

Praktische Erfahrungen mit Bildorientierung

HERBERT KRAUSS, Köln and WERNER GUDER, Erfstadt

ZUSAMMENFASSUNG

Seit Anfang 1994 setzen Rheinbraun AG (Köln) sowie deren Tochtergesellschaft KAZ Bildmess GmbH (Leipzig), die einen gemeinsamen Bildflug betreiben, die GPS-gestützte Aerotriangulation für verschiedene photogrammetrische Aufgabenstellungen ein. Am Beispiel von zwei kontrollierten Blöcken wird gezeigt, daß von minimalen Paßpunktbesetzungen abgesehen, bei der GPS-gestützten Aerotriangulation gleiche Genauigkeiten wie bei der herkömmlichen Aerotriangulation erzielt werden können. Paßpunkteinsparungen von mehr als 50 % sind mit den vorliegenden Erfahrungen denkbar. Aufgrund neuerer Techniken bei der Paßpunktbestimmung mittels Real-Time-GPS kommen diese Einspareffekte allerdings nicht bei jedem Projekt voll zum Tragen.

1. EINLEITUNG

Die Rheinbraun AG, Köln, baut im Städtedreieck Köln, Düsseldorf und Aachen jährlich über 100 Millionen Tonnen Braunkohle in vier Großtagebauen ab. Aufgrund der großen Massenbewegungen und der damit verbundenen schnellen Veränderung der Tagebausituation sowie der Weitläufigkeit der Betriebe wird bei Rheinbraun seit mehr als 35 Jahren die Photogrammetrie mit einem eigenen Flugbetrieb mit drei Bildflugzeugen als Meßverfahren eingesetzt. Zusammen mit der Tochtergesellschaft KAZ Bildmess GmbH in Leipzig, die Photogrammetrieleistungen am deutschen Markt anbietet, werden jährlich

- rd. 15000 m Film belichtet,
- ca. 150000 ha Gelände ausgewertet

und als digitale Karten bzw. Geoinformationssysteme aufbereitet.

Um den Aufwand der Paßpunktbestimmungen möglichst gering zu halten, wird seit 1972 das Verfahren der Aerotriangulation eingesetzt. Bei Rheinbraun und der KAZ Bildmess GmbH werden jährlich rd. 5000 Modelle trianguliert. Die notwendigen Messungen erfolgen dabei ausschließlich an analytischen Auswertegeräten Planicom C100, P3 sowie InterMap Analytic. Die Aerotriangulation von Standardbefliegungen (60 % Längs- und 30 % Querüberdeckung) wird mit dem Modellblockausgleichungsprogramm PAT M bearbeitet, Sonderbefliegungen mit größeren Überdeckungsverhältnissen, zum Beispiel Kreuzbefliegungen, mit dem Bündelblockausgleichungsprogramm PAT B.

Bei Rheinbraun und der KAZ Bildmess GmbH werden jährlich mehrere Tausend Paßpunkte bestimmt. Um den Aufwand für die Paßpunktbestimmungen weiter reduzieren zu können, wurden im Zeitraum ab 1988 in Zusammenarbeit mit der Bundeswehrhochschule München, der Universität Stuttgart sowie den Firmen INPHO und TopScan in Stuttgart, eine Reihe von Tests durchgeführt. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse und der vollen Nutzbarkeit des GPS-Systems ab 1993 wurden 1994 die zur GPS-gestützten Aerotriangulation erforderlichen Hard- und Softwarekomponenten für die Bildflugzeuge und die nachgeschaltete Auswertung beschafft.

Neben umfangreichem GPS-Equipment zur Paßpunktbestimmung stehen für die GPS-gestützte Aerotriangulation folgende Komponenten zur Verfügung:

- 4 Zeiss Reihenmeßkammern mit Ausgabe des Mittenkontaktes,
- 4 Trimble 4000 SSE mit jeweils 10 Mbyte Hauptspeicher zum Aufzeichnen der GPS-Daten sowie der Mittenkontakte,
- SKIP GPS-Auswertesoftware,
- PAT B und PAT M Blockausgleichungssoftware mit GPS-Erweiterung.

Zwei aktuelle Beispiele sollen einen Einblick in unsere Erfahrungen mit der GPS-gestützten Aerotriangulation geben.

2. BLOCK GENTHIN

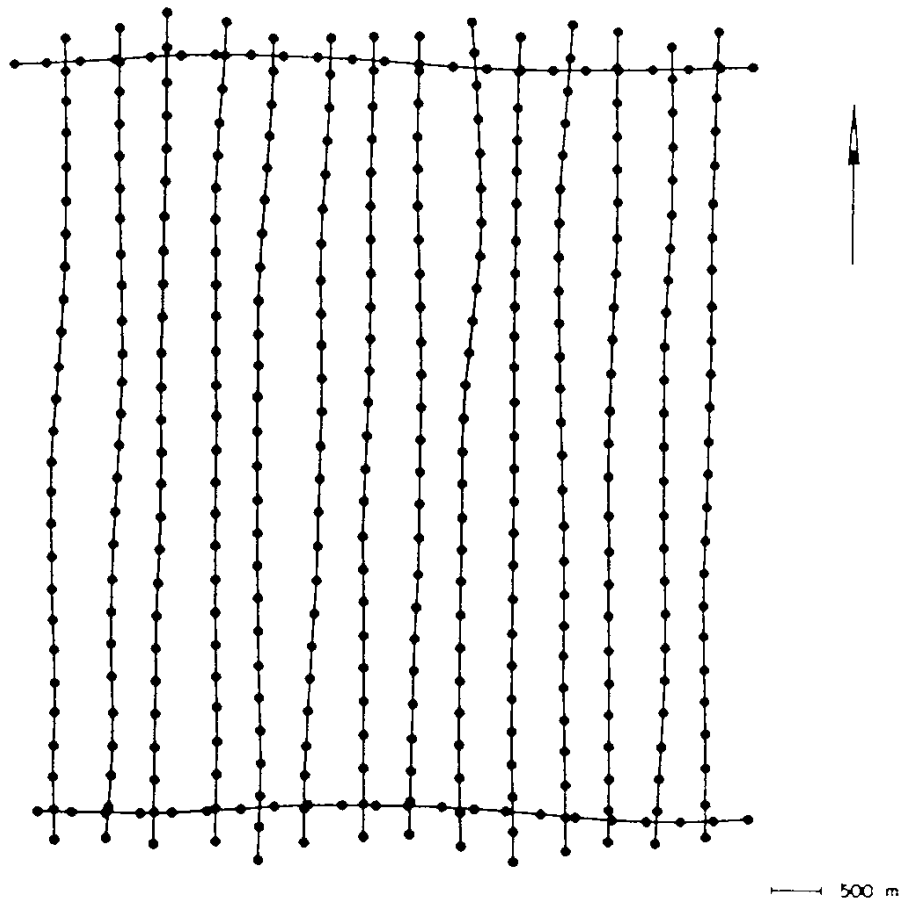


Abbildung 1: Block Genthin.

Dieser Block (Abbildung 1) wurde im Rahmen der Erneuerung der Liegenschaftskarte für die Vermessungs- und Katasterverwaltung des Landes Sachsen-Anhalt im Jahre 1994 geflogen. Ziel war die kurzfristige Bereitstellung einer aktuellen und flächendeckenden Topographie-Folie in Form von Entzerrungen. Die für die Entzerrungen erforderlichen Einpaßpunkte sollten über eine Aerotriangulation bestimmt werden. Während sich die gesamte Befliegungs- und Auswertekampagne - an der sich zeitweise bis zu 30 Photogrammetrie-Firmen beteiligten - auf 3 Jahre und 90 % der Landesfläche von Sachsen-Anhalt erstreckt, sind die technischen Daten des Blockes Genthin eher bescheiden:

- | | |
|---------------------------|-----------------------------------|
| • Blockgröße | 8 * 9 km ² |
| • Bildmaßstab | 1: 3700 |
| • Längs-, Querüberdeckung | 80%, 38% |
| • Streifenanzahl | 17 |
| • Anzahl der Bilder | 402 |
| • Objektpunkte | 2790 |
| • Paßpunkte | 39 Doppel- und 24 Einzelpaßpunkte |
| • Meßkammer | Zeiss RMK A 30/23 |
| • GPS-Empfänger: | 2 Trimble 4000 SSE |

- Aufzeichnungsrate 0.5 sec
- Abstand der Referenzstation zum Block rd. 100 km

Mit Blick auf die Aufgabenstellung und die zusätzliche Erfassung der Projektionszentren mit GPS wurde die Paßpunktanzahl des Blocks geringfügig reduziert. Während an den jeweiligen Blockrändern Paßpunkte im Abstand von 6 bis 7 Basislängen signalisiert und bestimmt wurden, wurden im Blockinneren nur luft sichtbare TP's signalisiert. Mit diesem Konzept ergab sich eine mittlere Paßpunktdichte von ca. 0.6 Paßpunkte je km². Ausgewertet wurde der Block am analytischen Auswertegerät P3.

Folgende Paßpunktvarianten wurden untersucht:

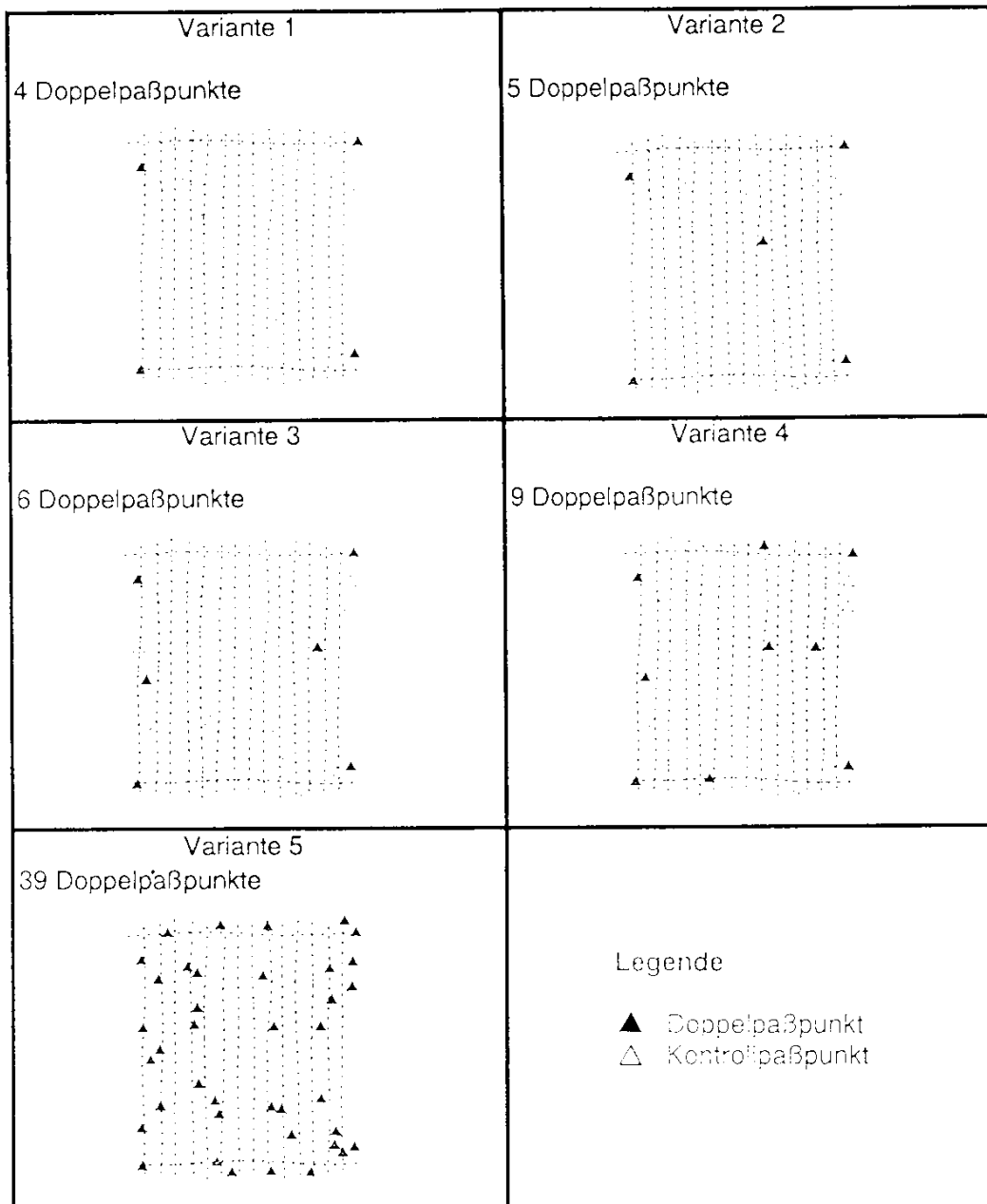


Abbildung 2: Paßpunktvarianten.

Anzumerken ist, daß es sich bei den in die Aerotriangulation eingeführten Paßpunkten immer um Doppelpaßpunkte handelt. Neben den in Abbildung 2 dargestellten Varianten wurden der Block sowohl mit PAT B als auch mit PAT M durchgerechnet. Bei der Bündel- und Modellvariante wurde die Paßpunkte mit einer Genauigkeit von ± 5 cm in die Ausgleichung eingeführt. Ferner wurden bei der

Modellvariante Berechnungen mit und ohne Querstreifen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefaßt. Zum Vergleich der Varianten wurden die mittleren quadratischen Restabweichungen an den Kontrollpunkten (nicht in die Triangulation eingeführte Paßpunkte) herangezogen.

Variante	Berechnung		mittl. quadr. Restabw.		maximale Abweichung		
			Lage	Höhe	Rechtsw.	Hochw.	Höhe
			[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
4 Paßpunkte	PAT B	m. Querstr.	21	23	32	19	52
	PAT M	m. Querstr.	25	24	39	43	69
	PAT M	o. Querstr.	28	438	46	57	680
5 Paßpunkte	PAT B	m. Querstr.	15	26	28	22	52
	PAT M	m. Querstr.	27	22	42	48	69
	PAT M	o. Querstr.	29	68	40	50	129
6 Paßpunkte	PAT B	m. Querstr.	16	26	31	18	52
	PAT M	m. Querstr.	22	23	41	33	68
	PAT M	o. Querstr.	24	72	52	44	134
9 Paßpunkte	PAT B	m. Querstr.	12	20	16	16	44
	PAT M	m. Querstr.	20	19	14	30	44
	PAT M	o. Querstr.	23	41	18	37	89
39 Paßpunkte	PAT B	m. Querstr.	9	6	16	15	16
	PAT M	m. Querstr.	9	11	14	17	23
	PAT M	o. Querstr.	10	11	18	17	28

Tabelle 1: Ergebnisse der Paßpunktvarianten.

Tendenziell können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Wie zu erwarten, steigt die Genauigkeit mit zunehmender Paßpunktanzahl.
- Bei PAT-M-Berechnungen ohne Querstreifen in der Variante mit 4 Paßpunkten treten Abweichungen von mehreren Metern auf (Maximal rd. 6,8 m in der Höhe). Auch bei der Variante mit 9 Paßpunkten treten noch Restabweichungen von rd. einem Meter auf. Beide Varianten hätten den Anforderungen des Auftraggebers nicht genügt. Diese Beispiele bestätigen die von Ackermann getroffenen Aussagen in deutlicher Weise [Ackermann 1993].
- Der Unterschied zwischen der Modell- und Bündelblockausgleichung ist in der Lage auffälliger als in der Höhe. Während in der Lage Restabweichungen bis 12 cm (Variante mit 5 Paßpunkten) auftreten, betragen sie in der Höhe maximal 4 cm. Anzumerken ist, daß über 60% der Objektpunkte mehr als 3-fach verknüpft sind.

Es ist festzuhalten, daß für die Aufgabe, Einpaßpunkte für Entzerrungen zu bestimmen, vier Doppelpaßpunkte ausreichen, wenn zusätzlich die Projektionszentren mit GPS bestimmt werden. Dem Einspareffekt von rd. 35 Vollpaßpunkten bei diesem Beispiel steht jedoch ein Mehraufwand an Vorbereitung, Messung und Aerotriangulation von rd. 40 Modellen (auf den Randstreifen) gegenüber. Seit einem Jahr sind Real-Time-GPS-Techniken hoher Genauigkeit zur Bestimmung von Punkten verfügbar. Diese Techniken sind besonders in Mitteleuropa, wo in der Regel ein dichtes Straßen- und Wegenetz vorhanden ist, sehr wirtschaftlich. Vor diesem Hintergrund bleibt die Frage offen, ob die Paßpunktreduzierung im Rahmen einer GPS-gestützten Aerotriangulation unter Berücksichtigung des Mehraufwandes bei der Auswertung von Querstreifen in jedem Fall wirtschaftlicher ist. Dies bedeutet, daß aufgrund neuen Techniken bei jedem Projekt geprüft werden sollte, ob die GPS-gestützte Aerotriangulation auch wirklich zu Einsparungen führen kann.

3. BLOCK SOPHIENHÖHE

Dieser hochgenaue Block ist für den Bergbau typisch. Er dient zur Erfassung von Bodenbewegungen im Bergsenkungsgebiet oder im Bereich von großen Tagebauböschungen. Der Block Sophienhöhe wird seit 1982 im Bereich der Endböschung des Tagebaus Hambach von Rheinbraun jedes halbe Jahr befliegen. Ziel der Messungen ist die homogene Erfassung und Dokumentation im rd. 460 m hohen Böschungsbereich mit einer Genauigkeit von 2-3 cm. Der Endböschungsbereich ist inzwischen mit mittlerem Buschwerk bzw. mittelhohem Baumbestand bewachsen, so daß die zu beobachtenden Punkte nur noch aus der Luft eingesehen werden können. GPS-Messungen fallen wegen der schlechten Zugänglichkeit der Böschung aus. Das Beobachtungsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von rd. 4 x 2 km². Rd. 160 Punkte sind vermarktet und durch Platten signalisiert. Die derzeit charakteristischen

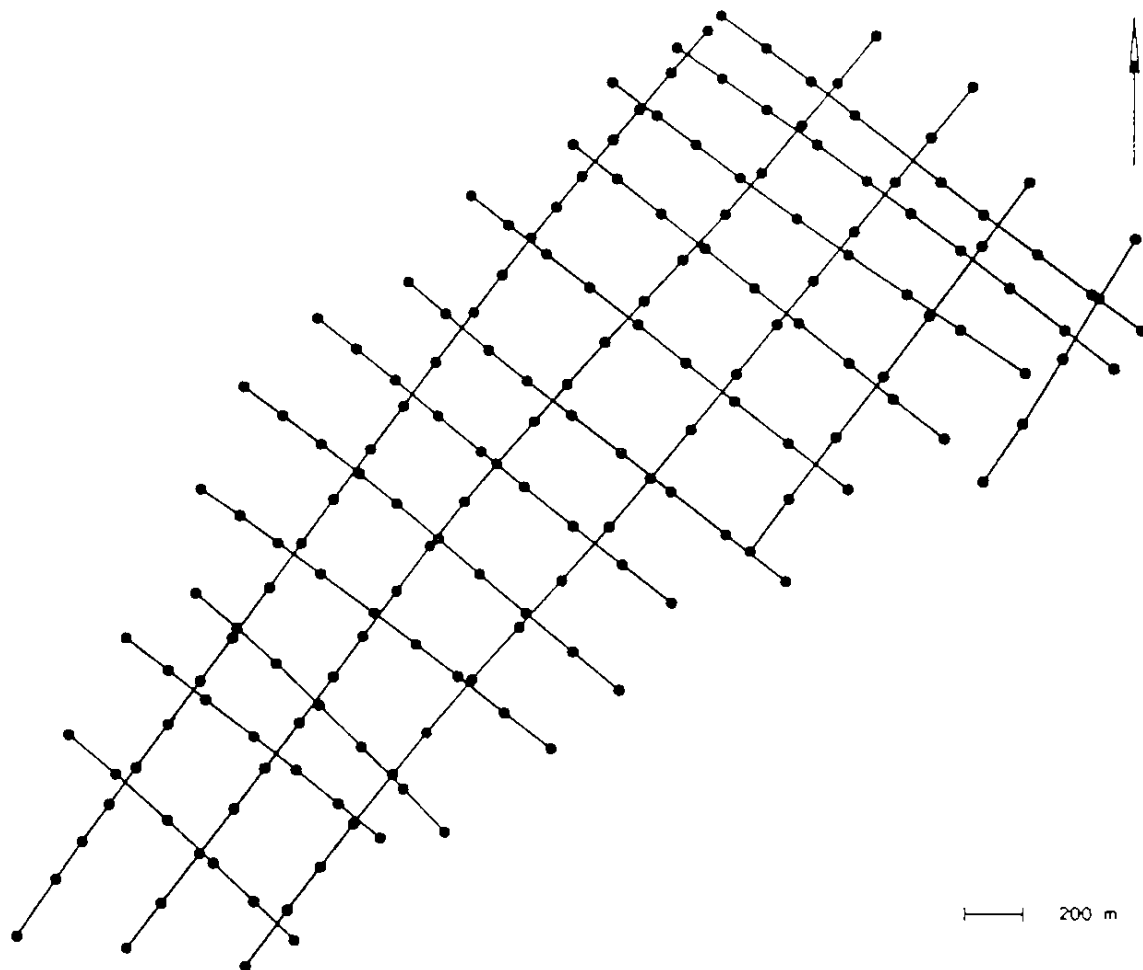


Abbildung 3: Bodenbewegungsblock Sophienhöhe.

Blockdaten sind (Abbildung 3):

- ca. 220 m Höhenunterschied des Endböschungsbereichs, der derzeit beobachtet wird
- Bildmaßstab 1:3800 bis 1:5200
- Kreuzbefliegung mit 80% Längs- und 60 Querüberdeckung
- 12 Längs- und 5 Querstreifen
- RMK TOP 15
- ca. 180 Bilder
- hohe Redundanz, ca. 66 % der Punkte mehr als 20-fach verknüpft
- 21 Voll- (VP) und 37 Höhenpaßpunkte (HP)

Die Lage- und Höhenpaßpunkte werden von der Tagebaumarkscheiderei für die jeweilige Kampagne bestimmt. Seit 1992 werden die Lagepaßpunkte mit GPS, die Höhenpaßpunkte durch Nivellement bestimmt, die Genauigkeit liegt in Lage und Höhe bei ca. ± 1 cm.

Die Bildkoordinatenmessung erfolgt mit einem Präzisions-Monokomparator PK1; die Bündelblockausgleichung mit dem Programm BINGO.

Der in diesem Beispiel angeführte Bildflug fand am 3. November 1994 statt. Die GPS-Informationen wurden im 0,5 Sekundenintervall aufgezeichnet. Während des Streifenfluges, dessen Dauer je nach Streifen ca. 20 bis 80 sec betrug, wurden 7, zeitweise 8 Satelliten getrackt. Der PDOP-Wert lag auch im Kurvenflug (5, zeitweise 7 Satelliten) nicht über dem Wert 2.5. Das Bildfluggebiet war rd. 30 km von der Referenzstation entfernt.

Die Aerotriangulation mit BINGO, bei der die GPS-Daten nicht berücksichtigt wurden, ergab für die Blockpunkte im Mittel folgende Standardabweichungen:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Rechts}} &= 6.4 \text{ mm} \\ \sigma_{\text{Hoch}} &= 6.5 \text{ mm} \\ \sigma_{\text{Höhe}} &= 8.8 \text{ mm} \end{aligned}$$

Die Ergebnisse dieser Berechnung werden bei den weiteren Betrachtungen als Referenz genommen.

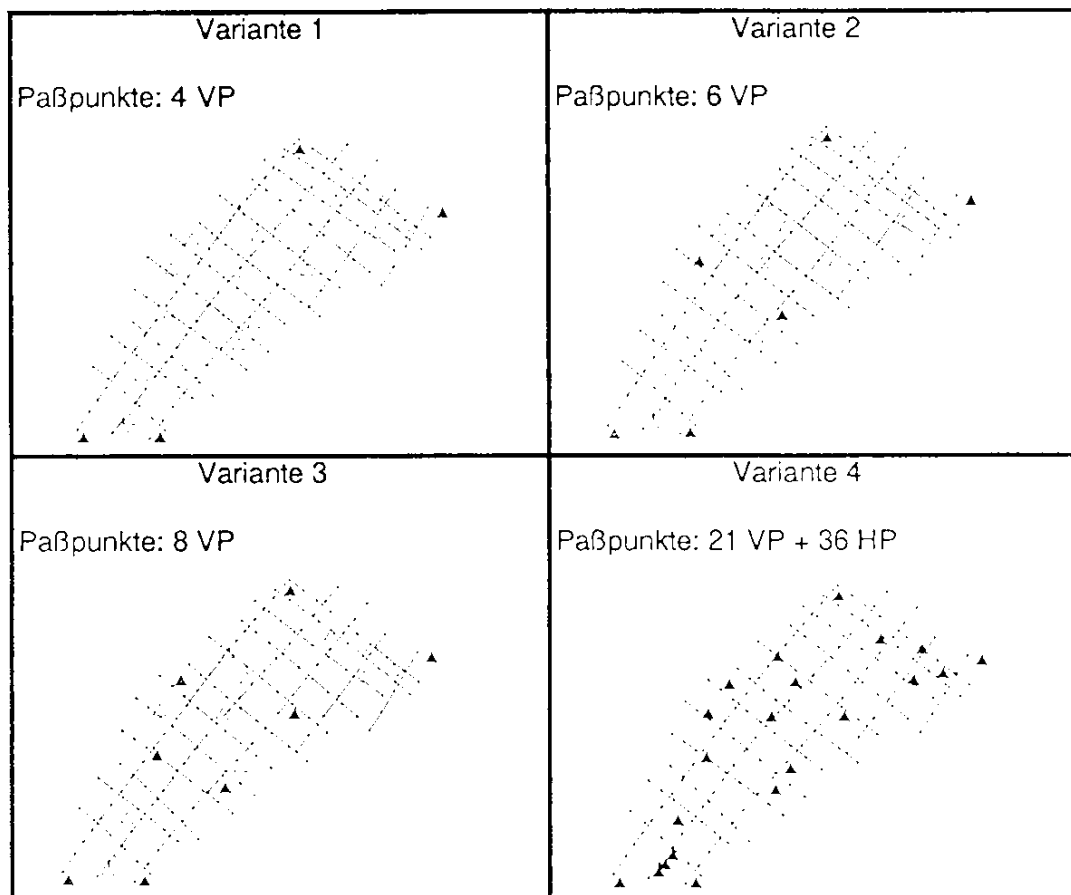


Abbildung 4: Paßpunktvarianten.

Die über GPS bestimmten Projektionszentren wurden in die Aerotriangulation mit PAT B eingeführt. Die untersuchten Paßpunktvarianten sind in Abbildung 4, die Ergebnisse der PAT B-Berechnungen in Tabelle 2 dargestellt.

Paßpunkt- variante	σ_0 [μm]	mittl. Standardabweichung der Objektpunkte [mm]			mittl. Verbesserung der Paßpunkte [mm]		
		Lage		Höhe	Lage		Höhe
		Rechts	Hoch		Rechts	Hoch	
4 VP	3,7	17	17	33	4	8	3
6 VP	3,7	14	14	27	9	7	6
8 VP	3,7	14	14	26	9	8	7
21 VP + 36 HP	3,7	10	11	19	7	8	6

Tabelle 2: PAT B-Blockberechnungen.

Auffällig ist, daß die einzelnen Berechnungen nach Tabelle 2 eine Genauigkeit von weniger als 2 cm in der Lage und ca. 3 cm in der Höhe für die Objektpunktkoordinaten ergeben und die Unterschiede zwischen den einzelnen Berechnungsläufen vernachlässigbar klein sind. Da der Koordinatenunterschied zwischen den Varianten mit 6 und 8 Paßpunkten im Schnitt kleiner als zwei Millimeter ist, könnte der Eindruck erweckt werden, daß eine Hinzunahme von weiteren Paßpunkten keinen Genauigkeitsgewinn bringt. Werden jedoch die mittleren quadratischen Restabweichungen an den terrestrisch gemessenen Kontrollpunkten (Punkte, die nicht als Paßpunkte in die Blockausgleichung eingehen), betrachtet (Tabelle 3), so bestätigt sich dieser Eindruck nicht.

Paßpunkt- variante	mittl. quadr. Restabw. an den Kontrollpunkten		mittl. quadr. Restabw. zu BINGO-Berechnung	
	Lage [mm]	Höhe [mm]	Lage [mm]	Höhe [mm]
4 VP	58	41	56	50
6 VP	28	30	21	27
8 VP	29	28	18	23
21 VP + 36 HP	-	-	19	12

Tabelle 3: Mittlere quadratische Restabweichungen.

Entsprechendes gilt für die Betrachtung der mittleren quadratischen Restabweichungen zu den BINGO-Ergebnissen. Der Vergleich zu den Kontrollpunkten bzw. zu der BINGO-Berechnung zeigt, daß die Varianten mit 6 bis 8 VP die optimale Wahl sind und das Ergebnis den Erwartungen für eine solche Aufgabe entspricht. Die Variante mit vier Paßpunkten wäre für eine Bodenbewegungsmessung unbrauchbar. Der Einspareffekt liegt in diesem Beispiel bei 15 bzw. 17 Voll- und 36 Höhenpaßpunkten. Da bei den Genauigkeitsansprüchen eine Kreuzbefliegung mit hoher Längs- und Querüberdeckung auf jeden Fall angestrebt wird, sind zusätzliche Querstreifen für die GPS-gestützte Aerotriangulation nicht erforderlich. Eine starke Reduzierung der Paßpunktanzahl erscheint aus reinen Sicherheitsgründen, wegen der hohen Genauigkeitsforderungen und der notwendigen Kontrollierbarkeit des Ergebnisses nicht zweckmäßig.

Als Ergebnis ist festzuhalten, daß bei solchen Aufgabenstellungen ein deutliches Einsparpotential von Paßpunkten denkbar ist, aus Sicherheitsgründen aber nicht zu weit getrieben werden sollte. Vielmehr sollte im Bereich hochgenauer Anwendungen die GPS-gestützte Aerotriangulation als Mittel zur weiteren Genauigkeitssteigerung bei sinnvoll reduziertem Paßpunktaufwand verstanden werden.

4. SCHLUSSBEMERKUNG

In den letzten eineinhalb Jahren wurden von der KAZ Bildmess GmbH bzw. der Rheinbraun AG rd. 15 Blockbefliegungen durchgeführt, bei denen die Projektionszentren mit GPS aufgezeichnet wurden. Abgesehen von dem zusätzlichen logistischen Aufwand (Bereitstellung einer Referenzstation) sowie den nicht immer vorhersehbaren Ausfällen bei der Datenaufzeichnung u. a. bei Richtfunkstrecken, kann die verfügbare Hard- und Software zur GPS-gestützten Aerotriangulation als einsatzreif gelten.

Aufgrund der rasanten Entwicklung bei der GPS-Technik für terrestrische Anwendungen kommt der Einsparffekt bei der Paßpunktanzahl durch den Mehraufwand zusätzlicher Randstreifen nicht immer voll zum Tragen.

5. LITERATUR

- Ackermann, F. (1993): GPS-Anwendungen in der Photogrammetrie - Neue Perspektiven, Vortragsband der Leipziger Bildmess-Tage 1993.
- Ackermann, F. (1988): Combined Adjustment of Airborne Navigation Data und Photogrammetric Blocks, ISPRS Congress, Cmm. III, Kyoto.
- Frieß, P., Heuchel T. (1993): Aerotriangulation mit GPS-Daten - Methode und praktische Erfahrungen, Vortragsband der Leipziger Bildmess-Tage 1993.
- Hein, G., (1993): Aktueller Status von GPS - Revolution in der Geodätischen Meßtechnik, Vortragsband der Leipziger Bildmess-Tage 1993.
- Krauß H. (1993): GPS-Einsatz bei einer Photogrammetrie-Firma, Vortragsband der Leipziger Bildmess-Tage 1993.
- Reichenbach K., Schaefer W.(1985): Photogrammetrische Präzisions-Punktbestimmung zur Erfassung von Bodenbewegungen - Ergebnisse eines Entwicklungsvorhabens und weitere Praxiserfahrungen, Das Markscheidewesen, 92 (1985), S. 1-7.