

# **Leitfaden Qualitätssicherung**

—

## **Photogrammetrie und DTM-Generierung**

Arbeitsgruppe Qualitätssicherung  
Photogrammetrie und DTM-Generierung

Juli 2000

## Inhaltsverzeichnis

|        |                                                                          |    |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | Einleitung.....                                                          | 1  |
| 1.1.   | Zielsetzung                                                              | 1  |
| 1.2.   | Gliederung                                                               | 2  |
| 1.3.   | Leitsätze                                                                | 2  |
| 1.4.   | Unternehmerbericht                                                       | 2  |
| 1.5.   | Dokumentationen                                                          | 2  |
| 2.     | Projektausschreibung.....                                                | 3  |
| 2.1.   | Vorabklärungen                                                           | 3  |
| 2.1.1. | Zielkonflikte                                                            | 3  |
| 2.1.2. | Übergeordnete Anforderungen                                              | 4  |
| 2.2.   | Vorprojekt / Projektbeschreibung                                         | 5  |
| 2.2.1. | Beschreibung des Ist-Zustandes                                           | 5  |
| 2.2.2. | Projektanforderungen                                                     | 5  |
| 2.2.3. | Leistungsbeschreibung (Technische Spezifikationen für die Ausschreibung) | 5  |
| 2.3.   | Bemerkungen zur Ausschreibung                                            | 6  |
| 3.     | Signalisierung und Bildflug .....                                        | 7  |
| 3.1.   | Methoden                                                                 | 7  |
| 3.2.   | Problemstellen                                                           | 7  |
| 3.3.   | Anforderungen                                                            | 8  |
| 3.4.   | Empfehlungen                                                             | 13 |
| 3.5.   | QS-Methoden und -Massnahmen                                              | 13 |
| 3.5.1. | Planung                                                                  | 13 |
| 3.5.2. | Bildflug                                                                 | 14 |
| 3.5.3. | Passpunktbestimmung                                                      | 14 |
| 3.6.   | Dokumentation                                                            | 15 |
| 4.     | Scanning.....                                                            | 16 |
| 4.1.   | Methoden                                                                 | 16 |
| 4.2.   | Problemstellen                                                           | 16 |
| 4.3.   | Anforderungen                                                            | 18 |
| 4.3.1. | Scanvorgang                                                              | 18 |
| 4.3.2. | Datenabgabe                                                              | 18 |
| 4.4.   | Empfehlungen                                                             | 19 |
| 4.5.   | QS-Methoden und -Massnahmen                                              | 19 |

|        |                                             |    |
|--------|---------------------------------------------|----|
| 4.5.1. | Projektausschreibung / Offertstellung       | 19 |
| 4.5.2. | Abnahme von Testscans                       | 20 |
| 4.6.   | Dokumentation                               | 20 |
| 5.     | Aerotriangulation .....                     | 21 |
| 5.1.   | Methoden                                    | 21 |
| 5.2.   | Problemstellen                              | 22 |
| 5.3.   | Anforderungen                               | 23 |
| 5.4.   | Empfehlungen                                | 24 |
| 5.5.   | QS-Methoden und –Massnahmen                 | 24 |
| 5.6.   | Dokumentation                               | 25 |
| 6.     | DTM-Generierung .....                       | 27 |
| 6.1.   | Gegenüberstellung DHM, DGM/DTM, DOM         | 27 |
| 6.2.   | Methoden                                    | 27 |
| 6.3.   | Problemstellen                              | 30 |
| 6.4.   | Anforderungen                               | 31 |
| 6.5.   | QS-Methoden und -Massnahmen                 | 31 |
| 6.5.1. | Formale Prüfung der abgelieferten Daten     | 32 |
| 6.5.2. | Plausibilitätsprüfungen im Modell           | 33 |
| 6.5.3. | Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsprüfungen | 34 |
| 6.6.   | Dokumentation                               | 36 |
| 7.     | Orthophotogenerierung .....                 | 38 |
| 7.1.   | Methoden                                    | 38 |
| 7.2.   | Problemstellen                              | 38 |
| 7.2.1. | Differentielle Entzerrung                   | 38 |
| 7.2.2. | Mosaikgenerierung                           | 40 |
| 7.3.   | Anforderungen                               | 41 |
| 7.4.   | Empfehlungen                                | 43 |
| 7.5.   | QS-Methoden und -Massnahmen                 | 44 |
| 7.5.1. | Formale Prüfung                             | 44 |
| 7.5.2. | Genauigkeitsprüfung                         | 44 |
| 7.6.   | Dokumentation                               | 45 |
| 8.     | Auswertungen .....                          | 46 |
| 8.1.   | Methoden                                    | 46 |
| 8.2.   | Problemstellen                              | 47 |
| 8.3.   | Empfehlungen                                | 48 |

## **Vorwort**

Die Bearbeitung dieses Leitfadens wurde anfänglich durch die nachgenannte Ad hoc Arbeitsgruppe aus Bedürfnisgründen der beteiligten Kreise in Angriff genommen. Gleichzeitig sah sich die Konferenz der kantonalen Vermessungsämter (KKVA) auf Begehren vor die Tatsache gestellt, für die Behandlung des nahezu gleichen Themas eine Arbeitsgruppe zusammenzustellen. In der Folge ist man mit der Techn. Kommission der KKVA an einer Besprechung zur Lösung gekommen, die vorbestandene Arbeitsgruppe offiziell mit dem Mandat der KKVA auszustatten.

Mitglieder Arbeitsgruppe "Qualitätssicherung Photogrammetrie und DTM-Generierung":

- Prof. Dr. Stephan Nebiker, Fachhochschule beider Basel
- Marc Amsler, Fachhochschule beider Basel und terra Vermessungen (ab Jan. 2000)
- Hans Hägler, Kantonaes Vermessungs- und Meliorationsamt Basel-Landschaft
- Christoph Käser & Stéphane Bovet (ab 1.7.99), Bundesamt für Landestopographie
- Ueli Maag & Stéphane Bovet (bis 30.6.99), Kantonaes Vermessungsamt Bern

## **1. Einleitung**

### **1.1. Zielsetzung**

Der Leitfaden soll der Auftraggeber- wie der Unternehmerseite die Qualitätssicherung in der Anwendung der Photogrammetrie und der daraus erzeugten Daten und Produkte ermöglichen. Er soll ermöglichen, Anforderungen an beliebige Projekte, insbesondere solche der amtlichen Vermessung, daraus abzuleiten. Für den Einsatz in der amtlichen Vermessung eignen sich vor allem die Erfassung und Nachführung der Informationsebenen Bodenbedeckung, Einzelobjekte/Linienelemente und Höhen.

Der Auftraggeber erhält die Möglichkeit:

- die Zielsetzung eines Projekts zweckmässig zu formulieren
- die Produkte möglichst genau zu definieren
- die Anforderungen bezüglich Genauigkeit und Zuverlässigkeit klar zu spezifizieren
- die Einhaltung dieser Anforderungen zu überprüfen

Den Auftragnehmern bietet dieser Leitfaden:

- die Grundlage zur Beschreibung der technischen Lösung und der in Aussicht genommenen Methoden, soweit Methodenfreiheit besteht
- die Möglichkeit, eine aktuelle Checkliste mit den QS-Massnahmen bezüglich der gewählten Methoden zu erarbeiten und die Eigenkontrollen wirksam durchzuführen

## **1.2. Gliederung**

Der Leitfaden ist entsprechend den Phasen der photogrammetrischen Prozesskette gegliedert:

- Projektausschreibung
- Signalisierung und Bildflug
- Scanning
- Aerotriangulation
- DTM-Generierung
- Orthophotogenerierung
- Auswertungen

## **1.3. Leitsätze**

### **Methodenfreiheit**

Die Methodenfreiheit soll wenn immer möglich beachtet und nur durch präzisierende daten- und produkterelevante Vorgaben begrenzt werden.

### **Selbstkontrolle**

Im Sinne des Qualitäts-Managements muss das Schwergewicht auf der Selbstkontrolle durch den Unternehmer und auf dem Nachweis, dass die verlangten Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten erreicht wurden, liegen. Seitens der Auftraggeber muss bereits im Zeitpunkt der Arbeitsausschreibung die Ablieferung von geeigneten Dokumenten, welche dem Qualitätsnachweis dienen, verlangt werden.

## **1.4. Unternehmerbericht**

Der Unternehmer hält in seinem Bericht über den Verlauf der Arbeiten detailliert seine gewählte(n) Methode(n) fest unter Angabe aller verwendeten Instrumente und Gerätetypen. Er hält weiter getroffene Entscheidungen, durchgeführte Eigenkontrollen zur rechtzeitigen Qualitätssicherung und die Arbeitsergebnisse fest. Insbesondere dokumentiert er Abweichungen zur vorgelegten und genehmigten Planung.

Der Unternehmerbericht soll laufend und modular erarbeitet werden, damit er Genehmigungsunterlagen und Zwischenverifikationen beigelegt werden kann.

## **1.5. Dokumentationen**

Die abzuliefernden Dokumente werden in den nachfolgenden Kapiteln jeweils unter der Rubrik 'Dokumentation' aufgeführt.

## 2. Projektausschreibung

### 2.1. Vorabklärungen

#### 2.1.1. Zielkonflikte

Photogrammetrische Projekte sind heute immer häufiger eigentliche Mehrzweckprojekte. Als Beispiel sei die periodische Nachführung der Informationsebenen Bodenbedeckung, Einzelobjekte/Linienelemente und Höhen erwähnt mit dem gleichzeitigen Bedürfnis nach digitalen Orthophotos. Bei solchen Projekten ergeben sich jedoch Zielkonflikte, die durch eine optimale Wahl der folgenden Parameter gelöst bzw. optimiert werden müssen:

- Zeitpunkt der Befliegung
- Objektivwahl, Bildmassstab
- Überdeckung
- Scanauflösung

#### **Zeitpunkt der Befliegung**

Der Zielkonflikt äussert sich hier wie folgt:

- Eine Befliegung in der vegetationslosen Zeit gewährleistet eine gute Einsehbarkeit in Regionen mit Laubwald, was die Voraussetzung für Auswertungen von Waldwegen u.ä. schafft. Eine Befliegung in der vegetationslosen Zeit birgt aber auch die Gefahr von schneebedeckten Bildstellen, vor allem in höheren Lagen oder bei spät einsetzendem Schneefall.
- Andererseits gewährleistet eine Befliegung während der Vegetationsphase 'schöne' und satte Farben, sowie bessere Möglichkeiten zur Bestimmung der Vegetationsart.

Bei Projekten, in welchen die Produktion von farblich optimalen Orthophotos im Vordergrund steht, ist eine Befliegung im Frühjahr oder Sommer angezeigt.

In gewissen Fällen lassen sich mit einer Simultanbefliegung mit mehreren Kameras unterschiedliche Zielsetzungen abdecken, z.B. Farbaufnahmen für Orthophotos und Farbinfrarotaufnahmen für Vegetationsuntersuchungen.

#### **Objektivwahl und Bildmassstab**

Die Objektivwahl beeinflusst zum einen den Versatz von Kunstbauten in Orthophotos und zum andern die erzielbare Höhengenaugkeit bei der DTM-Generierung oder der Stereoauswertung:

- Der Einsatz einer längeren Brennweite führt zu einem kleineren Bildversatz im Orthophoto. Aus diesem Grund ist für die Generierung von Orthophotos die Verwendung von Normal- oder Zwischenwinkelobjektiven ( $c_K = 210 - 300 \text{ mm}$ ) vorteilhaft.
- Die Verwendung grösserer Objektivöffnungswinkel bzw. kleinerer Brennweiten (z.B.  $c_K = 150 \text{ mm}$ ) führt zu einer Verbesserung der erreichbaren Höhengenaugkeit. Diese Verbesserung zeigt sich vor allem bei der interaktiven Stereoauswertung.

Bei Projekten mit hohen Anforderungen betreffend Höhengenaugkeiten und Objektversetzungen ist eine Simultanbefliegung mit verschiedenen Kamerabrennweiten ein prüfenswerter Lösungsansatz.

| <b>Gebiet / Toleranzstufe</b> | <b>Kammerkonstante (<math>c_K</math>)</b> | <b>Bildmassstab (<math>m_B</math>)</b> |
|-------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| Siedlungsgebiet               | 300 mm                                    | 4000 – 6000                            |
| TS3, TS4                      | 210 mm od. 300 mm                         | 8000 – 12'000                          |
| TS4, TS5                      | offen (150 – 210 mm)                      | 20'000 – 30'000                        |
| Ebene Höhen (alle TS)         | 150 mm (– 300 mm)                         |                                        |

Tabelle 1: Typische Objektivbrennweiten und Bildmassstäbe für Anwendungen in der amtlichen Vermessung und verschiedenen Toleranzstufen

## Überdeckung

Das kritische Element bei der Festlegung der Bildüberdeckungen ist normalerweise die Querüberdeckung:

- Eine traditionelle Querüberdeckung von 20-30% erlaubt eine ökonomische Befliegung eines Gebietes mit einem Minimum an Bildmaterial. Zu den möglichen Negativpunkten einer geringen Querüberdeckung gehören:
  - ein grosser Bildversatz quer zur Flugrichtung bei der Orthophotogenerierung
  - potentiell starke Helligkeitsunterschiede zwischen benachbarten Bildstreifen, die bei der Mosaikierung zu Problemen führen können (die Problematik ist besonders ausgeprägt bei einer E-W-Befliegung und kann durch eine N-S-Befliegung entschärft werden) (vgl. Abschnitt 7 – Orthophotogenerierung)
  - Zunahme an sichttoten Räumen, speziell in gebirgigem Gelände
  - eine starke Abhängigkeit der Höhengenaugkeit und –zuverlässigkeit in Bildverbänden von der Höhenpasspunktconfiguration bzw. der Bedarf nach einer grossen Höhenpasspunktdichte (bei einer Befliegung ohne GPS-Stützung)
- Höhere Querüberdeckungen führen einerseits zu einer stabileren Blockgeometrie und damit zu einer gesteigerten Höhengenaugkeit und –zuverlässigkeit. Gleichzeitig werden damit Bildversatz und sichttote Räume reduziert. Andererseits bedingt eine grössere Querüberdeckung einen höheren Aufwand bei der Befliegung (Bildmaterial, Datenmenge, Kosten), wobei der zusätzliche Zeitbedarf insbesondere bei grösseren Projekten zu einem wichtigen Faktor werden könnte.

## Scanauflösung

Schliesslich besteht auch ein Zielkonflikt beim Festlegen der Scanauflösung. In der Vergangenheit wurde die Scanauflösung auf Grund der anfallenden Datenmengen bewusst limitiert. Damit wurde ein reduzierter Informationsgehalt des Bildmaterials und eine leicht reduzierte Punktbestimmungsgenauigkeit in Kauf genommen. Auch wenn die erzielbaren Genauigkeiten nicht linear mit der Scanauflösung zunehmen, ist bei der zunehmenden Verfügbarkeit an kostengünstigem Massenspeicherplatz zu überlegen, ob bei Projekten mit längerfristiger Bedeutung grundsätzlich mit einer hohen geometrischen Auflösung gescannt werden sollte.

### 2.1.2. Übergeordnete Anforderungen

#### Projektunterteilung

Falls bei grösseren Projekten eine Etappierung oder eine Unterteilung in Teilprojekte vorgenommen werden soll, ist auf klar definierte Verantwortlichkeiten und Schnittstellen sowie einen reibungslosen Projektablauf zu achten.

So ist es zum Beispiel sinnvoll, die Verantwortung für die Bildaufnahme und den anschliessenden Scanvorgang einer Unternehmung zu übertragen. Damit ist die Verantwortung für einwandfreies digitales Bildmaterial klar geregelt. Mit dieser Massnahme sollte auch gewährleistet werden, dass der Scanvorgang möglichst rasch nach dem Bildflug mit absolut neuwertigem Bildmaterial erfolgt.

### **Projektphasen und deren Abhängigkeiten**

Die meisten Arbeitsschritte der photogrammetrischen Prozesskette hängen direkt voneinander ab. Es ist daher sicherzustellen, dass:

- Zwischenverifikation festgelegt werden
- diese Zwischenverifikationen bzw. die Abnahmen einzelner Projektphasen zügig und abschliessend durchgeführt werden
- keine weiterführenden Arbeiten initiiert werden, ohne dass die vorhergehende Phase erfolgreich verifiziert worden ist

## **2.2. Vorprojekt / Projektbeschreibung**

Zu den wichtigsten Elementen des Vorprojekts gehören:

- die Beschreibung des Ist-Zustandes
- die Formulierung der Anforderungen an das Projekt, insbesondere bezüglich Genauigkeit und Zuverlässigkeit
- der Leistungsbescrieb (Technische Spezifikationen für die Ausschreibung) inkl. Produktebescrieb
- eine grobe Kostenschätzung und Festlegung der zugehörigen Honorierungsgrundlagen

### **2.2.1. Beschreibung des Ist-Zustandes**

- Beschreibung der Entstehung und des Zustandes der amtlichen Vermessung(en), im Besondern bestehende digitale Daten (z.B. Qualität, Aktualität, Vollständigkeit, Konsistenz, Format)
- Beschreibung weiterer Randbedingungen (z.B. Zwangspunkte für die Arbeitsausführung, Nachführungssystem und -intensität, Koordinationsbedarf mit weiteren Arbeiten, bekannte bestehende Probleme)

### **2.2.2. Projektanforderungen**

- Hinweis auf einzuhaltende gültige eidg. und kantonale Vorschriften
- Grunddatensatz Kanton, Datenformate, Datenschnittstellen für die verschiedenen photogrammetrischen Produkte
- Bearbeitungssperimeter
- Verbindliche übergeordnete Vorgaben betr. Methode, Zeitplan, Parameter usf.
- Besondere Anforderungen (z.B. Koordinationsbedarf mit weiteren Arbeiten)

### **2.2.3. Leistungsbescrieb (Technische Spezifikationen für die Ausschreibung)**

Aufgelistet gemäss photogrammetrischer Prozesskette. Der Unternehmer muss aus dem Beschrieb genügend über die zu leistende Arbeit informiert werden. Alle prozessrelevanten Vorgaben müssen klar umschrieben sein und keine Fragen offen

lassen. Ihre Ableitung erfolgt aus den Prozessphasen (vgl. Abschnitt 1.2). Die Vorgaben enthalten auch die zugehörigen Produkte.

Der Leistungsbeschreibung trägt der Honorierung Rechnung und stellt eine möglichst einfache Beziehung her zu einem Angebotsformular. Preisbildende Elemente müssen im Leistungsbeschreibung mit der abgeschätzten Anzahl quantifiziert werden.

Der Leistungsbeschreibung schliesst mit dem Lieferumfang, inkl. den geforderten Datenformaten, Datenmedien etc..

### **2.3. Bemerkungen zur Ausschreibung**

Die nachfolgenden Bemerkungen zum Verfahren und zu den Anforderungen an eine Ausschreibung sind als allgemein gültige Hinweise gedacht. Sie sind in Abhängigkeit der anzuwendenden Submissionsgesetzgebung (Bund, Kantone, Gemeinden) zu überprüfen.

Neben den technischen Spezifikationen sind folgende weiteren Inhalte Gegenstand einer Ausschreibung:

- Anzuwendendes Submissionsrecht
- Name und Anschrift der auftraggebenden Stelle
- Bezeichnung einer Auskunftsstelle
- vorgesehene Verfahrensart (offenes, selektives und freihändiges Verfahren)
- Gegenstand und Umfang des Auftrages, Varianten und Nebenarbeiten
- Ausführungs- und Liefertermine
- Sprache des Vergabeverfahrens
- Wirtschaftliche, technische und ökologische Anforderungen sowie verlangte finanzielle Garantien und Angaben (z.B. Firmenportrait, bekannte Subunternehmer, Referenzen, Technische Lösung, Bestätigung Termine)
- Eignungs- und Zuschlagskriterien
- Allfällige weitere bei der Arbeitsvergabe zu berücksichtigende objektive Umstände
- Selbstdeklaration (Erklärung über die Erfüllung der Pflichten gegenüber Staat, Sozialversicherung und Arbeitnehmenden)
- Ort und Zeitpunkt für die Einreichung der Angebote
- Dauer der Verbindlichkeit des Angebotes
- Zahlungsbedingungen
- Allfällige allgemeine Vertragsbestimmungen

Den Ausschreibungsunterlagen ist eine detaillierte Aufzählung aller abgegebenen Unterlagen beizulegen.

Den Anbietenden sind angemessene Fristen für die Ausarbeitung der Angebote einzuräumen, in der Regel 4 bis 5 Wochen ab Publikation (resp. direkter Mitteilung) bis zur Einreichung.

### 3. Signalisierung und Bildflug

#### 3.1. Methoden

##### Planung

Die Signalisierungs- und Bildflugplanung können in der Regel nach einem einheitlichen Verfahren durchgeführt werden. Abweichungen vom Standardverfahren sind in den folgenden Punkten notwendig:

- Passpunktplanung – unterschiedliche Anforderungen bei einer Befliegung mit oder ohne GPS-Stützung
- Wahl der Signalgrösse – unterschiedliche Signalgrössen für eine anschliessende Aero-triangulation mit einem analytischen oder digitalen Auswertesystem

##### Realisierung

Einen konkreten Einfluss auf die Durchführung von Bildflügen hat eine allfällige Verwendung von GPS zur Bildflugnavigation und eventuell sogar zur genauen Sensorpositionierung (vgl. auch Kapitel Aero-triangulation). Einflussgrössen sind dabei:

- Bildflug mit / ohne (D)GPS-Navigation
- Navigationsgenauigkeit: DGPS 1-5 m, GPS 50 (-100) m
- Steuerung des Flugzeugs mit/ohne Autopilot

#### 3.2. Problemstellen

Bekannte Problemstellen bei der Planung und Realisierung eines photogrammetrischen Bildfluges sind:

##### Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Höhenpasspunktconfiguration

Bei Bildflügen ohne GPS-Stützung sind die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Höhenbestimmung im Bildblock erfahrungsgemäss kritische Punkte. Aus diesem Grund ist der Anordnung und Bestimmung der Höhenpasspunkte besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

##### Bewegungsunschärfe

In der Luftbildphotogrammetrie treten beträchtliche Relativbewegungen zwischen den aufzunehmenden stationären Objekten und der bewegten Kamera auf. Diese Relativbewegungen bewirken im Bild eine Bewegungsunschärfe (Bildwanderung) in Flugrichtung, welche von Geschwindigkeit, Belichtungszeit und Bildmassstab abhängt. Bei hohen Aufnahmegeschwindigkeiten in Kombination mit grossen Bildmassstäben sollte daher das eingesetzte Kamerasystem über eine Vorrichtung zur Kompensation der Bildwanderung (FMC = forward motion compensation) verfügen.

##### Belichtungssteuerung

Die optimale Belichtungssteuerung ist einer der heikelsten und anspruchsvollsten Punkte der Bildaufnahme und ist daher weitgehend Expertensache. Die beiden Hauptansätze sind:

- **automatische Belichtungssteuerung** – Bei Operaten mit relativ gleichförmiger Textur (Wiese / Wald) ist eine automatische Belichtungssteuerung in der Regel

problemlos und somit das bevorzugte Verfahren.

- **manuelle Belichtungssteuerung bzw. Festhalten der Belichtungswerte** – Bei Aufnahmen mit grösseren Gewässeranteilen (z.B. Seeanstoss) kann die automatische Belichtungssteuerung zu sehr starken radiometrischen Unterschieden zwischen benachbarten Bildern führen. Diese Unterschiede wirken sich negativ auf die weiteren Verarbeitungsschritte aus (z.B. DTM- und Orthophotogenerierung) und können diese – im schlimmsten Fall – sogar verunmöglichen. Die Problematik der Belichtungssteuerung ergibt sich auch in dicht besiedelten Gebieten mit starken Helligkeitsunterschieden zwischen stark reflektierenden Oberflächen (z.B. Dächern) und dunkeln, abgeschatteten Bildausschnitten. Bei derartigen Operationen ist deshalb eine manuelle Belichtungssteuerung bzw. das Festhalten vorgegebener Belichtungswerte vorzuziehen.

### Filmmaterial

Bei der Wahl des optimalen Filmmaterials für eine photogrammetrische Befliegung muss in der Regel auf das entsprechende Know-how des Bildflugunternehmers abgestützt werden. Die Auswahlkriterien umfassen:

- Masshaltigkeit
- Farbfilm: Farbwiedergabe (Achtung: mögliche radiometrische Probleme bei der Mischung von Filmmaterial verschiedener Hersteller, insbesondere bei etappierten Projekten)
- Verwendung von Schwarzweissfilm für höchste geometrische Anforderungen
- Anforderungen an die Entwicklung (Speziallabor, Zeitdauer, Verschmutzung der Originalnegative bzw. Diapositive, etc.)

### 3.3. Anforderungen

Die Anforderungen an die Bildflug- und Signalisierungsplanung ergeben sich normalerweise **aus den Anforderungen an die Endprodukte** eines photogrammetrischen Projekts, also zum Beispiel der geometrischen Auflösung der Orthophotos oder der Genauigkeit der zu erfassenden Höheninformationen (vgl. auch Bemerkungen zu potentiellen Zielkonflikten in 2.1.1).

Die Zielgrössen bei der Formulierung dieser Anforderungen sind:

- die gewünschte Aufnahmegeometrie (Normalwinkel, Weitwinkel, etc.)
- die geforderte Genauigkeit und Zuverlässigkeit
- die gewünschte geometrische Auflösung des digitalen Bildmaterials
- Informationsgehalt des Bildmaterials (Farbe, Terrain, Vegetation, etc.)

Aus diesen Zielgrössen ergeben sich:

- Zeitpunkt der Befliegung
- Objektivbrennweite
- Bildmassstab
- Flughöhe und evtl. Flugzeugtyp
- Längs- und Querüberdeckung

- Passpunktdichte
- Filmmaterial

Einige dieser Aspekte werden nachfolgend etwas detaillierter behandelt:

### **Zeitpunkt der Befliegung**

Zu den Aspekten, welche bei der Festlegung des Befliegungszeitpunktes zu berücksichtigen sind, gehören:

- mit / ohne Vegetation
- Vegetationszustand (speziell bei Infrarotaufnahmen)
- Schneebedeckung
- Schattenlängen (Tages- und Jahreszeit)
- Sichtbarkeit im Schatten
- Hot Spot (vgl. Abschnitt 7.2.2)

### **Flugplan**

Der Flugplan sollte folgende Elemente enthalten:

- Projektperimeter
- Bildmassstab
- nummerierte Fluglinien mit beschrifteten Flughöhen
- erste und letzte Bildposition pro Fluglinie
- Längsüberdeckung (in %)
- zu verwendende Kammerkonstante
- zu verwendendes Filmmaterial (SW, F, IR)

### **Passpunktdichte und -verteilung**

Die erforderliche Passpunktdichte und insbesondere die Höhenpasspunktconfiguration hängen sehr stark von der gewählten Querüberdeckung (Q) ab und davon, ob die Befliegung mit oder ohne GPS-Stützung durchgeführt wird. Im Sinne der Methodenfreiheit sollte deswegen keine feste Vorgabe betreffend der Anzahl zu signalisierender Passpunkte gemacht werden.

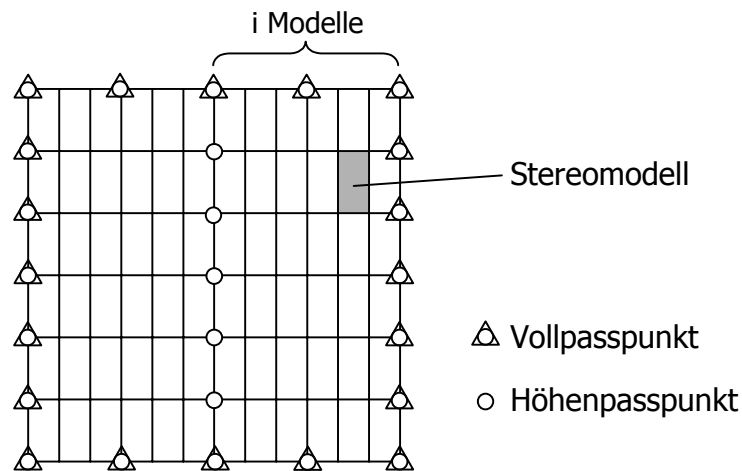


Abbildung 1: Passpunktverteilung in einem Block ohne GPS-Stützung mit Querüberdeckung 20%

| Befliegung                    | Einflussgrößen & Anforderungen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Q &lt; 50 % / ohne GPS</b> | <p>Bei Befliegungen mit Querüberdeckungen von 20-30% sollten Höhenpasspunkte im Blockinnern in der Form von Passpunktketten (quer zur Streifenrichtung) signalisiert werden (vgl. Abbildung 1). Die resultierende Höhengenaugkeit im Block wird dabei primär durch den Abstand <math>i</math> der Höhenpasspunktketten bestimmt (<math>i</math> = Anzahl Stereomodelle zwischen zwei Passpunktketten). Eine Abschätzung für die Größenordnung des durchschnittlichen (<math>\sigma_{B,Z,Mittel}</math>) und des maximalen (<math>\sigma_{B,Z,Max}</math>) zu erwartenden mittleren Höhenfehlers in einem Block wird durch die folgenden einfachen Formeln ermöglicht (aus Kraus, Bd. 1).</p> $\sigma_{B,Z,Mittel} = (0.34 + 0.22 \cdot i) \cdot \sigma_{M,Z}$ $\sigma_{B,Z,Max} = (0.27 + 0.31 \cdot i) \cdot \sigma_{M,Z}$ <p>Als Berechnungsbasis dient der mittlere Höhenfehler im Einzelmodell (<math>\sigma_{M,Z}</math>), wofür die folgenden Richtgrößen verwendet werden können:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>analytische Photogrammetrie: <math>\pm 0.03 \text{ ‰ } h_G</math></li> <li>digitale Photogrammetrie: <math>\pm 0.03 - 0.05 \text{ ‰ } h_G</math></li> </ul> <p><b>Anforderungen</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Mit dem geplanten Abstand der Höhenpasspunktketten müssen die Anforderungen an die Höhengenaugkeit (z.B. für die nachfolgende DTM-Generierung) erfüllt werden.</li> <li>Höhenpasspunkte sind wenn immer möglich in den Streifenüberlappungsbereichen zu platzieren.</li> <li>Die Passpunktconfiguration muss auch dem Aspekt der Zuverlässigkeit Rechnung tragen (einzelne zerstörte, nicht sichtbare oder grob falsche Passpunkte). Diesem Aspekt</li> </ul> |

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                               | muss durch zusätzliche Passpunkte (z.B. Doppelsignalisierungen) Rechnung getragen werden.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Q &gt; 50 % / ohne GPS</b> | <b>Anforderungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bei einer Querüberdeckung von über 50% reduziert sich die Anforderung der Höhenpasspunktketten mit Passpunkten in jedem Streifenüberlappungsbereich auf ein regelmässiges <b>Höhenpasspunktgitter</b>. In diesem Höhenpasspunktgitter sollte der Punktabstand in Analogie zu den obigen Berechnungen maximal i Modelle betragen.</li> </ul>                                                                                                  |
| <b>mit GPS-Stützung</b>       | <b>Anforderungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduzierte Passpunktzahl, theoretisch keine Höhenpasspunkte in der Blockmitte erforderlich.</li> <li>Für die Aufdeckung bzw. Vermeidung systematischer Fehler in den Koordinatentransformationsparametern, in den Koordinaten der GPS-Referenzstation(en) etc. und zur unabhängigen Kontrolle der erzielten Genauigkeiten ist die Verwendung mehrerer über den ganzen Perimeter verteilter Passpunkte dennoch dringend empfohlen.</li> </ul> |

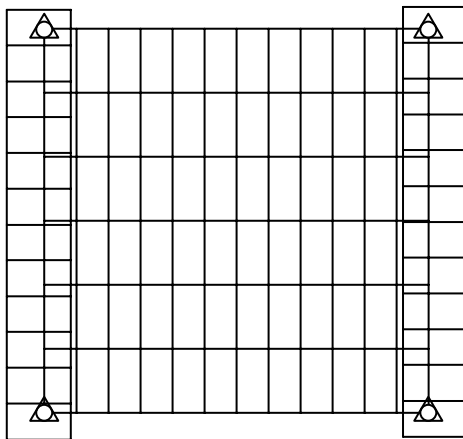


Abbildung 2: Passpunktverteilung in einem Block mit GPS-Stützung und Querstreifen

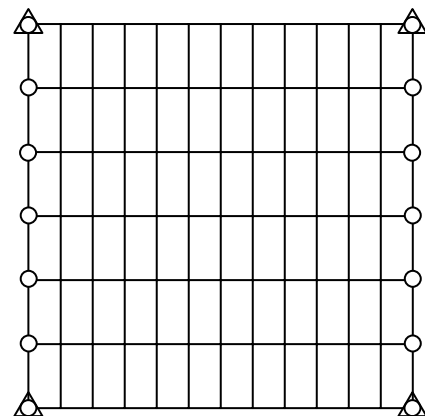


Abbildung 3: Passpunktverteilung in einem Block mit GPS-Stützung ohne Querstreifen

### Passpunktgruppen

Die Verwendung von Höhenpasspunktgruppen, anstelle von einzelnen Passpunkten, ermöglicht eine Steigerung der Zuverlässigkeit mit relativ bescheidenem Zusatzaufwand. Passpunktgruppen sind speziell angezeigt, wo mit Verdeckungen durch Verkehr oder mit Sichtbehinderungen durch Gebäude oder Vegetation gerechnet werden muss.

### Passpunktbestimmung

Bei der geodätischen Passpunktbestimmung sollten:

- die Zuverlässigkeit durch eine geeignete Messanordnung gewährleistet werden (z.B. durch Doppelbestimmung)

- über den ganzen Projektperimeter ein möglichst optimaler Anschluss an bestehende Fixpunktnetze gewährleistet werden
- allfällige Offsetmessungen, insbesondere die Bestimmung der Abstiche, sorgfältig dokumentiert werden
- die Passpunktkoordinaten zusammen mit den entsprechenden Versicherungskrokis für eine Wiederverwendung in Folgebefliegungen archiviert werden

### Signalgrösse

Die Signalgrösse ist abhängig vom Bildmassstab, vom Kontrast und davon, ob die Bilder analog oder digital ausgewertet werden sollen. In Folge der Überstrahlung werden künstliche Signale im Bild – je nach Kontrast – mit einem 1.5- bis 3-fachen Durchmesser abgebildet.

- analoge Photogrammetrie (analoge Bilddaten)
  - Für die analoge Bildauswertung beträgt die Zielgrösse für Signale im Bild ca. 50  $\mu\text{m}$ .
  - **Faustregel:** Signaldurchmesser  $d$  [cm] =  $m_B / 300$  bis  $600$   
(Der Variable Nenner trägt dem unterschiedlichen Kontrast Rechnung.)
  - Beispiele:
    - kleinmassstäblicher Bildflug  $m_B = 30'000 \Rightarrow d = 50 - 100 \text{ cm}$
    - grossmassstäblicher Bildflug  $m_B = 4'000 \Rightarrow d = 7 - 13 \text{ cm}$
- digitale Photogrammetrie (digitale Bilddaten)
  - Signalgrösse abhängig von Bildmassstab und Scanauflösung.
  - **Faustregel:** ca. 3 Pixel Durchmesser
  - Beispiele:
    - $m_B = 7'000 \Rightarrow d = \text{ca. } 25 \text{ cm}$
    - $m_B = 10'000 \Rightarrow d = \text{ca. } 50 \text{ cm}$
    - $m_B = 30'000 \Rightarrow d = \text{ca. } 100 \text{ cm}$

### Signalisierung

Bei der Signalisierung ist auf einen guten Kontrast zwischen Signal und Untergrund zu achten. Insbesondere auf ausgebleichten Teerflächen ist evtl. eine schwarze "Grundierung" anzubringen.

### GPS-Stützung

Bei GPS-gestützten Bildflügen sind die folgenden Aspekte zu beachten:

- nach Möglichkeit Einsatz von zwei GPS-Referenzstationen (als Backup im Falle eines Systemausfalls)
- bei hohen Genauigkeitsanforderungen bzw. grossen Bildmassstäben sollte(n) sich die GPS-Referenzstation(en) im Projektperimeter befinden
- bei der Koordinatenbestimmung muss die Referenzstation in das Passpunktnetz eingebunden werden (einheitliches Bezugssystem)
- Verwendung eines genauen Geoidmodells für die Höhenauswertung aus der GPS-Positionierung
- Dokumentation des Kameraoffsets (GPS – Kameraprojektionszentrum)
- evtl. unabhängige Auswertung mit zweiter Referenzstation und Dokumentation des

---

Koordinatenvergleichs

### 3.4. Empfehlungen

#### **Zeitpunkt der Befliegung**

Für Ersterhebungen und erstmalige periodische Nachführungen in der amtlichen Vermessung (DTM-Auswertung, Auswertung von natürlichen Eigentums Grenzen) dürfte sich die vegetationslose Zeit, resp. der Zeitraum vor Vegetationsbeginn (Laubaustrieb), aufdrängen. Spätere Befliegungen, in welchen farblich optimale Orthophotos im Vordergrund stehen, sollten in der Vegetationsperiode durchgeführt werden.

#### **Besondere Anforderungen**

Auf besondere Anforderungen (z.B. guter Kontrast in schattigen Bildregionen, manuelle Belichtung, Befliegung von Stadtgebieten bei Zirrenbewölkung) ist bei der Ausschreibung speziell hinzuweisen.

#### **Archivierung der analogen Bilder**

Bei der Archivierung der analogen Bilddaten ist zu überlegen, ob die Dienstleistungen eines professionellen Bildarchivs in Anspruch genommen werden sollten. Das Bildmaterial sollte langfristig nicht beim Unternehmer belassen werden.

### 3.5. QS-Methoden und -Massnahmen

#### 3.5.1. Planung

Vor der Durchführung des Bildfluges sollten mindestens die folgenden Elemente überprüft werden:

##### **Signalisierungsplanung**

- Signalgrössen
- Signalisierungsmaterial und -farbe

##### **Passpunktanordnung**

- Dokumentation der geplanten Passpunktanordnung
- A priori Abschätzung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der vorliegenden Passpunktanordnung
- Beschreibung der Massnahmen zur Gewährleistung der Zuverlässigkeit

##### **Flugplan**

- Einhaltung der Anforderungen betreffend Flughöhe, Massstab und Überdeckungen – letztere speziell in schwieriger Topographie

Zustellung der Plandokumente Flugplan und Signalisierungsplan im Entwurf an die Vermessungsaufsicht zur Genehmigung.

### 3.5.2. Bildflug

#### **Bildmaterial und Entwicklung**

- verwendeter Filmtypus (Material, Masshaltigkeit)
- Filmentwicklung (Labor, etc.)
- Bei hohen Qualitätsanforderungen: evtl. Aufbelichten eines Farbkeiles bzw. Graukeiles am Filmanfang zur Kontrolle der Dichtewerte.

#### **Kalibrierungsprotokoll**

- nicht älter als 5-6 Jahre
- evtl. häufiger bei Projekten mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen
- hängt stark von der Kamera ab

#### **Flugrapport**

Prüfen auf besondere Vorkommnisse während des Bildfluges (z.B. Wolken, Störungen, etc.)

#### **Passpunktkonfiguration**

Überprüfung der definitiven Passpunktanordnung und Begründung allfälliger Abweichungen von der ursprünglichen Planung. Analyse der durchschnittlichen und maximalen Anzahl Modelle bzw. Basislängen zwischen Höhenpasspunkten bzw. Höhenpasspunktketten.

#### **Bildmittenübersicht / Flugbildindex**

Einhalten des Flugplans: Stichprobenweise Kontrolle der Längsüberdeckung und Querüberdeckung auf Bildpaaren

#### **Bildabnahme**

- Visuelle Qualitätsprüfung des Bildmaterials auf Leuchttisch mit Vergrößerung z.B. auf Streifen verursacht durch Staubkörner, etc.
- Beurteilung der Bildqualität evtl. unter Beizug des Auftraggebers.

### 3.5.3. Passpunktbestimmung

#### **Prüfung der Lagerung**

- Lagerung bzw. Anschluss an das übergeordnete Fixpunktnetz
- Dokumentation der verwendeten Koordinatensysteme (WGS-84, LV95, LV03) und der vorgenommenen Koordinatentransformationen
- Dokumentation der Höhenbestimmung, insbesondere bei GPS-Stützung (verwendetes Geoidmodell, Höhentransformationen)

#### **Kontrolle der Koordinatenbestimmung**

- Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsnachweis (spez. für neu bestimmte Punkte, Transformationen und deren Resultate, Genauigkeit der Einpassung in bestehende geodätische Netze)

### **3.6. Dokumentation**

#### **Signalisierung**

Dokumentation der realisierten Signalisierung:

- Signalisierungskrokis
- Einmessungen
- Abstiche
- Begründung von Abweichungen gegenüber der Signalisierungsplanung

#### **Geodätische Passpunktbestimmung**

Die Dokumentation der geodätischen Passpunktbestimmung sollte mindestens die folgenden Punkte umfassen:

- definitiver Passpunktplan mit Unterscheidung nach Vollpasspunkten und Höhenpasspunkten
- Passpunktberechnungen inkl. Kontrollen
- Verzeichnis der Passpunkte mit Lagekoordinaten, Qualitätsattributen (Genauigkeit, Zuverlässigkeit), Artcode, Herkunft, Fixpunkthöhe, Signalthöhe und Abstich

## 4. Scanning

Die Digitalisierung der analogen Bilddaten mittels Scanner ist zu einem zentralen Element fast sämtlicher Photogrammetrieprojekte geworden. Der Scanvorgang ist ein wichtiger Prozess, da geometrische und radiometrische Qualitätsverluste in dieser Phase im Nachhinein nicht mehr oder nur noch sehr bedingt rückgängig gemacht werden können.

### 4.1. Methoden

Die hohen optischen und mechanischen Anforderungen, welche in der analogen Photogrammetrie an die Auswertesysteme gestellt werden, müssen in der digitalen Photogrammetrie durch die Scanner befriedigt werden. Für das Scannen photogrammetrischer Analogbilder kommen daher primär Flachbettscanner der folgenden Typen in Frage:

- photogrammetrische Spezialscanner: sehr hohe geometrische Auflösung, mittlere bis hohe radiometrische Auflösung
- Desktop Publishing Scanner (DTP-Scanner): sehr hohe radiometrische Auflösung, reduzierte geometrische Auflösung

Für Projekte mit hohen geometrischen Anforderungen (Aerotriangulation, DTM-Generierung) sollten nur kalibrierte photogrammetrische Scanner eingesetzt werden. Für Projekte mit sehr hohen radiometrischen Anforderungen und reduzierten Genauigkeitsanforderungen, wie zum Beispiel für das Erzeugen von Orthophotos mit einer sehr hohen radiometrischen Qualität, kommen auch hochwertige kalibrierte DTP-Scanner in Frage.

Bei photogrammetrischen Scannern wird zusätzlich unterschieden zwischen:

- Rollfilmscannern und
- Einzelbildscannern

Rollfilmscanner haben insbesondere bei grossen Projekten einige potentielle Vorteile technischer und ökonomischer Natur – vorausgesetzt, die entsprechende Steuerungssoftware kann diese Vorteile auch umsetzen.

### 4.2. Problemstellen

Zu den bekanntesten Problemstellen beim Scannen der analogen Bilder gehören die folgenden Punkte:

#### **Staub / Kratzer**

Eine der grössten Gefahren bilden Beeinträchtigungen und Beschädigungen des analogen Bildmaterials durch Staub und Kratzer **vor** und **während** des Scanvorgangs. Da diese Beschädigungen oft irreversibel sind, sind die folgenden Massnahmen angezeigt:

- Scanvorgang möglichst unmittelbar nach der Entwicklung des analogen Filmmaterials
- staubarme Arbeitsumgebung und sorgfältige Arbeitsweise beim Scanvorgang

#### **Ausrichtung der Bilddaten**

Beim Scanvorgang ist darauf zu achten, dass sämtliche Bilder mit **einheitlicher Ausrichtung** in den Scanner eingelegt werden (z.B. Nebenabbildungen immer links oder Flugrichtung bzw. x-Achse des Bildkoordinatensystems immer nach rechts).

Die Orientierung der Bilder sollte sich auf keinen Fall nach der Streifenausrichtung im

Block richten, d.h. die Scanneroperateure sollten sich überhaupt nicht mit der Flugrichtung der einzelnen Streifen im Block auseinander setzen müssen.

Eine uneinheitliche Ausrichtung der Bilddaten ist vielfach nur schwer zu entdecken, da die Nebenabbildungen beim Scanvorgang oft abgeschnitten werden und da einige Kameras keine nummerierten Rahmenmarken aufweisen.

Eine uneinheitliche Ausrichtung der Bilder hat die folgenden Probleme zur Folge:

- Bei der Rekonstruktion der inneren Orientierung besteht die Gefahr einer **falschen Rahmenmarkenzuweisung** und damit das Anbringen nicht zutreffender Rahmenmarkenpositionen aus der Kamerakalibrierung. Diese Gefahr ist besonders gross bei einer automatischen Rekonstruktion der inneren Orientierung; sie existiert aber auch bei der interaktiven Messung der Rahmenmarken, da die meisten Systeme die ungefähre Position der (vermeintlich korrekten) ersten Rahmenmarke anfahren, bzw. vorschlagen. Eine inkorrekte Rahmenmarkenzuweisung manifestiert sich oft nur in der Form leicht schlechterer Transformationsresultate der inneren Orientierung (grössere Restklaffen, leicht erhöhter mittl. Transformationsfehler).

Währenddem dieser Fehler bei der Bildorientierung normalerweise entdeckt wird, ist die zweite Folge problematischer:

- Die Resultate der Aerotriangulation, insbesondere die Bestimmung von **'zusätzlichen Parametern'**, werden durch eine uneinheitliche Ausrichtung der Bilder signifikant beeinträchtigt. Zusätzliche Parameter werden unter anderem eingeführt, um **systematische Fehler beim Scanvorgang kompensieren** zu können. Diese Kompensation ist jedoch nur bei einer einheitlichen Ausrichtung des Bildmaterials oder bei einer Bestimmung je eines Satzes zusätzlicher Parameter für jede Scanrichtung möglich. Dabei reduziert die zweite Lösung die Redundanz des Lösungssystems und damit die Zuverlässigkeit der geschätzten zusätzlichen Parameter.

### Kompression

Beim Scanvorgang sollten die Bilddaten nicht komprimiert und entsprechend **in unkomprimierter Form archiviert** werden. Für die nachfolgenden Arbeitsschritte sollte – falls überhaupt – eine Komprimierung mit minimalen Verlusten gewählt werden.

Bei einer Verwendung der weit verbreiteten **JPEG-Komprimierung** hat sich gezeigt, dass mit Kompressionsraten von 10–15 (\*) bei Farbbilddaten bzw. <5 bei Schwarzweissbilddaten keine signifikanten Qualitätsverluste auftreten. Von einer Verwendung höherer Kompressionsraten wird jedoch dringend abgeraten!

(\*) komprimierte Datenmenge = 1/10 – 1/15 der Originaldatenmenge

### Radiometrische Eigenschaften

Die radiometrischen Eigenschaften gescannter Bilddaten hängen stark von den entsprechenden Eigenschaften der Originalbilder ab. Hinzu kommen zum Teil auch subjektive Anforderungen, wie zum Beispiel die Farbwiedergabe. Die radiometrischen Anforderungen lassen sich daher nicht in wenigen Worten festlegen.

Sinnvoller ist es, spezielle Anforderungen bei der Ausschreibung festzuhalten, und nach dem Scannen erster Bilder zu verifizieren. Zu den speziellen Anforderungen könnten gehören:

- hoher Kontrast
- gute Sichtbarkeit in Schattenbereichen
- 'Farbechtheit'

- keine Sättigung der Randwerte (z.B. 0 und 255)

### 4.3. Anforderungen

#### 4.3.1. Scanvorgang

Beim Scanvorgang sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Verwendung eines kalibrierten photogrammetrischen Scanners (oder allenfalls eines kalibrierten Hochleistungs-DTP-Scanners bei reduzierten geometrischen Qualitätsanforderungen)
- staubarme Arbeitsumgebung
- sorgfältige Arbeitsweise (die Qualität der analogen Bilddaten darf durch den Scanvorgang nicht beeinträchtigt werden)
- einheitliche Ausrichtung der Bilder im Scanner
- keine Datenkompression beim eigentlichen Scanvorgang
- möglichst hohe Scanauflösung, falls die Daten später weiter verwendet werden sollen (vgl. Empfehlungen)

#### 4.3.2. Datenabgabe

Die gescannten Bilddaten wurden in der Vergangenheit oft nur als Zwischenprodukt auf dem Weg zu den verschiedenen photogrammetrischen Endprodukten betrachtet. Die gescannten Bilddaten stellen jedoch eine sehr **wertvolle digitale Kopie der Originalbilddaten** dar und verdienen daher ein besonderes Augenmerk.

Bei grösseren Projekten mit längerfristiger Bedeutung sollte daher die Abgabe der gescannten Originalbilddaten an den Auftraggeber zur Regel werden. Auch ohne Abgabe der Daten an den Auftraggeber sind die folgenden Aspekte zu berücksichtigen:

- Datenformate
- Datenmedien und Backupmechanismen
- ausführliche Dokumentation der gelieferten Daten

##### **Datenformat**

Auf Grund der zunehmenden Verbreitung grosser Bilddatenfiles wird auch die Fähigkeit der verschiedenen Softwarepakete zur Unterstützung effizienter Codierungen zunehmen. Im Zweifelsfalle, bietet zur Zeit nur die Befolgung der nachfolgenden Regeln einen zuverlässigen Austausch von Bilddaten zwischen verschiedenen Systemen:

- systemunabhängiges Format
- keine Datenkomprimierung
- keine Bildpyramiden
- keine räumliche Bildunterteilung (d.h. kein Tiling)

Empfehlung (Farbbilder): TIFF, 24-bit RGB, unkomprimiert, ohne Bildpyramiden und Tiling

##### **Datenmedien und Backupmechanismen**

Die Wahl geeigneter Datenmedien sollte in bilateraler Absprache zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer erfolgen. Auf Grund der hohen Speicherkapazität bieten sich insbe-

sondere AIT-, DLT- und eventuell DDS/DAT-Medien an.

Bei der Festlegung eines Backup-Formats (z.B. Windows NT Backup oder UNIX tar) ist insbesondere die Übertragung zwischen UNIX- und Windows NT-Umgebungen zu gewährleisten.

#### **4.4. Empfehlungen**

##### **Zeitpunkt des Scanvorgangs**

Das Scannen der Bilder sollte möglichst bald nach der Bildaufnahme erfolgen, um Probleme, wie z. B. Staub und Kratzer zu minimieren. Es ist daher empfehlenswert, den Bildflug und das Scannen der Bilddaten in derselben Projektphase auszuschreiben und zu vergeben.

##### **Scanauflösung**

Bei den heute verfügbaren Speichertechnologien ist zu überlegen, ob das Bildmaterial von Beginn weg mit einer hohen (maximalen) geometrischen Auflösung gescannt werden soll (z.B. generell mit 10 - 15  $\mu\text{m}$ ). Damit wird der 'maximale' Bildinhalt aus den noch neuwertigen Analogbildern extrahiert. Für die Weiterverarbeitung (z.B. Aerotriangulation, DTM-Generierung) kann durch rechnerisches Resampling immer noch eine reduzierte Auflösung verwendet werden.

Bei Projekten im Bereich amtliche Vermessung, Ersterhebung und periodische Nachführung sollte daher grundsätzlich mit einer hohen Auflösung (10 – 15  $\mu\text{m}$ ) gescannt werden.

##### **evtl. Scannerkalibrierung**

Bei grösseren Projekten (> 100 - 200 Bilder) wäre eine separate Scannerkalibrierung vor Beginn und nach Abschluss der Arbeiten denk- bzw. wünschbar. Die Resultate dieser Kalibrierungen sollten im technischen Bericht dokumentiert werden.

##### **Scannen ab Rolle (bei Grossprojekten)**

Wie bereits erwähnt, bietet das Scannen ab Filmrolle bei grösseren Projekten gewisse potentielle Vorteile. Bei einwandfrei funktionierender Steuerungssoftware sind das insbesondere eine regelmässige Filmpositionierung sowie die Möglichkeit einer optimalen Kontrastausnützung. Hinzu kommt ein geringeres Verschmutzungspotential durch das Wegfallen des manuellen Filmhandlings und durch eine geringere statische Aufladung.

#### **4.5. QS-Methoden und -Massnahmen**

##### **4.5.1. Projektausschreibung / Offertstellung**

Im Rahmen der Projektausschreibung und Offertstellung sollten die folgenden Angaben verlangt bzw. geliefert werden:

##### **Technische Angabe zum eingesetzten Scanner**

Scannertyp mit technischen Angaben (geometrische Auflösung, geometrische Genauigkeit, radiometrische Auflösung, Dichtebereich)

##### **Firmeninterne Massnahmen zur Qualitätssicherung beim Scanvorgang**

Angaben zur Scannerkalibrierung, Arbeitsabläufen, etc.

**evtl. Probescans**

Bei grösseren Projekten wäre es denkbar, einen Probescan ab (möglichst) identischem Bildmaterial zu verlangen. Diese Probescans könnten vor der Vergabe inspiziert und verglichen werden. Die Probescans könnten auf die folgenden Aspekte hin untersucht werden: Artefakte, 'Nahtstellen', fehlerhafte CCD-Elemente, Staub, evtl. sogar Untersuchung der geometrischen Genauigkeit, radiometrische Eigenschaften (Grauwertbereich, Kontrast) etc.

*Bemerkung:* Es ist zu berücksichtigen, dass der Aufwand für einen seriösen Vergleich derartiger Probescans sehr hoch ist und dass die Qualität eines einzelnen (mit spezieller Sorgfalt erstellten) Probescans nicht sehr viel über die Qualität der eigentlichen Produktions-Scans aussagen dürfte.

**4.5.2. Abnahme von Testscans**

Wie bereits erwähnt, enthalten die radiometrischen Anforderungen an die gescannten Bilddaten auch eine subjektive Komponente. Bei grösseren Projekten empfiehlt es sich daher, vor Beginn der eigentlichen Scanarbeiten eine Auswahl von Bildern mit unterschiedlichen Scanparametern bzw. -einstellungen zu scannen und diese durch den Auftraggeber abnehmen zu lassen.

Das Scannen der restlichen Bilder sollte erst nach Abnahme dieser Testserie in Angriff genommen werden.

**4.6. Dokumentation**

Bei Vertragsabschluss sollte die Lieferung bzw. der Verbleib der digitalen Bilddaten geregelt werden. In der Regel sind die digitalen Daten an den Auftraggeber abzuliefern. Dabei sind insbesondere Medien und Datenformate festzuhalten.

## 5. Aerotriangulation

Die Aerotriangulation – als Verfahren zur Orientierung von Bildverbänden – stellt zur Zeit eine der wichtigsten und anspruchsvollsten Arbeiten im Ablauf eines Photogrammetrieprojekts dar. Die geometrische Qualität der verschiedenen Produkte hängt massgeblich von einer einwandfreien Aerotriangulation ab.

### 5.1. Methoden

Das Standardverfahren der Aerotriangulation ist heute die Bündelblockausgleichung, eine Gesamtausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate. Unterschiede in den Verfahren betreffen die folgenden Aspekte:

- Passpunkte
- GPS-Stützung
- Messung von Verknüpfungspunkten
- zusätzliche Parameter

#### Passpunkte

Bei der konventionellen Aerotriangulation sind die üblicherweise signalisierten Passpunkte von zentraler Bedeutung. Massgebend für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Aerotriangulation sind dabei deren räumliche Verteilung und Dichte. Bei der GPS-gestützten Aerotriangulation dienen die Passpunkte primär zur Lagerung und Kontrolle der GPS-Positionierung. Auch bei einer direkten Bestimmung der äusseren Orientierung mittels GPS/INS werden Passpunkte als unabhängiges Kontrollmittel ihre Bedeutung nicht ganz verlieren.

#### GPS-Stützung

Das Global Positioning System (GPS) wird heute routinemässig in der Bildflugnavigation und zur hochgenauen Bestimmung der Sensorposition zum Zeitpunkt der Bildaufnahme eingesetzt. Die Positionsbestimmung im cm- bis dm-Bereich kann entweder in Echtzeit erfolgen (Real-Time Kinematic = RTK) oder durch eine nachträgliche differentielle Phasenauswertung (Post-Processing-Modus).

Im Hinblick auf die Aerotriangulation hat die hochgenaue GPS-Positionierung die folgenden Eigenschaften:

- massgebende Steigerung der Höhengenaugkeit und -zuverlässigkeit, vor allem in grossen Bildverbänden
- signifikante Reduktion der Anzahl benötigter Passpunkte und des damit verbundenen Signalisierungs- und Messaufwands
- Stützung / Verbesserung der automatischen Aerotriangulation bzw. der automatischen Verknüpfungspunktbestimmung als Resultat der verbesserten Näherungswerte für die Projektionszentren

#### Messung von Verknüpfungspunkten

In der digitalen Photogrammetrie erfolgt die Messung von Verknüpfungspunkten immer häufiger automatisch. Oft wird eine automatische Verknüpfungspunktmessung mit dem Begriff **automatische Aerotriangulation** gleichgesetzt. Die wichtigsten Eigenschaften der konventionellen und der automatischen Aerotriangulation werden in der Folge kurz

gegenübergestellt:

- automatische Messung (auf der Basis der digitalen Bildzuordnung): Erzielung einer hohen Genauigkeit und vor allem einer ausreichenden Zuverlässigkeit durch eine grosse Anzahl Messungen, eine entsprechend hohe Redundanz sowie eine automatische Fehlersuche und -elimination – üblicherweise auf der Basis robuster Schätzer. Automatisch bestimmte Verknüpfungspunkte sind nicht direkt als Punkte im Bild identifizierbar und können in der Regel nicht für eine spätere interaktive (Nach-) Orientierung oder Lagekontrolle verwendet werden.
- interaktive Messung: Messung einer minimal notwendigen Zahl von Verknüpfungspunkten. Gewährleistung der Zuverlässigkeit primär durch Operateurkontrolle. Zunehmende Kombination von interaktiver Punktwahl mit automatischer Messung der homologen Punkte.

### **Zusätzliche Parameter**

Zusätzliche Parameter erlauben eine Bestimmung und Kompensation systematischer Fehler, welche im Standardmodell nicht erfasst werden. Mit den zusätzlichen Parametern können zum Beispiel Restfehler in den Kamerakalibrierungsparametern, im Filmverzug, in der Refraktion oder systematische Fehler beim Scavorgang oder bei der GPS-Positionierung erfasst und kompensiert werden. Zusätzliche Parameter führen zu widerspruchsfreieren und damit genaueren Resultaten, sie reduzieren aber auch die Redundanz und damit die Zuverlässigkeit der Lösung. Der Einsatz zusätzlicher Parameter erfordert ein entsprechendes Fachwissen.

## **5.2. Problemstellen**

### **Höhengenaugigkeit und -zuverlässigkeit**

Vor allem bei Bildflügen ohne GPS-Stützung ist die Höhengenaugigkeit und -zuverlässigkeit ein heikler Punkt. Oft werden die Dichte und Verteilung der kritischen Höhenpasspunkte im Blockinnern auf den theoretischen Idealfall ausgelegt, wie diese zum Beispiel in Kraus, Band 1 aufgeführt ist. Bei einem Wegfallen von Passpunkten durch Zerstörung oder Abdeckung führt dies jedoch unweigerlich dazu, dass die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen nicht mehr eingehalten werden.

### **GPS-Positionierung**

Zu kritischen Punkten bei einem Einsatz von GPS zur Sensorpositionierung gehören:

- korrekte Bestimmung und Berücksichtigung des Offsets GPS-Antenne - Projektionszentrum
- korrekte Einführung der Projektionszentren als Beobachtungen: Genauigkeiten, Gewichtung
- bei hochgenauen Anwendungen: Sicherstellung, dass die GPS-basierten Zeitkorrekturen an der Referenzstation und im Flugzeug korrekt modelliert werden (keine periodischen Sprünge in der Zeitskala)
- zeitliche Synchronisation der GPS-Positionen mit dem Auslösezeitpunkt (Synchronisationsfehler muss allenfalls durch zusätzliche Parameter geschätzt werden)
- korrekte Behandlung der Datumsproblematik (vgl. unten)

**Geodätische Datumstransformation**

Mit der Einführung von GPS bei der Passpunktbestimmung und vor allem zur Sensorpositionierung ist die geodätische Datumstransformation auch in der Photogrammetrie zu einem zentralen Thema und zu einem möglichen Problempunkt geworden. Kritisch sind insbesondere die folgenden Punkte:

- Lagerung / Einbindung der GPS-Referenzstation(en) in das lokale geodätische Bezugssystem
- korrekte Einführung und Berücksichtigung des Geoids

**Einheitliche Bildausrichtung beim Scanvorgang**

vgl. Abschnitt 4.2

**Kompatibilität der äusseren Orientierungen**

Eine Problematik, welche in der Regel erst nach Abschluss der Aerotriangulation bei der Übernahme der Orientierungsdaten auftaucht, besteht in den unterschiedlichen Hierarchien und Drehrichtungen der Rotationsachsen und natürlich in der Verwendung unterschiedlicher Einheiten.

**5.3. Anforderungen**

Im Sinne der Methodenfreiheit werden hier nur einige Minimalanforderungen aufgeführt:

**Genauigkeit und Zuverlässigkeit**

- die erwartete Genauigkeit in Lage und Höhe sollte auf Grund der Produkthanforderungen spezifiziert werden
- die Gewährleistung der Zuverlässigkeit in Lage und Höhe, d.h. die Fähigkeit der Netzdisposition, einzelne grobe Fehler aufdecken zu können, sollte unbedingt gefordert werden

**Passpunktkonfiguration**

- bezüglich Genauigkeit: genügende Höhenpasspunktdichte, insbesondere bei Querüberdeckungen unter 50% ist darauf zu achten, dass die Höhenpasspunkte möglichst in den Streifenüberlappungszonen liegen
- Zuverlässigkeit: Doppelsignalisierung (als effiziente Massnahme gegen Zerstörung, Sichtbehinderungen, Abdeckung während des Bildflugs durch parkierte Fahrzeuge, etc.)

**GPS-Positionierung**

- Es wird empfohlen, grundsätzlich mit min. 2 Referenzstationen zu operieren, um eine gewisse Ausfallsicherheit zu gewährleisten.
- Mindestens eine Referenzstation sollte sich im Perimeter oder in unmittelbarer Nähe davon befinden. Damit wird eine robustere und genauere Basislinienauflösung erreicht.
- Die Einbindung bzw. Transformation der Referenzstation(en) in das lokale Koordinatensystem ist zu dokumentieren.

**Interaktiv festgelegte Verknüpfungspunkte**

- Bei einer digitalen Triangulation von Bildmaterial, welches später in analytischen Systemen ausgewertet werden soll, sind zusätzlich zu den automatisch bestimmten Verknüpfungspunkten pro Bild bzw. pro Modell eine genügende Anzahl von Verknüpfungspunkten interaktiv festzulegen, um damit eine problemlose Verwendung (Nachorientierung) in analytischen Systemen zu gewährleisten.

**5.4. Empfehlungen****Signalisierung zusätzlicher Kontrollpunkte**

Die Signalisierung – und allenfalls geodätische Bestimmung – zusätzlicher Kontrollpunkte durch den Auftraggeber stellt eine effiziente und gleichzeitig kostengünstige QS-Massnahme dar. Die zusätzlich signalisierten Punkte sollten dabei bewusst nicht Bestandteil der Signalisierungsplanung des Photogrammetrieunternehmens sein, um eine möglichst unabhängige Kontrolle zu ermöglichen. Als Bestandteil des Aerotriangulationsauftrags könnten dem Photogrammetrieunternehmen die ungefähren (oder exakten) Lagekoordinaten dieser Punkte zusammen mit Passpunktkrokis zur koordinatenmässigen Bestimmung übergeben werden. Die zusätzlichen Kontrollpunkte sollten in der Bündelblockausgleichung als Neupunkte ausgewiesen werden.

Im Notfall könnten diese Punkte – nach Absprache – sogar zur zusätzlichen Stützung der Aerotriangulation herangezogen werden.

**5.5. QS-Methoden und –Massnahmen**

Die Qualitätssicherung im Bereich Aerotriangulation stützt sich schwergewichtig auf die entsprechende Dokumentation ab. Aus diesem Grund werden im anschliessenden Abschnitt die zu dokumentierenden Informationen entsprechend detailliert aufgeführt.

Zu den zusätzlichen, weitgehend unabhängigen QS-Massnahmen, welche sich allenfalls anbieten, gehören:

**Kontroll- bzw. Checkpunkte**

Nachweis der Passpunktgenauigkeit durch Unternehmer mittels minimal gelagerter AT-Lösung, restliche Passpunkte als Checkpunkte mit ausgewiesenen Restklaffen (Achtung: diese Checkpunkte sind durch die räumliche Nähe mit den Passpunkten korreliert. Der Genauigkeitsnachweis hat zwingendermassen mit zusätzlichen unabhängigen Kontrollpunkten zu erfolgen! Bei GPS-Stützung sind die Kontrollpunkte am besten in der Blockmitte, evtl. auch am Blockrand.)

**DTM-Generierung**

Eine effiziente nachträgliche Überprüfung der Höhengenaugkeit kann auch mit Hilfe automatisch generierter DTMs erfolgen. Dies sollte jedoch nur in Zweifelsfällen notwendig sein.

- Identifikation von Testgebieten mit existierenden (jedoch möglichst genauen) Höheninformationen
- automatische Generierung eines DTMs für die Testgebiete unter Verwendung der äusseren Orientierungen aus der AT
- Untersuchung der Höhenunterschiede

## 5.6. Dokumentation

Bei der Dokumentation der Aerotriangulation ist es besonders wichtig, dass die Resultate nicht nur in Form von Listings dem technischen Bericht beigelegt werden. Vielmehr sind durch den Unternehmer die wichtigen Informationen aus diesen Listings zu extrahieren, übersichtlich zusammenzustellen, zu interpretieren und zu beurteilen.

Die Dokumentation einer Aerotriangulation umfasst im Minimum:

- Projektzusammenstellung bzw. -statistik: Anzahl Bilder, Anzahl Passpunkte (Voll, Lage, Höhe, verwendet, nicht verwendet)
- Kamerakalibrierungsprotokoll
- eingesetzte Software
- Listings der Bündelblockausgleichung

### Punktmessung

- Anzahl Verknüpfungspunkte pro Bild bzw. pro Modell (min. / durchschnittl.)
- Genauigkeit der Punktmessung

### Resultate der Bündelblockausgleichung

- mittl. Fehler a priori
  - der Gewichtseinheit (Sigma0) (\*)
  - mittl. Passpunktfehler
- mittl. Fehler a posteriori
  - der Gewichtseinheit (Sigma0)
  - mittl. Passpunktfehler
- Anz. verwendete / nicht verwendete Passpunkte (inkl. Begründung)
- Redundanz (Freiheitsgrad / Überbestimmung)
- Zusammenstellung
  - durchschnittl. Anz. Bildstrahlen pro Punkt
  - Statistik der Anz. Bildstrahlen pro Punkt (2 – max.)
- Restklaffen / Verbesserungen Passpunkte
- Restklaffen / Verbesserungen Checkpunkte
- Restklaffen nicht verwendeter Passpunkte
- graphische Ausgabe der AT-Resultate anstreben: Lage Passpunkte, Restklaffen, Lage und Qualität der Verknüpfungspunkte (Probleme: wird von kommerziellen AT-Programmen noch kaum unterstützt; Papierflut bei grafischen Plots !)
- Dokumentation und Begründung aufgetauchter Probleme

(\*) Sigma0 (od.  $\sigma_0$ ) bezeichnet den mittleren Fehler der Gewichtseinheit in einer Bündelblockausgleichung. In aller Regel entspricht dies dem mittleren Fehler einer Bildkoordinatenbeobachtung ( $x'$ - oder  $y'$ -Beobachtung). Sigma0 wird normalerweise in  $\mu\text{m}$  angegeben.

**GPS-gestützte Aerotriangulation**

- Anzahl und Lage der verwendeten Referenzstation(en)
- Positionsbestimmung der Referenzstation(en) und Einbindung in das Passpunktsystem
- eingesetzte GPS-Empfänger
- Datenerfassung (Beobachtungsintervalle, Satellitengeometrie während des Bildfluges, besondere Vorkommnisse)
- eingesetzte Auswertesoftware, Berechnungsmethode
- Offsetberechnungen (Referenzstationen, sowie GPS-Antenne – Kamera)
- verwendete Koordinatensysteme und Transformation in das lokale Koordinatensystem
- verwendetes Geoidmodell (evtl. mit Genauigkeitsangabe)
- Kontrollen: Vergleich der Lösungen bei Verwendung mehrerer Referenzstationen
- Beobachtung der Projektionszentren:
  - mittl. Fehler a priori (aus der GPS-Auswertung)
  - mittl. Fehler a posteriori
  - Verbesserungen
- Beurteilung der Resultate

**Zusätzliche Parameter**

Bei einer Verwendung zusätzlicher Parameter als Bestandteil der Bündelblockausgleichung sind insbesondere zu dokumentieren:

- Art und Anzahl der verwendeten zusätzlichen Parameter
- Anzahl der verwendeten Sätze an 'zusätzlichen Parametern'
- Beurteilung der erzielten Resultate

## 6. DTM-Generierung

### 6.1. Gegenüberstellung DHM, DGM/DTM, DOM

Zu räumlichen Beschreibung der Erdoberfläche und der Oberflächen anderer geometrischer Objekte werden eine Reihe von Modellen mit den entsprechenden Abkürzungen verwendet. In der Folge werden die wichtigsten Modelle kurz charakterisiert:

DHM = Digitales Höhenmodell

Modell zur Repräsentation der Höhen (z-Werte) allgemeiner Oberflächen. Bei diesen Oberflächen könnte es sich demnach um die Geländeoberfläche, um Grundwasserpegel oder um Schichten der Atmosphäre handeln. (engl. DEM = digital elevation model)

DTM = Digitales Terrainmodell

=

DGM = Digitales Geländemodell

Digitale Terrainmodelle repräsentieren die gewachsene Geländeoberfläche, üblicherweise ohne Kunstbauten (Gebäude, Brücken, etc.) oder Vegetation. Digitale Terrainmodelle verwenden zusätzlich zu den Höhenangaben oft Strukturelemente (z.B. Bruchkanten) zur optimalen Charakterisierung des Geländes. (engl. DTM = digital terrain model)

**Hinweis:** Bei der Informationsebene Höhe der AV93 handelt es sich um ein DTM.

DOM = Digitales Oberflächenmodell

Modell einer beliebigen 3D-Oberfläche. In Zusammenhang mit Geodaten werden Repräsentationen der sichtbaren Oberfläche (inkl. Gebäude, Vegetation, etc.) als Oberflächenmodelle bezeichnet. (engl. DSM = digital surface model)

### 6.2. Methoden

Neben den photogrammetrischen Erhebungsmethoden und der Herleitung von Terrainmodellen aus bestehenden analogen Karten und Plänen, drängen heute neue Methoden wie Laserscanning und Radar (Interferometric Synthetic Aperture Radar = InSAR) auf den Markt. Die Generierung von digitalen Terrainmodellen mit diesen nicht-photogrammetrischen Sensoren wird nur am Rande behandelt. Ein Grossteil der aufgezeigten QS-Verfahren sind jedoch direkt auf diese Technologien übertragbar.

| Erhebungsmethode                                                                                                                                                                                    | Stärken der Methode                                                                                                                                                                                                      | Schwächen der Methode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Modellierung mit Einzelpunkten und Geländelinien<br>(Messungen und Modellierung interaktiv)<br>Automatisch korreliertes Rastermodell aus photogrammetrischen Aufnahmen, interpoliertes Rastermodell | Gute Modellierung des Geländes mit vergleichsweise kleiner Datenmenge.<br>Auch im überbauten Gebiet geeignet.<br>Effiziente Erhebungsmethode in der offenen Flur.                                                        | Relativ aufwändige photogrammetrische oder terrestrische Messungen.<br><br>Je nach Rasterweite gehen topographische Feinheiten des Geländes verloren.<br>Erfordert trotz Filterung Nachbearbeitung für Punkte auf Vegetation und Bauten.<br>In Waldgebieten wird die Vegetationsoberfläche korreliert.<br>Heikler Übergang von der offenen Flur zum Wald.<br>Grosse Datenmengen (abhängig von der gewählten Rasterweite) |
| Digitalisierte Höhenkurven ab bestehenden Karten und Plänen                                                                                                                                         | Kostengünstige Erhebung.                                                                                                                                                                                                 | Die Qualität und Aktualität der bestehenden Höheninformationen wird bestenfalls übernommen.<br>Die Dreiecksvermaschung glättet Runsen und Kreten.<br>Tendenziell werden wenig strukturierte ebene Geländeabschnitte schlecht modelliert.                                                                                                                                                                                 |
| Kombinierte Verfahren                                                                                                                                                                               | Die Kombination verschiedener Erhebungsmethoden stellt heute die Regel dar und erlaubt eine situationsgerechte Modellierung des Geländes.                                                                                | Uneinheitlicher Aufbau und daraus resultierend unterschiedliche Charakteristiken der Terrainmodelle.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Rastermodell aus Laserscan                                                                                                                                                                          | Oberflächenmodell mit hoher Genauigkeit.<br>Die reflektierten Signale erlauben Aussagen sowohl über die Bodenbedeckung wie auch über den gewachsenen (Wald-)Boden.<br>Hohe Zuverlässigkeit (durch hohe Messpunktdichte). | Kurze Reichweite des Scanners und der Wunsch nach minimaler Abschattung erfordern tiefe Flüge und schmale Scanstreifen.<br>Anspruchsvolle Flugplanung und aufwändige Befliegung.<br>Grosse Datenmengen (Massenpunkte).                                                                                                                                                                                                   |

| Erhebungsmethode                        | Stärken der Methode                                                                                                                                                                                                     | Schwächen der Methode                                                                                                                             |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rastermodell aus Radaraufnahmen (InSAR) | <p>Effiziente und kostengünstige Erhebungsmethode für Oberflächenmodelle mittlerer Genauigkeit.</p> <p>Unterschiedliche Wellenlängen erlauben die Erhebung von Informationen über Vegetation und gewachsenen Boden.</p> | <p>Schrägaufnahmen verursachen grosse Abschattungen und erfordern aufwändigen Mehrfachbefliegungen.</p> <p>Grosse Datenmengen (Massenpunkte).</p> |

### Erreichbare Genauigkeiten

Mit den verschiedenen Methoden können schätzungsweise folgende Genauigkeiten erreicht werden:

#### Photogrammetrie (manuelle Auswertung):

Erreichbar sind Genauigkeiten in der Grössenordnung von  $0.2 \text{ ‰}$  der Flughöhe über Grund.

#### Photogrammetrie (automatische Generierung):

Systematische Auswertungen der erreichten Resultate belegen, dass mit der automatischen Korrelation annähernd die gleichen Höhengenaugkeiten erreichbar sind wie mit der manuellen Auswertung, d.h.  $0.2 - 0.3 \text{ ‰}$  der Flughöhe über Grund. Als Problemgebiete der Korrelation erweisen sich Flächen mit schlecht abgebildeter Textur (z.B. Schatten, Überbelichtung, strukturlose Kulturen) und sehr steile Gebiete. In Problemgebieten müssen manuelle Kontrollen vorgesehen werden (die statistisch errechneten Qualitätscode sind unzuverlässig und reichen zum Qualitätsnachweis nicht aus).

#### Laserscanning:

Bei einer Streifenbreite von heute zirka 250 Metern und einer Gitterweite von zirka 1 Meter sind folgende Genauigkeiten erreichbar:

|                                          |                                                        |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Terrainmodell (DTM) in der offenen Flur: | $\pm 0.15$ bis $0.20$ Meter                            |
| Terrainmodell (DTM) im Wald:             | unsicher, je nach Beschaffenheit der Vegetation        |
| Oberflächenmodell (DOM):                 | $\pm 1.5$ Meter, je nach Beschaffenheit der Oberfläche |

#### InSAR:

Mit einer 4-fach Befliegung und einer Gitterweite von zirka  $\frac{1}{2}$  Meter sind heute folgende Genauigkeiten erreichbar:

|                                          |                             |
|------------------------------------------|-----------------------------|
| Terrainmodell (DTM) in der offenen Flur: | $\pm 0.20$ bis $0.50$ Meter |
|------------------------------------------|-----------------------------|

Bei einer geringeren Befliegungsdichte (z.B. nur 2-fach) reduziert sich die

Höhengenaugigkeit entsprechend. Zudem erhöht sich auf Grund der asymmetrischen Aufnahmegeometrie der Anteil systematischer Fehler markant.

### 6.3. Problemstellen

#### **Unterschiedliche Verwendung von Höhendaten**

Je nach Verwendungszweck können die Anforderungen an ein digitales Terrainmodell - nicht nur die Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Daten - unterschiedlich ausfallen (z.B. unterschiedliche Anforderungen für: Terrainmodelle, Oberflächenmodelle, DTM zur Generierung von Höhenkurvenplänen, DTM zur Generierung von Orthophotos, DTM für Ingenieurprojekte).

#### **Anspruchsvoll zu modellierende Geländeteile**

Zu den im Terrainmodell schwierig zu modellierenden Geländeteilen zählen insbesondere starke Gefällsknicke, markante Bruchkanten und Kunstbauten (Bauwerke und Böschungen längs von Strassen und Bahnen, grosse Stützmauern, Brücken).

#### **Modellränder**

Ebenfalls zu den Problemstellen sind die Randgebiete des Terrainmodelles zu zählen. Bei der Perimeterdefinition ist deshalb auf eine ausreichende Überlappungszone zu achten.

Je nach gewählter Erfassungsmethode besteht zudem die Gefahr von Unstetigkeiten an den Rändern der 'Erfassungseinheiten' bzw. der Teilmodelle. Im Falle einer photogrammetrischen Erfassung treten diese Unstetigkeiten primär an den Rändern der einzelnen Stereomodelle auf. Grundsätzlich sollten zur DTM-Generierung nur die zentralen Bildbereiche – innerhalb der Pass- bzw. Orientierungspunkte eines Modells – verwendet werden. Bei grösseren Höhenversätzen zwischen benachbarten Stereomodellen sind unbedingt die äusseren Orientierungen zu überprüfen. Kleinere, visuell störende Unstetigkeiten (im Bereich der Messgenauigkeit) sind mittels Nachbearbeitung aus dem Terrainmodell zu entfernen.

#### **Schwierigkeiten bei der Kontrolle von Terrainmodellen**

Sehr grosse Datenmengen mit minimalen Redundanzen, welche einen direkten Nachweis von erreichten Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten erlauben würden, erschweren die Kontrollarbeiten.

Die Prüfung von zufällig ausgewählten Stichproben kann richtig sein, wenn das Ziel der Kontrolle ein rechnerischer Nachweis von erreichten mittleren Fehlern ist. Eine umfassende Genauigkeitsabschätzung wird oft dadurch erschwert, dass die auftretenden Fehler nicht normalverteilt sind.

Im Hinblick auf die Fragestellung, ob das erhobene Terrainmodell das Gelände - auch in schwierig zu erfassenden Gebieten - richtig abbildet, führt aber das Nachmessen zufälliger Stichproben in der Regel nicht mit vertretbarem Aufwand zum Ziel. Oft muss sich die Verifikation deshalb auf das Auffinden von Problemgebieten und auf die Nachmessung bei Schwachstellen beschränken. Wird das Terrainmodell aber nur in Problemgebieten näher untersucht, wird damit der aus Nachmessungen errechenbare mittlere Höhenfehler ungünstig beeinflusst. Die Beurteilung hat sich deshalb auf die Prüfung der Toleranzeinhaltung zu beschränken.

In der Regel sind die Höhendaten erst in einer aufbereiteten Form weiterzuverwenden (z.B. Dreiecksvermaschung). Dabei kann der Einsatz unterschiedlicher Software-Pakete und damit unterschiedlicher Berechnungsalgorithmen zu verschiedenen Ergebnissen

führen.

### **Äussere Orientierung bzw. Positionierung der Sensoren**

Sowohl bei der Photogrammetrie wie auch bei den neuen Verfahren InSAR und Laserscanning erfolgt die Datenerfassung in den jeweiligen Sensoren. Für die Auswertung der erhobenen Daten muss die Positionierung des jeweiligen Sensors im Raum bekannt sein. In der Regel wird heute die Vermessung der Sensoren mittels RTK-GPS an Bord des Flugzeuges bestimmt. Für InSAR und Laserscanning ist überdies die Orientierung im Raum mit hoch genauen Inertialsystemen nötig.

Unsicherheiten bestehen heute noch bei der Kalibrierung der InSAR- und Laserscanning-Sensoren.

## **6.4. Anforderungen**

Die Anforderungen an die Erstellung von Terrainmodellen sind stark durch die vorgesehene Verwendung der Daten beeinflusst. Folgende Überlegungen sind in der Planung zu berücksichtigen und führen zur Methodenwahl und zu den technischen Spezifikationen:

- Wird ein digitales Terrainmodell oder ein digitales Oberflächenmodell oder sogar beides verlangt?
- Müssen die Höhendaten flächendeckend vorliegen (z.B. Waldflächen, sichttote Räume, Behandlung von Gebäudeflächen im DTM)?
- Sind weitergehende Auswertungen geplant (z.B. 3D-Stadtmodelle, Überflutungskataster)?
- Werden die Daten zur Generierung von Orthophotos benötigt?
- Ist die Generierung von Höhenkurvenplänen vorgesehen?
- Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Daten?
- Anforderungen an den Detaillierungsgrad? (in Abstimmung mit den Genauigkeitsanforderungen)
- Ist die Flächendeckung nachzuweisen und wie sind allfällige Lücken zu behandeln? (z.B. Keine Massnahmen, nur Herkunftsnachweis; Ergänzung aus bestehenden Höhendaten)

## **6.5. QS-Methoden und -Massnahmen**

Die Prüfung von digitalen Terrainmodellen stellt grosse Anforderungen an Wissen und Erfahrung des Verifikators und an die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Rechner und Programme.

Im Sinne des Qualitäts-Managements muss das Schwergewicht auf der Selbstkontrolle durch den Unternehmer und auf dem Nachweis, dass die verlangten Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten erreicht wurden, liegen. Seitens der Aufsicht muss bereits im Zeitpunkt der Arbeitsausschreibung die Ablieferung von geeigneten Dokumenten, welche dem Qualitätsnachweis dienen, verlangt werden.

Für die Verifikation von digitalen Terrainmodellen - unabhängig davon, ob der Qualitätsnachweis beim Unternehmer oder bei der Aufsicht geführt wird - empfehlen wir die folgenden Prüfschritte:

1. Formale Prüfung der abgelieferten Daten

2. Plausibilitätsprüfungen
3. Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsprüfungen

#### 6.5.1. Formale Prüfung der abgelieferten Daten

##### **Vollständigkeitsprüfung**

Wird der verlangte Perimeter, inklusive der im Zeitpunkt der Ausschreibung zu definierende Überlappungsbereich, im Modell vollständig abgebildet.

##### **Datenbeschreibungssprache und Datenformate**

Check-Routinen erlauben die formale Prüfung der Daten bezüglich Syntax, Format und vollständiger Attributierung.

##### **Konsistenztests**

Sich schneidende Bruchkanten oder mehrere Einzelkoten mit identischen Lagekoordinaten deuten auf topologische Fehler hin. Überschneidungen müssen mit GIS-Werkzeugen aufgedeckt und allenfalls bereinigt werden.

##### **Richtige Attributierung der Daten**

Stichprobenweise muss die Attributierung der Daten inhaltlich geprüft werden. Im Hinblick auf die Qualitätsbeurteilung von Höhendaten ist das Wissen um die Herkunft und die Entstehung der Daten wichtig (z.B. Auswertung von Hand (Geländekanten), automatische Korrelation, Planabgriff von Höhenkurven, übernommene Daten aus bestehendem Terrainmodell).

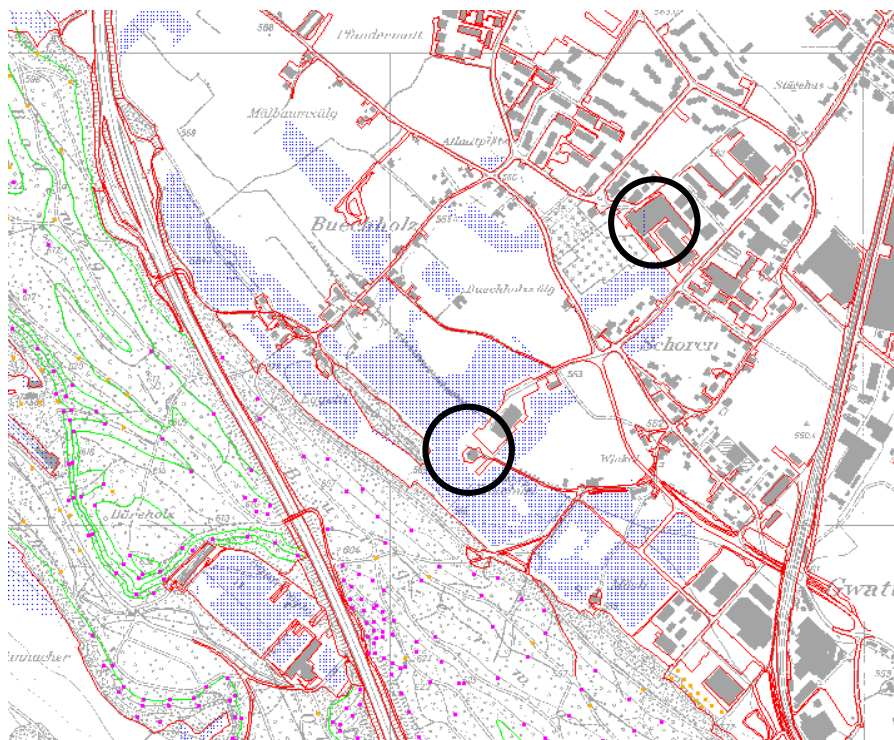


Abbildung 4: Übersichtsplan mit Elementen der Datenerhebung. Untersuchte Problemstellen sind mit dunklen Kreisen markiert (vgl. auch nachfolgende Abbildungen).

### 6.5.2. Plausibilitätsprüfungen im Modell

#### Modellierung des Geländes

Die Beschreibung des Geländes mit Einzelpunkten und Geländelinien erfordert viel Erfahrung und "Gespür"; ebenso die Beurteilung der Qualität eines Terrainmodells durch das reine Betrachten der abgelieferten Messelemente. Dennoch, gewisse Hinweise auf Schwächen in der Modellierung des Geländes können aus dem Aufbau erkannt werden (z.B. fehlende Bruchkanten und Strukturlinien, Höhenkurvenverfassung ohne Geländelinien, Baugebiete ohne Höhenkoten).

Effizient und aussagekräftig können die erhobenen Elemente des Terrainmodells vor dem Hintergrund einer topographischen Karte, allenfalls des Orthophotos beurteilt werden.

#### Berechnung eines Höhenkurvenbildes mit kleiner Aequidistanz

Die Berechnung eines verdichteten Höhenkurvenbildes kann dem Betrachter Hinweise auf Unstetigkeiten und Artefakte geben (z.B. Höhenkoten, welche nicht ins Kurvenbild passen, Plätze und Strassen mit unerklärlichen Neigungen).



Abbildung 5: Höhenkurvenbild mit sehr kleiner Aequidistanz

#### Schräglightschummerung

Eine Schräglightschummerung des Terrainmodells lässt Unstetigkeiten im Modell, besonders im gleichförmigen Gelände und bei unsauberen Übergängen von Teilmodellen, augenfällig zu Tage treten.

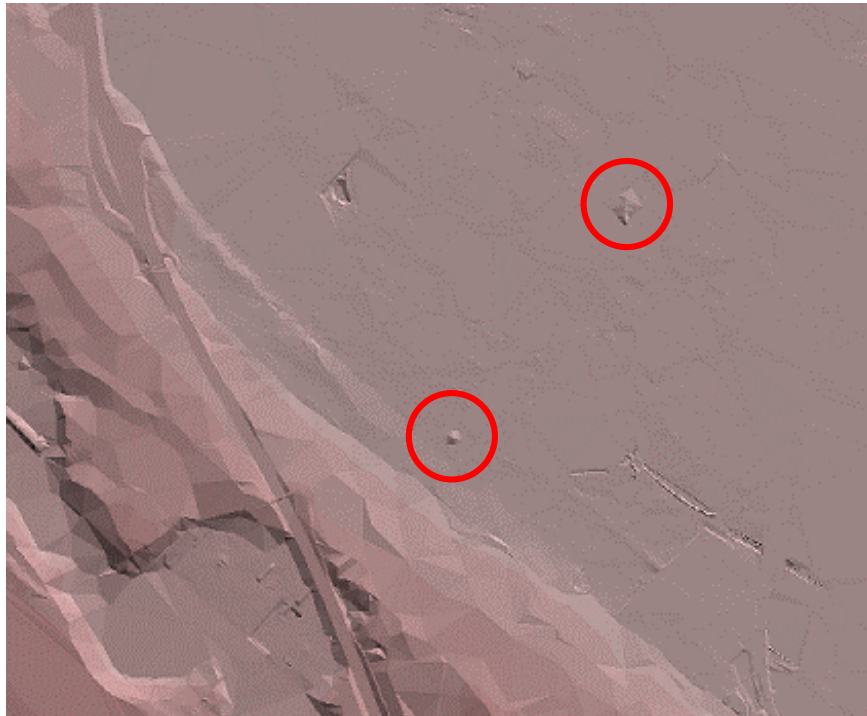


Abbildung 6: Schräglichtschummerung

### 6.5.3. Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsprüfungen

#### **Auffinden möglicher Problemgebiete**

Auf Grund der nachstehenden Überlegungen und Tests können sich Hinweise auf mögliche Problemgebiete ergeben, in denen sich Messungen zur Kontrolle bzw. zur Verbesserung der Geländemodellierung aufdrängen.

- Erfahrungen des Topographen

Aus der Erfahrung sind schwierig zu erfassende Geländeabschnitte bekannt (z.B. starke Gefällsknicke, markante Bruchkanten, Kunstbauten).

- Vergleich der Daten mit bestehenden Höhendaten:

⇒ Der Vergleich mit bestehenden Terrainmodellen

Die Berechnung von Differenzflächen zwischen dem zu prüfenden Terrainmodell und bereits bestehenden, meist ungenaueren, Terrainmodellen erlaubt die Suche nach Gebieten mit grösseren systematischen Abweichungen, welche allenfalls näher abgeklärt werden müssen.

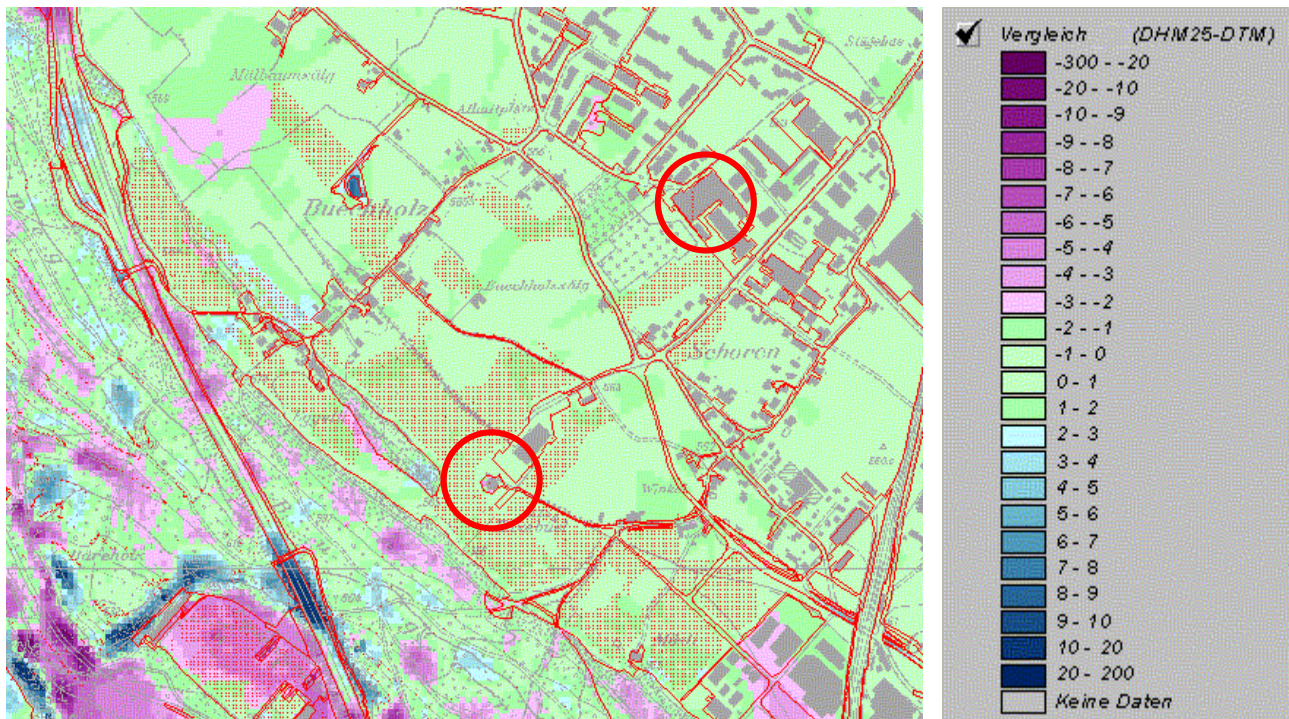


Abbildung 7: Differenzflächen zwischen 2 Terrainmodellen (Differenzklassen in [m]).

⇒ Der Vergleich mit punktuellen Höheninformationen (z.B. Fixpunkthöhen)

Für bekannte Höhenpunkte (z.B. Fixpunkte der amtlichen Vermessung; Unsicherheiten bei den Abstichen) können die entsprechenden Geländehöhen aus dem Terrainmodell interpoliert und mit der Vorgabe verglichen werden.

- Überlagerung der Orthophotos mit Vektordaten

Die Überlagerung der allenfalls erstellten Orthophotos, welche mittels dem zu prüfenden Terrainmodell berechnet wurden, mit vorhandenen Vektordaten - z.B. aus der amtlichen Vermessung - erlaubt eine effiziente Suche nach Problemgebieten.



Abbildung 8: "Ungenaueres" Orthophoto, überlagert mit Vektordaten der AV

### Kontrollmessungen

Bei der Durchführung von Kontrollmessungen sind möglichst unabhängige Messanordnungen (unabhängige Messmethoden, andere geometrische Messbedingungen, unabhängige Operateure) anzustreben.

- Überprüfung des interpolierten Höhenkurvenbildes am digitalen Stereoplotter oder an einem analytischen Plotter mit Bildeinspiegelung.

- Photogrammetrische Kontrollauswertung  
(Möglichst) unabhängige Parallelauswertungen über definierte Testgebiete.
- Terrestrische Profilmessungen oder Flächenauswertungen (z.B. mit RTK-GPS) und Vergleich mit den aus dem Terrainmodell interpolierten Werten.

## 6.6. Dokumentation

Es wird empfohlen, im Rahmen der Arbeitsausschreibung folgende Akten, mit welchen die bürointerne Qualitätssicherung belegt werden soll, zu verlangen:

- Technischer Bericht mit folgendem Inhalt:
  - \* Beschreibung der eingesetzten Erhebungsmethoden und der dazu verwendeten Datengrundlagen.
  - \* Dokumentation der Sensorpositionierung bzw. der Bestimmung der äusseren Orientierung, gegebenenfalls mit Offsetberechnungen (bei photogrammetrischen Projekten sollte dies im Rahmen der Aerotriangulation abgedeckt sein).
  - \* Beschreibung der eingesetzten Hard- und Software, der bürointernen Massnahmen zur Qualitätssicherung und der Prüfergebnisse.
  - \* insbesondere durchgeführte Kontrollmessungen: Passpunkte, Checkpunkte, Verwendung von Test- bzw. Kalibrierungsflächen
  - \* bei automatischer Generierung: Software, Maschenweite, Matchingverfahren (falls bekannt), Einstellungen für Geländetypus, Filterung, etc.
  - \* Dokumentation der Matching-Parameter
- Topographischer Plan des Perimetergebietes mit sämtlichen erhobenen Höhendaten, farblich nach ihrer Herkunft / Entstehung unterschieden (vgl. Abbildung 4).
- Schräglichtschummerung (Top-View) oder Höhenkurvenplan mit kleiner Aequidistanz über den gesamten Perimeter (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6).
- evtl. Plan der Dreiecksvermaschung (vgl. Abbildung 9)

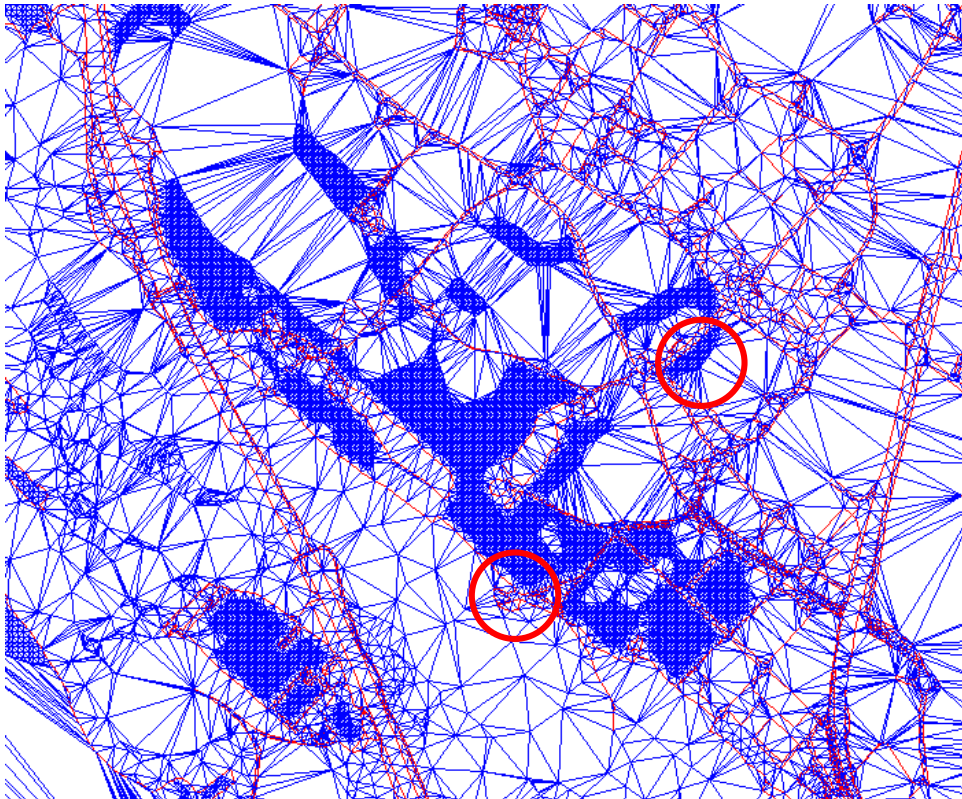


Abbildung 9: Gerechnete Dreiecksvermaschung

- Nachweis der Höhendifferenzen zwischen Fixpunkt- oder Kontrollpunkthöhen und aus dem Terrainmodell interpolierten Terrainshöhen (Hintergrund Perimeterplan).
- Ablieferung der vollständig attribuierten Messdaten (i.d.R. im systemunabhängigen Format AVS/Interlis oder evtl. DXF)
- Fehlerprotokoll des Datenexportes und des Datenchecks im Format AVS/Interlis

## 7. Orthophotogenerierung

Orthophotos sind zu einem festen Bestandteil fast jedes photogrammetrischen Projekts geworden. Auf Grund der grossen Bedeutung, der starken Verbreitung und der zum Teil etwas "kritiklosen" Verwendung von Orthophotos ist eine sorgfältige und rigorose Qualitätssicherung in diesem Bereich besonders angesagt.

### 7.1. Methoden

Die Orthophotogenerierung besteht grundsätzlich aus den folgenden zwei Arbeitsschritten:

- **Differentielle Entzerrung** eines Luft- oder Satellitenbildes (z.T. auch als Orthorektifizierung bezeichnet) mit bekannter äusserer Orientierung unter Einsatz eines digitalen Höhenmodells (Terrain- oder Oberflächenmodell).
- **Mosaikierung** – Zusammensetzung mehrerer einzelner Orthophotos zu grösseren Orthophotos oder zu einem Orthophotomosaik

Die Orthophotogenerierung ist heute ein weitgehend automatisierbarer Vorgang, was jedoch ein gutes Verständnis der grundsätzlichen Problematik und der eingesetzten Software voraussetzt.

### 7.2. Problemstellen

#### 7.2.1. Differentielle Entzerrung

Grundsätzlich gilt: In einem Orthophoto werden nur diejenigen Objekte lagerichtig abgebildet, welche auch im verwendeten Höhenmodell korrekt enthalten sind.

Das Hauptproblem bei der differentiellen geometrischen Entzerrung liegt somit in:

- dem Phänomen der radialen Bildversetzung bei zentralperspektivischen Aufnahmen, insbesondere der Lageversetzung nicht im Höhenmodell enthaltener Objekte (z.B. Dachfirste, Baumkronen)
- der Qualität des verwendeten Terrain- oder Oberflächenmodells

#### **Bildversetzung**

Die Bildversetzung im Orthophoto ist abhängig von:

- der **Kammerkonstante** ( $c_k$ ) – je kürzer die Brennweite, desto grösser die Bildwinkel und damit verbunden die radialen Bildversetzungen
- dem verwendeten **Bildausschnitt** bzw. der maximalen Distanz vom Bildmittelpunkt ( $\rho'$ ) – je grösser der gewählte Bildausschnitt, desto grösser der Bildversatz
- dem **Höhenfehler** bzw. der Höhe eines nicht modellierten Objekts ( $\Delta Z$ )
- der **lokalen Geländeneigung** ( $\alpha$ ) (Versatz ist grösser bei Gelände, welches vom Bildmittelpunkt weg geneigt ist: "Wasser fliesst zum Bildrand".)

Unter Vernachlässigung der lokalen Geländeneigung kann für die Abschätzung der Bildversetzungen im Orthophoto ( $\Delta r$ ) bzw. der entsprechenden Objektversetzung im Gelände ( $\Delta R$ ) die folgende Näherungsformel verwendet werden:

$$\Delta R = \frac{\Delta Z \cdot \rho'}{c_k} \quad (1)$$

$$\Delta r = \Delta R \cdot m_0 \quad (2)$$

In der folgenden Tabelle ist die max. Objektversetzung in einem Orthophoto (orig. Bildformat 23x23cm) in Abhängigkeit vom Höhenfehler  $\Delta Z$  für flaches Gelände zusammengestellt:

| Kam. | Überdeckung   |          | verwendeter Bildausschnitt |          |          |           |           | Objektversetzung                    |                                                                  |
|------|---------------|----------|----------------------------|----------|----------|-----------|-----------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|      | $c_k$<br>[mm] | L<br>[%] | Q<br>[%]                   | L<br>[%] | Q<br>[%] | L<br>[cm] | Q<br>[cm] | $\rho'$ max.<br>[cm] (*)            | $\Delta R$<br>$f(\Delta Z)$<br>$\Delta R$<br>( $\Delta Z = 2m$ ) |
| 150  | 60            | 20       | 40                         | 80       | 9.2      | 18.4      | 10.3      | <b>0.68 * <math>\Delta Z</math></b> | 1.36 m                                                           |
| 300  | 60            | 20       | 40                         | 80       | 9.2      | 18.4      | 10.3      | <b>0.34 * <math>\Delta Z</math></b> | 0.68 m                                                           |
| 150  | 70            | 40       | 30                         | 60       | 6.9      | 13.8      | 7.7       | <b>0.51 * <math>\Delta Z</math></b> | 1.02 m                                                           |
| 300  | 70            | 40       | 30                         | 60       | 6.9      | 13.8      | 7.7       | <b>0.25 * <math>\Delta Z</math></b> | 0.50 m                                                           |

Tabelle 2: Objektversetzungen in Orthophotos in Abhängigkeit des Höhenfehlers  $\Delta Z$ .  
(\*)  $\rho'$  max. = max. radiale Distanz ab Bildhauptpunkt

### Qualität des Höhenmodells (Terrain- oder Oberflächenmodell)

Die Qualität des Höhenmodells aus der Sicht der Orthophotogenerierung wird durch die folgenden Aspekte bestimmt:

- Genauigkeit der Geländedatenerfassung
- **Qualität der Terrainmodellierung**, insbesondere der Charakterisierung markanter Geländestellen mittels Bruchkanten und Einzelkoten.
- evtl. zusätzliche **Modellierung und Erfassung von Kunstbauten** (z.B. Brücken) entsprechend den spezifischen Anforderungen für die Orthophotoproduktion

Zusätzliche potentielle Problemstellen sind:

### DTM-Interpolation bei der differentiellen Entzerrung

Aus Gründen der Rechenzeitoptimierung wird bei der differentiellen Entzerrung üblicherweise nicht für jedes zu berechnende Pixel ein Höhenwert bestimmt. Vielmehr werden in einem bestimmten Abstand die Höhen von sogenannten Ankerpunkten bestimmt. Die Höhenwerte für die einzelnen Pixel werden anschliessend innerhalb dieser Ankerpunkte interpoliert. Lage und Dichte der verwendeten Ankerpunkte haben somit einen entscheidenden Einfluss auf die geometrische Genauigkeit des Orthophotos. Im Idealfall werden bei der Entzerrung sämtliche Stützpunkte des DTMs (Knoten der Dreiecksvermaschung oder Gitterpunkte bei Raster-DTM) als Ankerpunkte verwendet.

### Äussere Orientierungen

Die geometrische Genauigkeit eines differentiell entzerrten Luftbildes hängt direkt von der Genauigkeit seiner äusseren Orientierungen ab. Insbesondere bei einer Übernahme orientierter Bilddaten von Drittsystemen sind die äusseren Orientierungen zu kontrollieren.

### 7.2.2. Mosaikgenerierung

#### Nahtstellen

Die Nahtstellen zwischen zwei benachbarten entzerrten Bildausschnitten sollten im Endprodukt möglichst nicht sichtbar sein, d.h. sie sollten keine radiometrische Unterschiede und keine signifikanten geometrischen Fehler aufweisen. Einige Systeme ermöglichen eine kachelförmige Mosaikierung mit geradlinigen Standard-Nahtstellen (vgl. Abbildung 10). Eine derartige Mosaikierung sollte nur in unbebauten Gebieten bei reduzierten Anforderungen zum Einsatz kommen. In allen andern Fällen ist dieses Verfahren nicht zulässig.



Abbildung 10: Mosaikierung mit automatisch platzierten Nahtstellen und grossen geometrischen Versätzen im Nahtstellenbereich

#### Radiometrische Korrekturen

Bei der Generierung von radiometrisch optimalen Orthophotomosaiken sind allenfalls eine Reihe von Phänomenen zu kompensieren bzw. zu korrigieren. Je nach System erfolgen diese Kompensationen vorgängig oder während des Mosaikierungsvorgangs durch Anbringen geeigneter Bildanpassungsoperationen (Image Dodging Operations). Die zu korrigierenden Probleme umfassen:

- **Richtungsabhängige Reflexion** – Auf Grund der gerichteten Sonneneinstrahlung sind Teile der Luftbilder, die mit der Sonne photographiert wurden, heller als jene Teile, die gegen die Sonne aufgenommen wurden. Bei Bildflügen um die Mittagszeit führt dies zum Beispiel zu einer Abnahme der Helligkeit vom Südrand zum Nordrand hin. Dieser Grauwertgradient ist innerhalb eines einzelnen Orthophotos nicht wahrnehmbar. Bei einer Mosaikierung können diese grossflächigen Grauwertunterschiede jedoch stark stören. Ein Ansatz zur Reduktion dieses Effekts besteht in der Wahl einer **N-S-Befliegungsrichtung**, um in Richtung des Grauwertgradienten (N-S) eine möglichst grosse Überdeckung zu erhalten und entsprechend kleine Bildausschnitte verwenden zu müssen.
- **Hot Spot** – Als Hot Spot wird eine lokale Bildregionen bezeichnet, die eine viel höhere Helligkeit aufweisen, als deren Umgebung. In der Luftbildphotogrammetrie kann – je nach Oberflächenbeschaffenheit – am Ort der direkten Sonnenreflexion ein störender Hot Spot sichtbar sein.
- **Lichtabfall von der Bildmitte zum Bildrand** – Photogrammetrische Objektive weisen einen Lichtabfall von der Bildmitte zum Bildrand auf. Dieser Lichtabfall ist besonders ausgeprägt bei Weitwinkel- und Superweitwinkelobjektiven. Diese Helligkeitsab-

nahme wird unter anderem von der sogenannten **Vignettierung** beeinflusst, d.h. von der mechanischen Einengung eines schräg durch ein optisches System durchtretenden Lichtstrahls.

Ein Beispiel mit den entsprechenden radiometrischen Problemen ist in Abbildung 11 dargestellt (Beispiel aus Internetdokumentation der OrthoVista™-Software). Abbildung 12 zeigt das korrigierte Orthophotomosaik.

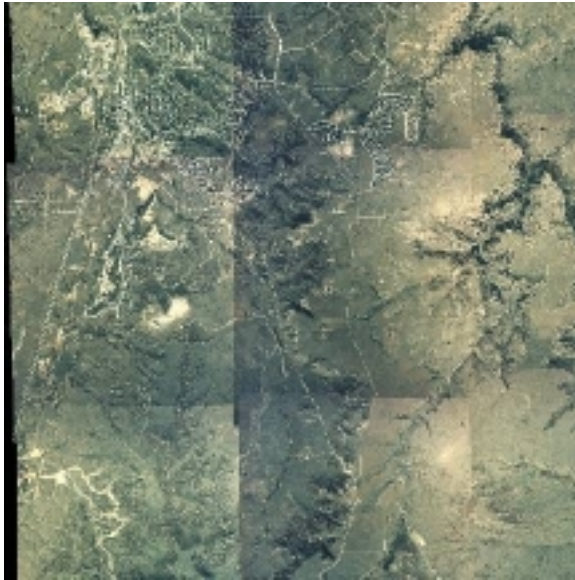


Abbildung 11: Orthophotomosaik ohne radiometrische Korrekturen



Abbildung 12: Orthophotomosaik mit radiometrischen Korrekturen

### 7.3. Anforderungen

#### Geometrische Auflösung Orthophoto ⇔ Minimaldimensionen

Die geometrische Auflösung des Orthophotos bzw. die Pixelgrösse im Orthophoto sollte sich primär nach der Grösse der zu identifizierenden Objekte richten. Eine Faustformel besagt, dass Objekte mit einer Dimension von mind. 2.5 (-3) Pixeln im Orthophoto identifizierbar sind. Das bedeutet, dass die geometrische Auflösung eines Orthophotos kleiner als 50% der Minimaldimension zu erfassender Objekte sein sollte.

Beispiel: Minimaldimension 20 cm  $\Rightarrow$  geom. Auflösung Orthophoto  $\leq$  10 cm  
( $\approx$  Anforderung für geom. Auflösung des gescannten Luftbilds)

In der Vergangenheit wurde die geometrische Auflösung von Orthophotos oft auf Grund der zu erwartenden Datenmenge spezifiziert. Heute sollte dem Kriterium der Minimaldimension unbedingt Priorität eingeräumt werden.

#### Geometrische Auflösung Orthophoto ⇔ Scanauflösung

Als Faustregel für die Pixelgrösse im Orthophoto ( $P_{\text{Orthophoto}}$ ) in Abhängigkeit der Scanauflösung bzw. der Pixelgrösse des gescannten Originalbildes ( $P_{\text{Originalbild}}$ ) kann die folgende Beziehung verwendet werden:

$$P_{\text{Originalbild}} \leq P_{\text{Orthophoto}} < P_{\text{Originalbild}} * 2 \quad (\text{Bem. Pixelgrössen im Objektraum !})$$

Für die Generierung optimaler Orthophotos sollte die Pixelgrösse im Orthophoto ca. 20% grösser sein als die Pixelgrösse im gescannten Originalbild.

Beispiel      Pixelgrösse im gescannten Originalbild = 20 cm (z.B. Scanauflösung 20  $\mu\text{m}$  bei einem Bildmassstab 1 : 10'000)  $\Rightarrow$  Pixelgrösse im Orthophoto = 25 cm

### Geometrische Auflösung Orthophoto $\Leftrightarrow$ DTM-Genauigkeit

Wie bereits in Abschnitt 7.2.1 gezeigt wurde, hängt die geometrische Genauigkeit eines Orthophotos primär von der Genauigkeit des verwendeten DTMs ab. Eine Abschätzung der durch solche Höhenfehler verursachten geometrischen Fehler in einem Orthophoto wird durch die Formel ( 1 ) ermöglicht.

Als Faustregel sollte die Pixelgrösse im Orthophoto nicht um ein Vielfaches kleiner sein als der zu erwartende mittlere Lagefehler. Damit wird die Gefahr einer unsachgemässen Verwendung der Orthophotos reduziert (vgl. auch nachfolgende Empfehlungen).

### Geometrische Genauigkeit der Orthophotos

Die geometrische Genauigkeit digitaler Orthophotos setzt sich primär aus den folgenden Komponenten zusammen:

- Höhengenaugigkeit des DTMs:  $m_H(\text{DTM})$
- Höhengenaugigkeit der äusseren Orientierungen bzw. der Aerotriangulation:  $m_H(\ddot{\text{A}}\text{O})$
- Lagegenauigkeit der äusseren Orientierungen bzw. der Aerotriangulation:  $m_L(\ddot{\text{A}}\text{O})$
- Geometrische Auflösung (an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt)

Die geometrische Genauigkeit kann in guter Näherung wie folgt abgeschätzt werden:

1. Bestimmung des gesamten mittleren Höhenfehlers  $m_H$  aus Höhengenaugigkeit DTM und Höhengenaugigkeit  $\ddot{\text{A}}\text{O}$ :  $m_H^2 = m_H^2(\text{DTM}) + m_H^2(\ddot{\text{A}}\text{O})$
2. Bestimmung einer durchschnittlichen  $m_L(\text{OV})$  bzw. maximalen Objektversetzung, welche durch diesen mittleren Höhenfehler  $m_H$  verursacht wird (vgl. Tabelle 2).
3. Bestimmung des gesamten mittleren Lagefehlers eines Orthophotos  $m_L(\text{OP})$  aus den Komponenten Objektversatz  $m_L(\text{OV})$  und Lagefehler der äusseren Orientierungen  $m_L(\ddot{\text{A}}\text{O})$ :  $m_L^2(\text{OP}) = m_L^2(\text{OV}) + m_L^2(\ddot{\text{A}}\text{O})$

**Beispiel:** Wenn der mittlere Lagefehler  $m_L^2(\text{OP})$  über das ganze Orthophoto den Betrag von 1 m nicht überschreiten soll, dann dürfen beispielsweise der mittlere Lagefehler aus der Aerotriangulation und der – durch die Höhenfehler bedingte – mittlere Objektversatz jeweils nicht grösser als 0.7 m sein. Bei einer 70/40%-Befliegung mit einem 15cm-Objektiv bedeutet dies, dass der gesamte mittl. Höhenfehler  $m_H$  (aus  $\ddot{\text{A}}\text{O}$  und DTM) nicht grösser als 1.4 m sein sollte (vgl. Tabelle 2  $\rightarrow \Delta Z = 0.7\text{m} / 0.51$ ). Diese Anforderung wiederum wäre erfüllt bei einem mittleren Höhenfehler des DTMs und der Aerotriangulation von je 1m.

### Resultierende Planungsparameter

Auf Grund der obigen Überlegungen und der Grenzwerte für die geometrische Scanauflösung sollte durch die Auftraggeber- oder Auftragnehmerseite eine geeignete Wahl der folgenden Parameter vorgenommen werden:

- Massstab für gedruckte Orthophotos
- Objektivbrennweite
- Bildmassstab
- Längs- und Querüberdeckung
- geometrische Auflösung der Originalbilder (Scanauflösung)

### **Behandlung von Kunstbauten**

Sollen (wichtige) Kunstbauten (z.B. Brücken, Überführungen, Stützmauern) im Orthophoto möglichst korrekt und lagerichtig dargestellt werden, so ist bei den Anforderungen für das digitale Terrainmodell und das Orthophoto speziell darauf hinzuweisen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit der speziellen Modellierung von Kunstbauten im DTM ein beträchtlicher Mehraufwand entsteht.

### **Bildversetzung / Auswahl der Bildstellen**

Um den Bildsturz in Orthophotos zu minimieren, sollten möglichst **nur zentrale Bildstellen** (in der Nähe des Bildhauptpunktes) verwendet werden. Aus diesem Grund sollten alle erfassten Luftbilder in die Orthophotoproduktion einbezogen werden. Lösungsansätze, in welchen nur jedes zweite Bild gescannt oder verwendet wird, sind zum Beispiel im überbauten Gebiet ungeeignet.

### **Mosaikierung**

- Die Nahtstellen zwischen benachbarten Luftbildern sollten nicht durch Gebäude oder andere Objekte führen, die nicht im Terrainmodell enthalten sind.
- An den Nahtstellen sollte eine radiometrische Anpassung vorgenommen werden, um einen kontinuierlichen Grauwertübergang zu gewährleisten.
- Bei beträchtlichen radiometrischen Unterschieden zwischen verschiedenen Bildverbänden (z.B. Befliegung benachbarter Streifen zu unterschiedlichen Tageszeiten) sollte vor der Mosaikierung eine radiometrische Anpassung bzw. 'Normalisierung' des Bildmaterials vorgenommen werden.
- Die Mosaikierung sollte projektweise und unabhängig von der gewünschten definitiven Blatteinteilung erfolgen. Die Mosaikierung bzw. die Anordnung der Nahtstellen sollte unter keinen Umständen entlang der gewünschten Blatteinteilung erfolgen.

### **Bildeinteilung / Planeinteilung**

Bei den Überlegungen zur Festlegung der Orthophotoeinteilung spielt die Datenmenge heute noch eine wichtige Rolle.

- Bei Verwendung von Standardblatteinteilungen (z.B. 50cm x 50cm - Einteilungen aus früheren analogen Orthophotoprojekten) besteht die Gefahr, dass viele potentielle Benutzer der digitalen Orthophotos auf Grund systembedingter Beschränkungen nicht mit den anfallenden Datenmengen umgehen können. Dies gilt insbesondere dann, wenn auch im Schnittstellenbereich von mehreren Orthophotos gearbeitet werden soll.
- Falls eine Verwendung der digitalen Orthophotos durch Dritte mit Standardinformatikmitteln angestrebt wird, sollte die unkomprimierte Datenmenge eines einzelnen Orthophotos max. 25-50% der standardmässig verfügbaren Hauptspeichergrösse ausmachen, um allenfalls auch die Zusammensetzung mehrerer Orthophotos zu ermöglichen (Stand 2000: ca. 50 MB pro Orthophoto).
- Bei einem zukünftigen Aufbau von blattschnittfreien Orthophotodatenbanken mit einer flexiblen Datenabgabe werden diese Überlegungen an Bedeutung verlieren.

## **7.4. Empfehlungen**

### **Verwendungszweck der Orthophotos**

Das genauigkeitsmässige Einsatzspektrum der Orthophotos sollte bei der Projektplanung

festgelegt werden. Bei Orthophotos – wie bei andern Datentypen übrigens auch – besteht die Gefahr, dass diese über den vorgesehenen Einsatzbereich hinaus verwendet bzw. 'missbraucht' werden.

Bei der Festlegung der geometrischen Auflösung der Orthophotos ist:

- entweder die Pixelgrösse etwa in der Grössenordnung der zu erwartenden Lagefehler zu wählen oder
- im Falle einer signifikant kleineren Pixelgrösse (z.B. 10 cm bei einem zu erwartenden mittl. Lagefehler von 50 cm), ist die geometrische Genauigkeit des Orthophotos immer explizit anzugeben und mitzuliefern.

### **Probe-Orthophotos – digital und geplottet**

Die radiometrische Aufbereitung der definitiven Orthophotos beinhaltet immer auch eine **subjektive** Komponente. Deshalb ist es sehr empfehlenswert, dass der Auftragnehmer der Auftraggeberin – vor Beginn der eigentlichen Produktionsphase – sowohl digitale als auch geplottete (!) Orthophotos von repräsentativen Teilgebieten vorlegt, diese bespricht und genehmigen lässt.

Als Referenz bzw. als Anhaltspunkt für diese Abnahme können zum Beispiel Papierkopien der Originalluftbilder verwendet werden, welche z.B. schon bei der Abnahme des analogen Bildmaterials zum Einsatz kamen.

## **7.5. QS-Methoden und -Massnahmen**

### **7.5.1. Formale Prüfung**

- Vollständigkeit (z.B. bei zu knappen Überdeckungen bzw. in gebirgigem Gelände)
- vollständige Abdeckung des Orthophotoperimeters durch ein (genaues) DTM
- unscharfe Bildstellen (z.B. verursacht durch zu starke Nahtstellenfilterung)
- (Un-) Sichtbarkeit von Nahtstellen
- systematische radiometrische Unterschiede zwischen einzelnen Orthophotos
- Kontrolle auf systematische Bildstörungen (z.B. verursacht durch zu starke Datenkompression im Verlaufe des Produktionsvorgangs)
- Kompatibilität der mit den Bilddaten mitgelieferten Georeferenzierungsinformationen mit der GIS-Umgebung des Auftraggebers (sollte rechtzeitig anhand eines Testdatensatzes geprüft werden)

### **7.5.2. Genauigkeitsprüfung**

Die geometrische Qualität von Orthophotos kann durch die Verwendung von Kontrollpunkten oder durch Überlagerung mit GIS-Daten rechnerisch oder visuell überprüft werden. Diese Überprüfung kann in der Regel durch den Auftraggeber mit eigenen GIS-Werkzeugen durchgeführt werden und stellt daher eine sehr einfache und effiziente QS-Massnahme dar.

### **Kontrollpunkte**

- photogrammetrisch : stereoskopische Bestimmung
- GPS, Tachymetrie: Problem Identifikation der Punkte im OP

Bei einer Genauigkeitsanalyse mittels Kontrollpunkten sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Verteilung der Kontrollpunkte über das ganze Bild
- Kontrollpunkte in allen vorkommenden Geländetypen
- numerische und visuelle (!) Inspektion der Residuen bzw. Restklaffen können systematische Fehler aufzeigen

### Überlagerung von GIS-Daten

- Überlagerung von Vektordaten (insbesondere Strassen !)
- Überlagerung existierender Pläne (gescannt, georeferenziert und geocodiert)

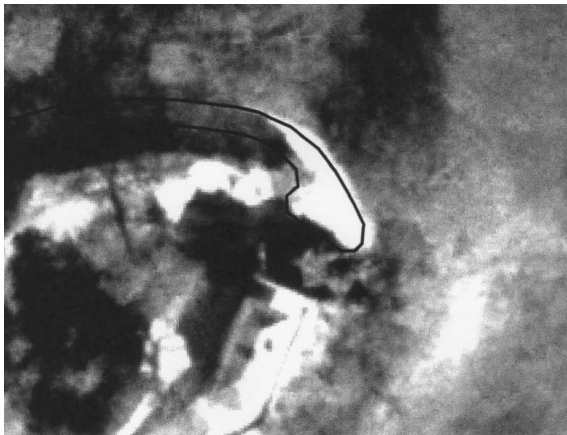


Abbildung 13: Orthophoto basierend auf DTM ohne Bruchkanten – Überlagerung mit Vektordaten (Wegrand)

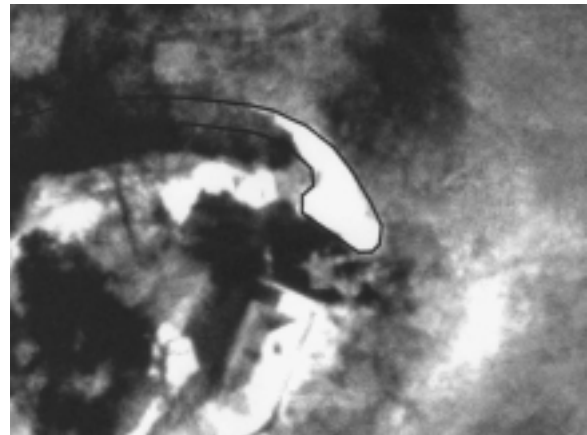


Abbildung 14: Orthophoto basierend auf DTM mit Bruchkanten – Überlagerung mit Vektordaten (Wegrand)

## 7.6. Dokumentation

Im Unternehmerbericht sollten mindestens die folgenden Aspekte der Orthophotogenerierung dokumentiert sein:

- Bildmaterial, verwendete äussere Orientierungen
- geometrische Auflösung
- verwendetes Resamplingverfahren (Pixelinterpolation)
- Verfahren und Parameter der Höheninterpolation (pixelweise Höhentransformation oder Ankerpunktverfahren, Lage und Dichte der Ankerpunkte)
- Höhenmodell: Terrainmodell oder Oberflächenmodell, Perimeter, Genauigkeit, Verwendung von Bruchkanten, Modellierung von Kunstbauten
- allenfalls durchgeführte Bildanpassungen (Image Dodging)
- Art der Nahtstellenfestlegung (automatisch, manuell)
- Verfahren und Parameter der Nahtstellenbearbeitung
- Übersicht 'Orthophotoeinteilung' (definitive Orthophotokacheln)
- Georeferenzierung (z.B. GeoTIFF und / oder TIFF World Files), Datenformate, Datenkompression

## 8. Auswertungen

Die Erfassung bzw. Nachführung von 2D- und 3D-Geodaten aus metrischen Bilddaten ist in der Regel sehr ökonomisch und zur Zeit entsprechend aktuell (z.B. Nachführung der AV-Ebene Bodenbedeckung, Nachführung landwirtschaftliche Nutzflächen, Erfassung von Dachformen für 3D-Stadtmodelle). Die photogrammetrische Auswertung steht dabei teilweise in Konkurrenz zur Orthophotoauswertung in der GIS-Umgebung. In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten Eigenschaften, sowie die Stärken und Schwächen der verschiedenen Auswertemöglichkeiten zusammengestellt und miteinander verglichen werden. Zum Abschluss werden eine Auswahl spezifischer Qualitätsaspekte aufgeführt.

### 8.1. Methoden

Die Auswertemethoden können nach den folgenden Kriterien unterteilt werden:

- stereoskopisch ⇔ monoskopisch
- digital ⇔ analog

#### **stereoskopisch ⇔ monoskopisch**

Die Unterteilung in stereoskopische und monoskopische Auswertung widerspiegelt gleichzeitig die Gliederung in photogrammetrische und nicht-photogrammetrische Auswertung.

|                 | <b>stereoskopische Auswertung</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <b>monoskopische Auswertung</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Charakteristika | <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3D-Auswertung aus Stereobildpaaren an photogrammetrischem Auswertesystem</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung aus digitalen Orthophotos an GIS-Arbeitsplatz</li> </ul>                                                                                                                                                                                                   |
| Vorteile        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• alle Objekte werden lagerichtig dargestellt und können geometrisch korrekt ausgewertet werden</li> <li>• bessere Sichtbarkeit / Identifizierbarkeit von Objekten, speziell in Bereichen mit Vegetation (Waldränder, Waldwege)</li> <li>• Möglichkeit zur Auswertung eines Objekts aus unterschiedlichen Stereomodellen</li> <li>• höhere Genauigkeit und Zuverlässigkeit</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• günstige Auswertesysteme (Hard- und Software)</li> <li>• kein stereoskopisches Sehvermögen erforderlich</li> </ul>                                                                                                                                                    |
| Nachteile       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stereo-Arbeitsplatz erforderlich</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Objekte, welche nicht (korrekt) im DTM enthalten sind, werden nicht lagerichtig abgebildet (z.B. Gebäude, Stützmauern, Kunstbauten ganz allg.)</li> <li>• Verdeckung von Bildinhalten je nach Aufnahmeposition (z.B. vom Betrachter abgewandte Waldränder)</li> </ul> |

**digital ⇔ analog**

In der Folge wird ausschliesslich die photogrammetrische Auswertung näher betrachtet. Eine wichtige Unterscheidung ist dabei die Art der eingesetzten Auswertesysteme bzw. des verwendeten Bildmaterials:

|                 | <b>digitale Auswertung</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>analoge Auswertung</b>                                                                                                                     |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Charakteristika | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung an digitaler photogrammetrischer Arbeitsstation</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung an analytischem photogrammetrischem Auswertesystem</li> </ul>                             |
| Vorteile        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• sehr schneller Modellwechsel</li> <li>• standardmässige Einspiegelung bestehender GIS-Daten</li> <li>• Potential zur direkten GIS-Anbindung bzw. zur GIS-Integration vereinfacht bzw. erübrigt aufwändigen Datentransfer und Nachbearbeitung</li> <li>• Potential zur Automatisierung von Auswertungen</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• gute bis sehr gute Ergonomie</li> <li>• bestehende Infrastruktur und erfahrene Operateure</li> </ul> |
| Nachteile       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bildinhalt abhängig von Scanauflösung</li> <li>• Ergonomie noch verbesserungsfähig</li> <li>• Investitionsbedarf (allerdings zunehmend günstigere Systeme verfügbar)</li> </ul>                                                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einspiegelung von GIS-Daten nur sehr aufwändig realisierbar</li> </ul>                               |

**8.2. Problemstellen****Lagegenauigkeit bei Auswertungen aus Orthophotos**

Die qualitäts-relevante Unterscheidung besteht primär zwischen der stereoskopischen photogrammetrischen Auswertung und der Auswertung aus Orthophotos.

Bei einer Auswertung aus Orthophotos weisen Objekte, welche nicht im DTM enthalten sind, einen Lagefehler entsprechend der Zusammenstellung in Tabelle 2 auf (Kap. Orthophoto). Je nach Objektbrennweite und Bildüberdeckungen beträgt der Lagefehler im Orthophoto in ungünstigen Fällen 25% bis 70% des Höhenfehlers. Eine im DTM nicht enthaltene 4 Meter hohe Stützmauer weist somit im Orthophoto einen Lagefehler von bis zu 3 Metern auf. Analog gilt dies für Waldränder, speziell im Falle einer dichten Bestockung. Bei einer Auswertung im Orthophoto muss hier mit einem systematischen Lagefehler von bis zu 70% der Baumhöhe gerechnet werden.

**Übernahme bekannter äusserer Orientierungen**

Die Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertungen hängt wiederum direkt von den äusseren Orientierungen ab, was insbesondere bei einem Einsatz unterschiedlicher Systeme zu Problemen führen kann (Definition der Drehachsen, Einheiten, etc.). (vgl.

auch Kap. DTM und Orthophoto). Eine Kontrolle der Passpunkt- und allenfalls Verknüpfungspunktelage, mittels der entsprechenden Koordinatenlisten und Punktekrois, sollte in jedem Falle vorgenommen werden.

### **Flächendeckung und Lückenergänzung**

Die Vollständigkeit und Konsistenz der zu erfassenden Informationen sowie die Behandlung von Lücken, d.h. von Objekten oder Gebieten, die nicht oder nur teilweise photogrammetrisch ausgewertet werden können, sind bei der Auftragsvergabe zu regeln. Dabei ist festzulegen, ob Lücken zu ergänzen sind und falls ja, wie und unter wessen Verantwortung eine Lückenergänzung zu erfolgen hat.

## **8.3. Empfehlungen**

### **Einsatz von Orthophotos**

Auswertungen aus Orthophotos sollten auf die offene Flur und auf Anwendungen mit Genauigkeitsanforderungen in der Grössenordnung der DTM-Genauigkeit beschränkt werden. Lagemässig exakte Auswertungen von Objekten, welche nicht in diesem DTM enthalten sind (z.B. Kunstbauten), sind zu vermeiden.

AG QS Photogrammetrie & DTM-Generierung

Muttenz, Juli 2000