

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: 92 (1994)

Heft: 7

Artikel: GPS-gestützte hochgenaue Luftbildphotogrammetrie

Autor: Grün, A. / Cocard, M. / Geiger, A.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235082>

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: 20.02.2025

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

GPS-gestützte hochgenaue Luftbildphotogrammetrie

A. Grün, M. Cocard, A. Geiger, H.-G. Kahle, B. Moser

Der Einsatz von kinematischem GPS während photogrammetrischer Befliegungen ermöglicht eine hochpräzise Bestimmung der Koordinaten der Projektionszentren, die in der Bündelblockausgleichung als unbekannte Parameter der äusseren Orientierung auftreten. Dies erlaubt die Reduktion der Anzahl Passpunkte am Boden. Die Resultate einer GPS-gestützten photogrammetrischen Befliegung des Testgebietes Uster (ZH) im Bildmassstab 1:10000 haben gezeigt, dass unter Einbezug der GPS-Information mit nur 4 Passpunkten in den Blockecken eine Genauigkeit von 5 cm in der Lage und 8 cm in der Höhe erreicht werden konnte. Eine vergleichbare Genauigkeit erhält man bei einer konventionellen Auswertung ohne GPS nur mit einer grossen Anzahl Passpunkte (17 Vollpasspunkte, 12 Höhenpasspunkte). Da es möglich war, in der kinematischen GPS-Lösung die Phasenmehrdeutigkeiten zu lösen, konnte die Anzahl der sogenannten «Driftparameter», die hier nur noch den kumulativen Effekt von Fehlern der inneren Orientierung der metrischen Kamera und von Restfehlern der Koordinatentransformationen beinhalten, auf einen einzigen Offsetvektor für den gesamten Block reduziert werden. Bei unserem Konzept bedarf es daher keines zusätzlichen Aufwandes in Form von Querstreifen an den Blockenden.

L'utilisation du GPS lors des vols d'aerotriangulation photogrammétrique permet la détermination précise des coordonnées des centres de projection de la caméra. Ces coordonnées sont des paramètres inconnus de l'orientation externe dans une compensation de faisceaux. La méthode GPS permet théoriquement de réduire le nombre de points de contrôle nécessaires au sol. Une étude de faisabilité a été conduite à l'aide d'un vol photogrammétrique aéroporté à l'échelle 1 : 10 000 dans la région de Uster (ZH). En tenant compte de l'information provenant du GPS, une précision de 5 cm pour la planimétrie et de 8 cm pour l'altimétrie a été obtenue avec seulement 4 points de contrôle disposés aux 4 coins du bloc. Par la méthode conventionnelle sans GPS une telle qualité du résultat ne peut être obtenue qu'avec un grand nombre de points de contrôle (17 points de contrôle complets (x,y,h) et 12 points de contrôle altimétriques [h]). Comme il a été possible de résoudre toutes les ambiguïtés des mesures de phase dans la solution GPS, le nombre de paramètres de dérive a pu être réduit à un seul vecteur de translation inconnu, qui tient compte des erreurs de l'orientation interne de la caméra et des imprécisions dans les transformations des coordonnées. Ainsi il ne s'avère pas nécessaire de renforcer le bloc par des lignes transverses au bord.

1. Einleitung

Da durch Einbeziehung von Phasenmessungen in die kinematische GPS-Auswertung eine Bestimmung der Flugtrajektorie im cm-Bereich möglich geworden ist, erlaubt der Einsatz von kinematischem GPS während des Bildfluges eine wesentliche Reduktion der Anzahl der Geländepasspunkte, was die Blocktriangulation effizienter und wirtschaftlicher werden lässt. In einer Studie mit synthetischen Daten (Grün, Runge, 1988) wurde das Genauigkeitspotential einer kombinierten GPS/Bündel-Lösung und die günstige Struktur solch eines Systems in Bezug auf die Bestimmbarkeit von zusätzlichen Parametern für die Selbstkalibrierung gezeigt.

Unser ETH-Projekt «GPS gestützte Aerotriangulation», dessen Ziel es war, die theoretischen Voraussagen zu bestätigen und dessen Ergebnisse hier vorgestellt werden, wurde 1989 in Angriff genommen.

Es wurde durch die ETH-Zürich gefördert und als Kooperation zwischen den Professoren «Geodäsie» und «Photogrammetrie» des IGP durchgeführt. Die Daten wurden über dem Testfeld «Uster» in der Nähe von Zürich erhoben. Dieses Testfeld diente schon früher zu photogrammetrischen Genauigkeitsuntersuchungen (Grün, 1986).

Nach einem halbwegs erfolgreichen Flug mit angemieteten GPS-Empfängern im Jahre 1990 konnten im März 1992 erfolgreiche Flüge an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit institutseigenen Empfängern durchgeführt werden. Sie deckten den gesamten Block ab und lieferten gute GPS Daten. Umfassende Berichte über das vollständige Projekt wurden mit (Grün et al., 1993a,b) vorgelegt.

Ein kritischer Punkt bei der GPS-Auswertung ist die Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten der Trägerwellen (Remondi, 1985, Cocard, Geiger, 1992). Gurtner et

al., 1985 haben gezeigt, dass im statischen Modus Positionierungsgenauigkeiten im Subzentimeterbereich möglich sind, wenn die Mehrdeutigkeiten auf ganzzahlige Werte fixiert werden können. Suchalgorithmen zur effizienteren Auflösung der Ambiguitäten sind in letzter Zeit sehr detailliert von Frei, 1991 untersucht worden. Zur Bestimmung der GPS-Trajektorie wurde eine Auswertemethode für den Off-line-Modus entwickelt, die den integralen Datensatz verwendet, der während des gesamten Fluges gesammelt wurde, um die Mehrdeutigkeiten so gut wie möglich zu schätzen.

Bei Untersuchungen mit synthetischen Daten konnten eine Genauigkeit von $m_{x,y} = 5$ cm in der Lage und $m_z = 8$ cm in der Höhe für die Bodenpunkte bei einem Bildmassstab von 1:10000, einer Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung $\sigma_0 = 5 \mu\text{m}$ und einer Positionierungsgenauigkeit der Projektionszentren von 10 cm in allen drei Koordinatenachsen erreicht werden.

In diesem Bericht wird gezeigt werden, dass diese theoretischen Erwartungen auch in der Praxis bestätigt werden konnten.

2. Testkonfiguration und Datenakquisition

Das ausgewählte Testfeld ist das Gebiet von Uster nahe Zürich und gut geeignet für diesen Zweck (Abb. 1). Die Nachbarschaft zum Flughafen Dübendorf und das Vorhandensein von ungefähr 100 sehr genauen Referenzpunkten machen es zu einem



Abb. 1: Testfeld Uster in der Nähe von Zürich (Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 23. 3. 1994).



Abb. 2: Twin-Otter der Vermessungsdirektion Bern, mit der die Flüge durchgeführt wurden.

idealen Testfeld für derartige Untersuchungen. Die geodätischen Netzpunkte haben eine Koordinatengenauigkeit von 5 mm in der Lage und 6 mm in der Höhe oder besser. Die 94 in diesem Test benutzten Punkte sind recht homogen über das gesamte Gebiet verteilt (Abb. 8).

Zur Gewährleistung eines gleichbleibenden optimalen GPS-Fensters wurde der Block an zwei aufeinanderfolgenden Tagen vom Flugplatz Dübendorf aus geflogen. Bis zu sechs Satelliten konnten gleichzeitig empfangen werden. Die Flüge dauerten jeweils ungefähr $1\frac{1}{2}$ Stunden. Um eine differentielle Verarbeitung zu ermöglichen, wurde ein Empfänger auf einem Referenzpunkt beim Flughafen installiert. Zwei weitere Empfänger waren auf dem Flugzeug (Twin-Otter der Vermessungsdirektion Bern) montiert (siehe Abb. 2). Der Referenzempfänger und einer der bewegten Empfänger waren 2-Frequenz-Empfänger (L1 und L2), der zweite bewegte Empfänger nur ein L1-Empfänger. Die 2-Frequenz-Empfänger sammelten die GPS-Daten mit einer Aufzeichnungsfrequenz 1 Hz, der L1-Empfänger mit 2 Hz. Die Daten bestanden aus Phasen-Messungen auf L1 und auf L2, C/A-Code-Messungen auf L1 und P-Code-Messungen auf L2. Die im Flug gespeicherten Daten wurden im Off-line-Modus überspielt und verarbeitet.

Die verwendete photogrammetrische Kamera war eine Wild RC20 mit einer Kammerkonstante von 15 cm. 8 Streifen mit einer Querüberdeckung von 60% wurden in einer Höhe von ungefähr 1500 m über Grund geflogen, was zu einem Bildmassstab von 1:10 000 führte. In jedem Streifen erfolgten 19 Aufnahmen mit einer Längsüberdeckung von 80%. Für die Auswertung fand nur jedes zweite Bild Verwendung, was zu einer Längsüberdeckung von 60% führte. Tabelle 1 zeigt die Projektparameter.

Um aus der GPS-Trajektorie der Antenne

die Koordinaten der Projektionszentren berechnen zu können, müssen der Zeitpunkt der Belichtung und die Komponenten des Exzentrizitätsvektors vom Projektionszentrum der Kamera bezüglich der Antennenposition sehr genau bekannt sein. Das Synchronisationsproblem wurde dadurch gelöst, dass zum Zeitpunkt der Belichtung ein von der Kamera ausgesandter Impuls im GPS-Empfänger registriert wurde. Dieser Impuls wurde vom Empfänger in GPS-Zeit aufgezeichnet und

Block Uster 1992: Aufnahmedaten	
Aufnahmegebiet	Testgebiet Uster
Gebietsgrösse	7,5 x 9,5 km
Mittlere Geländehöhe	500 m
Befliegungsdatum, -uhrzeit	4. + 5. März 1992, mittags
Flugzeug	Twin-Otter der V+D
Kamera	WILD RC20
Objektiv	15/4 UAGA-F, Nr. 13129
Kammerkonstante	152,85 mm
Kalibrierungsdatum	19.02.1991
Bildformat	23 x 23 cm ²
Bildmassstab	1 : 10 000
Flughöhe über Grund	ca. 1500 m
Überdeckung	(Längs-, Quer-) 80%, 60%
Anzahl Streifen	8
Anzahl Bilder	152 (8 x 19)
Anzahl ausgewerteter Bilder	80
Film	SW, Panatomic X
Anzahl signalisierter Passpunkte	94
GPS-Empfänger (stationär)	Trimble Surveyor II
GPS-Empfänger kinematisch	Trimble Geodesist & Trimble Aerial
Messfrequenz GPS	1 Hz

Tab. 1: Übersicht über die Projektparameter.

in den Rohdaten gespeichert. Der von der Kamera ausgesandte Impuls weicht mit einer geschätzten Standardabweichung von 50 μ sek vom exakten Belichtungszeitpunkt ab. Fliegt das Flugzeug mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h, so führt dies lediglich zu einer Ungenauigkeit von 3,5 mm in der Antennenposition. Der Exzentrizitätsvektor zwischen Antenne und Kamera im Flugzeug wurde am Boden mit terrestrischen Messungen in Bezug auf die Kamera-Bildebene mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern bestimmt. Die relative Orientierung der Bildebene gegenüber der Antenne darf während des Fluges nicht verändert werden, damit der kamerabezogene Referenz-Rahmen erhalten bleibt, in welchem die Komponenten des Exzentrizitätsvektors vorliegen. Die beiden Parameter, Belichtungszeitpunkt und Exzentrizitätsvektor ermöglichen die Verbindung zwischen den GPS-Resultaten und den photogrammetrischen Projektionszentren.

3. Auswertung von kinematischen GPS-Daten

Vor der Auswertung der kinematischen Trajektorie des Flugzeuges wurden die Koordinaten der Referenzstation am Flughafen bestimmt, indem dieser Punkt mit der Permanentstation in Zimmerwald mit GPS verbunden wurde. Diese Vorgehensweise ermöglichte es, die geozentrischen Koordinaten des Referenzpunktes beim Flughafen mit einer Genauigkeit von wenigen Millimetern bezüglich den Koordinaten des astronomischen Observatoriums in Zimmerwald zu fixieren. Diese Werte für die Referenzstation dienten dann als feste Grössen für die Auswertung der Flugdaten.

Für die in diesem Projekt angestrebten Genauigkeiten der GPS-Trajektorie ist eine Auswertung, die nur differentielle Codemessungen benutzt, unzureichend (Cocard, 1990). Deshalb wurden zur Berechnung der kinematischen GPS-Lösung sowohl Code- als auch Phasen-Messungen in einem differentiellen Modus verwendet. Die entsprechenden Beobachtungsgleichungen der Einfach-Differenzen der Code-Messungen sind:

$$\Delta\rho_{jk}^i = \rho_k^i - \rho_j^i = d_k^i - d_j^i + c \cdot \Delta c l_{jk}^i$$

und der Einfach-Differenzen der Phasen-Messungen:

$$\Delta\phi_{jk}^i = \phi_k^i - \phi_j^i = d_k^i - d_j^i + c \cdot \Delta c l_{jk}^i + \lambda \cdot A^i$$

wobei:

- ρ Code-Messung
- ϕ Phasen-Messung
- d Entfernung zwischen Satellit und Empfänger
- A Mehrdeutigkeit bezogen auf die Einfach-Differenz der Phasenmessung

- Δt differentieller Synchronisationsfehler der Empfängeruhren
- λ Wellenlänge der Trägerwelle
- c Lichtgeschwindigkeit

Die hochgestellten Indizes i beziehen sich auf die Satelliten, die tiefgestellten Indizes j und k auf die Referenzstation, beziehungsweise auf die Flugzeugantenne. Die Uhrparameter und die Positionen der Satelliten wurden als bekannt vorausgesetzt, da sie durch die gesendeten Ephemeriden (Broadcast ephemeris) gegeben sind.

Die zugewiesenen a priori Genauigkeiten der Messungen von Phasen- und Code-differenzen können, abhängig von der Qualität des Empfängers, ganz unterschiedlich sein. Typische Werte für die a priori RMS für unterschiedliche Arten von Beobachtungen sind:

Phase	2 – 5 mm
C/A Code	1 – 5 m
P-Code	0,2 – 0,8 m

Die Auswertung wurde in zwei Schritten durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden die zeitvarianten Parameter bestimmt. Parameter, die als invariant betrachtet werden, sind die Mehrdeutigkeiten und die statischen Koordinaten des Flugzeuges vor und nach dem Flug. Für jede Epoche wurden alle zeitvarianten Parameter aus dem Normalgleichungssystem eliminiert, und das reduzierte Normalgleichungssystem wurde über die gesamte Zeitspanne akkumuliert. Durch Invertierung erhält man zunächst die Gleitkomma-Lösung für die Mehrdeutigkeiten. Anschliessend wird versucht, die Mehrdeutigkeiten auf der Stufe der Doppel-Differenzen auf ganzzahlige Werte zu fixieren. Falls dies nicht möglich ist, kann die Gleitkomma-Lösung verwendet werden.

In einem zweiten Schritt werden dann die Werte für die Mehrdeutigkeiten, die in dem vorangegangenen Schritt berechnet wurden, verwendet, um die Koordinaten des bewegten Empfängers für jede Epoche zu berechnen. Die Qualität des Ergebnisses hängt stark von der Qualität der Schätzung

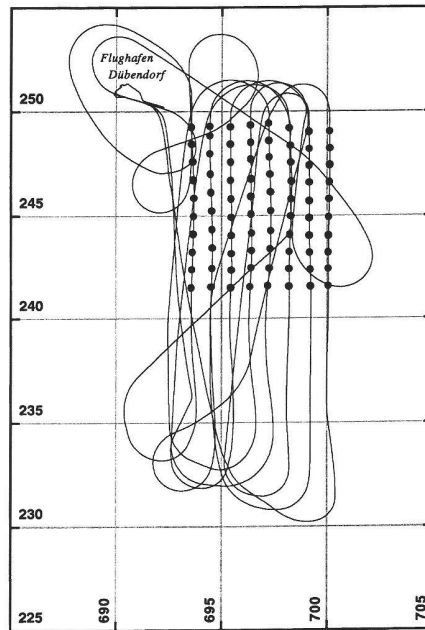


Abb. 3: GPS-Trajektorie mit Projektionszentren beider Flüge in Landeskoordinaten (Einheiten in km).

der Mehrdeutigkeiten ab. Das bestmögliche Ergebnis erhält man, wenn alle Mehrdeutigkeiten gelöst sind. Die Verwendung einer Gleitkomma-Lösung, einer Lösung also, wo die geschätzten Mehrdeutigkeiten im schlechtesten Falle bis zu einigen Zyklen falsch sein können, bedingt die Einführung von zusätzlichen Driftparametern in die Bündelblockausgleichung. Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung der Schritte, die für eine Nachbearbeitung von kinematischen GPS-Daten notwendig sind. Die Auswertesoftware wurde von M. Cocard, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich entwickelt (Cocard, 1994).

4. Bestimmung der Projektionszentren

Die Auswertung der kinematischen Daten erfolgte nach der oben beschriebenen Methode, wobei es möglich war, alle Ambiguitäten zu lösen. Dies ist darauf zurückzuführen,

dass in den Datensätzen zu keinem Zeitpunkt weniger als 4 Satelliten vorhanden waren, und die Distanz zum Referenzempfänger am Flughafen während des ganzen Fluges weniger als 25 km betrug. Abbildung 3 zeigt die GPS-Trajektorien beider Flüge in Landeskoordinaten. Abbildung 4 zeigt die mit GPS bestimmten Flughöhen während den einzelnen Streifenaufnahmen für jeden Tag getrennt, wobei offensichtlich am zweiten Tag (5. März) die Trajektorie wegen der rauereren Windverhältnisse unruhiger verläuft.

4.1 Interpolation der Antennenkoordinaten

Die Positionen der Antennen, die man durch die in Kapitel 3 beschriebene Vorgehensweise erhalten hat, beziehen sich auf die 1 Hz-GPS-Aufzeichnungen. Da die exakten Zeitpunkte der Kamerabelichtungen ebenfalls durch den Empfänger aufgezeichnet wurden, ist es möglich, die Antennenkoordinaten zu interpolieren. Hierzu wurde eine einfache lineare Interpolation gewählt. Um die Qualität und der Koordinaten zu überprüfen und um eine Abschätzung des Fehlers, der durch die lineare Interpolation entsteht, zu bekommen, wurde die folgende Untersuchung durchgeführt. Für jeden Streifen wurde der entsprechende 1-Sekunden Datensatz auf 2-, 4-, 6- und 8-Sekunden Datensätze reduziert. Durch lineares Interpolieren der Koordinaten der reduzierten Datensätze auf die Mitte der Zeitintervalle können die interpolierten Werte mit den gemessenen Werten verglichen werden, und aus den Differenzen kann ein mittlerer Fehler abgeleitet werden (Abbildung 7).

Anschliessend wurde empirisch die exponentielle Funktion

$$RMS = a \cdot \left(\frac{1}{f}\right)^b$$

mit den beiden Koeffizienten a und b verwendet, um den mittleren Fehler der Interpolation für den 1-Sekunden Datensatz vorauszusagen. Der mittlere Fehler RMS

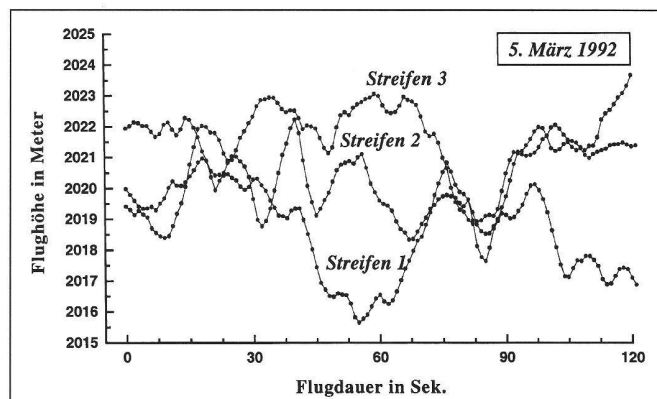
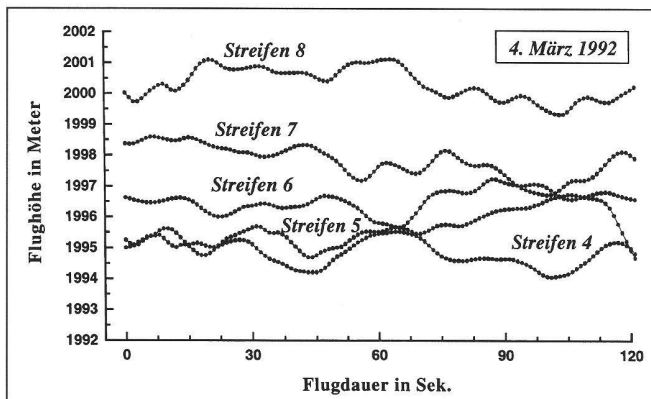


Abb. 4 (a) + (b): Höhenprofile der einzelnen photogrammetrischen Streifen für beide Tage getrennt.

Partie rédactionnelle

beschreibt die Interpolation als eine Funktion der Datenaufzeichnungsfrequenz f (in Hz). Im folgenden werden die Mittelwerte über die 5 Streifen des ersten Tages und über die drei Streifen des zweiten Tages getrennt angegeben:

Im deutlich grösseren Höhenfehler des zweiten Flugtages spiegeln sich die bereits erwähnten rauheren Windverhältnisse wider. So erreicht hier der maximale mittlere Interpolationsfehler 4,2 cm am zweiten Tag für die Höhenkoordinaten.

	Tag 4. März	Tag 5. März	in Meter
Ost-West	0,012 Δt 1.97	0,024 Δt 1.81	(quer zur Flugrichtung)
Nord-Süd	0,002 Δt 1.89	0,006 Δt 1.87	(in Flugrichtung)
Höhe	0,005 Δt 1.65	0,042 Δt 1.32	

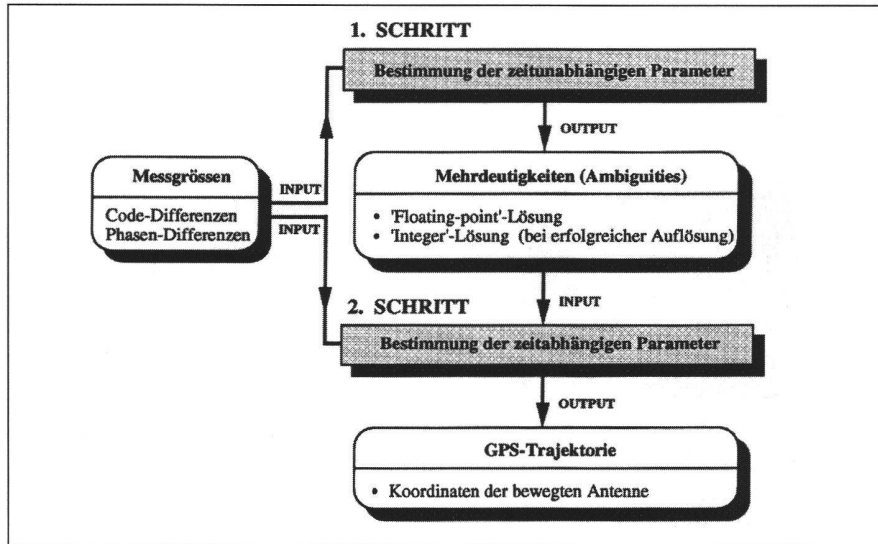


Abb. 5: Auswerteschema für kinematische GPS-Daten.

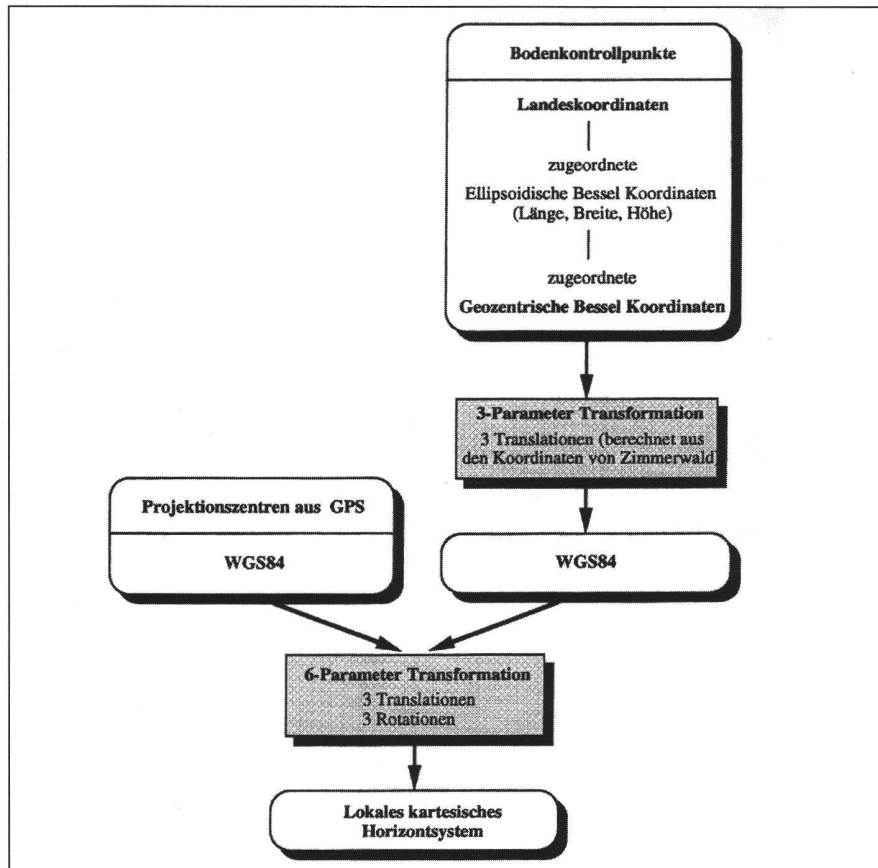


Abb. 6: Koordinatentransformationen.

4.2 Transformation in ein einheitliches Koordinatensystem

Die Koordinaten für die Projektionszentren sind im WGS84 gegeben und mit Hilfe des festen Referenzempfängers beim Flughafen mit den Koordinaten der Station Zimmerwald verbunden. Die Koordinaten der Bodenpunkte hingegen sind im Schweizer Landessystem gegeben. Um die Koordinatensysteme zu vereinigen, wurden zuerst die Koordinaten der Bodenpunkte in ihr zugehöriges geozentrisches kartesisches Bessel-System (Schweizerisches Referenzsystem CH1903) transformiert und dann durch einen Translationsvektor in das WGS84 verschoben. Da keine WGS84-Koordinaten der Bodenpunkte im Testgebiet Uster zur Verfügung standen, wurde dieser Translationsvektor nur aus der Differenz der Bessel- und WGS84-Koordinaten des Punktes Zimmerwald berechnet. Durch dieses Vorgehen bleiben Verzerrungen des Landesnetzes sowie geoidbedingte Höhenunterschiede unberücksichtigt. Dieser Fehler kann aber über den gesamten Block als konstant angenommen und somit durch Berücksichtigung eines unbekanntem Offsetparameters pro Koordinatenachse in der Bündelblockausgleichung abgefangen werden.

Nach diesem Übergang sind alle Koordinaten im geozentrischen WGS84-System verfügbar. Aus numerischen Gründen bei der Bündelblockausgleichung wurde eine vordefinierte 6 Parameter-Transformation (3 Translationen und 3 Rotationen) durchgeführt, um so schliesslich für alle Punkte (GPS-Projektionszentren und Bodenpasspunkte) kartesische Koordinaten in einem lokalen System zu erhalten. Die Abbildung 6 zeigt schematisch die vorgenommenen Koordinatentransformationen.

5. Vergleich mit photogrammetrisch bestimmten Projektionszentren

Die 80 Bilder des Blockes wurden am Analytischen Plotter WILD AC3 des IGP ausgemessen. Neben den 94 signalisierten Punkten mussten 313 natürliche Verknüpfungspunkte miteinbezogen werden. Dies ergab insgesamt 2020 Bildpunkte, die ca. 25 Punkten pro Bild entsprechen. Mit genügend vielen vorgegebenen Bodenpasspunkten können die Koordinaten der Projektionszentren aus der photogrammetrischen Bündelblockausgleichung bestimmt werden. Hier wurde die Bündelblockausgleichung zunächst einmal mit allen 94 Bodenpasspunkten und 12 Zusatzparametern für die Selbstkalibrierung durchgeführt.

Aus den interpolierten GPS-Antennenkoordinaten erhält man nach Berücksichtigung

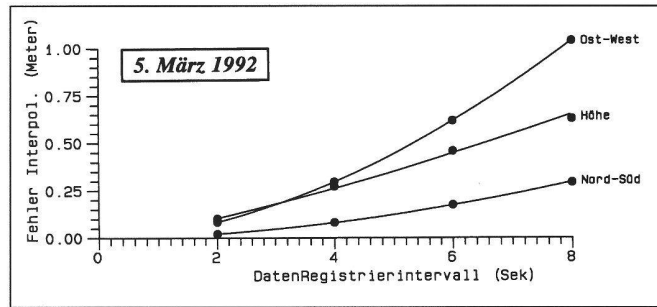
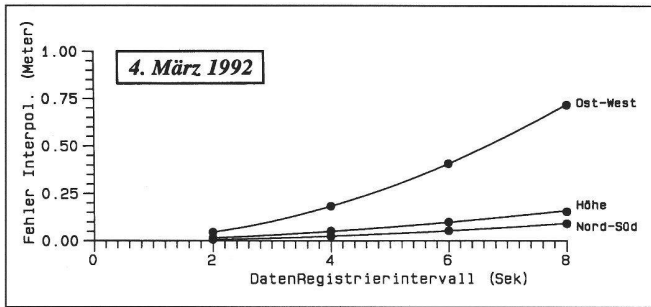


Abb. 7 (a) + (b): Interpolationsfehler der Antennentrajektorien.

des Antennenexzentrizitätsvektor einen zweiten unabhängigen Koordinatensatz für die Projektionszentren. Für den gesamten Block ergaben sich aus den zentrierten Differenzen (GPS versus Photogrammetrie) folgende mittlere Fehler:

$$\mu_x = 12,7 \text{ cm}, \mu_y = 17,4 \text{ cm}, \mu_z = 7,5 \text{ cm}.$$

Die x- und y-Koordinaten entsprechen in etwa der Fluglängs- bzw. der Flugquer- richtung, z der Höhenkomponente (siehe Abbildung 10).

Die Zentrierung der Differenzen ist identisch mit der Bestimmung eines unbekannten Translationsvektors.

Bei diesem externen Vergleich könnten leicht bessere Werte erzielt werden, wenn die Translationsparameter als streifeninvariant berechnet werden. Diese Version wird hier nicht gezeigt, weil – wie sich später herausstellte – dadurch die Koordinaten der Bodenkontrollpunkte nicht verbessert wurden.

Die Standardabweichungen der Projektionszentren aus der Bündelblockausgleichung sind mit $\sigma_{x,y} = 7,4 \text{ cm}$, $\sigma_z = 3,6 \text{ cm}$ um rund einen Faktor 2 kleiner als die empirischen Vergleichswerte. Ähnliche Diskrepanzen konnten auch in anderen Projekten beobachtet werden (Ackermann, 1992) und haben Anlass zu einigen Spekulationen gegeben. Eine Erklärungsmöglichkeit dieser Widersprüche ist durch nicht berücksichtigte systematische Fehler gegeben. In den meisten Fällen wird eine GPS-«Drift» als bedeutendste Ursache für diese Abweichungen diagnostiziert.

Wenn Mehrdeutigkeiten kein Problem darstellen (wie es in unserem Projekt der Fall ist), könnte eine Drift bei der L1-Verarbeitung durch ionosphärische Effekte erzeugt werden. Dies würde zu einem Massstabsfaktor von weniger als 10 ppm führen und einen maximalen Offset von 5 cm im gesamten Testfeldgebiet ergeben. Deshalb kann dieser Effekt die viel grösseren hier beobachteten Abweichungen nicht erklären.

Statt eine GPS-Drift anzunehmen, vermuten wir zwei andere Fehlerursachen. Zum einen gibt es Transformations-Diskrepanzen vom WGS84 (GPS Antennenkoordinaten) zum Schweizer Landeskoordinatensystem (Bodenpunkte) oder umgekehrt. Es gab hier keine in beiden Koordinatensysteme identischen Punkte im Block. Zum andern würde – im Falle flachen Gebietes – jedweder Fehler in den Elementen der inneren Orientierung (Hauptpunktkoordinaten und Kammerkonstante) Verschiebungen dx, dy, dz in allen drei Koordinaten der Projektionszentren der Bündelblockausgleichung verursachen. Falls die Projektionszentren durch GPS-Beobachtungen festgehalten werden, wird dieser Effekt durch die konstanten Terme der «Drift-Parameter» kompensiert. Deshalb können die konstanten Teile der Drift-Parameter und die Effekte der Parameter der inneren Orientierung unter unseren Testbedingungen nicht getrennt werden (gleiche Streifenrichtungen). Hier sollte beachtet werden, dass die Möglichkeit für die Trennung von dem Muster der Flugrichtungen und von der Einführung von block- oder streifeninvarianten Translationsparametern abhängt. Koordinatentransformationsfehler sind blockinvariant, wogegen Fehler der inneren Orientierung und mögliche GPS-Driftfehler vom Vorzeichen der Flugrichtung abhängen.

naten) zum Schweizer Landeskoordinatensystem (Bodenpunkte) oder umgekehrt. Es gab hier keine in beiden Koordinatensysteme identischen Punkte im Block. Zum andern würde – im Falle flachen Gebietes – jedweder Fehler in den Elementen der inneren Orientierung (Hauptpunktkoordinaten und Kammerkonstante) Verschiebungen dx, dy, dz in allen drei Koordinaten der Projektionszentren der Bündelblockausgleichung verursachen. Falls die Projektionszentren durch GPS-Beobachtungen festgehalten werden, wird dieser Effekt durch die konstanten Terme der «Drift-Parameter» kompensiert. Deshalb können die konstanten Teile der Drift-Parameter und die Effekte der Parameter der inneren Orientierung unter unseren Testbedingungen nicht getrennt werden (gleiche Streifenrichtungen). Hier sollte beachtet werden, dass die Möglichkeit für die Trennung von dem Muster der Flugrichtungen und von der Einführung von block- oder streifeninvarianten Translationsparametern abhängt. Koordinatentransformationsfehler sind blockinvariant, wogegen Fehler der inneren Orientierung und mögliche GPS-Driftfehler vom Vorzeichen der Flugrichtung abhängen.

6. Einbezug der GPS-Information in die Bündelblockausgleichung

Ein schlüssiger Systemtest muss Bodenkontrollpunkte enthalten, weil die Bestimmung von Bodenpunktkoordinaten das endgültige Ziel der Blocktriangulation ist. Abbildung 8 zeigt eine Blockübersicht, einschliesslich der Projektionszentren und der Passpunkte. In den nachfolgenden Untersuchungen wurden folgende vier Versionen mit unterschiedlichen Passpunkt-konfigurationen verwendet:

P0: Alle 94 Bodenpunkte wurden als Passpunkte verwendet und somit sind keine Kontrollpunkte mehr vorhanden.

P1: 17 Voll- und 12 Höhenpasspunkte (entspricht einer Überbrückungsdistanz $i = 2b$).

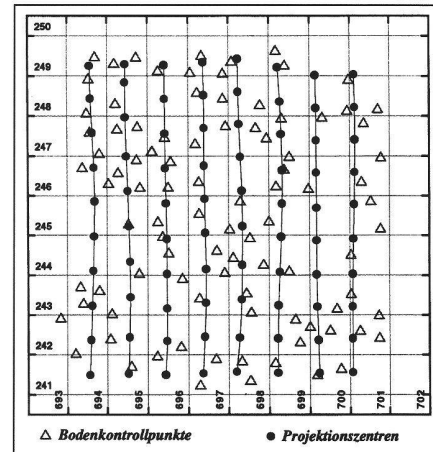


Abb. 8: Blockübersicht des GPS-Blockes «Uster 92».

P2: 4 Vollpasspunkte in den Blockecken und 1 Höhenpasspunkt in der Blockmitte.

P3: 4 Vollpasspunkte in den Blockecken.

In den Versionen P1 bis P3 dienen alle Bodenpunkte, die nicht als Passpunkte verwendet wurden, als Kontrollpunkte. Abbildung 9 zeigt die verschiedenen Passpunktversionen.

Bei der Berücksichtigung der GPS-Information in der Bündelblockausgleichung wurde für jede Passpunkt-konfiguration die Anzahl der Offsetparameter-Sätze variiert:

- O1: blockinvariant
 - 1 Satz pro Block
 - 1 Satz Offsetparameter
- O2: fluginvariant
 - 1 Satz pro Tag
 - 2 Sätze Offsetparameter
- O8: streifeninvariant
 - 1 Satz pro Streifen
 - 8 Sätze Offsetparameter

Die Bündelversionen mit GPS-Daten wurden mit dem Programm ACX vom Institut für Kartographie von Katalonien, Barcelona berechnet (Colomia, 1989). Zusätzlich wurde für jede Passpunkt-konfiguration eine Version ohne GPS-Daten mit dem

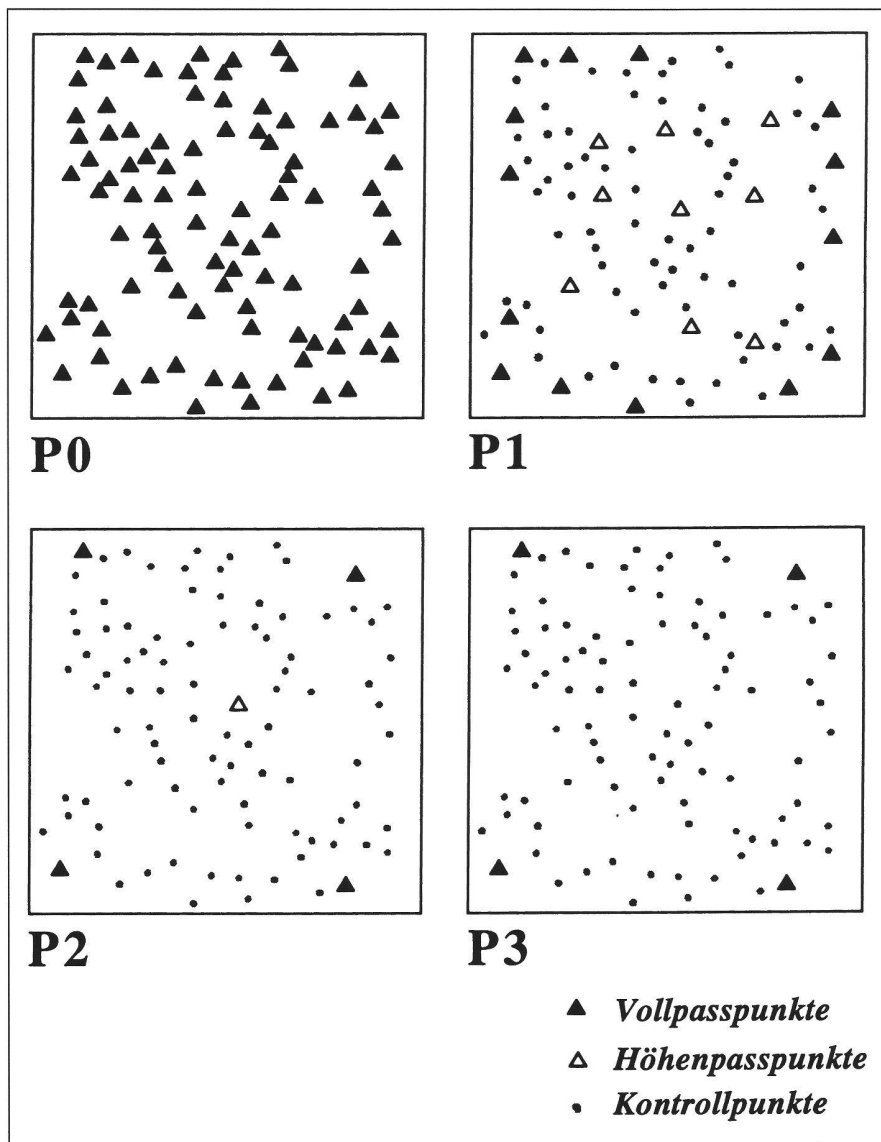


Abb. 9: Passpunktversionen für den GPS-Block «Uster 92».

Bündelprogramm BUND vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, berechnet. Alle Versionen enthalten 12 zusätzliche Parameter (Ebner, 1976) für die Selbstkalibrierung.

Es ist hier noch erwähnt, dass in einem ersten Schritt vollständige Driftparametersätze, die neben den Offsets noch zeitlich lineare Terme enthalten, verwendet wurden. Da diese linearen Terme weder signifikant waren noch die Genauigkeitswerte verbesserten, werden diese Versionen hier nicht vorgestellt. (für Details siehe Grün et al., 1993b).

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse aller Berechnungen mit reduzierten Driftparametersätzen (nur konstante Terme). Mit $\hat{\sigma}_0 = 4,8 \mu\text{m}$ (Version P0 / ohne GPS) ist das gesamte Genauigkeitsniveau nicht besonders hoch, was aus der Tatsache folgt, dass nur 30% aller Objektpunkte signalisiert und folglich deutlich markiert sind. Durch die Einführung zusätzlicher GPS-Daten steigt das Niveau für $\hat{\sigma}_0$ auf $5,2 \mu\text{m}$. Dies deutet auf eine Übergewichtung der

GPS-Antennenbeobachtungen, die mit einer a priori gewählten Standardabweichung von 3 cm für Lage- und Höhenkoordinaten eingeführt wurden, hin.

Es ist offensichtlich, dass die Verwendung von streifeninvarianten Offsetparametern (Version O8) die Ergebnisse sowohl in der Theorie als auch in der Praxis im Falle einer dünnen Passpunktverteilung (P2, P3) verschlechtert. Die Modellierung mit zwei Sätzen (einer pro Flug) verschlechtert noch verbessert die Ergebnisse signifikant. Deshalb ist es ausreichend, einen Satz für den gesamten Block zu verwenden. Sogar mit einer sehr schwachen Passpunktverteilung (P3, vier Vollpasspunkte in den Blockecken) kann eine sehr hohe Genauigkeit erreicht werden ($\mu_{x,y} = 5,2 \mu\text{m}$, $\mu_z = 8,7 \mu\text{m}$), wenn GPS-Daten integriert werden (siehe Abbildung 12). Diese Werte stehen in vernünftiger Beziehung zu den theoretischen Werten $\sigma_{x,y} = 4,5 \mu\text{m}$, $\sigma_z = 8,0 \mu\text{m}$ und sind äquivalent denen, die mit einer dichten Passpunktverteilung (P1, $i = 2b$), jedoch ohne GPS-

Daten ($\mu_{x,y} = 5,0 \mu\text{m}$, $\mu_z = 8,2 \mu\text{m}$) erreicht werden können (siehe Abbildung 11).

7. Schlussfolgerungen

Wenn Phasenmehrdeutigkeiten in kinematischen GPS-Berechnungen gelöst und ionosphärische Effekte bei der L1-Berechnung in einem relativ kleinen Testgebiet vernachlässigt werden können oder wenn die ionosphärenfreie L3-Kombination für die Berechnung verwendet wird, dann sollten GPS-bedingte «Drift»-Effekte nicht vorhanden sein. Jedoch verlangen Restfehler der inneren Orientierung der Kamera und die Ungenauigkeiten der Koordinatentransformationen vom WGS84 ins Landeskoordinatensystem (im Falle, dass nicht genügend gemeinsame Punkte verwendet werden können), dass ein konstanter Offsetvektor für die Projektionszentren als unbekanntes Parameter in das hybride Bündelsystem eingeführt werden. Dieses Projekt hat gezeigt, dass bei Benutzung von nur einer Kamera ein Satz von gerade nur drei Parametern für den gesamten Block genügend ist. Diese Vorgehensweise erlaubt, standardisierte Blockstrukturen zu verwenden. Querstreifen am Blockrand oder zusätzliche Passpunktketten werden damit nicht notwendig. Zudem konnten wir zeigen, dass die Verwendung von vier Passpunkten in den Blockecken die gleichen Genauigkeitswerte liefert ($\mu_{x,y} = 5,2 \mu\text{m}$, $\mu_z = 8,7 \mu\text{m}$, $\hat{\sigma}_0 = 4,9 \mu\text{m}$), wie wenn eine dichte Passpunktverteilung ($i = 2b$) jedoch ohne Berücksichtigung von GPS-Daten verwendet würde. Ungeachtet der Notwendigkeit weiterer praxisnaher Tests unter verschiedensten Bedingungen geben unsere Ergebnisse einen sehr optimistischen Ausblick für zukünftige praktische Projekte. Unsere Erfahrung zeigt, dass das theoretische Potential von kinematischem GPS im Zusammenhang mit der photogrammetrischen Blockausgleichung praktisch erfüllt werden kann.

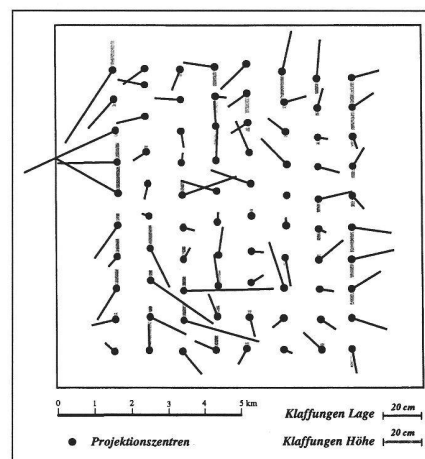


Abb. 10: Klaffungen in Lage und Höhe der Projektionszentren (aus dem externen Vergleich Photogrammetrie versus GPS).

Paßpunkt- version	Offsetpara- meter-Sätze	$\hat{\sigma}_0$ [μm]	μ_{xy} [μm]	μ_z [μm]	$\sigma_{x,y}^{*)}$ [μm]	$\sigma_z^{*)}$ [μm]	PassPte. Lage Höhe	KontrollPte. Lage Höhe			
P0	mit GPS	O1	5.18	--	--	3.5	6.6	94	94	--	--
		O2	5.13	--	--	3.6	6.5	94	94	--	--
		O8	5.01	--	--	3.5	6.5	94	94	--	--
	ohne GPS		4.84	--	--	4.0	7.6	94	94	--	--
P1	mit GPS	O1	4.96	4.5	8.8	3.8	6.9	17	29	77	65
		O2	4.92	4.4	7.9	3.8	6.9	17	29	77	65
		O8	4.81	4.2	8.3	3.8	6.9	17	29	77	65
	ohne GPS		4.63	5.0	8.2	3.9	7.3	17	29	77	65
P2	mit GPS	O1	4.90	5.3	9.0	4.5	7.7	4	5	90	89
		O2	4.87	5.2	8.8	4.5	7.7	4	5	90	89
		O8	4.77	5.6	13.3	4.7	8.8	4	5	90	89
	ohne GPS		4.55	14.3	23.7	5.7	12.2	4	5	90	89
P3	mit GPS	O1	4.91	5.2	8.7	4.5	8.0	4	4	90	90
		O2	4.88	5.0	8.3	4.5	8.1	4	4	90	90
		O8	4.76	6.9	47.9	4.7	12.4	4	4	90	90
	ohneGPS		4.42	12.5	177.0	5.6	18.3	4	4	90	90

*) $\sigma_{x,y}$, σ_z wurden mit dem jeweils geschätzten $\hat{\sigma}_0$ aus der Bündelblockausgleichung errechnet.

Tab. 2: Ergebnisse der Berechnungen mit reduzierten Driftparametern.

Danksagung

Hiermit möchten wir allen Personen, die bei diesem Projekt mitgewirkt haben, für ihre wertvollen Beiträge danken.

Herr R. Hübscher, der Aufnahme-Techni-

ker, und die Eidgenössische Vermessungsdirektion Bern stellten das Flugzeug und die Kamera zur Verfügung und waren unseren Anfragen gegenüber immer sehr aufgeschlossen. Dr. I. Colomina stellte uns

grosszügigerweise sein hybrides Bündelprogramm ACX zur Verfügung und stand uns bereitwillig mit Ratschlägen zur Seite. Dipl. Ing. Z. Parsic nahm die Arbeit der Bildkoordinatenmessung auf sich. Wir sind Dr. G. Forlani dankbar für seinen Einsatz im photogrammetrischen Teil des Projektes.

Wir bedanken uns schlussendlich für die Finanzierung dieses Projektes durch den Jubiläumsfonds der ETH Zürich.

Literatur:

Ackermann, F. (1992): Operational rules and accuracy models for GPS-aerotriangulation. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 29 (B3) pp 691-700.

Cocard, M. (1990): Kinematic experiences with GPS and laser tracker. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: GPS for Geodesy and Geodynamics, pp 19-25.

Cocard, M. (1994): High Precision GPS Processing in Kinematic Mode. Dissertation in Vorbereitung, ETH Zürich.

Cocard, M., A. Geiger (1992): Systematic search for all possible widelanes. Proceedings of the 6th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, pp 312-318.

Colomina, I. (1989): Combined adjustment of photogrammetric and GPS-data. Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, 13: 313-328.

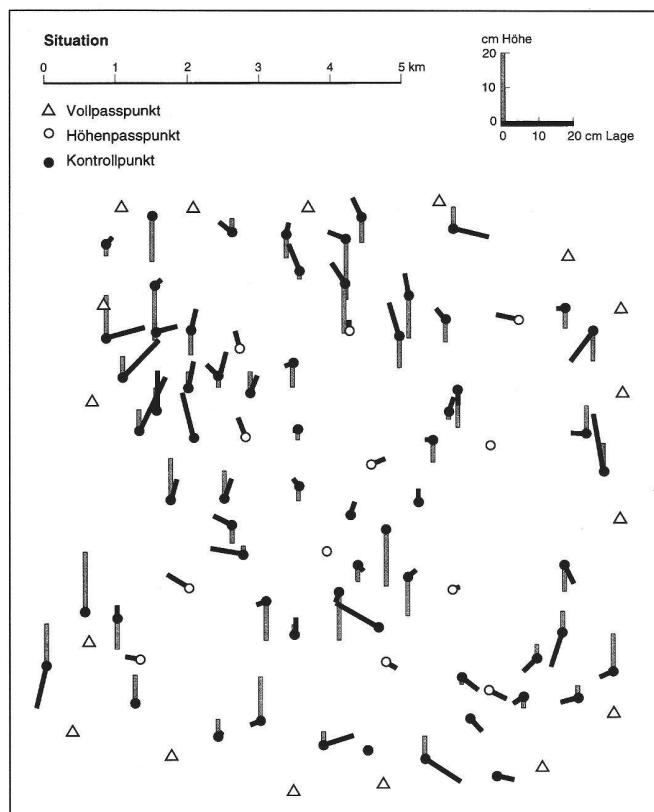


Abb. 11: Klaffungen in Lage und Höhe der verbleibenden Kontrollpunkte (Version P1: ohne GPS – mit 29 Passpunkten).

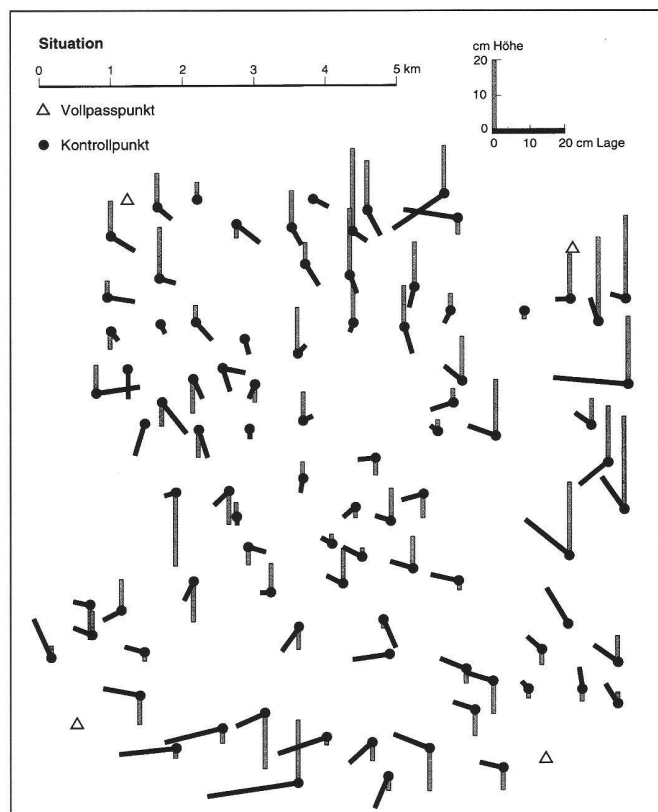


Abb. 12: Klaffungen in Lage und Höhe der verbleibenden Kontrollpunkte (Version P3: mit GPS (O1) – mit 4 Passpunkten).

Partie rédactionnelle

Ebner, H. (1976): Self calibrating block adjustment. Int. Archives of Photogrammetry, Vol. 21 Part 3, Helsinki.

Frei, E. (1991): Rapid Differential Positioning with the Global Positioning System (GPS). Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Band 44.

Grün, A. (1986): Projekt «Uster» – ein Beispiel moderner photogrammetrischer Punktbestimmung. VPK (4) : 187–191.

Grün, A., A. Runge (1988): The accuracy potential of self-calibrating aerial triangulation without control. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 27, Part B3, Kyoto.

Grün, A., M. Cocard, H.-G. Kahle (1993a): Photogrammetry and Kinematic GPS: Results of a High Accuracy Test. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol 59, No. 11, pp 1643–1650.

Grün, A., B. Moser, H.-G. Kahle, M. Cocard, A. Geiger (1993b): GPS-gestützte photogrammetrische Triangulation. Schlussbericht des ETH-Forschungsprojekts.

Gurtner, W., G. Beutler, I. Bauersima, T. Schildknecht (1985): Evaluation of GPS carrier phase difference observations: the Bernese second generation software. Proceedings of the 1st International Symposium of Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, pp. 353–372.

Remondi, B.W. (1985): Global Positioning System carrier phase: Description and use. Bulletin géodésique 59: 361–377.

Adresse der Verfasser:

Prof. Dr. Armin Grün
 Marc Cocard
 Dr. Alain Geiger
 Prof. Dr. H.-G. Kahle
 B. Moser
 Institut für Geodäsie und
 Photogrammetrie
 ETH Hönggerberg
 CH-8093 Zürich

SIEMENS NIXDORF

SICAD-CH/open – Das Softwarekonzept für Geoinformationssysteme.

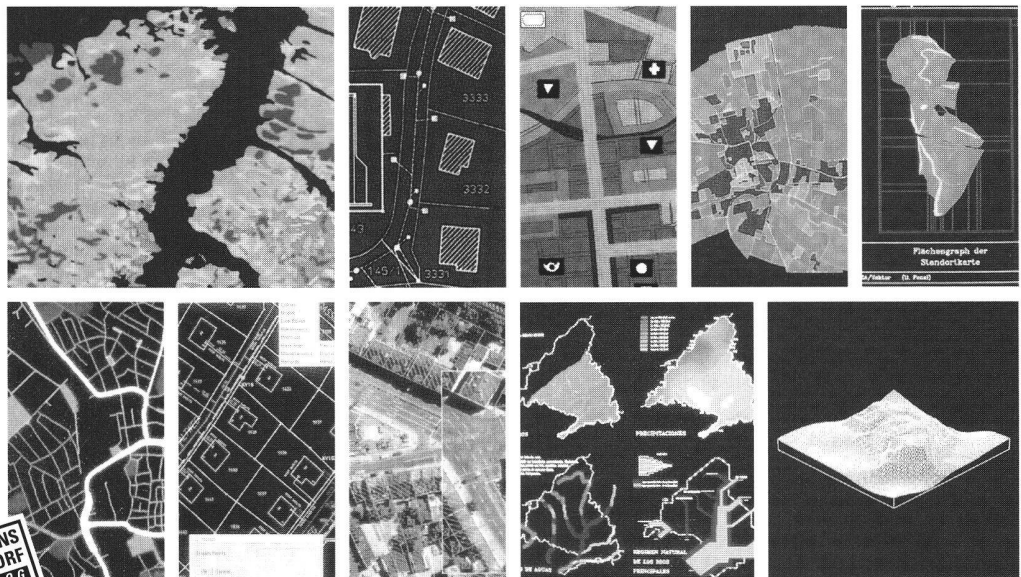
Mit SICAD-CH/open stellt Siemens Nixdorf jetzt die ganze Lösungsbreite unter UNIX zur Verfügung – mit den Standards der offenen Welt.

Herausragende Eigenschaften von SICAD-CH/open sind:

- Turn Key-Lösungen für Versorgung, Entsorgung und Gemeinden
- Datenbanken Oracle und Informix
- Verteilte Geo- und Alphadatenhaltung
- Verteilte Verarbeitung mit Client-Server-Architektur
- Hochleistungs-RISC-Workstations
- Standardisierte Eingabe unter OSF/Motif und X-Window
- Verarbeitung von Vektor- und Rasterdaten

Wenn Sie über SICAD-CH/open mehr wissen wollen: Herr Urs Wyss gibt gerne Auskunft.

Siemens Nixdorf Informationssysteme AG, Bereich GIS
 Obstgartenstr. 25 8302 Kloten



Synergy at work