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: 84 (1986)

Heft: 4

Artikel: Projekt "Uster" : ein Beispiel moderner photogrammetrischer Punktbestimmung

Autor: Grün, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-233035

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 12.07.2025

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

Material und stört zudem die Entwicklung von Pflanzen auf der Betonoberfläche.

Steilere, oft befahrene Wegabschnitte weisen eine gute Selbstreinigung auf. Da sich wenig Schwemmaterial ablagert, ergeben sich entsprechend karge Bedingungen für den Graswuchs. Der Abrieb durch das regelmässige Befahren hilft ebenfalls, das Überwachsen der Rasengittersteine zu verhindern.

Pflanzen mit oberirdischen Ausläufern eignen sich schlecht zur Begrünung, da sie die Steine überwachsen. Es empfiehlt sich, zur Ansaat mehrjährige Grasmischungen ohne Klee zu verwenden.

7. Empfehlungen

Rasengittersteine eignen sich für den Neubau und die Sanierung von Güterwegen mit mehr als 6% Steigung. In den folgenden Fällen sollte ein Ausbau mit Rasengittersteinen in Betracht gezogen werden:

- Strecken bis ca. 28% Gefälle mit Erosionsproblemen
- Wege mit hauptsächlich landwirtschaftlichem Verkehr
- Stichstrassen
- Hofzufahrten
- Wegabschnitte entlang von schattigen und feuchten Waldrändern
- Verwendung von nicht frostsicherem Koffermaterial.

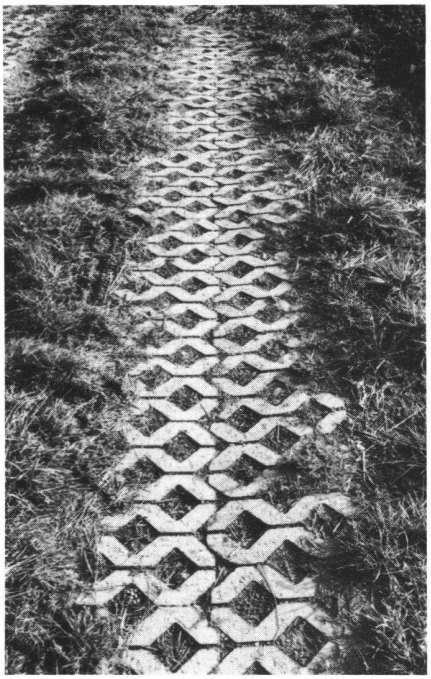


Abb. 9: Häufiges Befahren reinigt die Fahrspur und verhindert das Überwachsen der Steine.

Für den Bau empfiehlt es sich, die folgenden Punkte zu beachten:

- Robuste Rasengittersteine verwenden, d.h. Steine mit flacher Oberfläche und möglichst gleichmässigen Betonquerschnitten. Gewellte und ungleichmässige Steine weisen viele potentielle Bruchstellen auf
- Die Löcher der Rasengittersteine nur mit «magerem» Material füllen und nie humusieren
- Zum Auffüllen des Mittelstreifens und der Bankette ist bindiges Kies-Sand zu verwenden. Das optimale Grösstkorn liegt bei 20–50 mm, sollte jedoch immer kleiner sein, als der halbe Durchmesser des Loches im verwendeten Rasengitterstein
- Gleichzeitig mit dem Verfüllen der Steine angesäte Strecken weisen die erfolgreichste Begrünung auf. Die Jahreszeit spielt keine Rolle. Eine Schlafsaat keimt bei der nächsten besten Gelegenheit.

Es ist zweckmässig:

- In Kurven die Spuren zu verbreitern
- Vor dem Übergang auf eine andere Deckschicht mindestens eine einfache Querrinne einzubauen
- Im Bereich von Einmündungen die ganze Wegbreite und die Einlenker mit Rasengittersteinen oder einem Schwarzbelag zu versehen.

Bis sich die Begrünung gut entwickelt hat, sollten die Wege mit Rasengittersteinspuren nicht während oder unmittelbar nach starken Regenfällen befahren werden.

Adresse des Verfassers:
Peter Hutzli, Dipl. Kulturing. ETH
Ing.- und Vermessungsbüro B. Kauter
Egliweg 6, CH-2560 Nidau

Projekt «Uster» – ein Beispiel moderner photogrammetrischer Punktbestimmung

A. Grün

Anhand eines Beispiels aus der Praxis, dem Testprojekt «Uster», wird das Leistungsvermögen moderner photogrammetrischer Verfahren zur Punktbestimmung nachgewiesen. Unter Verwendung von 60% Längs- und Querüberdeckung lieferte die Blockausgleichung nach der Bündelmethode mit Selbstkalibrierung eine Koordinatengenauigkeit – berechnet aus terrestrischen Kontrollpunkten – von $\mu_{X,Y} = 2.0 \mu m$ für die Lage und $\mu_Z = 3.6 \mu m$ für die Höhe. Bei einem verwendeten Bildmassstab von 1:10 000 entspricht dies 2.0 cm bzw. 3.6 cm am Boden.

Diese erreichten Genauigkeiten beweisen einmal mehr, dass der Einsatz der Photogrammetrie für Punktbestimmungsmassnahmen im Rahmen von Netzverdichtung 4. Ordnung in schwierigem Gelände, Polygonierung und Parzellarvermessung jeweils ernsthaft geprüft werden sollte. Als integriertes Vermessungsverfahren weist die Photogrammetrie grundsätzlich und insbesondere bei grossen Punktmengen erhebliche operationelle und somit wirtschaftliche Vorzüge auf.

Der vorliegende Artikel schildert Hintergrund, Ablauf und Ergebnisse dieses Testprojekts. Durchgeführt unter weitgehend praxisgerechten Bedingungen, kann dieses Projekt somit dem Praktiker als Leitfaden für eigene Vorhaben ähnlicher Art dienen.

Par un exemple de pratique, le projet de test «Uster», la puissance de méthodes photogrammétriques modernes pour la détermination de points est démontré. En utilisant un recouvrement longitudinal et latéral de 60%, la compensation de bloc par

1. Einführung

Photogrammetrische Methoden zur Punktbestimmung haben heute einen Leistungsstand erreicht, welcher, bei gerechter Abwägung wirtschaftlicher und genauigkeitsbezogener Aspekte, diesen Verfahren neue Anwendungsgebiete erschliesst und traditionelle Aufgaben effizienter zu bearbeiten gestattet. Als indirekte Vermessungsmethode kann die Photogrammetrie immer dort ihr volles Potential entfalten, wo grosse Datenmengen zu bewältigen sind. Somit ist es nur folgerichtig, dass der bemerkenswerte Fortschritt der modernen Analytischen Photogrammetrie eng mit der rasanten Entwicklung der Computertechnologie zusammenhängt. Inzwischen stehen neben ausgereiften, hochgradig verfeinerten Schätzmodellen zur photogrammetrischen Punktbestimmung, wie etwa die Bündelmethode mit Selbstkalibrierung, auch die entsprechenden operationellen Computerprogramme zur Verfügung. Einer erfolgreichen Anwendung dieser modernen Verfahren in der Praxis sollte somit nichts mehr im Wege stehen.

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich
Separata Nr. 96

faisceaux avec paramètres auxiliaires donne une précision de coordonnées – calculé par des points de contrôle terrestre – de $\mu_{X,Y} = 2.0$ μm pour la position et $\mu_Z = 3.6$ μm pour l'altitude. A une échelle de photo à 1:10 000 cela correspond à 2.0 où 3.6 cm à terre.

Ces précisions atteintes prouvent une fois de plus, que l'utilisation de la photogrammétrie pour la détermination de points dans des triangulations de 4e ordre dans du terrain difficile, des traverses et la mensuration parcellaire devraient être évalué sérieusement à chaque fois. Comme une méthode de mensuration integrée, la photogrammetrie présente principalement des avantages opérationels considérables ainsi qu'économique, en particulier avec de grands nombres de points. L'article présenté décris: les conditions, le déroulement et les résultats de ce projet de test. Celui-ci été effectué dans des conditions proche de la pratique. Ce projet peut servir au praticien de guide dans toute les opérations similaires à celle-ci.

Ziel dieser Ausführungen kann nicht eine umfassende Darstellung von Entwicklung, Methodik, Test und Anwendung photogrammetrischer Verfahren der Punktbestimmung sein. Bezüglich Einzelheiten sei hier auf Grün (1986) verwiesen. Es wird dagegen beispielhaft ein Testprojekt vorgestellt, welches den gegenwärtigen Leistungsstand dieser Verfahren demonstriert. Die folgenden Betrachtungen beschränken sich allein auf die Luftbildphotogrammetrie.

Welche Genauigkeiten liefern die Ver-

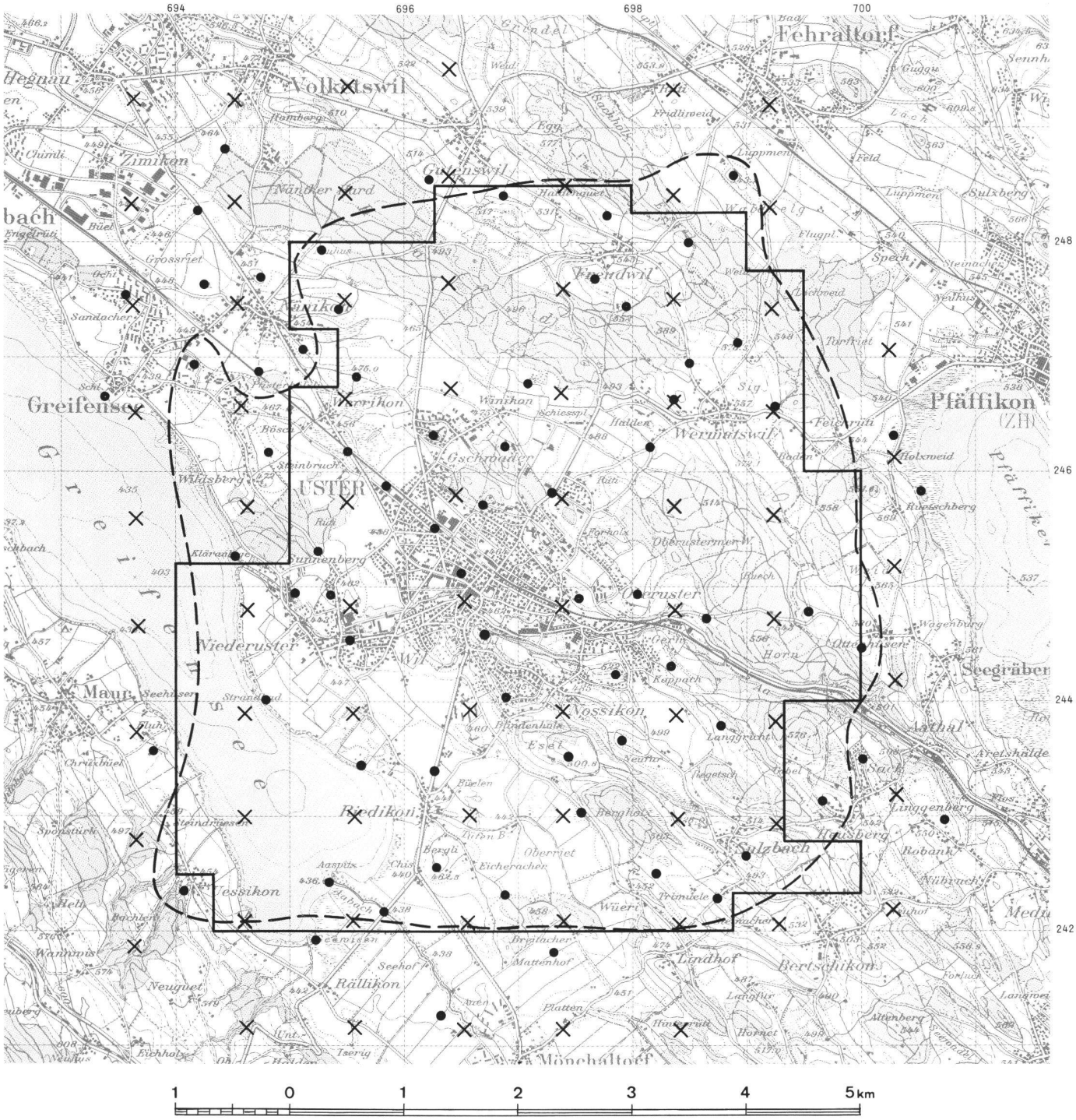


Abb. 1: Operat «Uster» und Umgebung. Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 4. 10. 85.
• Testpunkte (Pass- und Kontrollpunkte). x Nadirpunkte. – Operatgrenze «Uster». -- Gebietsgrenze Netz «Uster»

fahren der photogrammetrischen Punktbestimmung? Diese Frage lässt sich in zweifacher Richtung beantworten. Einmal können unter Benutzung synthetischer Daten Blöcke konstruiert, ausgeglichen und deren Genauigkeitseigenschaften nach Berechnung der Kovarianzmatrix für die Koordinatien der Objektpunkte analysiert werden. Zum zweiten kann man durch Befliegung von Testfeldern und durch Auswertung des somit erhaltenen praktischen Materials diese Genauigkeitsmodelle empirisch verifizieren. Umfassende Genauigkeitsmodelle, basierend auf Blocksimulationen, wurden von Ebner, Krack, Schubert (1977) vorgelegt. Jedem Praktiker und für Projektplanung Verantwortlichen sei ein Studium dieser Modelle dringend empfohlen.

Die Phase hochgenauer praktischer Testblockuntersuchungen hatte ihren Ausgangspunkt im OEEPE-Projekt «Oberschwaben» (vergleiche die Beiträge in Proceedings ISP Commission III, 1974). In verschiedenen, zum Teil praktischen Projekten wurde daraufhin ein überraschend hohes Genauigkeitsniveau photogrammetrisch erzielter Ergebnisse festgestellt (Brown 1976, Grün 1979, Roberts 1976). Etwa zur gleichen Zeit nahm sich eine Arbeitsgruppe der Kommission III der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie (ISP) dieser Problemstellung intensiver an. Unter Vorsitz von Prof. Kilpelä, Helsinki University of Technology, wurden an verschiedenen kompetenten Institutionen mehrere Testblöcke untersucht im Hinblick auf das Problem der Kompensation systematischer Fehler und auf die schliesslich zu erzielenden Genauigkeiten. Ein Schlussbericht dieser Arbeiten liegt mit Kilpelä (1980) vor. Insgesamt hat sich dabei gezeigt, dass unter operationellen Bedingungen bei der Bündelmethode mit Selbstkalibrierung Genauigkeiten von $\mu_{X,Y} \approx 2{,}5\ \mu m$ in der Lage und $\mu_Z \approx 4{,}5\ \mu m$ in der Höhe (aus Weitwinkelaufnahmen) erzielbar sind. Diese Genauigkeiten entsprechen den aus Genauigkeitsmodellen vorhergesagten theoretisch zu erwartenden Werten (Grün 1982). Konsistente Ergebnisse wurden über verschiedenen Testfeldern und mit unterschiedlichen Kammern erhalten. Bei dem in der Schweiz durchgeführten Versuch «Fixpunktverdichtung Zürich-Höngg» (Leuenberger 1977) konnte dieses hohe Genauigkeitsniveau aus verschiedenen Gründen nicht ganz erreicht werden. Neuere Arbeiten mit dem Testfeld Echallens (Kölbl 1985) bestätigen allerdings die anderswo vorher erreichten und prädizierten Genauigkeiten.

Allen mit Punktbestimmung befassten Gruppierungen, seien es staatliche Institutionen oder die private Praxis, steht somit eine leistungsfähige Vermessungsmethode zur Verfügung, deren Einsatz in jedem einzelnen Projekt ernsthaft geprüft werden sollte. Die Methoden der terrestrischen und photogrammetrischen Vermessung haben beide ihre spezifischen Eigenheiten. Ein optimaler Einsatz der einen oder anderen Methode ist jeweils an bestimmte Voraussetzungen gebunden wie Operatsgrösse, Gebietszugänglichkeit, Sichtbarkeitsverhältnisse horizontal und vertikal, Punktanzahl, Verknüpfung mit anderen Aufgaben wie linienweise Kartierung, Digitales Geländemodell, Orthophotoherstellung etc.

Ziel dieses Beitrags ist es, das Genauigkeitspotential photogrammetrischer Punktbestimmung unter möglichst praxisgerechten Bedingungen zu demonstrieren und dabei Erkenntnisse und Erfahrungen zu sammeln, welche später an die berufliche Praxis weitergegeben werden können. Das hier vorgestellte Testprojekt «Uster» hat sich zwar mit Umständen auseinanderzusetzen, wie sie denen der Netzverdichtung 4. Ordnung entsprechen, jedoch lassen sich die Ergebnisse durchaus in Richtung auf andere Projekte, wie Polygonierung, Parzellarvermessung etc. verallgemeinern.

Gebietsgrösse:	7.5 x 9.5 km^2
Mittlere Geländehöhe:	H_M = 500 m
Flughöhe über Grund:	h_g = 1500 m
Kamera:	Wild RC 10 15/4, UAG Nr. 13003
Bildmassstab:	1 : 10000
Überdeckung:	60% / 60%
Anzahl Streifen:	8
Anzahl Bilder:	73
Befliegungsdatum, -uhrzeit:	3. April 1985, 15.00 Uhr
Film (S/W):	Panatomic-X

Tab. 1 Befliegungs- und Blockdaten

2. Testgebiet, Blockdesign, Signalisierung, Bildflug

Beim Testgebiet «Uster» handelt es sich um ein echtes Operat (Operat Nr. 548). Abbildung 1 zeigt die Punktverteilung im Netz 4. Ordnung sowie die Nadirpunkte der Luftaufnahmen. Das Netz wurde im Jahre 1978 vollständig neu beobachtet. Nach der Neuausgleichung liegen die durchschnittlichen mittleren Fehler der verwendeten Punkte in der Lage bei $\sigma_{X,Y} \approx 5$ mm in der Höhe bei $\sigma_Z \approx 6$ mm.

Die Gesamtheit der in Abbildung 1 dargestellten Punkte setzt sich allerdings aus drei Netzen zusammen, wobei das Netz «Uster» durch die gestrichelte Linie begrenzt ist. Der photogrammetrische Block greift über das Gebiet des Netzes «Uster» hinaus. Die durch Luftaufnahmen abgedeckte Gesamtgebietsgrösse beträgt ca. 7.5 x 9.5 km^2.

Für die Befliegung wurde der Bildmassstab 1:10'000 gewählt, obwohl bei vergleichbaren Projekten in der Schweiz bisher vorwiegend Bildmassstäbe zwischen 1:7'000 und 1:8'000 benutzt wurden. Durch den kleineren Massstab sollte der Einfluss der Unsicherheiten der geodätisch bestimmten Punktkoordinaten verringert werden.

Der Block wurde mit je 60% Längs- und Querüberdeckung geflogen. Als Aufnahmekammer wurde eine Wild RC 10 (c = 15 cm) eingesetzt, als Schwarzweissfilm Panatomic-X gewählt.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über Befliegungs- und Blockdaten, Abbildung 2 zeigt Signalform und -grösse. Die Signale bestanden aus einer weissen, kreisförmigen Plastikscheibe auf schwarzer Kontrastdachpappe. Neben den eigentlichen, weiss markierten Punkten wurden zu Testzwecken noch orangefarbene, runde Signaltafeln ausgelegt. Die weissen Signale zeigten allerdings eine deutlich bessere spektrale Reaktion. Signalisiert wurden lediglich die Pass- und Kontrollpunkte. Als zusätzliche Verknüpfungspunkte wurden natürlich Objekte herangezogen. Neben 99 zentrisch signalisierten Punkten wurden noch 21 Exzentren signalisiert.

Durch die Beschäftigung nur einer Zweierequipe erstreckte sich die Signalisierung über einen Zeitraum von zwei Wochen. Zwischendurch auftretender Regen und Schnee und in der Folge Verschmutzung der Kontrastquadrate führte zu einer signifikanten Reduktion des Überstrahlungs-

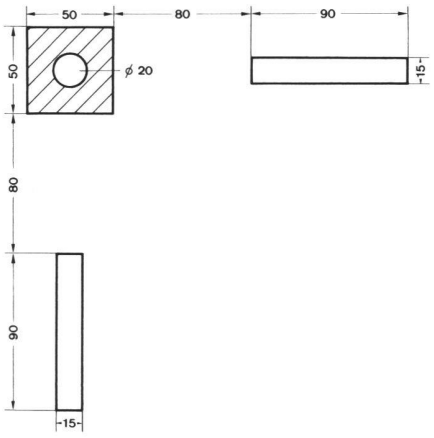


Abb. 2: Signalisierung im Projekt «Uster»

faktors der Signale. Wiewohl durchaus im Bild noch sichtbar, wurden diese somit kleiner abgebildet als erwünscht gewesen wäre.
Der Bildflug mit der Weitwinkelkammer konnte am 3.4.1985, um 15.00 bei sehr guten Wetterbedingungen durch die Vermessungsdirektion durchgeführt werden. In einem zweiten Bildflug am selben Tag wurde das Gebiet auch mit einer Normalwinkelkammer (Wild RC 10A 30/4) im Bildmassstab 1:10'000 beflogen. Dieses Material wurde jedoch bisher noch nicht ausgewertet.

3. Vorbereitung und Ausführung der Messungen

Die signalisierten Punkte wurden auf Papierabzügen der Luftbilder markiert und numeriert.
Die Bildkoordinatenmessungen wurden am Analytischen Plotter Wild AC 1 des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie mit dem Programm TMO im Stereomodus durchgeführt. Die natürlichen Verknüpfungspunkte wurden dabei direkt im Modell am Analytischen Plotter ausgewählt. Aus Gründen der Zuverlässigkeit wurden dabei in den «Gruber-Positionen» jeweils Zwillingspunkte, also eng benachbarte Punktepaare gemessen. Die Modelle wurden sukzessive in Streifenrichtung gemessen. Die Übertragung der Verknüpfungspunkte in Streifenrichtung erfolgte unter dem Programm TMO computergesteuert. Zur Übertragung quer zur Streifenrichtung waren dagegen Punktskizzen anzufertigen. Dies stellt klar eine Schwachstelle im Messprozess dar.
Die Bildpunkte wurden im Hin- und Rückgang gemessen. Dabei wurden die ersten 6 Punkte des Hingangs in den Gruberschen Standardlagen ausgewählt und im Anschluss an deren Messung die relative Orientierung des Modells hergestellt. Die Messung der restlichen Modellpunkte erfolgte dann im relativ orientierten Modell, was die Messung sichtlich erleichterte. Die relative Orientierung wurde nach Abschluss aller Messungen neu gerechnet. Der durchschnittliche mittlere y-Parallaxenfehler aller Modelle betrug $\sigma_{py} = 0.4\ \mu m$. Dieses Mass ist mit aller Vorsicht zu bewerten. Es zeigt nicht etwa die Genauigkeit der photogrammetrischen Bildkoordinaten, sondern ist lediglich ein Hinweis darauf, dass der Operateur sehr sorgfältig gemessen hat.
Bei der Reduktion der Bildkoordinaten wurden eine affine Rahmenmarkentransformation, die radiale Verzeichnung und die Refraktionskorrektur berücksichtigt. Die reduzierten Bildkoordinaten wurden modellweise über eine schnelle Datenleitung (DMA Interface) in eine angeschlossene PDP 11/70 eingespeist. Dort wurde jeweils nach Abschluss eines Streifens eine Bündelausgleichung mit allen bisher gemessenen Bildern des Blocks gerechnet. Die groben Fehler, welche fast ausschliesslich als Numerierungsfehler und Punktverwechslungen auftraten, wurden dabei sofort korrigiert. Diese interaktive Arbeitsweise, die nur mit wenig zusätzlichem Aufwand verbunden ist, hat sich sicherlich insofern bewährt, als die Bereinigung des Blockes dadurch sehr vereinfacht und beschleunigt wurde.

Passpunkt-version	Kalibrierungs-version	$\hat{\sigma}_o$ [μm]	$\mu_{X,Y}$ [μm]	μ_Z [μm]	Anzahl PP Lage	Anzahl PP Höhe	Anzahl KP Lage	Anzahl KP Höhe
(a) PPO	0	4.2	--	--	80	80	--	--
	12	3.1	--	--				
	44	2.8	--	--				
(b) PP1	0	4.1	3.8	14.0	15	26	64	54
	12	2.9	3.0	10.0				
(c) PP2	0	3.9	3.6	11.1	12	22	48	38
	12	2.8	2.1	7.1				
	44	2.6	2.0	3.6				
(d) PP3	0	3.8	6.8	11.9	7	19	47	36
	12	2.8	2.4	7.2				

PP . . . Passpunkte
KP . . . Kontrollpunkte

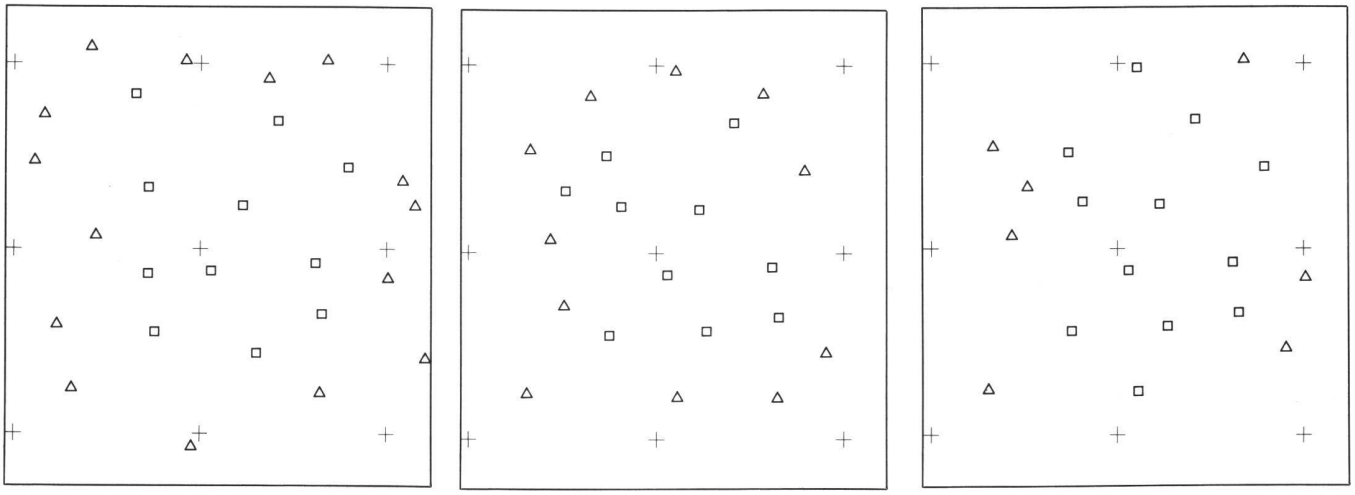
Tab. 2 Ergebnisse der Blockausgleichungen «Uster»

Kalibrierungsversion: 0 . . . ohne zusätzliche Parameter
12 . . . mit 12 (orthogonalen) zusätzlichen Parametern
44 . . . mit 44 (orthogonalen) zusätzlichen Parametern

4. Rechenversionen, Ergebnisse

Die verschiedenen Rechenversionen unterscheiden sich bezüglich Passpunktverteilung und Kalibrierungsverfahren (mit und ohne Selbstkalibrierung). Bei den Passpunktversionen wurden unterschieden

Abb. 3: Passpunktverteilung bei den Rechenversionen (b) - (d)
△ . . . Vollpasspunkte □ . . . Höhenpasspunkte



(b) Kombiniertes Netz (PP1) **(c) «Freies» Netz Uster (PP2)** **(d) «Gezwängtes» Netz Uster (PP3)**

(a) Alle Punkte als Passpunkte (PPO)
(b) Kombiniertes Netz (PP1)
(c) «Freies» Netz Uster (PP2)
(d) «Gezwängtes» Netz Uster (PP3).

Version (b) enthält, ebenso wie (a), neben den Punkten der Netzausgleichung «Uster» auch Punkte aus zwei Nachbarnetzen. Version (c) stützt sich nur auf die Punkte des Netzes «Uster». Der geodätischen Netzausgleichung liegt hier praktisch minimales Datum zugrunde, daher der Begriff «freies» Netz. Der sogenannte «Zwang» von Version (d) kommt dagegen von der verwendeten Redundanz in den Datumspunkten. Die Passpunkte von (d) sind identisch mit den in der Netzausgleichung verwendeten Fixpunkten.

Die Pass- und Kontrollpunktverteilungen dieser Versionen gehen aus Abbildung 3 hervor. Alle Versionen (a) - (d) wurden jeweils mit und ohne Selbstkalibrierung gerechnet. Als Funktionen zusätzlicher Parameter wurden die in der Aerophotogrammetrie sehr bewährten orthogonalen Ansätze mit 12 (Ebner 1976) und 44 (Grün 1978) Parametern herangezogen.

Das verwendete Bündelprogramm BUND, welches eine FORTRAN-Version und Weiterentwicklung des vom Autor an der Technischen Universität München entwickelten Programms MBOP (Grün 1976) darstellt, zeichnet sich u.a. dadurch aus, dass die Näherungswerte für die Ausgleichung automatisch vom Programm berechnet werden und dass im Zuge dieser Berechnungen auf verschiedenen Ebenen Tests auf grobe Fehler erfolgen und eine zum Teil automatische Elimination dieser Fehler vorgenommen wird.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 2 ausgewiesen.

Die Angaben der Spalte «Kalibrierungsversion» beziehen sich dabei auf

0 . . . ohne Selbstkalibrierung
12 . . . 12 (orthogonale) zusätzliche Parameter
44 . . . 44 (orthogonale) zusätzliche Parameter.

Die Genauigkeitsmasse $\mu_{X,Y}$, μ_Z für Lage und Höhe errechnen sich aus den Restfehlern in den Kontrollpunkten; sie sind auf den Bildmassstab bezogen. $\hat{\sigma}_0$ ist die geschätzte Standardabweichung der Bildkoordinaten.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse frühere, in ähnlichen Projekten gemachte Beobachtungen. Die zusätzlichen Parameter führen zu einer bemerkenswerten Genauigkeitssteigerung. In Abhängigkeit von der Passpunktverteilung ergeben sich Verbesserungen der Testmasse $\mu_{X,Y}$ und μ_Z bis zum Faktor 2.8 in Lage und Höhe. Diese Steigerungen werden nicht im gleichen Umfang in den geschätzten Standardabweichungen der Bildkoordinaten sichtbar, ein Zeichen dafür, dass die Fortpflanzung systematischer Fehlerkomponenten im Objektraum oft gefährlicher ist, als dies im Bildraum erkenntlich wird. Der Ansatz mit

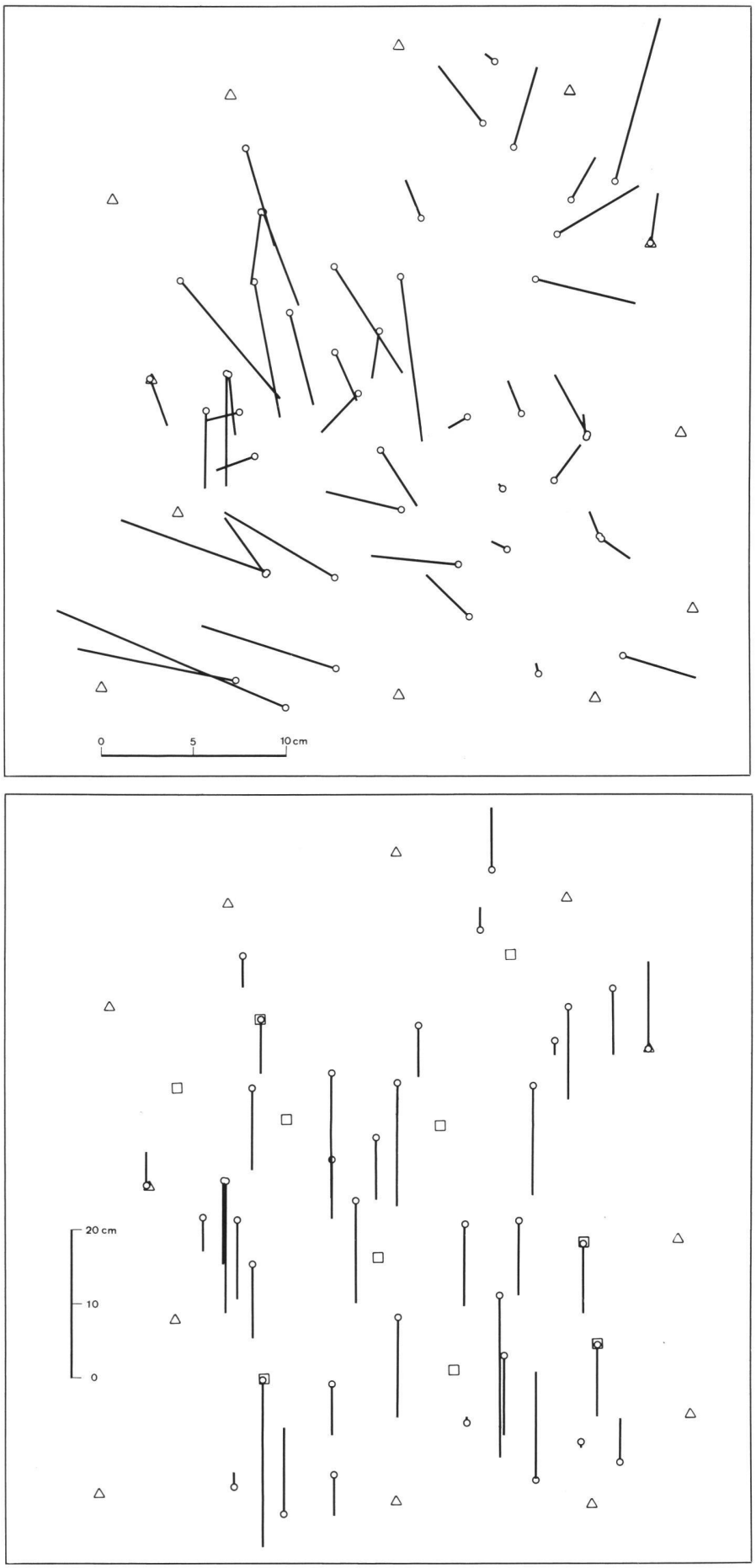
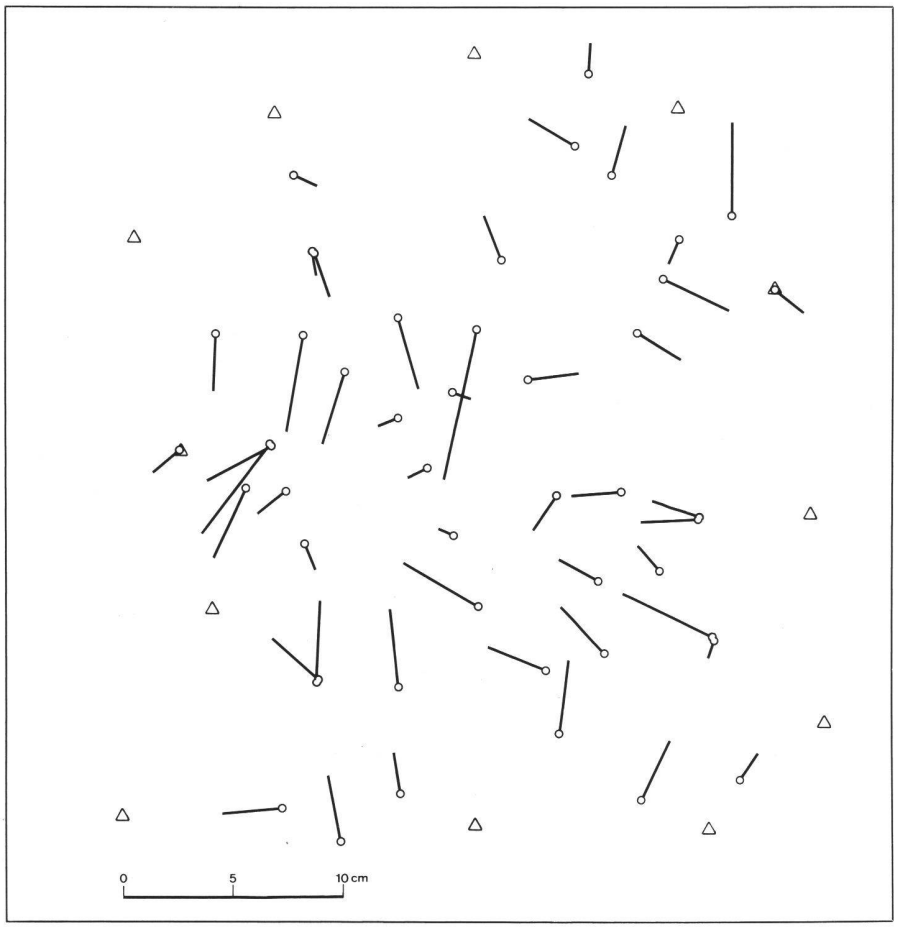


Abb. 4: Restfehler an den Kontrollpunkten; Rechenversion (c) ohne zusätzliche Parameter



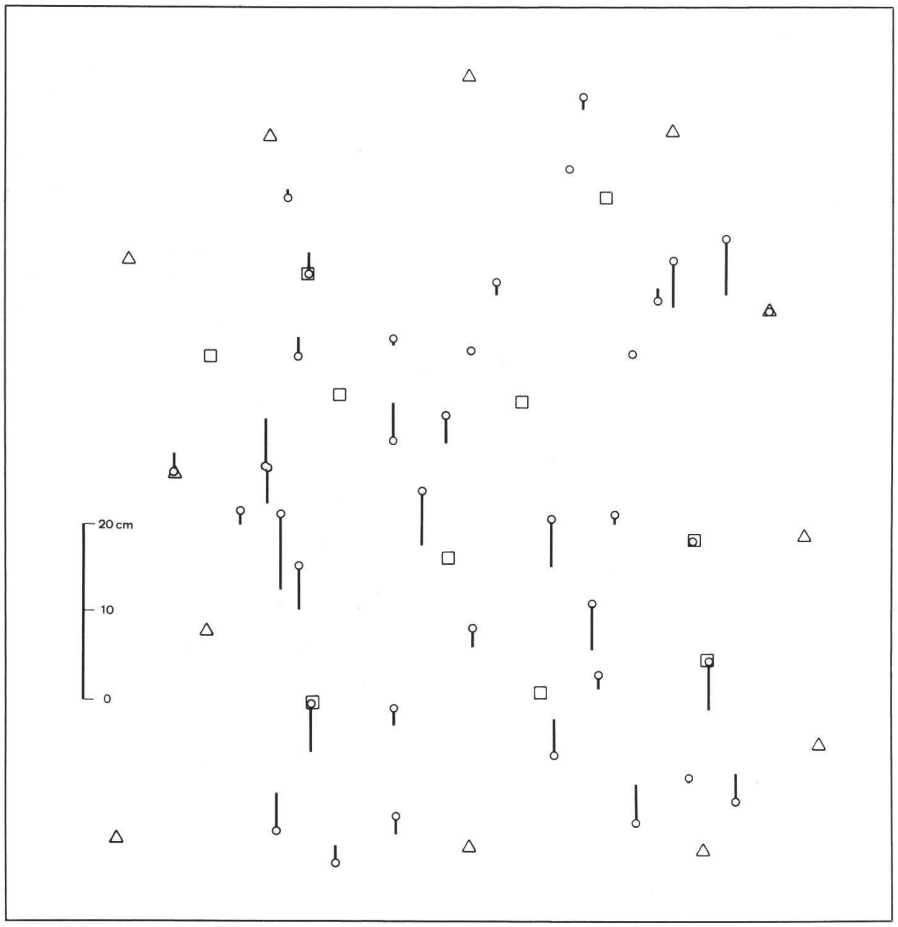


Abb. 5: Restfehler an den Kontrollpunkten; Rechenversion (c) mit 44 zusätzlichen Parametern

44 zusätzlichen Parametern arbeitet am erfolgreichsten. Dies wird insbesondere bei den Höhenwerten deutlich. In Version (c) bringt dieser Ansatz gegenüber demjenigen mit 12 zusätzlichen Parametern nochmals einen Gewinn um den Faktor 2 (von 7.1 cm auf 3.6 cm). Die systematischen Fehlerkomponenten, welche vor allem die Lagekoordinaten beeinflussen, sind dagegen bereits mit dem 12-Parameter Ansatz gut abgedeckt. Es erscheint wichtig zu bemerken, dass bei dem hier verwendeten Konzept der Selbstkalibrierung nicht etwa alle Komponenten des ursprünglichen Ansatzes zusätzlicher Parameter, also z.B. deren 44, tatsächlich auch im System verbleiben. Vielmehr werden nach einer ersten Bündeliteration nicht bestimmbare und insignifikante zusätzliche Parameter ausgeschieden und die nächsten Iterationen nur mit einer zum Teil stark reduzierten Anzahl zusätzlicher Parameter durchgeführt. Im Falle der Version (c), ZP = 44, blieben nur 9 zusätzliche Parameter übrig, im Falle ZP = 12 gar nur deren 7.

Besonders auffällig ist die positive Wirkung der Selbstkalibrierung bei Version (d), einer eher unüblichen Passpunktverteilung, bei welcher die nördlichen und südlichen Ränder des Blocks lagemässig «offen», d.h. durch Passpunkte nicht abgestützt sind. Selbst hier wird mit Selbstkalibrierung noch 2.4 cm erreicht, gegenüber 6.8 cm in der Version ohne zusätzliche Parameter.

Version (c) muss für diese Art Projekte als die «Musterversion» angesehen werden – homogenes geodätisches Netz, Passpunktüberbrückungsdistanz i=2.5 Basiseinheiten. Wiewohl die erreichten Genauigkeiten hoch sind – 2.0 cm für die Lage, 3.6 cm für die Höhe – sind diese nichtsdestoweniger keinesfalls überraschend, da sie mit den theoretisch zu erwartenden Werten etwa übereinstimmen. Man darf dabei auch nicht übersehen, dass die Fehler nicht voll zu Lasten der Photogrammetrie gehen. Weder ist das geodätische Netz perfekt, noch wurde die Signalisierung mit letzter Präzision durchgeführt.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Grösse und Verteilung der Restfehler an den Kontrollpunkten bei Version (c) ohne und mit Selbstkalibrierung. In der Selbstkalibrierungsversion der Abbildung 5 sind diese Fehler bis auf kleinere lokale systematische Effekte weitgehend unregelmässig verteilt, was die volle Wirksamkeit der blockinvarianten zusätzlichen Parameter bestätigt.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse des Versuchs «Uster» sind erwartungstreu. Die erzielten Genauigkeiten entsprechen den theoretischen Vorgaben. Die aus dem Bildmassstab 1:10'000 über Kontrollpunkte ermittelten mittleren Fehler von 2.0 cm für die Lage und 3.6 cm für die Höhe lassen sich

für relevante Massstabsbereiche durchaus linear auf einen anderen Bildmassstab umrechnen. Zur Erzielung dieser Genauigkeiten auf wirtschaftlicher Basis sind allerdings einige Projektparameter zu beachten, wie etwa

- 60% Längs- und Querüberdeckung
- Passpunktverteilung i ≈ 2-3 Basiseinheiten
- Bildkoordinatenmessung vorzugsweise mit einem Analytischen Plotter 1. Ordnung
- Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung

Besonders die Verwendung der Bündelausgleichung mit Selbstkalibrierung kann entscheidend zur Genauigkeitssteigerung beitragen. So ergab sich in diesem Projekt z.B. für die Lage- und Höhenkoordinaten jeweils eine Verbesserung um den Faktor 2.8.

Der Versuch «Uster» wurde in einem praxisgerechten Umfeld durchgeführt. Auf Grund der aus dem Projekt gewonnenen praktischen Erfahrungen könnten zusätzliche Optimierungsmassnahmen in folgenden Bereichen vorgenommen werden:

- Signalisierung. Die Signalisierung ist vielleicht die kritischste Phase im gesamten Projekt. Sie sollte von sachverständigem Personal in möglichst kurzer Zeit durchgeführt werden (2 - 3 Tage). Eine lange Signalisierungsperiode beinhaltet die Gefahr von Signalentfernung, -beschädigung und -verschmutzung. Eine sachgemässe Auswahl der Exzentren ist wichtig.
- Messung der Bildkoordinaten. Bei Messung am Analytischen Plotter mit der Möglichkeit der on-line Datenkontrolle sind Doppelmessungen von Bildpunkten nicht mehr nötig. Der mit Doppelmessungen erzielte Genauigkeitsgewinn ist eher unbeachtlich. Eine automatische Ansteuerung von Bildpunkten über einen Objektkoordinatenfile wäre dagegen sehr wünschenswert, auch wenn diese Objektkoordinaten nur in sehr grober Näherung vorliegen. Bei der Datenkontrolle und -bereinigung im relativ orientierten Modell sollte keine übertriebene Sorgfalt ausgeübt werden, da das Fehlerbudget im wesentlichen von der Genauigkeit der «Punktübertragung» quer zur Streifenmessrichtung beeinflusst wird.

Insgesamt hat das Projekt «Uster» gezeigt, dass sich die moderne photogrammetrische Punktbestimmung als echte Alternative zu klassischen Vermessungsmethoden anbietet. Insbesondere kann die Photogrammetrie immer dort ihren höchsten Wirkungsgrad entfalten, wo mehrere Aufgaben gleichzeitig und unter erschwerten äusseren Bedingungen zu lösen sind. Eine geradezu ideale Situation wäre z.B. dann gegeben, wenn Punktbestimmung (Netzverdichtung, Polygonierung, Parzellarvermessung), Datenerhebung für das Digitale Geländemodell und Orthophotoherstellung mit ein und dem selben Bildmaterial durchgeführt werden könnten. Ebenso können die Vorteile der Photogrammetrie gegenüber terrestrischen Verfahren in unwegsamem Gelände, wie Mittel- und Hochgebirge, besser zur Geltung kommen als im Flachland.

Das vorliegende Bildmaterial «Uster» wird weiteren Untersuchungen unterzogen, besonders im Hinblick auf die Generierung eines hochgenauen Digitalen Höhenmodells. Auf einer nächsten Stufe ist ein analoger Test im Hochgebirge geplant, und es wird zu prüfen sein, inwieweit Satellitensysteme vom GPS-Typus nutzbringend zur Passpunktbeschaffung integriert werden können.

Abschliessend ist es mir ein Bedürfnis und Vergnügen, allen massgeblich Beteiligten an diesem gelungenen Versuch «Uster» für ihr Interesse und ihren Einsatz zu danken. Besonders gilt dieser Dank den Herren H. Chablais (Bundesamt für Landestopographie), H. Diering (Eidg. Vermessungsdirektion), R. Weilenmann (Meliorations- und Vermessungsamt Kanton Zürich) und Z. Parsic (Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich).

Literatur

Brown, D.C., 1976: Densification of urban geodetic nets. Paper presented to the 1976 Fall Meeting of the ACSM/ASP, Sept./Oct., Seattle, Washington

Ebner, H., 1976: Self calibrating block adjustment. Int. Arch. Phot., Vol. XXI, Part 3, ISP Kongress, Helsinki

Ebner, H., Krack, K., Schubert, E., 1977: Genauigkeitsmodelle für die Bündelblocktriangulation. Bildmessung und Luftbildwesen, No. 6, S. 141-148

Grün, A., 1976: Die simultane Kompensation systematischer Fehler mit dem Münchener Bündelprogramm MBOP. Presented Paper zum XIII. Kongress der ISP, Kommission III, Helsinki

Grün, A., 1978: Progress in photogrammetric point determination by compensation of systematic errors and detection of gross errors. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe II: Übersetzungen, Heft Nr. 36, Frankfurt a.M.

Grün, A., 1979: zur Anwendung der modernen Präzisionsphotogrammetrie in der Netzverdichtung und Katastervermessung. Zeitschrift für Vermessungswesen 104, Nr. 3, S. 85-97

Grün, A., 1982: The accuracy potential of the modern bundle block adjustment in aerial photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 1, pp. 45-54

Grün, A., 1986: Photogrammetrische Punktbestimmung mit der Bündelmethode – Leistungssteigerung durch Kompensation systematischer und Elimination grober Fehler. Mitteilungen Nr. 40 des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.

Kilpelä, E., 1980: Compensation of systematic errors of image and model coordinates. Report of Working Group III/3, International Archives of Photogrammetry, Vol. XXIII, B9, ISP Congress Hamburg

Kölbl, O., 1985: Vergleichende Analyse von Aufnahmekammern. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Vol. 83, No. 9., S. 322-330

Leuenberger, Chr., 1977: Test photogrammetrische Fixpunktverdichtung Zürich-Höngg. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Vol. 75, No. 6, S. 198-201

Proceedings ISP Commission III, 1974: Proceedings of the Symposium of the ISP Commission III, Stuttgart, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Heft Nr. 214, München 1975

Roberts, R.G., 1976: Tests of bundle block adjustmeut for survey co-ordination. Paper presented to the XIIth Congress of the ISP, Commission III, Helsinki

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr. Armin Grün
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich

Gelegenheit – günstig abzugeben
2 DK-RT Doppelbild-Reduktions-Tachymeter
für horizontale Latten
W. LEISINGER AG, Ingenieurbüro, Strehlgasse 19
8472 Seuzach, Tel. 052/53 11 21

Zu verkaufen
HP 41 CV mit Magnetkartenleser und Drucker
HR. ZWINGLI Telefon 071/83 48 20 ab 19.00 Uhr

Vermarkungsarbeiten
übernimmt und erledigt
– genau
– prompt
– zuverlässig
– nach Instruktion GBV
für Geometerbüros und Vermessungsämter in der deutschsprachigen Schweiz
Josef Lehmann, Vermarkungsunternehmer,
9555 Tobel TG
Tel. 073 / 45 12 19 oder 9556 Affeltrangen, Tel. 073 / 45 15 42