

GENAUIGKEITSANALYSE DER ORTHOPHOTOSKOPISCHEN VERFAHREN

N. UGRIN

Geodätisches Institut, Lehrstuhl für Photogrammetrie, TU Budapest, H-1521

(Eingegangen am 2. März 1981.)

Vorgelegt von Prof. Dr. Ferenc Sárközy

PRECISION ANALYSIS OF ORTHOPHOTOSCOPIC METHODS — Development of orthophotoscopic instruments has much improved their economy and precision. Errors encountered in applying the method will be pointed out, and so will be the sources of error, giving hints of how to avoid them.

Die Orthophotoskopie hat sich in den letzten 15 bis 20 Jahren stürmisch entwickelt. Heute werden bereits in der ganzen Welt Karten in kleinem und mittlerem Maßstab nach diesem Verfahren, mit übergedruckten Schichtenlinien kombiniert hergestellt. Dieses sehr rasche Kartenherstellungsverfahren wird wegen seines reichen Informationsgehaltes und nicht zu allerletzt wegen seiner Wirtschaftlichkeit mit Vorliebe angewandt, um großmaßstäbige Karten für Planungsvorbereitung herzustellen.

Es ist bekannt, daß Instrument und Methode zwei eng verbundene Faktoren der Entwicklung darstellen. Neue Geräte ermöglichen die Anwendung neuer Methoden, und die Vervollkommnung oder die Schranken der Entwicklung der Verfahren geben die Entwicklungsrichtungen für die Geräte an.

Betrachten wir kurz die Entwicklung der Orthophotokope, die heute bereits in zahlreichen Arbeiten behandelt werden. Von diesen werden im Literaturverzeichnis nur jene genannt, die bei der Abfassung dieses Beitrags direkt benutzt wurden.

Die erste Generation der orthophotoskopischen Geräte arbeitet mittels Herstellung eines mit dem Originalstrahlenbündel zusammenfallenden Strahlenbündels und der Umkehrung des Projektionsprozesses.

Auf der zweiten Entwicklungsstufe wurde die Gruppe der mit optischer Bildübertragung arbeitenden Orthophotokope erstellt, die nach den geometrischen Zusammenhängen der Zentralprojektion verzerrte Bildelemente in unverzerrte umformen. Diese Geräte arbeiten in on-line-Organisation mit dem die Höhendaten liefernden stereophotogrammetrischen Gerät. (Deshalb werden diese Instrumente in der Fachliteratur auch als "Aufsatz"-Orthophotokope bezeichnet.)

Der dritte Gerätetyp arbeitet ebenfalls mit optischer Bildübertragung, bei der Entzerrung des verzerrten Bildelementes werden jedoch die mathema-

tischen Zusammenhänge der Zentralprojektion benutzt. Diese digital gesteuerten Orthophotoskope wurden für off-line-Produktionsweise entwickelt. Die Höheninformation kann in beliebiger Weise geliefert werden (z. B. mit Hilfe eines digitalen Geländemodells usw.).

Die im vorigen kurz angedeutete Entwicklung erbrachte für die Instrumente eine effektive Genauigkeitserhöhung und weitere Anwendungsbereiche.

Die mit optischer Bildübertragung funktionierenden, digital gesteuerten Orthophotoskope, die auf mathematischer Grundlage arbeiten, sind nicht nur für die Entzerrung durch Zentralprojektion hergestellter Aufnahmen geeignet, sondern auch für jene in beliebiger Weise (z. B. Radar, Scanner) hergestellter Bilder.

In den vorliegenden Arbeit möchte ich die Faktoren, die auf die Genauigkeit der Orthophotokarten von Einfluß sind, analysieren und von Möglichkeiten zur Beseitigung von Fehlern sprechen.

1. Zulässige Rastergröße

Das Orthophoto muß, um als "scharf" zu gelten, eine gewisse Auflösungs-fähigkeit haben. Diese ist nicht gleich der Korngröße des für Orthophotoaufnahmen benutzten Filmmaterials. Eben deshalb, wird diese Auflösungs-fähigkeit mit dem drucktechnischen Ausdruck, als *Raster* (elementarer Bildteil) bezeichnet. Die Rastergröße soll von einem normalen Betrachtungsabstand von 250 mm aus unerkennbar sein, d. h. unterhalb der Auflösungs-fähigkeit des menschlichen Auges liegen. Die Auflösungs-fähigkeit des Auges l' entspricht der Größe 0,065 mm in einem Abstand von 250 mm.

Dieser Wert beeinflusst die Vergrößerungsmöglichkeit des Meßbildes. Beträgt die Auflösungs-fähigkeit des Filmmaterials 50 Linien/mm, dann ist z.B. eine 6,5-malige Vergrößerung zulässig, damit das Bild der Körner des projizierten Filmmaterials im Orthophoto, den für das Raster im vorigen angegebenen Wert nicht übersteige.

2. Bildwanderung infolge einer Verschiebung in Z-Richtung der Projektionsebene

Bei Instrumenten, die mit Umkehrung des Projektionsprozesses arbeiten, wird die lichtempfindliche Schicht in der Projektionsebene solange belichtet, bis sie in Abhängigkeit von der Spaltbreite und von der Geschwindigkeit der Bewegung in Y-Richtung, durch die Lichtverschlussschicht nicht verdeckt wird. Es ist bekannt, daß die Projektionsebene ununterbrochen in die Höhe des Spalt-

mittelpunktes eingestellt wird. Ist also das abgetastete Gelände so geneigt, daß es auch eine Neigungskomponente von Y -Richtung (α_Y) hat, wird sich während der Belichtungszeit die Projektionsebene um $\pm \Delta Z$ verschieben. (Die Wirkung ist geometrisch dieselbe, wenn die Höheninformation an den Projektor gegeben wird.)

Die zentralen Projektionsstrahlen, durch die das Meßbild projiziert wird, durchstoßen die Projektionsebene nicht senkrecht; auf Wirkung einer Verschiebung von $\pm \Delta Z$ -Richtung wird also der Bildpunkt auf der lichtempfindlichen Schicht des Orthophotos in Form einer Linie der Länge a abgebildet. Die Bildwanderungsrichtung ist im Verhältnis zu dem Nadirpunkt radial, die Größe beträgt

$$a = \Delta Z \operatorname{tg} \beta. \quad (1)$$

Dabei bedeuten ΔZ = die Verschiebung der Projektionsebene in Z -Richtung
 β = den durch den Projektionsstrahl und die Vertikale gebildeten Winkel.

Die Größe von ΔZ hängt von der Neigungskomponente α_Y des Geländes in Y -Richtung, von der Breite des Spaltes s sowie von der Projektion β_Y des Projektionsstrahles in der Ebene YZ ab. Den Wert von ΔZ erhält man nach Abb. 1 aus

$$\Delta Z = \frac{s \operatorname{tg} \alpha_Y}{1 \pm \operatorname{tg} \beta_Y \operatorname{tg} \alpha_Y} \quad (2)$$

wo im Nenner bei übereinstimmender Projektionsstrahl- und Geländeneigung (Abb. 1a) das negative, bei entgegengesetzter Projektionsstrahl- und Geländeneigung (Abb. 1b) das positive Vorzeichen zu berücksichtigen sind.

Gl. (2) in Gl. (1) eingesetzt, erhält man für die Bildwanderung:

$$a = \frac{s \operatorname{tg} \alpha_Y \operatorname{tg} \beta}{1 \pm \operatorname{tg} \beta_Y \operatorname{tg} \alpha_Y}. \quad (3)$$

Die Bildwanderung hat keine die Schärfe beeinträchtigende Wirkung, bis sie den im Abschnitt 1 angegebenen Rasterwert von 0,064 mm nicht überschreitet.

Da die Bildwanderung von der Höhenänderung der Projektionsebene abhängig ist, soll zuerst die Änderung ΔZ untersucht werden. Aus Formel (2) erkennt man, daß bei $\beta_Y = 0$, also in der Mittellinie in X -Richtung des Meßbildes, der Wert von ΔZ nur durch die Spaltbreite und durch die Komponente der Geländeneigung in Y -Richtung bestimmt wird.

Zu den Rändern eines mit Weitwinkelkamera (152/23 × 23) angefertigten Meßbildes gehörende Projektionsstrahlen können eine Neigung ($\beta_X \beta_Y$) von 36° haben. Die ΔZ -Werte sind in Tabelle 1 bei einer Spaltbreite $s = 1,0$ mm, in Tabelle 2 bei $s = 0,4$ mm angegeben. Bei Übereinstimmung von Projektionsstrahl- und Geländeneigung an den Bildrändern nimmt der für die Mittellinie erhaltene Wert zu, bei gegensätzlichen Projektionsstrahl- und Geländeneigung

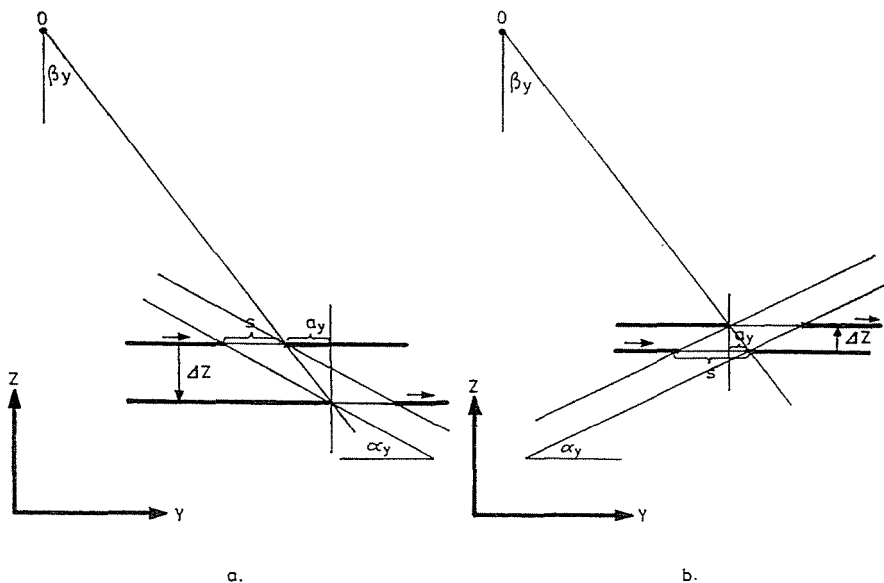


Abb. 1

gen ab. Weil man im voraus nicht weiß, ob die Geländeneigung am Bildrand mit dem Projektionsstrahl übereinstimmend oder entgegengesetzt sein wird, ist mit den ungünstigeren, übereinstimmenden Neigungen von Projektionsstrahl und Gelände zu rechnen.

Die Zunahme der Bildwanderung wurde in Tabelle 3 bei einer Spaltbreite von $s = 1,0$ mm, in Tabelle 4 von $s = 0,4$ mm geprüft. In der Tabelle ist die Grenze, wo die Bildwanderung den Rasterwert überschreitet, durch eine dickausgezogene Linie bezeichnet.

Vergleicht man die Werte in den Tabellen 3 und 4, ist zu erkennen, wie stark die Genauigkeit dadurch wuchs, daß die Spaltbreite von 1 mm auf 0,4 mm vermindert werden konnte.

Tabelle 1

β_y	α_y	5°	10°	15°	20°	25°	30°
	ΔZ						
0°		0,09	0,18	0,27	0,36	0,47	0,58
Übereinstimmend 36°		0,09	0,20	0,33	0,49	0,71	1,00
Entgegengesetzt 36°		0,08	0,16	0,22	0,28	0,35	0,40

$s = 1,0$ mm

Tabelle 2

βy	αy		5°	10°	15°	20°	25°	30°
		ΔZ						
0°			0,03	0,07	0,11	0,14	0,18	0,23
Übereinstimmend 36°			0,03	0,08	0,13	0,18	0,27	0,39
Entgegengesetzt 36°			0,03	0,06	0,09	0,11	0,13	0,16

s = 0,4 mm

Tabelle 3

β	αy		5°	10°	15°	20°	25°	30°
		a						
10°			0,01	0,03	0,05	0,06	0,08	
15°			0,02	0,05	0,07	0,1		
20°			0,03	0,06	0,1			
25°			0,04	0,09				
30°			0,05	0,1				
36°			0,06	0,1				
45°			0,09					

s = 1,0 mm

Bei mit Umkehr des Projektionsprozesses arbeitenden Geräten müssen so große Spaltbreiten benutzt werden, weil die Lichtstärke mit dem Quadrat des Projektionsabstands und dem \cos^4 -fachen des durch den Projektionsstrahl und die Senkrechte gebildeten Winkels abnimmt. (Solche Geräte ermöglichen eine höchstens vierfache Vergrößerung.)

Bei Instrumenten mit optischer Bildübertragung kommt keine Bildwanderung vor, einerseits, weil der optische (nicht geometrische) Projektionsstrahl die Oberfläche der die lichtempfindliche Schicht tragenden Trommel immer senkrecht trifft, andererseits, weil sich in Abhängigkeit von der Trommel-Umdrehungsgeschwindigkeit auch die Bildabtaoptik fortbewegt, und jeweils der der momentanen Trommelposition entsprechende Bildteil projiziert wird.

Es ist noch hinzuzusetzen, daß bei Instrumenten mit optischer Bildübertragung die Spaltbreite $s = 0,1$ bis $0,2$ mm beträgt. Das ist die Folge der großen

Tabelle 4

β	xy	5°	10°	15°	20°	25°	30°
	a						
10°		∅	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03
15°		∅	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
20°		0,01	0,02	0,04	0,05	0,07	0,1
25°		0,01	0,03	0,05	0,07	0,09	
30°		0,02	0,02	0,04	0,06	0,08	
36°		0,02	0,05	0,05	0,1		
45°		0,03	0,04	0,08			

$s = 0,4 \text{ mm}$

Lichtstärke, die diese Geräte gewährleisten und die eine kurze Belichtungszeit gestattet; während bei den die Strahlenbüschel rekonstruierenden Geräten die Belichtungszeit etwa 1/10 s beträgt, arbeiten die Geräte mit optischer Bildübertragung mit Belichtungszeiten von etwa 1/300 s.

3. Fehler infolge von Flächenersetzung

Bei differentieller Bildentzerrung nach dem Spaltverfahren, also bei der Orthophotoskopie, wird die Geländeoberfläche entweder durch differentielle kleine Ebenen oder durch Linien ersetzt.

Geräte, die den Projektionsprozeß umkehren und die Strahlenbündel wieder herstellen, haben Spaltgrößen von 1×4 oder $0,4 \times 4 \text{ mm}$, also wird die Fläche als Ebene ersetzt, deren Größe der Spaltengröße im Maßstab des Orthophotos entspricht.

Bei Instrumenten, die mit optischer Bildübertragung arbeiten, ist das Verhältnis der Länge zu der Breite der Spalten $1 : 160$ ($0,1 \times 16 \text{ mm}$), der Spalt kann also als ein Linienabschnitt betrachtet werden. Die Verzerrungen (Längenänderungen und Verdrehungen) dieses Linienabschnitts können nach geometrischen Zusammenhängen, mit Hilfe optischer Elemente (Dove und Zoom Optik) korrigiert werden.

Die Fläche kann durch sich anschmiegende (Abb. 2b) oder durch *horizontale* Elemente (Abb. 2a) ersetzt werden. Wird die Fläche durch an die Mittelhöhe des durch den Spalt abgetasteten Streifens angepaßte, horizontale Elemente ersetzt, entstehen an den Rändern der Streifen infolge der Ersetzung Diskon-

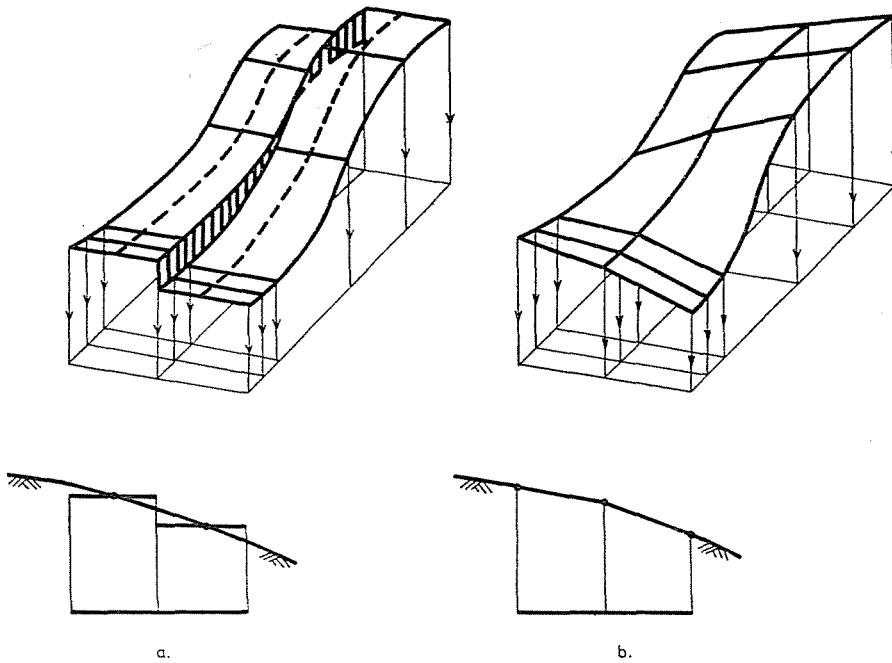


Abb. 2

tinuitäten (schraffierter Bereich in Abb. 2a). Diese entstehen dadurch, daß am Rande des Streifens zwischen Ersatzebene und Geländeoberfläche eine Höhendifferenz besteht, sich die Punkte bei Zentralprojektion also mit Punktverschiebung abbilden.

Um die Höhendifferenzen zu beseitigen, wird bei den Geräten, die den Projektionsprozeß umkehren, der lichtempfindlichen Schicht eine windschiefe Fläche mit Faseroptik vorgesetzt, so daß die Projektion auf eine der Geländeneigung entsprechend geneigte Fläche erfolgt. Dadurch wird die Fläche durch *Tangentelemente* ersetzt, die sich an die Mittellinie des Streifens anpassen und der Geländeneigung gemäß geneigt sind (Abb. 4 in Abschnitt 5).

Die digital gesteuerten Instrumente mit optischer Bildübertragung ersetzen die Fläche durch Schmiegeelemente. Wie wir es im weiteren sehen werden, sind in Orthophotos, die mit Hilfe von zu diesem Gerätetyp gehörenden Instrumenten hergestellt wurden, die sich aus Höhendifferenzen ergebenden Punktverschiebungen minimal und an den Streifenrändern entstehen keine Diskontinuitäten.

4. Fehler infolge der horizontalen Ersetzung der Fläche

Die Punkte der Geländeoberfläche, deren Höhe mit der Höhe der Ersatzfläche nicht übereinstimmt, werden infolge der Höhendifferenz mit Verschiebung abgebildet. Die Verschiebungsrichtung ist *auf den Nadirpunkt bezogen radial* und die Größe ergibt sich aus

$$\Delta r = \frac{d}{2} \operatorname{tg} \alpha_x \operatorname{tg} \beta \quad (4)$$

wo d = die Spaltlänge.

Tabelle 5

d	α_x	5°	10°	15°	20°	25°	30°
	Δv						
2		0,09	0,18	0,27	0,36	0,47	0,58
4		0,18	0,36	0,54	0,72	0,94	1,16
6		0,27	0,54	0,81	1,08	1,41	1,74
8		0,36	0,72	1,08	1,44	1,88	2,32

$$\beta = 45^\circ$$

Tabelle 6

a	α_x	5°	10°	15°	20°	25°	30°
	r						
2		1182	591	394	295	226	183
4		591	295	197	147	113	91
6		394	197	131	98	75	61
8		295	147	98	73	56	45

$$\Delta r = 0,7 \text{ mm}$$

In Tabelle 5 wurde zusammengefaßt, welche radiale Punktverschiebungen Δr sich bei maximaler Strahlneigung $\beta = 45^\circ$, aus der Spaltenlänge und der Komponente der Geländeneigung in X-Richtung ergeben. In der Tabelle wurde durch eine dickausgezogene Linie bezeichnet, wo die Größe der Verschiebung den Punktfehler von 0,7 mm, der bei den Detailpunkten IV. Ordnung in der Kartenebene (Orthophotoebene) zulässig ist, erreicht.

Die Tabelle zeigt, daß bei einer Spaltlänge von 2 mm auf der ganzen Bildfläche die den Detailpunkten vierter Ordnung entsprechende Genauigkeit der Karte — selbst im Falle hoher Gebirge ($\alpha = 30^\circ$) — gewährleistet werden kann.

Daten von Interesse lassen sich der Tabelle 6 entnehmen. Die Tabelle zeigt innerhalb eines Kreises, mit welchem Radius um den Nadirpunkt die Auswertung erfolgen kann, wenn Spaltlänge und maximaler Neigungswinkel berücksichtigt werden, oder bei welcher Spaltlänge und welchem Neigungswinkel die volle Bildfläche ausgewertet werden kann (dickausgezogene Linie).

Tabellen können auch für die Detailpunkte erster, zweiter und dritter Ordnung zulässigen Punktverschiebungen zusammengestellt, und die den Genauigkeitsforderungen entsprechenden Einschränkungen abgelesen werden.

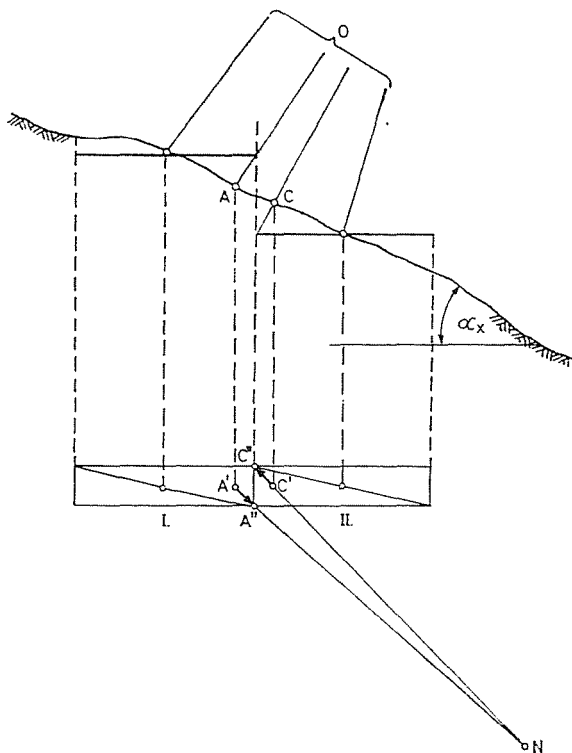


Abb. 3

Die radiale Punktverschiebung Δr läßt sich in Komponenten in Abtastrichtung und in Spaltlängsrichtung, in Δr_Y und Δr_X zerlegen. Die Komponenten Δr_Y und Δr_X können aus Formel (4) berechnet werden, wenn statt des Winkels β die Komponente β_Y in der Ebene YZ oder Komponente β_X in der Ebene XZ eingesetzt wird. Bezüglich der Abb. 3 läßt sich ablesen:

a) Infolge der Komponente Δr_Y der aus der Höhendifferenz herrührenden, radialen Punktverschiebung, da die Verschiebungen in zwei nebeneinander befindlichen Streifen von einander entgegengesetzter Richtung sind (in dem einen

Streifen liegt der Punkt unter, in dem anderen über der Bezugsebene), werden am Streifenrande die linienförmigen Kartenelemente bei dem Wert $2\Delta r_Y$ unterbrochen. Dieser Fehler wird *Sägezahnabbildung* genannt.

Eine Sägezahnabbildung kommt in der Mittellinie des Meßbildes von X -Richtung nicht vor, nur an den Bildrändern in Y -Richtung.

b) Infolge der Komponente Δr_X der aus Höhendifferenz herrührenden, radialen Punktverschiebung werden die Punkte am Streifenrand je nach dem Verhältnis der Geländeneigung zu der Neigung der Projektionsstrahles, entweder in beiden Streifen oder in keinem der beiden abgebildet.

Analog zu Abb. 1, stimmen Geländeneigung und Neigung des Projektionsstrahles in der Ebene XZ überein, wird am Streifenrand *das Bild verdoppelt*; sind die Neigungen *entgegengesetzt*, *fällt das Bild aus*.

Die Größe des verdoppelten oder ausfallenden Geländeabschnittes am Streifenrand wird nach [2] aus der Formel

$$\delta = 2\Delta r_X = d \frac{\operatorname{tg} \alpha_X}{\operatorname{ctg} \beta_X \pm \operatorname{tg} \alpha_X} \quad (5)$$

berechnet.

Im Nenner werden bei übereinstimmender Projektionsstrahl- und Geländeneigung (verdoppeltes Bild) das negative, bei entgegengesetzter Projektionsstrahl- und Geländeneigung (ausfallendes Bild) das positive Vorzeichen berücksichtigt.

Aus der Formel läßt sich ablesen, daß in der Mittellinie von Y -Richtung des Meßbildes kein Bildausfall oder keine Bildverdoppelung vorkommen, während diese gegen die Ränder von X -Richtung zunehmen.

5. Wirkung des Ersetzens der Fläche durch ein Schmiegelement auf die Genauigkeit

Die mit der Umkehr des Projektionsprozesses und geometrisch gesteuerter, optischer Bildübertragung arbeitenden Instrumente erhalten die Höheninformation in der Mittellinie des Streifens und ersetzen die Fläche durch ein theoretisch horizontales Element. Daher treten die in Abschnitt 4 beschriebenen, aus Höhendifferenz herrührenden Fehler auf, die dann nach verschiedenen Verfahren vermindert oder "eliminiert" werden.

Die Geländeneigung wird so berücksichtigt, daß die Geländeoberfläche in Abhängigkeit von der Geländeneigung mittels einer Ersatzebene "berührt" wird, die sich an die in der Mittellinie des Streifens abgetasteten Höhen anpaßt. Dieses Verfahren wird *tangentiale Ersetzung* genannt, und dabei werden, wie es Abb. 4 zeigt, die Diskontinuitäten am Streifenrand stark vermindert (vgl. Abb. 2a und Abb. 4).

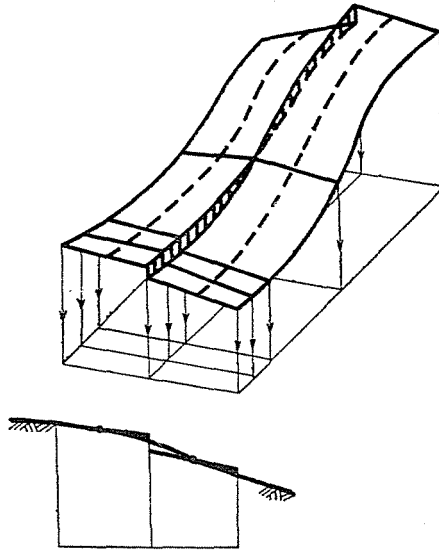


Abb. 4

Die zu dem Drehen und zu der Maßänderung des Bildlinienelementes erforderliche Höheninformation wird durch die digital gesteuerten, mit optischer Bildübertragung arbeitenden Geräte nicht in der Mittellinie, sondern an den Rändern des Streifens erfaßt. Dadurch wird erreicht, daß am Streifenrand keine Diskontinuität (kein Widerspruch) vorkommt, also weder Bildausfall noch Verdopplung oder Sägezahnabbildung auftreten.

Auch bei der Ersetzung durch Schmiegeflächenelemente zeigt sich eine geringe Punktverschiebung, die in Abb. 5 gerade im mittleren Teil des Streifens wahrnehmbar ist.

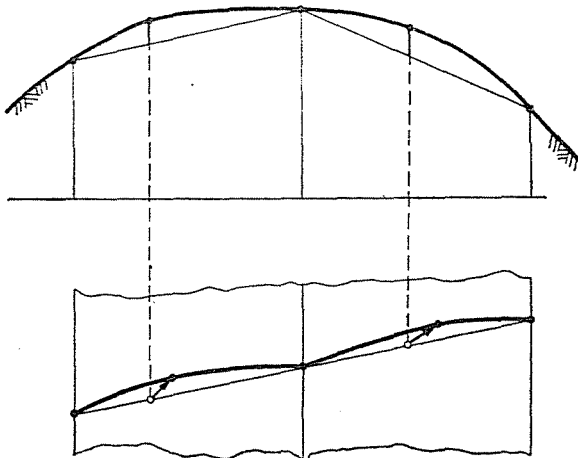


Abb. 5

Der Fehler zeichnet sich in der Form ab, daß die am Streifenrand befindlichen Punkte der linienförmigen Anlagen an Ort und Stelle bleiben, während sich die zwischenliegenden Abschnitte verkrümmen. Diese Krümmung erreicht jedoch nirgends den für Detailpunkte erster Ordnung zulässigen Fehlerwert von 0,1 mm.

6. Schlußfolgerungen

Nach dem Gesagten darf festgestellt werden, daß die zeitgemäßen kartographischen Ansprüche durch die digital gesteuerten, mit optischer Bildübertragung arbeitenden Orthophotoskope sowohl hinsichtlich der Bildgüte als auch der Genauigkeit befriedigt werden.

Da Orthophotokarten einen reichen Informationsgehalt haben und rasch hergestellt werden können, kann dieses Kartenherstellungsverfahren als eine der wirtschaftlichsten Methoden gelten.

Zusammenfassung

Der Entwicklung der orthophotoskopischen Geräte ist eine höhere Wirtschaftlichkeit und größere Genauigkeit derselben zu verdanken. Im Beitrag werden die bei der Anwendung des Verfahrens vorkommenden Fehler zusammenfassend analysiert, die Fehlerquellen werden aufgezeigt, und es wird darauf hingewiesen, wie die Fehler vermindert werden können.

Literatur

1. FÖRSTNER, R.: Das Orthophoto, seine Herstellung, Genauigkeit und weitere Verwendung. Bildmessung und Luftbildwesen (2) 1967.
2. GEBRY, J.: Einheimische Anwendungsmöglichkeiten der Orthophotoskopie.* Geodézia és Kartográfia, 1971.
3. HOBBIÉ, D.: Zur Verfahrensdisposition bei differentieller Entzerrung von photogrammetrischen Luftbildern. Bayerische Akademie, München 1974.
4. ОТЕПКА, Г.—ДУСХАНЕК, Е.: Empirische Genauigkeitsuntersuchung von Orthophotos. Geowiss. Mitteilungen der TU Wien 13. 1978.
5. UGRIN, N.: Entzerrung linienförmiger Bildelemente auf Orthophotoskopen Wild.* Geodézia és Kartográfia, 1, 1979.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Dr. Nándor UGRIN, H-1521 Budapest

* In ungarischer Sprache