

F. Ackermann

AUSSERE ZUVERLÄSSIGKEIT PHOTOGRAMMETRISCHER BLÖCKE

1. Einleitung

1.1 Im vorhergehenden Vortrag ist der Begriff der äußeren Zuverlässigkeit in Anlehnung an W. Baarda definiert und erläutert worden. Uns interessiert hier die äußere Zuverlässigkeit nur im Zusammenhang mit groben Datenfehlern. Wir gehen deshalb auf die Erweiterung nach Pelzer, die alle, auch die systematischen Modellfehler, begrifflich einbezieht, nicht ein.

Nachfolgend sollen die Anwendungen der theoretischen Konzeption der äußeren Zuverlässigkeit auf photogrammetrische Blöcke diskutiert und Folgerungen für die Projektplanung in der Aerotriangulation erläutert werden.

Fassen wir noch einmal die Ausgangssituation zusammen:

Es wird vorausgesetzt, daß die Daten eines Blocks nach der Methode des Data-snooping bezüglich grober Fehler bereinigt seien. Das Endergebnis der Blockausgleichung entspricht somit dem Bereinigungszustand, der theoretisch erreichbar ist. Entsprechend erkennt das Data-snooping (mit der $\delta_0(\alpha_0, \beta_0)$ entsprechenden Wahrscheinlichkeit) nur grobe Fehler, die größer sind als die Grenzwerte $\nabla_0 l_i$. Die Grenzwerte selber können für die einzelnen Beobachtungen unterschiedlich sein, da sie von dem jeweiligen Redundanzanteil r_i der betreffenden Beobachtung abhängen, in dem sich die örtliche Struktur der Ausgleichung widerspiegelt. Im Zusammenhang mit den Grenzwerten wurde dabei der Begriff der Kontrollierbarkeit ($\delta'_{0,i}$) der Beobachtungen eingeführt.

Als Ergebnis ist wesentlich, daß mit dem Data-snooping (oder jeder beliebigen anderen Methode der Fehlersuche) nicht alle groben Datenfehler erfaßbar sind. Es bleiben nicht entdeckbare und somit nicht entdeckte kleine grobe Fehler unerkannt im Datenmaterial und damit in der Endausgleichung enthalten, wobei die Maximalbeträge der mit der Irrtumswahrscheinlichkeit β_0 nicht entdeckbaren groben Fehler durch die Grenzwerte $\nabla_0 l_i$ gegeben sind.

Die nicht eliminierten groben Datenfehler pflanzen sich in der Ausgleichung auf die Bestimmung der Unbekannten fort, d.h. sie verfälschen die Lösung. Man könnte z.B. einzeln hochrechnen, um welche Beträge die maximal möglichen Werte verbliebener grober Beobachtungsfehler die Unbekannten maximal verfälschen können. Diese Hochrechnung über alle maximal möglichen groben Datenfehler genommen ergibt die Gesamtheit der maximal möglichen Verfälschungen der Unbekannten, was als (untere Schwelle der) Zuverlässigkeit des Systems bezeichnet wird. Begrifflich ist zu beachten, daß die maximal möglichen Verfälschungen der Unbekannten praktisch niemals gleichzeitig auftreten und überhaupt nur in Ausnahmefällen erreicht werden. Aber da man nicht weiß, welche Beobachtungen durch nicht erkannte grobe Fehler möglicherweise bis zum jeweiligen Grenzwert verfälscht sind, bleibt zunächst nichts anderes übrig, als alle möglicherweise auftretenden maximalen Verfälschungen anzugeben.

Tatsächlich wird der Begriff der äußeren Zuverlässigkeit eines Systems noch etwas allgemeiner gefaßt und auf beliebige Funktionen der Unbekannten ausgedehnt. Er wird ausgedrückt in der Gesamtheit der Größen $\bar{\delta}_{0,i}$. Sie geben jeweils an, wieweit der im Rahmen der gesetzten Wahrscheinlichkeiten mögliche Maximalbetrag $\nabla_0 l_i$ eines unentdeckten Beobachtungsfehlers eine Unbekannte oder eine Funktion f der Unbekannten maximal beeinflussen kann:

$$\nabla_{0,i} f \leq \sigma_f \cdot \bar{\delta}_{0,i} \quad (1a)$$

Der Zusammenhang ist durch \leq gekennzeichnet. Tatsächlich wird der Maximalbetrag in der Regel nicht erreicht, vielmehr deutlich unterschritten.

Bei photogrammetrischen Blöcken interessiert nun primär die äußere Zuverlässigkeit, d.h. die mögliche maximale Verfälschung der Koordinaten der Neupunkte.

$$\nabla_{0,i} x \leq \sigma_x \bar{\delta}_{0,i} \quad \nabla_{0,i} y \leq \sigma_y \bar{\delta}_{0,i} \quad \nabla_{0,i} z \leq \sigma_z \bar{\delta}_{0,i} \quad (1b)$$

Während im Prinzip die Größe $\bar{\delta}_{0,i}$ nicht erkennen läßt, an welcher Unbekannten die maximal mögliche Verfälschung auftreten würde, ist die Zuordnung im Falle der Neupunktkoordinaten klar gegeben: Die maximal mögliche Verfälschungswirkung durch einen Fehler vom Betrag $\nabla_0 l_i$ in der Beobachtung l_i (d.h. der gemessenen Bild- oder Modellkoordinate) tritt, von Sonderfällen abgesehen, stets an dem Neupunkt auf, zu dessen Bestimmung die betreffende Beobachtung direkt beiträgt. Dennoch sind die $\bar{\delta}$ -Werte beobachtungsbezogen, weshalb z. B. bei einem 4-fachen Verknüpfungspunkt jeweils 4 Werte anzugeben sind.

1.2 Um die äußere Zuverlässigkeit photogrammetrischer Blöcke zu ermitteln, müssen jeweils alle $\bar{\delta}_{0,i}$ -Werte berechnet werden. Sie sind unabhängig von den Beobachtungswerten, vielmehr ausschließlich durch die geometrische Struktur (und Gewichtsannahmen) des Ausgleichungsproblems bestimmt.

Die tatsächliche Berechnung der $\bar{\delta}_{0,i}$ -Werte benützt die Beziehung (s. Vortrag von W. Förstner)

$$\bar{\delta}_{0,i} = \delta_0 \sqrt{\frac{u_{ki}}{r_i}} \quad , \quad \text{mit } \delta_0 = 4, \quad r_i = (Q_{VV} P_{11})_{ii} \quad (2)$$

$$u_{ki} = 1 - r_i - u_{ti}$$

$$u_{ti} = (B(B^T P B)^{-1} B^T P)_{ii}$$

Dabei bedeutet B die Koeffizientenmatrix der Orientierungsparameter im System der linearisierten Fehlergleichungen. r_i , u_{ki} und u_{ti} sind Anteile, in die ein Beobachtungsfehler ϵ_i bzw. ∇l_i bei der Ausgleichung aufgeteilt wird und die entsprechend in die Verbesserung v_i bzw. in die Bestimmung der unbekannt Koordinaten k und der Orientierungsunbekannten t gehen. Die Redundanzanteile r_i wurden in der Untersuchung durch Simulation ($r_i = -v_i / \nabla l_i$), die Anteile u_{ti} durch Bildung der Matrizenprodukte nach Gleichung (2) berechnet.

Für die Berechnung der Zuverlässigkeit der als Beobachtungen behandelten geodätischen Paßpunktkoordinaten (einschließlich der Signalisierung!) ergibt sich gegenüber (2) eine Vereinfachung dadurch, daß diese Punkte keiner Transformation unterworfen sind. Daher sind die u_{t_i} -Werte = 0, und es gilt

$$u_{k_i} = 1 - r_i \quad (3a)$$

Ein grober Paßpunktfehler spaltet sich somit nur in 2 Komponenten auf. Der eine durch r_i bestimmte Anteil verbleibt als Verbesserung v_i . Der komplementäre Anteil $u_{k_i} = 1 - r_i$ verfälscht direkt die entsprechende Koordinate des ausgeglichenen Punktes, wobei vorausgesetzt ist, daß die Paßpunktkoordinaten in der Ausgleichung als Beobachtungen behandelt werden. Somit können in diesem Sonderfall die $\bar{\delta}$ -Werte direkt aus den r_i bzw. den δ' -Werten abgeleitet werden.

$$\begin{aligned} \bar{\delta}_{0,i} &= \delta'_{0,i} \sqrt{u_{k_i}} = \delta_0 \sqrt{\frac{u_{k_i}}{r_i}} \\ &= \delta'_{0,i} \sqrt{1-r_i} = \delta_0 \sqrt{\frac{1-r_i}{r_i}} = \sqrt{(\delta'_{0,i})^2 - \delta_0^2} \end{aligned} \quad (3b)$$

Wie sich zeigen wird, ist bei Paßpunkten in fast allen praktischen Fällen δ_0 erheblich kleiner als δ'_0 , sodaß für Paßpunkte in erster Näherung gelten kann

$$\bar{\delta}_{0,i} \approx \delta'_{0,i} \quad (3c)$$

2. Beispiele

Die wichtigsten Feststellungen über die äußere Zuverlässigkeit photogrammetrischer Blöcke können schon anhand einzelner Beispiele getroffen werden. Wir betrachten deshalb zunächst das Beispiel der Fig. 1 und Fig. 2. Es stellt schematisch einen Block von $6 \times 12 = 72$ unabhängigen Modellen dar. Die Modelle sind jeweils durch 4 Punktpaare in den Modellecken verknüpft (abgesehen von den beiden Projektionszentren bei der Höhenausgleichung). In den Figuren sind die $\bar{\delta}_{0,i}$ -Werte (äußere Zuverlässigkeit, jeweils 2. Zeile) für die Lagekoordinaten und die Höhenkoordinaten, sowie die $\delta'_{0,i}$ -Werte (innere Zuverlässigkeit, jeweils 1. Zeile) ausgewiesen. Die Werte sind für die Einzelpunkte jedes Paares von Verknüpfungspunkten stets gleich, sodaß die Zahlenwerte jeweils nur einmal angegeben sind.

2.1 Lassen wir zunächst die Randmodelle außer Betracht, dann kann für die inneren Blockteile sowohl für die Lage- wie auch für die Höhenkoordinaten festgestellt werden:

- Die äußeren Zuverlässigkeitsfaktoren sind wie die Kontrollierbarkeitsfaktoren für alle Modellpunkte praktisch konstant. Das Zuverlässigkeitsverhalten im Block ist also höchst gleichmäßig und homogen.

Die mittlere Höhenpaßpunktkette hat praktisch keinen merklichen Einfluß auf die Zuverlässigkeit der Höhenkoordinaten der dortigen Verknüpfungspunkte.

- Die Beträge der $\bar{\delta}$ -Werte liegen alle im Bereich von 2,6 bis 2,9. Sie sind alle etwa halb so groß wie die entsprechenden δ' -Werte.

Dieser Zusammenhang ist sehr beruhigend. Die unangenehm hohen Grenzwerte für nicht entdeckbare grobe Fehler schlagen auf die ausgeglichenen Koordinaten nur stark reduziert durch. Im vorliegenden Beispiel bleiben die durch nicht entdeckte grobe Fehler nach Wahrscheinlichkeit maximal möglichen Verfälschungen der Neupunktkoordinaten unter dem 3-fachen Betrag ihrer jeweiligen Streuungen.

2.2 Die äußere Zuverlässigkeit der Randpunkte des Blocks fällt gegenüber derjenigen der Innenpunkte deutlich ab. Zwar halten sich die $\bar{\delta}$ -Werte für die Lagekoordinaten an der Stirnseite des Blocks mit Beträgen von 3.3 und 3.4 noch im günstigen Bereich. Demgegenüber setzen sich die entsprechenden Beträge von 4.7 bis 5.0 an den beiden anderen Blockseiten deutlich ab.

Die äußere Zuverlässigkeit der Höhenkoordinaten der Randpunkte zeigt nur geringe Unterschiede zwischen den mit Paßpunkten kontrollierten Stirnseiten und den beiden anderen offenen Seiten (4.0 bis 4.1 gegenüber 4.2 bis 4.5). Insgesamt ist die Zuverlässigkeit der Höhen aller Randpunkte deutlich geringer als die der Innenpunkte.

Generell können also die Koordinaten der Blockrandpunkte unter den Verhältnissen des Beispiels durch nicht entdeckbare grobe Fehler im Einzelfall bis zum 5-fachen Betrag ihrer Streuung verfälscht sein.

2.3 Noch extremer werden die Verhältnisse an den Paßpunkten selbst, wobei hier vorausgesetzt ist, daß die geodätischen Paßpunktkoordinaten als Beobachtungen mit dem Gewicht 1 in die Ausgleichung einbezogen sind.

Die Paßpunkte hatten schon sehr große $\bar{\delta}$ -Werte, d.h. schwache Kontrollierbarkeit. Entsprechend groß sind die Werte für die äußere Zuverlässigkeit. Sie liegen in dem Beispiel mit dichter Paßpunktbesetzung für die Lagekoordinaten der Randpaßpunkte bei 5.0 und steigen an den 4 Eckpunkten auf 7.2. Die nicht entdeckbaren groben Fehler in den gegebenen Paßpunktkoordinaten schlagen also mit einem wesentlich höheren Anteil auf die zu bestimmenden Koordinaten durch als bei den Modellpunkten im Block.

Noch wesentlich ungünstiger sind in dem Beispiel die Zuverlässigkeitswerte der Höhenpaßpunkte, mit $\bar{\delta}$ -Werten um 11 bei den Randpunkten bzw. 14.9 bei den Eckpunkten. Nur die Werte von 8.0 bis 8.2 für die Innenpunkte der mittleren Höhenpaßpunktkette sind etwas günstiger.

Es ist generell festzuhalten, daß die Kontrollierbarkeit und damit die äußere Zuverlässigkeit der Paßpunkte sehr schwach ist. Die nicht erkennbaren Verfäls-

schungen der Koordinaten können ein Vielfaches der Streuungen dieser Koordinaten ausmachen.

Vergegenwärtigt man sich die geometrischen Zusammenhänge, dann kann die schwache Zuverlässigkeit der Lage- und Höhenpaßpunkte bzw. insbesondere der Eckpunkte anschaulich verstanden werden.

Zur äußeren Zuverlässigkeit der Projektionszentren bei Modellblöcken, die im Beispiel nicht angegeben sind (s. Anhang), sei angemerkt, daß schon im Fall einfacher Verknüpfungen die $\bar{\delta}$ -Werte für die x- und y-Koordinaten um 2,5 (um 4 am Randstreifen) bzw. 2,2 akzeptable Zuverlässigkeit signalisieren. Für die z-Koordinaten der Projektionszentren ist sie sogar mit $\bar{\delta} = 0,5$ extrem gut.

2.4 Als weiteres Beispiel betrachten wir einen Bündelblock mit 20 % Querüberdeckung, der aus $6 \times 13 = 78$ Bildern besteht. Es sind 9 Paare von Verknüpfungspunkten (= 18 Punkten) pro Bild und außerdem ein Paßpunkt Abstand für Lage- und Höhenpaßpunkte von nur 2 Basislängen ($i = 2b$) angenommen. (Das Beispiel ist daher nicht völlig mit dem Modellblock der Fig. 1 und 2 vergleichbar.) In den Fig. 3 und 4 sind die äußeren Zuverlässigkeitswerte $\bar{\delta}$ dargestellt, die sich auf die maximal möglichen Auswirkungen nicht erkennbarer Fehler der x- und der y-Bildkoordinaten beziehen. Zusätzlich sind jeweils in der 1. Zeile die Redundanzanteile r_i und in der 2. Zeile die Kontrollierbarkeitswerte δ' angegeben. Die eingeschobenen Fächer beziehen sich auf die x- und y- bzw. die z-Koordinaten der Paßpunkte.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt ein ähnliches Bild wie beim Modellblock. Zunächst fällt wieder der deutliche Unterschied zwischen dem Innenbereich und den Randzonen des Blocks auf. Im Block-Innern ist die äußere Zuverlässigkeit zwar für verschiedene Punktklassen verschieden, je nachdem, ob die Bildpunkte in den Bildecken oder auf der Streifenachse am Bildrand liegen. Innerhalb jeder Klasse sind die Werte aber gleichmäßig konstant. Der Einfluß der x-Bildkoordinaten auf die äußere Zuverlässigkeit der Verknüpfungspunkte ist mit $\bar{\delta}$ -Werten von 2,8 bis 3,0 sehr zufriedenstellend. Dagegen gelten für die Bildeckpunkte $\bar{\delta}$ -Werte von 3,9 bis 4,2, bzw. für die Bildrandpunkte auf der Streifenachse die extrem großen $\bar{\delta}$ -Werte von 8,0 bis 9,0. Letztere Werte gehen auf die bekannt schlechte Kontrollierbarkeit der x-Bildkoordinaten beim 3-fachen Strahlenschnitt zurück. Bezüglich der y-Bildkoordinaten herrschen im Durchschnitt aller Punkte etwas ungünstigere, aber gleichmäßigere Verhältnisse, mit δ -Werten von 3,2 bis 3,7.

An den Randzonen des Bündelblocks sind die $\bar{\delta}$ -Werte wiederum deutlich höher (3,5 bis über 8), wobei sich die Bildrandpunkte auf den Streifenachsen noch einmal besonders herausheben, die beim Schnitt von nur 2 Bildstrahlen überhaupt nicht kontrollierbar sind ($\bar{\delta} = \infty$).

Am schwächsten kontrollierbar sind wiederum die Paßpunktkoordinaten, deren äußere Zuverlässigkeit entsprechend unzureichend ist, obwohl das Beispiel eine sehr

dichte Paßpunktbesetzung aufweist. Hier zeigen sich ähnliche Verhältnisse wie beim Bündelblock, insbesondere sind die Paßpunkte an den Blockecken wiederum am stärksten gefährdet.

3. Systematische Untersuchungen über die Abhängigkeit der äußeren Zuverlässigkeit von Projektparametern

3.1 Die genannten Einzelbeispiele geben zwar schon wichtige Anhaltspunkte über die Zuverlässigkeitsverhältnisse in Blöcken, insbesondere auch über die gefährdeten Bereiche. Sie können aber noch nichts über die Zusammenhänge mit den Projektparametern aussagen.

Deshalb sind systematische Fallberechnungen durchgeführt worden, in denen die wichtigsten Größen, die einen Block bestimmen, variiert wurden. Die Ergebnisse sind im Anhang zusammengefaßt dargestellt. Die Untersuchungen umfaßten gleichzeitig die Berechnung der r_i , der δ' - und der $\bar{\delta}$ -Werte. Alle 3 Größen sind jeweils in den Zahlentabellen gemeinsam aufgeführt.

Die Untersuchung erstreckt sich auf folgende Fälle, welche die wichtigsten Projektparameter der Aerotriangulation beinhalten:

- Modellblöcke und Bündelblöcke
- 20 % und 60 % Querüberdeckung
- Paßpunktanordnung bzw. -abstände
- Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild (9, 2x9 = 18, 25) bzw. pro Modell (4, 6, 8, 12, abgesehen von den Projektionszentren)
- Blockgröße
- Bei Bündelblöcken Unterscheidung, ob außerhalb des Netto-Bereiches Verknüpfungspunkte am Rand mitbenutzt werden.

Diese Fehleruntersuchungen wurden im einzelnen bereits im Vortrag von R. Schroth erläutert. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen bezüglich innerer und äußerer Zuverlässigkeit eine weitgehende Parallelität, sodaß die dortige Diskussion hier mit einzubeziehen ist.

Die Abhängigkeit der äußeren Zuverlässigkeit von den Blockparametern kann wie folgt zusammengefaßt werden:

3.2 Die schon oben getroffene Feststellung bestätigt sich allgemein, daß die Zuverlässigkeiten im Blockinneren sehr homogen und gleichmäßig sind. Dabei unterscheiden sich innerhalb des Einzelbildes bei der Bündelmethode zusätzlich die einzelnen Punktklassen, je nachdem, ob es sich um Bildeck-, Bildrand- oder Bildmittelpunkte handelt. Offensichtlich ist die Zahl der am jeweiligen Punkt beteiligten Bildstrahlen wirksam. Im Vergleich zum Blockinnern fällt die äußere Zuverlässigkeit der Blockrandpunkte stets deutlich ab.

3.3 Als wichtiges Ergebnis kann zunächst allgemein festgestellt werden, daß die Blockgröße praktisch keinen Einfluß auf die äußere Zuverlässigkeit der Blöcke hat. Insbesondere ist die Zuverlässigkeit der Blockinnenpunkte nicht von der Blockgröße und nicht von der Paßpunktanordnung abhängig. Auch die Zuverlässigkeit der Randpunkte ist praktisch nicht von der Blockgröße abhängig. Und selbst für die Paßpunkte ist die Blockgröße nur indirekt von Bedeutung. Die wirksame Einflußgröße ist der jeweilige Paßpunktabstand.

Für die Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Neupunkte stellt sich, abgesehen von den Effekten am Blockrand, als eigentlich einzig wesentliches und bestimmendes Kriterium die Stärke der Verknüpfungen der Bilder oder Modelle heraus. Der unter dem Stichwort "Stärke der Verknüpfungen" zusammengefaßte Einfluß läßt sich trennen in die Wirkung der Überdeckung einerseits und in die Anzahl der Verknüpfungspunkte pro Bild oder Modell andererseits.

Für die Zuverlässigkeit der Paßpunkte kommt zusätzlich noch der Paßpunktabstand als wirksamer Faktor hinzu.

Diese Zusammenhänge werden nachfolgend erläutert.

3.4 Bei Modellblöcken mit 20 % Querüberdeckung sind die Modell-Innenpunkte, die nicht verknüpfen, überhaupt nicht kontrollierbar. Im einfachsten Fall von 4 Verknüpfungspunkten pro Modell, die jeweils in den Modellecken liegen, ergeben sich für die Lagekoordinaten im Blockinnern $\bar{\delta}$ -Werte von über 4. Derartige Zuverlässigkeitswerte sind zwar für kleinmaßstäbige Auswertungen vielleicht tolerierbar, können aber in der Regel nicht als akzeptabel gelten. Die Verwendung der üblichen 6 Verknüpfungspunkte pro Modell verbessert diese Werte kaum, sodaß auch sie als unzureichend eingestuft werden müssen. Erst der Übergang auf 4 bzw. 6 Paare von Verknüpfungspunkten pro Modell bringt die äußere Zuverlässigkeit der Lagekoordinaten auf die akzeptablen Beträge von 3 oder knapp darunter, wobei die in der Nähe der Nadirpunkte gelegenen Verknüpfungspunkte noch stets $\bar{\delta}$ -Werte über 3 aufweisen.

Am Blockrand von Modellblöcken sind die Zuverlässigkeitswerte für die Lagekoordinaten bei 4 oder 6 Verknüpfungspunkten pro Modell in jedem Fall unzulässig groß. Sie gehen selbst bei Verwendung von 4 bzw. 6 Punktepaaren nur auf Beträge von 4 bis über 5 zurück, die noch ebenfalls als zu hoch angesehen werden müssen. Nur an den Paßpunkten selbst ergibt sich eine weitere Verminderung.

Die äußere Zuverlässigkeit der Höhenkoordinaten ist bei Modellblöcken schon mit 4 oder 6 Verknüpfungen pro Modell im Blockinnern zufriedenstellend, bei $\bar{\delta}$ -Werten mit Beträgen um oder unter 3, bzw. am Blockrand um 5 oder darüber, in geringer Abhängigkeit von den Paßpunkten. Doppelte Verknüpfungspunkte senken diese Beträge auf 2,5 bis 2,7 im Blockinnern bzw. auf 4 bis 4,5 am Blockrand.

Bei Bündelblöcken mit 20 % Querüberdeckung herrschen insgesamt ähnliche Verhältnisse. Bei den üblichen 9 Verknüpfungspunkten pro Bild liegen die $\bar{\delta}$ -Werte

der äußeren Zuverlässigkeit im Blockinnern bei Beträgen zwischen knapp unter 3 und über 6, mit deutlichen Unterschieden der Einflüsse der x- und y-Bildkoordinaten. Am Blockrand treten Werte bis über 10 auf. Eine Sonderrolle spielen dabei jeweils die nur schwach kontrollierbaren Bildpunkte am jeweiligen Bildrand auf der Streifenachse. Ihre von den x-Bildkoordinaten herrührenden $\bar{\delta}$ -Werte liegen im Blockinnern bei 9 und springen an den Stirnseiten der Blockränder auf ∞ .

Erst mit doppelten Verknüpfungspunkten (18 Punkte pro Bild) reduzieren sich die $\bar{\delta}$ -Werte der äußeren Zuverlässigkeit im Innern von Bündelblöcken auf akzeptable Werte von 2 - 3, bleiben jedoch an den Blockrändern und an den Bildrandpunkten noch stets bei den unangenehm hohen Beträgen um 8 bzw. ∞ an den Stirnseiten.

3.5 Dagegen erweist sich die doppelte Überdeckung ($q = 60\%$ oder noch besser Kreuzbefliegung) allgemein als höchst wirksame Maßnahme zur Homogenisierung und zur Steigerung der äußeren Zuverlässigkeit im Block. Bei Bündelblöcken liegen dann die $\bar{\delta}$ -Werte alle zwischen 2 und 3, selbst am doppelt überdeckten Blockrand, wenn man die überstehenden, einfach überdeckten Halbbilder nicht rechnet. Für doppelte Modellblöcke gilt dasselbe, abgesehen für leicht erhöhte Werte am äußeren Blockrand.

3.6 Die schwächsten und als höchst unzureichend zu beurteilenden Zuverlässigkeitswerte haben ganz allgemein die Paßpunktkoordinaten, die in der Blockausgleichung als Beobachtungen behandelt werden, andernfalls sind sie überhaupt nicht direkt kontrollierbar. Wegen des Zusammenhangs zwischen Kontrollierbarkeit und äußerer Zuverlässigkeit bei Paßpunkten gemäß Gleichung (3c) gelten hier ähnliche Gesetzmäßigkeiten, wie sie von R. Schroth für die Kontrollierbarkeit von Paßpunktkoordinaten bereits angegeben wurden.

Danach ist bei Lagepaßpunkten am Blockrand die Zuverlässigkeit primär vom Paßpunktabstand abhängig. Bei sogenannter dichter Paßpunktbesetzung ($i = 2b$) am Blockrand ergeben sich $\bar{\delta}$ -Werte bei Bündel- und Modellblöcken von 5 bis 6, die Paßpunkte an den Blockecken haben jedoch auch in diesem Fall $\bar{\delta}$ -Werte von 8,5 bis 9,1 bzw. 7,2. Mit zunehmendem Paßpunktabstand steigen die $\bar{\delta}$ -Werte rasch an (bei Bündelblöcken noch rascher als bei Modellblöcken) auf $\bar{\delta}$ -Werte von 10 bis 20. Dabei wachsen die $\bar{\delta}$ -Werte der stets besonders gefährdeten Lagepaßpunkte an den Blockecken noch stärker an, um z.B. beim Bündelblock den Wert 50,8 (für x) bzw. 53,3 (für y) bei einem Paßpunktabstand von $i = 12b$ zu erreichen.

Ganz ähnliche Verhältnisse gelten für die äußere Zuverlässigkeit der Höhenpaßpunkte. Beim Modellblock mit 3 Höhenpaßpunktketten von je 4 Basislängen Abstand liegen die $\bar{\delta}$ -Werte für die am Blockrand gelegenen Höhenpaßpunkte zwischen 11,3 und 11,6 und die Höhenpaßpunkte an den Blockecken bei 15,5. Lediglich die Innenpunkte der mittleren Paßpunktkette haben $\bar{\delta}$ -Werte von 8,0. Die vergleichbaren Werte bei Bündelblöcken liegen durchweg noch höher. Mit wachsendem Abstand i der Höhen-

paßpunktketten steigen die $\bar{\delta}$ -Werte in erster Näherung linear an, um bei $i = 12 b$ Beträge von 18,4 bzw. an den Blockecken von 25,7 zu erreichen.

Diese Angaben beziehen sich auf die Fälle einfacher Verknüpfungen mit 4 Punkten/Modell bzw. 9 Punkten/Bild. Etwas günstigere Werte ergeben sich mit stärkerer Verknüpfung, d.h. mit jeweils doppelten Verknüpfungspunkten (8 oder 12 Punkte/Modell bzw. 18 Punkte/Bild). In diesen Fällen sind bei Randbesetzung sowohl beim Bündelblock als auch beim Modellblock $\bar{\delta}$ -Werte für die Lagekoordinaten der Paßpunkte von 5,0 zu erreichen, wiederum abgesehen von den Paßpunkten an den Blockecken, deren $\bar{\delta}$ -Werte sich nur auf 7,3 bis 7,9 bzw. 7,2 reduzieren. Entsprechend verringern sich die $\bar{\delta}$ -Werte der Höhenpaßpunkte um etwa 18 %. Mit zunehmendem Abstand der Paßpunkte steigen aber auch mit doppelten Verknüpfungen die $\bar{\delta}$ -Werte der Paßpunkte in erster Näherung linear an, um mit $i = 12 b$ an den Blockecken Werte von über 25 (Lage) bzw. von 20 (Höhe) anzunehmen.

In der Fig. 7 sind die jeweils an den Blockecken auftretenden maximalen $\bar{\delta}$ -Werte für Lage- und Höhenpaßpunkte für einfach und doppelt verknüpfte Bündel- und Modellblöcke in Abhängigkeit vom Paßpunktastand graphisch dargestellt. Die beschriebenen Abhängigkeiten sind deutlich zu erkennen.

In ähnlicher Weise wie doppelte Verknüpfungspunkte verbessert auch die Doppelbefliegung die äußere Zuverlässigkeit an den Paßpunkten (s. Beispiele in den Anlagen). Einigermaßen brauchbare Zuverlässigkeiten mit $\bar{\delta}$ -Werten um 4 für die Lage- bzw. um 6 für die Höhenpaßpunkte erhält man jedoch erst in der Kombination kurzer Paßpunktastände mit doppelter Befliegung und Mehrfach-Verknüpfungspunkten. Selbst dann fallen aber die Paßpunkte in den Blockecken noch stets deutlich ab. Die Kontrollierbarkeit der Paßpunkte durch die Blockausgleichung ist somit auch in den günstigsten Fällen nur schwach bzw. in den in der Praxis üblichen Fällen völlig unzureichend.

4. Folgerungen für die Projektplanung

4.1 Die gewonnenen Erkenntnisse über Kontrollierbarkeit und Zuverlässigkeit photogrammetrischer Blöcke bezüglich grober Datenfehler müssen in Regeln für die Projektplanung bei der Aerotriangulation umgesetzt werden.

Vorab sei herausgestellt, daß sich die Projektplanung primär nach der Zuverlässigkeit des Endresultats zu richten hat, und erst in zweiter Linie nach der Genauigkeit (im Sinne von Präzision). Theoretische Genauigkeitsangaben werden nämlich illusorisch und bedeutungslos, wenn nicht entdeckbare und somit nicht entdeckte grobe Datenfehler in einem Block für das Fehlerverhalten dominierend und bestimmend werden. Allerdings ist man bisher völlig auf Vermutungen angewiesen, wie häufig derartige Fehler tatsächlich auftreten.

Als Grundlage für die zu ziehenden Schlußfolgerungen wird neben den Ausführungen des Abschnitts 3 auf die Zusammenstellung in Fig. 7 verwiesen, sowie auf die entsprechenden Ausführungen bezüglich der Kontrollierbarkeit im Aufsatz von R. Schroth. Im übrigen zeigt sich, daß die zur Erzielung guter Zuverlässigkeit und guter Kontrollierbarkeit erforderlichen Maßnahmen weitgehend mit denen parallel laufen, die zur Erzielung guter Genauigkeit ergriffen werden können.

4.2 Bezüglich Überdeckung und Verknüpfungspunkten muß man zunächst zwei verschiedene Projektziele unterscheiden. Soll die Aerotriangulation der (geodätischen) Punktbestimmung dienen, muß man zumindest doppelte Überdeckung (Doppelblöcke) vorsehen, weil Einzelpunkte innerhalb der Bildpaare überhaupt nicht (bei unabhängigen Modellen) oder nur sehr schwach (bei Bündelblöcken) kontrollierbar sind.

Beschränkt man sich bei der Aerotriangulation für anschließende Kartierung auf die Bestimmung von Verknüpfungspunkten im Überdeckungsbereich benachbarter Modelle, ist die Einfachüberdeckung (60 % Längs-, 20 % Querüberdeckung) ausreichend. Für die Innenpunkte eines Blocks kann es bei den unabhängigen Modellen in gewissen Fällen genügen, nur die Mindestanzahl von 4 oder 6 Verknüpfungspunkten pro Modell (abgesehen von den Projektionszentren) zu messen, um eine für den konkreten Fall hinreichende Zuverlässigkeit zu bekommen. (bei kleinmaßstäbigen Kartierungen entspricht die in der Karte geforderte Zuverlässigkeit großen zulässigen $\bar{\sigma}$ -Werten im Bildmaßstab). Bei der Bündelmethode sind die Verhältnisse in diesem Fall etwas ungünstiger, insbesondere wegen der schlechteren Kontrollierbarkeit der nur durch 3 Strahlen bestimmten Achspunkte. In der Regel sind aber als Standardverfahren jeweils Paare von Verknüpfungspunkten vorzusehen (8 oder 12 Punkte/Modell; 18 Punkte/Bild), wenn höhere Ansprüche an die Aerotriangulation gestellt werden.

4.3 Bereiche unzureichender Zuverlässigkeit sind bei Einfachblöcken (und in reduziertem Maße relativ auch bei Doppelblöcken) stets die Randzonen der Blöcke, insbesondere die Randpunkte selber. Wie schon früher bei der Studie der Genauigkeitsverhältnisse erkannt wurde, kommen 2 Maßnahmen in Frage, dieser Schwäche zu begegnen:

(1) Man kann den Block "rändern" bzw. von einem gegebenen Block die Randpunkte zwar mit auswerten, aber nur die Innenpunkte des Blocks zur weiteren Verwendung benützen. Insbesondere können dabei die Paßpunkte an den Rand des Innenbereichs verlegt werden. Dieser Fall kommt in der Praxis häufig vor, da sich das Interessengebiet meist nicht völlig mit dem durch die Befliegung überdeckten Gebiet deckt.

(2) Anstelle einer Ränderung kann der Rand eines Gebiets auch durch zusätzliche Überdeckung und durch Verwendung von Mehrfach-Verknüpfungspunkten zuverlässiger gemacht werden. Für zusätzliche Überdeckung genügt es in der Regel, je einen zusätzlichen Streifen am Blockrand zu fliegen. Man erkennt den Zusammenhang mit dem Vorschlag der Ränderung eines Blocks.

Das sicherste Verfahren mit voll befriedigender Zuverlässigkeit ist die Kombination beider Maßnahmen: Ränderung des Blocks und Verwendung mehrfacher (3- oder 4-facher) Verknüpfungspunkte in den Randzonen des Blocks.

4.4 Noch mehr Beachtung als der Blockrand ohnehin schon erfordert, muß der Kontrollierbarkeit und der Zuverlässigkeit der Paßpunkte geschenkt werden. Es geht dabei nicht um die photogrammetrische Messung der Paßpunkte, sondern um die geodätischen Paßpunktkoordinaten. Dazu gehört allerdings, weil nicht davon unterscheidbar, die Signalisierung der Paßpunkte im Gelände bzw. die Identifizierung der Geländepunkte im Bild.

Die Zahlenwerte der verschiedenen Fälle haben gezeigt, daß bei schwacher Paßpunktbesetzung und einfacher Überdeckung nur sehr große grobe Paßpunktfehler durch den Block aufdeckbar sind. Um auch nur von einer einigermaßen brauchbaren Kontrollierbarkeit der Paßpunkte durch die Photogrammetrie sprechen zu können, sind Doppelüberdeckung und starke Verknüpfungen Voraussetzung. Aber selbst dann sind bei größeren Paßpunktabständen, wie sie in der Praxis insbesondere der kleinmaßstäbigen Aufnahme die Regel sind, keine befriedigenden Zuverlässigkeiten zu erreichen. Das Problem kann nur sauber gelöst werden, wenn der Photogrammeter voraussetzen kann, daß die geodätischen Paßpunkt-Koordinaten als solche bei der geodätischen Bestimmung so abgesichert werden, daß ihre Zuverlässigkeit (mit $\bar{\sigma}$ -Werten, die im Vergleich zur Photogrammetrie klein sind) vorausgesetzt werden kann. Dann bleibt dem Photogrammeter nur noch das Problem der Zuverlässigkeit der Signalisierung bzw. der Identifizierung der Paßpunkte. Da diese Operationen punktweise unabhängig sind, kann die Kontrollierbarkeit auf grobe Fehler dieser Art durch die in der Praxis zumutbare Verwendung von Paaren oder Tripeln von Paßpunkten gesichert werden. Das gilt sowohl für Lage- als auch für Höhenpaßpunkte. Mit Paßpunkt-Tripeln sind dann $\bar{\sigma}$ -Werte von 2,8, mit Quadrupeln von 2,3 erreichbar. Insbesondere für die stets besonders gefährdeten Paßpunkte an den Blockecken sollten deshalb stets mindestens Tripelpunkte vorgesehen werden. Zur weiteren Sicherung wird man sie nicht in die äußersten Blockecken legen, sondern z.B. auf die 3 inneren Eckpunkte des Eckmodells verteilen.

Wenn die Maßnahme der Mehrfachpaßpunkte kombiniert wird mit dem durch Doppelbefliegung versteiften Rand oder mit einer zusätzlichen Ränderung des Blocks außerhalb des Paßpunkterahmens, kann insgesamt auf ökonomische Weise ein her-

vorragendes Zuverlässigkeitsniveau der photogrammetrischen Blockausgleichung einschließlich der Absicherung der Paßpunkte erreicht werden. Es bietet die Voraussetzung dafür, daß sich die hervorragenden Genauigkeitseigenschaften der Blöcke realisieren lassen.

4.5 Abschließend seien noch mit dem Blick auf die Zuverlässigkeit geodätischer Netze 2 Feststellungen getroffen:

Die Zuverlässigkeit photogrammetrischer Blöcke ist direkt mit der Zuverlässigkeit guter geodätischer Netze vergleichbar, mit sehr ähnlichen $\bar{\delta}$ -Werten.

Die photogrammetrischen Punktfelder sind in geringerem Maße als die geodätischen durch örtliche Bedingungen behindert. Photogrammetrische Blöcke sind (abgesehen vom Hochgebirge) geometrisch schematischer und gleichartiger aufgebaut. Entsprechend sind die Zuverlässigkeitsverhältnisse im Block homogener. In der Regel genügt deshalb im Block eine schematische Beurteilung der Zuverlässigkeit, wobei nicht vorab im Planungsstadium jeder Punkt einzeln analysiert zu werden braucht. Spezielle Einzelbetrachtungen sind erst bei Störungen der Geometrie (z.B. durch Wasserflächen) erforderlich. Und selbst dann können die für den äußeren Rand eines Blocks gültigen Regeln auf innere Ränder übertragen werden.

				6.5				6.5				6.5
				5.1				5.1				5.1
8.3	7.2											
8.3	7.2	7.2	7.4	7.4	7.2	7.2	7.4	7.4	7.2	7.2	7.4	7.4
6.0	4.8	4.8	5.0	5.0	4.7	4.7	5.0	5.0	4.7	4.7	5.0	5.0
6.4	5.0											
6.1	5.7	5.7	5.6	5.6	5.7	5.7	5.6	5.6	5.7	5.7	5.6	5.6
3.4	2.9	2.9	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	2.8	2.9	2.9	2.8	2.8
6.1	5.7	5.7	5.6	5.6	5.7	5.7	5.6	5.6	5.7	5.7	5.6	5.6
3.4	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
6.4	5.0											
6.0	5.7	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
3.3	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
6.0	5.7	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
3.3	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
6.4	5.0											
6.0	5.7	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
3.3	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8

Fig. 1 Kontrollierbarkeits- und äußere Zuverlässigkeitsfaktoren der Lagekoordinaten (für x und y gleich) eines Blocks von $6 \times 12 = 72$ unabhängigen Modellen mit dichter Paßpunkt-Randbesetzung; 4 Paare von Verknüpfungspunkten pro Modell (jeweils $\delta'_{o,i}$ Werte in der ersten Zeile, $\bar{\delta}_{o,i}$ in der zweiten Zeile)

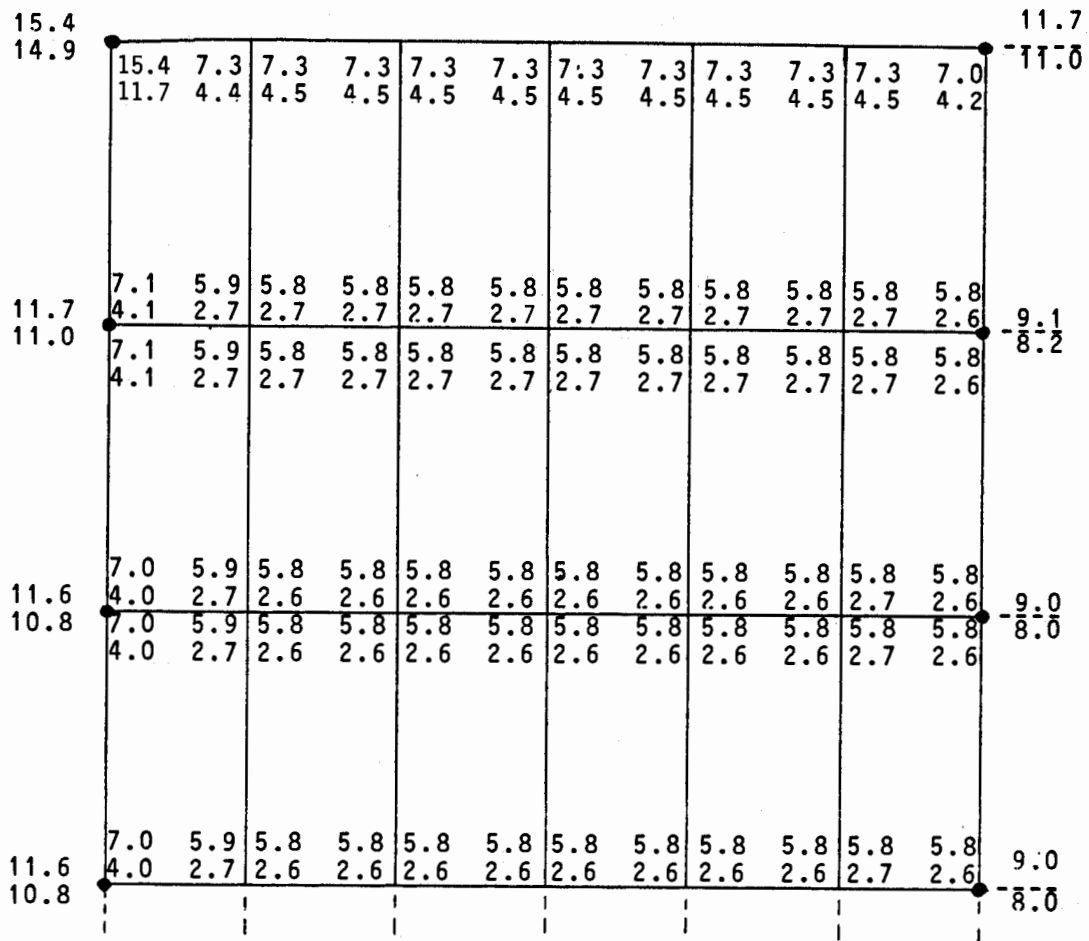


Fig. 2 Kontrollierbarkeits - und äußere Zuverlässigkeitsfaktoren der Höhenkoordinaten eines Blocks von $6 \times 12 = 72$ unabhängigen Modellen mit 3 Höhenpaßpunktketten; 4 Paare von Verknüpfungspunkten pro Modell + Projektionszentren.
 (jeweils $\delta'_{o,i}$ Werte in der ersten Zeile,
 $\bar{\delta}_{o,i}$ Werte in der zweiten Zeile)

	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
PP	.231 8.32 7.30	.202 8.89 7.94	.126 11.3 10.6	.443 6.01 4.49	.385 6.45 5.06	.227 8.40 7.38	.444 6.00 4.48	.388 6.42 5.03	.251 7.98 6.91	.443 6.01 4.49	.387 6.43 5.04	.253 7.95 6.86
		.256 7.91 5.64	.126 11.3 8.63	.126 11.3 9.03	.537 5.46 3.13		.130 11.1 8.86	.539 5.45 3.11	.130 11.1 8.85	.130 11.3 9.03	.539 5.46 3.13	
		.000 ∞ ∞	.147 10.4 8.95	.147 10.4 9.02	.587 5.22 2.95		.148 10.4 9.02	.588 5.22 2.95		.148 10.4 9.02	.588 5.22 2.95	
		.515 5.57 2.78	.470 5.84 2.87	.494 5.69 2.98	.657 4.93 2.25		.494 5.69 2.98	.657 4.93 2.25		.494 5.69 2.98	.659 4.93 2.24	
PP	.387 6.43 5.03	.424 6.14 4.66	.209 8.74 7.77	PP z: 3.87 6.43 5.04			.420 6.17 4.70			PP z: 4.25 6.14 4.66		
		.521 5.54 2.74	.472 5.82 2.86	.481 5.77 3.09	.649 4.96 2.31	.509 5.62 2.88	.481 5.77 3.09	.649 4.96 2.31	.509 5.62 2.88	.496 5.68 2.96	.653 4.93 2.25	
		.000 ∞ ∞	.148 10.4 8.90	.148 10.4 9.02	.592 5.20 2.92	.149 10.4 8.93	.148 10.4 9.02	.597 5.18 2.88	.149 10.4 8.93	.148 10.4 9.02	.597 5.18 2.88	
		.522 5.53 2.72	.472 5.82 2.85	.481 5.77 3.09	.650 4.96 2.30	.506 5.62 2.88	.481 5.77 3.09	.650 4.96 2.30	.506 5.62 2.88	.498 5.67 2.95	.661 4.92 2.23	
PP	.398 6.34 4.92	.432 6.09 4.59	.220 8.53 7.53	PP z: 3.99 6.33 4.91			.434 6.07 4.57			PP z: 4.39 6.04 4.53		
		.522 2.73 ∞	.472 2.85 8.90	.481 ∞ ∞	.651 5.20 2.92	.506 5.62 2.88	.481 ∞ ∞	.651 5.20 2.92	.506 5.62 2.88	.498 5.67 2.95	.661 4.92 2.23	
		.522 5.54 2.73	.472 5.82 2.85	.481 5.77 3.09	.651 4.96 2.30	.506 5.62 2.88	.481 5.77 3.09	.651 4.96 2.30	.506 5.62 2.88	.498 5.67 2.95	.661 4.92 2.23	
PP	.397 6.35 4.93	.431 6.09 4.60	.220 8.52 7.53	PP z: 3.99 6.33 4.91			.435 6.07 4.56			PP z: 4.39 6.04 4.53		
		.522 5.54 2.73	.472 5.82 2.85	.481 5.77 3.09	.651 4.96 2.30	.506 5.62 2.88	.481 5.77 3.09	.651 4.96 2.30	.506 5.62 2.88	.498 5.67 2.95	.661 4.92 2.22	

Fig. 3 Einfluß der x-Bildkoordinaten und der Paßpunkte auf die Zuverlässigkeit eines Bündelblocks von 6 x 13 = 78 Bildern, mit q = 20 % Querüberdeckung, 9 x 2 = 18 Verknüpfungspunkten/Bild und dichter Paßpunktbesetzung (i = 2 b für Lage- und Höhenpaßpunkte). Es sind jeweils untereinander die Werte für r_i , δ und $\bar{\delta}$ angegeben.

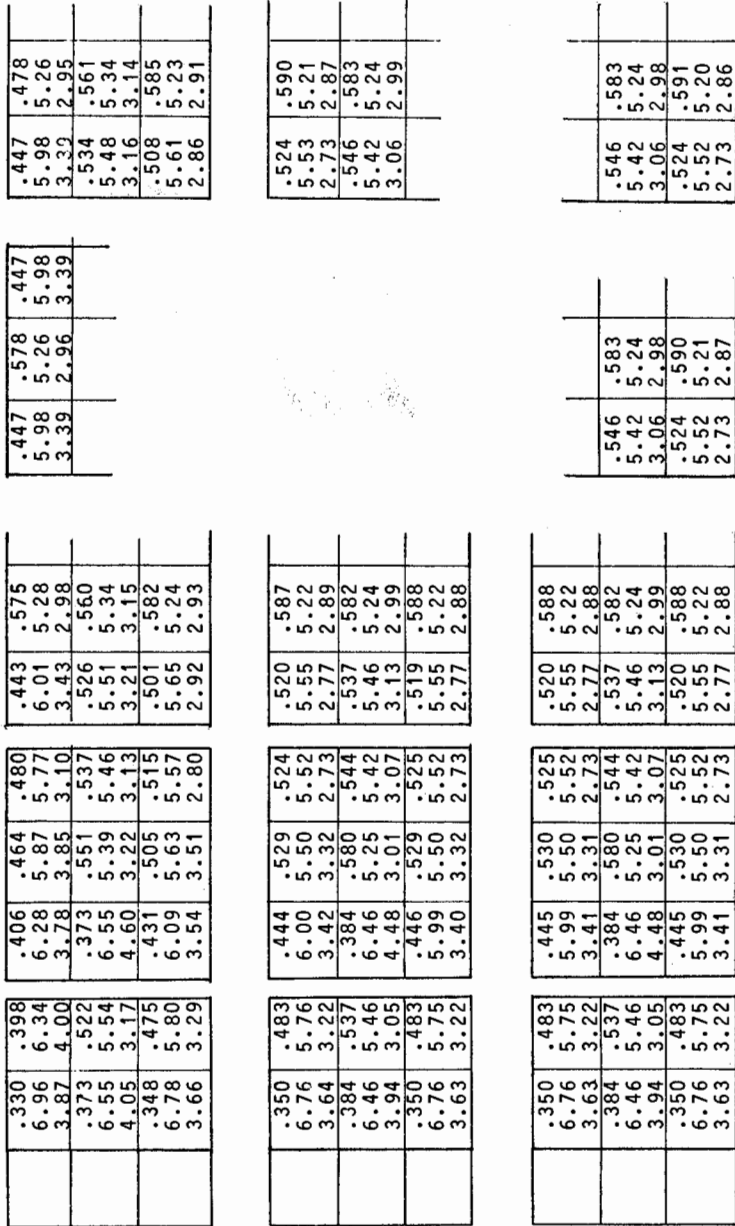


Fig. 4 Wie in Fig. 3, Einfluß der y-Bildkoordinaten auf die Zuverlässigkeit eines Bündelblocks

Fig. 5 Zusammenstellung der mittleren und der extremen Zuverlässigkeitswerte für Modellblöcke (weitgehend unabhängig von Blockgröße und Paßpunktbesetzung; Erläuterung der Bezeichnungen im Anhang)

Mittelwerte (Innenpunkte)

Block	q = 20 %				Block	q = 60 %	
	Lage		Höhe			Lage	
	δ'_0	$\bar{\delta}_0$	δ'_0	$\bar{\delta}_0$		δ'_0	$\bar{\delta}_0$
E 4	8.0	4.0	7.5	2.5	D 6	5.7	2.3
E 6	6.9	4.0	6.9	2.9	D 12	4.9	2.0
E 8	5.7	2.8	6.2	2.4			
E 12	5.7	3.3	6.0	2.9			

Extremwerte

Block	q = 20 %								Block	q = 60 %			
	Lage				Höhe					Lage			
	Ecken		Rand		Ecken		Rand			Ecken		Rand	
	δ'_0	$\bar{\delta}_0$	δ'_0	$\bar{\delta}_0$	δ'_0	$\bar{\delta}_0$	δ'_0	$\bar{\delta}_0$		δ'_0	$\bar{\delta}_0$	δ'_0	$\bar{\delta}_0$
E 4	21.	15	18.	13.	12.	5.6	12.	5.4	D 6	7.6	4.3	6.9	3.5
E 6	12.	8.0	11.	7.7					D 12	6.4	4.1	5.7	3.1
E 8	7.8	5.5	7.8	5.5	7.3	4.5	7.3	4.5					
E 12	7.3	5.2	7.2	5.1									

Fig. 6 Zusammenstellung der mittleren und der extremen Zuverlässigkeitswerte für Bündelblöcke (weitgehend unabhängig von Blockgröße und Paßpunktbesetzung; Erläuterung der Bezeichnungen im Anhang).

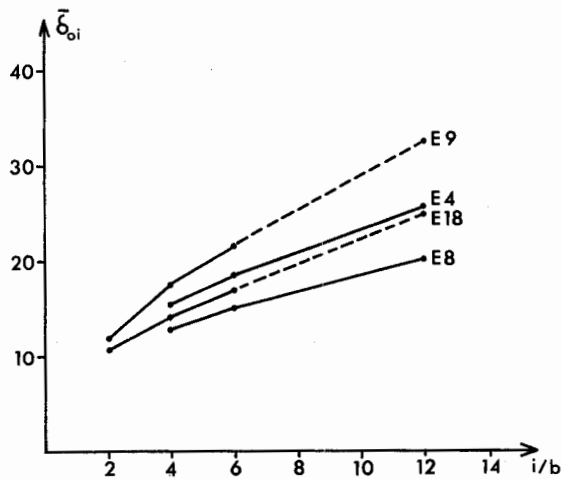
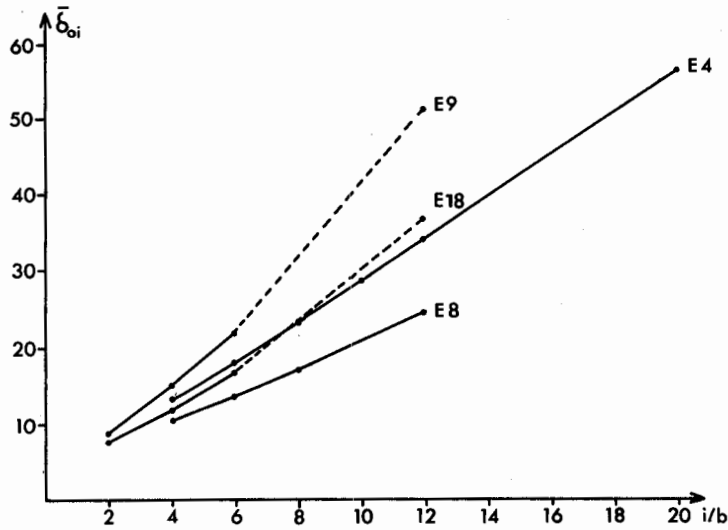
Mittelwerte (Innenpunkte)

Block	q = 20 %		Block	q = 60 %	
	δ'_0	$\bar{\delta}_0$		δ'_0	$\bar{\delta}_0$
E 9	6.9	4.0	D 9	5.7	2.3
E 18	5.7	3.3	D 18	4.9	2.0
E 25	6.3	4.4	D 25	5.0	2.45

Extremwerte

Block	q = 20 %				Block	q = 60 %			
	Ecken		Rand			Ecken		Rand	
	δ'_0	$\bar{\delta}_0$	δ'_0	$\bar{\delta}_0$		δ'_0	$\bar{\delta}_0$	δ'_0	$\bar{\delta}_0$
E 9	15.	10.	15.	10.	D 9	10.	5.7	9.7	4.0
E 18	12.	9.3	12.	9.3	D 18	7.0	3.0	6.3	3.0
E 25	12.	9.8	12.	9.8	D 25	5.0	2.7	5.0	2.7

Fig. 7 Extremwerte der äußeren Zuverlässigkeit ($\bar{\delta}$) bei einfach und doppelt verknüpften Bündel- und Modellblöcken für Lagepaßpunkte (oben) und Höhenpaßpunkte (unten), in Abhängigkeit vom Paßpunktabstand i .



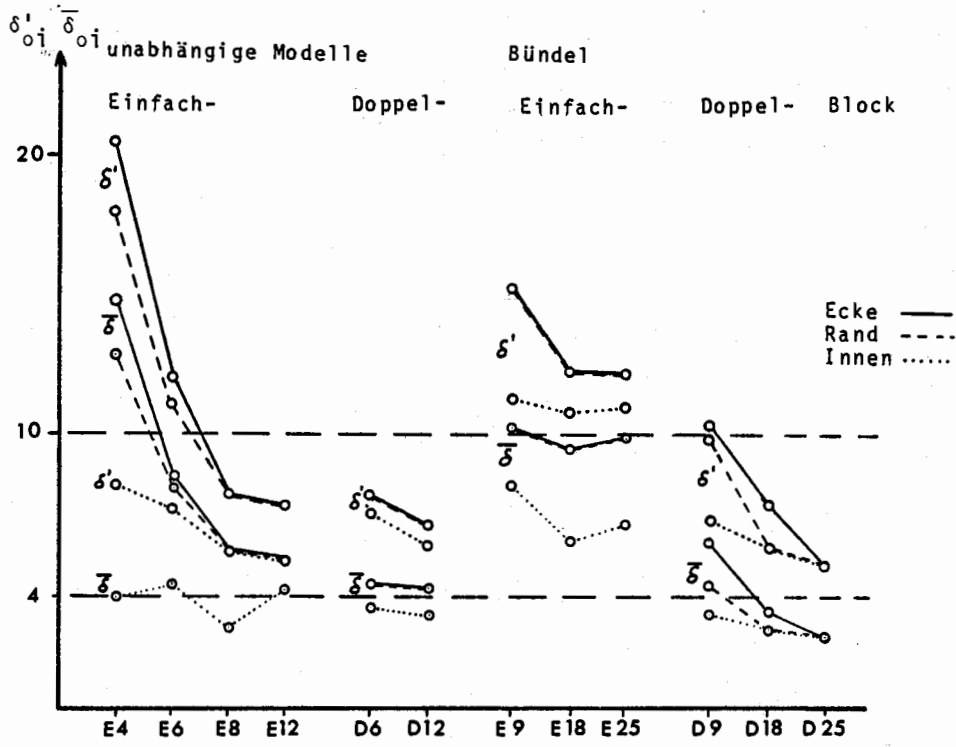


Fig. 8 Maximale Werte der inneren Zuverlässigkeit δ' und der äußeren Zuverlässigkeit $\bar{\delta}$ in photogrammetrischen Blöcken