

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 80 (1982)

Heft: 12

Artikel: Rechnergestützte, photogrammetrische Erfassung von Geländedaten

Autor: Leupin, M. / Parsic, Z. / Rüedin, B.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-231188>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.02.2025

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

Rechnergestützte, photogrammetrische Erfassung von Geländedaten

M. Leupin, Z. Parsic, B. Rüedin, R. Schneeberger

Das Interesse an der Erfassung von Geländedaten in digitaler Form nimmt in letzter Zeit zu. Die Photogrammetrie leistet dabei einen wichtigen Beitrag; dabei stehen Fragen der optimalen Höhendarstellung im Vordergrund. Ausgehend von den besonderen Anforderungen der Datenverarbeitung, wird versucht, ein digitales Höhenmodell zu beschreiben, welches bei hoher absoluter Genauigkeit dem direkt ausgewerteten Höhenkurvenbild sehr nahe kommt.

La saisie de données topographiques en forme numérique devient de plus en plus importante en vue d'une cartographie automatisée. Entre autres, la photogrammétrie s'intéresse particulièrement à la question d'un modèle d'élévation numérique optimal. Cette contribution essaye de décrire un tel modèle en tenant compte des exigences particulières de l'informatique. Ce modèle devra aussi se comparer favorablement aux courbes de niveau originales tout en gardant une haute précision absolue.

1. Einleitung

Ähnlich wie in anderen Disziplinen gewinnen rechnergestützte Verfahren auch in der Photogrammetrie laufend an Bedeutung und sind heute kaum mehr wegzudenken. Untersucht man die Forschungsanstrengungen der letzten 10 bis 15 Jahre, so stellt man fest, dass die Orientierungs- und Punktbestimmungsverfahren (Aerotriangulation) einen gewichtigeren Platz eingenommen haben. In neuerer Zeit hat sich der Schwerpunkt mehr zu Fragen der Qualitätskontrolle (grobe Fehlersuche, Online-Aerotriangulation) hin verschoben. Daneben hat der Problembereich «Digitales Geländemodell» (DGM) die Photogrammetrie seit geraumer Zeit beschäftigt, wobei insbesondere das digitale Höhenmodell (DHM) in den Brennpunkt gerückt ist. Dieses Interesse teilen sie mit einer Vielzahl von Fachleuten anderer Disziplinen, allen voran Kartographen, Geographen, Morphologen und anderen.

Die Photogrammetrie als dreidimensionale Erfassungsmethode ist bei weitem der wichtigste Zulieferer von DGM's, zumindest, was Neuaufnahmen anbelangt. Daher ist ein Interesse sicher legitimiert. Dies gilt umso mehr, als sich gezeigt hat, dass das digitale Geländemodell mathematische, kartographische und organisatorische Probleme aufwirft, die letztlich nur in Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Disziplinen angegangen und gelöst werden können. Überschneidungen lassen sich dabei kaum vermeiden und sind letztlich der Sache sicher auch nicht abträglich.

Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich, Separata Nr. 42

Das Gelände lässt sich leider nicht leicht in geschlossene mathematische Formeln packen; diese Tatsache zeigt sich schon am folgenden Beispiel:

Wendet man auf einen unregelmässigen, wenig dichten Geländepunkthaufen zwei verschiedene Höhenkurven-Interpolationsprogramme an, so ist es oft erstaunlich, wie verschieden das Kurvenbild aussehen kann. Diese sowie kartographische Probleme in der Generalisierung haben bewirkt, dass man sich wieder vermehrt mit der eigentlichen Erfassung der Geländedaten abgibt, in der Meinung, dass bei der Erfassung die wesentlichen Parameter festgelegt werden können. Dabei ist es wichtig, zu sehen, dass der Begriff «Güte» immer davon abhängt, für welche spezifischen Anwendungen und Berechnungen das DGM zugezogen werden soll. In diesem Sinne wird es ein universales DGM nie geben.

Die vorliegenden Untersuchungen beschränken sich bewusst auf grössere und mittlere Massstäbe bis etwa 1:10 000, wobei natürlich gewisse Erkenntnisse auch für kleinere Massstäbe Gültigkeit haben.

2. Höhenkurven und reguläres Gitter

Vom kartographischen Standpunkt aus gibt es kaum etwas besseres als die Höhenkurve, um das Gelände in der dritten Dimension darzustellen. In der Tat vereinigt die Höhenkurve viele Vorteile, unter anderem die Fähigkeit, feinste morphologische Details zur Geltung zu bringen. Wo daher im Endprodukt (Karte, Plan) Wert auf ein «gutes» Höhenkurvenbild gelegt wird, ist die von einem topographisch geschulten Photogrammetrie-Operator ausgewertete (und gleichzeitig digitalisierte) Hö-

henkurve nach wie vor schwer durch andere Methoden zu erreichen. Wie «gut» die Kurven in einem absoluten Genauigkeitsmass dann sind und wie vollständig sie Kleinformen zwischen den Kurven darstellen, ist eine zweite Frage, womit gleichzeitig der schwache Punkt der Höhenkurven angesprochen ist: Eine Höhenkurve vereinigt viel Information in nur einer Richtung, zwischen den Kurven fehlt diese Information fast gänzlich.

Sollen daher mit den Höhendaten Berechnungen (etwa Volumenbestimmungen) durchgeführt werden, so erweist sich die Höhenkurvendarstellung verglichen mit einem regelmässigen Gitter (mit Bruchkanten) nicht unbedingt als bessere Methode. Da zudem Höhendaten in meist sehr grossen Mengen anfallen, spielen organisatorische Aspekte des Datenzugriffs und der Datenspeicherung eine wichtige Rolle. Mehrere Autoren (siehe Yoeli [8] u. a.) haben schon darauf hingewiesen, dass in dieser Hinsicht das regelmässige Gitter die optimale Lösung darstellt. Die neueste Rechnertechnologie stellt zudem mit schnellen Parallelrechnern (Array-Prozessoren) ein Mittel zur Verfügung, welches erlaubt, auch bei extrem vielen Gitterpunkten noch brauchbare Rechenzeiten zu bekommen.

Eine endgültige Antwort für die eine oder andere Darstellungsart kann trotzdem nicht gegeben werden. Diese wird von den Applikationen bestimmt werden, die man mit der Höheninformation vorhat. Es wird im allgemeinen auch nicht einfach sein, Höhenkurven aus dem Gitter und regelmässige Gitter aus Höhenkurven zu berechnen, ohne an Information und Genauigkeit zu verlieren.

Ziel der vorliegenden Untersuchung kann es deshalb nicht sein, sich definitiv für die eine oder andere Darstellungsart zu entscheiden. Es soll vielmehr versucht werden, die beiden bis zu einem gewissen Grad in Einklang zu bringen. Zu diesem Zweck wird die Geländeerfassung in Gitterform näher untersucht, da sie von den beiden Methoden die jüngere und damit auch die weniger bekannte ist.

3. Optimale Gitterdichte

Eine Gitterdichte könnte dann optimal genannt werden, wenn jeder beliebige Geländepunkt durch lineare (oder höhere) Interpolation so bestimmt werden kann, dass seine Höhe nur unwesent-

lich von der wahren Höhe abweicht. Insbesondere sollte es damit auch möglich sein, aus diesem Gitter ein Höhenkurvenbild abzuleiten, welches den direkt ausgezogenen Höhenlinien ebenbürtig ist.

Es stellt sich nun bald einmal heraus, dass dieses Ziel nicht mit einem uniformen Gitter erreicht werden kann, es sei denn, man nehme eine extrem hohe Dichte mit entsprechender Punktzahl in Kauf. Wünschenswerter wäre dagegen eine dynamische Methode, welche die Punktdichte dem Gelände anpasst. Makarovič [4] hat als einer der ersten diesen Gedanken aufgegriffen und die Methode «progressive sampling» (neuerdings «progressive composite sampling») genannt.

Der Photogrammetrie-Operateur, der Geländehöhen digital erfassen muss, sollte aber schon zu Beginn der Arbeit wissen

- wie dicht das Basisgitter zu dimensionieren ist,
- wann das Basisgitter durch zusätzliche Zwischengitter zu verdichten ist.

Diese Entscheidung ist möglichst objektiv zu fällen, obschon gewisse Erfahrungswerte berücksichtigt werden können. Der Prozess darf nicht viel Zeit in Anspruch nehmen, da er in der Zeit stattfinden muss, während der das Modell im Auswertegerät orientiert ist. Dafür kommen nur interaktive Methoden der computergestützten Photogrammetrie in Frage, wobei in dieser Hinsicht (wie später noch gezeigt werden wird) der analytische Plotter wesentliche Vorteile aufweist.

4. Interaktive Bestimmung der Gitterdichte

Der Versuch, die Geländeoberfläche mathematisch darzustellen, führt zur Notwendigkeit, ein Modell anzunehmen. Man wird danach trachten, letzteres nicht allzu kompliziert werden zu lassen, obgleich man hierdurch eine mehr oder weniger grobe Idealisierung einführt. An dieser Schwierigkeit sind bisher alle Bemühungen gescheitert, die Geländeoberfläche mathematisch geschlossen darzustellen.

Trotzdem haben aber solche Modelle ihre Daseinsberechtigung, lassen sich doch damit bis zu einem gewissen Grad charakteristische Geländeparameter erfassen und auswerten. Im vorliegenden Fall geht es um Verfahren zur Ermittlung der Stützpunktdichte, die ein höheres Mass an Objektivität und Zuverlässigkeit bieten soll als die Erfahrung oder der Vergleich mit der Höhenkurvendarstellung. Solche Verfahren sollen zudem der Forderung nach einem möglichst geringen Testaufwand Rechnung tragen, sollen sie später für den praktischen Einsatz zum Zuge

kommen. Da zudem sämtliche Berechnungen interaktiv stattfinden, muss auf die Leistungsfähigkeit des Computers Rücksicht genommen werden.

Mehrere Autoren haben sich in letzter Zeit intensiv mit dem Problem der optimalen Stützpunktdichte in einem digitalen Geländemodell beschäftigt (Makarovič [4], Ayeni [1], Frederiksen/Jacobi/Justesen [3], Rüdener [5] u.a.). Hält man jedoch die Forderungen nach rechentechnisch einfachen und im Testaufwand beschränkten Verfahren aufrecht, so schrumpft die Liste auf eine bis drei Methoden zusammen, von denen hier diejenigen von Rüdener [5] und Frederiksen/Jacobi [2] näher betrachtet werden sollen.

4.1 Bestimmung des Basisgitters

Im orientierten photogrammetrischen Modell wird ein genügend langes Profil registriert, welches möglichst durch ein für das Modell charakteristisches Gelände gelegt werden sollte. Die (regelmässige) Stützpunktdichte ist dabei so eng zu wählen, dass eine lineare Interpolation für Zwischenpunkte zu vernachlässigbaren Höhenfehlern führt. Da grundsätzlich Isotropie im Gelände nicht vorausgesetzt werden kann, wären theoretisch mindestens zwei solche Profile notwendig, womit der Testaufwand allerdings wieder stark zunehmen würde. Künstliche Punkte (Häuser usw.) sind dabei aus dem Profil auszuschliessen, da sie sonst die Geländecharakteristiken verfälschen.

Rüdener's Verfahren besteht nun in der schon in anderem Zusammenhang angewandten «Ausdünnung» des Profils, wie es in Abb. 1 dargestellt ist. Der mittlere Höhenfehler für einen vorgegebenen Profilverständnis berechnet sich aus den Differenzen d_{i+v} zwischen allen gemessenen Höhenwerten P_{i+n} des Profils und den Funktionswerten, welche aus der Teilmenge der Profilverständnis ermittelt werden, die den vorgegebenen Punktabstand besitzen. Dabei gilt nach Abb. 1 für

$$d_{i+v} = z_{i+n} - z_i - (z_{i+v} - z_i) \frac{x_{i+n} - x_i}{x_{i+v} - x_i} \quad (1)$$

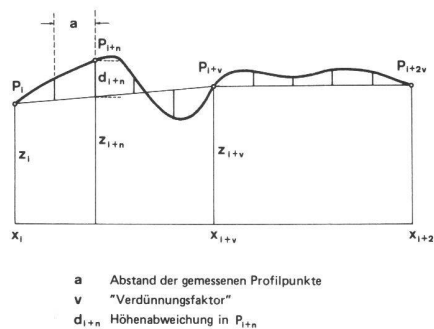


Abb. 1 Profilausdünnung mit linearer Interpolation

Rüdener hat aufgezeigt, dass im vorliegenden Fall eine lineare Interpolation keine schlechteren Ergebnisse bringt als eine Interpolation mit Spline-Polynomen.

Das Testprofil kann nun sukzessive «verdünnt» werden, wobei für jeden Durchgang ein mittlerer Höhenfehler berechnet wird, der dann einer Schranke gegenübergestellt werden kann.

Frederiksen/Jacobi/Justesen [3] gehen einen anderen Weg, der schon von Ayeni [1] begangen wurde, nämlich die Berechnung von Gelände-Leistungsspektren. Ohne hier im einzelnen auf die Theorie einzugehen (es wird auf die Originalartikel verwiesen), drückt das Leistungsspektrum eines Profils die Variationen im Gelände aus. Bezeichnet man mit L = Länge des Profils in m , n = Anzahl Stützpunkte im Profil, Δx = Stützpunktabstand, z_i = gemessene Höhe an der Stelle $i \cdot \Delta x$, weiter mit f die der Wellenlänge λ entsprechende Frequenz ($\lambda = \frac{1}{f}$), so drückt man das Leistungsspektrum $S(f)$ aus als

$$S(f) = L \cdot C_f^2 = L(A_f^2 + B_f^2) \quad (2)$$

mit

$$A_f = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n z_i \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{L} \cdot \Delta x \cdot i \cdot f\right)$$

$$B_f = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n z_i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot \Delta x \cdot i \cdot f\right)$$

Bezeichnet man weiterhin mit m_z^2 die Varianz der Messung der Profilverständnis, so kann die totale Standardabweichung geschrieben werden als

$$s_o^2 = m_z^2 + \sum_{\lambda=2}^{\infty} \frac{C_\lambda^2}{2 \cdot \Delta x} = m_z^2 + \sum_{\lambda=2}^{\infty} C_\lambda^2 \quad (3)$$

Das $\sum_{\lambda=2}^{\infty} C_\lambda^2$ aus (2) hängt vom Punktabstand Δx sowie vom Geländespektrum C_λ^2 ab. C_λ^2 wird summiert zwischen der Wellenlänge $2 \cdot \Delta x$ und der kleinstmöglichen Wellenlänge. Legt man beispielsweise ein regelmässiges Gitter mit $\Delta x (= \Delta y) = 10 m$ aus, so beeinflusst derjenige Teil des Geländespektrums die Schätzung der Standardabweichung, welcher sich zwischen den Wellenlängen von $2 \cdot \Delta x = 20 m$ und allen kleineren Wellenlängen befindet. Es lässt sich dann bei der Auswertung leicht bestimmen, von welchen Wellenlängen ein Beitrag an s_o^2 geliefert wird, und daraus kann dann auch der minimal notwendige Punktabstand abgeleitet werden.

4.2 Interaktive Verdichtung

Selten weist ein photogrammetrisches Modell eine homogene Geländestruktur oder zumindest gleichstrukturierte, aufteilbare Abschnitte auf. Legt man daher ein regelmässiges Gitter darüber, so

wird praktisch immer der Fall eintreten, dass an gewissen Stellen die Stützpunktdichte entweder zu hoch oder zu niedrig ist. Systematisch auf die höchste Dichte herunterzugehen wäre dabei die einfachste Lösung, würde man damit nicht einen hohen Messaufwand mit einer Unmenge unnötiger Punkte einhandeln. Steht daher wie beim analytischen Plotter ein «Closed-loop»-System zur Verfügung, so lässt sich eine progressive Verdichtung durchführen. Ausgehend von einem Basisgitter geringer Dichte kann, durch Abfragen bestimmter Kriterien, eine Gitterverdichtung gezielt gebietsweise erfolgen. Dies entspricht Makarovičs «progressive sampling».

Rüdenauer hat in seinen Untersuchungen nachgewiesen, dass die Geländekrümmung, berechnet aus drei sukzessiven Gitterpunkten in x- oder y-Richtung, das geeignetste Kriterium für die Bestimmung der Punktedichte ist. Sie lässt sich berechnen als

$$K = z_2 - z_1 - (z_3 - z_1) \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_1} \quad (4)$$

wenn z_1, z_2, z_3 die Höhen in P_1, P_2, P_3 und x_1, x_2, x_3 die entsprechenden x- (resp. y)-Koordinaten bezeichnen.

Eine On-line-Lösung am analytischen Plotter vollzieht sich demnach nach folgendem Schema:

1. Bestimmung der Basisgittermaschenweite mittels Messung eines Testprofils.
2. Messung des Basisgitters.
3. Berechnung aller Krümmungswerte (aus je 3 sukzessiven Punkten) in x und y und Abfragen einer Schranke.
4. Automatisches Anfahren an die zu messenden Stellen (Halbierung der Maschenweite).
5. Berechnung aller Krümmungswerte der neu gemessenen Punkte und allenfalls Viertelung des Basisrasters mit automatischem Anfahren.

Bruchkanten sind separat zu erfassen und dürfen keinesfalls für Krümmungsberechnungen zugezogen werden. In Paragraph 6 wird ein Beispiel gegeben, welches mit diesem Erfassungsschema bearbeitet worden ist.

5. Software-Aspekte

In bewegter Topographie führt das Abfahren eines photogrammetrischen Modells schnell einmal zu 30 000 und mehr Gitterpunkten. Es ist daher unerlässlich, effiziente Algorithmen zu entwickeln und die Datenablage gut zu organisieren, will man nicht grosse Schwierigkeiten riskieren. In den meisten Fällen wird man daher mit leistungsfähigen Rechnern arbeiten müssen. Dabei gilt es, die Arbeitsprozesse *Datenerfassung* (am Auswertegerät) und *Daten-Editierung* auseinanderzuhalten.

Bei der *Datenerfassung* registriert der Operateur am Auswertegerät die Daten, unterstützt von einem Mini-Rechner, welcher dem Operateur bis zu einem gewissen Grad eine interaktive Editierung erlaubt. Das Zusammenfügen der Modelle, das Anbringen kosmetischer Korrekturen sowie das Einsetzen der Beschriftung bleibt dagegen der eigentlichen *Daten-Editierung* vorbehalten. Hier muss wegen der grösseren Datenmenge ein leistungsfähiger Computer vorliegen, mit Vorteil unterstützt von einem interaktiv-graphischen System (IGS). Die Konfiguration an der ETHZ, die in dieser Zeitschrift schon vorgestellt wurde (Schmid [6]), kommt dieser Idealvorstellung ziemlich nahe (Abb. 2).

Eine solche Konfiguration muss, um effizient eingesetzt zu werden, von entsprechender Software unterstützt sein. Diese Programmpakete sollen deshalb hier kurz erwähnt werden, wobei der Schwerpunkt bei derjenigen Software liegen soll, die im Zusammenhang mit der Höherfassung eine besondere Rolle spielt:

In Entwicklung befindet sich zur Zeit das Programm GITTER, welches für digitale Höhenmodelle in Gitterform konzipiert wurde. Um den Ansprüchen des «progressive sampling» gerecht zu werden, ist eine zweifache Verdichtung möglich, welche die jeweilige Maschenweite halbiert (Abb. 3).

Grundsätzlich handelt es sich um drei unabhängige Gitter, die bei Bedarf

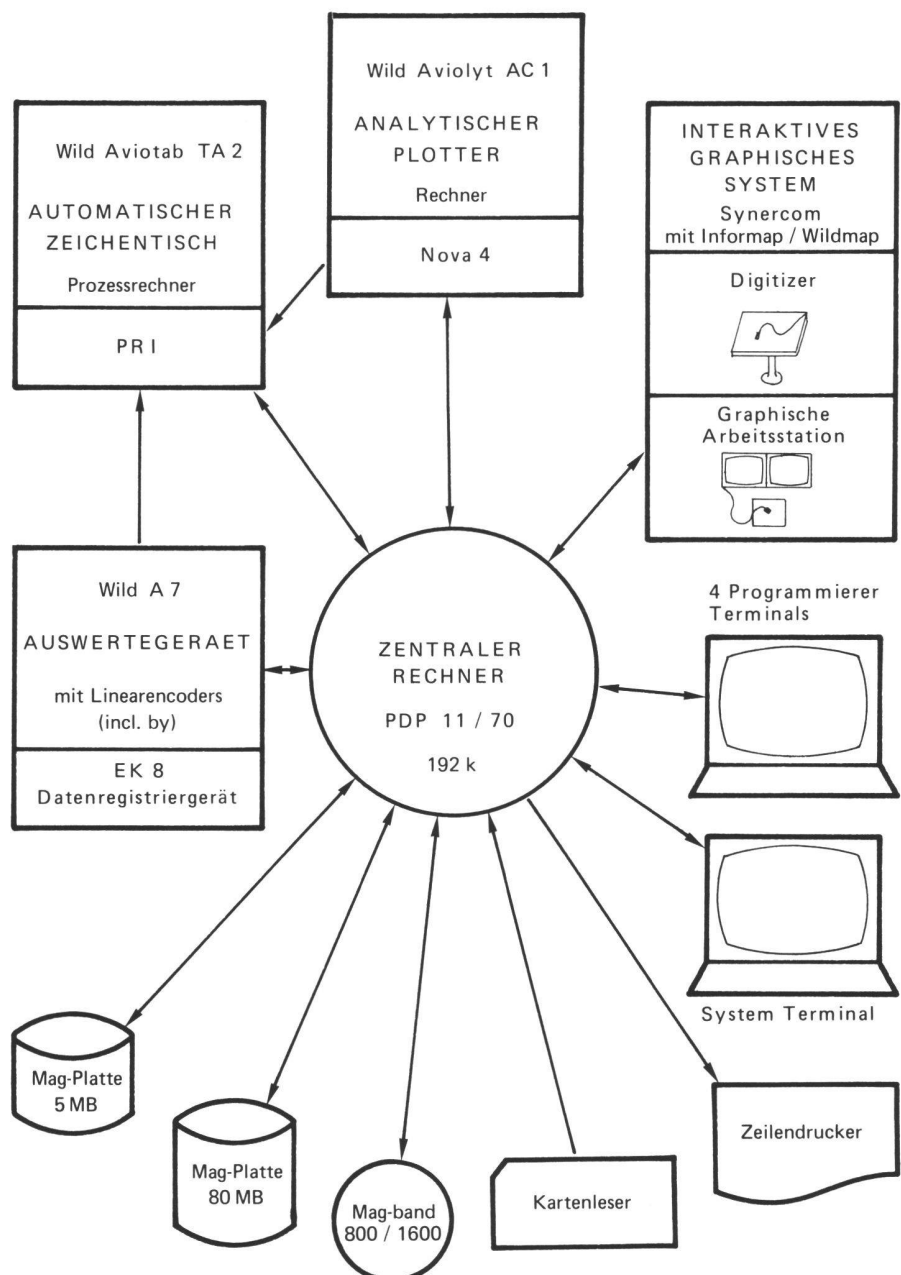


Abb. 2 Systemkonfiguration an der ETHZ, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie

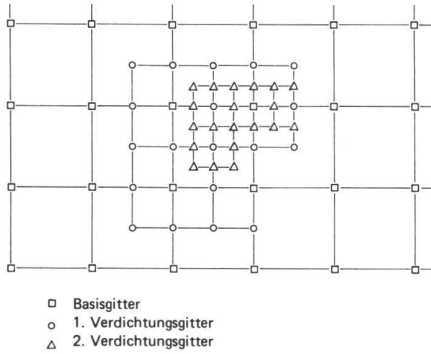


Abb.3 Verdichtungsschema des Basisgitters

übereinandergelegt werden. Der einzige Nachteil dieses Konzepts besteht darin, dass einige Punkte zwei- bis dreifach vorliegen und gemessen werden müssen, jedoch sollte es bei optimaler Wahl des Basisgitters gemäss den gemachten Erfahrungen kaum je vorkommen, dass eine zweifache Verdichtung nicht ausreicht.

Der wesentlichste Vorteil des Programms GITTER ist die rasche Adressierbarkeit und die platzsparende Speicherung; Eigenschaften, die sich bei den anfallenden Datenmengen als unerlässlich erwiesen haben. Das Programm ist eingebaut in das übergeordnete Programm ERFASS, welches die in Paragraph 4 aufgezeigten Optimierungs- und Verdichtungsalgorithmen ausführt. ERFASS läuft auf dem Rechner des analytischen Plotters.

Rege verwendet wird auch das Höhenkurven-Interpolationsprogramm CIP von Zumofen/Leoni [9], installiert auf der PDP II/70. Das Programm, welches aus mehr oder weniger beliebig verteilten Stützpunkten Höhenkurven interpoliert, ist jetzt auch in der Lage, zusätzlich aus unregelmässig verteilten Punkten ein regelmässiges Gitter zu rechnen.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Anwendung von Höhenkurven-Interpolationsprogrammen ist die Erkenntnis, dass ein bestimmtes Programm in gewissen Fällen nicht zu optimalen Ergebnissen führen kann. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Stützpunktdichte schwach und unregelmässig ist. Versuche an der ETHZ haben deutlich gezeigt, dass gerade in solchen Situationen sich das Zumofen/Leoni-Programm sehr gut verhält und dass es im grossmassstäbigen Bereich seine besondere Stärke zu haben scheint. Letztlich kann aber das Höhenkurvenbild nur durch eine genaue und vollständige Datenerfassung verbessert werden.

Der rechnerische Übergang Höhenkurve-Gitter und umgekehrt wird in Zukunft an Bedeutung gewinnen, obwohl damit immer ein Informationsverlust verbunden ist [8]. Sollen aber all die (in

Höhenkurvenform) existierenden Plan- und Kartenunterlagen in Gitterform gespeichert werden, so ist die Umrechnung nach erfolgter Digitalisierung unumgänglich. Gegenwärtig ist es ein Ziel weiterer Untersuchungen an der ETHZ, diesen Informationsverlust zu minimalisieren.

Schliesslich ist auch die Rolle des interaktiven graphischen Systems hervorzuheben, im vorliegenden Fall das INFORMAP/WILDMAP-System. Sobald grössere Datenmengen vorliegen, die irgendwie bearbeitet und editiert werden müssen, kommt man ohne Visualisierung nicht mehr aus. Dies gilt in besonderem Masse für die photogrammetrische Datenerfassung, wo das Zusammenfügen von Einheiten (Modellen) besondere Probleme ergibt. Bis zu einem gewissen Grad lassen sich auch grobe Fehler leicht entdecken und beheben, ein Vorteil, der besonders bei Gittermessungen zum Tragen kommt. Das direkte Mitzeichnen am Auswertetisch bringt in diesem Fall ja keine Kontrolle, letztere kann nur durch eine dreidimensionale Visualisierung erfolgen.

Es ist aus diesen Ausführungen klar ersichtlich, dass der Soft- und Hardwareaufwand nicht unerheblich ist. Dies ist der Preis, der für den Einstieg in die digitale Datenerfassung und -behandlung bezahlt werden muss, wobei zu erwähnen bleibt, dass bescheidene Konfigurationen durchaus auch ihre Aufgabe erfüllen können.

6. Ein Beispiel

Um die Aussagekraft und Leistungsfähigkeit des Verfahrens zu untersuchen, wurde in einem Testgebiet ein digitales Höhenmodell nach verschiedenen Methoden erfasst. Dazu standen zwei Luftbilder in der Nähe von Herisau (AR) im Bildmassstab von ca. 1:4800 zur Verfügung. Das eigentliche Testgebiet umfasst eine Fläche von 400 x 400 m und ist charakterisiert durch wechselnde Geländestruktur mit mehreren Bruchkanten. Sämtliche Auswertungen geschahen im Plan-Massstab 1:1000 mit einem Höhenkurvenintervall von 1 m (siehe Abb. 5).

Um objektive Genauigkeitsangaben zu erhalten, sind zudem im Testgebiet 65

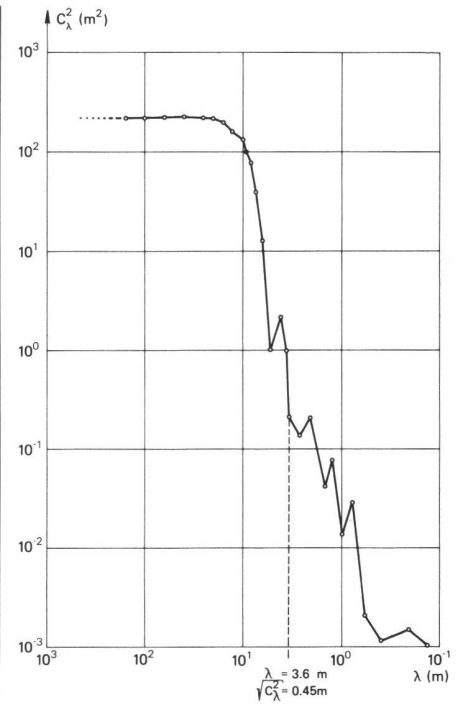


Abb.4 Leistungsspektrum des Testprofils

zufällig verteilte, unabhängige Kontrollpunkte ausgewertet worden. Der Vergleich dieser Werte mit den aus den verschiedenen Datensätzen interpolierten Werten ermöglicht die Ermittlung eines mittleren und maximalen Höhenfehlers. Die verschiedenen Erfassungsarten erlauben auch, Vergleiche in bezug auf die Auswertzeit und die totale Punktzahl anzustellen. Schliesslich lassen sich durch rein visuelle Vergleiche die Höhenkurvendarstellungen übereinanderlegen und beurteilen. Zur Bestimmung der Basisgitterdichte sind die zwei in Paragraph 4 vorgestellten Verfahren zugezogen worden. Das 330 m lange Testprofil durchschneidet das Gebiet diagonal, wobei alle 2 m ein Punkt registriert worden ist. Die «Ausdünnung» nach Rüdener (Abb.1) und die Berechnung der d_{i+n} gemäss (2) ergab folgende Ergebnisse für den mittleren Höhenfehler (k-Werte)

$$m_k^2 = \sum \frac{(d_{i+n})^2}{k} \quad (\text{Tab. 1})$$

Erwartet man von der Höhenauswertung eine Genauigkeit von etwa 0,15‰ der Flughöhe, so folgt aus der Auswer-

Verdünnungsfaktor	m_k (cm)	
2	10	alle 4 m ein Punkt
3	16	alle 6 m ein Punkt
4	25	alle 8 m ein Punkt
5	26	alle 10 m ein Punkt
6	37	alle 12 m ein Punkt
7	40	alle 14 m ein Punkt
8	46	alle 16 m ein Punkt
9	50	alle 18 m ein Punkt
10	52	alle 20 m ein Punkt

Tab.1 «Ausdünnung» des Testprofils

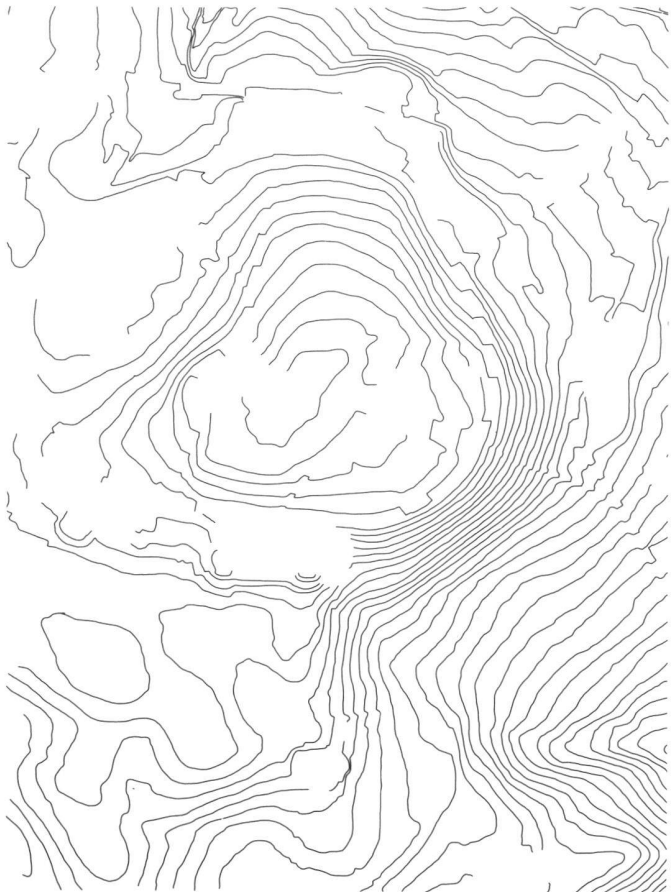


Abb. 5 Direkt ausgewertete und digitalisierte Höhenkurven (Ausschnitt)

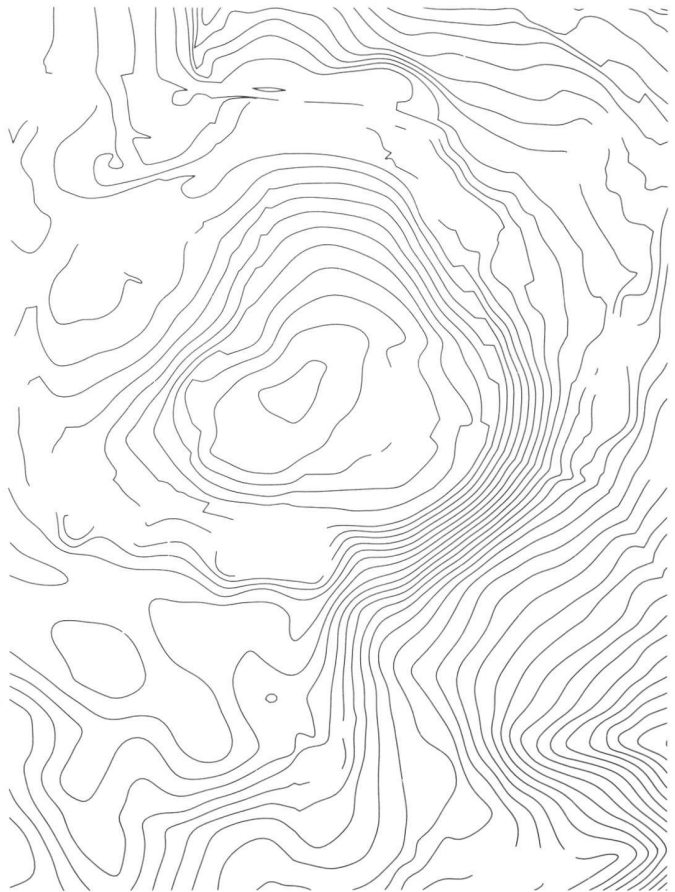


Abb. 6 Regelmässige Profile, alle 10 m mit charakteristischen Punkten in Profilrichtung (mit Bruchkanten)

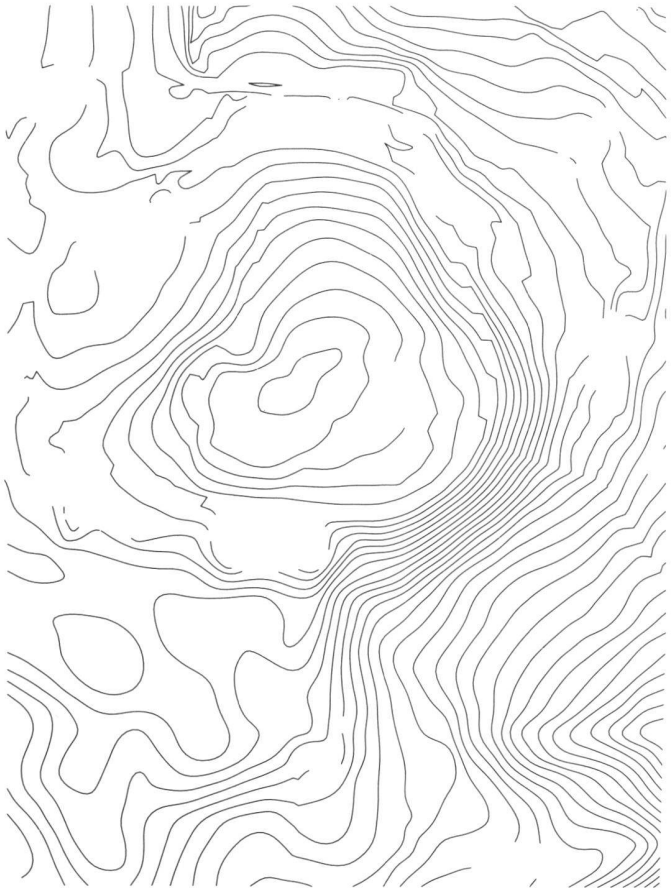


Abb. 7 Regelmässiges Gitter 10 x 10 m (mit Bruchkanten)

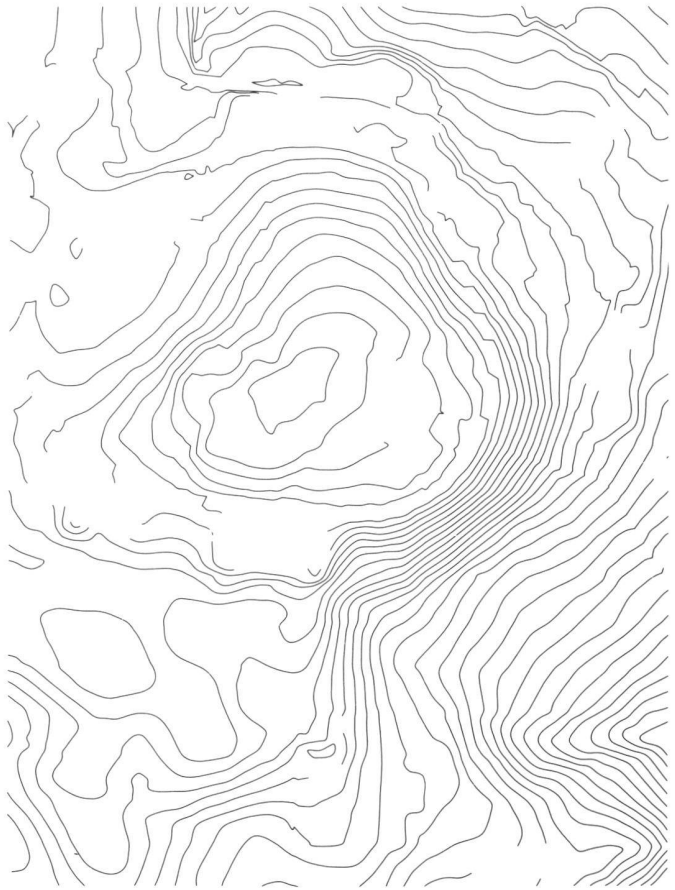


Abb. 8 Regelmässiges Basisgitter 20 x 20 m, zusätzlich lokal verdichtet bis 5 x 5 m (mit Bruchkanten)

Verfahren	Auswertung am AC1	Anzahl Punkte
1	5 Stunden	36 775
2	4 Stunden 10 Minuten	3 128
3	3 Stunden 30 Minuten	3 228
4	3 Stunden 10 Minuten	2 608

Tab.2 Erfassungszeiten und Stützpunktzahl der Verfahren 1 bis 4 (2 bis 4 jeweils inkl. Bruchkanten)

Verfahren	mittl. Höhenfehler (cm)	max. Höhenfehler (cm)
1	11	27
2	19	80
3	14	43
4	11	23

Tab.3 Mittlerer und maximaler Höhenfehler von 65 Kontrollpunkten in den 4 Verfahren

tung des Testprofils, dass bei einer ungefähren Flughöhe von 700 m die Profilpunkte nicht mehr als ca. 4 m auseinanderliegen sollten.

Dieses Ergebnis wird bestätigt durch die Berechnung des Leistungsspektrums nach (2). Hier konnten die Profilhöhen allerdings nicht direkt verwendet werden, zur Trendabspaltung ist vor der Berechnung eine Gerade durch den Anfangs- und Endpunkt des Profils zu legen. In Abb. 4 ist auf der Abszisse die Wellenlänge λ logarithmisch abnehmend, auf der Ordinate C_λ^2 logarithmisch zunehmend aufgetragen. Der Graphik kann leicht entnommen werden, bei welcher Wellenlänge λ welche Amplitude entsteht. Da C_λ^2 einen wesentlichen Anteil von s_0 in (3) trägt, lässt sich der Beitrag direkt ablesen.

Bei einer Wellenlänge von 3,6 m folgt beispielsweise, dass $C_\lambda^2 = 0,20 \text{ m}^2$ beiträgt, der Anteil an s_0 wird somit zu $\sqrt{C_\lambda^2} = 0,45 \text{ m}$. Schon bei Stützpunktständen von 4 m entstehen demnach Beiträge zu s_0 , die nicht mehr vernachlässigbar sind. Das Gelände, welches durch das Testprofil erfasst ist, muss daher als äusserst bewegt angesehen werden.

Diesen zwei Testuntersuchungen darf entnommen werden, dass ein Gitter, welches das Gelände repräsentativ erfassen will, eine feinste Maschenweite von ca. 4 bis 5 m aufweisen sollte. Um aufzuzeigen, dass dem so ist, ist das Testgebiet auf vier verschiedene Arten am AC1 erfasst worden; die Planimetrie blieb dabei ausgeklammert.

1. Direkte Auswertung von Höhenkurven mit 1-m-Äquidistanz und gleichzeitiger Digitalisierung.
2. Auswertung in Profilen, die je 10 m auseinanderliegen. In Profilrichtung Erfassung aller charakteristischen Geländepunkte.
3. Erfassung in einem regelmässigen Gitter 10 x 10 m.
4. Regelmässiges Gitter 20 x 20 m mit interaktiver Verdichtung bis 5 x 5 m.

Für die Verfahren 2 bis 4 sind zudem noch Bruchkanten erfasst worden, die

bei der Berechnung von Höhenkurven immer mitgeführt worden sind. Das Gitter in Verfahren 4 entspricht den aus dem Testprofil entnommenen Parametern.

Tabelle 2 gibt einen Einblick in den Auswerteaufwand, wobei zu berücksichtigen ist, dass bei der direkten Höhenkurvenauswertung nach 1 extrem viele Punkte digitalisiert wurden, um möglichst an das originale Kurvenbild heranzukommen.

Berechnet man nun für die Verfahren 2 bis 4 das Höhenkurvenbild mit dem CIP-Programm von Zumofen/Leoni (Abbildungen 6, 7 und 8) und vergleicht sie mit den direkt ausgewerteten Höhenkurven (Abb. 5), so ergibt sich auf den ersten Blick eine gute Übereinstimmung, abgesehen von den etwas (nerwöseren) direkten Höhenkurven. Dieser Eindruck bestätigt sich auch bei einem visuellen Vergleich durch Übereinanderlegen der verschiedenen Bilder, wo bei genauem Hinsehen das Verfahren 4 eindeutig am besten mit 1 übereinstimmt.

Damit ist aber noch nichts über eine absolute Höhengenaugigkeit ausgesagt; hier bringt die statistische Auswertung von zufällig verteilten Kontrollpunkten mehr Objektivität. Gemäss Tabelle 3 zeigt das regelmässige Gitter (wie erwartet) die schlechtesten Ergebnisse. Etwas besser schneiden die regelmässigen Profile ab, während direkte Höhenkurven und optimales Gitter die Spitze einnehmen.

Im objektiven Sinne ist daher das Gelände im Verfahren 4 mindestens gleich genau erfasst wie durch direkte Höhenkurven. Dies bei einer ungleich niedrigeren Punktzahl sowie in kürzerer Auswertzeit.

7. Schlussfolgerungen

Das hier gezeigte Beispiel erlaubt nur Folgerungen im grossmasstäblichen Bereich und, obschon noch sehr viel Arbeit in solche Experimente gesteckt werden muss, scheint ein digitales Höhenmodell in Gitterform (im Sinne

des (progressive samplings)) mit Bruchkanten doch gewichtige Vorteile aufzuweisen im Vergleich zu direkt ausgewerteten Höhenkurven:

1. Die Auswertzeit ist wesentlich kürzer, im vorliegenden Fall ca. 33%.
2. Die Stützpunktzahl ist optimiert und die Punkte in Gitterform leicht adressier- und speicherbar.
3. Das Höhenkurvenbild nähert sich sehr stark dem direkt ausgewerteten an.

Allerdings wird das positive Gesamtbild etwas verdüstert durch zwei Faktoren, deren Einfluss auf das Ganze noch zu wenig bekannt ist: Das Arbeiten mit Gittern ist EDV-intensiv. Die Rohdaten müssen zuerst bearbeitet werden, damit schon nur rein visuelle Kontrollen möglich sind, was natürlich bei direkt ausgewerteten Höhenkurven entfällt. Auch ist schwer abzuschätzen, wie der Operateur langfristig auf eine Arbeitsweise reagiert, die ihm ausser der genauen Messung kaum mehr topographische Gestaltungsmöglichkeiten lässt. Letztlich wird es aber von der Anwendung selbst abhängen, für welches Verfahren man sich entschliesst. Dabei ist es gut zu wissen, dass bei optimaler Gitterdichte Höhenkurven erzeugt werden können, welche bei hoher absoluter Genauigkeit dem Originalkurvenbild sehr nahe kommen.

Literatur

- [1] O. O. Ayeni: Automated digital terrain models. Presented paper, ASP DTM Symposium, St. Louis, 1978
- [2] P. Frederiksen, O. Jacobi: Terrain Spectra. Presented paper, Comm. III, ISPRS, Helsinki, 1982
- [3] P. Frederiksen, O. Jacobi, J. Justesen: Fourier-Transformation von Höhenbeobachtungen. ZfV 2/78, pp. 64-79
- [4] B. Makarovič: From progressive to composite sampling for digital terrain models. Geo-Processing, Nr. 1, 1979, pp. 145-166, Elsevier, Amsterdam
- [5] H. Rüdener: Zur photogrammetrischen Erfassung von Geländedaten. Diss. Uni Hannover, Nr. 101, 1980
- [6] H. H. Schmid: Über den Wandel der geometrisch-algebraischen Modellvorstellung in der Photogrammetrie unter dem Einfluss computergestützter Auswertverfahren. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 7-8/79, S. 197-205
- [7] Y. P. Singh: Performance evaluation of composite sampling for digital terrain models. Master Thesis, ITC, 1981
- [8] P. Yoeli: Über digitale Geländemodelle und deren computergestützte kartographische und kartometrische Auswertung. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 2/82, S. 34-39
- [9] G. Zumofen, M. Leoni: Neue Programmsysteme zur Berechnung und Darstellung von Isolinien mit Hilfe von Kleincomputern. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 6/77, S. 189-194

Adresse der Verfasser:
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zürich