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: 10

Artikel: Stichprobeweise Luftbildauswertung zur Erneuerung der Arealstatistik : Geometrische Aspekte und Genauigkeitsanalyse

Autor: Kölbl, O.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-231180

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

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

am 19. April 1901. Schweizerische Statistik, 132. Lieferung, Bern.

(4) Eidg. Statistisches Bureau, 1912: Schweizerische Arealstatistik abgeschlossen auf 1. Juli 1912. Schweizerische Statistik, 184. Lieferung, Bern.

(5) Eidg. Statistisches Bureau, 1925: II. Arealstatistik der Schweiz 1923/24, Schweizerische statistische Mitteilungen, VII. Jahrgang, 3. Heft, Bern.

(6) Eidgenössisches Statistisches Amt, 1953: Arealstatistik der Schweiz 1952. Statistische Quellenwerke der Schweiz, Heft 246, Bern.

(7) Eidgenössisches Statistisches Amt, 1972: Arealstatistik der Schweiz 1972. Statistische Quellenwerke der Schweiz, Heft 488, Bern.

(8) Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung an der ETH, 1969: Informationsraster (Landesplanerische Datenbank) 1. und 2. Teil, Übersicht und Vorbereitungsarbeiten. Arbeitsberichte zur Orts-, Regional- und Landesplanung, Nr. 4.1 und 4.2, Zürich (S. 19–34).

(9) Vgl. Arealstatistik der Schweiz 1952 und 1972, a. a. O.

(10) Vgl. Arealstatistik der Schweiz 1972, a. a. O. (S. 9).

(11) Bundesamt für Statistik, Bundesamt für Raumplanung, 1980: Informationsraster Benützerhandbuch. Arbeitsdokumente für die schweizerische Statistik, Heft 3, Bern.

(12) Vgl. Arealstatistik der Schweiz 1972, a. a. O. (S. 10–12).

(13) Postulat 11968 Hagmann ‹Arealstatistik und Bodennutzung› vom 18. März 1974, am 17. Juni 1974 vom Bundesrat entgegengenommen und am 24. Juni 1974 vom Nationalrat überwiesen worden.

(14) Arbeitsgruppe ‹Arealstatistik und Bodennutzung›, Arbeitsgruppe der unter der Leitung des Bundesamtes für Bildung und Wissenschaft stehenden ‹Koordinationsgruppe Fernerkundung›.

(15) Eidg. Vermessungsdirektion, 1980: Grundbuchvermessung und Arealstatistik, Bericht zu Handen der Arbeitsgruppe Arealstatistik und Bodennutzung, Bern (unveröffentlicht).

(16) Trachsler, H., Kölbl, O., Meyer, B., Mahrer, F., 1981: Stichprobenweise Auswertung von Luftaufnahmen für die Erneuerung der Eidgenössischen Arealstatistik, Bericht über einen Versuch in verschiedenen Testgebieten in der Schweiz. Arbeitsdokumente für die schweizerische Statistik, Heft 5, Bern.

(17) Arbeitsgruppe Arealstatistik und Bodennutzung, 1981: Arealstatistik und Bodennutzung, Bericht einer interdepartementalen Arbeitsgruppe zum Postulat 11968 Hagmann, Bern (unveröffentlicht).

(18) Eidg. Vermessungsdirektion, 1980: a. a. O (S. 15).

(19) Vgl. Trachsler, Kölbl, Meyer, Mahrer a. a. O.

(20) Der Delegierte für Raumplanung, Eidg. Vermessungsdirektion, 1975: Ergebnisse einer Umfrage des Delegierten für Raumplanung und der Eidg. Vermessungsdirektion bei kantonalen Planungsstellen und privaten Planungsbüros über die Themenkreise: Grossmassstäbige Plangrundlagen, Richtlinien für die Plangrundlagendaten in einem eventuellen Mehrzweckkataster, Bodennutzung in der Arealstatistik. Vervielfältigter Bericht, Bern.
H. R. Henz, 1977: Raumplanerische Anforderungen an die Volkszählung, den Informationsraster und die Arealstatistik der Schweiz. Bericht über die Durchführung und Auswertung der Befragung, Forschungsauftrag Ref. Nr. 139, Delegierter für Raumplanung/METRON, Brugg.

(21) Vgl. Schlussbericht der Arbeitsgruppe Arealstatistik und Bodennutzung, a. a. O. (S. 5-9).

(22) Vgl. O. Kölbl und H. Trachsler in diesem Heft.

Adresse des Verfassers:
B. Meyer-Sommer, dipl. ing.-agr. ETH
Bundesamt für Statistik
CH-3003 Bern

Stichprobenweise Luftbildauswertung zur Erneuerung der Arealstatistik: Geometrische Aspekte und Genauigkeitsanalyse

O. Kölbl

Für eine Neuerhebung der schweizerischen Arealstatistik ergeben sich im wesentlichen nur zwei Möglichkeiten: eine extensive Erhebung mittels Stichproben in Luftbildern oder eine Vollerhebung, welche mehr oder weniger stark auf der Grundbuchvermessung basiert. Im folgenden Beitrag wird ein analytisches Verfahren zur Erhebung von Punktstichproben in Luftbildern beschrieben, welches sich fast vollständig automatisieren lässt; ferner wird aufgezeigt, wie die Genauigkeit von Stichprobenerhebungen abgeschätzt werden kann. Vorteile des aufgezeigten Stichprobenverfahrens sind die geringen Kosten, gute Voraussetzungen für die Nachführung und die Möglichkeiten zur Erhebung einer relativ hohen Anzahl von Landnutzungskategorien.

Pour un renouvellement de la statistique de la superficie de la Suisse, il n'y a en principe que deux possibilités: un lever extensif à l'aide d'un échantillonnage sur des photographies aériennes ou un lever complet basé essentiellement sur la mensuration cadastrale officielle. Dans l'article suivant, on présente un procédé analytique pour le lever d'échantillons de points sur des photographies aériennes, lequel se prête à une automatisation presque complète; d'autre part, on montre comment la précision des échantillonnages peut être estimée. Les avantages du procédé démontré sont les frais extrêmement bas, les conditions favorables pour une mise à jour et les possibilités de lever un nombre assez important de catégories de l'utilisation du sol.

1. Problemstellung

Zuverlässige Angaben über die Landnutzung sind eine wichtige Voraussetzung für die verschiedensten planerischen Massnahmen, sei dies auf nationaler oder kantonaler Ebene, im regionalen Bereich oder auch für kleinräumige Gebiete. Die Eidgenössische Arealstatistik stellt zweifelsohne eines der wichtigsten Verzeichnisse über die tatsächliche Bodennutzung dar. Diese Daten basierten bisher im wesentlichen auf den Angaben der Grundbuchvermessung. Obgleich die Anzahl der Kategorien und die Aktualität damit zwangsläufig durch die Gegebenheiten der Grundbuchvermessung vorgegeben war, stellte die Grundbuchvermessung in der Vergangenheit die bedeutendste Quelle dar, um quantitative Daten über die Landnutzung zu erhalten. Die topographischen Karten und auch der Übersichtsplan weisen gegenüber der Grundbuchvermessung bereits eine beträchtliche Generalisierung auf und eignen sich damit kaum, um Angaben über kleinflächige Nutzungen wie Gebäudeflächen oder Strassen und Wege abzuleiten. Diese Überlegungen zeigen, dass als Basis für eine detaillierte Landnutzungserhebung durchaus recht grossmassstäbige Pläne nötig sind, solange eine Vollerhebung angestrebt wird. Unter Vollerhebung wird hierbei verstanden, dass sämtliche Nutzungsgrenzen einzeln erfasst werden.
Eine wirkliche Alternative zu einer Vollerhebung stellt nur die Verwendung von Stichproben dar. Erst durch die Verwendung von Stichproben lässt sich der Aufwand für eine Landesinventur

wirklich reduzieren, da die Landnutzung nur an ausgewählten Stellen angesprochen wird. Stichprobenerhebungen sind gerade für statistische Aufgaben oder auch für Vorratsschätzungen im Forstwesen ein weit verbreitetes Hilfsmittel. Für Landnutzungserhebungen können an sich Flächenstichproben, Profile und Punktstichproben herangezogen werden. Bei einer detaillierten Betrachtung zeigt sich jedoch, dass für die Belange der Arealstatistik am zweckmässigsten mit Punktstichproben gearbeitet wird; die Erhebung selbst erfolgt dabei am zweckmässigsten mit Luftbildern.

Bei der Verwendung von Flächenstichproben liesse es sich nicht vermeiden, diese Stichprobenflächen im Detail zu kartieren und die einzelnen Nutzungsflächen zu planimetrieren. Auch die profilweise Erhebung der Landnutzung würde umfangreiche Messungen in Luftbildern bedingen. Demgegenüber lässt sich die metrische Auswertung von Luftbildern bei der Verwendung von Punktstichproben weitgehend automatisieren, und die manuelle Bearbeitung konzentriert sich auf die reine Luftbildinterpretation. Wird mit permanenten Stichproben gearbeitet, so lassen sich auch Veränderungen der Landnutzung mit grosser Sicherheit erfassen.

Zur praktischen Realisierung eines derartigen Erhebungsverfahrens wird man zunächst einen Stichprobenraster in Landeskoordinaten festlegen. Diese Stichproben werden in der Folge mittels analytischer Rechenverfahren in die Luftbilder übertragen. Die eigentliche Luftbildinterpretation beschränkt sich dann auf den Stichprobenpunkt und seine unmittelbare Umgebung, eine flächendeckende Interpretation ist damit überflüssig. Nach der Luftbildinterpretation werden die Interpretationsergebnisse in eine Datenbank integriert und können je nach Bedarf mit weiteren Daten verknüpft werden. Selbstverständlich können diese Landnutzungsdaten wie bisher auch aufgeschlüsselt nach Gemeinden periodisch publiziert werden.

Das aufgezeigte Verfahren zur Erneuerung der gegenwärtigen eidgenössischen Arealstatistik sollte als Vervollständigung der bisherigen Erhebungen gesehen werden; angestrebt werden dabei ca. 40 verschiedene Arealkategorien für Aussagen im regionalen und überregionalen Bereich; als kleinste Aussageeinheit kann weiterhin die Gemeinde dienen oder auch eine Rastereinheit entsprechender Grösse. Diese Erhebungen können aber die bisherige Arbeit des Grundbuchgeometers nicht konkurrenzieren, da für Planungen im kleinräumigen Gebiet nach wie vor sehr detaillierte Karten und Pläne erforderlich sind, deren Basis zwangsläufig der Grundbuchplan wohl weiterhin darstellen wird. Die Erhebungen der Bodennutzung mittels Stichprobenverfahren soll aber den Geometer in einem Bereich entlasten, dem die Grundbuchvermessung nur sehr begrenzt genügen kann.

In den folgenden beiden Kapiteln wird im Detail auf die Technik und Genauigkeit der Stichprobenübertragung in Luftbildern eingegangen und die Genauigkeit bei Stichprobenerhebungen abgeschätzt. Die eigentliche Luftbildinterpretation und die Erfassung der Landnutzung in Luftbildern wird im nachfolgenden Aufsatz von H. Trachsler behandelt.

2. Analytische Übertragung von Stichprobenpunkten ins Luftbild

Es wurde bereits in der Einleitung darauf hingewiesen, dass Luftbilder zwangsläufig eine wesentliche Grundlage für die Erneuerung der Arealstatistik darstellen. Voraussetzung für eine zuverlässige Luftbildinterpretation ist eine durchgehende Kontrollmöglichkeit der Arbeit. Dabei ist es wichtig, dass einerseits der Interpret selbständig seine Arbeit kontrollieren kann und sich beim Fortschreiten der Arbeit an vorangegangenen Klassifikationen orientiert; zum anderen müssen Vorkehrungen getroffen werden, um die Interpretation im Gelände durchgreifend verifizieren zu können. Diese Forderungen lassen sich am besten dadurch erfüllen, dass die Interpretationsergebnisse unmittelbar in die Luftbilder eingetragen werden. Da die Luftbildinterpretation zwangsläufig unter einem Stereoskop mit entsprechender optischer Vergrösserung erfolgt, müssen auch die Stichprobenpunkte unmittelbar in die Originalluftbilder übertragen werden.

2.1 Erstellung der Interpretationsfolien

Technisch lässt sich die Übertragung der Stichprobenpunkte am zweckmässigsten mit den Hilfsmitteln der automatischen Kartierung realisieren. Dazu werden die in Landeskoordinaten vorgegebenen Stichprobenpunkte mit Hilfe der projektiven Abbildungsgleichungen in die Geometrie der Luftbilder umgerechnet und auf eine Folie kartiert (vgl. Abb. 1 und Abb. 2). Diese Folie wird dann auf das jeweilige Luftbild montiert und legt damit die Position der Stichprobenpunkte für die Bildinterpretation fest. Für die projektive Transformation der Stichprobenpunkte werden die Orientierungselemente der Luftbilder (Aufnahmestandpunkt und Bildneigung) sowie neben den Lagekoordinaten der Stichprobenpunkte auch deren Höhen benötigt.

Die Genauigkeit, mit der die Stichprobenpunkte lokalisiert werden können,

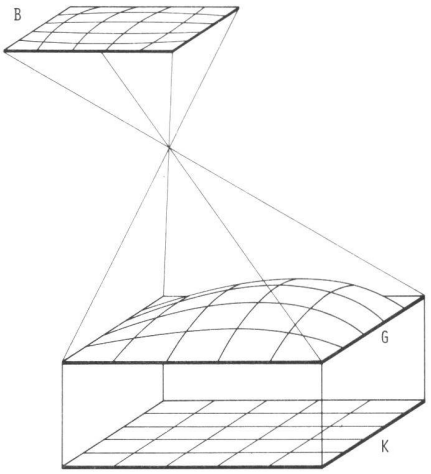
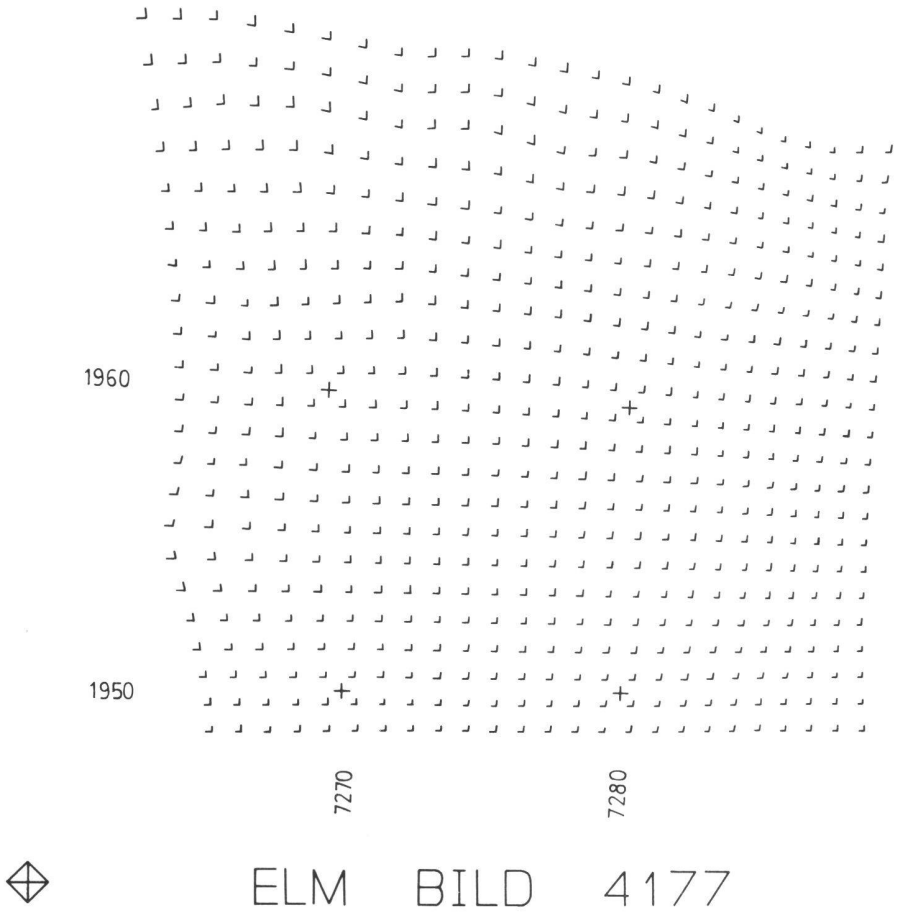


Abb. 1 Übertragung eines regelmässigen Stichprobenrasters in ein Luftbild. Neben den Orientierungselementen des Luftbildes sind für die lagerichtige Lokalisierung der Stichprobenpunkte auch die Geländehöhen zu berücksichtigen. In der Darstellung bedeuten B die Bildebene, K die Kartenebene und G das Gelände.

hängt im wesentlichen von der Zuverlässigkeit der Orientierungselemente und der Genauigkeit des digitalen Geländemodells ab. Schliesslich wäre auch die Zeichengenauigkeit am automatischen Kartiertisch zu berücksichtigen. Es zeigte sich jedoch, dass letztere Fehlerkomponente bei Verwendung entsprechender Präzisionsgeräte vernachlässigt werden kann.

Bei den bisherigen Arbeiten wurden die Orientierungselemente der Luftbilder aus Passpunktmessungen abgeleitet, wobei die Landeskarte 1:25 000 als Referenz diente. Als Passpunkte wurden vielfach markante Wegkreuzungen, Brücken und freistehende kleine Gebäude verwendet. Die Geländekoordinaten dieser Passpunkte einschliesslich der Höhen wurden aus der Landeskarte abgegriffen, die entsprechenden Bildkoordinaten wurden an einem Präzisionskomparator gemessen. Im Durchschnitt wurden pro Bild 8 Passpunkte verwendet. Die Berechnung der Orientierungselemente über einen Ausgleich erlaubt das Erkennen grober Fehler bei der Passpunktermittlung und eine Abschätzung der Einpassgenauigkeit.

Mit dieser relativ einfachen Methode konnte eine recht hohe Genauigkeit erzielt werden. So betrugen die Restabweichungen in den Passpunkten nach der Ausgleichung mit 6–8 Punkten im Mittel ± 3–5 m, bezogen auf die Landeskoordinaten. Diese Unsicherheit bewirkt bei der Lokalisierung der Stichprobenpunkte Fehler von ± 2–3 m oder ± 0,1 mm im Aufnahmemassstab der Luftbilder. Prinzipiell lässt sich bei der Luftbildmessung eine wesentlich höhere Genauigkeit erreichen, allerdings dürften dann die Passpunktkoordinaten



⌟ = Stichprobenpunkt. × = für die Bestimmung der Orientierungselemente verwendete Passpunkte. + = Kilometernetz der Landeskoordinaten. ⊕ = Rahmenmarken des Luftbildes.

Abb. 2 Projektiv verzerrter Stichprobenraster, Maschenweite = 100 Meter, Massstab des zugehörigen Luftbildes ca. 1 : 25 000.

nicht mehr der Landeskarte entnommen werden, sondern müssten speziell bestimmt werden.

2.2 Höheninterpolation der Stichprobenpunkte

Neben den Orientierungselementen der Luftbilder werden zur Erzeugung des Punktrasters noch die Geländehöhen sämtlicher Stichprobenpunkte benötigt; diese Angaben wurden einem digitalen Geländemodell entnommen. Es handelt sich dabei um einen quadratischen Höhenraster mit einer Maschenweite von 250 m. Da der vorgesehene Stichprobenraster eine wesentlich geringere Maschenweite aufweist, musste eine Höheninterpolation vorgenommen werden. Hierfür wurde das Gelände durch Sattelflächen approximiert. Anhand der eingegebenen Bildgrenzen wurden von einem Programm die entsprechenden Punkte des Höhenrasters aufgesucht und die Höhen für den 100-Meter-Raster interpoliert.

Durch diese Interpolation können sich in stark kupiertem Gelände beträchtliche Höhenfehler ergeben. Nach verschiedenen statistischen Untersuchungen liegt die Genauigkeit im Flachland bei ± 25 m und im Berggebiet bei ± 75 m (Standardabweichung). Unter Berücksichtigung des Öffnungswinkels der Aufnahmekammer ergeben sich damit Lagefehler von ca. ± 10 m im Mittelland (0,3 mm im Luftbild 1 : 25 000) und ca. ± 30 m (1,0 mm im Luftbild 1 : 25 000) im Gebirge. Diese Fehler kommen erst zum Tragen, wenn der Stichprobenpunkt auf einem anderen Medium (Karte oder Luftbild) reproduziert wird. Dies ist zum Beispiel bei der Nachführung der Landnutzungserhebung der Fall, wenn wieder mit dem gleichen Stichprobenraster (permanente Stichprobe) gearbeitet wird. Dabei soll der Stichprobenpunkt auf den neu erstellten Luftbildern, unter Berücksichtigung der unvermeidlichen Messfehler, am gleichen Ort lokalisiert werden wie bei der Erstaufnahme. Aus Abbildung 3 lässt sich ablesen, dass ein Höhenfehler die Reproduzierbarkeit eines Stichprobenpunktes nur geringfügig beeinflusst, da der Lagefehler (Δs) proportional zum Abstand der beiden Projektionszentren ist. Dies bedeutet, dass die Nachführungsflüge soweit wie möglich nach dem selben Flugplan erfolgen sollten wie die Erstaufnahmen. Falls dabei die Abweichungen nicht grösser sind als 10% der Flughöhe, ergibt sich bei einem Bildmassstab von 1 : 25 000 im Mittel eine Reproduzierbarkeit von 0,1 mm im Flachland und 0,3 mm im Berggebiet. Dieser Fehler weist damit zumindest im Mittelland die gleiche Grössenordnung auf wie die Abweichungen, die sich ergeben, wenn die Passpunktmessungen auf der Landeskarte erfolgen. Im Berggebiet ist mit einem etwas grösseren Fehler zu rechnen.

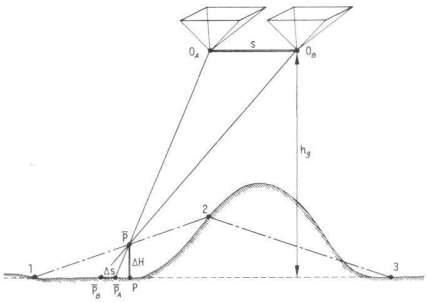


Abb. 3 Lagefehler, bedingt durch die Höheninterpolation. Eine lineare Interpolation zwischen den Punkten 1 und 2 führt zu einer Zunahme der Höhe des Punktes P um ΔH. Dieser Höhenfehler beeinflusst die Lagegenauigkeit von Stichprobenpunkten bei einem Nachführungsflug. Der Lagefehler Δs entspricht dem ursprünglichen Höhenfehler ΔH, reduziert um den Faktor s/h_g (s = Abstand zwischen den Aufnahmestandorten der Bilder A und B, h_g = Flughöhe über Grund).

Die Genauigkeit der Reproduzierbarkeit lässt sich beträchtlich erhöhen, wenn in Zukunft ein genaueres Geländemodell zur Verfügung stehen wird. Ferner können bei einer operationellen Landnutzungserhebung die Orientierungselemente der Luftbilder unmittelbar vom Bundesamt für Landestopographie übernommen und müssen nicht mehr über die Landeskarte bestimmt werden.

2.3 Aufwandsabschätzung

Der Aufwand für die analytische Stichprobenübertragung ist klein im Vergleich etwa zu einer klassischen Stereokartierung. Die bisherigen Aufwandsschätzungen beschränken sich auf Vorversuche, welche mit den Geräten des Instituts für Photogrammetrie der EPF-Lausanne ausgeführt wurden. Dabei musste auf eine weitgehende Optimierung der Rechenprogramme verzichtet werden. Im Rahmen dieser Vorversuche wurden etwa 100 Interpretationsfolien erstellt.

Die Messung der Passpunkte in den Luftbildern erfolgte am Monokomparator MK2 der Firma Kern. Die Messwerte wurden auf Lochkarten registriert. Die entsprechenden Koordinaten der Landeskarte wurden auf einem Haag und Streit-Digitalisiertisch abgegriffen und ebenfalls auf Lochkarten registriert. Für

diese Messoperationen wurden im Durchschnitt pro Bild 20 Minuten benötigt. Hinzu kommt noch eine Vorbereitungszeit von ca. 10 Minuten pro Luftbild, welche für ein Sichten des Bildmaterials, die Festlegung der Bearbeitungsgrenzen pro Bild und die Herstellung einer Flugplanübersicht nötig sind. Die Berechnung der Orientierungselemente der Luftbilder und die Generierung eines Zeichenkodes erfolgten bei den Vorversuchen auf der Grossrechenanlage des Rechenzentrums der EPF-Lausanne (CDC-Cyber 170–720). Für diese Rechenarbeiten waren im Durchschnitt ebenfalls 10 Minuten Bearbeitungszeit pro Bild erforderlich. Die Stichprobenfolien selbst wurden an der computergesteuerten Zeichenanlage Coradi MK3 erstellt. Die Zeichnung erfolgte auf Gravurfolien, wobei neben den eigentlichen Stichprobenpunkten noch die verwendeten Passpunkte, die Rahmenmarken der Luftbilder sowie das Kilometernetz der Landeskoordinaten inklusive Beschriftung dargestellt wurden (vgl. Abb. 2). Die Bearbeitungszeit für diese Operationen einschliesslich Einfärben und Auswaschen der Folien und die Montage auf die Luftbilder hatten den Bearbeiter ca. 20 Minuten beansprucht. Die reine Maschinenzeit am Zeichentisch für die Gravur der Folien betrug im Durchschnitt 50 Minuten. Diese Aufstellung zeigt, dass für die Herstellung einer Interpretationsfolie mit allen Nebenoperationen etwa eine Stunde benötigt wurde.

Obgleich die Interpretation in Stereobildern erfolgt, genügt es, die Interpretationsfolien nur für jedes zweite Luftbild herzustellen. Nach Abschätzungen des Bundesamtes für Landestopographie sind für die Schweiz etwa 3600 Interpretationsfolien herzustellen. Nach den vorausgegangenen Aufwandsangaben würde dies einen Zeitaufwand von ungefähr 2 Mannjahren bedingen. Durch eine weitere Optimierung der Rechenprogramme lässt sich dieser Arbeitsaufwand noch ganz beträchtlich reduzieren. Besonders günstige Voraussetzungen ergeben sich, da das ebenfalls in Ausführung begriffene Landesforstinventar methodisch ähnlich konzipiert ist. Durch die Koordination der metrischen Bildauswertung können die Kosten für diesen Arbeitsabschnitt noch beträchtlich gesenkt werden.

3. Genauigkeitsabschätzung von Stichprobenerhebungen

Stichprobenerhebungen mögen im Vermessungswesen zunächst als Fremdkörper erscheinen. Es sollte aber nicht übersehen werden, dass beispielsweise eine topographische Höhenaufnahme im Gelände ebenfalls als Stichprobenaufnahme aufgefasst werden muss. In manchen Ländern ist auch die Verwendung des Haarplanimeters (Harfe) für die Flächenplanimetrierung auf Grundbuchplänen durchaus üblich. Die Flächenbestimmung mit diesem Gerät stellt ebenfalls eine Stichprobenerhebung dar. Viel wichtiger als die Methode selbst ist jedoch die erzielbare Genauigkeit einzuschätzen. Bei einer stichprobenweisen Landnutzungserhebung in Luftbildern sind im wesentlichen zwei Fehlerarten zu berücksichtigen, nämlich der Stichprobenfehler selbst und Fehler der Luftbildinterpretation. Lässt sich der Stichprobenfehler mittels theoretischer Überlegungen recht gut abschätzen, so sind zur Erfassung von Fehlern der Luftbildinterpretation praktische Untersuchungen unerlässlich.

3.1 Zufallsverteilte Stichproben

Der Stichprobenfehler lässt sich am einfachsten nach der Binomialverteilung abschätzen. Dabei wird davon ausgegangen, dass innerhalb eines vorgegebenen Perimeters ein Flächenanteil p zu bestimmen ist (vgl. Abb. 4). Die Genauigkeit dieser Schätzung hängt im wesentlichen von der Anzahl der Stichprobenpunkte (n_G) innerhalb des Perimeters sowie vom Flächenanteil p ab:

$$\sigma_G\,[\%] = \pm k \sqrt{\frac{p\,(100-p)}{n_G}} \qquad (1)$$

σ_G ist der Schätzfehler von p in Prozenten; mit 100% wird dabei die Gesamtfläche des Perimeters beziffert. k ist eine Konstante, womit der Vertrauensbereich des Schätzfehlers festgelegt wird; k = 1 entspricht der Standardabweichung mit einem Vertrauensintervall von 66%, k = 2 dem Vertrauensintervall von 95% und k = 3 einem Wert von 99%.

Für das in Abbildung 4 wiedergegebene Beispiel ergibt sich nach Formel 1 ein Fehler σ_G = 6% (n_G = 48, p = 21%). Bei einer Landnutzungskartierung könnte man davon ausgehen, dass der äussere Perimeter beispielsweise der Gemeindefläche entspricht und die innere Abgrenzung einem Waldstück. Wird dazu ein regelmässiger Raster verwendet, so kann neben dem Flächenanteil auch die effektive Fläche ermittelt werden. Bei der Binomialformel wird jedoch vorausgesetzt, dass die Gesamtfläche des Perimeters (z. B. Gemeindefläche) bekannt ist und die Einzelflächen abgeglichen werden.

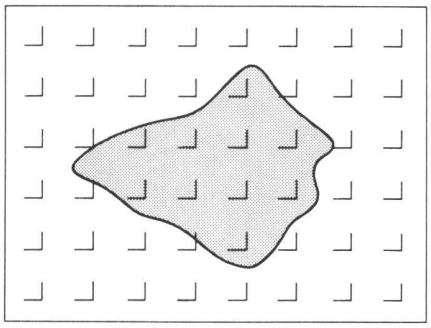


Abb. 4 Flächenbestimmung mittels eines regelmässigen Stichprobenrasters. Der zu erhebende Flächenanteil mit n_M = 10 Stichprobenpunkten wurde gerastert und könnte eine Waldfläche darstellen. Auf den Gesamtperimeter entfallen n_G = 48 Stichprobenpunkte.

Für verschiedene Überlegungen interessiert nicht der Flächenfehler des einzelnen Merkmals in bezug auf eine vorgegebene Gesamtfläche, sondern der Fehleranteil bezogen auf die Fläche des betreffenden Merkmals selbst. Durch Umformung von Formel 1 ergibt sich:

$$\sigma_M\,[\%] = \pm k \sqrt{\frac{100\,(100-p)}{n_M}} \qquad (2)$$

Dabei gibt n_M die Anzahl der Stichprobenpunkte an, die auf die jeweils untersuchte Nutzung entfallen. Für das in Abbildung 4 gezeigte Beispiel erhält man: σ_M = 28% (n_M = 10, p = 21%).

Bei Merkmalen, deren Flächenanteile p kleiner als ~30% sind, kann mit ausreichender Näherung auch geschrieben werden:

$$\sigma_M\,[\%] = \pm k \frac{100}{\sqrt{n_M}} \qquad (3)$$

Durch diese Näherung wird der Bezug auf die Gesamtfläche ausgeschaltet; die Formel gilt daher auch, wenn keine Flächenabgleichung erfolgt. Umgekehrt kann mit dieser Formel auch abgeschätzt werden, welche Stichprobendichte nötig ist, um Merkmale einer bestimmten Flächenausdehnung mit einer vorgegebenen Genauigkeit zu erfassen.

Die Binomialformel ist sehr einfach zu handhaben und erlaubt Fehlerabschätzungen ohne Vorkenntnisse über die Objektkonfiguration. Es wird allerdings vorausgesetzt, dass die aufzunehmenden Merkmale in bezug auf die Stichproben zufallsverteilt sind. Diese Voraussetzung ist erfüllt, wenn die Objektflächen im Vergleich zum Stichprobenraster klein sind und eine unregelmässige Verteilung aufweisen (z. B. Streusiedlung) oder falls mit zufallsverteilten Stichproben gearbeitet wird. Ist dagegen die Wahrscheinlichkeit gross, dass benachbarte Rasterpunkte auf das gleiche Merkmal entfallen, so wird der Flächenfehler mit der Binomialformel mehr oder weniger stark überschätzt, vorteilhafterweise aber praktisch nie unterschätzt.

3.2 Stichprobenerhebung bei zusammenhängenden Flächenstücken

Verschiedentlich wurden auch Formeln entwickelt, um die Korrelation zu be-

rücksichtigen, die sich ergibt, wenn benachbarte Stichprobenpunkte auf dasselbe Merkmal entfallen. Dies kann etwas global erfolgen, indem man einen Formfaktor einführt und den Exponent der Zahl der Stichprobenpunkte n_M hinaufsetzt (1, 2, 3, 4) oder es wird nach Matérn (5) die Korrelation individuell berechnet. Für den ersten Fall würde sich Formel 3 etwas vereinfacht abwandeln in:

$$\sigma_M\,[\%] = \pm k\,\frac{100 \cdot f}{(n_M)^e} \qquad (4)$$

Der Formfaktor f ist im allgemeinen zwischen 0,5 und 1,5 zu wählen, kann aber bei stark zergliederten Flächen noch erheblich grösser werden (Kreisfläche f = 0,5; Quadrat f = 0,6). n_M ist wieder die Anzahl der Stichproben pro Merkmal, e ist der Exponent, der aufgrund der bisherigen praktischen Erfahrungen für grossflächige, zusammenhängende Merkmale zwischen ⅔ und ¾ liegt.

Die effektive Flächenverteilung kann mit den von Matérn angegebenen Formeln in die Überlegungen einbezogen werden. Diese Formeln wurden auch wiederholt für Genauigkeitsabschätzungen bei Waldinventuren angewendet (6). Hierbei wird die Korrelation zwischen benachbarten Stichprobenpunkten unmittelbar in Rechnung gestellt; sie wird durch die sogenannte Kreuzdifferenz (d_{ij}) approximiert:

$$d_{ij} = w_{ij} + w_{i+1,\,j+1} - w_{i+1,\,j} - w_{i,\,j+1} \qquad (5)$$

Die Position der Stichprobenpunkte wird durch die Indizes i (Zeilenindex) und j (Spaltenindex) gekennzeichnet, w nimmt den Wert 1 an, falls der betreffende Stichprobenpunkt auf das betrachtete Merkmal entfällt, und 0, falls er ausserhalb liegt. Die Kreuzdifferenz d_{ij} ist damit null, falls sämtliche Stichprobenpunkte des Quadrupels auf dem Merkmal selbst oder ausserhalb liegen oder wenn zwei benachbarte Punkte auf das gleiche Merkmal entfallen; sie wird eins, falls nur ein Punkt ausserhalb oder innerhalb liegt, und schliesslich zwei, wenn zwei diagonal gegenüberliegende Punkte auf das betreffende Merkmal entfallen (vgl. Abb. 5).

Die Flächengenauigkeit berechnet sich dann nach folgender Formel:

$$\sigma_M\,[\%] = \pm k \cdot 100 \cdot \sqrt{\frac{\Sigma\, d_{ij}^2}{4 \cdot n_M^2}} \qquad (6)$$

Diese Formel geht in die Binomialformel (Formel 3) über, falls die untersuchten Objektflächen klein sind und im Vergleich zur Maschenweite des Stichprobennetzes weit auseinanderliegen. In diesem Fall ergeben sich für jeden Stichprobenpunkt, der auf das betrachtete Merkmal entfällt, gerade 4 Kreuzdifferenzen mit dem Wert eins, und es

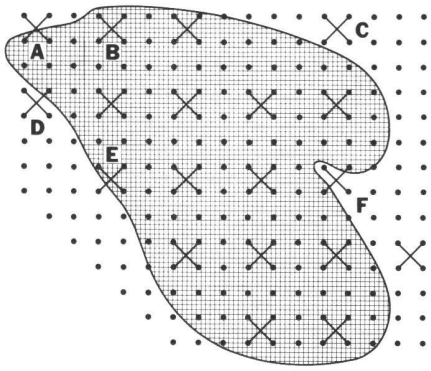


Abb. 5 Ermittlung der Kreuzdifferenz zur Beschreibung der Korrelation bei Stichprobenerhebungen mit einem regelmässigen Punktraster. Dazu wird dem Stichprobenpunkt der Wert eins zugewiesen, falls dieser auf das betreffende Merkmal (umfahrene Zone) fällt, und null, falls er ausserhalb zu liegen kommt. Die Kreuzdifferenz (vgl. Formel 5) wird dann für die Quadrupel A, B und C gleich null, für D und E gleich eins, und für F nimmt es den Wert zwei an.

bleibt in Formel 6 nur mehr der einfache Wert von n_M unter der Wurzel im Nenner. Demgegenüber ergibt sich der kleinste mögliche Flächenfehler, wenn die Landnutzung die Form eines einzigen Rechtecks aufweist, dessen Seiten parallel zu den Seiten des Stichprobenrasters verlaufen. Die Quadratsumme sämtlicher Kreuzdifferenzen beträgt dann nur 4 und

$$\sigma_M\,[\%] = \pm k\,\frac{100}{n_M} \qquad (7)$$

Damit liegt eine Minorante vor, nach welcher der Flächenfehler für den günstigsten Fall abgeschätzt werden kann. Wie sich leicht erkennen lässt, liegen die Werte, welche sich nach Formel 4 berechnen, zwischen den beiden Extremwerten nach den Formeln 3 und 7 (vgl. auch Abb. 6). Erfahrungsgemäss ist mit den Formeln für die Berechnung der Kreuzdifferenzen eine gute Genauigkeitsabschätzung möglich. Sie können allerdings erst angewendet werden, wenn die Stichprobenergebnisse vorliegen und erlauben daher keine a-priori-Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeit; dafür muss wieder auf die Formeln 3 und 4 zurückgegriffen werden.

Nach den bisherigen Genauigkeitsüberlegungen versteht es sich von selbst,

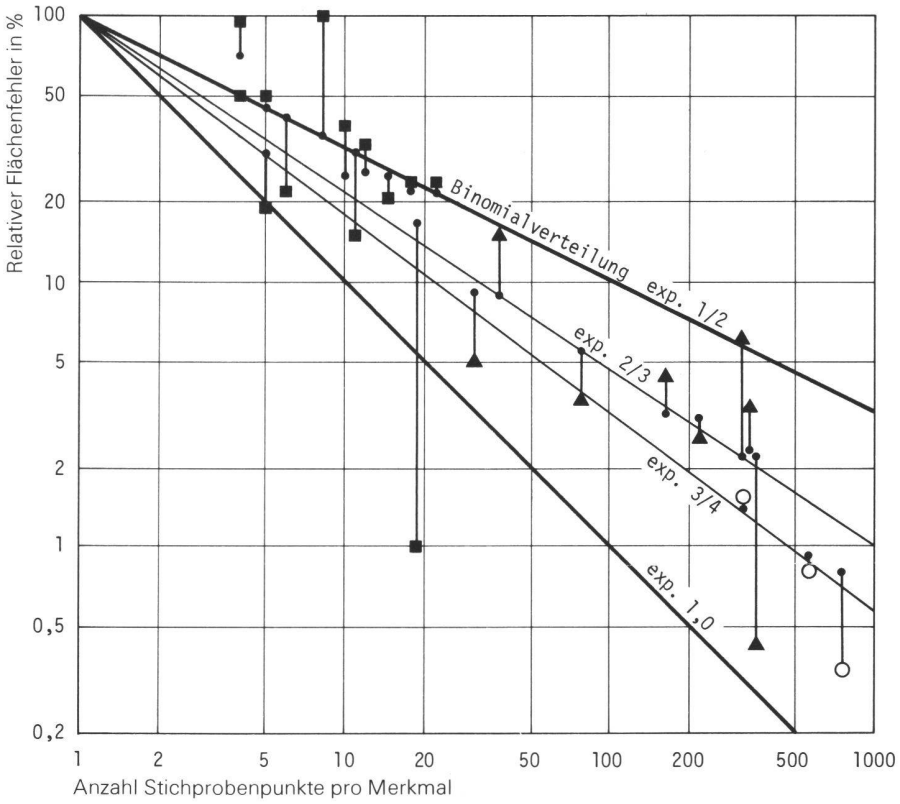


Abb. 6 Gegenüberstellung von theoretischen Genauigkeitsabschätzungen für Stichprobenerhebungen (Standardabweichungen) mit den Ergebnissen praktischer Untersuchungen. Dargestellt werden die Flächenfehler in Prozent in bezug auf die Gesamtfläche des jeweiligen Merkmals. Diese relativen Flächenfehler werden in Funktion der Anzahl der Stichprobenpunkte ausgewiesen, die auf das betrachtete Merkmal entfallen. Neben der Binomialformel (vgl. Formel 3) und Exponentialfunktionen mit höheren Exponenten werden die Erwartungswerte nach den Formeln 5 und 6, berechnet über die Kreuzdifferenzen (kleiner Punkt), ausgewiesen. Demgegenüber werden die effektiven Flächenfehler entsprechend einem Vergleich mit der Grundbuchvermessung durch besondere Symbole gekennzeichnet, Gemeindefläche: Kreis, grössere Flächenkomplexe wie Wald, Wies- und Ackerland, Rebflächen und Weiden: Dreieck, stark aufgesplitterte Nutzungskategorien wie Gebäudeflächen, Hofraum, Strassen: Quadrat. Die Daten entstammen Stichprobenerhebungen für die Gemeinden Jonen, Oberlunkhofen und Bonvillars, Stichprobenabstand 100 m.

dass ein regelmässiger Stichprobenraster unbedingt einer Zufallsverteilung vorzuziehen ist. Lediglich die Lage des Stichprobenpunktes innerhalb des vorgesehenen Rasterelements kann noch gewissen Variationen unterworfen werden. Wird der Stichprobenpunkt nicht konsequent ins Zentrum der jeweiligen Netzmasche gelegt, sondern innerhalb dieser zufällig angeordnet, so lässt sich vermeiden, dass etwa in Städten mit einem streng regelmässigen Strassennetz die Nutzungsanteile systematisch verfälscht werden. Für die praktische Arbeit hat eine derartige Stichprobenanordnung allerdings Nachteile, da der Stichprobenpunkt selbst nicht so rasch aufzufinden ist wie bei einer regelmässigen Anordnung und einzelne Punkte leichter übersehen werden können.

3.3 Erhebung von Veränderungen

Bei Landnutzungserhebungen interessiert nicht nur die Genauigkeit einer einzigen Erhebung, sondern es ist auch von Bedeutung, mit welcher Zuverlässigkeit Veränderungen über mehrere Erhebungsperioden hinweg verfolgt werden können. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass sich Veränderungen erheblich genauer mit permanenten Stichproben als mit unabhängigen Stichprobennetzen erfassen lassen. Explizit lässt sich der Fehler für die Erhebung von Veränderungen nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz abschätzen:

$$\sigma_{\Delta}^{\text{Zuf.}} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_{1\,2}} \qquad (8)$$

σ_1 = Genauigkeit der ersten Erhebung.

σ_2 = Genauigkeit an einer zweiten Erhebung, die zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt wurde.

$\sigma_{1\,2}$ = Kovarianz der beiden Erhebungen.

Sind die beiden Erhebungen unabhängig, so besteht keine Korrelation zwischen den beiden Fehlerkomponenten und $\sigma_{1\,2} = 0$. Der Fehler der Einzelerhebungen berechnet sich dann nach Formel 3 oder 4; allerdings dürfen nicht die Prozentwerte verwendet, sondern es müssen die absoluten Flächenbeträge selbst aufaddiert werden. Diese ergeben sich, indem man die Werte aus Formel 3 bzw. 4 mit der Anzahl der Stichprobenpunkte multipliziert:

$$\sigma_1 = \sqrt{n_M}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{n_M + n_\Delta}$$

wobei mit n_Δ die Stichprobenpunkte bezeichnet werden, welche auf Veränderungen entfielen.

Man erhält damit für

$$\sigma_{\Delta}^{\text{Zuf.}} = \sqrt{2 \cdot n_M + n_\Delta} \qquad (9)$$

Bei permanenten Stichproben sind die Fehler der beiden Erhebungen nahezu gleich. Die Kovarianz zwischen den beiden Erhebungen wäre damit gleich der Wurzel aus dem Produkt der beiden Fehler

$$\sigma_{\Delta}^{\text{Per.}} = \sqrt{n_M + n_M + n_\Delta - 2\sqrt{n_M\,(n_M + n_\Delta)}}$$

Diese Formel vereinfacht sich zu

$$\sigma_{\Delta}^{\text{Per.}} \sim \sqrt{n_\Delta} \qquad (10)$$

Demnach berechnen sich die Fehler für die Erhebungen von Veränderungen unmittelbar aus der Anzahl der Stichprobenpunkte, welche eben auf Veränderungen entfielen; bei Zufallsstichproben muss demgegenüber der Wert noch um den zweifachen Fehler für die Gesamtfläche vergrössert werden. Permanente Stichproben sind daher für periodische Erhebungen unbedingt zweckmässiger als unabhängige Stichproben.

4. Schlussbetrachtung

Mit den vorangegangenen Ausführungen konnte ein Verfahren aufgezeigt werden, das es erlaubt, grossräumige Landnutzungserhebung mit äusserst geringem Aufwand auszuführen. Ein wesentlicher Teil dieses Verfahrens ist die automatische Generierung der Interpretationsfolien mit projektiv verzerrtem Stichprobenraster. Die Gesamtkosten für die Ersterhebung werden auf ca. 2 Mio. Franken geschätzt. Durch die Wahl einer permanenten Stichprobenerhebung konnte auch die Nachführung sichergestellt werden.

Im Aufsatz von B. Meyer wurde aufgezeigt, dass es für die Belange der Arealstatistik schon immer problematisch war, das Grunddatenmaterial mit der nötigen Genauigkeit zu erhalten. Es mag daher überraschen, dass nicht bereits früher versucht wurde, ein ähnlich konzipiertes Verfahren aufzugreifen, etwa anlässlich der Entwicklung des ORL-Hektarrasters.

Es darf jedoch nicht übersehen werden, dass erst in den letzten 10 Jahren verschiedene Voraussetzungen geschaffen wurden, um ein derartiges Verfahren zu realisieren; dazu gehören die Fortschritte bei der digitalen Kartierung, die Erstellung eines ersten, wenn auch weitmaschigen digitalen Geländemodells und die periodische Befliegung des Bundesgebietes durch die Eidgenössische Landestopographie für Kartennachführungen. Erst seit knapp zehn Jahren führt dieses Bundesamt eine periodische Befliegung des Landes mit dem fixen Rhythmus von sechs Jahren durch. Eine Neubefliegung speziell für die Belange der Arealstatistik hätte demgegenüber beträchtliche Mehrkosten verursacht. Nach einer groben Kostenabschätzung würde eine einmalige Befliegung der Schweiz entsprechend der Flugdisposition der Eidgenössischen Landestopographie bereits Kosten in der Grösse einer Million Franken verursachen. Vor zehn Jahren wäre auch der Aufwand für die automatische Zeichnung der Interpretationsfolien beträchtlich höher gewesen.

Die Fortschritte in der elektronischen Datenverarbeitung haben aber auch ganz beträchtliche Veränderungen bei der Grundbuchvermessung bewirkt. Durch die zunehmende Informatisierung der Grundbuchvermessung ergeben sich aber auch wieder neue Aspekte für eine engere Koordination zwischen der klassischen Vermessung und der Arealstatistik. Die Verbesserung der Zugriffsmöglichkeit etwa durch die Verwendung von Landinformationssystemen stellt dabei aber nur einen Aspekt dar; vielleicht noch wichtiger für eine aktuelle Arealstatistik ist, dass die von der Vermessung gelieferte Information auch vollständig und nachgeführt ist. Es ist jedenfalls sehr wichtig, dass auch in Zukunft eine enge Zusammenarbeit zwischen dem Bundesamt für Statistik, welches die Neuerhebung für die Arealstatistik ausführt, und den Vermessungsbehörden aufrechterhalten wird; dies im ganz besonderen, um im Rahmen der Reform der amtlichen Vermessung eine gute Koordination in Fragen von Landnutzungserhebungen sicherzustellen.

Literatur:

[1] Matheron, G.: The Theory of Regionalized Variables and its Applications. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 5, 1971, S. 36.

[2] Bartet, J.-H., Grand, J.-P.: Encore un exemple d'échantillonnage: mesure de surfaces par comptage de points. Service cantonal des forêts, Lausanne, 1968, S. 3.

[3] Zöhrer, F.: Die Genauigkeit der Ermittlung von Waldflächen durch systematische Punktstichproben (Einzelflächen). Forstw. Cbl. 95, 1976, S. 294.

[4] Loetsch, F., Zöhrer, F., Haller, K.: Forest Inventory, Vol. II. München, Bern, Wien, 1973, S. 35.

[5] Matérn, B.: Spatial Variation – Stochastic Models and their Application to some Problems in Forest Surveys and other Sampling Investigations. Meddelanden Fran Statens Skogsforskningsinstitut, Band 49, Nr. 5, 1961, S. 120f.

[6] Kennel, E.: Bayerische Waldinventur 1970/71 – Inventurabschnitt I: Grossrauminventur, Aufnahme- und Auswertungsverfahren. Forschungsberichte Forstliche Forschungsanstalt München, 11, 1973, S. 132f.

Adresse des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. Otto Kölbl
Institut de photogrammétrie EPFL
Av. de Cour 33, CH-1007 Lausanne