

Anwendungsmöglichkeiten von GPS in Geodäsie und Nachbargebieten : Erfahrungen mit dem TI4100 NAVSTAR Navigator

Autor(en): **Seeber, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural**

Band (Jahr): **87 (1989)**

Heft 8

PDF erstellt am: **18.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-234070>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Anwendungsmöglichkeiten von GPS in Geodäsie und Nachbargebieten – Erfahrungen mit dem TI4100 NAVSTAR Navigator

G. Seeber

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten des Global Positioning System im Vermessungswesen werden an Beispielen mit dem TI4100 NAVSTAR Navigator von Texas Instruments aufgezeigt. Ausgehend von einer kurzen Darstellung über Systemstatus, Beobachtungsgrößen, Fehlereinflüsse und Empfänger werden Beispiele und Erfahrungen aus der Grundlagenvermessung, der Detail- und Ingenieurvermessung, der Geodynamik sowie der Meeres- und Glazialgeodäsie vorgestellt. Es wird deutlich, dass die Nutzung des GPS bereits heute mit Erfolg Eingang in nahezu alle Bereiche des Vermessungswesens gefunden hat.

Les multiples possibilités d'application du Global Positioning System en mensuration sont ici exposées à l'aide de quelques exemples acquis avec le TI4100 NAVSTAR Navigator de Texas Instruments. Partant d'une courte description de l'état du système, des grandeurs à observer, des sources d'erreurs et des récepteurs, cet article présente exemples et expériences acquises en mensuration fondamentale, en levé de détail, aussi bien terrestre que glaciaire ou hydrographique, en mensuration technique et industrielle, ainsi qu'en géodynamique. Il en ressort que le GPS s'est aujourd'hui déjà introduit dans la quasi-totalité des domaines de la mensuration.

Vorbemerkungen

Das NAVSTAR Global Positioning System GPS trifft seit Anfang der achtziger Jahre auf ein zunehmendes Interesse in der geodätischen Forschung und Praxis. Ein Blick in die Fachzeitschriften und Tagungskalender zeigt, dass GPS heute zu den am meisten diskutierten Themen im Vermessungswesen gehört. Nahezu alle geodätischen Ausbildungsstätten im deutschen Sprachraum und einige mit der Grundlagenvermessung betraute Organisationen verfügen über eigene GPS-Empfänger. Man kann feststellen, dass GPS bereits heute zumindest in Teilbereichen Eingang in die Vermessungspraxis gefunden hat und «klassische» Messverfahren ersetzt. Man kann erwarten, dass sich diese Entwicklung fortsetzt und dass satellitengestützte Positionsbestimmungsverfahren erhebliche und einschneidende Auswirkungen auf Tätigkeitsfelder und auch auf das Berufsbild des Vermessungsingenieurs haben werden.

Am Institut für Erdmessung der Universität Hannover (IFE) konnte bereits sehr frühzeitig mit anwendungsorientierter Forschung zu GPS begonnen werden. Seit Juni 1984 wird hierzu mit dem TI4100 GPS Navigator von Texas Instruments das bis heute universellste GPS-Empfängergerät

in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt. Auf der Grundlage dieser Erfahrungen und der dabei gewonnenen Erkenntnisse soll nachstehend die reiche Skala der Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Dabei werden die Grundzüge des GPS-Systems und der geodätischen Beobachtungs- und Auswertetechnik als bekannt vorausgesetzt. Einführende Literatur hierzu findet man u.a. bei Wells (1986), Seeber (1984, 1989), Scherrer (1985), Beutler (1988). Einige wichtige Gesichtspunkte werden im folgenden referiert.

1. Einige Voraussetzungen und Gesichtspunkte bei der Durchführung von GPS-Messungen

1.1 Systemstatus

Gegenwärtig stehen für GPS-Beobachtungen nur die Prototypsatelliten (Block I) für mehrere Stunden je Tag zur Verfügung (Beobachtungsfenster). Die sechs funktionsfähigen Block I Satelliten (Stand August 1988) gestatten je nach geographischer Lage des Arbeitsgebietes eine zwei bis sechsstündige Beobachtungsphase mit wenigstens vier simultan sichtbaren Satelliten. Sofern für Navigationszwecke mit nur drei oder zwei Satelliten gearbeitet wird (vgl. 5.), kann in manchen Weltgegenden GPS länger als zwölf Stunden täglich genutzt werden. Die Satellitenkonfiguration wiederholt sich an jedem Tag zu einem vier Minuten früheren Zeitpunkt. In Mitteleuropa kann gegenwärtig von Frühjahr bis Herbst tagsüber beobachtet werden. Je nach Punkterfernung und logistischen Gegebenheiten können durch Umsetzen auch zwei und mehr Stationen pro Tag mit dem selben Gerät besetzt werden.

Ab Anfang 1989 soll mit dem Start der operationellen Satelliten (Block II) begonnen werden. Der vollständige Ausbau mit voraussichtlich 24 Satelliten soll 1990/91 erreicht sein. Es werden dann an jedem Ort der Welt zu jeder Zeit mindestens vier Satelliten über dem Horizont stehen und kontinuierliche Beobachtungen ermöglichen. Da keine weiteren Prototypsatelliten mehr gestartet werden, wird sich bis zum Beginn der operationellen Phase die Überdeckungssituation bei Ausfall einzelner Satelliten möglicherweise verschlechtern. Ab Mitte 1989 ist mit einer sich rasch verbessernden Situation zu rechnen (Stand 1988).

1.2 Beobachtungsgrößen, Fehlereinflüsse

Um die für geodätische Anwendungen gewünschten hohen Genauigkeiten zu errei-

	Code	Träger
Wellenlänge	P-Code 29,3 m C/A-Code 293 m	L1 19,05 cm L2 24,45 cm
Messrauschen	P-Code 0,6–1 m C/A-Code 10 m	2–3 mm
Ausbreitungseffekte	Verzögerung in der Ionosphäre	Beschleunigung in der Ionosphäre
Mehrdeutigkeit	eindeutig	mehrdeutig

Tab. 1: Haupteigenschaften von Code- und Trägerphasen

chen, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Hierzu gehören

- Nutzung der Trägerphasen
- Beobachtungen im Relativmodus
- zutreffende Modellierung der wirksamen Einflüsse.

In der Praxis der geodätischen Nutzung von GPS werden zwei unterschiedliche Beobachtungsgrößen verwendet, nämlich Codephasen und Trägerphasen. Die wichtigsten Eigenschaften sind nachstehend zusammengefasst (Tab. 1).

Es wird deutlich, dass aufgrund des sehr geringen Beobachtungsrauschens von $\pm 2 \dots 3$ mm für geodätische Anwendungen nur die Trägerphasenmessung in Betracht kommt. Die Nutzung der Codephasen ist den Navigationsanwendungen vorbehalten, zumal hierbei kein Mehrdeutigkeitsproblem auftritt und somit Echtzeitergebnisse möglich sind. Für die Präzisionsnavigation können beide Beobachtungsgrößen kombiniert werden.

Um das hohe Genauigkeitspotential der Trägerphasenmessungen ausnutzen zu können, muss der Hauptanteil der wirksamen Modellfehler durch Differenzbildung bei der Beobachtung auf wenigstens zwei Stationen beseitigt werden. Wenn die beteiligten Stationen genügend dicht beieinander liegen, können die Modellfehler als hochkorreliert angesehen werden. Dies betrifft im wesentlichen die Fehler der Bahnvorhersage und die unzureichende Erfassung der Signalausbreitung in der Atmosphäre. Die hierbei auftretenden Fehler übersteigen das Beobachtungsrauschen etwa um den Faktor 10^3 bis 10^4 und lassen sich nicht mit genügender Genauigkeit modellieren. Aus diesem Grunde können hochpräzise GPS-Messungen grundsätzlich nur als Relativmessungen ausgeführt werden. Der Einsatz von zwei Geräten genügt für viele Aufgabenstellungen. Bei der Verfügbarkeit von drei und mehr Geräten lassen sich Messprojekte aber wesentlich zuverlässiger und wirtschaftlicher durchführen.

Bei wachsender Punktentfernung nimmt die gegenseitige Korrelation der Auswirkung von Modellfehlern ab, so dass eine reine Differenzbildung nicht mehr genügt; es muss vielmehr versucht werden, den relativen Einfluss der Modellfehler direkt zu bestimmen oder durch Modellverfeinerung zu parametrisieren.

Ein Fehler in der *Satellitenbahnbestimmung* wirkt sich näherungsweise nach dem Verhältnis Basislänge zu Satellitenentfernung auf die Basiskomponenten aus (Beutler 1987). Bei einem Bahnfehler von etwa 20 m und einer Punktentfernung von 10 km entspricht dies ± 1 cm. Dies bedeutet für kurze Distanzen, beispielsweise im Aufnahmenetz oder für Kataster- und Ingenieuranwendungen, dass die Bahngenauigkeit keinen kritischen Faktor darstellt. Bei grösseren Punktentfernungen oder

höheren Bahnungenauigkeiten müssen genauere Bahnen verfügbar sein, oder es müssen Bahnverbesserungstechniken im Zuge der Auswertung angewendet werden. Herausgehobene Arbeiten hierzu werden an der Universität Bern im Zusammenhang mit der «Berner GPS Software» durchgeführt (Beutler 1986).

Da die *Ionosphäre* für Wellen im Radiofrequenzbereich ein dispersives Medium ist, können Ausbreitungskorrekturen aus der Verwendung von zwei Trägerfrequenzen L1, L2 berechnet werden. Verbleibende Restfehler sind vernachlässigbar klein. Wenn nur auf einer Frequenz beobachtet werden kann, muss mit einem verbleibenden Modellfehler von $1:10^6$ für die Bestimmung relativer Koordinaten gerechnet werden, wobei dieser Wert in Zeiten verstärkter Sonnenaktivität wesentlich höher ausfallen kann. Dies bedeutet, dass im allgemeinen der Einsatz von Einfrequenzgeräten auf einen Entfernungsbereich von etwa 10 km zu beschränken ist, dass aber für Präzisionsanwendungen generell Zweifrequenzgeräte vorzuziehen sind. Der Einfluss der *Troposphäre* auf die Signalausbreitung ist frequenzunabhängig und muss deshalb durch möglichst zutreffende Erfassung der Atmosphärenparameter längs des Signalausbreitungsweges modelliert werden. Restfehler betragen 2–5 cm und sind über grössere Entfernungen nicht mehr miteinander korreliert. Erfahrungen zeigen, dass es sinnvoll sein kann, statt punktuell gemessener meteorologischer Parameter plausible regionale Mittelwerte in die Auswertung einzuführen. Insbesondere in gebirgigen Regionen mit starken Höhenunterschieden stellt die zutreffende Erfassung der troposphärischen Ausbreitungsbedingungen einen kritischen Parameter dar, wenn 1 cm Genauigkeit angestrebt wird.

1.3 Empfänger und Auswertprogramme

Von mehreren Herstellern stehen ausge-reifte Empfangssysteme zur Verfügung, die operationell eingesetzt werden können. Aktuelle Marktübersichten findet man beispielsweise bei Boucher (1987), Wells (1986) und von Seeber (1989). Eine allgemein übliche Einteilung erfolgt in codefreie und codeabhängige Empfänger. Herausragender Vertreter in der Gruppe der codefreien Empfänger ist das *Macrometer* in der Ein- und Zweifrequenzversion, das als Beobachtungsgrößen die Trägerphasen liefert. Bahn- und Zeitinformationen müssen aus externen Quellen beschafft werden. Codeabhängige Geräte benötigen zur Messung eine a priori Kenntnis der verwendeten Codes. Zu dieser Gruppe gehören u.a. *Texas Instruments* (TI4100), *Wild Magnavox* (WM 101, WM 102), *Trimble* (4000SL, 4000 SLD).

Alle genannten codeabhängigen Geräte liefern Code- und Trägerphasen auf dem L1 Kanal; der Trimble 4000 SLD zusätzlich Trägerphasen auf dem L2 Kanal. Der WM 102 Empfänger ist für Mitte 1989 angekündigt und wird Trägerphasen auf L2 und optional den P-Code auf L2 bereitstellen. Ausschliesslich der TI4100 stellt als einziges zivil nutzbares Gerät sämtliche geodätisch interessanten Beobachtungsgrößen bereit, nämlich

P-Code Pseudoentfernungen (Codephasen auf L1 und L2)

C/A-Code Pseudoentfernungen auf L1 Trägerphasen auf L1 und L2.

Der TI4100 ist ein Multiplexempfänger, der innerhalb von 20 Millisekunden zwischen vier Satelliten umschalten kann. Etwa alle drei Sekunden werden für vier Satelliten auf beiden Frequenzen Messdaten ausgegeben. Weiterhin stehen die Bahn- und Zeitinformationen (Message) zur Verfügung. Das Gerät ist sowohl für Navigations- als auch für geodätische Anwendungen geeignet. Der eingebaute Mikroprozessor liefert für etwa alle drei Sekunden in Echtzeit Positionen und Geschwindigkeiten (User Solution). Die Echtzeitlösungen sowie die Originalmessdaten können über genormte Schnittstellen an andere Systeme weitergeleitet oder auf dem zugehörigen Datenrecorder aufgezeichnet werden. Weiterführende Literatur zum TI4100 ist z.B. Henson u.a. (1985).

Die nachstehend beschriebenen Anwendungsbeispiele beruhen sämtlich auf Beobachtungen mit TI4100 Empfängern. Da es sich um die gegenwärtig universellsten Empfänger handelt, kann mit den Beispielen das Einsatzpotential von GPS weitgehend reflektiert werden.

Die meisten der Gerätehersteller bieten Auswertprogramme für Mehrstationsbeobachtungen an (z.B. PoPS, TRIMVEC). Weiterhin sind an mehreren wissenschaftlichen Institutionen Auswertprogramme entwickelt worden, z.B. Berner Software (Beutler 1988), PHASER (Goad 1985), TI-POSIT (Wübbena 1985). Die universellste und am weitesten entwickelte Software dürfte gegenwärtig die Berner Software sein, die u.a. einen vollständigen Bahnberechnungsteil und die Möglichkeit zur Simulationsrechnung enthält. Die nachstehend beschriebenen Beispiele wurden mit dem in Hannover entwickelten TIPOSIT Programmpaket ausgewertet, das die Besonderheiten des TI4100 Empfänger ausnutzt. Es geht von den originalen, undifferenzierten Phasenmessungen aus und löst die Mehrdeutigkeiten durch eine Kombination von Code- und Trägerphasenmessungen. In einer neueren Version können auch Bahn- und Uhrparameter sowie die Ionosphäre und Troposphäre geschätzt werden.

1.4 Folgerungen

Man kann feststellen, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt für projektbezogene Einsätze von GPS in genügendem Umfang

Satelliten
Empfangsanlagen
Auswertprogramme

verfügbar sind. Damit können die spezifischen Vorteile von GPS im Hinblick auf Anwendungen im Vermessungswesen bereits jetzt genutzt werden, nämlich

- Genauigkeit
- Schnelligkeit
- Unabhängigkeit von Sichtverbindungen zwischen Bodenpunkten
- Unabhängigkeit von Wetterbedingungen
- Wirtschaftlichkeit.

Dies soll durch die nachstehenden Anwendungsbeispiele erläutert und belegt werden.

2. Anwendungen in der Grundlagenvermessung

Folgende Zielsetzungen sind möglich

- vollständige Neuanlage eines Punktfeldes
- Verdichtung oder Erweiterung eines Punktfeldes
- Kontrolle, Analyse und Verbesserung eines bestehenden Punktfeldes
- Beitrag zur Höhen- und Geoidbestimmung.

Die Situation und Aufgabenstellung ist von Land zu Land unterschiedlich. Dort wo die Netzerneuerung 1. und 2. Ordnung bereits abgeschlossen ist, wie z.B. in Niedersachsen (Augath 1984), geht es um die Verdichtung des bestehenden Punktfeldes, um ein spannungsfreies Netz mit einer Punktdichte von 1 Punkt/km² als Grundlage für die geplante automatisierte Liegenchaftskarte zu erstellen. In anderen Ländern wird es darauf ankommen, mit Hilfe von GPS ein übergeordnetes, hochpräzises Grundnetz zu schaffen und entsprechend zu verdichten. Nachstehend werden Erfahrungen und Ergebnisse bei Punktfeldern unterschiedlicher Grösse mitgeteilt.

2.1 Die Projekte HANNAC und NIENAC

Als Beispiel für ein lokales Netz mit Punktabständen von 3–7 km sei die Hannoverische NAVSTAR-Kampagne HANNAC genannt (Seeber u.a. 1986), die inzwischen in insgesamt vier Verdichtungsstufen vorliegt. Abb. 1 zeigt die Punktverteilung von HANNAC 1,2. Die Beobachtungen von HANNAC 1 wurden mit zwei Geräten im Januar während der Nachtstunden und von HANNAC 2 mit drei Geräten im Juni

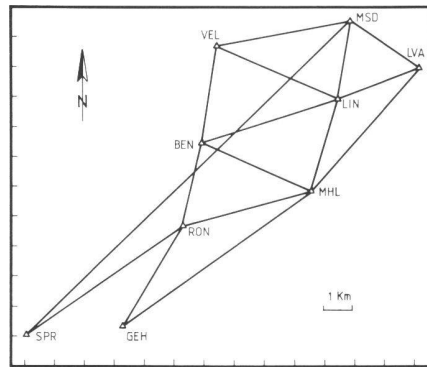


Abb. 1

tagsüber vorgenommen. Tab. 2 zeigt die Ergebnisse der GPS Gesamtauswertung mit einem Modell ohne aktuelle Atmosphärenparameter sowie ohne Bahn- und Uhrverbesserung. Weiterhin werden die Residuen nach einer 7 Parameter Transformation auf ein terrestrisches Vergleichsnetz nachgewiesen. Die mittleren Lagefehler der Vergleichskoordinaten betragen ± 3 mm.

Die Ergebnisse bestätigen die allgemeine Erfahrung, dass mit GPS in lokalen Netzen bei Punktdistanzen unter 10 km eine Genauigkeit im Subzentimeterbereich standardmässig erreicht werden kann. Die grösseren Abweichungen für die Höhenkomponenten haben ihre Ursache in der herangezogenen Geoidinformation und der im vorliegenden Fall z.T. trigonometrisch bestimmten terrestrischen Vergleichshöhe. Bemerkenswert ist, dass keine signifikanten Differenzen zwischen Einzelergebnissen der Winter- und Sommermessungen gefunden werden konnten, obwohl keine aktuellen meteorologischen Daten genutzt wurden. Dies bedeutet, dass in lokalen Netzen die Auswertung mit einem mittleren Standardwetter vorgenommen werden kann. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass durch Kombination von P-Code- und Trägerphasenmessungen bereits nach wenigen Minuten Messzeit eine Mehrdeutigkeitslösung möglich

ist. Kurze Messzeiten sind vor allem in lokalen Netzen aus Wirtschaftlichkeitsgründen bedeutsam, da dann häufiger innerhalb eines Beobachtungsfensters umgesetzt werden kann. Die Ergebnisse lassen ebenfalls erkennen, dass in lokalen Netzen Punktverdichtungen mit 1 cm-Genauigkeit durch «polares Anhängen» mit GPS möglich sind.

Mit dem Projekt NIENAC (Niedersächsische NAVSTAR Campagne) wird ein Beispiel für ein Netz von der Grösse eines Bundeslandes und Stationsentfernungen von etwa 100 km gegeben (Abb. 2). Das Netz enthält zehn Punkte und wurde im Mai 1986 an zehn Tagen mit drei Empfängern gemessen. Die Zahlen an den Verbindungslinien in Abb. 2 geben an, in welcher «Session» beobachtet wurde. Mit «Session» wird allgemein eine gleichzeitig mit mehreren Empfängern beobachtete Punktkonfiguration bezeichnet. Es ist ersichtlich, dass einzelne Verbindungen doppelt belegt sind. Da auf der Station Springe (SPR) wegen militärischer Funkaktivitäten in unmittelbarer Nähe die Beobachtungen eines Tages nicht brauchbar waren, wurde eine Linie an einem weiteren Tag nachgemessen. Die Gesamtausgleichung mit Standardwetterdaten und ohne Verbesserung der Broadcast-Bahn- und Uhrdaten ergibt Standardabweichungen der Koordinaten von im Mittel ± 5 cm (Seeber u.a. 1987a). Für die besetzten Punkte steht ein hochgenaues Lagevergleichsnetz aus den Ergebnissen der zwangsfreien Ausgleichung des Niedersächsischen Trilaterationsnetzes 1. und 2. Ordnung zur Verfügung, dessen Genauigkeit mit $\pm 2 \dots 3$ cm angegeben wird. Die Restklaffungen zwischen GPS Netz und terrestrischem Netz nach einer 7 Parameter Transformation sind in Tabelle 3 nachgewiesen und erreichen 2...5 cm. Dies bestätigt einerseits die hohe Genauigkeit des terrestrischen Vergleichsnetzes und andererseits das Genauigkeitspotential von GPS über Punktentfernungen von etwa 100 km.

	Standardabweichungen (m)			Restklaffungen (m)		
	m_x	m_y	m_h	$d\varphi$	$d\lambda$	dh
LIN	0,000	0,000	0,000	0,003	–0,006	–0,032
MSD	0,002	0,002	0,005	0,004	0,008	0,022
VEL	0,003	0,002	0,007	0,002	–0,006	0,007
BEW	0,003	0,002	0,007	0,001	–0,010	–0,010
RON	0,002	0,002	0,006	0,012	–0,001	0,018
MAL	0,003	0,002	0,007	0,007	–0,006	0,001
LVA	0,003	0,004	0,008	0,013	–0,005	0,020
GEH	0,005	0,004	0,011	0,007	–0,005	0,009

Tab. 2: HANNAC Ergebnisse

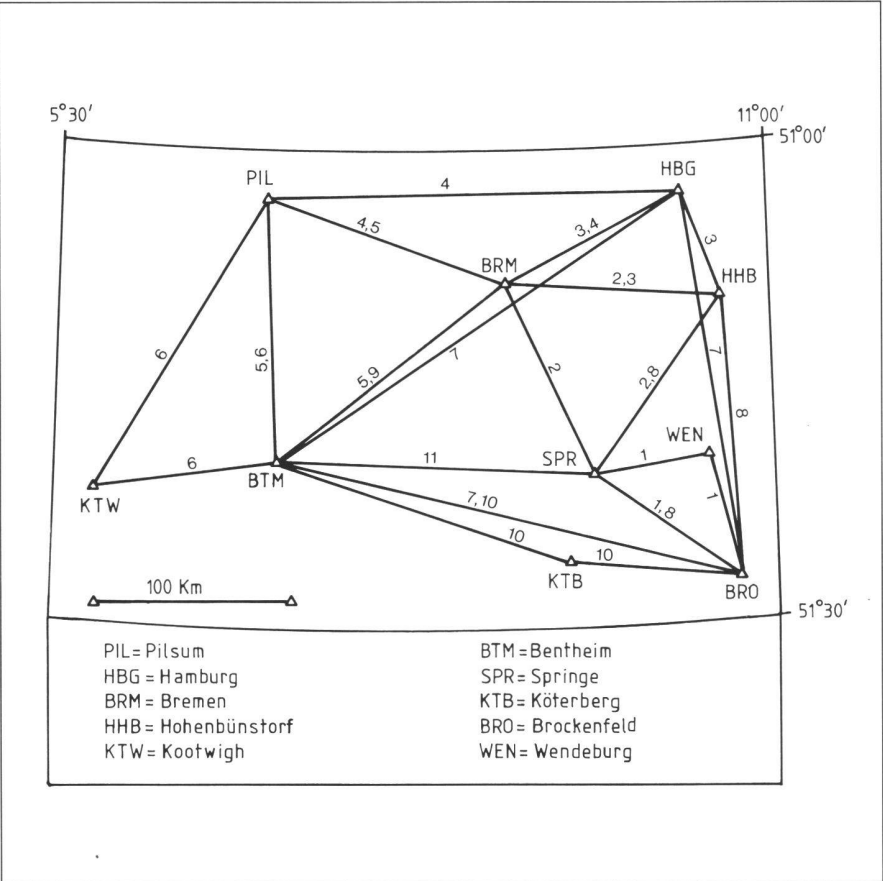


Abb. 2

	d (m)	dλ (m)	dh (m)
BRM	0,033	-0,005	0,054
PIL	-0,054	0,021	-0,027
HBG	0,025	-0,017	0,007
HHB	-0,038	0,008	-0,022
SPR	-0,035	-0,032	-0,035
BTM	0,057	-0,026	0,010
BRO	0,011	0,051	0,013

Tab. 3: NIENAC Restklaffungen nach 7 Parameter Transformation

Linie	Zahl der Session	Entfernung (km)	RMS Distanz [m]
ONS ZMW	11	1207	± 0,031
ONS WTZ	11	920	± 0,030
ONS HHB	7	492	± 0,035
ONS KTW	11	700	± 0,028
KTW WTZ	11	602	± 0,022
KTW KLP	11	298	± 0,028
ZMW WTZ	11	476	± 0,024
ZMW GRZ	4	611	± 0,028

Tab.4: Standardabweichungen für einzelne DÖNAV-Linien

2.2 DÖNAV (Deutsch Österreichische NAVSTAR Campaigne)

Als Beispiel für ein neuangelegtes Grundlagentnetz in einem Land mittlerer Größe mag das DÖNAV Netz dienen, das als wissenschaftliches GPS-Grundnetz im November 1986 in Deutschland, Österreich und angrenzenden Ländern beobachtet wurde (Seeber u.a. 1987). Im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes kamen zwölf TI4100 Empfänger an elf Tagen zum Einsatz. Grundgedanke war, auf sechs Stationen, zum Teil fundamentale Laser- und/oder VLBI-Stationen, während der ganzen Kampagne permanent zu beobachten, um die Teilmessungen miteinander zu verknüpfen und um Bahnverbesserungen rechnen zu können. Die übrigen sechs Empfänger wurden von Tag zu Tag in der Weise versetzt, dass zwischen den einzelnen Sessions neben den Permanentstationen zwei weitere Verknüpfungspunkte bestanden. Insgesamt wurden 50 Stationen mit einem mittleren Punktabstand von etwa 100 km besetzt (Abb. 3). DÖNAV kann damit als Studienbeispiel für ein nationales Grundnetz dienen. Die Ergebnisse werden als Gemeinschaftsarbeit der beteiligten Gruppen 1989 veröffentlicht. Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass die Relativgenauigkeit zwischen benachbarten Stationen bei wenigen cm liegt. Tabelle 4 vermittelt einen Eindruck der Relativgenauigkeit zwischen einzelnen Permanentstationen (vorläufige Berechnung in Hannover). Es zeigt sich, dass wegen der hohen Überbestimmungen und Verknüpfungen nur eine geringe Entfernungsabhängigkeit der inneren Genauigkeitsmasse besteht. Auch für 1000 km Distanzen beträgt die Standardabweichung der Distanz nur ±3–4 cm. Netze dieser Art haben offensichtlich eine hohe innere Homogenität und Konsistenz und sind sehr dazu geeignet, als Grundlagentetze für weitere Verdichtungsarbeiten zu dienen. Für weitergehende Aussagen soll auf den Schlussbericht zu DÖNAV verwiesen werden.

2.3 Netzkontrolle in Brasilien

Als Beispiel für die Anwendung von GPS zur Netzkontrolle in Ländern mit unzureichenden geodätischen Grundlagen sei ein Messprojekt aus Brasilien dargestellt. Im November 1987 wurde in Kooperation zwischen der Bundesuniversität von Paraná in Curitiba und dem Institut für Erdmessung der Uni Hannover mit Unterstützung weiterer Organisationen mit vier Empfängern auf Punkten des Südbrasilianischen Hauptdreiecksnetzes beobachtet (Abb. 4). Acht Punkte gehören zu den Dreiecksketten, die zwischen 1947 und 1959 aus reinen Richtungsbeobachtungen aufgebaut wurden. Der Punkt RN ist Neupunkt in bisher unermessenen Gebiet, der Punkt CP ist Basisstation der Universität. Die Beobachtungen dauerten sechs Tage,

wegen logistischer Schwierigkeiten gab es einige Datenlücken. Die GPS Netzausgleichung führt zu einer Relativgenauigkeit von weniger als 0,1 m bei Punktentfernungen bis zu 300 km (Campos, Seeber 1988). Der Vergleich mit dem terrestrischen Netz nach einer 7 Parametertransformation zeigt Restklaffungen bis zu etwa 1 m. Dies entspricht Ergebnissen, die auf identischen Punkten wenige Jahre zuvor mit TRANSIT Doppler Verfahren gefunden wurden (Campos 1987) und spiegelt die Deformationen des terrestrischen Grundlagentetzes wieder. GPS zeigt gegenüber TRANSIT aber eine etwa zehnfach höhere Genauigkeit bei wesentlich kürzerer Beobachtungsdauer und erheblich geringerem logistischen Einsatz, da jeweils nur für wenige Stunden beobachtet wurde. GPS ermöglicht hiermit eine gezielte Analyse der vorhandenen geodätischen Grundlagen; zuverlässige Genauigkeitsangaben lagen bisher nicht vor. Weiterhin können die Ergebnisse von GPS genutzt werden, um gemeinsam mit den vorhandenen terrestrischen Beobachtungen eine Neuausgleichung vorzunehmen. Effektiver dürfte es aber sein, ein vorhandenes präzises GPS Grundnetz durch GPS-Beobachtungen weiter zu verdichten.

2.4 Höhenbestimmung mit GPS

Die Höhenbestimmung ist ein Teilaspekt der Positionsbestimmung. Satellitenverfahren sind von Haus aus dreidimensional. Man bestimmt jedoch keine Höhen im Schwerfeld sondern rein geometrische Koordinatendifferenzen, die in ellipsoidische Höhendifferenzen umgerechnet werden können. Die Leistungsfähigkeit hat sich in den o.g. Beispielen HANNAC und NIENAC gezeigt. Zum Übergang in ein mit dem Schwerfeld verbundenes Höhensystem werden Informationen über den Geoidverlauf benötigt. Umgekehrt können Geoidkontrollen vorgenommen werden, wenn auf GPS-Punkten Nivellementshöhen vorliegen. Die Beziehungen sind sehr einfach

$N = h - H$
 $H = h - N$

mit
 h = ellipsoide Höhe eines Bodenpunktes P aus GPS Beobachtungen
 H = Orthometrische Höhe von P aus dem geometrischen Nivellement
 N = Geoidhöhe in P.

Unter Annahme einer einfachen Fehlerfortpflanzung lässt sich über eine GPS Traverse eine Höhenübertragungsgenauigkeit von wenigen dm über mehrere 1000 km erwarten (Seeber 1987a). Tab. 5 zeigt dies für Traversen, die aus 50 km langen Teilstücken aufgebaut sind, unter der Annahme von drei verschiedenen Genauigkeitsvorgaben für die Teilstücke bei Werten von rein zufälligen Fehlern.

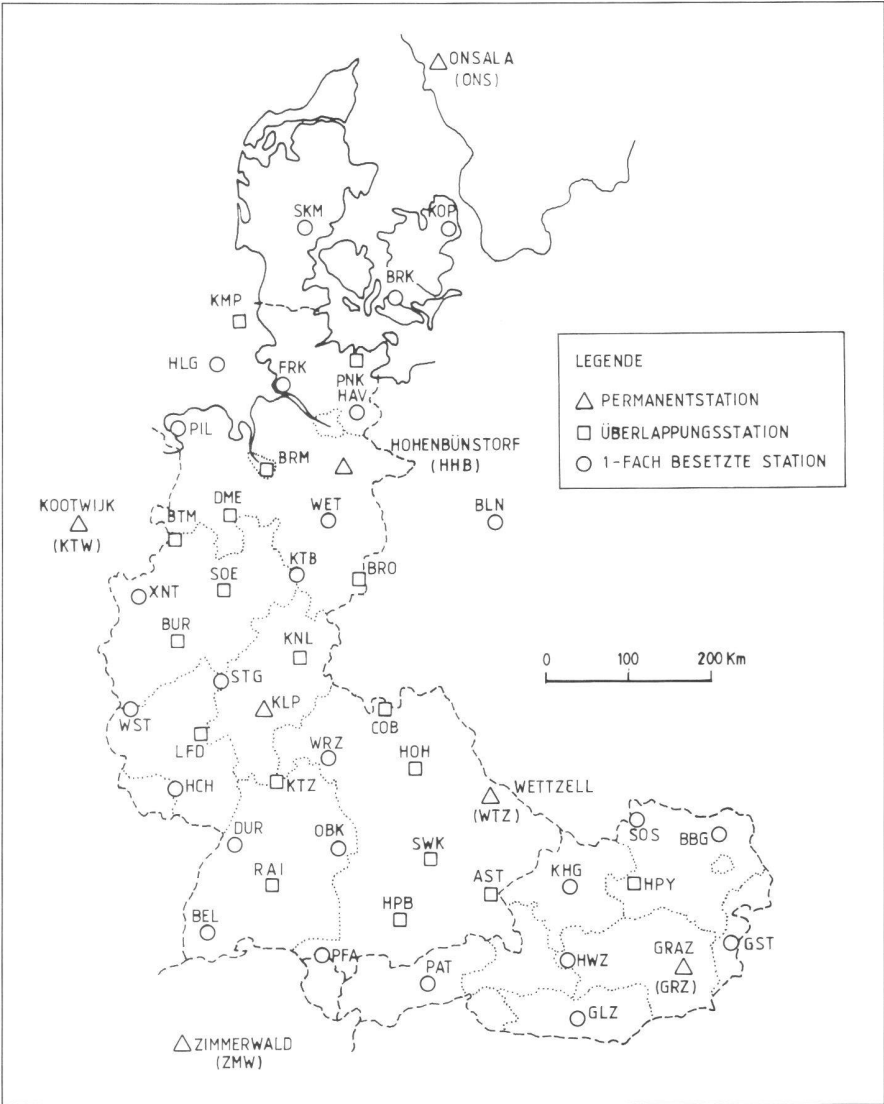


Abb. 3

$\sigma_{\Delta h}$		Profillänge (km)			
		500	1000	2500	4000
(1)	2 cm	6 cm	9 cm	14 cm	18 cm
(2)	5 cm	16 cm	22 cm	35 cm	45 cm
(3)	10 cm	32 cm	45 cm	70 cm	90 cm

Tab. 5: Fehlerfortpflanzung in einer GPS Traverse

Vom Institut für Erdmessung wurde in Kooperation mit den jeweils nationalen Dienststellen 1986 und 1987 eine insgesamt 3000 km lange GPS Traverse zwischen Österreich und Norwegen gemessen (Abb. 5). Bisherige Ergebnisse zeigen (Torge u.a. 1988), dass eine Genauigkeit erreicht wird, die zwischen den in den Zeilen (1) und (2) der Tab. 5 angegebenen Werten liegt. Offensichtlich zeigt ein wesentlicher Teil der von Atmosphäre und Bahn verursachten systematischen Fehler über mehrere Wochen hinweg ein eher zu-

fälliges Verhalten, so dass die angenommene Fehlerfortpflanzung realistisch ist. Dies bedeutet, dass mit GPS eine wichtige Kontrollgröße für das geometrische Nivellement und für Geoidberechnungen zur Verfügung steht.
Höhenübertragungen können auch im Ingenieurbereich über kürzere Entfernungen, beispielsweise auf See vorteilhaft mit GPS vorgenommen werden.
Zusammenfassend eröffnen sich folgende Anwendungsfelder:

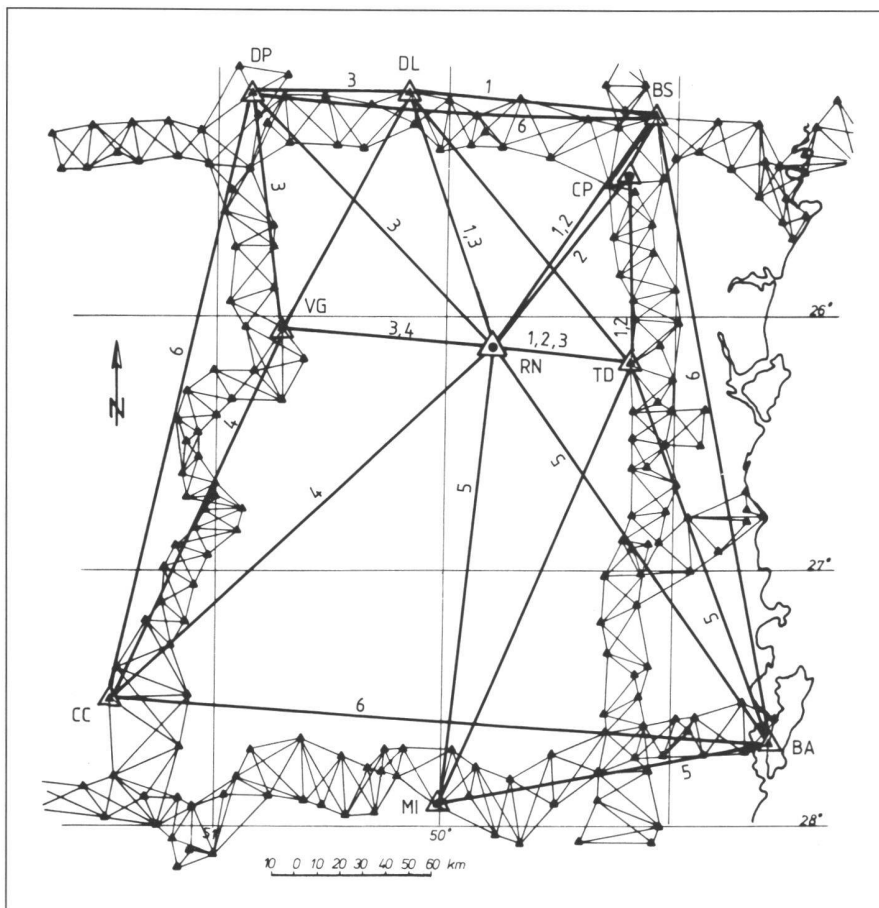


Abb. 4

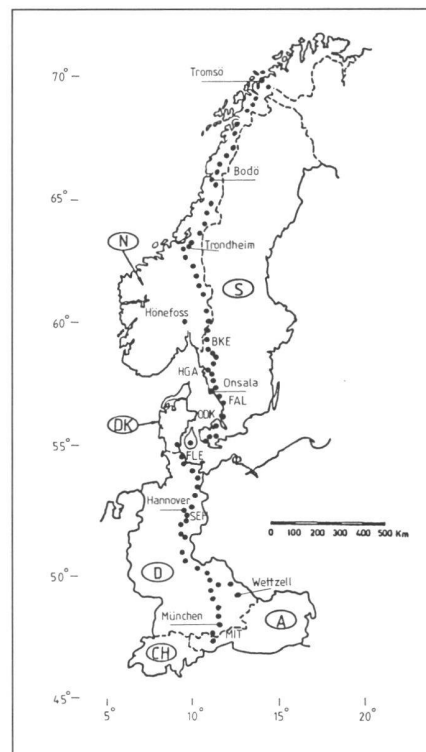


Abb. 5

tionellen Verfahren bereits heute zu den routinemässig eingesetzten Positionsbestimmungsmethoden. Neuanlage und/oder Verdichtung von Punktfeldern der Landesvermessung werden in Zukunft nahezu ausschliesslich mit Satellitenverfahren erfolgen. Wegen erheblicher logistischer Nachteile werden Mikrowellendistanzmessgeräte über mittlere und grosse Entfernungen keine Rolle mehr spielen. Das geometrische Nivellement wird langfristig vorrangig eine Rolle als Interpolationsverfahren spielen und grossräumig durch GPS abgestützt werden.

3. Detail- und Ingenieurvermessung

3.1 Stadtgrundnetze, Planung, Kataster

Das Beispiel von HANNAC wie auch zahlreicher vergleichbarer Projekte an anderer Stelle machen deutlich, dass GPS wirtschaftlich und genau Detailvermessungen ermöglicht und zumindest den Rahmen für Detailaufnahmen liefern kann. Aufgrund von Bebauung, Bewuchs und anderen Hindernissen wird in vielen Fällen eine Kombination von GPS mit terrestrischen Methoden, insbesondere registrierenden Tachymetern, vorteilhaft sein. Die GPS-Punkte können dabei zum Teil auf Hochhäusern eingerichtet werden. Als Beispiel soll das Stadtgrundnetz von Recife im Nordosten Brasiliens dienen (Abb. 6). Als Planungsgrundlage für Entwicklungs- und

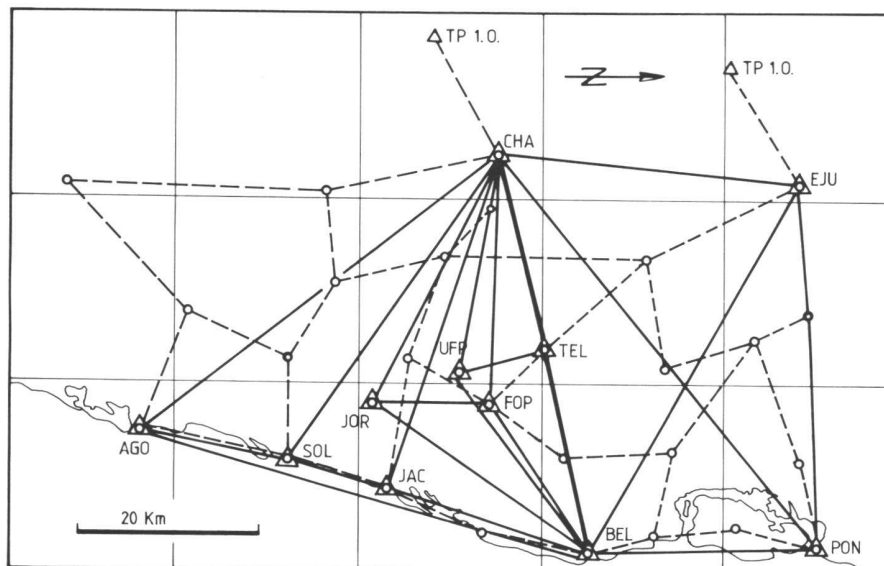


Abb. 6

- grossräumige Kontrolle des Nivellements bei vorhandener Geoidinformation
- Kontrolle und Verfeinerung der Geoidbestimmung bei vorliegender Nivellementsinformation
- Verbindung getrennt liegender Höhensysteme (Pegel)

- Höhenmässiger Anschluss von Inseln und Meeresbauwerken.

2.5 Folgerungen

Für den Bereich der Grundlagenvermessung konnte die Leistungsfähigkeit von GPS vielfach bestätigt werden. In manchen Ländern gehört GPS neben konven-

Stationen	Entfernung (km)	σ_s [m]
CHA – BEL	44,8	0,006
CHA – PON	54,9	0,018
CHA – EUJ	33,2	0,016
CHA – AGO	49,4	0,007
CHA – UFP	30,1	0,011
UFP – TEL	13,8	0,011
JAC – BEL	24,2	0,012
AGO – BEL	51,5	0,008
AGO – PON	74,9	0,017
AGO – EUJ	76,8	0,017
SOL – JAC	11,4	0,018
SOL – JOR	8,6	0,010

Tab. 6: Standardabweichungen für Distanzen im GPS-Stadtnetz Recife

Neuordnungsmassnahmen wird dort dringend ein präzises Grundnetz als Rahmen für photogrammetrische Detailaufnahmen sowie für kommunale Bauvorhaben benötigt. Hierzu wurde ein Langstreckenpolygonnetz an zwei Punkten des Hauptdreiecknetzes im Osten der Stadt angeschlossen. Die Konfiguration (Abb. 6) ist aus Mangel an geeigneten Anschlusspunkten sehr ungünstig. Die Ausgleichung des terrestrischen Netzes ergab Standardabweichungen der Koordinaten bis zu ± 20 cm (Silva 1988). In Zusammenarbeit mit der Universität Recife wurden im Dezember 1987 auf elf Punkten an insgesamt drei Tagen Messungen mit vier Empfängern durchgeführt. Die Genauigkeit des GPS Netzes nach der Gesamtauswertung liegt erwartungsgemäss bei $\pm 1 \dots 2$ cm. Die Standardabweichungen für einzelne Verbindungslinien sind in Tab. 6 nachgewiesen; die Diskrepanzen zum terrestrischen Netz nach einer 7 Parametertransformation erreichen bis zu 40 cm.

Dieses Beispiel zeigt, dass gerade in Entwicklungsländern mit unzureichenden kartographischen Grundlagen die brennenden Probleme in urbanen Regionen bei der Schaffung von Planungsgrundlagen mit GPS in kürzester Zeit gelöst werden können.

Für geodätisch entwickelte Gebiete wie beispielsweise Mitteleuropa kann GPS zu einer wichtigen Grundlage in einem koordinatenbezogenen Landinformationssystem werden, wenn GPS und elektronische Tachymeter in einem einheitlichen Datenfluss integriert werden. Hier liegt eine reizvolle Zukunftsaufgabe im öffentlichen Vermessungswesen. Gerade die Schnelligkeit der Arbeiten mit GPS gestattet eine rasche Aufnahme des Istzustandes bei Planungsvorhaben sowie ländlichen und städtischen Neuordnungsmassnahmen.

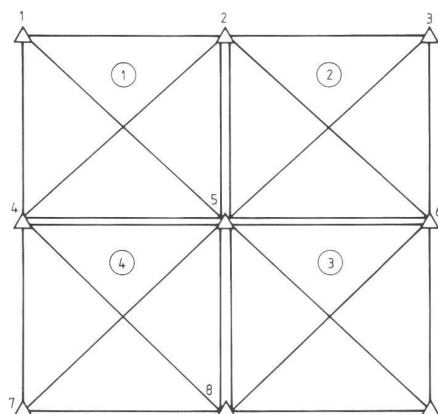


Abb. 7

3.2 Ingenieur Anwendungen

Für Überwachungs- und Ingenieuraufgaben sind nahezu unbegrenzte Einsatzmöglichkeiten denkbar:

- Bestimmung von Pass- und Kontrollpunkten für Photogrammetrie, Kartographie, Hydrographie, Inertialvermessung
- Überwachung von Punktbewegungen durch Wiederholungsmessungen bei Dammbauten, Böschungen, Bodensenkungsgebieten, Bauwerkssenkungen
- Anlage und Einrichtung von Sondernetzen für Ingenieur- und Baumasnahmen, beispielsweise für Teilchenbeschleuniger, Tunnel, Brücken, Strassen, Pipelines, Wasserstrassen.

Basislänge	1 m	10 m	100 m	1000 m	2000 m	5000 m
statisch	7'–2'	40''–10''	5''–2''	0'',6–0'',3		
kinematisch			3',5	0',35	11''	5''

Tab. 7: Azimutbestimmung mit GPS

GPS ist immer dann anwendbar, wenn keine Satellitenverdeckungen, wie z.B. bei unterirdischen Baumasnahmen, auftreten. Konventionelle geodätische Messmethoden werden deshalb sicher ihre Bedeutung für Sonderanwendungen behalten.

In vielen Fällen muss ein Kontrollnetz angelegt werden, wie es in Abb. 7 schematisiert dargestellt ist. Dieses aus neun Punkten bestehende Netz kann nach bisherigen Erfahrungen (z.B. Campos, Seeber 1988) bei Verfügbarkeit von vier Empfängern in fünf Beobachtungssessions mit einer Relativgenauigkeit von deutlich kleiner als ± 1 cm bestimmt werden, wenn die Punktdistanzen nicht über 10 km liegen. Bei der gegenwärtigen Satellitenüberdeckung reichen zwei bis drei Tage aus; in Zukunft kann ein solches Netz an einem Tag beobachtet und berechnet werden. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber terrestrischen Messverfahren liegt darin, dass keine gegenseitigen Sichtverbindungen erforderlich sind und die Punkte deshalb dort angelegt werden können, wo sie für die Baumasnahmen benötigt werden. Wenn ± 1 mm Genauigkeit verlangt wird, kommt GPS gegenwärtig an die Grenzen der Leistungsfähigkeit. Erforderlich sind eine neue Generation von Empfängern, neues Antennendesign und eine zutreffende Erfassung und Modellierung der atmosphärischen Parameter.

Bei Nutzung zweier Antennen kann GPS als Methode der Richtungsbestimmung genutzt werden. Die Richtung wird dabei aus den Koordinaten der beiden Antennenstandpunkte abgeleitet. In der Regel werden Trägerphasenbeobachtungen verwendet, um eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen; dabei tritt das Problem der Mehrdeutigkeitsbestimmung auf. Bei bekanntem Antennenabstand können hierzu besondere Algorithmen herangezogen werden. Aus Beobachtungen mit zwei TI4100 Empfangsanlagen ergab sich Tabelle 7.

Die Tabelle lässt erkennen, dass in geodätischen Netzen die Azimutinformation aus GPS wesentlich genauer entnommen werden kann als aus astronomischen Beobachtungen.

3.3 Folgerung

Im Bereich des öffentlichen Vermessungswesens wird es zu einer Integration «klassischer» Nahbereichsverfahren mit GPS kommen. GPS wird zu einer wichtigen Komponente und vielleicht Grundlage in

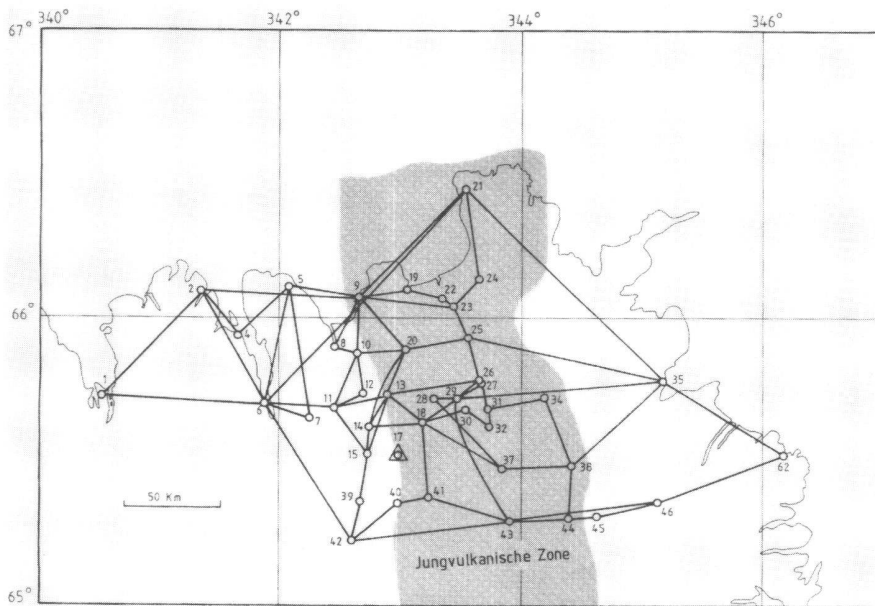


Abb. 8

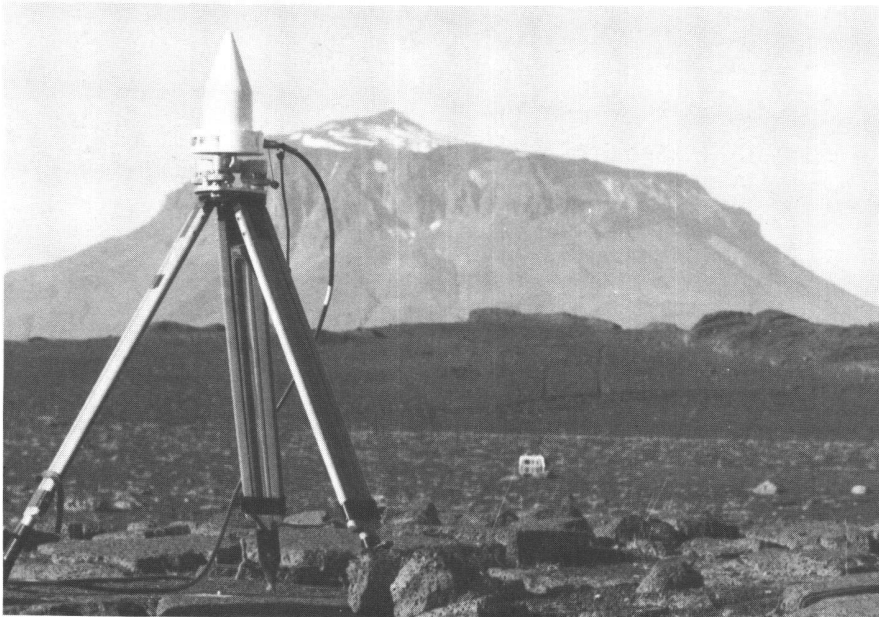


Abb. 9

einem koordinatenbezogenen Landinformationssystem.

In vielen Bereichen der Ingenieurvermessung werden bisher angewendete Methoden ihre Bedeutung erhalten. GPS wird für Überwachungsnetze und die Erfassung kinematischer Vorgänge verstärkt eingesetzt werden. Zum Teil sind Kombinationsmethoden zu erwarten.

4. Geodynamik

Das sehr hohe Genauigkeitspotential, verbunden mit vergleichsweise leicht transportabler Ausrüstung und kurzer Beobachtungszeit, macht GPS zu einem geeigneten Verfahren für die Bestimmung rezenter

Erdkrustenbewegungen. Bei der Planung von Einsätzen muss allerdings beachtet werden, dass mit GPS-Techniken eine Relativgenauigkeit von $1 \cdot 10^{-7}$ der Punktdistanz erzielt werden kann und dass für $1 \cdot 10^{-8}$ noch erhebliche Entwicklungsarbeit zu leisten ist. Mit Hinblick auf die bekannten Bewegungsraten von wenigen cm/Jahr sollten die Punktabstände nicht wesentlich grösser als 100 km sein. Andernfalls müssen längere Zeiträume zwischen Wiederholungsmessungen betrachtet werden, eine längere Beobachtungsdauer eingeplant und /oder Bahnverbesserungstechniken genutzt werden. Um beispielsweise eine Relativgenauigkeit von $1 \cdot 10^{-7}$ zu erreichen, müssen die Bahnen auf ± 2 m bestimmt werden.

4.1 Regionales Netz Nordost-Island

In der jungvulkanischen Riftzone Nordostislands (Abb. 8) werden seit längerer Zeit geodätische Arbeiten zur Erfassung des rezenten Riftgeschehens durchgeführt (Wendt u.a. 1985, Torge u.a. 1985). Im Sommer 1987 wurden in einem abgestimmten Programm terrestrische, gravimetrische und GPS Messungen in der Riftzone durchgeführt (Seeber 1987b), Abb. 9. In Kooperation mit isländischen Behörden und einer Arbeitsgruppe der Universität Durham (England) kamen sieben TI-Empfänger zum Einsatz, insgesamt wurde auf 63 Stationen beobachtet (Foulger 1987). Abb. 8 zeigt die besetzten Stationen, die in das eigentliche Untersuchungsgebiet fallen und eine Verknüpfung zu terrestrischen und gravimetrischen Messungen sowie zu früheren GPS Messungen erlauben. Vorläufige Auswertungen führten erwartungsgemäss zu einer relativen Koordinatengenauigkeit von 1–3 cm. Damit wird es sinnvoll sein, nach etwa drei Jahren Wiederholungsmessungen auszuführen, um Bewegungsraten abzuleiten, die auf 2–3 cm/Jahr geschätzt werden. Das Beispiel zeigt, dass in begrenzter Zeit von wenigen Wochen ein grösseres Punktfeld in logistisch schwierigem Gelände erfolgreich mit GPS bestimmt werden kann.

4.2 Lange Linie

In einem Experiment wurde untersucht, welche Ergebnisse im Entfernungsbereich bis etwa 1000 km zu erreichen sind (Wübbena, Seeber 1987). Neben den Radioteleskopen in Wettzell und Onsala (Schweden) wurden im Juni und November 1986 an insgesamt 20 Tagen GPS-Beobachtungen durchgeführt. Die «Sollkoordinatendifferenzen» des etwa 920 km langen Raumvektors sind aus VLBI-Beobachtungen mit einer Standardabweichung von wenigen mm bekannt. Es zeigt sich, dass bei Verwendung von Standardmodellen ohne Bahnverbesserung die einzelnen Tageslösungen von der Gesamtlösung um zumeist weniger als 30 cm abweichen. Dies entspricht einer Relativgenauigkeit von $3 \cdot 10^{-7}$ der Entfernung. Wenn das Gesamtergebnis mit einem veröffentlichten Massstabsfaktor $0,22 \cdot 10^{-6}$ von WGS72 in WGS84 umgerechnet wird (die GPS-Beobachtungen waren 1986 noch in WGS72 gegeben), dann ergibt sich eine Übereinstimmung mit der VLBI-Strecke im cm-Bereich (Tab. 8).

Hieraus lässt sich folgendes erkennen: Über grosse Entfernungen lässt sich mit GPS unter Verwendung von Broadcastephemeriden und ohne Bahnmodellierung nur eine Genauigkeit von einigen dm erreichen. Sofern präzise Bahninformationen vorliegen oder durch Referenzbeobachtungen generiert werden können, dürfte bei guter Modellierung ein Genauigkeitsniveau von wenigen cm erreichbar sein. Of-

VLBI (1983–1985):	919 661,004 m ± 0,001 m
GPS (WGS72) 15 Tage:	919 600,802 m ± 0,031 m
GPS (WGS84):	919 661,013 m ± 0,031 m
GPS (WGS84)-VLBI:	0,009 m (△ 0,01 ppm)

Tab. 8: Vergleich von GPS-VLBI über 920 km (Onsala-Wettzell)

fensichtlich führt auch eine Anhäufung von Beobachtungen zu zutreffenden Ergebnissen.

4.3 Folgerungen

Für die Bestimmung rezenter Krustenbewegungen ist GPS bereits heute ein ideales Verfahren. Terrestrische Messverfahren werden in Zukunft kaum noch eingesetzt werden. Bei grösseren Entfernungen von 1000 km und mehr muss noch sorgfältige Entwicklungsarbeit geleistet werden. Eine Anhäufung von Beobachtungen sowie Bahnverbesserungen durch Simultanbeobachtungen auf Laser/VLBI Stationen können erforderlich sein.

5. Meeres- und Glazialgeodäsie

Durch die Echtzeitfähigkeit, kontinuierliche Verfügbarkeit (im Endausbau) und hohe Genauigkeit eröffneten sich für GPS in der Meeres- und Glazialgeodäsie eine Fülle von Anwendungen. Für viele Aufgaben genügt die mit einem einzelnen Empfänger an Bord eines Schiffes erreichbare Echtzeitgenauigkeit, nämlich

- ±10... 15 m mit P-Code
- ±30... 100 m mit C/A-Code.

Wichtige Einsatzgebiete sind beispielsweise

- Positionszuordnungen bei flächenhaften Tiefenvermessungen (SEABEAM, HYDROSWEEP)
- Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung bei gravimetrischen, magnetischen und seismischen Messungen
- Kalibrierung von Unterwassertranspondern zur akustischen Positionsbestimmung von Unterwassersensoren, z.B. in der rohstoffbezogenen Meeresforschung.

Auf See kann die Höhe als bekannt vorausgesetzt werden, so dass bei Hinzuziehung eines externen Zeitnormals (Rubidium) auch mit nur zwei GPS Satelliten gearbeitet werden kann. Dies ermöglicht bereits heute eine Überdeckungsperiode von mehr als zwölf Stunden täglich.

Bei höheren Genauigkeitsanforderungen kann im Relativmodus zu Referenzpunkten an der Küste, auf Inseln oder festen Meereskonstruktionen gemessen werden. Sofern Echtzeiterfordernis vorliegt, kön-

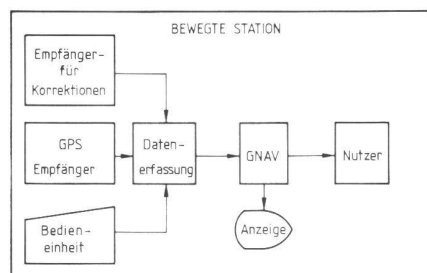
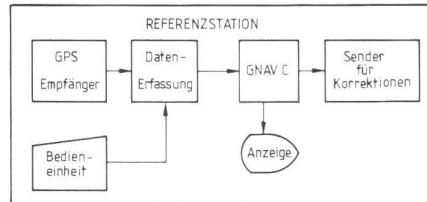


Abb. 10

nen Korrekturwerte übertragen werden. In Abb. 10 ist das Blockdiagramm des am Institut für Erdmessung entwickelten echtzeitfähigen relativen Navigationsprogramms GEONAV (Seeber u.a. 1988) dargestellt. Unter Nutzung der Trägerphasenbeobachtungen lassen sich auf See im Relativmodus Genauigkeiten im Submeterbereich erzielen (Seeber u.a. 1988). Dies ermöglicht beispielsweise die Durchführung von hydrographischen Vermessungen oder die detaillierte Untersuchung von Meeresbodenstrukturen im küstennahen Raum.

In der Glazialgeodäsie und Antarktisforschung kann GPS erfolgreich zur Eisbewegungsbestimmung eingesetzt werden (Hinze 1986). Nachstehend werden einige Beispiele vorgestellt.

5.1 Positionszuordnung bei der Meeresbodenvermessung

Zur hochauflösenden topographischen Erfassung des Meeresbodens haben sich flächenhaft arbeitende Sonarsysteme wie SEABEAM und HYDROSWEEP hervorragend bewährt (Schenke u. Ulrich 1986). Besonders das neu entwickelte HYDROSWEEP von Krupp-Atlas-Elektronik (Bremen) besitzt mit einer Streifenbreite von 200% der Wassertiefe hervorragende Leistungsdaten. Bei 5000 m Wassertiefe lässt sich damit ein 10 km breiter Bodestreifen in Fahrtrichtung des Schiffes kontinuierlich kartieren. Zur flächenhaften Ver-

messung müssen rasterförmige Figuren gefahren werden (Abb. 11), wobei an die Positionszuordnung des Schiffes hohe Anforderungen gestellt werden. Die Arbeitsgruppe des IFE nahm an insgesamt fünf derartigen Messfahrten auf den Forschungsschiffen SONNE, POLARSTERN und METEOR teil. Abb. 11 zeigt einen Ausschnitt der Messfahrt mit FS SONNE im Pazifik. Während der GPS Verfügbarkeit gelingt es, das Schiff auf vorgegebenem Parallelkurs zu halten. Sobald keine GPS Navigation mehr möglich ist – im Beispiel um 8.00 Uhr –, muss mit TRANSIT-gestützter integrierter Navigation gefahren werden. Dabei treten Aufdatierungen bis zu 1 km und mehr auf, so dass eine korrekte Positionszuordnung der Messstreifen nicht mehr möglich ist.

5.2 Relativmodus mit Trägerphasenmessung

Ebenso wie auf Land lässt sich auf See eine Genauigkeitssteigerung durch Relativmessungen zu einer festen Referenzstation erzielen. Hierzu müssen Korrekturinformationen von der Referenzstation zum Nutzer übertragen werden (vgl. Abb. 10). Von den verschiedenen Möglichkeiten hat es sich bewährt, Entfernungskorrekturen zu allen «sichtbaren» Satelliten zu übermitteln. Sofern keine Echtzeiterfordernis vorliegt, kann die Mehrstationsauswertung nachträglich durch Nachprozessieren erfolgen.

Das hohe Genauigkeitspotential der Trägerphasenmessungen kann auch im bewegten Modus auf See sowie in Landfahrzeugen ausgeschöpft werden. Abb. 12 zeigt als Beispiel die Differenz zwischen Relativmessungen mit phasengeglätteten Pseudoentfernungen und einer Sollstrecke (Seeber u.a. 1988). Der Genauigkeitsbereich von 1–2 m ist damit nachgewiesen. Sofern ausschliesslich Trägerpha-

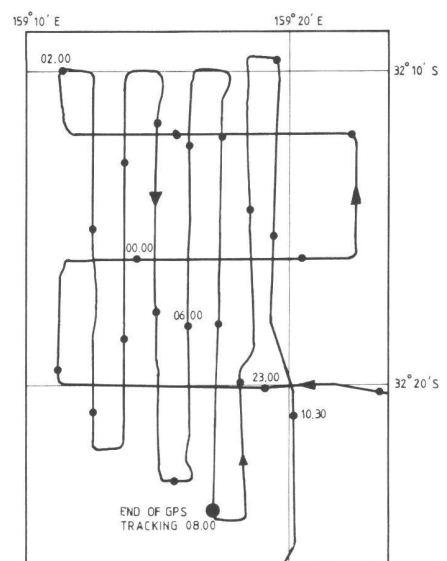


Abb. 11

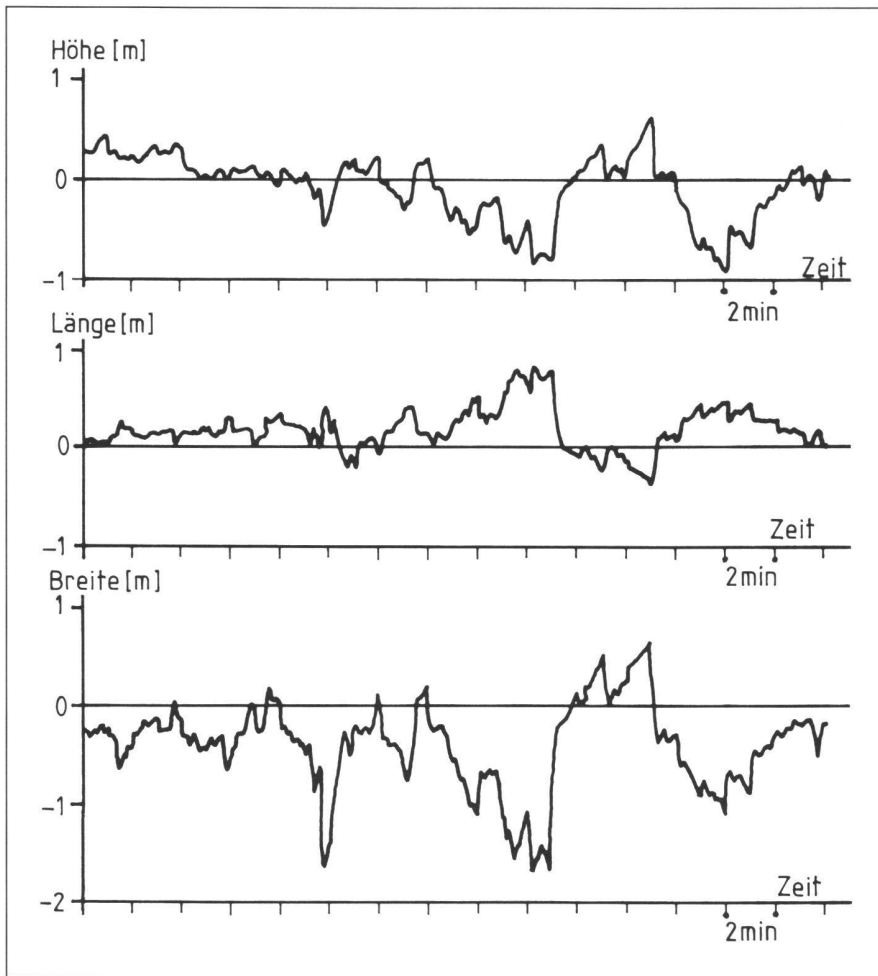


Abb. 12



Abb. 13

sen genutzt werden, ist im kinematischen Modus auch 1 dm Genauigkeit erreichbar (vgl. Abb. 15). Es treten dabei aber das Mehrdeutigkeitsproblem sowie das Cycleslipproblem (Verlust der Phasenbeziehung) auf.

Bei P-Code Empfängern wie dem TI4100 lassen sich nach jedem Cycleslip auch im kinematischen Modus die Mehrdeutigkei-

ten nach etwa einer Minute lösen. Bei anderen Empfängern helfen Verfügbarkeit beider Frequenzen sowie eine möglichst grosse Zahl von Empfangskanälen weiter. Das hohe Genauigkeitspotential von Relativmessungen unter Nutzung der Trägerphasen eröffnet Anwendungen in der Hydrographie, die dreidimensionalen Seismik und in der hochpräzisen Kombination

mit akustischen Verfahren zur Einbeziehung untermeerischer Kontrollpunkte für Fragestellungen der Plattentektonik.

5.3 Schelfeisbewegungen in der Antarktis

Seit 1982 werden vom IFE regelmässig im Rahmen von Antarktisexpeditionen Messungen zur Eisbewegungsbestimmung durchgeführt, wobei anfangs TRANSIT Doppler-Verfahren zum Einsatz kamen. Seit 1985 werden regelmässig TI4100 GPS-Empfänger eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil von GPS gegenüber TRANSIT ist, dass die erforderlichen Beobachtungszeiten erheblich kürzer sind. Auf diese Weise ist es möglich, grössere Traversen mit Motorschlitten oder Helikoptereinsatz abzuarbeiten (Abb. 13) und während einer Saison zweimal abzufahren. Wenn im Relativmodus zu einer festen Station oder zu einer Station mit bekanntem Bewegungsverhalten gemessen wird, kann eine dem statischen Einsatz vergleichbare Genauigkeit erzielt werden. Dies macht auch die Bestimmung von langsamen Bewegungen, beispielsweise 0,1 m/Tag nach nur ein bis zwei Wochen Wiederholungsrate möglich. Ein weiterer Vorteil dabei ist, dass die Punkte nicht dauerhaft vermarktet werden müssen. Abb. 14 zeigt als Beispiel die Anlage von insgesamt 16 Bewegungsstationen auf dem Ekström Schelfeis in der Nähe der deutschen Überwinterungsstation Georg von Neumeyer. Bewegungssta-

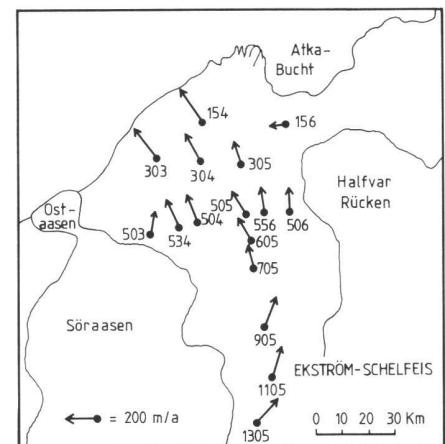


Abb. 14

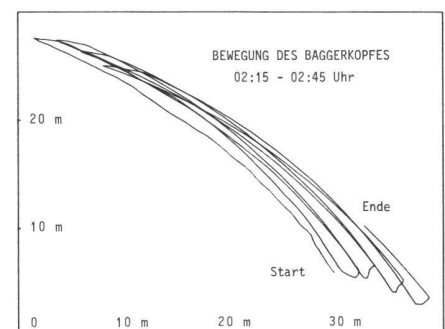


Abb. 15

parameter finden Eingang in Modelle der Eis-massenbilanzberechnung (Hinze, Seeber 1988).

5.4 Folgerungen

Für Forschungsschiffe gehört GPS heute bereits zur Standardausrüstung, da es konventionellen integrierten Anlagen um ein Vielfaches überlegen ist. Sobald das System voll ausgebaut sein wird, lassen sich die meisten Aufgaben der Präzisionsnavigation mit GPS problemlos lösen. Im Relativmodus und bei Nutzung von Trägerphasenmessungen wird GPS auch für hydrographische Vermessungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen interessant. Für den operationellen Gebrauch sind jedoch noch Probleme der Cycleslipbehebung und Mehrdeutigkeitsbestimmung zu lösen. Aufgrund der hohen Genauigkeit und Kürze der Beobachtungszeit wird GPS für Koordinatenbestimmung in polaren Regionen das primäre Messsystem sein.

6. Sonstige Anwendungen

Wie bereits mehrfach angedeutet, gibt es wegen der herausragenden Eigenschaften des GPS-Systems nahezu unbegrenzte Einsatzmöglichkeiten. Dies gilt insbesondere dann, wenn im kinematischen Modus die Trägerphasenmessung voll genutzt werden kann, so dass kontinuierliche Subdezimetergenauigkeit erreicht wird. Dies eröffnet Möglichkeiten zur Steuerung von Fahrzeugen aller Art, beispielsweise Baumaschinen, Grossbagger im Tagebau oder Stapelfahrzeuge auf Containerlagerplätzen. Bei der Steuerung und Kontrolle von Bildflugzeugen können Beiträge zur Photogrammetrie geleistet werden. Schliesslich wäre ein kontinuierliches «motorisiertes» Nivellement oder das Aufnehmen von Profilen auf Grossbaustellen denkbar. Als ein Beispiel sei ein Experiment auf einem Grossbagger im Braunkohlentagebau gezeigt (Abb. 15). Die GPS-Antenne wurde unmittelbar neben dem Schaufelrad installiert. Es zeigt sich, dass die Bewegung während des Arbeitsvorgangs mit Dezimetrauflösung erfassbar ist. Dies macht es möglich, die Baggerbewegungen innerhalb eines digitalen Geländemodelles zu steuern und zu kontrollieren. Da die Messauflösung von der Geschwindigkeit weitgehend unabhängig ist, können die hier dargestellten Ergebnisse auch auf andere Bewegungsvorgänge übertragen werden.

7. Danksagung

Die in diesem Übersichtsbeitrag vorgestellten Projekte wurden durch den engagierten Einsatz vieler Mitarbeiter und Studierender am Institut für Erdmessung ermöglicht. Manche der Projekte erfolgten in

Kooperation mit anderen Institutionen. Neben eigenen Empfangsanlagen wurden zahlreiche weitere TI4100 GPS-Empfänger durch befreundete Organisationen bereitgestellt. Die Auswertprogramme wurden sämtlich am IFE entwickelt; ein Teil der Berechnungen erfolgte am Regionalen Rechenzentrum Niedersachsen. Die jeweils Beteiligten sind in den zitierten Veröffentlichungen genannt. Darüberhinaus möchte ich mich auch an dieser Stelle bei allen Beteiligten für ihre Unterstützung bedanken.

Literatur

- Augath, W.: Die Neukoordinierung des Niedersächsischen Anteils am Deutschen Hauptdreiecksnetzes (DHDN) und des TP-Netzes 2. Ordnung. Nachr. Nieders. Verm.- u. Kat. verw. 34, 173–200, 1984.
- Beutler, G.: GPS orbit determination using the double difference phase observable. In Turner (Ed.): Applied Geodesy, 31–46, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo 1986.
- Beutler, G.: Static positioning with the Global Positioning System (GPS): State of the art. Intern. GPS Workshop Darmstadt 1988.
- Boucher, C.: GPS Receiver Technology. In Turner (Ed.): Applied Geodesy, 11–15. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo 1986.
- Campos, M.: Controle da Rede Geodésica Brasileira por Meio de Satélites do Sistema NNSS. Dissertation, Curitiba 1987.
- Campos, M., Seeber, G., Ramão, V.: Positioning with NAVSTAR GPS in Brazil. CSTG Bulletin, 10, 97–102, 1988.
- Foulger, L.: A GPS Survey of the Northern Volcanic Zone of Iceland, 1987. Dep. Geol. Sciences, Univ. Durham, 1987.
- Goad, C.C.: Precise relative position determination using Global Positioning System carrier phase measurements in a non-difference mode. Proc. 1st Int. Symp. Precise Positioning with GPS, 347–356, Rockville 1985.
- Henson, D. u.a.: Geodetic applications of the Texas Instruments TI 4100 GPS Navigator, 1st Int. Symp. Precise Positioning with GPS, Rockville 1985.
- Hinze, H.: NNSS and GPS monitor very slow ice motion. Proc. 4th Int. Geod. Symp. Satellite Positioning, 1377–1390, Austin 1986.
- Hinze, H., Seeber, G.: Ice-Motion Determination by Means of Satellite Positioning System. Annals of Glaciology 11, 1988.
- Schenke, H.-W., Ulrich, J.: Mapping the Seafloor. Applied Geography and Development, Vol. 30, 1987.
- Scherrer, A.: The WM GPS Primer. Wild Heerbrugg 1985.
- Seeber, G.: Die Rolle des NAVSTAR Global Positioning Systems für die Lösung geodätischer Aufgaben. Z.f. Verm.wesen 109, 1–11, 1984.
- Seeber, G.: Use of GPS for the Determination of Precise Height Differences-Models and Results. Boll. Geod. Scien. Aff. 16, 325–332, 1987a.
- Seeber, G.: Die Nutzung von GPS zum Nachweis rezenter Erdkrustenbewegungen. Geod. Schr. Reihe TU Braunschweig, H.7, 107–117, 1987b.
- Seeber, G.: Satellitengeodäsie. W. de Gruyter, Berlin 1989.
- Seeber, G., Wübbena, G., Augath, W.: Anlage eines örtlichen 3D Netzes mit GPS TI4100 Beobachtungen. Z.f. Verm.wesen, 111, 481–489, 1986a.
- Seeber, G., Schuchardt, A., Wübbena, G.: Precise positioning results with TI4100 receivers on moving platforms. Proc. 4th Int. Geod. Symp. Satellite Positioning, 1269–1286, Austin 1986b.
- Seeber, G., Schuchardt, A., Wübbena, G.: Beobachtung eines grossräumigen GPS-Netzes mit Zweifrequenzempfängern. Z.f. Verm.wesen, 112, 397–401, 1987a.
- Seeber, G., u.a.: Status Report on DÖNAV. Symp. «Impact of Global Positioning System on Geophysics». IUGG General Assembly, Vancouver 1987b.
- Seeber, G., Heimberg, F., Schuchardt, A., Wübbena, G.: Developments for the operational use of GPS in kinematic Modes. Int. GPS Workshop Darmstadt 1988.
- Silva, T.: Persönliche Mitteilung 1988.
- Stansell, T.A.: GPS Perspectives. Int. Nav. Congress, Sydney 1988.
- Torge, W., Kanngieser, E.: Regional and Local Vertical Crustal Movements in Northern Iceland, 1965–1980. J. Geophys. Res. 90, 10173–10177, 1985.
- Torge, W., Basić, T., Denker, H., Doliff, J., Wenzel, H.-G.: Long Range Geoid Control Through GPS Techniques – Final Results –. Paper, Chapman Conf. on Progress in the Determin. of Earth's Gravity Field, Sept. 13–16, Fort Lauderdale, 1988.
- Wendt, K.D., Möller, D., Ritter, B.: Geodetic Measurements of surface deformation during the present rifting episode in NE Iceland. J. Geophys. Res. 90, 10163–10172, 1985.
- Wells, D.: (Hrsg.): Guide to GPS Positioning. Fredericton, Canada 1986.
- Wübbena, G.: Model and program developments for cm-positioning with GPS. Proc. FIG Joint Meeting Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Survey, 553–565, München 1985.
- Wübbena, G., Seeber, G.: Analysis of multiple TI4100 GPS measurements over a 920 km VLBI baseline. Symp. «Impact of Global Positioning Systems on Geophysics». IUGG Gen. Assembly, Vancouver 1987.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber
Institut für Erdmessung
Universität Hannover
Nienburger Strasse 6
D-3000 Hannover 1