

**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:** 90 (1992)

**Heft:** 10

**Artikel:** GPS-Testkampagne des Vermessungsamtes der Stadt Zürich

**Autor:** Kofmel, D.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-234866>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

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

- alle Baustellenreste und Werkplätze ausserhalb des Staubereiches werden wieder entfernt und der Begrünung überlassen
- für die Mauerüberwachung notwendige Visuren werden von hochwachsender Bepflanzung freigehalten, die Zugänglichkeit abseits liegender Elemente (wie z.B. Grundablass-Austritt) mit einfachen Fusspfaden sichergestellt.

## 6. Ausblick

Der wegen landschaftspflegerischen und ökologieorientierten Massnahmen geleistete Mehraufwand beträgt etwa 1 Promille der Anlagekosten. Der eigentliche Er-

folg der Begleitung liegt darin, dass nicht erst Generationen später, sondern spontan das Gefühl aufkommt, die landschaftliche Szenerie sei auch so richtig, eine Verschmelzung habe stattgefunden. Dies kann allerdings nicht darüber hinwegtäuschen, dass der See, wenn er nicht voll ist, einen hässlichen Anblick bietet, dass die anliegenden Talschaften in den für Mensch und Natur wichtigsten Zeitperioden meist kein Wasser mehr in ihren Bächen und Flüssen haben, dass das fertige Werk der Gemeinde Panix kaum Arbeitsplätze und noch keine Zuwanderer bringt und dass im Unterland mit dem Strom deswegen nicht sorgsamer umgegangen wird!

### Literatur:

- [1] Panix: ein Dorf wünscht sich einen Stausee, Neue Zürcher Zeitung Nr. 122, 28./29. 5. 1983.
- [2] Projekt und Bau des Kraftwerkes Ilanz, Schweizer Baublatt Nr. 83, 20. 10. 1987.
- [3] Stauanlage Panix, Landschaftspflegerisches Begleitkonzept, Ernst Basler & Partner, Juni 1986.

Adresse des Verfassers:  
 Andreas Erni  
 Landschaftsarchitekt BSLA  
 Ernst Basler & Partner AG  
 Ingenieurunternehmen  
 CH-8702 Zollikon

# GPS-Testkampagne des Vermessungsamtes der Stadt Zürich

D. Kofmel

Das Vermessungsamt der Stadt Zürich (VAZ) führte im Frühling 1991 eine GPS-Testkampagne durch. Es wurden Untersuchungen in bezug auf Genauigkeit und Vertrauenswürdigkeit der GPS-Lösungen gemacht. Hierbei wurde unterschieden zwischen Langzeitlösungen gemäss der klassischen statischen Auswertemethode und Kurzzeitlösungen gemäss den rapid static Methoden. Die Resultate sind abhängig von verschiedenen Rahmenbedingungen wie: Beobachtungsdauer, Anzahl und Verteilung der sichtbaren Satelliten, Ionosphärenaktivität und Störquellen (Fahrzeugverkehr, Multipathing). Ein möglicher Weg zur Auswertung von GPS-Messungen und die wichtigsten Erkenntnisse aus der Testkampagne sind in diesem Artikel zusammenfassend dargelegt.

*Le Service des mensurations de la Ville de Zurich réalisa, au printemps 1991, une campagne de tests GPS. Des recherches furent menées, relatives à la précision et à la fiabilité des résolutions GPS. On fit à ce propos la différence entre les solutions à long temps d'observation, selon le mode conventionnel statique de résolution, et les solutions à courts temps d'observation, selon le mode rapide statique. Les résultats dépendent de différents facteurs tels que: la durée des observations, le nombre et la répartition des satellites visibles, l'activité ionosphérique et les sources de perturbation (circulation de véhicules, «multipathing», etc.). L'article qui suit présente de façon résumée un mode possible de résolution des mesures GPS ainsi que les principaux enseignements de la campagne de tests.*

## 1. Einleitung

Im Frühling 1991 führte das VAZ zwischen dem 29. April und 8. Mai eine GPS-Testkampagne durch. Zu diesem Zweck wurden insgesamt 6 Zweifrequenzempfänger gemietet:

- 4 Trimble SLD Empfänger (Quadriertechnik) mit Zubehör von der L+T
- 2 Trimble SST Empfänger (P-Code-fähig) mit Zubehör von der ETH.

Aufgrund der zeitweise dürftigen Satellitenüberdeckung von 3 bis maximal 5 relativ tief am Horizont liegenden Satelliten, musste man lange Beobachtungszeiten einplanen, um die Messungen auf der zweiten Frequenz L2 auch mit Sicherheit auswerten zu können. Pro Tag wurden daher nur zwei Messsessionen angesetzt: eine Vormittagssession von ca. 3 Stunden Dauer und eine Nachmittagssession von ca. 4 Stunden Dauer. Zwischen beiden

Sessionen stand ca. 1 Stunde zum Umstellen der Geräte zur Verfügung. In der Abbildung 1 und 2 ist die damals gegebene Satellitenkonstellation ersichtlich. Es sind nur die Satelliten aufgeführt, die höher als 15° über dem Horizont stehen. Dieselbe Elevationsmaske von 15° wurde auch für die Messungen verwendet.

Als Registrierintervall für die GPS-Messungen wurde 15 Sekunden gewählt. Die Antennen wurden mit  $\pm 0,5$  mm Genauigkeit über dem Bodenpunkt zentriert und jeweils nach Norden orientiert. Meteodaten wurden keine erhoben. Im allgemeinen war das Wetter regnerisch bedeckt.

Von den zur Verfügung stehenden 6½ Messtagen wurden 2 für Antenneneichmessungen (Kalendertage Nr. 119 und 120), 3 für Messungen im Triangulationsnetz (Kalendertage Nr. 122, 123 und 126) und 1½ für Messungen im Polygonar (Kalendertage Nr. 127 und 128) genutzt.

Praktisch alle gewählten Stationen im Triangulationsnetz waren für GPS-Messungen ideal gelegen, mit wenig Störeinflüssen und weitgehend uneingeschränkter Horizontfreiheit (Hochpunkte).

Im Polygonar war es mangels Erfahrung schwierig abzuwägen, welche Punkte bestimmbar sind und welche nicht. Die Stationen wurden einerseits so gewählt, dass diese sicher genügend Horizontfreiheit aufwiesen, um eine Punktbestimmung zu erlauben, andererseits aber andere potentielle Störquellen auf die Messungen wirken konnten. Solche für GPS zwar ungünstige, in der Stadtvermessung jedoch meist vorhandene Störquellen sind insbesondere:

- starker Automobil- oder Tramverkehr in nächster Nähe der Antenne (bewirkt Störeinflüsse und Phasensprünge)
- grosse Metallflächen in Form von Verkehrsschildern und andere Metallge-

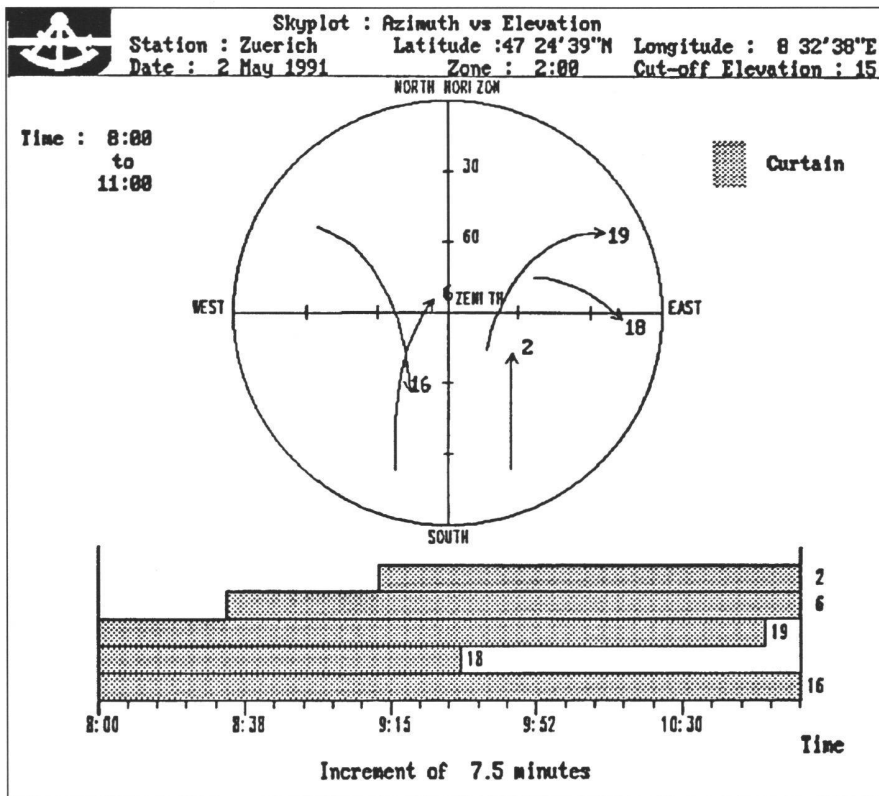


Abb. 1: Satellitenüberdeckung während der Vormittagssession.

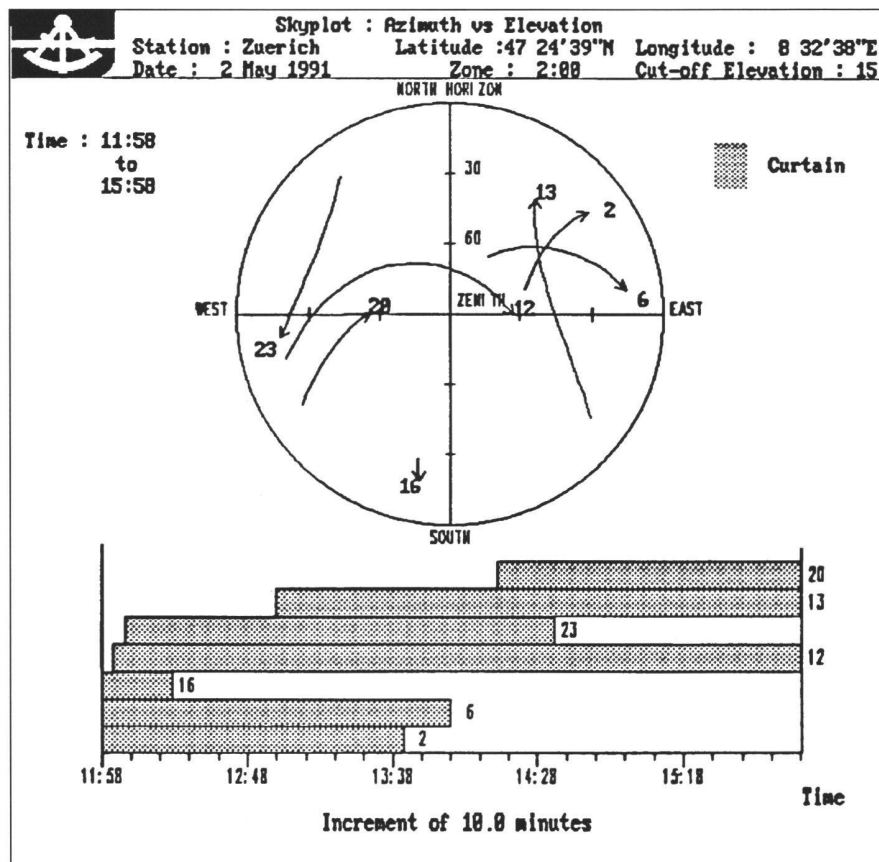


Abb. 2: Satellitenüberdeckung während der Nachmittagssession.

genstände in nächster Nähe der Antenne  
 – viele Metallkabel über dem Punkt

– starke Magnetfelder (Tramkabel).  
 In den Abbildungen 3 und 4 ist ersichtlich, wie die GPS-Messungen im Triangula-

tionsnetz resp. im Polygonar durchgeführt und die Basislinien in den Sessionslösungen definiert wurden.

## 2. Auswertung der Messungen

Durch Herausschneiden von Messungen aus den Halbtagesessionen wurden weitere Untermessungen gebildet und nachfolgend unabhängig voneinander ausgewertet. Die Messfenster sind derart gewählt, dass sie in die Zeitperiode mit der bestmöglichen Satellitenüberdeckung fallen. Auf diese Weise wurde zu jeder Halbtagesession zusätzlich eine 120-Minuten-, eine 90-Minuten- und eine 60-Minuten-Session gebildet. Korrespondierende Sessions, die an unterschiedlichen Tagen gemessen wurden, beziehen sich auf exakt dieselbe Satellitengeometrie, da die tägliche Verschiebung um minus 4 Minuten berücksichtigt wurde.

Zur Auswertung der GPS-Messungen wurden zur Hauptsache 2 Programmpakete herangezogen. Mit dem Programmpaket Trimvec Plus wurden die Rohmessungen sessionsweise ausgewertet. Die in einem geozentrischen Koordinatensystem anfallenden Sessionslösungen wurden anschliessend mit dem Programmpaket GEO an der ETH weiterverarbeitet und ins Landeskoordinatensystem integriert.

### 2.1 Die Auswertung mit dem Programmpaket Trimvec Plus

Die GPS-Rohmessungen (Trägerphasenmessungen, Pseudodistanzmessungen) wurden unter Verwendung der Broadcast Ephemeriden mit dem im Programmpaket Trimvec Plus enthaltenen Einzelprogramm Multiple Baseline Processor Version 91.023MBP ausgeglichen. Das Resultat dieser Ausgleichung sind Koordinaten hoher Relativgenauigkeit im dreidimensionalen geozentrischen WGS 84.

Liegen L1- und L2-Trägerphasenmessungen vor, so können mit Trimvec folgende Sessionslösungen berechnet werden:

#### L1-Lösung:

Resultiert aus der Ausgleichung der L1-Trägerphasenmessungen. Die L1-Messungen weisen das geringste Messrauschen aller GPS-Messgrößen auf. Die L1-Lösung ist daher die geometrisch genaueste Lösung. Sie weist jedoch einen zu kleinen Massstab auf, da die L1-Beobachtungen von der Ionosphäre beeinflusst sind.

#### L4-Lösung:

Resultiert aus der Ausgleichung der sog. wide-lane Trägerphasenbeobachtung. Diese L4-Beobachtung ergibt sich aus einer Linearkombination der ursprünglichen L1- und L2-Trägerphasenbeobachtung.

$$\Phi_{L4} = \Phi_{L1} - \Phi_{L2}$$

$\Phi$ : Trägerphasenbeobachtung

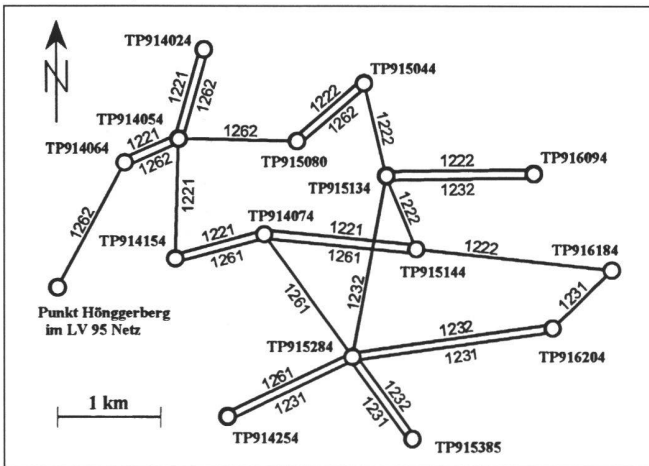


Abb. 3: Messungen im Triangulationsnetz mit Stations- und Sessionsnummer.

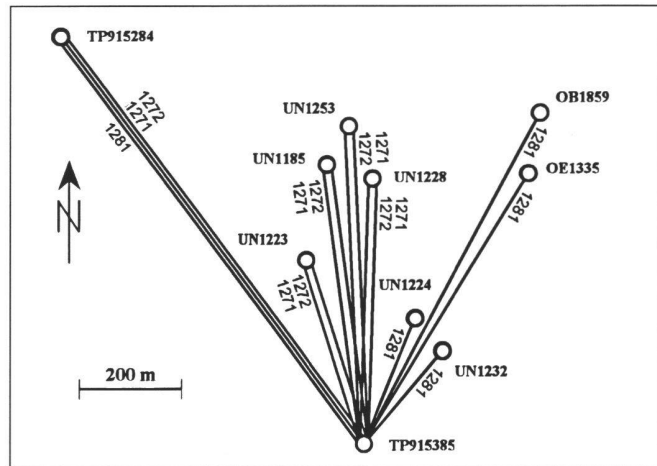


Abb. 4: Messungen im Polygonar mit Stations- und Sessionsnummer.

Die Wellenlänge des L4-Signals beträgt 86,2 cm, sofern sich die L2-Trägerphasenmessungen auf die volle Wellenlänge beziehen. Bei Empfängern die mit Quadrier-technik arbeiten, beträgt die L4-Wellenlänge immerhin noch 34,1 cm. Dank der grossen Wellenlänge und einem praktisch gleich grossen Rausch- und Ionosphärenanteil wie die Originalbeobachtungen, sind die Mehrdeutigkeiten des L4-Signals einfacher zu lösen als diejenigen des L2-Signals. Für die Mehrdeutigkeiten N ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$N_4 = N_1 - N_2$$

N: Mehrdeutigkeit

Über diesen einfachen linearen Zusammenhang können aus den berechneten Mehrdeutigkeiten der L1- und L4-Lösung die L2-Mehrdeutigkeiten ermittelt werden. Bei der nachfolgenden Berechnung der ionosphärenfreien L3-Lösung werden die L1- und L2-Mehrdeutigkeiten als konstante Grössen eingeführt.

### L3-Lösung:

Resultiert aus der Ausgleichung der vom Ionosphäreinfluss befreiten L3-Beobachtung. Das L3-Signal ergibt sich wiederum aus einer Linearkombination der L1- und L2-Trägerwelle:

$$\Phi_3 = \frac{f_1^2 \cdot \Phi_1 - f_1 \cdot f_2 \cdot \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2}$$

f: Frequenz

Bei dieser Linearkombination geht die Ganzzahligkeit des Mehrdeutigkeitsterms verloren. Da Trimvec zur Berechnung der L3-Lösung die L1- und L2-Mehrdeutigkeiten nicht neu ermittelt sondern aus der L1- und der L4-Lösung übernimmt, spielt dies keine Rolle. Die L3-Lösung kann allerdings nur dann das richtige Ergebnis liefern, wenn zuvor in der L1- und L4-Lösung die Mehrdeutigkeiten korrekt berechnet wurden.

Die L3-Beobachtungen weisen gegenüber den original L1- resp. L2-Beobachtungen einen etwa dreifach grösseren zufälligen Fehler auf. Die L1-Lösung ist deshalb geometrisch genauer. Die L3-Lösung sollte aber den genaueren Massstab und die genauere Orientierung beinhalten. Um die guten Eigenschaften beider Lösungen zu vereinen, wird in der Vermessung oft die L1-Lösung über eine 7-Parameter Transformation auf die L3-Lösung transformiert. Die resultierende L1/L3-Lösung übernimmt die gute Geometrie aus der L1-Lösung, den guten Massstab und die gute Orientierung aus der L3-Lösung.

### L2-Lösung:

Zum Zweck der Kontrolle ist es sinnvoll, am Schluss noch die L2-Messungen aus-

zugleichen. Wiederum werden die L2-Mehrdeutigkeiten nicht neu bestimmt, sondern fliessen als bekannte Grössen in die Ausgleichung ein. Die L2-Lösung sollte, sofern die Ambiguitäten [1] richtig gelöst wurden, im Bereich weniger Millimeter mit der L1-Lösung übereinstimmen.

Gemäss den von der L+T herausgegebenen «Richtlinien für die Bestimmung von Lagefixpunkten mittels GPS in der amtlichen Vermessung» darf man die L1-Mehrdeutigkeiten als richtig gelöst betrachten, sofern das Verhältnis sum of squares (2) zu sum of squares (1) mindestens 4 beträgt.

Dieser Verhältnisfaktor (ratio) ergibt sich im Rahmen der Auswertung der GPS-Messungen aus der Suche nach den wahr-

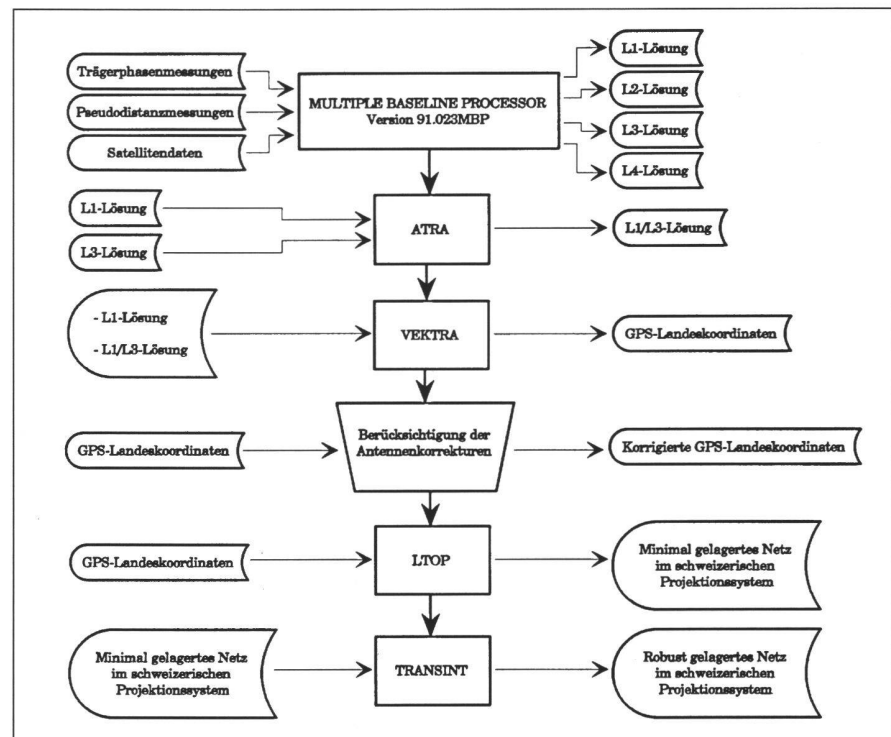


Abb. 5: Flussdiagramm der Auswertung.

scheinlichen Werten für die Mehrdeutigkeiten:

In einem ersten Schritt der Ausgleichung werden aus den Doppeldifferenzbeobachtungen die Koordinaten einzelner Stationen bezüglich einer fixen Referenzstation und die Mehrdeutigkeiten geschätzt. Das Resultat dieser sog. «double difference float solution» sind reelle Werte mit einem mittleren Fehler für die Unbekannten. Man weiss aber, dass die Ambiguitäten ganze Zahlen sein müssen. Wenn es gelingt, die reellen Mehrdeutigkeiten auf eine feste ganze Zahl zu fixieren, so dürfen diese in einer zweiten Ausgleichung («double difference fixed solution») als bekannte Grössen eingeführt werden. Dies bewirkt eine Versteifung der Lösung und führt zu bedeutend kleineren mittleren Koordinatenfehlern als in der float solution.

Oft ist der dem reellen Wert nächste Integer-Wert der richtige Wert für eine Mehrdeutigkeit. Da dies aber nicht immer so ist, müssen pro Mehrdeutigkeit verschiedene ganzzahlige Werte (beispielsweise nächster Integer  $\pm 1$ ) getestet werden. Pro Basislinie ergeben sich so mehrere Kombinationen aus ganzen Zahlen, welche die a priori unbekanntes Mehrdeutigkeitsparameter ersetzen sollen. Pro Basislinie kann allerdings nur eine dieser Kombinationen richtig sein. Daher wird im Rahmen eines sog. Integer-Suchprozesses für jede Kombination eine Basislinienlösung als fixed solution durchgerechnet. Die wahrscheinlichste Kombination ist in der Basislinienlösung mit der kleinsten Quadratsumme aus allen Verbesserungen zu finden. Der Ratiofaktor gibt das Verhältnis aus den Quadratsummen der zweitbesten zur wahrscheinlichsten Basislinienlösung wieder. Je höher dieser Faktor ausfällt, desto grösseres Vertrauen kann der wahrscheinlichsten Lösung geschenkt werden. Wie bereits erwähnt, empfiehlt die L+T in ihren Richtlinien einen minimalen Ratiofaktor von 4.

Der oben beschriebene Suchprozess wird für jede Basislinie einer Session einzeln durchgeführt. Erst nachdem dieser Suchprozess abgeschlossen ist, kann die endgültige Sessionslösung als fixed solution gerechnet werden.

Im Rahmen der Auswertung der Messungen im Triangulationsnetz zeigte sich, dass bei Tagesmessungen (höhere Ionosphärenaktivität als in der Nacht) und Basislinien bis 2 km die L1-Mehrdeutigkeiten bei 60 Minuten Beobachtungszeit noch vertrauenswürdig lösbar waren. Der kleinste Ratiofaktor aus allen L1-Lösungen bei 60 Minuten Beobachtungszeit betrug 5,06.

Ob die L2-Mehrdeutigkeiten richtig gelöst wurden, entscheidet man, indem die L2- oder auch L4-Lösung mit der L1-Lösung verglichen wird. Sofern alle Mehrdeutigkeiten richtig gelöst wurden, sollten sich die Basislinien der verschiedenen Lösungen

nur um wenige Millimeter unterscheiden. Falls die L2-Mehrdeutigkeiten in der L4-Lösung nicht richtig ermittelt wurden, kann einzig die L1-Lösung genutzt werden. Sowohl bei 90 Minuten als auch bei 60 Minuten Beobachtungsdauer wurden die L2-Mehrdeutigkeiten einiger Sessionslösungen im Triangulationsnetz eindeutig falsch gelöst. In diesen fehlerhaften Lösungen unterscheiden sich entsprechende Basislinienlängen der L2- resp. L4-Lösung von der L1-Lösung um mehrere Dezimeter. Bei der gegebenen Satellitenüberdeckung waren demnach im Triangulationsnetz 2 Stunden Beobachtungszeit notwendig, um die L2-Mehrdeutigkeiten vertrauenswürdig lösen zu können.

Im Polygonar bei Basislinien bis ca. 1 km wurden die L1-Mehrdeutigkeiten bei 60 Minuten Beobachtungszeit richtig gelöst. Einige Verhältnisfaktoren unterschritten jedoch den von der L+T empfohlenen Wert von 4. Der kleinste Wert betrug 2,58, der grösste 4,33. Die 60-Minuten-Lösungen konnten nur deshalb als richtige Lösungen identifiziert werden, da es in unserer Testkampagne möglich war, diese mit entsprechenden L1-Lösungen längerer Beobachtungszeit zu vergleichen. Selbst bei 90 Minuten Beobachtungszeit betrug der kleinste Ratiofaktor einer L1-Lösung im Polygonar 3,63.

Eindeutig falsch gelöste L2-Mehrdeutigkeiten konnten im Polygonar in Sessionslösungen ab 2 Stunden Beobachtungsdauer nachgewiesen werden. In den Halbtageslösungen lagen die a posteriori Genauigkeiten der Trägerphasenmessungen zum Teil deutlich über den zu erwartenden Werten. Eine L4-Lösung beispielsweise unterschied sich von der L1-Lösung um 5,3 cm. Dies ist eindeutig mehr, als aufgrund der Erfahrungen im Triangulationsnetz zu erwarten gewesen wäre. Da sich die übrigen Lösungen (L1, L2, L3) aber nur um maximal 4 mm unterschieden, konnte nicht schlüssig entschieden werden, ob die L2-Mehrdeutigkeiten in dieser Halbtageslösung richtig gelöst wurden.

In bezug auf die Zuverlässigkeit einer GPS Lösung ist wichtig, dass alle Punkte doppelt stationiert werden und dies möglichst bei unterschiedlicher Satellitenkonstellation. Ein fehlerhaft bestimmter Punkt kann so allenfalls noch bei der Netzausgleichung aufgedeckt werden.

## 2.1.1 Die mit L2-Lösungen erzielten Repetiergenauigkeiten im Triangulationsnetz

Mittels der doppelt gemessenen Basislinien, lässt sich aus den «unabhängigen» Distanzdifferenzen  $\Delta$  der mittlere Fehler eines Basisvektors gemäss folgender Formel abschätzen:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \sum \Delta^2}{2n}}$$

n: Anzahl der doppelt gemessenen Basislinien

Hieraus ergaben sich die in Tabelle 1 aufgelisteten Repetiergenauigkeiten für die Basisvektoren der Trimvec L1-Lösungen im Triangulationsnetz. Für diese Genauigkeitsabschätzung wurde weder eine Ionosphärenkorrektur noch eine Korrektur der Antennenoffsets an den Lösungen vorgenommen. Die Zusammenstellung soll einer ersten Abschätzung der mit GPS erzielbaren Genauigkeit dienen.

Gemäss dieser ersten Abschätzung unterscheiden sich die einzelnen Lösungen bezüglich Genauigkeit sehr wenig. Sofern einzig L1-Trägerphasenbeobachtungen zur Verfügung stehen und die GPS-Punkte annähernd ideal liegen (mit guter Horizontfreiheit und wenig Störeinflüssen), machen sich Beobachtungszeiten länger als 60 Minuten demnach kaum bezahlt.

## 2.1.2 Die mit L1-Lösungen erzielten Repetiergenauigkeiten im Polygonar

Auch im Polygonar kann mittels der doppelt gemessenen Basislinien eine erste Genauigkeitsabschätzung durchgeführt werden. Hier ist allerdings zu beachten, dass die Übereinstimmung bedeutend geringer ist als bei den Messungen im Triangulationsnetz.

Es resultieren folgende Repetiergenauigkeiten:

siehe Tabelle 2

Im Polygonar ergeben sich etwas deutlichere Genauigkeitsunterschiede als im Triangulationsnetz. Sofern die GPS-Punkte nicht ideal liegen, machen sich längere Beobachtungszeiten demnach bezahlt. Bei genügend langen Beobachtungszeiten machen sich vorhandene Störeinflüsse in der Lösung deutlich weniger bemerkbar.

## 2.1.3 L1-Kurzzeitlösungen im Polygonar und im Triangulationsnetz

Im Hinblick auf die rapid static Auswertemethoden, mit deren Hilfe es möglich ist die Mehrdeutigkeiten aus Messungen über nur wenige Minuten – bei mindestens 4–5 sichtbaren Satelliten und Basislinien von weniger als 20 km – zu lösen, wurden Untersuchungen angestellt, um die zu erwartende Genauigkeit und Vertrauenswürdigkeit dieser Methoden abschätzen zu können.

Trimvec-Plus ist ein sehr flexibles Auswertepaket, das dem Operateur viele Möglichkeiten bietet, Untersuchungen durchzuführen. Diese Untersuchungen können rein wissenschaftlicher Natur sein. Sie können aber auch von ganz erheblichem Nutzen im praktischen Einsatz sein, indem Probleme, die im Rahmen einer Auswertung möglicherweise auftreten, lokalisiert, behoben oder umgangen werden können.

Halbtageslösung	120-Minuten-Lösung	90-Minuten-Lösung	60-Minuten-Lösung
$\sigma = 2,5 \text{ mm}$	$\sigma = 2,6 \text{ mm}$	$\sigma = 2,6 \text{ mm}$	$\sigma = 3,0 \text{ mm}$

**Tab. 1: Genauigkeit der L1-Lösung im Triangulationsnetz.**

Halbtageslösung	120-Minuten-Lösung	90-Minuten-Lösung	60-Minuten-Lösung
$\sigma = 2,8 \text{ mm}$	$\sigma = 4,6 \text{ mm}$	$\sigma = 5,5 \text{ mm}$	$\sigma = 5,8 \text{ mm}$

**Tab. 2: Genauigkeit der L1-Lösung im Polygonar.**

Trimvec konnte die Mehrdeutigkeiten aus Trägerphasenmessungen über nur wenige Minuten (noch) nicht lösen. Die kurzen Beobachtungszeiten mussten also gewissermassen simuliert werden.

Zu diesem Zweck wurden die Mehrdeutigkeiten zunächst im Rahmen einer Halbtageslösung bestimmt. Anschliessend konnten ganz selektiv nur einzelne Messungen aus der gesamten Messession mit Start- und Endzeit herausgeschnitten und Kurzzeitlösungen berechnet werden. Dabei wurden die in der Halbtageslösung berechneten Mehrdeutigkeiten in die Kurzzeitlösungen übernommen und als Konstanten eingeführt. Das Ergebnis dieser Kurzzeitlösungen sollte unter der Bedingung, dass die Mehrdeutigkeiten beiderseitig richtig gelöst wurden, identisch sein mit einer Lösung gemäss der rapid static Methode.

Pro Halbtagesession wurden jeweils zwölf 5-Minuten- und zwölf 3-Minuten-Lösungen berechnet. Diese Kurzzeitlösungen verteilen sich regelmässig über die Zeitdauer der jeweiligen Halbtagesession, während der mindestens vier Satelliten höher als  $15^\circ$  über dem Horizont stehen. Trotzdem konnten nicht alle Lösungen mit 4 Satelliten berechnet werden, da je nach Punkt einzelne Satelliten durch Hindernisse verdeckt waren.

Kurzzeitlösungen wurden für die drei Messessionen im Polygonar (1271, 1272, 1281) und die Messessionen 1221 und 1262 im Triangulationsnetz gerechnet.

Die Genauigkeit der Kurzzeitlösungen kann abgeschätzt werden, indem man sie mit den Halbtageslösungen vergleicht. Als erstes hat sich ganz deutlich gezeigt, dass Kurzzeitlösungen mit nur 3 sichtbaren Satelliten nicht brauchbar sind. In der Regel unterscheiden sie sich um mehrere Dezimeter von der Halbtageslösung.

Aus den Distanzkorrekturen  $d$  zu der Halbtageslösung resp. zum Mittel aus den beiden Halbtageslösungen lässt sich ein Genauigkeitsmass gemäss folgender Formel rechnen:

$$\sigma_s = \sqrt{\frac{2 \sum d^2}{n - u}}$$

$\sigma_s$  = scheinbarer mittlerer Fehler  
 $n$  = Anzahl Beobachtungen  
 $u$  = Anzahl Unbekannte

Dieses Mass wird hier als scheinbarer mittlerer Fehler einer Kurzzeitlösung bezeichnet.

Selbst bei den Kurzzeitlösungen mit mindestens vier sichtbaren Satelliten wiesen einzelne der Korrekturwerte  $d$  unakzeptable Grössen (bis 13 cm) auf. Es zeigte sich, dass die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Ausreisser steigt, je grösser der RDOP-Wert [2] für die entsprechende Basislinie ausfällt. Der RDOP-Wert ist ein Mass für die Güte der Satellitengeometrie während der Basislinienbestimmung. Um die guten von den schlechten Lösungen unterscheiden zu können, muss man einen geeigneten Grenzwert (beispielsweise für das RDOP) einführen und Kurzzeitlösungen bei denen dieser Grenzwert überschritten ist, für nicht nutzbar erklären. Bei den gerechneten Kurzzeitlösungen zeigte sich, dass mit einem RDOP-Grenzwert der Grösse 1 die meisten Ausreisser eliminiert werden können, ohne all zu viele gute Lösungen zu verwerfen.

Für die nachfolgenden statistischen Berechnungen in Tabelle 3 und Tabelle 4 wurden nur die Korrekturwerte  $d$  der Kurzzeitlösungen mit einem  $RDOP < 1$  herangezogen. An den Kurzzeitlösungen wurde weder eine Ionosphärenkorrektur noch eine Korrektur der Antennenoffsets vorgenommen.

TAG	Lösungen	# d	$\sigma_s$	# $ d  \geq \sigma_s$	# $ d  \geq 2\sigma_s$	# $ d  \geq 3\sigma_s$
127	3 Min. Lösg. des ganzen Tages	65	9,2 mm	13 (20%)	4 (6%)	2 (3%)
	5 Min. Lösg. des ganzen Tages	65	7,9 mm	11 (17%)	2 (3%)	1 (2%)
	3 Min. Lösg. der Vormittagssession	34	7,5 mm	8 (24%)	3 (9%)	0
	5 Min. Lösg. der Vormittagssession	34	5,7 mm	8 (24%)	3 (9%)	0
	3 Min. Lösg. der Nachmittagssession	31	11,4 mm	6 (19%)	3 (10%)	0
	5 Min. Lösg. der Nachmittagssession	31	10,1 mm	5 (16%)	2 (6%)	1 (3%)
128	3 Min. Lösg. der Vormittagssession	34	6,8 mm	8 (24%)	1 (3%)	1 (3%)
	5 Min. Lösg. der Vormittagssession	34	6,0 mm	7 (21%)	1 (3%)	1 (3%)

**Tab. 3: Genauigkeit der L1-Kurzzeitlösung im Polygonar.**

Die erreichten Genauigkeiten im Polygonar liegen in einem Bereich von 5–12 mm. Weiter kann man der Tabelle 3 entnehmen, dass der prozentuale Anteil der Ausreisser grösser ist, als man dies von der Normalverteilung her gewohnt ist.

Um mit Kurzzeitlösungen bessere Genauigkeiten mit weniger Ausreissern erreichen zu können, müsste man entweder die RDOP-Grenze herabsetzen, die geforderte Mindestanzahl der in einer Lösung zu verwendenden Satelliten von 4 auf 5 erhöhen oder die Beobachtungszeit etwas verlängern.

In offenem Gelände kann in Zukunft die durch den zu erwartenden kontinuierlichen Ausbau des GPS verbesserte Satellitenüberdeckung genutzt werden. Bei einer verbesserten Geometrie werden mehr Satelliten gleichzeitig über dem Horizont stehen (kleinere RDOP-Werte).

In überbautem Gebiet wird man auch in Zukunft infolge der Abdeckungen kaum mit bedeutend besserer Satellitengeometrie als der während der Testkampagne gegebenen rechnen dürfen. Hier wird man, sofern man die Punktlage nicht beliebig frei wählen und Störeinflüsse ausschliessen kann, kaum darum herkommen, die Beobachtungszeit zu erhöhen.

Gemäss Tabelle 4 liegt die erreichte Genauigkeit der Kurzzeitlösungen im Triangulationsnetz in einem Bereich von 3–7 mm. Die Ausreisser sind weniger häufig als im Polygonar. Die Störquellen im Polygonar scheinen somit signifikante geometrische Auswirkungen auf die GPS-Lösung zu haben.

## 2.2 Die Auswertung mit dem Programmpaket GEO

Die sessionsweise anfallenden geozentrischen Koordinatentupel wurden mit GEO an der ETH weiterverarbeitet und zu einem Netz kombiniert. Das an der ETH im Lehrbereich P01 unter Leitung von Prof. Dr. A. Carosio entwickelte Programmpaket GEO integriert mehrere hauptsächlich in Fortran 77 geschriebene Einzelpro-

# Partie rédactionnelle

TAG	Lösungen	# d	$\sigma_s$	# $ d  \geq \sigma_s$	# $ d  \geq 2\sigma_s$	# $ d  \geq 3\sigma_s$
122	3 Min. Lösg. der Vormittagssession	35	3,9 mm	13 (37%)	1 (3%)	0
	5 Min. Lösg. der Vormittagssession	35	3,3 mm	9 (26%)	0	0
126	3 Min. Lösg. der Nachmittagssession	36	7,2 mm	7 (19%)	3 (8%)	0
	5 Min. Lösg. der Nachmittagssession	36	7,1 mm	6 (17%)	2 (6%)	1 (3%)

Tab. 4: Genauigkeit der L1-Kurzzeitlösung im Triangulationsnetz.

gramme unterschiedlicher Herkunft und automatisiert den Datenaustausch zwischen diesen Programmen.

GEO soll dem Nutzer dienen, Triangulationsberechnungen mit dem Computer durchzuführen. Dabei wird durch eine einheitliche Filestruktur angestrebt, dass der Programmfluss möglichst wenig manuelle Arbeit erfordert. Jede Berechnung liefert das Eingabefile für den nächsten Bearbeitungsschritt. Der Benutzer braucht nicht zeitraubende Handeingaben oder entsprechende Transformationen durchzuführen.

Im Herbst 1991 beinhaltet GEO folgende Einzelprogramme:

#### ATRA:

ATRA dient der Berechnung von räumlichen Affin- oder Ähnlichkeitstransformationen mit 3 Translationen, 3 Rotationen und wahlweise 0–3 Massstabsfaktoren.

#### LAG:

Das Programm LAG berechnet Lotabweichungen, Lotkrümmungen und Geoidhöhen.

#### VEKTRA:

VEKTRA ist ein Programm zur Transformation von Koordinaten zwischen verschiedenen Referenzsystemen. Die Transformationen lassen sich in allen sinnvollen Kombinationen ausführen.

#### LTOP:

Das Triangulationsprogramm LTOP ermöglicht eine vermittelnde Ausgleichung nicht korrelierter Beobachtungstypen, nach der Methode der kleinsten Quadrate. Als Beobachtungen sind Richtungsmessungen, Distanzmessungen, Azimute, Höhenwinkel, Höhendifferenzen, Koordinaten, Koordinatendifferenzen oder GPS-Koordinaten zugelassen.

#### MESSED:

Das Programm MESSED dient zur Erfassung von Messdaten.

#### PKTED:

Das Programm PKTED ist das Datenerfassungsprogramm für das Punktfiler.

#### PLANNETZ:

Das Programm PLANNETZ dient zur grafischen Darstellung von Netzen und der Re-

sultate der Ausgleichung durch LTOP im geeigneten Massstab.

#### TRANSINT:

Das Programm TRANSINT ist ein Transformationsprogramm mit dem sich folgende Aufgaben ausführen lassen:

- robuste Ähnlichkeitstransformation
- Interpolation nach dem arithmetischen Mittel
- Editieren der Passpunkte.

#### KOORDIFF:

Das Programm KOORDIFF dient der grafischen Darstellung von Höhen- und Lageverschiebungen bzw. Koordinatendifferenzen.

### 2.2.1 Sieben Parameter Transformation mit dem Programm ATRA

Die L3-Lösung weist den besseren Massstab, die L2-Lösung infolge des kleineren Messrauschens die bessere Geometrie auf. Man versucht die guten Eigenschaften der beiden Lösungen zu kombinieren, indem man im kartesischen WGS 84 die L1-Lösung über eine 7-Parameter Transformation auf die L3-Lösung transformiert. Dies führt zur L1/L3-Lösung.

Der Ionosphärenmassstab der L1-Lösungen im Triangulationsnetz schwankt zwischen ca. 1 ppm und 4 ppm und lässt sich mit einem mittleren Fehler von ca.  $\pm 0,5$  ppm bestimmen. Die Massstabsfaktoren der Nachmittagssessionen des Kalendertages 126 sind etwas schlechter bestimmbar als diejenigen der übrigen Sessionen im Triangulationsnetz ( $\pm 1$  ppm).

Im Polygonar lässt sich der durch die Ionosphäre bedingte Massstab für keine Session signifikant bestimmen. Somit bestätigt sich, dass die L2-Messungen im Polygonar beträchtlich gestört sind und für die Auswertung nicht genutzt werden können.

#### 2.2.1.1 Repetiergenauigkeit einer L1/L3-Lösung

Wie zuvor für die L1-Lösung, lässt sich jetzt auch die Repetiergenauigkeit der L1/L3-Lösung aus den doppelt bestimmten Basislinienlängen ableiten. Dank der 7-Parameter Transformation ist die L1/L3-Lösung von Ionosphäreinflüssen weitgehend befreit. Eine Korrektur der Anten-

nenoffsets wurde noch nicht vorgenommen. Es ergaben sich folgende Repetiergenauigkeiten:

Halbtageslösung	120-Minuten-Lösung
$\sigma = 0,9$ mm	$\sigma = 1,6$ mm

Tab. 5: Genauigkeit der L1/L3-Lösung im Triangulationsnetz.

Gegenüber den unkorrigierten L1-Lösungen ergibt sich somit eine markante Verbesserung in der Genauigkeit. Ein Millimeter Genauigkeit scheint bei genügend langer Beobachtungsdauer mit GPS erreichbar zu sein.

### 2.2.2 Transformation der WGS 84 Koordinaten ins schweizerische Projektionssystem mit dem Programm VEKTRA

Alle nutzbaren L1- und L1/L3-Lösungssessionen müssen zunächst ins schweizerische Projektionssystem umgerechnet werden. Erst dann können die so erhaltenen GPS-Landeskoordinaten im Netzausgleichungsprogramm LTOP als Beobachtungen eingeführt werden.

Der Übergang vom kartesischen WGS 84 System ins kartesische schweizerische Bessel-Referenzsystem erfolgt mit einer Ähnlichkeitstransformation:

$$X_{\text{Bessel}} = (1 + m) \cdot R \cdot X_{\text{WGS}} + X_{\text{Trans}}$$

wobei:

$X_{\text{Bessel}}$  : kartesischer Ortsvektor im schweizerischen Besselsystem

$X_{\text{WGS}}$  : kartesischer Ortsvektor im WGS-System

$X_{\text{Trans}}$  : Translationsvektor im Besselsystem

$m$  : Massstabskorrektur

$R$  : Rotationsmatrix

In der Granitkampagne 1987 wurden von der Landestopographie mit 12 über die ganze Schweiz verteilten Punkten die folgenden Parameter bestimmt:

$$\Delta Y = -660,074 \text{ m}$$

$$\Delta Y = -13,552 \text{ m}$$

$$\Delta Z = -369,341 \text{ m}$$

$$\alpha = -2,485^\circ$$

$$\beta = -1,783^\circ$$

$$\gamma = -2,939^\circ$$

$$m = -5,66 \text{ ppm}$$

Für die Umtransformation der Sessionlösungen mit VEKTRA wurden für die Rotation und Translation die Parameter der Granit Kampagne verwendet. Die Massstabskorrektur wurde gleich Null gesetzt, um so einen direkten Vergleich zwischen GPS- und terrestrischem Massstab zu erhalten.

## 2.2.3 Ausgleichung der GPS-Landeskoordinaten mit LTOP

Die sessionsweise ins schweizerische Projektionssystem umgerechneten GPS-Koordinaten werden als Beobachtungen ins Programm LTOP eingeführt. Die Koordinatensätze jeder Session beziehen sich auf ein eigenes kartesisches Koordinatensystem. Das Programm LTOP führt die einzelnen Sätze über ebene Helmerttransformationen in ein einheitliches Koordinatensystem über.

Für jede Session lassen sich somit 4 Hilfsparameter bestimmen, zwei für die Translation sowie je einer für Rotation und Massstab.

Würde man aber für jede Session alle Parameter freigeben, so wäre im allgemeinen die Zuverlässigkeit des ausgeglichenen Netzes nicht mehr gewährleistet. Deshalb gibt man nur so viele Parameter frei, wie unbedingt notwendig sind. Zwei Translationsparameter pro Session müssen allerdings praktisch immer freigelassen werden.

Die Ausgleichung wird im allgemeinen in mehreren Schritten durchgeführt. In einem ersten Rechendurchgang lässt man alle Parameter frei. Im Resultatfile kann dann überprüft werden, ob allenfalls die Parameter für die Rotation resp. den Massstab einzelner Sessions zu einem einzigen zusammengefasst werden können. Falls die Sessions nur wenige Tage auseinander liegen, darf im allgemeinen ein einziger, allen Sessions gemeinsamer Rotationsparameter eingeführt werden. Unterschiede können sich allenfalls für den Massstab ergeben. Hier steht man dann vor der Entscheidung, entweder mehrere Massstäbe einzuführen, um gegebenenfalls etwas Genauigkeit zu gewinnen aber an Zuverlässigkeit zu verlieren, oder allen Sessions einen gemeinsamen Massstab zuzuweisen und an Zuverlässigkeit zu gewinnen.

### 2.2.3.1 Die Ausgleichung der GPS-Landeskoordinaten im Triangulationsnetz

Das GPS-Netz wurde auf den Punkten TP914024 und TP915385 minimal gelagert. Die Anschlusskoordinaten wurden als fehlerlose Grössen eingeführt.

Die GPS-Landeskoordinaten aller Sessions gleicher Berechnungsweise und Beobachtungsdauer wurden in je einem LTOP-Messfile zusammengefasst. Da im Triangulationsnetz 6 Messsessions durchgeführt wurden, ergab dies pro Messfile 6 GPS-Landeskoordinatensätze. Erst in der jetzigen Phase der Auswertung wurden die Lagekoordinaten der Messfiles um die auf den Millimeter gerundeten Antennenoffsets korrigiert.

Aus den berechneten Antennenoffsets ergaben sich in der Lage Relativverschiebungen von maximal 2,6 mm bei einem mittleren Fehler von 1–1,5 mm. Der Relativ-

einfluss der berechneten Antennen-eichwerte ist demnach kaum signifikant. Die Eichwerte wurden für die beiden Halbtagesessions berechnet und sind streng genommen auch nur für die Halbtageslösungen gültig.

In Tabelle 6 sind die von LTOP a posteriori errechneten mittleren Fehler der GPS-Landeskoordinaten unterschiedlicher Messfiles aufgelistet. Als Hilfsparameter für die Helmerttransformationen wurden neben den Translationen noch ein allen Sessions gemeinsamer Parameter für den Massstab und einer für die Rotation eingeführt (insgesamt 14 Hilfsparameter).

Die Genauigkeitsunterschiede der einzelnen Lösungen sind sehr klein. Obwohl nicht getestet wurde, ob die Unterschiede signifikant sind, soll hier eine Interpretation der Ergebnisse versucht werden.

Der mittlere Fehler einer beobachteten GPS-Landeskoordinate ist um etwas mehr als den Faktor  $\sqrt{2}$  kleiner als die aus doppelt gemessenen Basislinien ermittelte Repetiergenauigkeit einer Basislängenbestimmung. Dies scheint plausibel, da die Verbesserungen des Basisvektors in der Netzausgleichung auf die Koordinaten zweier Punkte verteilt werden und gewisse systematische Anteile durch die Freigabe eines Rotations- und Massstabparameters aufgefangen werden können. Der Genauigkeitsgewinn durch die Ionosphärenkorrektur ist nicht mehr so markant wie beim Basislinienvergleich (L1-Lösung gegenüber L1/L3-Lösung). Dies ist verständlich, da in der Gesamtausgleichung zusätzlich die Orientierungsfehler der Sessionslösungen zum Tragen kommen.

Der Einfluss der Ionosphärenkorrektur dürfte sich um so stärker bemerkbar machen, je unterschiedlicher die Ionosphärenaktivität während der verschiedenen Messsessions einer Messkampagne wirkt.

Bloss vermuten darf man, dass die Antenneneichwerte etwas an Genauigkeit bringen. Dass die Genauigkeitssteigerung

durch Berücksichtigung der Antennenkorrekturen nicht deutlicher ausfällt, könnte seinen Grund darin haben, dass auf mehrfach stationierten Punkten oft dieselbe Antenne verwendet wurde und die Antennenoffsets deshalb nicht genügend kontrolliert werden.

Die genaueste Lösung ist die Halbtageslösung mit Ionosphären- und Antennenkorrektur.

Etwas merkwürdig sind die Resultate aus den Lösungen ohne Ionosphärenkorrektur. Erstaunlicherweise passen die Sessionslösungen in den Messfiles mit kürzerer Beobachtungszeit fast genauer zusammen als in denjenigen mit längerer Beobachtungsdauer. Dies scheint nun erneut darauf hinzudeuten, dass Beobachtungszeiten von mehr als 60-Minuten kaum eine Genauigkeitssteigerung bringen, sofern man nur Einfrequenzmessungen durchführt.

Bei den Einfrequenzlösungen liess sich nicht nachweisen, dass die Antenneneichwerte zusätzliche Genauigkeit bringen. Diese gehen wohl im allgemeinen Messrauschen unter.

### 2.2.3.2 Die Ausgleichung der GPS-Landeskoordinaten im Polygonar

Wie bereits erwähnt, liess sich der Ionosphärenmassstab der im Polygonar gemessenen Sessions nicht bestimmen, weshalb im Polygonar allein die L1-Lösungen sinnvoll genutzt werden konnten.

Pro Messsession wurde eine Halbtages-, eine 120-Minuten-, eine 90-Minuten- und eine 60-Minuten-Lösung gerechnet.

Vier Polygonpunkte wurden in den zwei Messsessions 1271 und 1272 eingemessen. Vier Polygonpunkte in der einen Messsession 1281. Die beiden Anschlusspunkte wurden während allen drei Messsessions stationiert. An der Ausgleichung mit LTOP konnten somit nur die beobachteten GPS-Landeskoordinaten der vier Polygonpunkte aus den Messsessions 1271 und 1272, sowie die GPS-Landeskoordinaten der Anschlusspunkte teilnehmen.

Messfile	$\sigma$ (mm)
Halbtageslösungen ohne Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur	1,88
Halbtageslösungen ohne Ionosphären- und mit Antennenkorrektur	1,84
Halbtageslösungen mit Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur	1,41
Halbtageslösungen mit Ionosphären- und mit Antennenkorrektur	1,26
120-Minuten-Lösungen ohne Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur	1,80
120-Minuten-Lösungen mit Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur	1,55
120-Minuten-Lösungen mit Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur	1,37
90-Minuten-Lösungen ohne Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur	1,41
60-Minuten-Lösungen ohne Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur	1,58

Tab. 6: A posteriori Genauigkeiten der GPS-Landeskoordinaten im Triangulationsnetz.



	Halbtageslösungen	120-Minuten-Lösungen	90-Minuten-Lösungen	60-Minuten-Lösungen
$\sigma$ (mm)	1,28	1,64	1,94	2,04

**Tab. 7: A posteriori Genauigkeiten der GPS-Landeskoordinaten im Polygonar.**

Als Hilfsparameter wurden ein allen Sessions gemeinsamer Massstabfaktor, ein gemeinsamer Rotationsparameter sowie für jede Session je zwei Translationsparameter in die Ausgleichung eingeführt. Antennenkorrekturen wurden keine angebracht. Dies ergab die in Tabelle 7 aufgeführten a posteriori Genauigkeiten für die beobachteten GPS-Landeskoordinaten im Polygonar.

Die mittleren Fehler in obiger Tabelle sind fast um den Faktor 3 kleiner als die aus Doppelmessungen berechneten. Es wäre etwa ein Faktor  $\sqrt{2}$  zu erwarten gewesen. Den Unterschied könnte man sich dadurch erklären, dass die Spannungen der Polygonpunktkoordinaten auf die Koordinaten der Anschlusspunkte verteilt werden und zudem die Redundanz im Polygonar kleiner ist als im Triangulationsnetz. Die erreichten Genauigkeiten genügen den Genauigkeitsanforderungen im Polygonar. Günstig wirkt sich aus, dass es keine Fehlerfortpflanzung gibt und für alle Punkte dieselbe Genauigkeit gilt.

### 3. Vergleich des GPS-Netzes mit einem Mekometernetz (ME5000)

Einige der Triangulationspunkte auf dem Gebiet der Stadt Zürich wurden in einem Trilaterationsnetz aus Mekometerdistanzen (ME5000) bestimmt. 11 Punkte des GPS Netzes sind, sofern keine Punktverschiebungen stattgefunden haben, mit Punkten des Mekometernetzes identisch. Die Mekometerdistanzen wurden als freies Netz ausgeglichen und analog wie das GPS-Netz auf den als fehlerfrei angenommenen Punkten TP914024 und TP915385 minimal gelagert. Hierdurch wird ein direkter Vergleich des Mekometernetzes mit dem GPS-Netz möglich. Allerdings können Punktverschiebungen nicht völlig ausgeschlossen werden, da die Mekometerdistanzen im Februar 1992 gemessen wurden. Die mittleren Koordinatenfehler des Mekometernetzes betragen ca. 1 mm. Um einige Erfahrungswerte zu geben, sind in Tabelle 8 die Koordinatenunterschiede zwischen Mekometer- und GPS-Netz aufgelistet. Die Version 1 bezieht sich auf eine Ausgleichung der Halbtageslösungen mit Ionosphären- und Antennenkorrektur, wobei für jede Session 4 Hilfsparameter (Translation, Rotation, Massstab) bestimmt wurden. Die Version 2 bezieht sich auf dieselben Messungen wie Version 1, allerdings wurde nur je ein allen Sessions gemeinsamer Parameter

für den Massstab und die Rotation bestimmt. Die Version 3 bezieht sich auf eine Ausgleichung der 60-Minuten-Lösungen ohne Ionosphären- und ohne Antennenkorrektur, mit nur je einem gemeinsamen Parameter für Rotation und Massstab.

Punktnummer	Version 1		Version 2		Version 3	
	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)
TP914054	-0,07	2,66	-1,07	1,66	-2,07	1,66
TP914064	-5,64	3,88	-6,65	1,88	-5,64	1,88
TP914154	1,54	5,05	2,54	5,05	1,54	5,05
TP915084	0,82	1,53	2,82	-1,47	2,82	-0,47
TP015134	-1,88	2,89	2,12	0,89	2,12	3,89
TP915144	-1,62	3,51	0,38	2,51	-0,62	4,51
TP915284	0,47	1,83	1,47	1,83	0,47	-0,17
TP916094	-2,14	-2,28	0,86	-4,28	-2,14	-0,28
TP916204	-1,42	-2,60	-0,42	-5,60	-1,42	-7,60

**Tab. 8: Differenz Mekometernetz Koordinate minus GPS-Netz Koordinate.**

### 4. Zusammenfassung

Die gemachten Aussagen gelten für den zur Zeit der Durchführung der Testkampagne gegebenen Entwicklungsstand des GPS, der Empfangsgeräte und der Auswertesoftware.

Selective Availability war damals nicht eingeschaltet. Es könnte sein, dass SA eine leichte Verschlechterung der erzielbaren Genauigkeit bringt. Verbesserungen, sowohl bezüglich Genauigkeit als auch Zuverlässigkeit, könnten sich ergeben, falls nur P-Code-fähige Empfänger eingesetzt würden. Einerseits wäre das Signal zu Rausch Verhältnis bei der Messung besser, was wenige Phasenverluste sowie weniger Messrauschen bedeutet, und andererseits könnte bei der Auswertung die volle Wellenlänge des L2-Trägersignals genutzt werden.

#### a) Auswertung nach der klassischen Methode

##### Beobachtungsdauer:

Die Richtlinien der L+T resp. V+D konnten von allen L1-Lösungen der Messungen im Triangulationsnetz erfüllt werden. Um die L2-Messungen auswerten zu können, waren für die Messungen im Triangulationsnetz 2 Stunden Beobachtungszeit notwendig.

Im Polygonar waren 90 Minuten Beobachtungszeit notwendig, um mit den L1-Lösungen die Richtlinien der L+T resp. V+D zu erfüllen.

Die L2-Messungen konnten im Polygonar auch bei 3–4 Stunden Beobachtungsdauer nicht genutzt werden.

##### Relativgenauigkeit:

im Triangulationsnetz: ca.  $\pm 3$  mm  
im Polygonar: ca.  $\pm 3$ –6 mm

Bei Einfrequenzmessungen bringen Beobachtungszeiten von mehr als 60 Minuten kaum mehr eine Genauigkeitssteigerung.

Die Ionosphärenkorrektur brachte im ausgeglichenen GPS-Netz mit Basislinienlän-

gen von 1–2 km eine kleine Steigerung in der Relativgenauigkeit von ca.  $\pm 1$  mm.

Ob die mit viel Aufwand bestimmten Antenneneichwerte tatsächlich eine Genauigkeitssteigerung brachten, kann bei der gewählten Messanordnung nicht klar entschieden werden.

##### Zuverlässigkeit:

Eine Stationierung ist keine Stationierung.

#### b) Zu den Kurzzeitlösungen von 3 resp. 5 Minuten

##### Relativgenauigkeit:

im Triangulationsnetz: ca. 3–7 mm  
im Polygonar: ca. 5–12 mm

##### Normalverteilung:

Die Anzahl der vom «scheinbaren Erwartungswert» um mehr als den dreifachen mittleren Fehler abweichenden Lösungen ist grösser, als gemäss Normalverteilung zu erwarten wäre. Doppelte Stationierungen sind deshalb bei Kurzzeitlösungen sehr zu empfehlen.

Sowohl anhand der Langzeitlösungen als auch der Kurzzeitlösungen konnte festgestellt werden, dass die Genauigkeit der Messungen im Polygonar von Störungen wie Fahrzeugverkehr, Phasensprüngen, Multipathing merklich verschlechtert wird. Bei genügend langen (sehr langen) Beobachtungszeiten machen sich die Störeinflüsse in der Lösung allerdings deutlich weniger bemerkbar.

## Anmerkungen:

- [1] Ambiguität ist ein Synonym für Mehrdeutigkeit und stammt vom englischen Ausdruck Ambiguity.
- [2] RDOP: «Relativ Dilution of Precision» ein quasi über die Beobachtungszeit aufintegriertes und auf 60 Sekunden normalisiertes a priori Genauigkeitsmass (Einheit: m/Zyklus).

## Literaturverzeichnis:

Eidgenössische Vermessungsdirektion, Bundesamt für Landestopographie (1990): Richtlinien für die Bestimmung von Lagefixpunkten mittels GPS in der amtlichen Vermessung.

Kofmel D. (1992): Die GPS-Testkampagne durchgeführt vom Vermessungsamt der Stadt Zürich (interner Bericht).

## Adresse des Verfassers:

Daniel Kofmel  
dip. Ing. ETH  
Volkswirtschaftsdepartement  
des Kantons St. Gallen  
Moosbrugstrasse 11  
CH-9001 St. Gallen

# La combinaison de mesures terrestres et par satellite dans les réseaux planimétriques

A. Carosio

**Les mesures de position grâce aux satellites du système GPS caractérisent toujours davantage la géodésie moderne. Les méthodes traditionnelles n'en disparaîtront pas pour autant: combinées aux mesures par satellite, elles sont toujours nécessaires. La méthode des séries de coordonnées est particulièrement indiquée pour les travaux courants, dont la planimétrie et l'altimétrie sont traitées séparément.**

**Die heutige Geodäsie ist je länger je mehr durch das Positionierungssystem GPS geprägt. Trotzdem werden die anderen Messverfahren nicht verschwinden: Kombinationen von Satellitenbeobachtungen und terrestrischen Messungen sind immer notwendig. Die Methode der Koordinatensätze ist besonders geeignet für die normalen Arbeiten, die am besten getrennt in Lage und Höhe berechnet werden.**

## Révolution ou évolution?

Les techniques géodésiques ont subi de profonds changements depuis la mise en service du système GPS NAVSTAR, lesquels seront d'autant plus visibles que le nombre de satellites en orbite aura atteint le nombre total initialement prévu et qu'une grande partie des géomètres se sera équipé de récepteurs. Ces transformations dans nos techniques de travail, bien que notables, ne constituent pas un bouleversement total de nos méthodes. Il s'agit plutôt d'une évolution des techniques très semblable à celle de la fin des années soixante, consécutive à l'apparition de la mesure électronique des distances.

Plusieurs raisons incitent à prévoir que les mesures GPS devront être intégrées aux mesures traditionnelles et ceci pendant de nombreuses années encore:

- Les mesures GPS sont uniquement possibles en terrain découvert et donc pas nécessairement là où les points sont requis.
- Les rattachements, les levés de points inaccessibles, les mesures entre les bâtiments etc. se font à l'aide de mesures de directions et de distances.
- Les mesures effectuées par le passé constituent un capital qui ne doit pas être perdu.
- La précision des mesures GPS n'est que relative. Il faut donc continuer à concevoir des réseaux.

Le choix entre les modèles de calcul tridimensionnels ou partagés en planimétrie et altimétrie doit tenir compte des considérations suivantes:

- Le système GPS est tridimensionnel. La précision de l'altimétrie est cependant moins bonne que celle de la planimétrie.

- Les mesures traditionnelles sont normalement faciles à partager en réseau dans le plan et en altimétrie.
- La compensation tridimensionnelle se justifie dans les réseaux étendus dans les trois dimensions et demande beaucoup plus de mesures pour atteindre une fiabilité suffisante.
- Une analyse mathématique de la fiabilité est indispensable pour les calculs à trois dimensions.

Ces raisons sont plus que suffisantes pour suggérer le développement de procédés permettant la combinaison de mesures GPS et de mesures conventionnelles (terrestres) en suivant la conception classique de partager les réseaux et le calcul en planimétrie et altimétrie.

## Stratégies de développement

Pendant les 20 dernières années, beaucoup de temps et d'énergie ont été investis dans le développement de logiciels de traitement des mesures géodésiques! Je me réfère en particulier à la compensation des réseaux, aux analyses statistiques, à la théorie de la fiabilité, etc. Les logiciels actuellement utilisés sont complets et ont atteint un bon niveau de qualité.

Il ne semble pas raisonnable d'abandonner ces logiciels existants, très complexes, pour écrire de nouveaux programmes pour le traitement combiné de mesures GPS et traditionnelles. La composante GPS est encore assez simple pour le moment, on ne dispose en effet que de peu d'expérience.

L'Office fédéral de topographie a par conséquent décidé d'intégrer dans son programme de triangulation LTOP le traitement de mesures GPS pour compléter la bien connue compensation des réseaux géodésiques. Cela a permis d'utiliser un

sauter

Kartographie Leitungskataster Vermessung

Wir übernehmen laufend Zeichnungsaufträge aus den Bereichen:

LEITUNGSKATASTER  
KARTOGRAPHIE  
VERMESSUNG

Vergleichen Sie uns:

- Attraktives Preis-Leistungsverhältnis
- Hochqualifiziertes Personal
- Bedeutender Kundenkreis (seit 1968 aufgebaut)
- Termingerech
- Sicherer Transport

Niederdorfstr. 63  
8001 Zürich  
Tel. 01/252 56 74

Rotbuchstr. 9  
8006 Zürich  
Tel. 01/363 82 83

Oberseestr. 48  
8640 Rapperswil  
Tel. 055/276 246

Das Sauter-Team grüsst