dx, dy$ ) und Höhenänderungen  $dh$  dargestellt. Aus der Tabelle kann abgelesen werden, daß die oben angegebene Absolutgenauigkeit von wenigen Metern für den gegenständlichen Fall bei weitem ausreicht.

| 150 m - Änderung | dx [m] | dy [m] | dh [m] |
|------------------|--------|--------|--------|
| Breite           | -0.02  | +0.00  | -0.05  |
| Länge            | +0.01  | +0.00  | -0.02  |
| Höhe             | +0.06  | +0.02  | +0.00  |

Tabelle 5: Auswirkung von Änderungen in den Koordinaten des Referenzpunktes

Von besonderem Interesse ist die Abhängigkeit des Basisvektors vom Datum. Dabei ist zu beachten, daß bei Anwendung der räumlichen Drehstreckung auf den Basisvektor wegen der Differenzbildung zwischen End- und Anfangspunkt der Einfluß des Verschiebungsvektors eliminiert wird und nur die Auswirkungen der Drehungen und des Maßstabsfaktors zu berücksichtigen sind. Eine grobe Abschätzung ergibt mit den Werten in Tab. 1 für eine 15 km Basislinie Änderungen in der Größenordnung von 0.5 m, welche sich hauptsächlich auf die Lage auswirken. Dies beruht darauf, daß in Österreich das Höhendatum im Vergleich zum Lagedatum wesentlich besser bestimmt ist. In der Tab. 6 sind die tatsächlichen Abweichungen der mit dem rohen bzw. transformierten Basisvektor berechneten Koordinaten des Basisendpunktes bezüglich der vorgegebenen Koordinaten im Gebrauchssystem dargestellt. Daraus geht hervor, daß für die geforderten Genauigkeiten eine Datumstransformation des Basisvektors eigentlich nicht erforderlich ist. Im Fall des transformierten Basisvektors sind in den Abweichungen neben der Unsicherheit in den (österreichweit bestimmten) Transformationsparametern auch die Spannungen im Gebrauchsnetz enthalten. Die relativen Unsicherheiten in den Undulationen dürften in diesem Bereich  $\pm 1-2$  cm nicht übersteigen, so daß die geforderte Höhengenaugigkeit erreicht wurde. Trotzdem wird, wie bereits im Abschnitt 2.3 erwähnt, die Bestimmung der jeweiligen lokalen Transformationsparameter für Kontrollzwecke empfohlen.

| Basisvektor     | dx [m] | dy [m] | dh [m] |
|-----------------|--------|--------|--------|
| untransformiert | -0.30  | +0.39  | -0.07  |
| transformiert   | -0.11  | -0.14  | -0.06  |

Tabelle 6: Abweichungen der GPS-Lösungen gegen die Gebrauchskoordinaten

Um den Einfluß der ionosphärischen Refraktion zu testen, wurde die Gesamtlösung mit Hilfe der aus Zweifrequenz-Beobachtungen ableitbaren ionosphärenfreien Phasenkombination mit jener unter Verwendung nur einer Trägerwellenphase verglichen. Mit dem Ergebnis in Tab. 7 wird nachgewiesen, daß für die angestrebte Genauigkeit Einfrequenzempfänger genügen.

| dx [m] | dy [m] | dh [m] |
|--------|--------|--------|
| +0.05  | -0.01  | -0.01  |

Tabelle 7: Abweichung der Einfrequenz-Lösung von der ionosphärenfreien Lösung

Schließlich wurde noch die Abhängigkeit der Lösung von meteorologischen Daten untersucht, indem an einem Punkt Druck und Temperatur systematisch verfälscht wurden. Das Ergebnis ist in Tab. 8 dargestellt. Es zeigt sich wiederum die bekannte Tatsache, daß sich die troposphärische Refraktion vorwiegend auf die Höhenkomponente auswirkt. Daraus folgt aber, daß bei den Beobachtungen die aktuellen meteorologischen Parameter in Form der Trocken- und Feuchttemperatur sowie des Luftdruckes zu erfassen sind. Dies ist besonders dann wichtig, wenn die beiden Basispunkte in verschiedenen Höhenlagen situiert sind.

| Änderung     | dx [m] | dy [m] | dh [m] |
|--------------|--------|--------|--------|
| dT = 20°C    | +0.00  | +0.00  | -0.04  |
| dp = 20 mbar | +0.01  | +0.00  | -0.11  |

Tabelle 8: Auswirkung von Änderungen meteorologischer Parameter

*Teillösungen.* Die folgenden Untersuchungen dienen der Klärung der Frage nach den minimal notwendigen Beobachtungszeiten. Hierfür wurde der vorhandene und sich über 2.5 Stunden erstreckende Datensatz vorerst in sich überlappende einstündige bzw. unabhängige halbstündige Teilintervalle zerlegt. Die Auswertung der (Einfrequenz-) Beobachtungsdaten für jedes dieser Intervalle ergab Teillösungen, deren Abweichungen von der Gesamtlösung in Tab. 9 aufgelistet sind. Es kann abgelesen werden, daß nur in der dritten Halbstundenlösung das Genauigkeitsziel in der Höhe nicht ganz erreicht wurde. Eine Erklärung hierfür wird später noch gegeben.

| Ortszeit [h:min] | dx [m] | dy [m] | dh [m] |
|------------------|--------|--------|--------|
| 08:20 - 09:20    | -0.10  | +0.18  | +0.03  |
| 08:50 - 09:50    | +0.01  | +0.00  | +0.01  |
| 09:20 - 10:20    | +0.00  | +0.01  | +0.01  |
| 09:50 - 10:50    | -0.02  | +0.01  | -0.03  |
| 08:20 - 08:50    | -0.01  | +0.00  | +0.01  |
| 08:50 - 09:20    | -0.08  | +0.30  | +0.02  |
| 09:20 - 09:50    | +0.02  | -0.04  | +0.14  |
| 09:50 - 10:20    | +0.02  | -0.16  | -0.10  |
| 10:20 - 10:50    | -0.02  | +0.01  | -0.08  |

Tabelle 9: Abweichungen von Teillösungen von der Gesamtlösung



Die Ursache für die geringeren Genauigkeiten bei reduzierten Beobachtungsintervallen liegt darin, daß die Phasenmehrdeutigkeiten nicht mehr in allen Fällen als Integergrößen bestimmt werden konnten. Um dies zu verdeutlichen, sind in Tab. 10 die einzelnen Ambiguitätenlösungen bezogen auf den Referenzsatelliten SV 27 aufgelistet. Jede Abweichung um eine Einheit von den Sollwerten verfälscht die aus der Phasemessung abgeleitete Pseudoentfernung um etwa 20 cm.

| Ortszeit [h:min] | SV 02 | SV 16 | SV 18 | SV 19 | SV 24 | SV 26 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 08:20 – 09:20    | 07.36 | 83.00 | 77.00 | 33.00 | 53.00 | —     |
| 08:50 – 09:50    | 08.00 | 84.00 | 78.00 | 33.00 | 52.00 | 59.00 |
| 09:20 – 10:20    | 08.00 | 84.00 | 78.00 | 33.00 | —     | 59.00 |
| 09:50 – 10:50    | 08.00 | 84.00 | —     | 33.00 | —     | 59.00 |
| 08:20 – 08:50    | —     | 84.00 | 78.00 | 33.00 | 52.00 | —     |
| 08:50 – 09:20    | 07.14 | 83.13 | 76.54 | 33.67 | 52.85 | —     |
| 09:20 – 09:50    | 08.46 | 84.04 | 78.76 | 32.70 | —     | 58.78 |
| 09:50 – 10:20    | 08.00 | 84.59 | —     | 32.66 | —     | 60.30 |
| 10:20 – 10:50    | 08.00 | 84.00 | —     | 33.00 | —     | 59.00 |

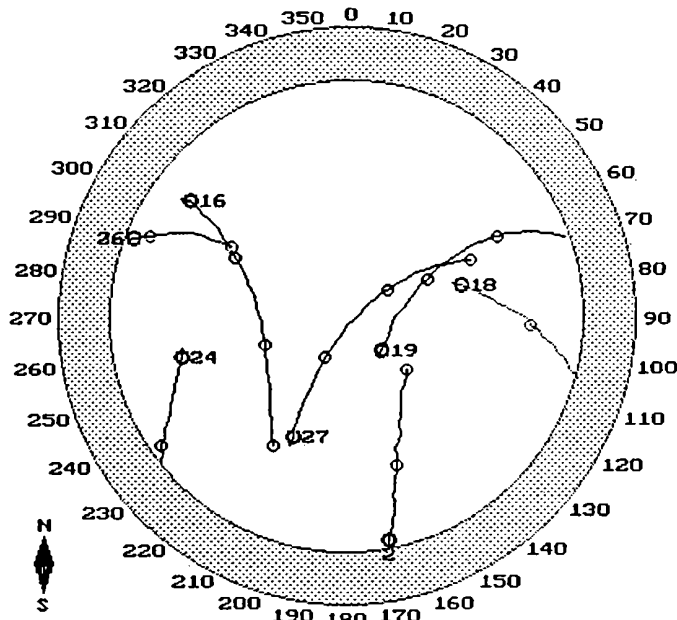
Tabelle 10: Phasenambiguitäten der Teillösungen bezogen auf SV 27

In einem weiteren Schritt wurden die Halbstundenintervalle nochmals unterteilt. Die Ergebnisse dieser 15-Minuten Lösungen sind zusammen mit den aus der Gesamtlösung resultierenden Sollwerten in der Tab. 11 enthalten, wobei  $b$  die (reduzierte) Basislänge und  $\Delta h$  den ellipsoidischen Höhenunterschied bedeuten. Die Ergebnisse genügen im allgemeinen der Genauigkeitsanforderung. Nur im Beobachtungsintervall 09:20–09:35 tritt eine Abweichung vom Sollhöhenunterschied auf, welche mit 18 cm deutlich über dem angestrebten Wert liegt. Eine Erklärung hierfür kann wiederum aus den Ambiguitäten gefunden werden. Im kritischen Beobachtungsintervall weichen diese nämlich bis etwa 4(!) Einheiten von den Sollwerten ab. Wie später noch gezeigt wird, ist vor allem die Abweichung in der Ambiguität für den Satelliten SV 16 kritisch.

| Ortszeit [h:min] | b [m] | $\Delta h$ [m] | Ambiguitäten |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |       |                | SV 02        | SV 16 | SV 18 | SV 19 | SV 24 | SV 26 |
| 08:20 – 10:50    | 5.60  | 61.12          | 08.0         | 84.0  | 78.0  | 33.0  | 52.0  | 59.0  |
| 08:20 – 08:35    | 5.55  | 61.09          | —            | 83.6  | 77.1  | 33.5  | 52.6  | —     |
| 08:35 – 08:50    | 5.61  | 61.10          | —            | 84.2  | 78.2  | 32.9  | 51.9  | —     |
| 08:50 – 09:05    | 5.53  | 61.14          | —            | 82.6  | 75.2  | 34.3  | 53.5  | —     |
| 09:05 – 09:20    | 5.62  | 61.16          | 08.1         | 84.5  | 78.7  | 32.6  | 51.2  | —     |
| 09:20 – 09:35    | 5.66  | 60.94          | 10.0         | 85.9  | 82.2  | 31.0  | —     | —     |
| 09:35 – 09:50    | 5.60  | 61.13          | 08.4         | 84.6  | 79.0  | 32.5  | —     | 60.3  |
| 09:50 – 10:05    | 5.61  | 61.16          | 07.8         | 83.9  | —     | 33.1  | —     | 59.0  |
| 10:05 – 10:20    | 5.62  | 61.21          | 08.0         | 84.2  | —     | 32.9  | —     | 59.7  |
| 10:20 – 10:35    | 5.64  | 61.12          | 07.8         | 83.7  | —     | 33.1  | —     | 58.2  |
| 10:35 – 10:50    | 5.57  | 61.22          | 08.2         | 84.1  | —     | 32.9  | —     | 59.6  |

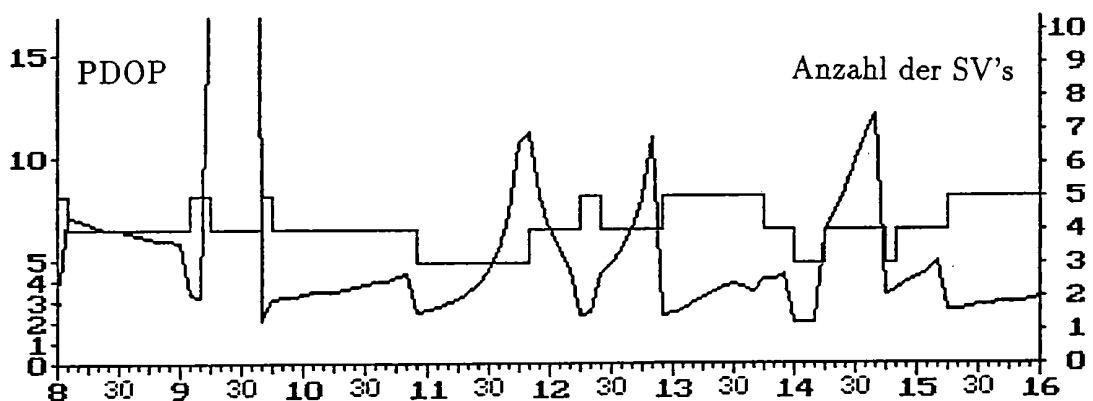
Tabelle 11: Ergebnisse von 15-Minuten Teillösungen

Abschließend wird noch die Auswirkung etwaiger Signalabschattungen untersucht. Damit sollen auch Einwände, das bisherige gute Ergebnis sei nur bei optimalen Beobachtungsbedingungen zu erzielen, entkräftet werden. Die Fig. 3 stellt ein Azimut-Zenitdistanz-Diagramm mit den Bahnen der einzelnen Satelliten während der Testmessung dar. Die verwendete Höhenmaske von  $15^\circ$  wird durch den punktierten Kreisring angezeigt. Nun sollen zusätzliche Sichthindernisse simuliert werden.



Figur 3: Satellitenverteilung für Graz am 6. April 1993, 8:00–11:00 Ortszeit

Es ist unmittelbar einzusehen, daß dem Satelliten SV 16, welcher während der gesamten Beobachtungszeit sichtbar war, eine besondere Bedeutung hinsichtlich Geometrie und damit für die Stabilität der Lösungen zukommt. Es wurde daher ein Meßdatensatz ohne den Satelliten SV 16 simuliert. Das entsprechende PDOP- und Sichtbarkeitsdiagramm ist in Fig. 4 dargestellt.



Figur 4: PDOP und Anzahl der Satelliten in Funktion der Ortszeit für Graz am 6. April 1993 bei einer Höhenmaske von  $15^\circ$  und ohne SV 16

Ein Vergleich obiger Figur mit der Fig. 2 zeigt, daß nun trivialerweise im Beobachtungszeitraum durchgehend nur mehr vier Satelliten sichtbar sind. Der wesentliche Unterschied zu Fig. 2 liegt jedoch in dem PDOP-Extremum zwischen 9:10 und 9:40 Ortszeit. Gerade in diesen Bereich fällt jedoch die dritte halbstündige Teillösung gemäß Tab. 9 oder die fünfte 15-Minuten Lösung gemäß Tab. 11. Damit finden aber auch die dortigen schlechteren Ergebnisse eine plausible Erklärung.

Eine Bestätigung obiger Aussagen erhält man noch aus Tab. 12, in der die Halbstundenlösungen aus den Datensätzen mit und ohne den Satellit SV 16 verglichen werden. Das Augenmerk ist hier auf die relativen Änderungen der Ergebnisse zu richten. Es ist klar ersichtlich, daß diese wiederum für den Beobachtungszeitraum 09:20–09:50 aus den angegebenen Gründen abnormale Werte annehmen.

| Ortszeit<br>[h:min] | b [m]     |            | $\Delta h$ [m] |            |
|---------------------|-----------|------------|----------------|------------|
|                     | mit SV 16 | ohne SV 16 | mit SV 16      | ohne SV 16 |
| 08:20 – 08:50       | 5.62      | 5.60       | 61.11          | 61.10      |
| 08:50 – 09:20       | 5.58      | 5.61       | 61.09          | 60.98      |
| 09:20 – 09:50       | 5.59      | 5.43       | 60.97          | 61.19      |
| 09:50 – 10:20       | 5.64      | 5.70       | 61.21          | 61.23      |
| 10:20 – 10:50       | 5.62      | 5.60       | 61.19          | 61.14      |

Tabelle 12: Vergleich der Halbstundenlösungen mit und ohne SV 16

## 5. Zusammenfassung

Die Studie hat gezeigt, daß unter normalen Bedingungen und bei Basislinien bis etwa 15 km die geforderte Höhengenaugigkeit von  $\pm 10$  cm mit Einfrequenzempfängern und bei Beobachtungszeiten von weniger als 30 Minuten erreicht wird. Um dieses Ergebnis zu erzielen, muß allerdings besonderes Augenmerk auf die Planung der Beobachtungen und die Punktauswahl gelegt werden. Als Faustregel gilt, daß Beobachtungen in Zeiten mit PDOP-Faktoren größer als 5 oder mit weniger als vier Satelliten zu vermeiden sind.

## Literatur

- Hofmann-Wellenhof B., H. Lichtenegger (1990): Einsatz des Globalen Positionierungssystems GPS in Geophysik und Geodynamik. 50. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft gemeinsam mit der Österreichischen Geologischen Gesellschaft, Leoben.
- Hofmann-Wellenhof B., H. Lichtenegger, J. Collins (1992): GPS - Theory and Practice. Springer-Verlag Wien New York.
- Lichtenegger H. (1993): Transformation von GPS-Resultaten. Vortragsmanuskript, "Österreich-GPS-Woche", Graz bzw. Innsbruck.
- Sünkel H., N. Bartelme, H. Fuchs, M. Hanafy, W.-D. Schuh, M. Wieser (1987): The Gravity Field in Austria. In: Geodätische Arbeiten Österreichs für die Internationale Erdmessung, Neue Folge, Band IV, S. 47–76.

