

Paper-ID: VGI_198907



GPS-Messung im Tunnelnetz Roppen

Günther Chesi ¹, Albert Grimm-Pitzinger ²

¹ *Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck*

² *Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie, Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **77** (3), S.
105–110

1989

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Chesi_VGI_198907,  
Title = {GPS-Messung im Tunnelnetz Roppen},  
Author = {Chesi, G{\u}nther and Grimm-Pitzinger, Albert},  
Journal = {{\u}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessungswesen und  
Photogrammetrie},  
Pages = {105--110},  
Number = {3},  
Year = {1989},  
Volume = {77}  
}
```



GPS-Messung im Tunnelnetz Roppen

von G. Chesi und A. Grimm-Pitzinger, Innsbruck

Zusammenfassung

Im Artikel wird das Ergebnis einer satellitengestützten Messung eines Tunnelnetzes mit dem einer konventionellen, terrestrischen Messung verglichen. Zwei Portalpunkte und jeweils zwei Miren werden mittels vier WM-101-GPS-Empfängern während einer Beobachtungssession eingemessen und berechnet. Nach einem Vergleich der beiden Punktverbände und einer realistischen Abschätzung der Genauigkeit der Satellitenkoordinaten durch Varianzkomponentenschätzung wird die unterschiedliche Auswirkung auf den untertägigen Lagevortrieb dargestellt. Es zeigt sich, daß im betrachteten Beispiel die GPS-Lösung als gleichwertig mit der terrestrischen Variante betrachtet werden kann.

1. Einleitung

Lange Zeit war die Satellitenmethode in ihrer Anwendung auf meist überregionale Projekte mit ausschließlich wissenschaftlichem Charakter beschränkt. Mit den verfahrenstechnischen Vorteilen und den erreichbaren hohen Genauigkeiten des Global Positioning System (GPS) scheint es zu gelingen, diese Techniken in die Praxis der Landesvermessung und der Ingenieurgeodäsie einzubinden.

Der wohl bedeutendste Vorteil gegenüber den konventionellen, terrestrischen Verfahren ist die fehlende Notwendigkeit von Sichtverbindungen zwischen den Netzpunkten. Dadurch ist GPS prädestiniert für den Einsatz in der Tunnelvermessung, wo die mühsame terrestrische Verbindung der Portalbereiche elegant ersetzt werden kann.

Die Tendenz, aus Gründen des Lärmschutzes Verkehrswege unter Tag zu verlegen, läßt in nächster Zeit eine Fülle von Tunnelbauvorhaben in Österreich erwarten. Damit stellt sich unmittelbar die Frage nach der Praxistauglichkeit von GPS im Rahmen der Tunnelvermessung. Um eine erste Antwort zu bekommen, wurde im September 1987 für das Institut für Geodäsie der Universität Innsbruck im Rahmen eines Forschungsauftrages ein bereits terrestrisch gemessenes Netz mit GPS nachgemessen und die Ergebnisse verglichen.

2. Das Tunnelnetz Roppen

Im Zuge der Fortführung der Inntalautobahn A12 in Richtung Arlberg befindet sich im Bereich Roppen-Imst ein sechs Kilometer langer Straßentunnel zur Durchquerung des Tschirgantmassives in Bau. Als Grundlage für die Vortriebskontrollen führte die Vermessungsabteilung des Amtes der Tiroler Landesregierung terrestrische Messungen durch.

Abbildung 1 zeigt diejenigen sechs Punkte dieses Netzes inklusive ihrer Fehlerellipsen, die in den GPS-Vergleich einbezogen wurden. Die Elemente der aus einer freien Ausgleichung mit Gesamtspurminimierung resultierenden Fehlermaße sind in Tabelle 1 aufgelistet.

	$A_{[mm]}$	$B_{[mm]}$	RIW [$^{\circ}$]
P-WEST	4	2	77
P-OST	7	3	60
WEST 1	10	4	36
OST 1	11	5	345
WEST 2	12	5	18
OST 2	4	4	313

Tabelle 1: Helmert'sche Fehlerellipsen auf Grund der terrestrischen Messungen

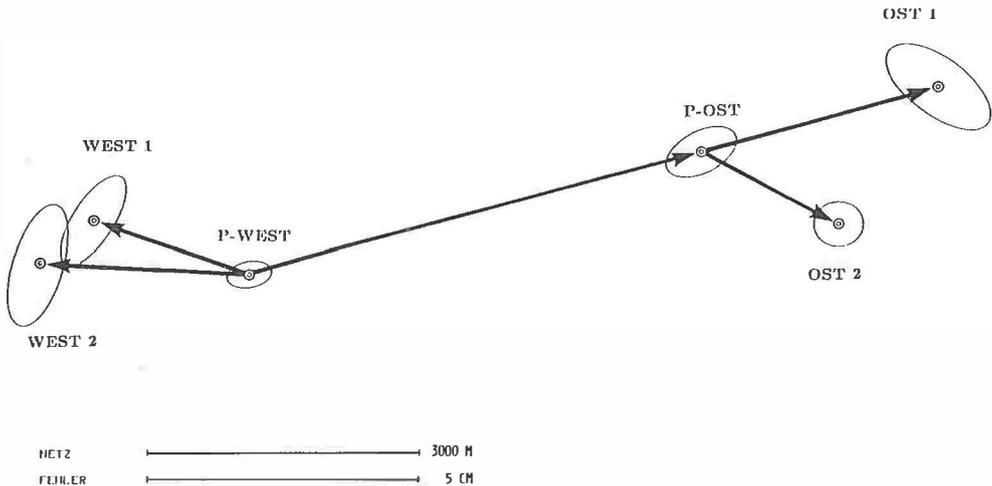


Abbildung 1

Die Höhenübertragung basierte auf der Präzisionsnivellementlinie 723 des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen, welche die zwei an der Bundesstraße liegenden Portalbereiche verbindet. Die Anschlüsse daran erfolgten mit Feinnivellement oder, wenn dies die Topographie erzwang, mittels trigonometrischen Nivellement mit gleichzeitig-gegenseitig gemessenen Zentidistanzen und kurzen Seiten.

Für die vergleichende GPS-Messung wurde eine einfache Konfiguration mit drei Punkten pro Portalbereich gewählt (Abbildung 1). Von den vier zur Verfügung stehenden Empfängern vom Typ WM-101 wurden zwei auf den beiden Portalpunkten postiert, die beiden anderen kamen durch Umsetzen nach etwa der Hälfte der während eines Beobachtungsfensters zur Verfügung stehenden Zeit, auf je zwei Miren zum Einsatz.

Die Auswertung erfolgte mit Hilfe des Berner Softwarepaketes an der TU Wien (Dipl.-Ing. Schwarz). Ausgehend vom westlichen Portalpunkt wurden die in Abbildung 1 dargestellten Basisvektoren gebildet. Diese durch Koordinatendifferenzen im kartesischen, geozentrischen Koordinatensystem gegebenen Vektoren wurden an die Näherungskordinaten des Punktes Portal West addiert. Die durch Pseudobogenschnitt gewonnenen Koordinaten des Zentralpunktes wurden als fehlerfrei und damit unveränderlich in die Ausgleichung eingeführt.

Durch diese willkürliche Festlegung sind sowohl die resultierenden Koordinaten als auch deren Kovarianzmatrix nicht als frei im Sinne einer Gesamtspurminimierung zu betrachten. Tabelle 2 zeigt die vom Auswerteprogramm auf Breite, Länge und ellipsoidische Höhe bezogenen Standardabweichungen der sechs Netzpunkte.

	σ_B [mm]	σ_L [mm]	σ_h [mm]
P-WEST	—	—	—
P-OST	1	1	1
WEST 1	2	2	4
OST 1	1	2	4
WEST 2	1	2	3
OST2	1	1	3

Tabelle 2: Standardabweichungen der GPS-Lösung aus Berner-Software, bezogen auf P-West

Diese Angaben sind zu optimistisch, da bei der Erstellung der Kovarianzmatrix der Satellitenkoordinaten Korrelationen nicht berücksichtigt werden [Welsch]. Eine realistische Abschätzung der Punktlagegenauigkeiten aus dem Datensatz erfolgt in Kapitel 4.

3. Vergleich terrestrisches Netz – GPS-Netz

Um Größe und Gestalt der beiden Netze miteinander vergleichen zu können, wurde das GPS Netz auf das terrestrische transformiert. Zuvor mußten die Gauß-Krüger Koordinaten und Gebrauchshöhen des terrestrischen Netzes in ein dem kartesischen geozentrischen Satellitensystem vergleichbares System übergeführt werden, ohne dabei die innere Geometrie des Punktverbandes zu verändern.

Die Gauß-Krüger-Koordinaten und Gebrauchshöhen der sechs den beiden Systemen gemeinsamen Punkte wurden in geographische Koordinaten (B, L, h) (Bessel-Ellipsoid) umgerechnet. Da aus GPS-Messungen ellipsoidische Höhen (h) resultieren, wurden an die als Gebrauchshöhen vorliegenden Höhenwerte der terrestrischen Messung (H) Höhenanomalien (N) addiert:

$$h = H + N$$

Nach Umwandlung in kartesische Koordinaten (X_T, Y_T, Z_T) und einer Reduktion auf den Schwerpunkt der sechs Koordinatentripel (X_T^S, Y_T^S, Z_T^S) können diese Werte mit den ebenfalls auf ihren Schwerpunkt bezogenen GPS Koordinaten (X_S^S, Y_S^S, Z_S^S) verglichen werden. Dadurch werden die drei Translationen zwischen Bessel-Ellipsoid und WGS-84 eliminiert, was in den folgenden Verfahren rechentechnische Vorteile bietet.

Die verbleibenden Koordinatendifferenzen von maximal 20 cm gehen als Beobachtungsgrößen in eine überbestimmte, differentielle, räumliche Helmerttransformation des GPS-Netzes auf das terrestrische Netz ein. Das funktionale Modell dieser Transformation ist das einer Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen [Welsch].

$$X_T^S - X_S^S + v_x - G \cdot p = 0 \tag{1}$$

- X_T^S ... Vektor der schwerpunktbezogenen terrestrischen Koordinaten
- X_S^S ... Vektor der schwerpunktbezogenen Satellitenkoordinaten
- v_x ... Vektor der Restklaffungen
- G ... Koeffizientenmatrix
- p ... Vektor der Parameter

Die „Meßwerte“, also die Differenzen der terrestrischen und der Satellitenkoordinaten, werden gleichgewichtig in die Ausgleichung eingeführt.

Es steht eine Transformation mit sieben oder sechs Parametern (mit oder ohne Maßstabsunbekannte) zur Wahl. Das an dieser Stelle meist benützte 7-Parameter Modell gleicht den Maßstab des Satellitennetzes an den des terrestrischen Netzes an. Der beabsichtigte Vergleich bezieht sich deshalb nur mehr auf die Form, aber nicht mehr auf die Größe der beiden Punkthaufen. Die Restklaffungen der 7-Parameter-Transformation (nach einer Umrechnung in Breiten-, Längen- und Höhenkomponenten) sind in Tabelle 3 ersichtlich.

Das quadratische Mittel der Klaffungen in den Lagekoordinaten: 16 mm
 Das quadratische Mittel der Höhenklaffungen: 19 mm

Als nicht signifikant erwies sich der Maßstab:

$$M = 2.6 \cdot 10^{-6}$$

$$s_M = 2.2 \cdot 10^{-6}$$

Das 6-Parameter-Modell liefert praktisch idente Ergebnisse.

	ΔB	ΔL	Δh
Portal-West	24	12	6
West 1	- 9	5	28
West 2	-20	-17	-26
Portal-Ost	31	3	-21
Ost 1	-26	7	1
Ost 2	0	-10	11

Tabelle 3: Restklaffungen der gleichgewichtigen 7-Parameter-Transformation in *mm*

4. Realistische Abschätzung der Genauigkeit der Lagekomponenten der Satellitenkoordinaten

Bei der Beurteilung der Restklaffungen muß beachtet werden, daß diese nur ein Maß für das Übereinstimmen der beiden Netze sind. Da das terrestrische Netz in Relation zum Satellitennetz nicht als fehlerfreier Komparator zu betrachten ist (siehe Tabelle 1), dürfen diese Restklaffungen nicht alleine zu Lasten des GPS-Netzes interpretiert werden. Um zu einer realistischen Aussage zumindest über die Genauigkeit der Lagekomponenten der Satellitenkoordinaten zu gelangen, wurde eine Varianzkomponentenschätzung durchgeführt.

Mit Hilfe dieser statistischen Methode ist es möglich, die Genauigkeitsrelation zwischen Meßgruppen (z. B. Richtungs- und Streckenmessungen in einem terrestrischen 2-D-Netz [Grimm-Pitzinger, Hanke]) aus dem Datenmaterial abzuschätzen.

Dazu ist eine Verfeinerung des bisherigen Modelles (1) notwendig. Der Vektor der Restklaffungen \mathbf{v}_x wird in einen den terrestrischen Koordinaten zugehörigen Anteil \mathbf{v}_{xT} und in einen den Satellitenkoordinaten zugehörigen Anteil \mathbf{v}_{xS} aufgeteilt [Welsch]:

$$\mathbf{X}_T + \mathbf{v}_{xT} - (\mathbf{X}_S + \mathbf{v}_{xS}) - \mathbf{G} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (2)$$

Statt des bisher gleichgewichtigen Ansatzes werden nun die Kovarianzmatrizen der beiden Koordinatengruppen zur Erstellung des stochastischen Modells benützt. Sie können als Kofaktorenmatrizen \mathbf{Q}_{xT} und \mathbf{Q}_{xS} des neuen Modells interpretiert werden. Entscheidend ist der Ansatz von zwei Varianzkomponenten σ_T^2 und σ_S^2 , um das Varianzniveau der beiden Gruppen getrennt schätzen zu können.

$$\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{K}_x = \begin{pmatrix} \sigma_T^2 \cdot \mathbf{Q}_{xT} & 0 \\ 0 & \sigma_S^2 \cdot \mathbf{Q}_{xS} \end{pmatrix} \quad (3)$$

\mathbf{Q}_{xT} . . . Kofaktorenmatrix der terrestrischen Koordinaten (Teilmatrix aus Lageausgleich

\mathbf{Q}_{xS} . . . transformierte Kofaktorenmatrix der Satellitenkoordinaten aus Berner Software

Das verfeinerte Modell entspricht dem einer Ausgleichung bedingter Beobachtungen mit Unbekannten (Gauß-Helmert-Modell). Nach der Ausgleichung können die a-priori angenommenen Varianzkomponenten σ_T^2 und σ_S^2 den aus dem Datenmaterial geschätzten Größen s_T^2 und s_S^2 gegenübergestellt werden. Die berechneten Größen werden in einem weiteren Rechenlauf als a-priori Werte angenommen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis sich a-priori und a-posteriori Werte nicht mehr signifikant unterscheiden.

Eine Anmerkung zur Erstellung des stochastischen Modells (3):

Die (12×12) Matrix Q_{XT} wurde direkt der Kovarianzmatrix der geschätzten Koordinaten einer Lageausgleichung entnommen. Die Berechnung erfolgte unter der Bedingung der Gesamtspurminimierung, das heißt durch Transformation auf alle Näherungskordinaten. Sie stellt damit eine im Sinn von *Meissl* „innere Fehlermatrix“ dar. Um zu einer damit vergleichbaren Matrix Q_{XS} der Satellitenkoordinaten zu gelangen, mußte die auf kartesische Koordinaten bezogene, von der Berner Software ausgegebene Matrix, mittels des Fehlerfortpflanzungsgesetzes in geographische Koordinaten transformiert werden. Das Eliminieren der Höhenkomponente erfolgte durch Streichen der entsprechenden Zeilen und Spalten [*Wolf*]. Außerdem unterschied sich durch das willkürliche Festhalten des Punktes Portal West die Lagerung der beiden Systeme. Mit Hilfe einer S-Transformation wurde die Matrix der Satellitenkoordinaten in den Rang einer „inneren Fehlermatrix“ übergeführt und damit der terrestrischen Matrix vergleichbar gemacht.

Als Ergebnis der Varianzkomponentenschätzung resultiert eine durchschnittliche Standardabweichung der Satellitenkoordinaten von 6 mm. Demnach wären die Angaben aus der Berner Software gegenüber diesen, als äußere Genauigkeit interpretierbaren Werten, um den Faktor 6 zu optimistisch.

5. Vergleich der Auswirkung der beiden Lösungen auf den Tunnelvortrieb

Wurde im Abschnitt 3. die Geometrie der beiden Netze verglichen, so sollen sie jetzt bezüglich ihres ursprünglichen Zweckes, der Schaffung einer Verbindung zwischen den Tunnelportalen, betrachtet werden. Tunnelnetze weisen mit dem Durchschlagsfehler eine klar umrissene, eng definierte Zielfunktion auf. Es soll also die Frage untersucht werden, ob bei der Lageabsteckung des Tunnelvortriebes auf der Grundlage des GPS-Netzes eine Diskrepanz im Durchschlagspunkt gegenüber der Variante mit dem terrestrischen Netz auftritt.

Abbildung 2 zeigt schematisiert die Situation im unterirdischen Bereich des Netzes. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die beiden Polygonzüge zwischen den Portalpunkten und dem Durchschlagspunkt durch jeweils eine fiktive polare Anzielung ersetzt. In der Praxis werden mit Theodoliten auf den Portalpunkten Anschlußrichtungen nach sichtbaren Punkten des oberirdischen Netzes gemessen und daraus Orientierungen berechnet. Die für die Absteckung der Durchschlagspunkte einzustellenden horizontalen Richtungen am Theodolit errechnen sich aus dem bekannten Zusammenhang zwischen Orientierung, Richtungswinkel und horizontaler Richtung. Führt man diese Berechnung im GPS-System durch, ergeben sich im allgemeinen andere einzustellende horizontale Richtungen, da sich wegen der nicht vollständigen Kongruenz des terrestrischen und des GPS-Netzes in den Portalbereichen andere Orientierungen ergeben und außerdem die Richtungswinkel in beiden Systemen differieren.

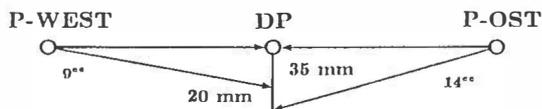


Abbildung 2: Auswirkung der beiden Lösungen auf den Tunnelvortrieb

Die auf der Grundlage des GPS-Netzes errechneten Absteckungen sind um 9° bzw. 14° gegenüber der „terrestrischen Version“ verdreht. Die entsprechenden Perpendikel im Durchschlagspunkt betragen 3,5 bzw. 5,5 cm, in gleiche Richtung weisend. Eine Beurteilung dieser Diskrepanzen kann nur unter Betrachtung des für den Durchschlagspunkt prognostizierten Vertrauensbereiches des Querfehlers vorgenommen werden. Dieser, stark von der Konfiguration und der veranschlagten Meßgenauigkeit im unterirdischen Teil des Tunnelnetzes abhängige Wert, wurde in [Hanke, Grimm-Pitzinger] mit ± 19 cm geschätzt (Sicherheitswahrscheinlichkeit = 95%). Die terrestrischen und die GPS-Lösungen können somit als gleichwertig bezeichnet werden.

Eine dieser Vorgangsweise entsprechende Überlegung für die Höhenabsteckung zeigt eine vertikale Versetzung des Durchschlagsortes gegenüber der terrestrischen Grundlage um 27 mm.

Abschließende Bemerkungen

Bevor sich die GPS-Meßtechnik endgültig als Standardverfahren zur Schaffung der obertägigen Verbindung von Tunnelportalen durchsetzen kann, sind noch wichtige Fragen zu klären. Diese betreffen weniger die erreichbaren Genauigkeiten. Die Schwachstelle liegt in den nicht zufriedenstellend geklärten Aspekten der Zuverlässigkeit der aus den Berechnungen resultierenden Koordinaten und damit des Vortriebes. Eine hohe Zuverlässigkeit der Meßanordnung scheint jedoch gerade in der Tunnelvermessung eine unabdingbare Forderung des verantwortlichen Ingenieurs zu sein.

Dank

Die Verfasser bedanken sich bei der Industriellenvereinigung für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes.

Literaturverzeichnis

- [1] Hanke K., Grimm-Pitzinger A.: Bedeutung der Varianzkomponentenschätzung für die geodätische Praxis, Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Heft 2, 1986.
- [2] Hanke K., Grimm-Pitzinger A.: Eine Optimierungsstrategie für Tunnelnetze, Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Heft 2, 1987
- [3] Welsch W.: Vergleichende Auswertung und Beurteilung von GPS-Beobachtungen in lokalen Netzen, Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural, Heft 7, 1988
- [4] Wolf H.: Scale and Orientation in Combined Doppler and Triangulation Nets, Bulletin Géodésique, Heft 54, 1980.

Manuskript eingelangt im April 1989.