

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

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 89 (1991)

Heft: 8

Artikel: GPS-Präzisionsnetz zur Bestimmung von rezenten Krustenbewegungen in der Nordschweiz

Autor: Wiget, A. / Gubler, E. / Schneider, D.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-234596>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 17.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

GPS-Präzisionsnetz zur Bestimmung von rezenten Krustenbewegungen in der Nordschweiz

A. Wiget, E. Gubler, D. Schneider

Im Auftrag der NAGRA hat das Bundesamt für Landestopographie 1987–1988 in der Nordschweiz ein hochpräzises GPS-Netz mit 25 Stationen (40×80 km) zur Überwachung von regionalen rezenten Krustenbewegungen installiert. Die Messanlage wurde anhand einer Präanalyse mit simulierten Beobachtungen optimiert. Das Netz wurde dann im Oktober 1988 in zwei aufeinanderfolgenden Kampagnen zu je vier Tagen mit drei Zweifrequenzen- und sieben Einfrequenzen-Empfängern gemessen. Die Sessionslänge betrug 4.5 Stunden zwischen Mitternacht und Sonnenaufgang, während denen insgesamt sieben Satelliten beobachtet werden konnten. Bei der Auswertung der Daten wurde der Modellierung systematischer Einflüsse, wie Offsets der Antennen-Phasenzentren, Satellitenbahnfehler oder troposphärische und ionosphärische Refraktion, besondere Beachtung geschenkt. Die mittleren relativen Phasenzentren aller Antennen wurden in Kurzstreckentests vorgängig bestimmt. Vier verschiedene Typen von Satellitenbahnen wurden verwendet und miteinander verglichen: (1) Broadcast Ephemeriden, (2) Präzise Ephemeriden der US DMA sowie eigene nachträglich bestimmte Satellitenbahnen unter Verwendung (3) der Zweifrequenzmessungen im Netz und (4) zusätzlicher Beobachtungen von kontinentalen Referenzstationen. Die troposphärische Refraktion wurde mittels Standard-Atmosphärenmodellen wie auch aus den auf den Stationen gemessenen lokalen Meteodaten modelliert. Als weitere Optionen wurden aus den GPS-Daten selber pro Session einerseits ein Troposphärenparameter pro Basislinie und andererseits ein lokales Troposphärenmodell mit linearer Höhenabhängigkeit der troposphärischen Zenit-Korrektur geschätzt. Für die Ionosphäre bestimmte man aus den lokalen Zweifrequenzen-Daten je ein Einschicht-Modell pro Session. Durch Vergleiche der zwei viertägigen Kampagnen konnte die Konsistenz der Lösungen unter Anwendung all dieser verschiedenen Modelle zur Elimination systematischer Fehler geprüft werden. Aus der Wiederholbarkeit zwischen den zwei Kampagnen werden die innere Genauigkeit des Netzes zu 4 mm in der Lage und 6 mm in der Höhe (1 Sigma) geschätzt.

Mandaté par la CEDRA, l'Office fédéral de topographie a installé en 1987–1988 un réseau GPS de haute précision de 25 stations (40×80 km) au nord de la Suisse pour la détermination de mouvements régionaux de l'écorce terrestre. Une pré-analyse faite d'observations simulées a permis d'optimiser la répartition des observations. Le réseau a été mesuré en deux campagnes successives de quatre jours à l'aide de trois récepteurs à deux fréquences et sept à une seule. Une attention particulière a été accordée aux effets systématiques tels que l'excentricité du centre de phase des antennes, les erreurs des paramètres orbitaux, la réfraction troposphérique et ionosphérique. L'excentricité du centre de phase a été déterminée préalablement, pour chaque antenne utilisée, par des tests sur de courtes lignes de base. Quatre types d'orbites différentes ont été comparés: éphémérides diffusées par les satellites (broadcast), éphémérides précises fournies par US DMA et orbites estimées par les données des campagnes, de même qu'avec celles de trois stations européennes. La prise en compte de la réfraction troposphérique s'est faite à l'aide de modèles atmosphériques standards et des valeurs météo mesurées aux stations. Comme variantes supplémentaires, des paramètres troposphériques relatifs ont été estimés uniquement à l'aide des phases des ondes porteuses du GPS. Un modèle local a été calculé pour la ionosphère. La précision relative (1 sigma) du réseau par la répétition des mesures peut être estimée à 4 mm en planimétrie et à 6 mm en altimétrie.

1. Einleitung

Das Bundesamt für Landestopographie (L+T) befasst sich schon seit Jahrzehnten mit der Untersuchung von rezenten Bewe-

gungen der obersten Erdkruste mit Hilfe von wiederholten geodätischen Messungen. Seit Ende der Sechzigerjahre werden aus den Resultaten der wiederholten Messungen des Schweizerischen Landesni-

vellements systematisch relative Vertikal-komponenten der Geschwindigkeit von ausgewählten Nivellementsfixpunkten berechnet. Leider erlaubt die begrenzte Genauigkeit der Messungen der Landestriangulation ein ähnliches Vorgehen für die Bestimmung der horizontalen Komponenten der Geschwindigkeit nicht. Erst die modernen geodätischen Messmethoden eröffnen nun Möglichkeiten, auch relative Horizontalbewegungen nach der Wiederholung der Messungen nach wenigen Jahren signifikant nachzuweisen.

Die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) führt erdwissenschaftliche Untersuchungen zur Standortwahl eines künftigen Endlagers für radioaktive Abfälle durch. Ihre Arbeitsgruppe Neotektonik, in welcher unsere Dienststelle vertreten ist, hat bis heute mehrere geodätische Untersuchungen geplant und durchgeführt. So wurde eine umfassende Analyse von vertikalen Relativbewegungen (in der Grössenordnung von 0.3 mm/Jahr) auf Grund von wiederholten Nivellements in der Nordschweiz und im angrenzenden süddeutschen Raum abgeschlossen [Gubler et al., 1984; Mälzer et al., 1988].

Ein Projektvorschlag für die Messung eines Präzisions-Distanznetzes [Gubler und Schneider, 1983] konnte aus Kostengründen nicht realisiert werden. Seit den frühen Achtzigerjahren ist die satellitengestützte Vermessung mit dem Global Positioning System (GPS) in Entwicklung, welche ganz neue Möglichkeiten für die Lösung der schwierigen Untersuchungsaufgabe anbietet. Da sich unser Amt intensiv mit der praktischen Einführung dieser neuen Messtechnik für die Landesvermessung befasste, erhielten wir 1986 den Auftrag, einen Projektvorschlag für die Installation und die Erstmessung eines GPS-Überwachungsnetzes auszuarbeiten. Dieses GPS-Netz «Neotektonik» hat zum Ziel, innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte allfällige kleinste Relativbewegungen von ausgewählten Punkten der obersten Kruste in der Nordschweiz signifikant nachzuweisen.

Im Untersuchungsgebiet muss mit sehr geringen Deformationen und damit äusserst kleinen Beträgen der relativen Bewegungs-Geschwindigkeit gerechnet werden. Daher war es wichtig, die ersten Messungen mit höchster Messgenauigkeit so früh als möglich und die Wiederholungen in kurzen Abständen (Intervall 3–5 Jahre) vorzusehen. Der Vermeidung beziehungsweise Eliminierung von systematischen Fehlern durch optimale Messanordnungen im Feld sowie durch die Anwendung geeigneter Modelle bei der Auswertung der Daten kam zudem grösste Bedeutung zu. Die Grösse der zufälligen und systematischen Messfehler wurde anhand einer kurz aufeinanderfolgenden Doppel-messung abgeschätzt. Besondere Beach-

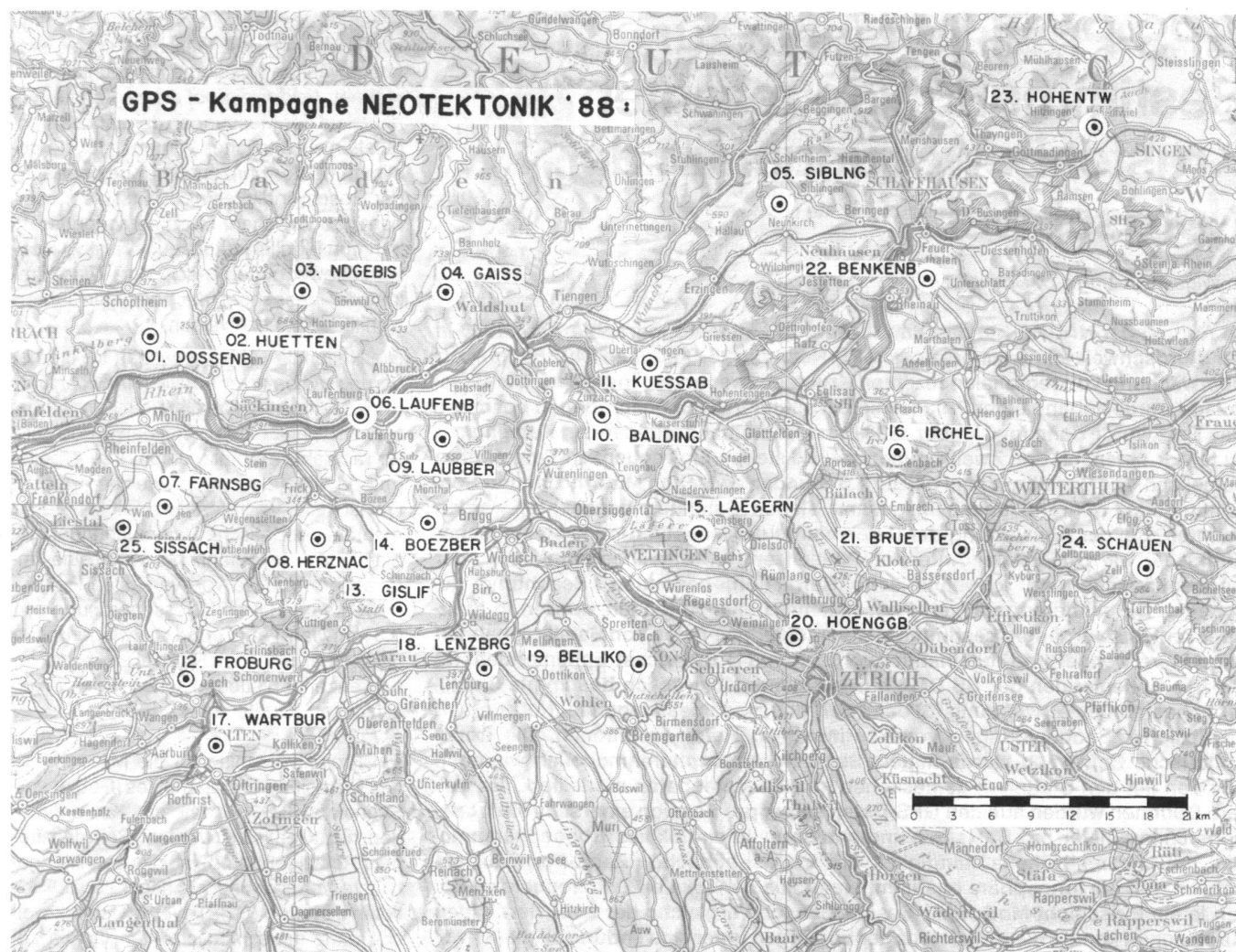


Abb. 1: Übersichtskarte der Kontrollpunkte im GPS-Netz «Neotektonik».

tung wurde namentlich der Bestimmung der Ablagen der Antennen-Phasenzentren, den Einflüssen der Satelliten-Bahnparameter sowie der troposphärischen und ionosphärischen Refraktion geschenkt. Diese Refraktionseinflüsse sind durch die besonderen Ausbreitungsbedingungen für die Satellitensignale in den verschiedenen Schichten der Atmosphäre bedingt. Als Troposphäre wird der untere Teil der Erdatmosphäre bis in zirka 40 km Höhe bezeichnet, in dem die Wellenausbreitung vor allem durch Wasserdampf und die temperaturbedingte Luftschichtung beeinflusst wird. Die Ionosphäre ist der Teil der Erdatmosphäre von etwa 70 km bis oberhalb 1000 km Höhe, in dem freie Elektronen und Ionen die Ausbreitung von Radiowellen beeinflussen. Im Unterschied zum Brechungsindex in der Troposphäre ist jener in der Ionosphäre für Radiosignale abhängig von der Frequenz der Wellen.

2. Netzentwurf

Idealnetz:

Als Ausgangspunkt für die Projektierung hatte Dr. W. Müller (Projektleiter Geologie

der NAGRA) einen «Idealentwurf» auf der Grundlage der geologischen Karte der Nordschweiz vorgelegt. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von der Linie Rheinfelden–Sissach–Olten im Westen bis zur Linie Singen–Frauenfeld–Turenthal im Osten (vgl. Karte Abb. 1). Im Norden ist es begrenzt durch den Schwarzwald-Südfuss, den Randen und den Südrand des Hegau und im Süden durch die Linie Jurasüdfuss–Limmattal–oberes Tösstal. Von besonderem Interesse sind lokale, relative Blockbewegungen im Bereich bekannter Verwerfungslinien im Jura und entlang des Aaredurchbruchs zwischen Brugg und Klingnau sowie weiträumige Deformationen (Dehnungen oder Scherungen) der obersten Kruste zwischen dem Grundgebirge des Schwarzwaldes, dem Jura und dem Mittelland.

Rekognoszierung:

Es galt nun geeignete Lösungen für die stabile Versicherung der Kontrollpunkte in der Nähe der vorgeschlagenen Standorte zu finden. Bei der Standortwahl der Kontrollpunkte wurden die folgenden Kriterien beachtet:

1. Geologische Eignung des Standortes für eine stabile Versicherung beziehungsweise Rückversicherung der Kontrollpunkte
2. Dauerhaftigkeit der Versicherung (Bautätigkeit und Vegetation)
3. Gute Empfangsbedingungen für die Satellitensignale (Hindernisse, Störungen durch Sendeanlagen etc.)
4. Gute Zugänglichkeit (i.A. bis 30 m mit 4WD-Fahrzeug)
5. Akzeptanz durch Grundeigentümer.

Die Rekognoszierung erwies sich als schwierig. Oft konnten nicht alle Kriterien optimal eingehalten werden. Der Auswahl und Materialisierung der Kontrollpunkte wurde jedoch besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Wo immer möglich wurden die Kontrollpunkte sowie die zugehörigen Rückversicherungs-Punktgruppen im stabilen, anstehenden Fels oder auf gut fundierten Bauwerken festgelegt. Allfällige Eigenbewegungen der Kontrollpunkte können in Zukunft durch wiederholte Rückversicherungsmessungen aufgedeckt werden.



Abb. 2: Rammsondierung zur Bestimmung der Tiefe des anstehenden Felsens.

Geologische Beurteilung der Kontrollpunkte:

Die geologische Eignung der Standorte und ihre Repräsentativität für die örtliche geologische Formation wurde anhand der geologisch-tektonischen Karte 1:100 000 im Gespräch mit dem Geologen beurteilt. Bei einzelnen Punkten wurde noch eine Feldbegehung mit dem Geologen vorgenommen. Die Tiefe des anstehenden Felsens wurde durch Rammsondierungen bestimmt und der lokal beste Standort ausgewählt (vgl. Abb. 2).

Bei den meisten Punkten wurde zudem ein dynamischer Stabilitätstest nach der Methode von Dr. N. Pavoni (Inst. für Geophysik, ETH Zürich) durchgeführt. Dabei wird das zu prüfende Felsobjekt in der Nähe des Bolzens (i.A. ca. 1 m) mechanisch angeregt und die induzierte Schwingung (Vertikalauslenkung) mit einem Geophon gemessen (vgl. Abb. 3). Das verstärkte, gefilterte und integrierte Signal wird auf einem elektronischen Anzeigegerät ausgegeben. Dieses System erlaubt jedem Beobachter zumindest eine vergleichende Beurteilung der Stabilität der verschiedenen Untergründe. Die Resultate dieser Untersuchungen wurden zusammen mit den Einmessungen der Rückversicherungen in einer ausführlichen Dokumentation über die Netzinstallation archiviert. Alle Kontrollpunkte wurden dann nach einem Schema der geologischen Eignung klassiert ([a] direkt im Fels, [b] in einem auf Fels fundierten stabilen Bauwerk versetzt, [c] in einem massiven Betonfundament oder stabilen Bauwerk gesetzt, das in Lockergestein oder auf Moräne fundiert ist). Weitere Detailbeurteilun-

gen sind nach der zweiten Messung des Netzes mit Wiederholung der Rückversicherungs-Einmessungen im Rahmen der Deformationsanalyse vorgesehen.

3. Installation des Netzes

An die Materialisierung der Kontrollpunkte wurden folgende Anforderungen gestellt:

1. Dauerhafte und sichere Festlegungen während mehreren Jahrzehnten
2. Geometrische Punktdefinition in Lage und Höhe auf den Zehntelsmillimeter
3. Möglichkeit der optischen Zentrierung und stabilen Fixierung der Messgeräte mit Submillimeter-Genauigkeit.

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, musste Installationsmaterial verwendet werden, welches normalerweise bei Ingenieurvermessungen eingesetzt wird. Die Stationspunkte wurden durch sogenannte Kappenbolzen versichert. Dieser geschützte Bolzen erlaubt auch nach Jahren noch eine genaue Punktdefinition.

Die Installationsarbeiten erfolgten in den Jahren 1987 und 1988. Der sorgfältigen Dokumentation der Kontrollpunkte wurde grösste Beachtung geschenkt. Die bei den Grabarbeiten gewonnenen Erkenntnisse über den Untergrund wurden dokumentiert. Über jeden Kontrollpunkt wurde ein Versicherungsblatt mit Skizze und Beschreibung der Festlegung der Kontrollpunkte und der Rückversicherungen angelegt.

4. Präanalyse

Die Berner GPS-Software des Astronomischen Institutes der Universität Bern

(AIUB) ermöglicht die Simulation von GPS-Messungen und deren Auswertung. Dabei können nicht nur zufällige Fehleranteile, sondern auch systematische Effekte (Einflüsse der Satellitenbahnen, der Ionosphäre und der Troposphäre) modelliert werden. Das AIUB hat 1987 im Auftrag der L+T eine Simulation und Präanalyse des GPS-Netzes NAGRA/Neotektonik durchgeführt [Beutler und Gurtner, 1987]. Die wichtigsten Fragen, die es dabei zu beantworten gab, waren:

- Wieviele Zweifrequenzen-Empfänger müssen mindestens eingesetzt werden?
- Durch wieviele gemeinsame Stationen sollen die einzelnen Sessionen untereinander verknüpft werden?
- Welches ist das beste Messprogramm für sechs, sieben und acht Einfrequenz-Empfänger?
- Welche Einflüsse haben systematische Fehler und wie können sie vermindert werden?

Die Präanalyse wurde in drei Varianten mit sechs, sieben oder acht Einfrequenz-Empfängern und einer, zwei oder drei gemeinsamen L1-Stationen pro Session durchgerechnet. Zudem wurde angenommen, dass simultan dazu drei Zweifrequenzen-Empfänger auf Randstationen eingesetzt würden. Zweck dieser Empfänger war einerseits, den durch die Einflüsse der Ionosphäre verursachten Massstabsfehler zu eliminieren, und andererseits die Bahnverbesserung zu unterstützen und die Geometrie der L1-Kampagne zu stärken.

Eine erste Simulation ohne systematische Fehler aber mit einem Rauschen der Pha-



Abb. 3: Dynamischer Stabilitätstest nach der Methode von Dr. N. Pavoni (Inst. für Geophysik, ETH Zürich). Dabei wird das zu prüfende Felsobjekt mechanisch angeregt und die induzierte Schwingung mit einem Geophon gemessen.

senmessungen von 5 mm (1 Sigma) ergab mittlere relative horizontale Lagefehler in der Grössenordnung von 1 mm (rms) und mittlere Höhenfehler von bis zu 2 mm für die Varianten mit zwei oder drei gemeinsamen L1-Stationen zur Verknüpfung der Sessionen. Wurde nur eine gemeinsame L1-Station pro Session angenommen, so verdoppelten sich diese mittleren Fehler. Als systematische Fehler wurden Satelliten-Bahnfehler sowie troposphärische und ionosphärische Refraktion der Trägerphasen simuliert. Im Prinzip ist es relativ einfach, mittels Simulationstechniken den Einfluss der Bahnfehler auf die gerechneten Stationskoordinaten abzuschätzen. Es ist aber nicht trivial, realistische Annahmen betreffend Art und Grössenordnung der Bahnfehler zu machen. In der Präanalyse wurden nur Fehler längs der Satellitenbahn («along track») angenommen. Diese Annahme ist begründet, wenn Bahnen verwendet werden, die über ein längeres Zeitintervall (z.B. eine Woche) extrapoliert worden sind. In diesen Fällen dominieren zwangsläufig die «along track» Fehler. Lediglich um der Grössenordnung gerecht zu werden, wurden die in der Tabelle 1 für die einzelnen Satelliten angegebenen Längsfehler eingeführt. Diese sind nach unserer Erfahrung selbst für die sogenannten Broadcast-Bahnen immer noch viel zu pessimistisch, sofern keine künstliche Verschlechterung durch sogenannte «selective availability» vorliegt. Wurden diese Bahnfehler eingeführt, so verschlechterte dies insbesondere die Höhen, während die durchschnittlichen Residuen der Lagekoordinaten nach der Transformation auf die «wahren» Koordinaten ca. 2 mm betrugen. Dieses Resultat folgt auch aus theoretischen Überlegungen [Beutler et al., 1988].

Dasselbe Bild zeigt sich nach der Einführung von simulierten troposphärischen Einflüssen (Tab. 1, Troposphäre b): Die horizontalen Koordinaten stimmten immer noch durchschnittlich auf 2 mm mit den entsprechenden Werten ohne systematische Einflüsse überein, aber in den Höhen wurden Fehler von durchschnittlich 50 mm verursacht.

Der Hauptunterschied beim Einführen des Ionosphäreneinflusses (Tab. 1, Ionosphäre b) war ein Massstabsfaktor von 2 mm/km, die Residuen betrugen zirka 2 mm.

Zusammenfassend kam die Studie zum Schluss, dass mindestens drei Zweifrequenzen-Empfänger während der ganzen Kampagne stationär auf denselben Stationen belassen werden sollten und die übrigen Punkte mit mindestens sieben Einfrequenz-Empfängern in vier Messtagen (vier Teilnetze mit je zwei Punkten Überlappung) eingemessen werden sollten. Die relative Punktgenauigkeit im Netz wurde auf etwa 3 mm Standardabweichung an den Koordinatendifferenzen

Anzahl Satelliten	6
Anzahl L1-Empfänger	6-8
Anzahl L1/L2-Empfänger	3
Sessionsdauer	4 Stunden
Epochen-Intervall	4 Minuten
Mittlerer Fehler der Code-Beobachtungen	10 m
Mittlerer Fehler der Phasenmessungen	5 mm
Minimale Elevation	20 Grad

Bahnfehler:

Abweichungen der a priori Bahn von der „wahren“ Bahn, nur Längsfehler:

Unterschiedlich, je nach Satellit zwischen 7 m und 30 m;
zu Testzwecken für Satellit Nr. 08 am letzten Tag 90 m.

Troposphären-Parameter auf Meereshöhe:

- a) ohne systematische Fehler: $P = 1013.2 \text{ mbar}$, $T = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 50 \%$
b) schlimmster Fall: $P = 1013.2 \text{ mbar}$, $T = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 100 \%$
mittl. zufällige Trop.fehler $dP = 1 \text{ mbar}$, $dT = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $dH = 1 \%$
maxim. systemat. Trop.fehler $dP = 1 \text{ mbar}$, $dT = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $dH = 5 \%$

Ionosphären-Parameter eines Einsicht-Modelles der Ionosphäre mit konstanter Elektronendichte E:

- a) ohne systematische Fehler:
totaler Elektronengehalt $E = 0$
Varianz der Änderung pro Minute $v = 1 \cdot 10^{16} \text{ Elektr./m}^2$
b) schlimmster Fall:
totaler Elektronengehalt $E = 30 \cdot 10^{16} \text{ Elektr./m}^2$
Varianz der Änderung pro Minute $v = 5 \cdot 10^{16} \text{ Elektr./m}^2$

Tab. 1: Test-Eigenschaften für die Daten-Simulation.

(Lage) geschätzt. Dies unter der Voraussetzung, dass die Messdaten mit der Berner GPS-Software ausgewertet würden und alle wichtigen systematischen Fehler-einflüsse anhand von Modellrechnungen berücksichtigt würden.

5. Messkampagne

Die GPS-Kampagne für das Neotektonik-Netz wurde durch die L+T (Sektion Nivellement und geodätische Spezialarbeiten) organisiert und im Oktober 1988 im Detail geplant und durchgeführt. Insbesondere aus logistischen Gründen wurde sie mit den GPS-Messungen für die Grundlagenvermessung des Wisenbergtunnels der Neubaustrecke Muttens–Olten der Bahn 2000 (im Auftrag der Schweizerischen Bundesbahnen SBB) kombiniert. Beide Netze erforderten wegen ihren Zielsetzungen (Neotektonik beziehungsweise Tunnelabsteckung für Bahn-Neubaustrecke) bestmögliche Präzision der relativen Positionierung. Da sie drei Punkte gemeinsam haben, ermöglichen sie zudem eine gegenseitige Verstärkung.

Bei den Messungen wurde die L+T durch das Landesverwaltungsamt Niedersachsen (LVA-NS, Hannover) mit zwei Operateuren und sechs GPS-Empfängern unterstützt. Zudem haben verschiedene weitere Institutionen und Einzelpersonen direkt oder indirekt bei der Vorbereitung und Durchführung der Messkampagne mitgewirkt.

Trackingnetz:

Als sogenannte «Fiducial Points» (Punkte mit vorgegebenen Koordinaten) für die

nachträgliche eigene Bahnverbesserung mit der Berner GPS Software wurden die Messdaten von zwei europäischen Tracking-Stationen des «Cooperative International GPS Network» (CIGNET), Onsala (Schweden; VLBI-Station) und Wettzell (BRD; Satelliten-Laser- und VLBI-Station), verwendet. Als dritte Referenzstation wurde die Satellitenbeobachtungs-Station Zimmerwald der Universität Bern im Rahmen dieser Kampagne versuchsweise als Permanentstation betrieben. Leider konnte auf einem vierten Fiducial Point, «Graz-Lustbühl» in Österreich, wegen technischen Problemen nicht gemessen werden. Die Koordinaten der Fiducial Stationen wurden auf den BTS87-Werten festgehalten [Boucher et al., 1988].

Netz «Neotektonik»

Das 1988 gemessene Netz besteht aus 25 Kontrollpunkten und hat eine Ausdehnung von ca. 40 km (Nord-Süd) und 80 km (Ost-West). Die Höhen der Stationen variieren zwischen 360 m und 900 m ü.M. Das Netz wurde gegenüber dem simulierten Netz der Präanalyse insbesondere nach Osten erweitert (21. Brütten, 22. Benken, 23. Hohentwiel, 24. Schauenberg).

Personal:

Ein GPS-Empfänger wurde normalerweise von einem Operateur bedient, der über ein eigenes Fahrzeug verfügte und damit unabhängig arbeiten konnte. Insgesamt standen elf sorgfältig ausgebildete Operateure der Abteilung Geodäsie sowie des LVA-NS und vier Gehilfen im Einsatz. Per Funk, zum Teil via Relaisstationen,

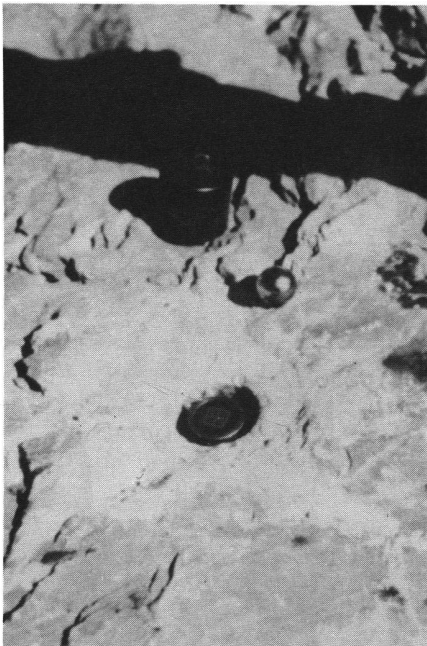


Abb. 4: Die Kontrollpunkte wurden durch Kappenbolzen versichert. Für die exakte Zentrierung wird ein mit einem Millimeterraster versehener Einsatzzapfen (sog. «Le Pont-Zapfen») in den Kappenbolzen eingesetzt. Eine in den Bolzen eingesetzte Stahlkugel mit konstantem Durchmesser definiert die exakte Referenz für die zu nivellierende Antennenhöhe.

konnten alle Operateure vom Einsatzleiter jederzeit erreicht werden.

GPS-Empfänger:

Als GPS-Empfänger wurden im Netz ausschliesslich von der Firma Trimble Navigation Ltd. in den USA hergestellte Geräte folgender Typen verwendet:

- 1 4000 SD (L1/L2) Leihgerät Firma Trimble Nav. Ltd. (Zimmerwald)
- 4 4000 SLD (L1/L2) je zwei von LVA-NS und L+T
- 4 4000 SX (L1) LVA-NS
- 2 4000 SL (L1) L+T

Wegen technischen Problemen mit einer Zweifrequenzen-Antenne musste einer der 4000 SLD Empfänger mit einer Einfrequenz-Antenne betrieben werden. Insgesamt konnten drei Zweifrequenzen- und sieben Einfrequenz-Empfänger eingesetzt werden, womit die anhand der Präanalyse geforderten Mittel zur Verfügung standen. Die Station Zimmerwald wurde mit einem zusätzlichen Zweifrequenzen-Empfänger Trimble 4000 SD besetzt; auf den zwei CIGNET Stationen Onsala und Wettzell standen TI-4100 Zweifrequenzen-Empfänger im Einsatz.

Meteorologische Daten:

Ausser den eigentlichen GPS-Messungen wurden auf allen Stationen alle 30 Minuten lokale Meteodaten erhoben, nämlich

Trockentemperatur, Feuchttemperatur und Luftdruck. Als Messgeräte wurden 11 Haenni Aspirations-Psychrometer und 10 Thommen Barometer (Typ 3B4) verwendet. Die Psychrometer wurden vor und nach der Kampagne miteinander verglichen; es mussten keine Eichkorrekturen

angebracht werden. Die Barometer wurden vor und nach der Kampagne beim Eidg. Amt für Messwesen in Wabern mit dem dortigen Eichbarometer verglichen. Für alle Barometer wurde eine Eichkurve bestimmt und die Messwerte der Kampagne entsprechend korrigiert.

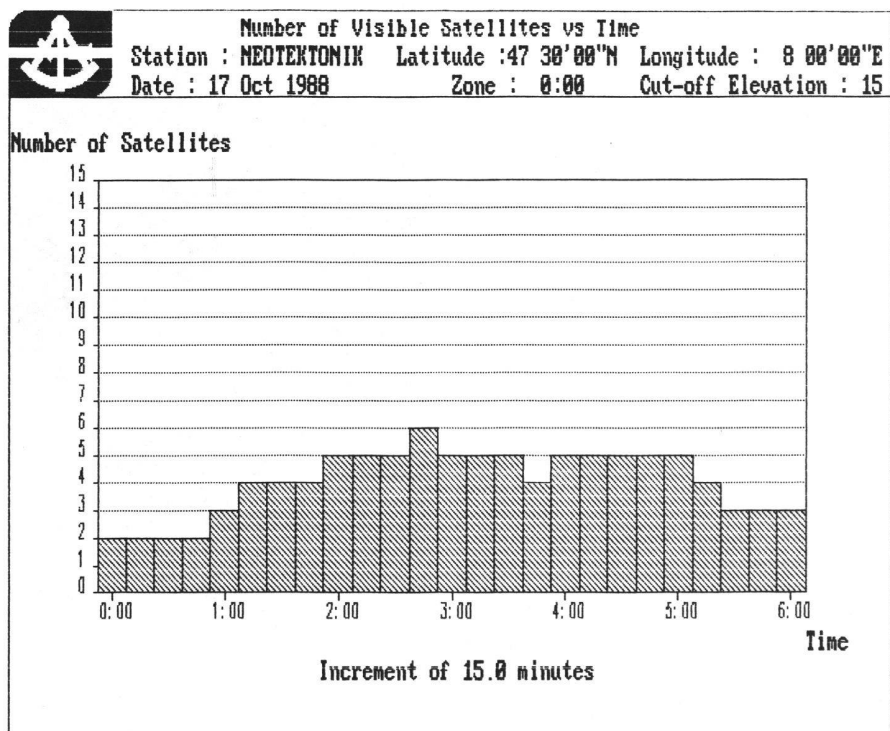
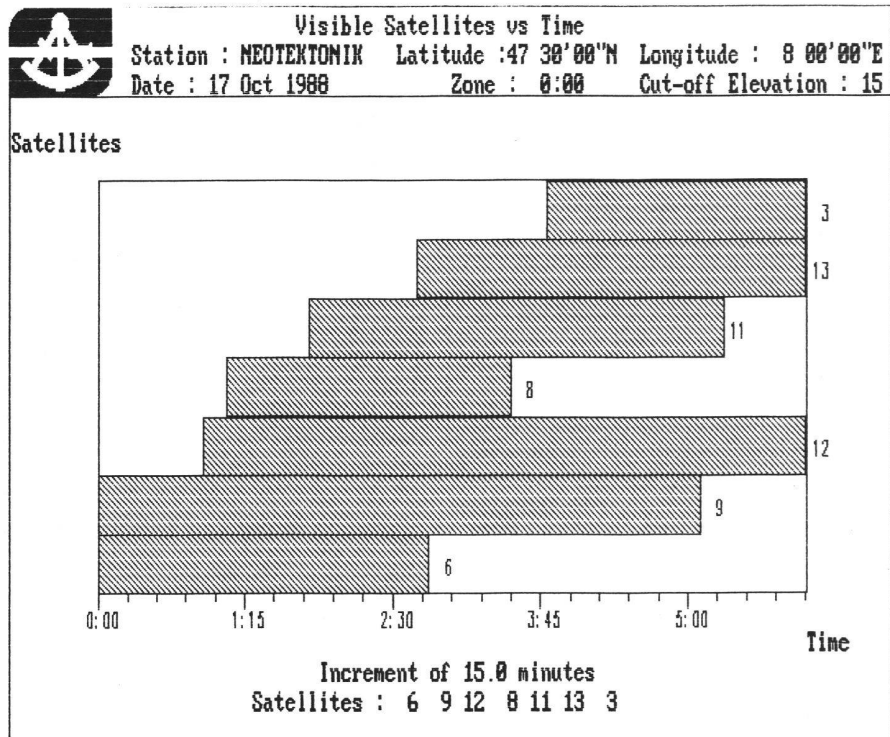
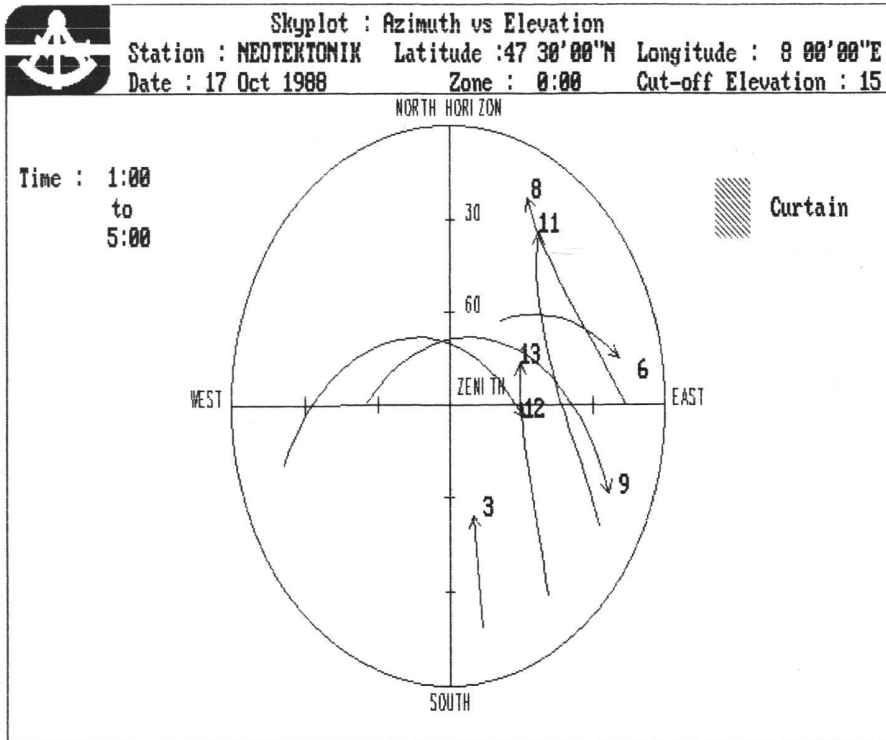


Abb. 5: GPS-Satellitenkonstellation im Oktober 1988.

- a) Satelliten-Sichtbarkeit am 17. Okt. 88 in der Nordschweiz; minimale Elevation der Satelliten 15°; Zeiten in GMT/UTC.
- b) Gesamtzahl der sichtbaren Satelliten zwischen Mitternacht und 06:00 Uhr GMT/UTC.



c) Verteilung der GPS-Satelliten über 15° Elevation in der Zeit zwischen 01:00 und 05:00 Uhr GMT/UTC.

Aufstellung und Zentrierung:

Die Antennen wurden grösstenteils auf demontierbaren Stahlpfeilern festgeschraubt und mittels optischer Lotung und Kreuzschlitten mit einer Standardabweichung <0.5 mm über den Kappenbolzen zentriert. Dazu wurde ein mit einem Millimeterraster versehener Einsatzzapfen (sogenannte «Le Pont-Zapfen») in den Kappenbolzen eingesetzt (vgl. Abb. 4). Die Antennenhöhen wurden nivelliert. Eine in den Bolzen eingesetzte Stahlkugel mit konstantem Durchmesser definierte dabei die exakte Referenz für die Höhe.

Terrestrische Rückversicherungen:

Um die im Gelände materialisierten Kontrollpunkte im Falle von Beschädigungen oder gar Zerstörung am gleichen Ort wieder rekonstruieren zu können sowie um allfällige Eigenbewegungen aufdecken zu können, wurden alle GPS-Punkte exzentrisch rückversichert. Üblicherweise bestand eine Punktgruppe aus einem Kappenbolzen und zwei bis vier Exzentrumsbolzen (Bolzen mit 5mm-Loch für die Zentrier-Einsätze).

Alle exzentrischen Rückversicherungen wurden terrestrisch mit Richtungs- und Distanzmessungen realisiert. Mit Ausnahme einiger weniger Punkte wurden die Einmessungen noch während der GPS-Kampagne im Herbst 1988 durchgeführt. Einzelne wurden erst später eingemessen und zum Teil noch an der Landestriangulation angeschlossen. Grundsätzlich waren jedoch alle Punkte im Sommer 1989 derart überbestimmt eingemessen, dass

eine kontrollierte Rekonstruktion des GPS-Hauptpunktes möglich sein sollte.

GPS-Satelliten-Konstellation:

Im Oktober 1988 war das optimale sogenannte «Beobachtungsfenster» mit min-

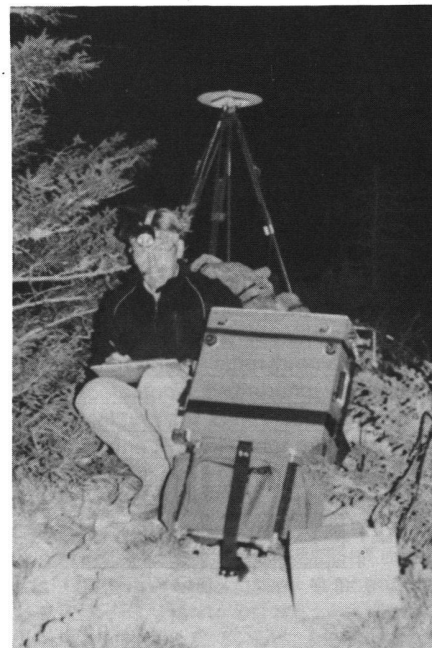


Abb. 6: Operateur mit einem auf dem Tragrät montierten GPS-Empfänger. Im Vordergrund die Batterie, im Hintergrund die Antenne. Wegen der geringen Ionosphärenaktivität wurde der Zeitpunkt der GPS-Messungen so gewählt, dass diese nachts bis in die frühen Morgenstunden stattfanden.



Abb. 7: Vor der eigentlichen Messkampagne im Netz wurden alle eingesetzten Empfänger auf der Teststrecke der L+T in Thun geprüft und die individuellen Offsets der Phasenzentren für alle Antennen bestimmt. Auf dem Bild ist auch ein Stahlpfeiler für die stabile Montage der Antennen zu erkennen.

destens vier Satelliten in den frühen Morgenstunden und dauerte 4 Stunden 20 Minuten (vgl. Abb. 5a–c): Zu Beginn der Kampagne von 01:05 Uhr bis 05:25 Uhr (GMT/UTC), am Schluss der Kampagne von 00:30 Uhr bis 04:50 Uhr (GMT/UTC). Pro Tag verschob sich das Fenster um 4 Minuten früher in die Nacht. Zu dieser Zeit waren insgesamt 7 Satelliten brauchbar, nämlich die PRN-Nummern 3, 6, 8, 9, 11, 12, 13. Die minimale Elevation der zu beobachtenden Satelliten wurde auf 15° über dem Horizont gesetzt.

Die Kampagne wurde bewusst im Herbst durchgeführt, da die Messungen dann in der Nacht und am frühen Morgen stattfanden. Zu dieser Tageszeit sind die absolute Elektronendichte in der Ionosphäre wie auch deren Aktivität am geringsten und damit die Bedingungen für GPS-Messungen besser. Dies musste allerdings mit dem Nachteil vermehrter Nacharbeit erkaufte werden (Abb. 6).

Antennentests:

Vorgängig der eigentlichen Messkampagne wurden alle eingesetzten Empfänger und Antennen auf der Teststrecke der L+T in Thun geprüft (vgl. Abb. 7). Die Ziele dieser Tests waren:

- Überprüfung der Funktionstüchtigkeit aller Empfänger
- Nachweis der Vollständigkeit des GPS-Materials

01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	1	1		1	1	1	1	1											1					1
				2			2	2			2	2	2			2	2		2					2
			3	3	3				3	3				3			3	3	3					3
				4						4				4	4				4	4	4	4	4	4

Tab. 2: Beobachtungsplan der 25 Stationen über die vier Tage (Fett = L1/L2).

- Bestimmung der relativen Offsets der Phasenzentren aller Antennen, (d.h. der Ablage des über eine Session gemittelten elektronischen Phasenzentrums gegenüber dem mechanischen Zentrum der Antenne)
- Auffrischen der Kenntnisse der Operateure in der Bedienung der Empfänger.

Beobachtungsplan:

Der Beobachtungsplan wurde entsprechend den Resultaten der Präanalyse ausgearbeitet. Das ganze Netz wurde in vier Tagen einmal gemessen, wobei die Punkte 05. Siblingen, 20. Hönggerberg und 25. Sissacherflue an allen vier Tagen mit Zweifrequenzen-Empfängern stationiert wurden. Die übrigen Punkte wurden in regionalen Gruppen mit Einfrequenz-Empfängern pro Teilnetz je ein- (16) oder zweimal (6) stationiert (vgl. Tabelle 2). Das ganze Vier-Tagesprogramm wurde eine Woche später wiederholt. Die Messkampagne konnte dank dem guten Einsatz aller Beteiligten ohne grössere Schwierigkeiten durchgeführt und abgeschlossen werden.

Feldauswertung:

Alle GPS-Messdaten wurden am selben Morgen nach der Session auf PC übertragen und auf Disketten gesichert. Für die sieben Einfrequenz-Empfänger im Netz wurde dies jeweils zentral in der Operationsbasis (Hotel) durchgeführt. Alle Messungen wurden möglichst bald mit der «TRIMVEC Multibaseline Software» (Version 88.044MB) ausgewertet: Die L1-Daten der sieben mobilen Empfänger noch gleichentags im Hotel, die L1/L2-Daten der Fixstationen mit einem Tag Verzögerung (Postversand) auf der Station Hönggerberg. Bei den drei Zweifrequenzen-Empfängern kam es wegen eines Firmware-Problems (Version 3.04) besonders bei den später aufgehenden Satelliten zu einigen Ausfällen auf der Frequenz L2. Dieser Gerätefehler wurde inzwischen durch einen «Firmware-Upgrade» behoben.

Bemerkenswert ist die Tatsache, dass an allen Tagen auf allen Basislinien sowohl im L1-Verdichtungsnetz als auch zwischen den L1/L2-Fixstationen (Distanzen von 34 km und 52 km) alle L1-ambiguities bereits im Feld bestimmt (gefixt) werden konnten. Die L2-ambiguities einzelner Tage dagegen waren nicht automatisch bestimmbar. Damit konnte bereits während der Kampagne festgestellt werden, dass die erfassten GPS-Daten zumindest

auf der Frequenz L1 von guter Qualität waren. Die Messungen auf den Stationen 15. Lägern, 16. Irchel und 25. Sissacherflue wurden zum Teil durch Sendeanlagen, diejenigen auf der Station 18. Lenzburg durch «Signal-Multipath» beeinträchtigt.

6. Auswertung

Die Auswertung aller GPS-Messungen wurde mit der sogenannten «Berner GPS Software» (Version 3.2) des Astronomischen Institutes der Universität Bern (AIUB) durchgeführt [Rothacher et al., 1990a]. Dieses Software-Paket wurde von der L+T auf ihrer PRIME Computer-Anlage installiert und mit einem eigenen, benutzerfreundlichen Rahmenprogramm versehen [Walser, 1990]. Der Vorteil der «Berner GPS Software» gegenüber «TRIMVEC» liegt insbesondere darin, dass die ganze Kampagne in einem Guss verarbeitet werden kann, wobei gleichzeitig verschiedenste Parameter (Koordinaten, Bahnparameter, Ambiguity-Parameter, Empfänger- und Satellitenuhrparameter, Ionosphärenmodell und Troposphären-Parameter) geschätzt werden können. Insbesondere bei grossen GPS-Projekten (Dimension des Netzes und Anzahl Stationierungen) ist diese Software überlegen. Die breiten Möglichkeiten der Berner Software wurden für die Auswertung der GPS-Messungen im Netz «Neotektonik» intensiv ausgenutzt. Dabei konnten wir auf die gute Unterstützung durch die GPS-Gruppe des AIUB zählen. Einige Arbeitsschritte, wie zum Beispiel die Simulation, die Bahnverbesserung mit Hilfe der europäischen CIGNET-Stationen oder die Berechnung von Ionosphärenmodellen, wurden sogar direkt am AIUB durchgeführt.

Bezüglich der Auswertung soll im folgenden speziell auf die in den Kapiteln 1 und 4 erwähnten Einflüsse der systematischen Fehler eingegangen werden.

Bahndaten:

Die Qualität der Satellitenbahndaten spielt bei der Auswertung von Netzen der Grösse des Neotektonik-Netzes eine bedeutende Rolle, und zwar nicht nur für die

globale Lagerung. Schlechte Bahnparameter haben auch systematische Einflüsse auf die innere Geometrie, das heisst die relativen Koordinatendifferenzen. Daher wurde den Bahnen grosse Beachtung geschenkt. Zum Vergleich wurden drei Typen unterschiedlicher Herkunft verwendet: Broadcast-Ephemeriden, präzise Ephemeriden und eigene, verbesserte Ephemeriden.

Broadcast-Bahnen:

Bahn- und Satellitenuhr-Informationen wurden den von den Satelliten ausgesendeten Nachrichten entnommen. Die präzisierten Genauigkeiten für die einzelnen Satellitenbahnen, die sogenannten «user range accuracy» (URA)-Werte, wurden mit 2 m bis 32 m (vgl. Tabelle 3) angegeben.

Nach der Berechnung von geozentrischen Positionen der Satelliten in festen Zeitabständen im Inertial-System 1950.0 wurden diese durch Bahnbögen von neun Stunden pro Session approximiert. Jeder Bogen wurde durch sechs Kepler'sche Bahnparameter und zwei Strahlungsdruckparameter definiert.

Präzise Bahnen:

Als zweiter Satz von Ephemeriden wurden die vom U.S. Naval Surface Warfare Center (NSWC) in Zusammenarbeit mit der Defense Mapping Agency (DMA) aus Daten von zehn weltweit verteilten Tracking-Stationen in einer Ausgleichung nachträglich berechneten präzisen Ephemeriden benutzt [Remondi et al., 1989]. Diese Daten, welche uns vom U.S. National Geodetic Survey (NGS) zur Verfügung gestellt worden waren, wurden vom ersten System ebenfalls ins Inertial-System 1950.0 umgerechnet und analog zu den Broadcast-Bahnen weiterverarbeitet.

Bahnverbesserung des AIUB:

Das AIUB hat ausgehend von den Broadcast-Ephemeriden und unter Verwendung der Beobachtung (a) der L1/L2-Stationen im Netz, (b) des Trimble Zweifrequenzen-Empfängers in Zimmerwald und (c) der TI4100-Empfänger in Wettzell und Onsala eigene Bahnverbesserungen gerechnet. Als Beobachtungen wurde die ionosphärenfreie Linearkombination (L3) der Trägerphasen L1 und L2 benutzt. Pro Teilkampagne zu vier Tagen wurde je Satellit ein Bogen gerechnet, wiederum definiert durch sechs Kepler'sche Bahnparameter und zwei Strahlungsdruckparameter. Diese sogenannten Standard-Bögen sind in einem iterativen Prozess gerechnete, strenge Lösungen der Bewegungsgleichungen, unter Verwendung eines umfas-

Satellit:	03	06	08	09	11	12	13
URA:	2.0-32.0	2.8-11.3	32.0	2.8-8.0	5.7-32.0	2.8-8.0	2.0-16.0

Tab. 3: URA-Werte [m] der benutzten Satelliten.

Element	rms	
a	1 m	grosse Halbachse
e	$5 \cdot 10^{-7}$	numerische Exzentrizität
i	.02"	Inklination der Bahnebene
Ω	.02"	Rektaszension des aufsteigenden Knotens
ω	.02"	Argument des Perigäums
u_0	.10"	Argument der Breite zur Anfangsepoche

Tab. 4: Geschätzte mittlere Fehler der Ausgangs-Bahnelemente.

senden Kraftfeldes. Als a priori Fehler für die Ausgangs-Bahnelemente wurden die in Tabelle 4 angegebenen Werte verwendet.

Für Vergleichszwecke wurden zwei Sets von Bahnen gerechnet, eines nur mit den schweizerischen L1/L2-Stationen, ein zweites inklusive den Stationen Onsala und Wettzell. Aus verschiedenen Gründen erwiesen sich nämlich die Daten letzterer Stationen für diesen Zweck leider als problematisch. Das «Referenznetz» Onsala-Wettzell-Zimmerwald hat eine ziemlich schwache Geometrie: Seine Nord-Süd Ausdehnung ist mit 1200 km viel grösser als in Ost-West Richtung mit 200 km. Zudem liegt das «Neotektonik»-Netz nicht zentrisch sondern im Gegenteil in der südwestlichen Ecke am Rand. Ein anderes Problem war die Kombination von zwei verschiedenen Empfängertypen. Theoretisch hat man solche Kombinationen gut im Griff [Gurtner et al., 1989]; vorausgesetzt, einige Bedingungen sind erfüllt, wie zum Beispiel, dass die Drift der Satellitenuhren genügend genau bekannt ist, um das Zeitintervall zwischen den entsprechenden Beobachtungsepochen der verschiedenen Empfängertypen zu überbrücken. Diese Zeitintervalle waren in unserem Fall ziemlich lang (Grössenordnung 1 Sekunde) und die vorliegenden (broadcast) Informationen über die Satellitenuhren für diesen Zweck eher ungenügend. Ein weiteres Problem ist die unterschiedliche Herkunft der Referenzkoordinaten für die «fiducial»-Stationen (SLR für Zimmerwald, VLBI für Onsala, VLBI und SLR für Wettzell). In Zukunft werden zum Beispiel mit dem 1989 gemessenen europäischen Netz EUREF zuverlässigere Koordinatensätze zur Verfügung stehen.

Ionosphären-Modell:

Da im Netz sowohl Einfrequenz- wie Zweifrequenzen-Empfänger eingesetzt wurden, musste aus den Zweifrequenzen-Messungen der L1/L2-Fixstationen je Session ein Ionosphärenmodell (Einschicht-Modelle) berechnet werden, mit dem die L1- und L2-Phasen in der Auswertung korrigiert werden konnten [Wild et al., 1989]. Für Vergleichszwecke wurden pro Session zwei Modelle berechnet, deren Unterschied im Einbezug oder Weglassen der Station Zimmerwald lag. In diesen Modellen werden alle freien Elektronen der Ionosphäre in einer infinitesimal dünnen

Schicht in einer Höhe von 350 km über der Erdoberfläche konzentriert. Als Beobachtungen werden die Differenzen zwischen den L1- und L2-Phasen (in m), genannt L4, verwendet, welche nur den Einfluss der Ionosphäre enthalten.

Troposphäre:

Die troposphärische Refraktion wurde auf vier verschiedene Arten modelliert: (1) Troposphärische Zenitkorrektur berechnet mit der Formel von Saastamoinen unter Verwendung einer Standardatmosphäre mit Referenzwerten auf Meereshöhen ($T_0 = 18^\circ$, $P_0 = 1013.25$ mbar, $H_0 = 50\%$). (2) Dasselbe wie (1), jedoch mit den auf den Stationen gemessenen Meteodaten (T, P, H). (3) Ausgehend vom Modell (1). Schätzen von lokalen Troposphären-Parametern, das heisst einer Rest-Zenitkorrektur pro Station und Session (ausser einer Referenzstation), aus den GPS-Messdaten. (4) Ausgehend von Modell (1). Schätzen

eines lokalen Troposphärenmodelles mit linearer Höhenabhängigkeit der troposphärischen zenitalen Laufzeitverzögerung [Rothacher et al., 1990b].

Antennen-Phasenzentren:

Für lokale und regionale Präzisions-GPS-Netze müssen die elektronischen Phasenzentren der Antennen möglichst exakt bekannt sein [Geiger, 1988]. Die verwendeten sogenannten «Microstrip»-Antennen haben ein mechanisches Zentrum, welches in Lage und Höhe mit Submillimeter-Genauigkeit definiert ist. Das elektronische Phasenzentrum für die L1- und L2-Signale kann gegenüber diesem mechanischen Zentrum um einige Millimeter verschoben sein. Für jeden Antennentyp gibt der Gerätehersteller sogenannte Nominaloffsets in den drei Dimensionen heraus. Um systematische Einflüsse infolge fehlerhafter Offsets zu vermeiden, wurden diese kleinen Korrekturen sowohl für die drei verschiedenen Antennentypen als Gruppe als auch für jede einzelne Antenne bestimmt (vgl. Tabelle 5).

Dazu wurden alle in der Kampagne verwendeten Geräte/Antennen-Paare auf einer Teststrecke der L+T auf der Allmend Thun kalibriert. Die Antennen wurden zwangszentriert auf Stahlpfeilern im Abstand von 20 m montiert und deren Koordinaten mit konventionellen, terrestrischen Präzisionsmessungen (Mekometer ME-5000, Sekundentheodolit, Nivellement)

Trimble Antennen:		Freq.	3D-Offset-Vektoren:				
Type	Serien #		Axe	nominal (N) [mm]	bestimmt (B) [mm]	Std.abw. [mm]	Diff. (B-N) [mm]
4000SLD alle		L1	X=	0.0	0.0	0	0
		L1	Y=	-3.1	-3.1	0	0
		L1	Z=	0.0	0.0	0	0
		L2	X=	-3.8	-3.8	0	0
		L2	Y=	-2.0	-2.0	0	0
		L2	Z=	0.0	0.0	0	0
4000SL alle		L1	X=	-1.8	-2.54	0.31	-0.74
		L1	Y=	3.3	3.30	0.31	0.00
		L1	Z=	-2.5	-2.31	0.59	0.19
4000SX alle		L1	X=	-1.8	0.02	0.50	1.82
		L1	Y=	3.3	2.90	0.50	-0.40
		L1	Z=	1.0	3.87	0.96	2.87
4000SLD 103		L1	X=	0.0	-0.74	0.29	-0.74
		L1	Y=	-3.1	-3.89	0.29	-0.79
		L1	Z=	0.0	-0.33	0.53	-0.33
		L2	X=	-3.8	-3.27	0.33	0.53
		L2	Y=	-2.0	-1.85	0.33	0.15
		L2	Z=	0.0	1.31	1.09	1.31
4000SL 132		L1	X=	-2.5	-3.52	0.32	-1.02
		L1	Y=	3.3	3.14	0.32	-0.16
		L1	Z=	-2.3	-2.92	0.51	-0.62

Tab. 5: Beispiel der berechneten Offsets der Antennen-Phasenzentren.

bestimmt. Die relative Genauigkeit (1 Sigma) dieser Referenz wird aufgrund der Ausgleichung geschätzt zu 0.3 mm in der Lage und 0.1 mm in der Höhe. Die Satellitenkonstellation und die Mess-Szenarien waren für diese Antennentests dieselben wie in der Messkampagne im Netz. Dies ist wichtig, weil die Position des elektronischen Phasenzentrums leicht von der mit der Zeit variierenden Satellitengeometrie abhängig ist.

Preprocessing:

Die Datenaufbereitung und Vorverarbeitung, Bestimmung der Polynome der Empfängeruhren wie auch die Entdeckung und Eliminierung von Phasensprüngen (sogenannte «cycle slips») gab bei dieser GPS-Kampagne keine Probleme.

Parameterschätzung und Ausgleichung:

Nachdem die Satellitenbahnen, Uhrparameter und Phasensmessungen bereinigt worden waren, wurde die eigentliche GPS-Auswertung durchgeführt. Im Hauptprogramm GPSEST können eine ganze Reihe verschiedenster Parameter nach der Methode kleinsten Quadrate optimal geschätzt werden, insbesondere natürlich die Koordinaten der gemessenen Stationen. In allen Berechnungen wurde ein Intervall zwischen den Messepochen von 15 Sekunden und die minimale Satellitenelevation zu 20° gewählt. Die Korrelationen zwischen den Frequenzen L1 und L3 wie auch zwischen den Basislinien einer Session wurden berücksichtigt.

Als erstes wurden alle Messungen sessionsweise (tageweise) ausgewertet und alle L1- und L2-Mehrdeutigkeiten («ambiguities») gelöst. Als Beobachtungen wurden die sogenannten Doppeldifferenzen zwischen L1- und (wo verfügbar) L2-Phasen benutzt. Es sei hier vermerkt, dass die Bestimmung der ambiguities weder auf den kürzeren Einfrequenz- noch auf den längeren Zweifrequenzen-Basislinien ein Problem war. Ein Grund war sicher die während der Nacht wesentlich geringere Aktivität der Ionosphäre. Diese Tageslösungen wurden anschliessend in den zwei Teilkampagnen (je vier Tage) zusammengefasst, wobei die «ambiguities» als bekannt übernommen wurden. Diese Teilkampagnen wurden für Vergleichsstudien (vgl. Kapitel 7) unter Variation der Satellitenbahnen (3 Typen), der Ionosphärenmodelle (2 Typen) und der Troposphärenmodelle (4 Typen) mehrmals berechnet.

Für die definitive Berechnung wurden das Netz Neotektonik und das in Kapitel 5 erwähnte Wisenberg-Netz in einer gemeinsamen Ausgleichung zusammengefasst. Diese Gesamtlösung umfasst mit allen Phasensmessungen auf L1 und L2 mehr als 450 000 Doppeldifferenzen. Die aus der Bahnbestimmung resultierenden WGS-84 Koordinaten der Station 20. Hönningerberg wurden festgehalten, alle übrigen 36 Stationen wurden als Unbe-

Meteo-Modell	Sigma der Einfach-Differenzen			Transformation Kamp.1 auf Kamp. 2			
	Kamp. 1 [mm]	Kamp. 2 [mm]	Total [mm]	Totaler rms [mm]	mittl. Residuen		
					Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Ionosphären-Modell ohne Zimmerwald-Daten:							
Standardatmos.	11.2	9.1	10.4	6.2	4.2	4.0	8.6
Ionosphären-Modell mit Zimmerwald-Daten:							
Standardatmos.	10.9	9.2	10.3	6.2	4.2	4.5	8.6
Stationsmeteo	11.1	9.7	10.8	13.6	4.7	4.4	22.0
Tropos.-Param.	10.1	8.7	9.5	14.5	4.9	4.4	23.5
Höhen-Modell	10.8	9.2	10.3	8.9	4.1	4.4	13.6

Tab. 6: Vergleich der verschiedenen Ionosphären- und Meteo-Modelle.

kannte bestimmt (108 unbekannte Parameter). Die ambiguities wurden von den Tageslösungen übernommen. Die Standardabweichung der single difference Beobachtungen betrug 8.8 mm. Der rms der geozentrischen Koordinaten relativ zum Festpunkt 20, entsprechend einer inneren Genauigkeit der Lösung, ist im Netzteil Neotektonik in den X- und Z-Werten kleiner oder gleich 0.4 mm, in den Y-Werten kleiner oder gleich 0.2 mm. Die rms-Werte der Koordinatendifferenzen betragen in der Lage 0.2–0.3 mm, in der Höhe 0.3–0.7 mm.

7. Resultate und Diskussion

Nebst der Erhöhung der Genauigkeit und der Zuverlässigkeit ermöglichte die zweimalige Messung der ganzen Kampagne eine gründliche Überprüfung der Mess- und Auswertemethoden sowie eine erste Analyse der realisierten Genauigkeit.

Durch den Vergleich der Lösungen der beiden Teilkampagnen konnte die Konsistenz der verschiedenen Modelle (Satellitenbahnen, Ionosphäre, Troposphäre) getestet werden. Anhand einer Ausgleichung können nämlich insbesondere die Einflüsse systematischer Fehler, die bei der Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate als nicht existent angenommen werden, nicht studiert werden. Zur Beurteilung wurde die einfache 3D-Ähnlichkeitstransformation (Helmert-Transformation) mit sieben Parametern (3 Translationen, 3 Rotationen, 1 Massstab) verwendet.

Der Vergleich der Lösungen mit den zwei Ionosphärenmodellen (mit und ohne Daten von Zimmerwald) zeigte maximale Koordinatendifferenzen in der Lage von 2 mm. Der Gesamt-rms der Transformation untereinander betrug 0.7 mm und der Massstab änderte um 0.01 ppm. Auch die Transformationen der ersten auf die zweite Teilkampagne je Modell (vgl. Ta-

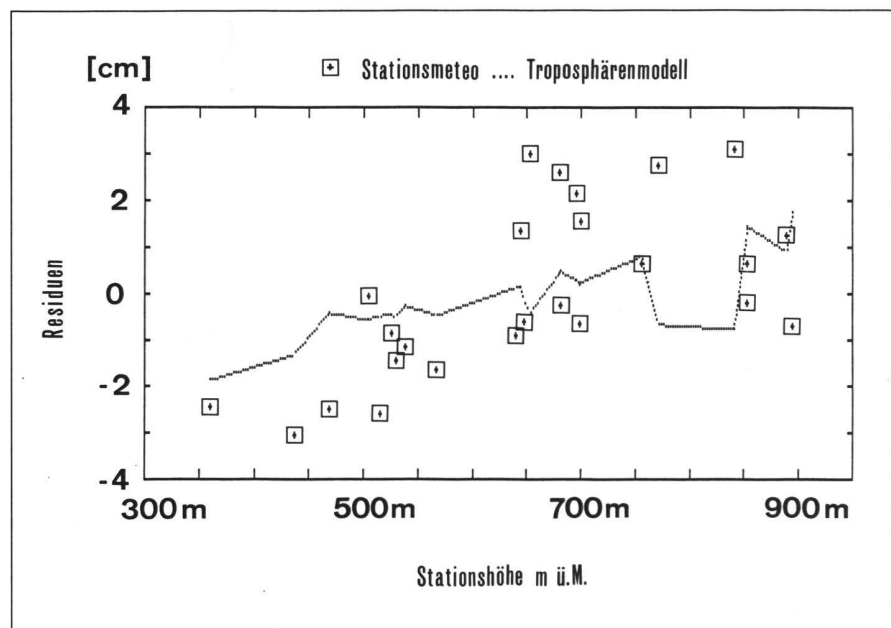


Abb. 8: Abhängigkeit der Höhen-Residuen von den Stationshöhen in den Transformationen zwischen den Lösungen mit den Modellen 2 (gemessene Stationsmeteo) und 4 (höhenabhängiges Troposphärenmodell) auf jene mit dem Modell 1 (Standardatmosphäre).

Bahntyp	Sigma der Einfach-Differenzen			Transformation Kamp.1 auf Kamp. 2			
	Kamp. 1 [mm]	Kamp. 2 [mm]	Total [mm]	Totaler rms [mm]	Nord [mm]	Ost [mm]	Höhe [mm]
Broadcast B.	13.0	9.9	11.8	6.9	4.1	5.3	9.6
Präzise B.	10.9	9.2	10.3	6.2	4.2	4.5	8.6
Bahnverb. 1	11.1	9.6	10.9	6.7	4.0	4.9	9.3
Bahnverb. 2	11.3	9.6	11.0	7.3	4.0	5.8	10.1

Tab. 7: Vergleich der verschiedenen Bahntypen.

belle 6) waren etwa gleichwertig, lediglich in Ost-West Richtung war das rein lokale Modell leicht besser. Für die weiteren Untersuchungen wurde das Modell inklusive Zimmerwald-Daten verwendet, da es auf mehr Beobachtungen beruhte.

Die verschiedenen Modelle für die troposphärische Refraktion beeinflussten vor allem die Stationshöhen, welche in unserem Netz von geringerer Bedeutung sind. Die Transformationen zwischen der Lösung mit Standardatmosphäre (1) einerseits und jenen mit örtlich gemessenen Stations-Meteorodaten (2), geschätzten lokalen Troposphären-Parametern (3) respektive einem Troposphären-Modell mit linearer Höhenabhängigkeit (4) andererseits ergaben mittlere Residuen in den Lagekoordinaten von 0.5 mm, 1.0 mm respektive 0.2 mm. Die entsprechenden Werte in der Höhe dagegen betrugen 15.9 mm, 15.7 mm und 8.2 mm. Der Tabelle 6 kann entnommen werden, dass die Repetierbarkeit in der Höhe um den Faktor 1.5 bis 3 abnahm.

Obwohl die Repetierbarkeit für die erste Strategie (Standardatmosphäre) am besten erscheint heisst dies nicht notwendigerweise, dass diese auch die zuverlässigsten Stationshöhen ergibt. In Abbildung 8 sind die Höhenresiduen der Lösungen mit gemessenen Stations-Meteorodaten beziehungsweise mit dem aus GPS-Daten bestimmten, höhenabhängigen Troposphären-Modell gegenüber der Lösung mit der Standardatmosphäre aufgetragen. Es ist überzeugend, dass die zwei vollständig voneinander unabhängigen Modelltechniken grundsätzlich zum selben Resultat führen, nämlich einer linearen Drift der Stationshöhen gegenüber dem Modell mit der Standardatmosphäre von zirka 6 mm/100 m. Abbildung 8 zeigt auch, dass die gemessenen Stations-Meteorodaten statistisch gesehen die richtigen Höhen ergeben, dass diese jedoch (wahrscheinlich infolge lokalen Einflüssen) starken Streuungen unterworfen sind. Diese Resultate decken sich übrigens mit neuesten Versuchen im Testnetz Turtmann, die [Rothacher, 1990b] in noch weitergehenden Untersuchungen mit lokalen Troposphären-Modellen beschrieben hat.

In GPS-Netzen der vorliegenden Grösse wird die Qualität der Satellitenbahnen zum limitierenden Faktor für die relative Lage-

genauigkeit. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Helmert-Transformationen zwischen den zwei Teilkampagnen mit den verschiedenen Bahntypen. Für die Bahnverbesserung 1 wurden nur die Zweifrequenzen-Messungen in der Schweiz (Zimmerwald und L1/L2-Stationen im Netz) benutzt, in der Bahnverbesserung 2 wurden auch die Messungen der Stationen Onsala und Wettzell mitverwendet. Das Sigma der Einfach-Differenzen gibt einen Anhaltspunkt für die interne Konsistenz der Lösungen. Der Gesamt-rms der Transformation zeigt den Grad der Übereinstimmung zwischen den zwei Teilkampagnen. Dasselbe ist aus den mittleren Residuen ersichtlich. Als Beispiel für die Residuen je Station und für die Transformationsparameter wird in Tabelle 10a die Helmert-Transformation zwischen der ersten und zweiten 4-Tageskampagne mit den präzisen Bahnen dargestellt.

Tabelle 7 zeigt keinen grossen Unterschied im Rauschen der Beobachtungen (Sigma der Einfach-Differenzen) zwischen den vier Bahntypen. Immerhin ist ersichtlich, dass die drei a posteriori Bahnen ähnliche Werte ergeben, die kleiner sind als diejenigen der Broadcast-Bahnen. Es ist andererseits enttäuschend, doch im Hinblick auf die in Kapitel 6 gemachten Bemerkungen nicht unerwartet, dass der rms der Beobachtungen wie auch der Transformation der Koordinaten der Kampagne 1 auf Kampagne 2 für die Bahnverbesserung 2 grösser sind als für die Bahnverbesserung 1. Grundsätzlich kann dies nicht akzeptiert werden und wir schliessen daraus, dass die Bahnverbesserung 2 wegen den erwähnten Schwierigkeiten ein Reinfall war. Wir wollen daher diese Resultate

nicht weiter kommentieren. Es muss allerdings betont werden, dass diese Erkenntnis keinesfalls verallgemeinert werden darf. Von andern Kampagnen (z.B. [Dong et al., 1989], [Beutler et al., 1990]) ist bekannt, dass Bahnverbesserungen unter Verwendung des «Fiducial Point» Konzeptes im kontinentalen Rahmen eindeutig die bestmöglichen Satellitenbahnen ergibt.

Wie genau sind nun die Koordinaten des ausgeglichenen GPS-Netzes? Aus den mittleren Residuen der in Tabelle 10a dargestellten Transformation lassen sich die in Tabelle 8 aufgeführten Standardabweichungen der Koordinaten der Gesamtlösung beider Kampagnen statistisch berechnen.

Selbstverständlich schlagen sich die gemeinsamen systematischen Fehler beider Teilkampagnen in dieser einfachen, aus der Wiederholbarkeit gerechneten Statistik nicht nieder. Betrachtet man eine graphische Darstellung der Lage-Residuen der Transformation zwischen den Teilkampagnen, so fallen die lokal ähnlichen Vektoren verschiedener Nachbarkpunkte auf. Ein Vergleich mit dem Beobachtungsplan zeigt, dass diese Systematiken (im mm-Bereich) sessionsabhängig sind. Daraus lässt sich schliessen, dass in den Gesamtlösungen noch örtliche oder tägliche Systematiken vorhanden sind, die nicht vollständig modelliert werden konnten. Andererseits ergibt sich daraus, dass die Nachbargenauigkeit einzelner Punkte, insbesondere wenn sie in denselben Sessionen gemessen wurden, besser als die oben angegebene sein dürfte.

Wohl den grössten Einfluss haben auch hier die Satellitenbahnen. Tabelle 9 zeigt den rms der Transformationen zwischen den präzisen Bahnen einerseits und den Broadcast-Bahnen beziehungsweise denen der Bahnverbesserung 1 andererseits. Zudem sind in dieser Tabelle die Rotationsparameter sowie der Massstabsunterschied (inkl. mittlerer Fehler) dieser Transformationen zusammengestellt.

Wiederum zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Lösungen mit den a posteriori Bahnen. Es ist bemerkenswert, dass die Bahnverbesserung mit Daten von einem lokalen Netz eine konsi-

Nord-Süd [mm]	Ost-West [mm]	Lage insgesamt [mm]	Höhe [mm]
3.0	2.8	4.1	6.1

Tab. 8: Standardabweichungen der Gesamtlösung (statistisch errechnet).

Transformation Bahn auf Bahn	rms [mm]	X-Rot ["]	Y-Rot ["]	Z-Rot ["]	Massstabsfaktor [mm/km]
Broad → Präzise	2.8	-0.14	0.00	0.03	-0.16 ± 0.02
Verb. 1 → Präzise	1.7	-0.10	-0.01	0.03	-0.02 ± 0.01

Tab. 9: Transformationen zwischen Lösungen mit verschiedenen Bahntypen.

		a) Transf. Kamp.1 auf Kamp.2 Präzise Bahnen, Standard- atmosphäre, lokales Ionosphärenmodell			b) Transformation Gesamt- lösung mit Bahnverbes- serung 1 auf Gesamtlö- sung mit präzisen Bahnen		
No.	Name	Residuen in [mm]			Residuen in [mm]		
		Nord	Ost	Höhe	Nord	Ost	Höhe
1	DOSENB	- 3.9	4.7	- 4.4	- 0.3	- 4.1	- 3.0
2	HUETTEN	- 1.2	3.1	0.0	- 0.4	- 3.0	- 1.6
3	NDGEBIS	1.7	0.1	7.3	- 0.3	- 2.7	- 0.4
4	GAISS	- 3.6	1.1	- 6.0	- 0.1	- 0.8	1.6
5	SIBLING	- 1.5	- 5.2	5.8	1.1	- 0.9	2.9
6	LAUFENB	- 3.6	- 3.5	13.3	- 0.4	- 0.7	0.6
7	FARNSBG	-10.9	6.0	- 9.9	- 0.7	- 2.6	- 2.6
8	HERZNAC	- 0.9	0.5	- 0.7	- 0.6	- 0.1	- 0.1
9	LAUBBER	1.3	- 2.9	8.4	- 0.2	0.0	1.4
10	BALDING	- 2.7	- 0.8	3.5	0.0	0.5	1.8
11	KUESSAB	- 3.2	- 0.4	- 2.0	0.4	0.0	1.9
12	FROBURG	5.1	2.3	-14.1	- 1.2	1.4	- 0.8
13	GISLIFL	3.8	0.0	4.6	- 0.7	1.7	0.3
14	BOEZBER	0.7	- 3.3	6.5	- 0.4	0.9	0.8
15	LAEGERN	- 2.2	- 2.0	2.7	- 0.2	1.8	1.5
16	IRCHEL	4.1	2.6	-13.3	1.2	0.5	- 1.4
17	WARTBUR	8.7	7.1	-18.0	- 1.1	2.0	- 0.8
18	LENZBRG	1.9	- 3.6	13.7	- 0.7	2.4	0.6
19	BELLIKO	3.5	- 4.7	10.7	- 0.5	2.5	1.2
20	HOENGGB	- 0.1	- 4.6	8.0	- 0.6	3.7	1.5
21	BRUETTE	4.7	4.2	- 3.4	0.5	1.4	- 1.3
22	BENKEN	- 2.2	- 0.4	1.0	2.0	- 1.7	- 0.7
23	HOHENTW	- 4.5	- 8.4	-10.4	3.4	- 3.6	- 1.7
24	SCHAUEN	5.8	6.2	- 4.2	1.0	1.3	- 2.8
25	SISSGPS	- 0.8	2.0	1.1	- 1.4	0.0	1.2
Mittlere Residuen:		4.2	4.0	8.6	1.1	2.0	1.6
Anzahl Parameter :		7			7		
Anzahl Koordinaten :		75			75		
rms der Transformation:		0.0062			0.0017		
Transl. in Nord-Süd :		0.002 ± 0.001 m			0.003 ± 0.000 m		
Transl. in Ost-West :		0.006 ± 0.001 m			-0.006 ± 0.000 m		
Transl. in Höhe :		-0.006 ± 0.001 m			0.007 ± 0.000 m		
Rotation um N-S Axe :		-0.00" ± 0.01"			-0.10" ± 0.00"		
Rotation um E-W Axe :		0.03" ± 0.02"			-0.01" ± 0.01"		
Rotation um vertik. A. :		0.01" ± 0.01"			0.03" ± 0.00"		
Massstabsfaktor :		0.09 ± 0.05 mm/km			-0.02 ± 0.01 mm/km		

Tab. 10: Helmert-Transformationen.

stente Lösung ergibt, die nicht signifikant von der Lösung mit präzisen Bahnen abweicht. Die eigene Bahnverbesserung hat zudem den Vorteil, dass sie lediglich aus unserem Beobachtungsmaterial bestimmt wurde und damit für uns reproduzierbar sein wird, beispielsweise in einer zukünftigen Kampagne.

8. Dank

Das hier beschriebene Projekt wurde durch die NAGRA angeregt, welche auch die Messungen und einen Teil der Studien finanzierte.

Wesentliche Teile der beschriebenen Ar-

beiten, insbesondere in den Bereichen Simulation, Bahnverbesserung und Ionosphärenmodelle, wurden am Astronomischen Institut der Universität Bern von den Herren Prof. Dr. G. Beutler, Dr. W. Gurtner und Dipl. Ing. U. Wild durchgeführt. Der vorliegende Artikel stützt sich vor allem in den Kapiteln 6 und 7 weitgehend auf den am Second International Symposium on Precise Positioning with GPS im September 1990 in Ottawa präsentierten Bericht [Wiget et al., 1990] ab, der gemeinsam mit diesen Kollegen abgefasst worden war. Schliesslich danken wir dem Landesverwaltungsamt Niedersachsen, Hannover und der Firma Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, für ihre Beteiligung an der GPS-Messkampagne.

Abkürzungen:

Für eine nähere Erklärung der z.T. verwendeten englischen Fachausdrücke sei zum Beispiel auf den Artikel von [Gurtner, 1986] verwiesen.

Abb.	Abbildung
AIUB	Astronomisches Institut der Universität Bern, Bern
BTS	Bureau International de l'Heure (BIH) Terrestrial System
CIGNET	Cooperative International GPS Network
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
EUREF	Europäische (GPS-)Referenznetz
GMT/UTC	Greenwich Mean Time, Universal Time Coordinated
GPS	Global Positioning System
H	relative Feuchte
L+T	Bundesamt für Landestopographie, Wabern
LVANS	Landesverwaltungsamt Niedersachsen
L1, L2	Trägerwellen der GPS-Signale (L1 = 1.575 GHz, L2 = 1.228 GHz)
NAGRA	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NGS	National Geodetic Survey der USA, Rockville Md.
NSWC	U.S. Naval Surface Warfare Center, Dahlgren, Va.
P	Luftdruck
rms	root mean square (mittlerer Fehler)
SLR	Satellite Laser Ranging
T	Temperatur
Tab.	Tabelle
URA	User Range Accuracy
USDMA	Defense Mapping Agency der USA, Fairfax, Va. und Washington, D.C.
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VPK	Zeitschrift Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik

Literaturverzeichnis:

- Beutler, G. und W. Gurtner (1987): Das NAGRA GPS NETZ 1988. Präanalyse des Astronomischen Instituts der Universität Bern.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht (1987): «Evaluation of the Alaska Global Positioning System Campaign with the Bernese Software». Journal of Geophysical Research, Vol. 92, No. B2, S. 1295–1303.
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht und A. Geiger (1988): «Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase obser-

ventions». Monograph 12, School of Surveying, University of New South Wales, Australia.

Beutler, G., S. Fankhauser, W. Gurtner, M. Rothacher und U. Wild (1990): «Considerations concerning GPS software development: Structure, models, algorithms». Proceedings of 1989 Luxembourg GPS workshop.

Boucher, C., Z. Altamini, P. Willis (1988): «Relation between BTS87, WGS84 and GPS activities». BIH Annual Report 1987.

Dong, D., Y. Bock (1989): «Global Positioning System Network Analysis With Phase Ambiguity Resolution Applied to Crustal Deformation Studies in California». Journal of Geophysical Research, Vol. 94, No. B4, S. 3949-3966.

Geiger, A. (1988): Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETHZ, Mitteilungen Nr. 43, Sept. 1988.

Gubler, E. und D. Schneider (1983): Projekt: Kinematisches Präzisionsnetz Aargau-Nord, 1984-2002. Technischer Bericht zu Netzentwurf Präanalyse und genereller Projektierung der Messinstallation. L+T, Wabern, 1983.

Gubler, E., D. Schneider und P. Kellerhals (1984): Bestimmung von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. NTB 84-17, NAGRA, Baden, 1984.

Gurtner, W. (1986): GPS-Testmessungen auf dem CERN-LEP-Kontrollnetz. VPK 6/1986, S. 219-224.

Gurtner, W., G. Beutler, M. Rothacher (1989): «Combination of GPS observations made with different receiver types». Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning, March 1989, Las Cruces, New Mexico, S. 362-374.

Mälzer, A., H. Rösch, I. Misselwitz, M. Ebert und D. Moosmann (1988): Höhenänderungen in der Nord-Schweiz und im Süd-Schwarzwald bis zum Bodensee. NTB 88-05, NAGRA, Baden 1988.

Remondi, B. W. und B. Hofmann-Wellenhof (1989): «GPS broadcast orbits versus precise orbits: a comparison study». CSTG GPS Bulletin, Vol. 2, No. 6, Nov.-Dec. 1989. S. 8-20.

Rothacher, M., G. Beutler, W. Gurtner, T. Schildknecht, U. Wild (1990a): «Bernese GPS Software Version 3.2». Astronomisches Institut der Universität Bern, Bern.

Rothacher, M., G. Beutler, W. Gurtner, U. Wild, D. Schneider, A. Wiget, A. Geiger und

H.-G. Kahle (1990b): «The role of the atmosphere in small GPS networks». Second Intern. Symposium on Precise Positioning with GPS, GPS '90, Ottawa, Canada, Sept. 1990; S. 581-598.

Walser, F. (1990): Rahmenprogramm GPS. Bundesamt für Landestopographie, Bulletin des Rechenzentrums Nr. 19, Juli 1990.

Wild, U., G. Beutler, W. Gurtner, M. Rothacher (1989): «Estimating the ionosphere using one or more dual frequency GPS receivers». Proceedings of the Fifth Intern. Geodetic Symposium on Satellite Positioning, March 1989, Las Cruces, New Mexico. S. 724-736.

Wiget, A., D. Schneider, E. Gubler, G. Beutler und U. Wild (1990): High precision regional crustal motion network in Switzerland. Second International Symposium with the Global Positioning System, GPS '90, Ottawa Canada, Sept. 1990; S. 835-852.

Adresse der Autoren:

Dipl. Ing. A. Wiget
Dipl. Ing. E. Gubler
Dr. Ing. D. Schneider
Bundesamt für Landestopographie
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern

Dahinter steckt einiges: Orell Füssli Karten und Pläne

Sie wollen:

- scannen und vektorisieren
- Vorlagen mit Datenbanken kombinieren
- Daten ausgeben
- Karten und Pläne drucken

Wir bieten unseren Partnern aus den Bereichen

- Vermessungswesen
- Raumplanung
- Technische Werke
- Transportsysteme
- Touristik
- Kartografie

umfassende Lösungen ihrer Probleme der Datenumwandlung.

Unser erfahrenes Team unterstützt Sie gerne mit kompetenten Vorschlägen. Für eine eingehende Beratung setzen Sie sich bitte mit Herrn Nierula, Produktmanager Digitale Kartografie, in Verbindung.

Orell Füssli Kartografie

Dierzingerstr. 3, 8036 Zürich
Telefon 01/466 77 11

