

Vergleich von Verfahren zur Dammprofilmessung

Dr. habil. K. Baganz, KDT, Forschungszentrum für Mechanisierung der Landwirtschaft Schlieben/Bornim der AdL der DDR
Dr.-Ing. K. Regensburger, KDT, Technische Universität Dresden, Sektion Geodäsie und Kartographie

1. Aufgabenstellung

Die Ermittlung der Bearbeitungsprofile von Landmaschinen, wie Schnittprofile, Ablageprofile u. a., ist für die Beurteilung der Arbeitsergebnisse qualitativ und in vielen Fällen auch quantitativ von Interesse. So beeinflusst z. B. die Genauigkeit der Dammprofil- bzw. Aufnahmeprofilmessungen wesentlich die Aussagekraft von Messungen über die Erdbabsiebleistungen von Kartoffelerntemaschinen.

Die „klassische“ Methode für die Messung von Damm- und Aufnahmeprofilen besteht in der Messung des vertikalen Abstands der Ober- und Unterkante der Profilfläche von einer darüber fixierten Latte in gleichmäßigen Abständen mit einem Gliedermaßstab. Bekannte Modifikationen, wie Anwendung eines Pantografen oder einer „Stabharte“ in Verbindung mit fotografischen Aufnahmen [1, 2, 3], konnten sich bisher nicht als Standardverfahren durchsetzen. Da die fotografischen Verfahren hinsichtlich des Zeitaufwands bei der Aufnahme anderen Methoden überlegen sind, scheinen Untersuchungen über Genauigkeit und Gesamtaufwand dieser Verfahren sowie ein Vergleich mit dem exakteren fotogrammetrischen Verfahren angebracht.

2. Versuchsdurchführung

2.1. Versuchsbedingungen

Die Messungen wurden an Rodeprofilen des Kartoffelsammelroders E665 auf sandigem Lehmboden (LPG „Vorgebirge“ Bannewitz, Bezirk Dresden) durchgeführt. Durch geeignete Fahrweise waren die Meßprofile nicht durch Räder der Erntemaschine oder des Transportfahrzeugs beeinflusst. Im Abstand von 1,0 m wurden jeweils 10 Profile der 2 gerodeten Reihen fixiert, die zu einem Legemaschinendurchgang gehörten. Der Profilgrund wurde mit Handspaten freigelegt, und für die fotografischen Aufnahmen wurden Profilgrund und Oberkante des abgesiebten Bodens durch angefeuchtete weiße Perlonschnüre (Durchmesser rd. 5 mm) markiert. In die Auswertung wurden 20 auf diese Weise vorbereitete Profile (Breite rd. 1,5 m, Höhe rd. 0,15 m) einbezogen.

2.2. Aufnahme- bzw. Meßverfahren

Als Aufnahmegerät für das fotogrammetrische Verfahren fand die Universalmeßkammer UMK 10/1318 des Kombinates VEB Carl Zeiss JENA mit einem Weitwinkelobjektiv (Brennweite 99 mm) Verwendung (Bild 1). Die vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen ermöglichen es in Verbindung mit den übrigen Objektbedingungen, 5 Profile mit einer Aufnahme zu erfassen, wobei das vorderste Profil 2,4 m von der Kammer (Instrumentenhöhe 1,6 m) entfernt war (Abstimmfernung: 4,2 m, Blende 22). Als Fotomaterial wurden ORWO-FU-2-Platten (13 cm × 18 cm, Empfindlichkeit 10 DIN) benutzt. Mit Hilfe der Orientierungs- vorrichtung der Universalmeßkammer war die Aufnahmeachse rechtwinklig zu den Profilachsen und horizontal ausgerichtet worden. Die Profilabstände wurden mit einem Stahlmeß-

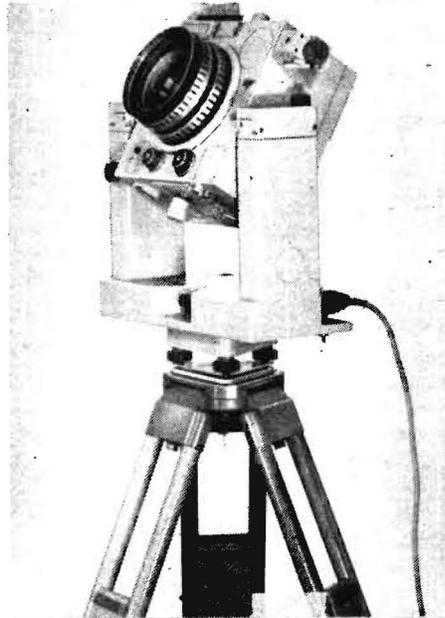


Bild 1. Universalmeßkammer UMK 10/1318 des VEB Carl Zeiss JENA

band vermessen. Zur Ableitung des Bildmaßstabs war im 1. und 5. Profil je eine Nivellierlatte horizontal angeordnet (Bild 2).

Die Kleinbildkamera Exakta RTL 1000 des VEB Pentacon Dresden mit einem Objektiv von 50 mm Brennweite wurde zu dem fotografischen Aufnahmeverfahren eingesetzt. Jedes Profil wurde einzeln aus einer Entfernung von 3,5 m bei einer Kamerahöhe von 0,8 m aufgenommen. Horizontale und vertikale Meßplatten wurden zu Korrekturzwecken in den Bildausschnitten mit erfaßt. Als Fotomaterial fand handelsüblicher Schwarzweiß-Kleinbildfilm 24 mm × 36 mm (Empfindlichkeit 20 DIN) Verwendung.

Als „klassisches“ Verfahren wurde die sog. „Zollstockmethode“ eingesetzt. Von einer über dem Profil angeordneten horizontalen Meßlatte mit 37,5-mm-Teilung (Reihenabstand der Dämme 750 mm) wurde mit einem Gliedermaßstab für jede Abszisse die Ordinate (jeweils Profilerkante und Profilunterkante) gemessen, wobei die Millimeter geschätzt angegeben wurden. Eine zweite Arbeitskraft führte das vorbereitete Meßprotokoll.

2.3. Auswerteverfahren

Die fotogrammetrisch mit der Meßkammer aufgenommenen Bilder wurden sowohl numerisch als auch analog ausgewertet. Beim numerischen Verfahren erfolgte die Messung der Bildkoordinaten der Knick- und Zwischenpunkte entlang der Ober- und Unterkante der Profile mit dem Präzisionsstereokomparator Stecometer des Kombinates VEB Carl Zeiss JENA (Bild 3). Die Meßwerte wurden automatisch auf Lochstreifen ausgegeben und im Off-line-Betrieb an der EDVA BESM-6 rech-



Bild 2. Meßbild der Meßkammer; im unteren Bildteil die durch feuchte Perlonchnüre gekennzeichneten 5 Profile sowie Meßpfähle und Nivellierlatte, im Hintergrund Gegenpunkt zur horizontalen Kameraeinrichtung

nerisch weiterverarbeitet. Hierzu wurde das ALGOL-Programm FLA 3 aufgestellt [4]. Mit seiner Hilfe sind folgende Aufgaben zu lösen:

- Ermittlung der Bildkoordinaten aus den Meßwerten
- Ermittlung des Bildmaßstabs aus dem Streckenvergleich mit den aufgenommenen Meßplatten und Interpolation für die übrigen Profile
- Berechnung der Aufnahmeentfernung zu den einzelnen Meßpunkten und ihrer Objektkoordinaten
- Ermittlung des Inhalts der ebenen, vertikalen Profilflächen nach der Gaußschen Flächenformel.

Zur Erfassung des Profilverlaufs würden durchschnittlich 100 Punkte je Profil benötigt.

Die Analogauswertung erfolgte unter Verwendung des Entzerrungsgeräts SEG I des Kombinates VEB Carl Zeiss JENA. Hierbei wurden die jeweils 3 vorderen Profile auf den Maßstab 1:10 und die beiden hinteren Profile in jedem Bild auf den Maßstab 1:15 (Grenze des Vergrößerungsbereichs des SEG I) vergrößert und fotografisch festgehalten.

Zur Kontrolle des Papierschrumpfes wurde ein Gitternetz einkopiert. Die Flächenbestimmung erfolgte durch mehrfache Messung mit Planimeter und anschließende Berücksichtigung des Papierverzugs.

Die Aufnahmen der Kleinbildkamera wurden durch normale Vergrößerung auf den Maßstab 1:10 gegenüber dem Original gebracht. Die Auswertung erfolgte einmal durch Planimetrie analog den Bildern der Meßkammer, zum anderen durch Messen der Ordinaten auf den

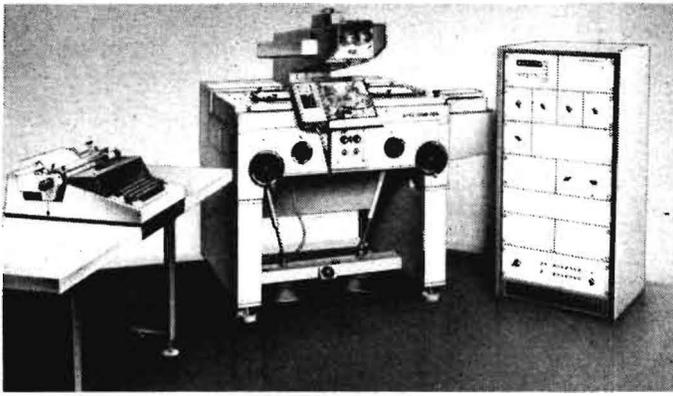


Bild 3. Stereokomparator Stecometer des VEB Carl Zeiss JENA

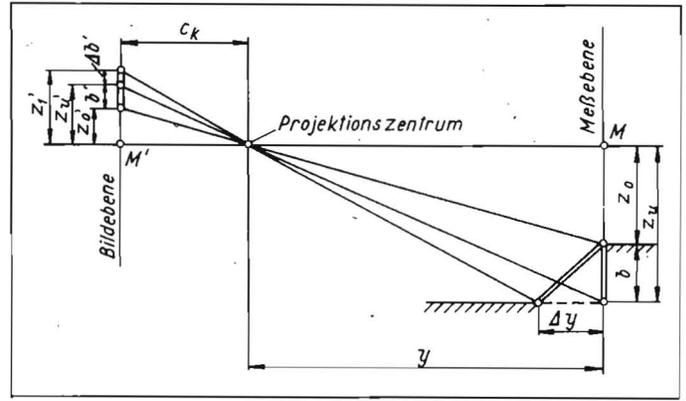


Bild 4. Schema zur Berechnung der „Schrägenkorrektur“ durch Böschungswinkel des freigelegten Profils

Bildern analog der Zöllstockmethode. Bei der Ordinatenmessung wurde die Flächenbestimmung getrennt nach der Trapezmethode und nach der Simpson-Regel durchgeführt, wobei für beide Verfahren eine Abszisseinteilung sowohl von 37,5 mm als auch von 75,0 mm im Original zugrunde gelegt wurde. Die Flächenberechnung beim Zöllstockverfahren erfolgte analog zu der vorstehend geschilderten Auswertung für Kleinbildkamera mit Ordinatenmessung.

Bei der Freilegung des Profils trat durch den Böschungswinkel eine Abstandsdifferenz in Aufnahmeorientierung zwischen Profilerkante und -unterkante auf. Bei den fotografischen Verfahren ohne Entzerrung wurde dieser Sachverhalt durch eine zusätzliche Korrekturrechnung (Schrägeneinfluß) berücksichtigt (Bild 4).

Hat die Unterkante der senkrechten Objektstrecke b den Abstand $b_0 \rightarrow z_u$ von der waagerechten optischen Achse der Kamera mit der Bildweite c_k (näherungsweise die Brennweite) und der Aufnahmeentfernung y , so wird mit dem Abbildungsmaßstab

$$m_b = \frac{y}{c_k} \quad (1)$$

die Strecke b im Bild abgebildet als

$$b' = z_u' - z_o' = \frac{b}{m_b} \quad (2)$$

Ist die Profilerkante um Δy in Richtung zur

Kamera vorgerückt, wird die Strecke b zu groß abgebildet um

$$\begin{aligned} \Delta b' &= z_1' - z_u' = \left(\frac{z_o + b}{y - \Delta y} - \frac{z_o + b}{y} \right) c_k \\ &= \frac{\Delta y (z_o + b)}{m_b (y - \Delta y)} \end{aligned}$$

und für $y \gg \Delta y$ mit $y \approx y - \Delta y$

$$\Delta b' = \frac{\Delta y (z_o + b)}{m_b^2 c_k} = \frac{\Delta y}{y} z_u' \quad (3)$$

Daraus folgt der relative Fehler für die Profilhöhen b' im Bild:

$$\frac{\Delta b'}{b'} = \frac{\Delta y}{m_b c_k} \frac{z_o + b}{b} = \frac{\Delta y}{y} \frac{z_u'}{b'} \quad (4)$$

3. Versuchsergebnisse und Diskussion

Das numerische fotogrammetrische Verfahren unter Verwendung der Universalmeßkammer UMK 10/1318 und des Stecometers läßt auch nach einer Kontrolle aufgrund der realen Meßbedingungen keine größeren Meßfehler (Variationskoeffizient) als $s\% = 0,5\%$ erwarten. Es dient daher für alle anderen Verfahren als Standard, d. h. die mit Meßkammer und Stecometer ermittelten Flächen, gelten als fehlerfrei (Tafel 1).

Für Vergleiche wurde mit folgendem Verfahren gearbeitet:

- paarweiser t-Test zur Ermittlung von Mittelwertdifferenzen zwischen betrachteten Verfahren und Standard
- Spearman'sche Rangkorrelation und Bestimmtheitsmaß der linearen Regression zur Beurteilung der „gleichartigen Einstufung“
- Varianzanalyse u. a. zu speziellen Fragen.

Die varianzanalytische Untersuchung ergab weder für die beiden untersuchten Abszisseinteilungen (37,5 mm, 75,0 mm) noch für die Integrationsnäherungen (Trapezmethode, Simpson-Regel) unter den Versuchsbedingungen signifikante Unterschiede, wenn auch die Mittelwerte der Trapezmethode um 0,3% unter den nach der Simpson-Regel berechneten Werten lagen. Deshalb wurde im folgenden für die Ordinatenmessungen jeweils der Mittelwert von allen 4 Varianten benutzt und für Aufwandsbetrachtungen die einfachste Methode (Abszisseinteilung 75,0 mm, Trapezmethode) zugrunde gelegt.

Die Zöllstockmethode brachte eine um durchschnittlich 4% zu kleine Fläche. Dieses Ergebnis ist angesichts der einfachen Meßmethode im Vergleich zu den fotografischen und analogen fotogrammetrischen Verfahren zunächst positiv zu werten. Allerdings zeigen die Korrelationswerte und die Standardabweichung, daß dieses relativ günstige Ergebnis auf dem Ausgleich starker Abweichungen der Einzelwerte aufbaut.

Das Verfahren dürfte daher zur genauen Bestimmung einzelner Profile in der angewendeten Form nicht ausreichen. Das gegenüber den Ist-Flächen zu kleine Gesamtergebnis wäre durch tieferes Maßstabansetzen sowie Schrägstellung des Maßstabs bei der Messung der Profilerkante zu deuten.

Eine Analyse des fotogrammetrischen bzw. fotografischen Verfahrens zeigt den großen Einfluß der Profilschräge auf die mit diesen Verfahren ermittelten Flächen infolge der zentralperspektiven Abbildung. Bei Verwendung der Universalmeßkammer und einer mittleren Schräge im Versuch von $\Delta y = 50$ mm wurde das vorderste Profil (Aufnahmeentfernung $y = 2400$ mm) durchschnittlich um 18% und das hinterste Profil ($y = 6400$ mm) noch um 8% zu groß abgebildet.

Die exakte Horizontierung der Aufnahmeachse und die bekannten geometrischen Größen der Meßkammer ermöglichen jedoch eine vollständige Korrektur dieses Fehlereinflusses. Für die niedriger aufgestellte Kleinbildkamera, deren Horizontallage nicht so sorgfältig eingerichtet werden konnte, wurde durch Auswertung der Profillagen zu den Aufnahmeachsen in den einzelnen Bildern durchschnittlich

Tafel 1. Vergleich der Meßwerte verschiedener Verfahren zum Standardverfahren (Meßkammer, Stecometer: $\bar{x} \pm s_x = 1074,1 \pm 127,7 \text{ cm}^2$)

Verfahren	$\bar{x}^{(2)}$ \bar{x}_o	Mittelwertdifferenz $\bar{d} \pm s_d$ cm^2	Rangkorrelationskoeffizient r_s	Bestimmtheitsmaß B
Zöllstock	0,96	- 78,0 ± 86,3 ¹⁾	0,64	0,55
Kleinbild, Ordinaten ohne Schrägenkorrektur	1,12	136,6 ± 65,2 ¹⁾	0,89	0,74
Kleinbild, Ordinaten mit Schrägenkorrektur	1,07	74,8 ± 62,7 ¹⁾	0,87	0,74
Kleinbild, Planimeter ohne Schrägenkorrektur	1,12	139,6 ± 67,8 ¹⁾	0,89	0,70
Kleinbild, Planimeter mit Schrägenkorrektur	1,07	75,7 ± 64,6 ¹⁾	0,90	0,71
Meßkammer, Planimeter ohne Schrägenkorrektur	1,26	397,0 ± 170,8 ¹⁾	0,57	0,27
Meßkammer, Planimeter mit Schrägenkorrektur	1,00	4,1 ± 39,9	0,90	0,88

1) Differenz gegenüber Standard bei $\alpha = 5\%$ Fehler 1. Art (Irrtumswahrscheinlichkeit) gesichert
2) Mittelwert relativ zum Standard

eine Vergrößerung der abgebildeten Fläche um 5% und als Maximum von 12,5% nachgewiesen.

Auch unter Einbeziehung einer Näherungskorrektur des Einflusses der Profilschrägen lagen die mit der Kleinbildkamera erzielten mittleren Werte noch um 6,7% über denen der Meßkammer. Das zeigt, daß noch nicht alle Fehlereinflüsse des einfacheren Aufnahme- und Auswertverfahrens erfaßt wurden.

Ein Vergleich von Planimeter- und Ordinatenauswertung der fotografisch ermittelten Profillflächen ergibt keine wesentlichen Unterschiede in der Genauigkeit der Flächenermittlung, wenn eine hinreichende Arbeitserfahrung mit dem Polarplanimeter vorliegt. Das Bestimmtheitsmaß zwischen Ordinaten- und Planimeterauswertung liegt um 0,90.

Werden die Verfahren vom Arbeitsaufwand her betrachtet, so erfordert das genaueste Verfahren — das numerische fotogrammetrische Verfahren mit Meßkammer und Stecometer — auch den höchsten Aufwand (Tafel 2). Für die Feldmessungen sind hier in jedem Fall 2 Arbeitskräfte zweckmäßig. Eine Meßkammer steht in landtechnischen Einrichtungen meistens nicht zur Verfügung, das Stecometer müßte aufgrund der relativ hohen Anschaffungskosten ebenfalls in anderen Einrichtungen mitgenutzt werden. Die richtige Anwendung des Verfahrens erfordert für den Landtechniker zumindest eine fachkundige Anleitung. Aufnahmen mit der Kleinbildkamera sind auf dem Feld durch eine Arbeitskraft zu realisieren, d. h. die gesamte Profilbestimmung auf dem Feld kann durch eine Person erfolgen. Das Risiko des vollständigen oder teilweisen Informationsverlustes durch Fehler im Aufnahmeapparat oder beim Entwicklungsvorgang muß aber einkalkuliert werden.

Für die Zollstockmessung ergeben sich die geringsten Aufwendungen und eine sofortige Verfügbarkeit der Meßergebnisse nach der Profilmessung. Allerdings sind — wenn akustische Aufzeichnungsgeräte außer Betracht gelassen werden — wie bei allen Ordinatenmessungen zwei Arbeitskräfte für eine zügige Arbeit (Ansager und Schreiber) erforderlich.

Bei einem Vergleich der Verfahren müssen notwendige Genauigkeiten für den Anwendungsfall und entstehender Aufwand als Auswahlkriterien benutzt werden. Für zahlreiche Messungen zur Bestimmung von Durch-

Tafel 2. Vergleich des Arbeitsaufwandes für verschiedene Verfahren bei der Bestimmung von 10 Dammprofilen mit einer Breite von 1,5 m

Verfahren	Aufwand auf dem Feld AKmin	Auswertaufwand AKmin	Gesamtaufwand AKmin
Zollstock (7,5-cm-Teilung)	210 (2) ¹⁾	30	240
Kleinbild, Ordinaten (7,5-cm-Teilung)	165	105 (2)	270 (+ 40 Foto)
Kleinbild, Planimeter	165	75	240 (+ 40 Foto)
Meßkammer, Planimeter	180 (2)	75	255 (+ 60 Foto)
Meßkammer, Stecometer	180 (2)	180	360 (+ 20 Foto + 40,— M EDV-Kosten)

1) (2) zwei Arbeitskräfte

schnittswerten bietet die Zollstockmethode eine vertretbare Genauigkeit bei relativ geringem Aufwand und geringen Qualifikationsansprüchen. Für Kartoffeldämme erwiesen sich ein Meßintervall von 75 mm und die Auswertung nach der Trapezmethode als ausreichend. Die Anwendung fotografischer Verfahren erfordert in jedem Fall besondere Aufmerksamkeit, um Meßfehler durch Verzerrungen verschiedenster Art zu vermeiden. Bei Anwendung der Kleinbildkamera wird der Fehler von 5 bis 7% nur bei sehr sorgfältiger Arbeit zu verkleinern sein. Horizontale Aufnahmeachse und zusätzliche Messung der Werte für den Schrägenausgleich sind hier Voraussetzung. Für die Auswertung ist dann bei hinreichender Arbeitserfahrung das Planimetrieren die günstigste Methode.

Die Anwendung der Meßkammer mit Stecometerauswertung wird durch Verfügbarkeit, notwendige Spezialkenntnisse und Aufwand auf Sondermessungen beschränkt bleiben, bei denen von jeder einzelnen Profilmessung Genauigkeiten um 1% verlangt werden.

Die vorhandenen Meßreihen ermöglichen neben den Aussagen zum Verfahrensvergleich auch Abschätzungen über die Veränderung der Rodeprofile in der Reihe (Abstand 1 m) und in benachbarten Reihen. So betrug das Aufnahmeprofil in der ersten Meßdurchfahrt $\bar{x} \pm s_x = 1068,31 \pm 107,0 \text{ cm}^2$, in der zweiten, die aus einer anderen Legemaschinendurchfahrt in 4,5 m Abstand stammte, $\bar{x} \pm s_x = 1201,4 \pm 72,7 \text{ cm}^2$. Während die signifikante Mittelwertdifferenz beider Durchfahrten 12,5% betrug, lag der Variations-

koeffizient in der Reihe auf 10 m bei 6 bis 10%.

4. Zusammenfassung

Aufgrund eines Vergleichs verschiedener Meßverfahren zur Profilaufnahme werden Aussagen zur Genauigkeit und zum Arbeitsaufwand gemacht. Die üblichen Meßverfahren wiesen Bestimmungsfehler in der Größe von 4 bis 7% auf. Bei fotografischen Verfahren müssen Fehlereinflüsse durch Verzerrungen infolge Schräglage der Profile besonders beachtet werden. Die untersuchten Meßprofile wiesen einen Mittelwertunterschied von 12,5% zwischen den Maschinendurchfahrten auf, während der Variationskoeffizient in der Reihe um 8% lag.

Literatur

- [1] Bailey, P.: An Investigation into the Distribution of Potatoes in the Rigde. *Journal of Agricultural Engineering Research* 2 (1957) H. 2, S. 146—151.
- [2] Bialojan, G.: Ein Verfahren zur Ermittlung der Lage rodefähiger Kartoffeln im Damm. *agrartechnik* 10 (1960) H. 9, S. 427—428.
- [3] Thaer, R.: Über Häufelwerkzeuge für den Kartoffelbau. *Landbauforschung Völkenrode* (1958) H. 2, S. 27.
- [4] Regensburger, K.; Brusckke, B.: Programm FLA 3 (ALGOL) zur Berechnung der ebenen Flächen von Kartoffeldämmen, Programmbeschreibungen. TU Dresden, Sektion Geodäsie und Kartographie, 1980.

A 3196

Hinweis für unsere Leser im Ausland

Wir bitten alle Bezieher unserer Zeitschrift außerhalb der DDR, die Erneuerung der Abonnements für das Jahr 1982 rechtzeitig vorzunehmen.

Die Zeitungsvertriebsstellen Ihres Landes finden Sie auf Seite 524.

Redaktion agrartechnik