



Leibniz
Universität
Hannover

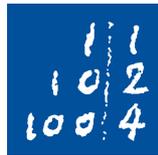
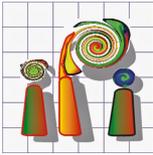
Leibniz Universität Hannover
Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
Institut für Photogrammetrie und Geoinformation

Bachelorarbeit

Qualitätskontrolle von automatisiert generierten 3D-Modellen

Frederic Hake

Hannover 2015



Leibniz
Universität
Hannover

Leibniz Universität Hannover
Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
Institut für Photogrammetrie und Geoinformation

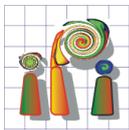
Bachelorarbeit

Qualitätskontrolle von automatisiert generierten 3D-Modellen

eingereicht von: Frederic Hake
Matrikelnummer: 2966310
Studiengang: Geodäsie und Geoinformatik

Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke
Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Hannover, den 05.11.2015



Bachelorarbeit für Herrn Frederic Hake

Fakultät für Bauingenieurwesen
und Geodäsie

Thema: Qualitätskontrolle von automatisiert generierten 3D-Modellen

Institut für Photogrammetrie
und GeoInformation
Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke

Aufgabenstellung:

Aufgabe der Kampfmittelräumdienste ist es in der heutigen Zeit zunehmend die Munitionsreste des zweiten Weltkriegs aufzuspüren und unschädlich zu machen.

Bei der Situationseinschätzung ob es sich beim damaligen Abwurf von Bomben z.B. um Blindgänger handelte wird auf die Bilddokumentationen der Kriegsjahre zurückgegriffen. Die historischen Luftbilder der Alliierten wurden zu dem Zweck gescannt und stehen heute den Auswertestellen zur Verfügung.

Bei der notwendigen Georeferenzierung stellt sich dann jedoch oft das Problem der Identifikation von genügend Passpunkten, da sich die Situation am Boden über die Jahrzehnte stark verändert hat.

Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein alternativer Ansatz zur Georeferenzierung dieser Luftbilder entwickelt und untersucht werden.

Im Rahmen einer Bündelblockausgleichung soll ein Bildverband mit möglichst wenigen Passpunkten ausgewertet und auf seine Qualität hin überprüft werden. Hier ist besonders Augenmerk auf die dreidimensionalen Ergebnisse in Form des aus den Bilddaten berechneten Digitalen Geländemodelles zu legen.

Zusammenfassend sind Aussagen zu treffen ob das Verfahren von seiner Ergebnisgenauigkeit für die Kampfmittelräumdienste geeignet ist.

Ausgabetermin: 11.05.2015

Abgabetermin: 11.11.2015

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen
Tel. +49 511 762-3304
Fax +49 511 762-2483
E-Mail: wiggenhagen
@ipi.uni-hannover.de

11.05.2015

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Besucheradresse:
Nienburger Straße 1
30167 Hannover
www.ipi.uni-hannover.de

Zentrale:
Tel. +49 511 762 0

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich meine Bachelor-Arbeit „Qualitätskontrolle von automatisiert generierten 3D-Modellen“ selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Hannover, den 05.11.2015

(Frederic Hake)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Zentralprojektion	2
2.2 Innere Orientierung	4
2.3 Äußere Orientierung	5
2.3.1 Einzelbildauswertung	5
2.3.2 Stereoauswertung	6
2.4 Räumlicher Rückwärtsschnitt	8
2.5 Räumlicher Vorwärtsschnitt	10
2.6 Passpunkte	11
2.7 Bündelblockausgleichung	12
2.8 Mosaik	14
2.8.1 Geometrische Mosaikbildung	14
2.8.2 Radiometrische Mosaikbildung	15
2.9 Orthophoto / true Orthophoto	15
2.10 3D - Modelle	18
2.10.1 Höhenmodelle	18
2.10.2 Automatische Oberflächenbestimmung	19
2.10.3 Poisson Oberflächenrekonstruktion	21
3 Konzept für den Arbeitsablauf	22
3.1 Rahmenbedingungen und Beschreibung des Datensatzes	22
3.2 Besonderheiten historischer Luftbilder	22
3.3 Orientierung der Bilder	23
3.3.1 Innere Orientierung	23
3.3.2 Relative Orientierung	23
3.3.3 Äußere Orientierung	23
3.3.4 Absolute Orientierung	24
3.4 Erstellung DGM und Orthophotomosaik	24
3.4.1 DGM	24
3.4.2 Orthophoto	24
3.4.3 Orthophotomosaik	24
3.5 Untersuchung der 3D Genauigkeit	25
3.6 Fallbeispiele	25
4 Umsetzung	26
4.1 Verwendete Software	26
4.1.1 QGIS	26
4.1.2 PhotoScan	26
4.1.3 MATLAB	26
4.2 Vorverarbeitung der Bilder	27

4.3	Orientierung	27
4.3.1	Innere und relative Orientierung der Bilder	27
4.3.2	Bestimmung von Passpunkten	29
4.3.3	Absolute Orientierung der Bilder	30
4.4	Erstellung von DGM und Orthophotomosaik	31
4.5	Qualitätskontrolle	32
4.5.1	Absolute Höhenabweichung	32
4.5.2	Lagefehler auf Grund falscher Geländehöhe	33
4.6	Ergebnisse	34
4.6.1	Kampagne 2002 (Referenz)	35
4.6.2	Kampagne 1977	39
4.6.3	Kampagne 1945	43
4.7	Diskussion der Ergebnisse	46
5	Fazit und Ausblick	48
5.1	Nutzbarkeit der Ergebnisse	48
5.2	Empfehlungen	48
5.3	Zusammenfassung	49
	Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

1	Positiv- und Negativdarstellung der Zentralprojektion	2
2	Zusammenhang Bild- und Objektkoordinaten	3
3	Innere Orientierung eines Bildes	4
4	Einzelbildorientierung	6
5	Folgebildanschluss	7
6	Absolute Orientierung	8
7	Räumlicher Rückwärtsschnitt	9
8	Allgemeinfall der Photogrammetrie	10
9	Schematische Darstellung der Bündelblockausgleichung	12
10	Passpunktconfiguration der Bündelblockausgleichung	13
11	Mosaikbildung	15
12	Prinzip der Orthophotoberechnung	16
13	Luftbild und Orthophoto	18
14	Geländemodelle	19
15	Vertical Line Locus Zuordnung	20
16	Oberflächenrekonstruktion nach Poisson	21
17	Beispiele für gute und schlechte Ausrichtung der Bilder	29
18	Beispiel zur Lageverschiebung	32
19	Lagefehler im Orthophoto	33
20	Orthophotomosaik der Kampagne 2002	35
21	DOM der Kampagne 2002	36
22	Soll-Ist-Vergleich der Kampagne 2002	37
23	Lageverschiebung der Kampagne 2002	38
24	Orthophotomosaik der Kampagne aus 1977	39
25	DOM der Kampagne 1977	40
26	Soll-Ist-Vergleich der Kampagne 1977	41
27	Lageverschiebung der Kampagne 1977	42
28	Orthophotomosaik der Kampagne aus 1945	43
29	Beispiel für Höhenänderung bei veränderter Passpunktanzahl	44
30	DOM der Kampagne 1945	44
31	Soll-Ist-Vergleich der Kampagne 1945	45
32	Lageverschiebung der Kampagne 1945	46

1 Motivation und Zielsetzung

Selbst 70 Jahre nach Ende des zweiten Weltkrieges stellen nicht detonierte Fliegerbomben, insbesondere wenn sie im Rahmen von Bauarbeiten stark bewegt oder erschüttert werden, eine große Gefahr dar.

Schätzungen zur Folge befinden sich noch einige zehntausend dieser sog. Blindgänger unentdeckt im Boden, so dass die Suche nach ihnen auch heute noch eine wichtige Aufgabe darstellt.

Dabei ist die Suche auf Basis historischer Luftbilder der alliierten Streitkräfte nach [CARLS ET AL., 1999, S. 10] eine etablierte Form der Altlastensuche in Deutschland. Bei der Auswertung dieser Bilder mit Hilfe moderner digitaler photogrammetrischer Verfahren ergibt sich die Problematik, dass viele wichtige Daten, die im heutigen Regelfall Verwendung finden (z.B. Informationen über die verwendete Kamera- oder Aufnahmekonfiguration), nicht vorliegen. Dies hat zur Folge, dass die Referenzierung der Bilder schwierig und zeitaufwendig ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein vereinfachter Referenzierungsansatz historischer Luftbilder untersucht. Hauptaugenmerk liegt auf dem Einfluss des aus den Luftbildern abgeleiteten Oberflächenmodells auf die Lagekoordinate im Orthophotomosaik. Ziel ist es, einen Arbeitsablaufplan zur Auswertung und Qualitätskontrolle historischer Luftbilder am Beispiel der Programme PhotoScan, QGIS und MATLAB darzustellen.

Der vorliegende schriftliche Teil der Arbeit beinhaltet eine Beschreibung der theoretischen Grundlagen zur photogrammetrischen Auswertung von Bildern, die für das Verständnis und die Nachvollziehbarkeit der im Rahmen des praktischen Teils durchgeführten Arbeitsschritte als notwendig angesehen werden. Weiterhin beinhaltet sie einen 'praktischen' Teil mit der Darstellung der grundlegenden Randbedingungen (Datenbasis, Werkzeuge, definierte Rahmenbedingungen usw.) sowie des erarbeiteten Arbeitsablaufs. Abschließend erfolgt die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse bzw. Erkenntnisse, die sich aus den durchgeführten praktischen Arbeiten ableiten.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Zentralprojektion

Um räumliche Objekte aus Photographien rekonstruieren zu können, müssen die geometrischen Modelle und Abbildungsgesetze der Aufnahme bekannt sein. Ein mit einer Kamera aufgenommenes Bild entspricht in guter Näherung einer Zentralprojektion. Jeder Punkt des Objektes P wird durch eine Gerade mit dem Projektionszentrum PZ' verbunden. Diese Geraden schneiden die Bildebene und erzeugen dadurch die Bildpunkte P' (siehe Abb. 1).

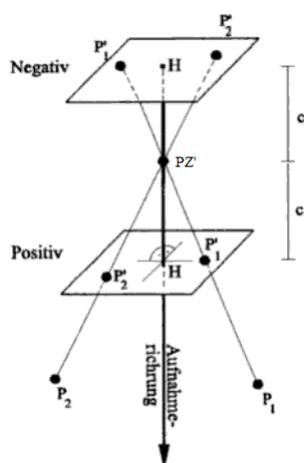


Abbildung 1: Positiv- und Negativdarstellung der Zentralprojektion. PZ' ist das Projektionszentrum, H der Bildhauptpunkt und c die Kammerkonstante [KRAUS, 2004, S. 17]

Tatsächlich liegt die Bildebene hinter dem Projektionszentrum PZ' , es handelt sich also um die Negativdarstellung.

Mathematisch gesehen entspricht die Zentralprojektion einer Koordinatentransformation zwischen dem Objektpunkt P im Objektkoordinatensystem X, Y, Z (z. B. übergeordnete Landeskoordinaten) und dem Bildpunkt P' im Bildkoordinatensystem $x', y', 0$.

Zunächst muss der Zusammenhang zwischen Bild- und Pixelkoordinatensystem hergestellt werden. Dieser ist für alle Bilder einer Kamera gleich. Da sich beide Koordinatensysteme in der selben Ebene befinden, handelt es sich um eine ebene Affintransformation.

Der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten x', y' und den Objektkoordinaten X, Y, Z ist in Abb. 2 dargestellt und formelmäßig in den sogenannten Kollinearitätsgleichungen beschrieben.

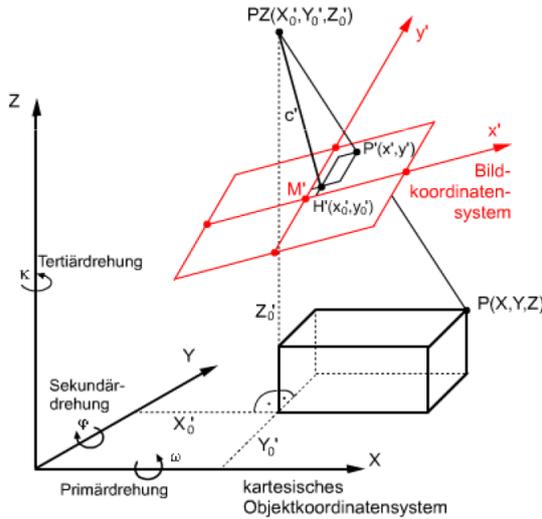


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen den Bild- und Objektkoordinaten [HEIPKE, 2014]

$$\begin{aligned}
 x' &= x'_0 - c' \cdot \frac{r'_{11} \cdot (X - X'_0) + r'_{21} \cdot (Y - Y'_0) + r'_{31} \cdot (Z - Z'_0)}{r'_{13} \cdot (X - X'_0) + r'_{23} \cdot (Y - Y'_0) + r'_{33} \cdot (Z - Z'_0)} \\
 y' &= y'_0 - c' \cdot \frac{r'_{12} \cdot (X - X'_0) + r'_{22} \cdot (Y - Y'_0) + r'_{32} \cdot (Z - Z'_0)}{r'_{13} \cdot (X - X'_0) + r'_{23} \cdot (Y - Y'_0) + r'_{33} \cdot (Z - Z'_0)}
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Mit $x', y' =$ Bildkoordinaten, $X'_0, Y'_0, Z'_0 =$ Koordinaten des Projektionszentrums, $x'_0, y'_0 =$ Koordinaten des Bildhauptpunktes, $X, Y, Z =$ Objektkoordinaten, $c' =$ Kammerkonstante. Die in den Gleichungen (2.1) vorkommenden Elemente r_{ij} sind die Elemente der Drehmatrix R , welche in diesem Fall die Drehung des Bildes in das Objektkoordinatensystem beschreibt. Sie können auch durch die drei Drehwinkel ω, φ und κ beschrieben werden.

Werden die Gleichungen (2.1) nach den Objektkoordinaten X, Y aufgelöst, so ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 X &= X'_0 + (Z - Z'_0) \cdot \frac{r'_{11} \cdot (x' - x'_0) + r'_{12} \cdot (y' - y'_0) + r'_{13} \cdot c'}{r'_{31} \cdot (x' - x'_0) + r'_{32} \cdot (y' - y'_0) + r'_{33} \cdot c'} \\
 Y &= Y'_0 + (Z - Z'_0) \cdot \frac{r'_{21} \cdot (x' - x'_0) + r'_{22} \cdot (y' - y'_0) + r'_{23} \cdot c'}{r'_{31} \cdot (x' - x'_0) + r'_{32} \cdot (y' - y'_0) + r'_{33} \cdot c'}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Wie in den Gleichungen (2.1) gut zu sehen ist gehört zu jedem Objektpunkt P genau ein Bildpunkt P' . Im Gegensatz dazu zeigen die Gleichungen (2.2) auf Grund der Z -Koordinate auf der rechten Seite, dass zu jedem Bildpunkt P' unendlich viele Objektpunkte P gehören. Folglich kann aus einer Aufnahme allein kein räumliches Objekt rekonstruiert werden. Zur eindeutigen Bestimmung muss entweder die Z -Koordinate festgesetzt werden, sodass alle Objektpunkte auf einer Ebene liegen, oder es muss vom selben Objekt eine zweite Aufnahme mit einem anderen Projektionszentrum vorliegen.

Insgesamt werden zur eindeutigen Bestimmung einer zentralperspektivischen Aufnahme neun Parameter benötigt. Die sechs Elemente der äußeren Orientierung (X, Y, Z und ω, φ, κ) sowie die drei Konstanten der inneren Orientierung (x'_0, y'_0, c'). (vgl. [KRAUS, 2004, S. 17 ff.])

2.2 Innere Orientierung

Die innere Orientierung definiert die Position des Projektionszentrums P bezogen auf die Bildebene. Die Elemente der inneren Orientierung sind der Bildhauptpunkt H' mit den Koordinaten x'_0 und y'_0 , die Kammerkonstante c' (siehe Abb. 3) sowie eine Funktion der Objektivverzeichnung.

Der Bildhauptpunkt H' ist der Durchstoßpunkt der optischen Achse durch die Bildebene. Die Beträge x'_0 und y'_0 sollten möglichst klein sein, sodass der Bildhauptpunkt H' sehr nah beim Bildmittelpunkt M liegt.

Die Kammerkonstante ist der Abstand zwischen dem Projektionszentrum P und dem Bildhauptpunkt H' . Die Kammerkonstante kann auch als Brennweite des Objektivs verstanden werden, obwohl sie nicht mit der physikalischen Brennweite f übereinstimmt. In der Funktion der Objektivverzeichnung werden durch z. B. Linsenfehler hervorgerufene Abweichungen von der Zentralperspektive modelliert. Diese Abweichungen können durch eine Laborkalibrierung bestimmt werden und ergeben eine Abbildungsvorschrift der Art

$$x'' = A \cdot x' \quad (2.3)$$

so dass für jeden Punkt im Bild (x', y') eine korrigierte Bildkoordinate (x'', y'') berechnet werden kann (vgl. [KRAUS, 2004, S. 19 ff.]).

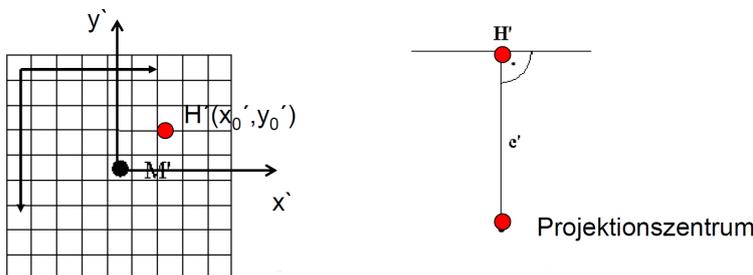


Abbildung 3: Innere Orientierung eines Bildes mit Bildhauptpunkt H' , Bildmittelpunkt M , den Bildhauptpunktkoordinaten x'_0 und y'_0 sowie der Kammerkonstante c' [HEIPKE, 2014]

Bei analogen Messbildern wird das Bildkoordinatensystem durch vier oder mehr eindeutig bestimmbareren Rahmenmarken definiert. Diese werden bei der Belichtung im Messbild mit abgebildet und besitzen kalibrierte Sollkoordinaten.

Bei gescannten Analogbildern kann die innere Orientierung wieder hergestellt werden, indem die Rahmenmarken am Computer angemessen werden.

2.3 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung beschreibt die Position der Kamera im Objektkoordinatensystem zum Zeitpunkt der Aufnahme. Sie wird unterschieden zwischen der äußeren Orientierung eines Einzel- oder Stereobildes, wobei die Orientierung eines Stereobildpaares weiter in die relative und absolute Orientierung unterteilt wird.

2.3.1 Einzelauswertung

Die Lage und Ausrichtung der Kamera, bzw. des Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektraum wird durch sechs Parameter beschrieben (siehe Abb. 2.3.1).

Der Bezug zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem wird über drei Translationen (Vektor X_0) sowie durch drei Rotationen um die Koordinatenachsen (ω, φ, κ) beschrieben. Die drei Rotationen bilden die orthogonale Drehmatrix R .

Die räumliche Transformation zwischen Kamerakoordinaten x, y, z und Objektkoordinaten X, Y, Z kann nun folgendermaßen dargestellt werden:

$$X = X_0 + R \cdot x \tag{2.4}$$

(vgl. [LUHMANN, 2010, S. 236 ff.])

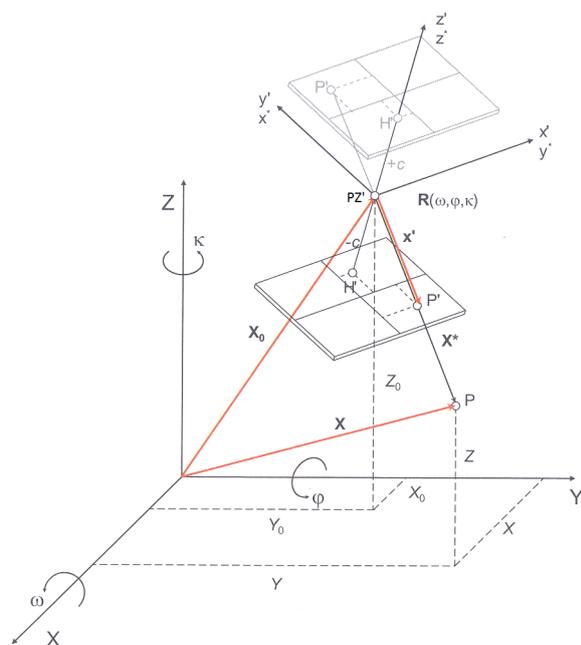


Abbildung 4: Äußere Orientierung eines Einzelbildes [LUHMANN, 2010, S. 237]

2.3.2 Stereoauswertung

Im Stereobildfall wird die äußere Orientierung in zwei Stufen unterteilt, die relative und die absolute Orientierung.

Relative Orientierung

Die relative Orientierung beschreibt die Lage zweier Bilder zueinander in einem dreidimensionalen Modellkoordinatensystem.

Ein gängiges Rechenverfahren zur relativen Orientierung ist der sogenannte Folgebildanschluss. Hierbei wird der Ursprung des Modellkoordinatensystems in das Projektionszentrum des ersten Bildes gelegt. Die Richtung der Achsen wird durch die Richtung der Achsen im Bildkoordinatensystem festgelegt (siehe Abb. 2.3.2). Dadurch sind die Parameter der äußeren Orientierung des ersten Bildes im Objektkoordinatensystem bereits festgelegt:

$$\begin{aligned}
 x_{01} &= 0 & \omega_1 &= 0 \\
 y_{01} &= 0 & \varphi_1 &= 0 \\
 z_{01} &= 0 & \kappa_1 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

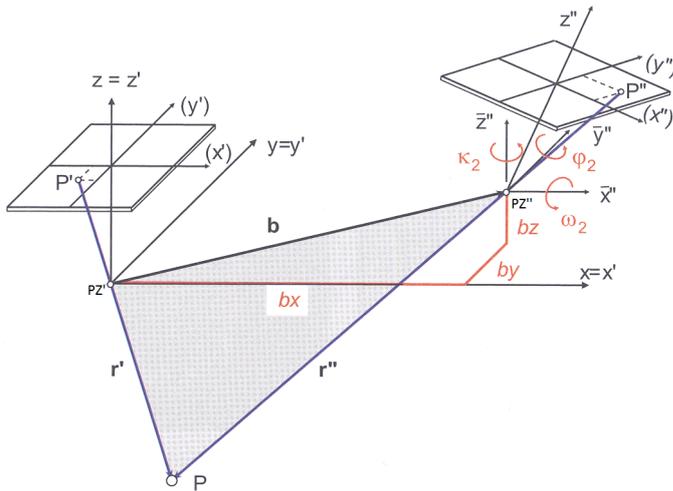


Abbildung 5: Relative Orientierung eines Stereobildpaares und Modellkoordinatensystems [LUHMANN, 2010, S. 276]

Zur Orientierung des zweiten Bildes relativ zum Ersten müssen drei Translationen (bx, by, bz) und drei Rotationen $(\omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$ bestimmt werden. Die drei Translationen definieren den Basislinienvektor \mathbf{b} .

Die relative Orientierung beschreibt nur die relative Ausrichtung der Bilder zueinander. Die Modellkoordinaten haben keinen Bezug zum übergeordneten Objektraum. Deshalb kann ein beliebiger Maßstab gewählt werden, was zur Folge hat, dass noch keine Objektgrößen bestimmt werden können.

Zur Festlegung des Maßstabs wird eine Basislinienkomponente auf einen beliebigen Wert festgelegt, in der Regel

$$bx = 1 \quad (2.6)$$

Dadurch müssen nur noch fünf Bestimmungselemente $(by, bz, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2)$ zur Beschreibung der relativen Orientierung des zweiten Bildes festgelegt werden. (vgl. [LUHMANN, 2010, S. 275 ff.])

Absolute Orientierung

Bei der absoluten Orientierung wird das bei der relativen Orientierung mit beliebiger Lage, Orientierung und Maßstab bestimmte Modellkoordinatensystem in das übergeordnete Objektkoordinatensystem transformiert. Der Zusammenhang zwischen Modellkoordinaten (x, y, z) und Objektkoordinaten (X, Y, Z) wird über eine räumliche Ähnlichkeitstransformation hergestellt. Um den Zusammenhang eindeutig herzustellen, müssen drei Translationen (X_m, Y_m, Z_m) , drei Rotationen (ξ, η, ζ) und ein Maßstab (m) festgelegt werden. Zur Berechnung müssen sieben Punktinformationen, z. B. zwei

XYZ-Passpunkte und eine Z-Koordinate bekannt sein.

Die sich hieraus ergebende Transformation eines Modellpunktes in das Objektkoordinatensystem lautet:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} + m \cdot \mathbf{R}(\xi, \eta, \zeta) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Die Lösung erfolgt durch eine Ausgleichung nach dem Prinzip der vermittelnden Beobachtungen. Abb. 6 veranschaulicht schematisch das Prinzip der Transformation der Modellkoordinaten in den Objektraum. (vgl. [LUHMANN, 2010, S. 289 ff.])

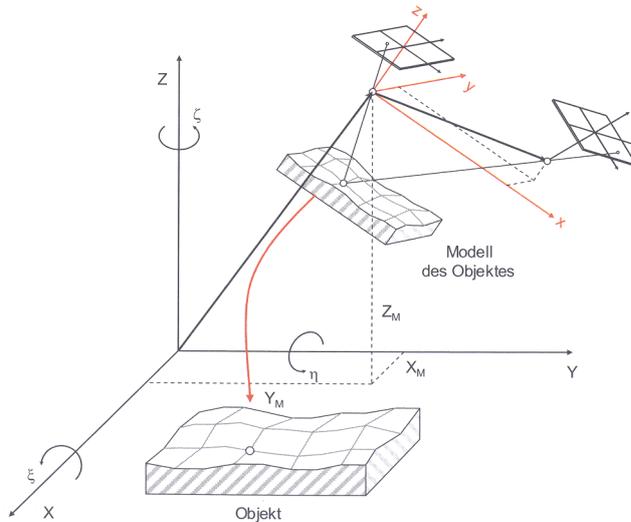


Abbildung 6: Prinzip der absoluten Orientierung und Transformation des Modells in den Objektraum [LUHMANN, 2010, S. 289]

2.4 Räumlicher Rückwärtsschnitt

Der räumliche Rückwärtsschnitt ist eine rechnerische Form der Einzelbildauswertung. Verwendet werden die gemessenen Bildkoordinaten unter der Voraussetzung, dass die innere Orientierung bekannt ist. Ziel des Rückwärtsschnitts ist die Bestimmung der äußeren Orientierung über Passpunkte. Um die sechs Parameter der äußeren Orientierung ($X, Y, Z, \omega, \varphi, \kappa$) bestimmen zu können, müssen mindestens drei Vollpasspunkte bekannt sein (siehe Abb. 7), da diese jeweils zwei Beobachtungsgleichungen (2.2) liefern.

Auf Grund der Nichtlinearität der Gleichungen (2.2) wird die Lösung mit Näherungswerten für die Unbekannten und die linearisierten Beobachtungsgleichungen (2.8) iterativ berechnet.

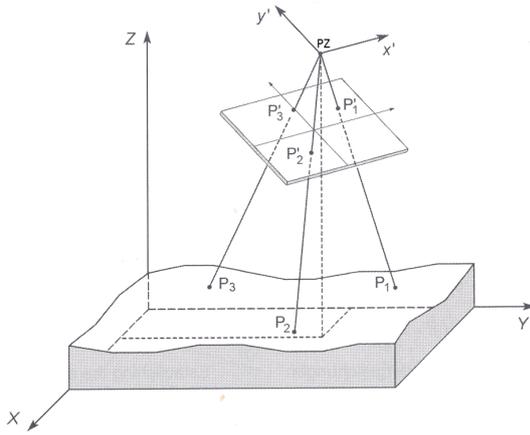


Abbildung 7: Prinzip der Einzelbildauswertung mit drei Passpunkten
[ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 225]

$$\begin{aligned}
 v'_{xi} &= \frac{\partial x'_i}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial x'_i}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial x'_i}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial x'_i}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial x'_i}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial x'_i}{\partial \kappa} d\kappa + x'_i - x' \\
 v'_{yi} &= \frac{\partial y'_i}{\partial X_0} dX_0 + \frac{\partial y'_i}{\partial Y_0} dY_0 + \frac{\partial y'_i}{\partial Z_0} dZ_0 + \frac{\partial y'_i}{\partial \omega} d\omega + \frac{\partial y'_i}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial y'_i}{\partial \kappa} d\kappa + y'_i - y'
 \end{aligned} \quad (2.8)$$

x'_i und y'_i sind die Bildkoordinaten, welche sich aus den Gleichungen (2.8) mit den Elementen der bekannten inneren Orientierung, den Näherungswerten der unbekannt Parameter sowie den Passpunktkoordinaten X_i, Y_i, Z_i ergeben.

„Die Bestimmung von Näherungskoodinaten für die unbekannt Parameter ist im allgemeinen Fall kein triviales Problem“ [SCHWIDEFSKY/ACKERMANN, 1976, S. 150]. Bei einem Flug in Ost/West Richtung und genäherten Senkrechtaufnahmen können folgende Näherungswerte für die 1. Iteration verwendet werden: $\omega^0 = \varphi^0 = \kappa^0 = 0$. Handelt es sich nicht um einen Ost/Westflug, so kann für κ die ungefähre Flugrichtung angenommen werden. Die Näherungswerte für die Projektionszentren X'_0, Y'_0, Z'_0 können mit hinreichender Genauigkeit aus der in der Regel eingesetzten GPS (Global Positioning System)-Navigation abgeleitet werden. Heutzutage wird bei vielen Flugmissionen die Orientierung der Messbilder mit einer IMU (inertial measurement unit) erfasst.

Da der räumliche Rückwärtsschnitt in der Photogrammetrie sehr häufig Verwendung findet, existiert eine Vielzahl von Lösungsstrategien. So gibt es z. B. einen mit vier Passpunkten auskommenden linearen Lösungsansatz nach Müller/Killian (siehe [KRAUS, 1996, S. 51 ff.]), der allerdings keine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung verwendet, sodass die Genauigkeit beeinträchtigt ist.

Im Computer-vision-Bereich wird oft eine direkte lineare Transformation verwendet, welche den Bezug zwischen den Bildkoordinaten und Objektkoordinaten mit einer projektiven Transformation herstellt. (vgl. [SCHWIDEFSKY/ACKERMANN, 1976, S. 149 ff.], [KRAUS, 2004, S. 207 ff.], [ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 225 f.]

2.5 Räumlicher Vorwärtsschnitt

Der räumliche Vorwärtsschnitt ist ein Verfahren zur Zweibildauswertung bei bekannter innerer und äußerer Orientierung.

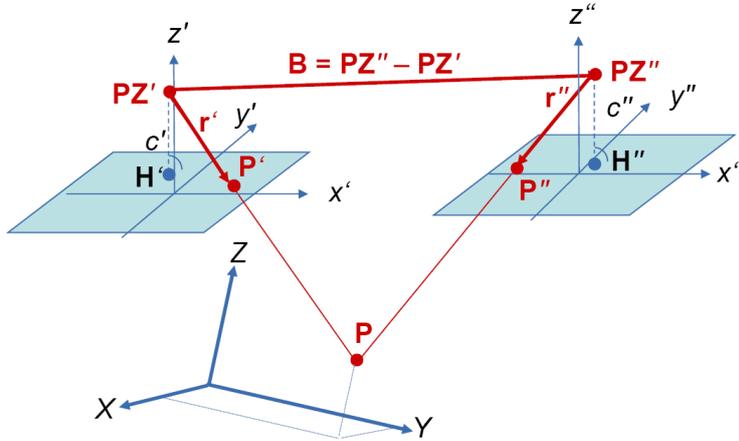


Abbildung 8: Allgemeinfeld der Zweibildmessung. PZ sind die Projektionszentren der beiden Bilder. Der Bildhauptpunkt H und die Kammerkonstante c' sind die Elemente der inneren Orientierung. P' und P'' sind die Abbildungen des Objektpunktes P [HEIPKE, 2014]

Die äußere Orientierung liegt im modernen Luftbildfall durch GPS/IMU - Aufzeichnungen vor, welche im Post Processing genau ermittelt wird. Da GPS und IMU einen direkten Bezug zum übergeordneten Koordinatensystem herstellen, spricht man auch von direkter Georeferenzierung. Bei der indirekten Georeferenzierung liegt die äußere Orientierung nicht vor und wird über Passpunkte berechnet.

Die beiden Bilder sollten genäherte Senkrechtaufnahmen sein und sich um etwa 60 % überlappen. Man spricht in so einem Fall von Stereoaufnahmen (siehe Abb. 8).

Die photogrammetrische Auswertung eines Stereobildpaares bei bekannter äußerer Orientierung geht von den ermittelten Bildkoordinaten homologer Punkte aus. Aus den Gleichungen (2.2) lassen sich die Objektkoordinaten X , Y , Z des Punktes P durch räumliches Vorwärtseinschneiden mit folgender Beziehung berechnen:

$$\begin{aligned}
 X &= X'_0 + (Z - Z'_0)bx' \\
 Y &= Y'_0 + (Z - Z'_0)by' \\
 X &= X''_0 + (Z - Z''_0)bx'' \\
 Y &= Y''_0 + (Z - Z''_0)by''
 \end{aligned}
 \tag{2.9}$$

Die Größen bx , by ergeben sich aus den vier gemessenen Bildkoordinaten und den bekannten Elementen der inneren und äußeren Orientierung jeweils für Bild 1' und Bild

2 ''.

X kann aus der ersten oder dritten Gleichung, Y aus der zweiten oder vierten Gleichung der vier Gleichungen (2.9) berechnet werden. Z erhält man aus der ersten und dritten Gleichung:

$$Z = \frac{X_0'' - Z_0'' \cdot b_x'' + Z_0' \cdot b_x' - X_0'}{b_x' - b_x''} \quad (2.10)$$

Ein besseres Ergebnis liefert die Bestimmung der Neupunktkoordinaten über eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate. In diesem Fall handelt es sich um vier Beobachtungsgleichungen. Unter Verwendung der Kollinearitätsgleichungen (2.1) werden die Beobachtungsgleichungen für ein Bild nach Taylor linearisiert (7).

Somit ergeben sich vier linearisierte Beobachtungsgleichungen mit drei Unbekannten. Die Elemente $x_i', ''$, $y_i', ''$ sind die gemessenen Bildkoordinaten, welche sich durch Hinzunahme der Näherungswerte für die Neupunkte und den Elementen der inneren und äußeren Orientierung aus den Gleichungen (2.1) ergeben. Die Näherungswerte können über die Gleichungen (2.9) und (2.10) berechnet werden.

Der große Vorteil der Lösung des räumlichen Vorwärtsschnittes durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate ist, dass im Rahmen der Ausgleichung auch die Genauigkeit der Neupunkte berechnet wird.

Wie oben gezeigt, gelingt die Lösung bei bekannter äußerer Orientierung auch ohne Passpunkte. Es ist jedoch trotzdem zu empfehlen, Passpunkte auch bei bekannter äußerer Orientierung zu verwenden, um erstens eine unabhängige Kontrollmöglichkeit zu schaffen und um zweitens die Elemente der äußeren Orientierung verbessern zu können. (vgl. [KRAUS, 2004, S. 202 ff.])

2.6 Passpunkte

Ein Passpunkt ist im allgemeinen ein Geländepunkt, dessen Koordinaten im übergeordneten Koordinatensystem schon vor der photogrammetrischen Auswertung bekannt sind. Es wird dabei in Vollpasspunkte (X, Y und Z sind bekannt), Lagepasspunkte (X und Y sind bekannt) und Höhenpasspunkte (nur Z ist bekannt) unterschieden.

Diese Passpunkte können durch die klassischen Verfahren der terrestrischen Messtechnik z. B. GPS oder durch ein GIS koordinatenmäßig bestimmt werden.

Weiterhin wird zwischen natürlichen und künstlichen Passpunkten unterschieden. In Gebieten mit eindeutigen und gut erkennbaren Strukturen können natürliche Punkte wie z. B. Wegkreuzungen, Gebäudeecken, Zaunecken usw. als Passpunkte verwendet werden. In Gebieten mit wenig Strukturen wie Wüsten, Wiesen usw. müssen künstliche Signale vor der Bildaufnahme vermarktet werden.

Als Kontrollpunkte werden koordinatenmäßig bekannte Punkte bezeichnet, die aber nicht für die Herstellung des Raumbezugs verwendet werden. An ihnen kann die Qualität und die Genauigkeit der Georeferenzierung gemessen werden. In dieser Arbeit werden ausschließlich natürliche Passpunkte verwendet, deren Koordinaten in einem GIS bestimmt werden. (vgl. [FINSTERWALDER/HOFMANN, 1968, S. 139],[ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 159])

2.7 Bündelblockausgleichung

Die Bündelblockausgleichung ist ein Verfahren zur gemeinsamen Bestimmung der äußeren Orientierung aller Bilder des Bildverbands sowie der Objektkoordinaten der Verknüpfungs- und Objektpunkte.

Voraussetzung dabei ist, dass ein streifen- oder blockförmiger Bildverband mit mindestens 60 % Längs- und 20 % Querüberdeckung vorliegt. Die schematische Darstellung des Grundprinzips der Bündelblockausgleichung ist in Abb. 9 dargestellt.

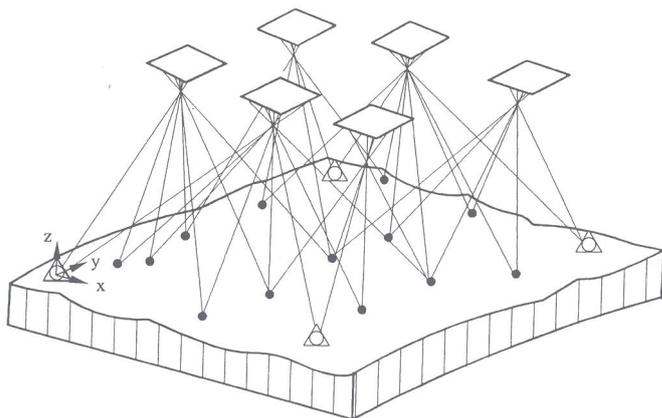


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Strahlenbündel einer Bündelblockausgleichung [KRAUS, 2004, S. 299]

Die Bündelblockausgleichung beruht auf dem mathematischen Modell der Zentralperspektive. Die Bildpunkte und Projektionszentren definieren nach den Kollinearitätsgleichungen (2.1) ein räumliches Strahlenbündel. Ziel ist es nun, die äußere Orientierung aller Strahlenbündel gleichzeitig zu bestimmen. Die Berechnung wird formuliert als vermittelnde Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (2.11). Als Beobachtungen gehen die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte, die Bild- und Objektkoordinaten der Passpunkte und die Elemente der inneren Orientierung in die Ausgleichung ein. Verknüpfungspunkte sind Punkte, die in mehreren Bildern vorkommen und eindeutig definiert werden können. Unbekannt sind die sechs Elemente der äußeren

Orientierung (drei Translationen: X_0, Y_0, Z_0 , drei Rotationen: ω, φ, κ), der Messbilder sowie die Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte.

$$v = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 - l \quad (2.11)$$

Ist die innere Orientierung nicht bekannt, können auch die Elemente der inneren Orientierung durch die Bündelblockausgleichung bestimmt werden. Die Verbesserungsgleichungen werden um die Elemente der inneren Orientierung erweitert. Da die Anzahl an Unbekannten erhöht wird, müssen weitere Pass- oder Verknüpfungspunkte in die Ausgleichung mit einbezogen werden.

Weiterhin können auch Korrekturpolynome für Objektivverzeichnungen und geometrische Abweichungen als Unbekannte eingeführt werden. Man spricht in diesem Fall von einer Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern oder Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung. Sie wird häufig bei der Auswertung verwendet, wenn keine photogrammetrischen Messkameras, sondern handelsübliche Kameras verwendet werden, da diese sehr instabil und deformierbar sind.

Aber auch bei der Auswertung von photogrammetrischen Messbildern wird die Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung vermehrt eingesetzt, da die zusätzlichen Parameter sehr effektiv systematische Restfehler beheben.

Um eine gute Genauigkeit erreichen zu können, sollte eine bestimmte Konfiguration der Passpunkte berücksichtigt werden. Abb. 10 zeigt die empfohlene Konfiguration an Voll- und Höhenpasspunkten für eine Bündelblockausgleichung ohne GPS/IMU-Unterstützung. Der Abstand der Vollpasspunkte sollte vier bis sechs Basislängen und der Abstand der Höhenpasspunkte im Streifen etwa vier Basislängen betragen. Zusätzlich sollten Höhenpasspunktketten quer zur Streifenrichtung liegen, wobei in jedem Überlappungsbereich ein Höhenpasspunkt liegen sollte.

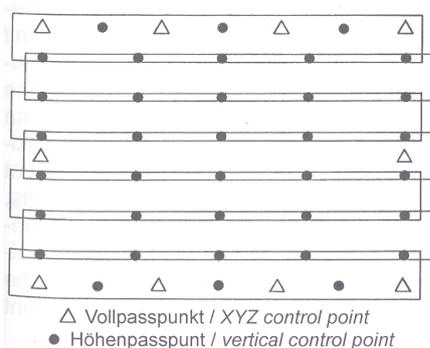


Abbildung 10: Empfohlene Passpunktkonfiguration Bündelblockausgleichung
 [ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 261]

Bei einem Block mit GPS/IMU-Unterstützung kann die Anzahl an Passpunkten reduziert werden.

Der Vorteil der Bündelblockausgleichung gegenüber anderen Verfahren zur Blockauswertung ist, dass es auf Grund des direkten Zusammenhangs zwischen Bild- und Objektkoordinaten ohne Zwischenschritte ein sehr genaues Verfahren ist. Weiterhin können leicht Beobachtungen der äußeren Orientierung in den Rechengang einbezogen werden. Dieser kann zusätzlich einfach erweitert werden, um weitere Parameter zu schätzen oder Restfehler zu kompensieren. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass auch Aufnahmen mit Amateurkameras oder unkonventionelle Blockkonfigurationen ausgewertet werden können.

Die Nachteile der Bündelblockausgleichung sind zum einen das rechenintensive Verfahren und zum anderen, dass es sich um ein nichtlineares Ausgleichungsproblem handelt und somit Näherungswerte nötig sind. Weiterhin kann ein Nachteil sein, dass keine Trennung in Lage- und Höhenauswertung möglich ist, es kann somit immer nur räumlich ausgewertet werden.

Die erreichbaren Lage- und Höhengenaugigkeiten für eine Objektkoordinate lassen sich mit den Gleichungen (2.12) abschätzen, wobei h_G die Flughöhe über Grund, B die Basislänge, c die Kammerkonstante und σ_{px} die Genauigkeit einer Bildkoordinate ist.

$$\begin{aligned}\sigma_{X,Y} &= \frac{h_G}{c} \cdot \sigma_{px} \\ \sigma_Z &= \frac{h_G^2}{c \cdot B} \cdot \sigma_{px}\end{aligned}\tag{2.12}$$

(vgl. [KRAUS, 2004, S. 299 ff.],[ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 259 ff.])

2.8 Mosaik

Unter einem Mosaik versteht man ein aus mehreren Einzelbildern zusammengesetztes, größeres Bild. In der Mosaikbildung ist es wichtig, sowohl geometrische als auch radiometrische Korrekturen der Bilder durchzuführen.

2.8.1 Geometrische Mosaikbildung

Um ein Mosaik erstellen zu können, müssen alle beteiligten Bilder in ein gemeinsames Bezugssystem transformiert werden. Die Einzelbilder werden mit Pass- und Verknüpfungspunkten versehen, geometrisch zusammengefügt und in ein geodätisches Bezugssystem transformiert.

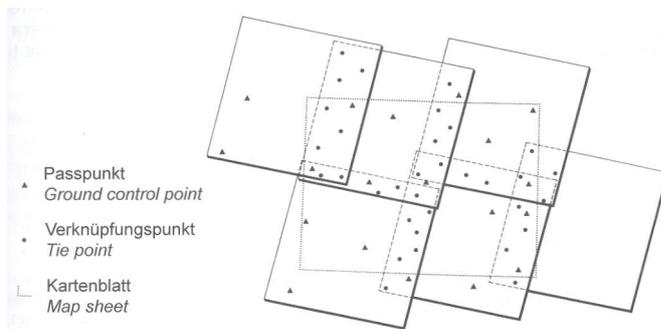


Abbildung 11: Schematische Darstellung zur geometrischen Mosaikbildung
[ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 233]

2.8.2 Radiometrische Mosaikbildung

Häufig treten zwischen den Einzelbildern radiometrische Unterschiede in Helligkeit und Kontrast auf. Dies ist besonders dann der Fall, wenn zwischen den einzelnen Aufnahmen größere Zeitspannen liegen. Um diese Unterschiede zu beseitigen, werden radiometrische Korrekturen durchgeführt.

Aus den in den Überlappungsbereichen vorkommenden Mehrfachinformationen lassen sich Unbekannte zur Korrektur gewinnen. Ein häufig angewendetes Verfahren ist die (iterative) Anpassung der Grauwertistogramme.

Eine geschickte Wahl der Schnittkanten z. B. entlang hoher Kontrastunterschiede wie Straßen, Flüssen oder Waldkanten kann helfen, die Kanten zu kaschieren und den optischen Eindruck zu verbessern. (vgl. [WIEDEMANN, 2013, S. 223 ff.],[DE LANGE, 2002, S. 401 ff.],[ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 233])

2.9 Orthophoto / true Orthophoto

Ein Orthophoto ist ein maßstabsgetreues entzerrtes Luftbild, welches die Landschaft lagerichtig darstellt.

Ausgangsmaterial für die Erstellung von Orthophotos sind Luftbilder. Diese Luftbilder bilden die Erdoberfläche zentralperspektivisch ab, wodurch es zu Verzerrungen kommt. Die geometrischen Verzerrungen entstehen durch eine geneigte Kamera, z. B. durch Schwankungen des Flugzeugs, und durch das Geländere relief.

Um aus einem Luftbild ein Orthophoto zu generieren, muss eine Entzerrung und Georeferenzierung durchgeführt werden. Dazu werden zum einen ein digitales Geländemodell und zum anderen Passpunkte benötigt.

Die Berücksichtigung des Geländere liefs erfolgt über eine differentielle Entzerrung. Dabei wird jeder Punkt auf Grund seiner Position (XYZ-Koordinate) individuell abgebildet, sodass ein neues Bild entsteht, welches die Objektoberfläche in einer Parallelprojektion

darstellt. Das Prinzip der Orthophotoberechnung ist schematisch in Abb. 12 dargestellt.

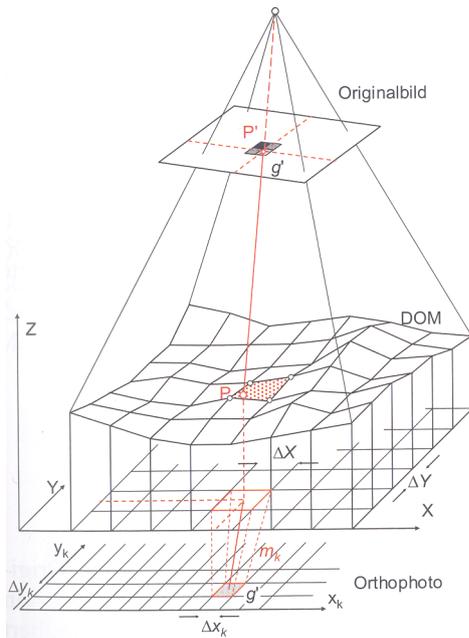


Abbildung 12: Prinzip der Orthophotoberechnung [LUHMANN, 2010, S. 267]

Orthophotos können entweder direkt über eine Vorwärtsprojektion oder indirekt über eine Rückwärtsprojektion entzerrt werden.

Bei der Vorwärtsprojektion wird für jedes Pixel im Luftbild die Position im Orthophoto berechnet. Nachteil der Vorwärtsprojektion ist, dass Lücken im Orthophoto entstehen können. Deshalb wird aus praktischen Gründen meist die Rückwärtsprojektion verwendet, deren Schritte im folgenden beschrieben werden:

1. Interpolation der Höhe Z_i für jeden Rasterpunkt an der Stelle (X_i, Y_i)

$$Z_i = Z(X_i, Y_i) \quad (2.13)$$

2. Berechnung der zu der Objektkoordinate (X_i, Y_i, Z_i) gehörende Bildkoordinate x'_i, y'_i aus den Parametern der inneren und äußeren Orientierung mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen (2.1)

$$\begin{aligned} x'_i &= F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, x'_0, c, \Delta x', X_i, Y_i, Z_i) \\ y'_i &= F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, y'_0, c, \Delta y', X_i, Y_i, Z_i) \end{aligned} \quad (2.14)$$

3. Bestimmung des Grauwertes an der Stelle (x'_i, y'_i) . Da die Koordinaten meist nicht direkt in das Zentrum eines Pixels fallen muss eine Interpolation durchgeführt

werden.

$$g'_i = g(x'_i, y'_i) \tag{2.15}$$

Da in einem digitalen Geländemodell Gebäude, Bäume, Brücken usw. nicht modelliert werden, entstehen an diesen Objekten Lagefehler im Orthophoto.

Wird anstelle eines Geländemodells ein Oberflächenmodell zur Orthophotoentzerrung verwendet, werden die Lagefehler eliminiert, da alle Objekte der Erdoberfläche im Oberflächenmodell enthalten sind. Das Ergebnis wird echtes (true) Orthophoto genannt. Die durch Verdeckung nicht sichtbaren Bereiche müssen aufwendig durch andere Bilder abgedeckt werden.

In Abb. 13 ist ein Luftbild mit der schematischen Darstellung der Zentralperspektive sowie ein echtes Orthophoto mit schematischer Darstellung der Parallelprojektion dargestellt. (vgl. [LUHMANN, 2010, S. 266 ff.],[ALBERTZ/WIGGENHAGEN, 2009, S. 231 f.])

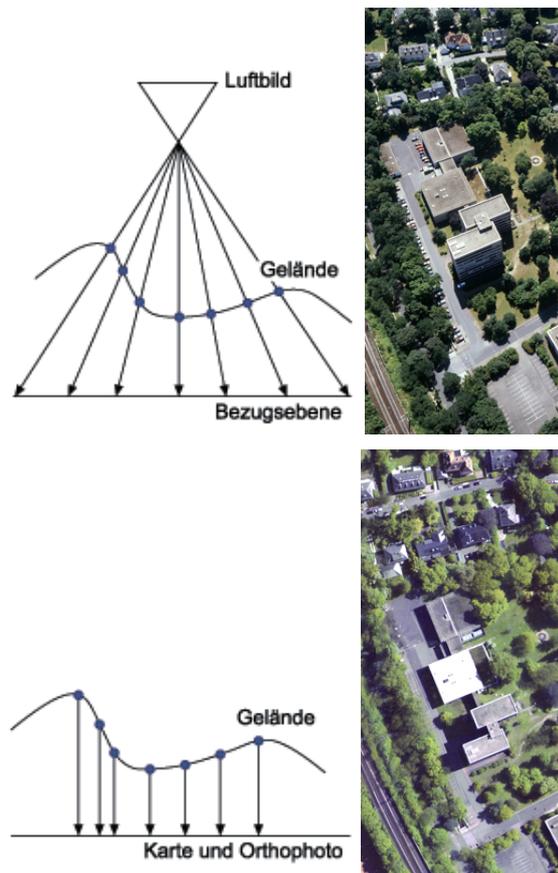


Abbildung 13: Oben ist ein Luftbild mit der schematischen Abbildung der Zentralprojektion dargestellt, unten ein Orthophoto mit der schematischen Darstellung der Parallelprojektion [BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE, 2015]

2.10 3D - Modelle

2.10.1 Höhenmodelle

Digitale Höhenmodelle sind für viele Anwendungen und Gebiete wie z. B. Archäologie, Forstwirtschaft oder Katastrophenmanagement von großem Nutzen. Zur Erfassung von digitalen Höhenmodellen gibt es verschiedene Aufnahmetechniken wie terrestrische Messungen, Airborne Laserscanning, Fernerkundung und Photogrammetrie, wobei die Höhenbestimmung durch photogrammetrische Auswertung eine schnelle und effiziente Lösung ist.

Das digitale Höhenmodell oder DEM (engl. Digital Elevation Model) ist ein allgemeiner Überbegriff über verschiedene Arten von Höhenmodellen. Es wird meist in folgende drei Bereiche unterteilt:

- Das digitale Geländemodell DGM (engl. Digital Terrain Model DTM) beschreibt die Geländeoberfläche ohne Gebäude und Vegetation (siehe Abb. 2.10.1).
- Das digitale Oberflächenmodell DOM (engl. Digital Surface Model DSM) beschreibt die Geländeoberfläche mit der gesamten Bebauung und Vegetation (siehe Abb. 2.10.1).
- Das Digital Canopy Model DCM stellt nur die Vegetation und Bebauung dar. Dazu werden DSM und DTM voneinander subtrahiert.

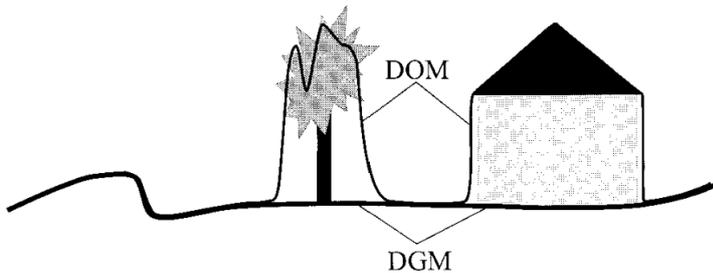


Abbildung 14: Digitales Geländemodell DGM und digitales Oberflächenmodell DOM. [KRAUS, 2004, S. 354]

Alle Modelle werden durch dreidimensionale Punktwolken mit X-, Y-, und Z-Koordinaten repräsentiert. Häufig wird jedoch nur die Z-Koordinate gespeichert, da die Punkte in einem Raster vorliegen und die Höhe als Funktion der Lage angegeben wird. Da die Modelle keine „echte“ dritte Dimension haben spricht man auch von 2.5D Modellen.

Die Schwierigkeit hierbei ist, dass ein Punkt nur einen Höhenwert besitzen darf. An Brücken oder Überhängen kommt es somit zu Problemen, da zu einer Lagekoordinate mehrere Höhenwerte gehören (vgl. [LI ET AL., 2004, S. 6 ff.]).

2.10.2 Automatische Oberflächenbestimmung

Die Erfassung von Oberflächen und Geländehöhen sowie die Rekonstruktion von Objekten ist ein zentraler Bestandteil der Photogrammetrie.

Dabei wird in manuelle Oberflächenbestimmung durch einen Operateur sowie die automatische Oberflächenbestimmung unterschieden. In der manuellen Oberflächenbestimmung erfasst der Operateur markante Geländepunkte wie Gipfel sowie Geländekanten als Linien wie z. B. Bruchkanten oder Küstenlinien. Zusätzlich werden noch Punktmessungen in einem Raster durchgeführt. Aus diesen Daten kann die Geländeoberfläche hinreichend gut beschrieben werden.

Es wird deutlich, dass die manuelle Oberflächenbestimmung nicht nur als Messvorgang angesehen werden darf, sondern dass auch eine Bildinterpretation stattfindet.

Gerade die Bildinterpretation macht eine automatische Oberflächenbestimmung schwierig. Geländekanten und markante Punkte sind zwar für den Menschen leicht zu erkennen, eine automatische Erkennung durch Algorithmen ist aber sehr komplex. Daher werden in der automatischen Oberflächenbestimmung meist nur Rasterpunkte gemessen, sodass eine Punktwolke entsteht. Geländekanten und markante Punkte müssen manuell erfasst werden.

Eine Möglichkeit der automatischen Bestimmung ist die Berechnung von Objektkoordinaten durch räumlichen Vorwärtsschnitt. Dazu wird ein Raster aus homologen Punkten in den Bildern gebildet und zu jedem Punkt wird die Objektkoordinate bestimmt.

Eine andere Lösung ist die Zusammenfassung der Bildzuordnung und Objektrekonstruktion in einen geschlossenen Auswertungsprozess.

Ein einfaches Verfahren, welches diesen Ansatz verfolgt, ist die Vertical Line Locus Zuordnung VLL. Ist die äußere Orientierung der beiden Bilder bekannt, wird die Lage (X- und Y-Koordinate) der Punkte in einem regelmäßigen Raster vorgegeben. Zu jedem Punkt P_i werden entlang der Lotlinie zwischen zwei Punkten (Q und R) mehrere Z-Koordinaten in kleinen, gleichabständigen Intervallen ΔZ definiert.

Mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen (2.1) können nun die zu den einzelnen Höhen gehörenden Punkte in die beiden Bilder transformiert werden. Für jedes Punktpaar in den Messbildern wird nun die Ähnlichkeit berechnet. Dies geschieht z. B. über den Kreuzkorrelationskoeffizient r zwischen den beiden Bildern. Das Maximum r_{max} des Kreuzkorrelationskoeffizienten legt die gesuchte Z-Koordinate fest. Das Verfahren ist in Abb. 2.10.2 schematisch dargestellt. (vgl. [LUHMANN, 2010, S. 300 f.],[KRAUS, 2004, S. 392 ff.])

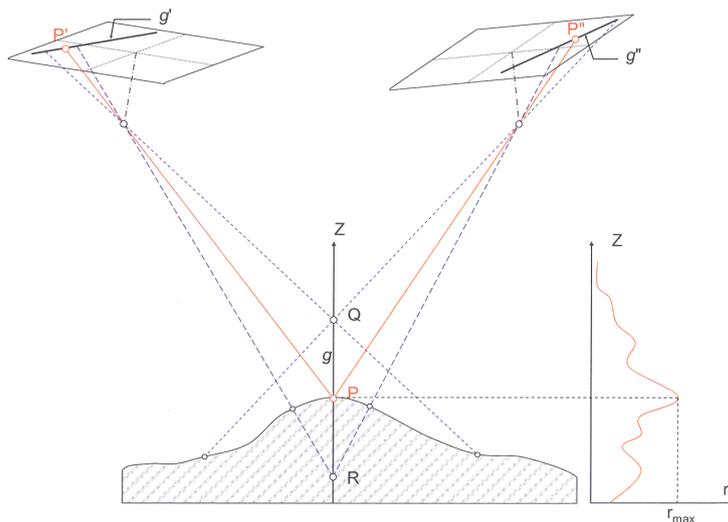


Abbildung 15: Schematische Darstellung der VLL-Zuordnung und des Korrelationskoeffizienten bei verschiedenen Z-Werten [LUHMANN, 2010, S. 300]

2.10.3 Poisson Oberflächenrekonstruktion

Die Oberflächenrekonstruktion ist ein Verfahren, um aus einer beliebigen Punktwolke eine Oberfläche zu generieren, welche diese Punktwolke beschreibt. Die implizite Oberflächenrekonstruktion verfolgt den Ansatz, die Oberfläche durch eine Indikatorfunktion χ zu beschreiben. Diese Funktion klassifiziert die Punkte hinsichtlich deren Lage zu der beschreibenden Oberfläche. Punkte mit dem Wert 1 liegen innerhalb der Oberfläche und Punkte mit dem Wert 0 außerhalb. Daraus können anschließend Isolinien extrahiert werden.

Zwischen den orientierten Punkten einer Oberfläche und der Indikatorfunktion besteht ein integraler Zusammenhang. Der Gradient der Indikatorfunktion ist überall null, außer in der Nähe der Oberfläche, wo er dem inversen Normalenvektor der Oberfläche entspricht. Die skalare Funktion χ muss nun so definiert werden, dass der Gradient das Vektorfeld V bestmöglich approximiert. Durch die Einführung des Laplace-Operators ∇ wird das Problem in ein Standard-Poisson-Problem (partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung) transformiert:

$$\Delta\chi = \nabla \cdot \nabla\chi = \nabla V \quad (2.16)$$

Abb. 16 zeigt schematisch den Ablauf der Oberflächenrekonstruktion nach Poisson.

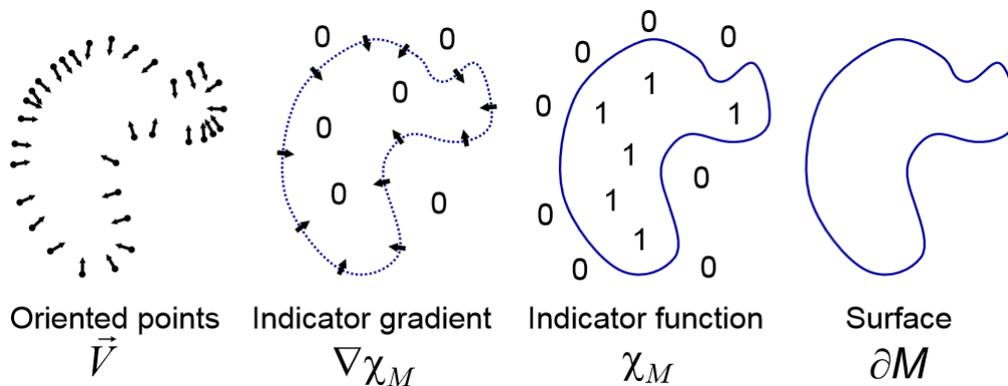


Abbildung 16: Schematischer Ablauf der Oberflächenrekonstruktion nach Poisson
[KAZHDAN ET AL., 2006, S. 1]

Der Vorteil der Oberflächenrekonstruktion nach Poisson ist, dass sie im Gegensatz zu vielen anderen Verfahren eine globale Lösung bietet. Das heißt die Oberfläche wird nicht in viele kleine Teile zerlegt, für die eine Funktion bestimmt wird und die später wieder zusammengesetzt werden, sondern es wird eine Funktion für die gesamte Oberfläche verwendet. Dadurch entsteht eine sehr glatte Oberfläche, welche robust auch verrauschte Punktwolken approximiert. (vgl. [KAZHDAN ET AL., 2006])

3 Konzept für den Arbeitsablauf

3.1 Rahmenbedingungen und Beschreibung des Datensatzes

Die Rahmenbedingungen dieser Arbeit werden durch die Arbeitshilfe Kampfmittelräumung [AH KMR, 2014, S. 201 ff.] festgelegt. Für die Georeferenzierung ist die Verwendung der digitalen Orthophotos des Bundesamtes für Kartographie und Geoinformatik vorgeschrieben. Die einzuhaltende Genauigkeit einer Lagekoordinate soll 3 m betragen. Überschreitungen dieser Genauigkeit sind nur in Ausnahmefällen und mit Begründung zulässig.

Als Fallbeispiele werden drei ausgewählte Befliegungskampagnen aus verschiedenen Jahren verwendet. Die Kampagne aus 2002 besteht aus sechs Bildern die in einer Flughöhe von 4000 m aufgenommen wurden. Die Kammerkonstante beträgt 305 mm und die berechnete Pixelgröße $39.6 \mu\text{m}$. Die Kampagne von 1977 besteht aus sieben Bildern, die in einer Flughöhe von 2000 m aufgenommen wurden. Die Brennweite beträgt 152.9 mm und die berechnete Pixelgröße $39.9 \mu\text{m}$. Die Kampagne aus 1945 besteht aus 13 Bildern. Die Flughöhe beträgt 7600 m und die Brennweite 508 mm. Für die Pixelgröße wurde eine Größe von $36.4 \mu\text{m}$ berechnet. Die Kampagnen wurden so ausgewählt, dass der zeitliche Abstand zwischen den Kampagnen möglichst ähnlich ist.

3.2 Besonderheiten historischer Luftbilder

Historische Luftbilder und besonders Aufklärungsbilder aus der Zeit des zweiten Weltkrieges sind oft nicht unter photogrammetrischen Gesichtspunkten erstellt worden. So ist die Ausrichtung der Flugstreifen sowie die Überlappung zwischen den Bildern oft nicht optimal. Weiterhin wurden meist keine kalibrierten Kameras verwendet, da diese vor jedem Flug hätten kalibriert werden müssen, was während eines Kriegseinsatzes sehr schwierig ist. Die Koordinaten der Projektionszentren wurden durch Karten bestimmt. Dadurch sind sie deutlich ungenauer als die durch GNSS-Messungen (Globales Navigationssatellitensystem) bestimmten Projektionszentren bei modernen Bildflügen. Ein weiteres oft vorkommendes Problem bei historischen Bildern ist eine Veränderung der Flughöhe und -geschwindigkeit. Weiterhin traten auch häufig Verkippungen der Flugzeugachsen auf. Aus diesen Gründen kann nach [CARLS ET AL., 1999, S. 9] streng genommen nicht von Senkrechtbildern ausgegangen werden.

Da es sich bei historischen Luftbildern um analoge Bilder handelt, müssen diese zunächst

eingescannt werden, um sie mit moderner photogrammetrischer Software auszuwerten. Bei sehr alten Bildern tritt zusätzlich oft das Problem auf, dass die Originale nicht verfügbar sind und somit Kopien verwendet werden müssen. Dadurch können Verzerrungen und eine Verschlechterung der Bildqualität eintreten.

Da bei der Bearbeitung von historischen Luftbildern nicht kalibrierte Kameras verwendet werden, wird angenommen, dass der Bildhauptpunkt H' mit dem Bildmittelpunkt M übereinstimmt und die Kammerkonstante der Brennweite entspricht.

3.3 Orientierung der Bilder

Im ersten Schritt müssen die Bilder orientiert werden. Dazu müssen die folgende Schritte durchgeführt werden.

3.3.1 Innere Orientierung

Die Innere Orientierung wird nicht wie bei der Auswertung von eingescannten Analogbildern üblich durch Anmessen der Rahmenmarken wiederhergestellt, sondern durch eine Ausgleichung bestimmt. Das ist nötig, da bei einigen Bildern die Rahmenmarken nicht vorhanden sind oder durch das Einscannen abgeschnitten wurden. Weiterhin sind auch die Sollkoordinaten der Rahmenmarken nicht bekannt, deshalb wäre ein Anmessen nicht zielführend.

3.3.2 Relative Orientierung

Ist die innere Orientierung bestimmt, können die Bilder relativ zu einander orientiert werden. Dazu werden zunächst markante Punkte in den Bildern gesucht. Anschließend werden die gefundenen Punkte verglichen und zusammenhängende Paare ermittelt. Mit Punkten, die in mehr als einem Bild gefunden wurden, können die Bilder relativ orientiert werden.

3.3.3 Äußere Orientierung

Zur Bestimmung der äußeren Orientierung wird die Position der Kamera im Objektkoordinatensystem zum Zeitpunkt der Bildaufnahme bestimmt. Zur Bestimmung der Parameter der räumlichen Transformation, welche den Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten herstellt, werden Passpunkte benötigt.

3.3.4 Absolute Orientierung

Die absolute Orientierung des Bildverbands wird über Passpunkte hergestellt. Dazu werden mindestens drei, besser jedoch mehr Vollpasspunkte koordinatenmäßig bestimmt und im Bild markiert. Durch die Berechnung der Bündelblockausgleichung wird nun die absolute Orientierung für den gesamten Bildverband bestimmt.

3.4 Erstellung DGM und Orthophotomosaik

Zur Erzeugung eines Orthophotomosaiks muss zunächst ein DGM berechnet werden, um die Luftbilder zu entzerren.

3.4.1 DGM

Aus den absolut orientierten Luftbildern werden mittels des Vorwärtsschnittes rasterförmig Geländepunkte berechnet. Um die Suche nach homologen Punkten zu beschleunigen kann die Vertical-Line-Locus-Methode verwendet werden. Bei der Berechnung findet keine Bildinterpretation statt, sodass ein Raster an Geländepunkten entsteht, in dem keine Geländekanten oder markante Punkte enthalten sind.

3.4.2 Orthophoto

Um ein Luftbild so zu entzerren, dass die Objekte lagerichtig und maßstabsgetreu abgebildet werden, wird ein Höhenmodell benötigt. Dabei wird für jedes Pixel die Position im Orthophoto mit Hilfe des Geländemodells neu berechnet. Wird ein DGM zur Entzerrung verwendet, entsteht ein Orthophoto, in dem Hausdächer und Brücken nicht lagerichtig dargestellt werden, da sie im DGM nicht modelliert sind. Wird stattdessen ein DOM verwendet, werden auch Dächer und Brücken an der richtigen Position dargestellt.

3.4.3 Orthophotomosaik

Werden mehrere Orthophotos zu einem großen Bild zusammengesetzt, spricht man von Orthophotomosaik. Das Problem, welches dabei auftritt ist, dass die Bilder unterschiedliche Helligkeiten und Kontraste haben können. Aus den Mehrfachinformationen in den Überlappungsbereichen werden Koeffizienten bestimmt, mit denen die Histogramme der Bilder angeglichen werden.

3.5 Untersuchung der 3D Genauigkeit

Die berechneten Geländemodelle sind auf Genauigkeit zu untersuchen. Dabei steht die Höhe im Mittelpunkt. Die Genauigkeit einer Lagekoordinate wird in dieser Arbeit als fehlerfrei angenommen. Dabei soll auch die Lageverschiebung untersucht werden, die auf Grund eines fehlerhaften Geländemodells entsteht.

3.6 Fallbeispiele

Das beschriebene Vorgehen soll an drei Beispielen verdeutlicht werden. Ein Beispiel aus dem Jahr 2002 soll zeigen, dass das durchgeführte Verfahren bei Bildern guter Qualität auch die gewünschten Ergebnisse liefert und somit Fehler nicht auf Unstimmigkeiten im verwendeten Verfahren zurückzuführen sind. Die Beispiele aus dem Jahr 1977 und 1945 sollen die Verschlechterung der Ergebnisse auf Grund schlechter werdender Qualität der Bilder zeigen, wobei die Kampagne aus 1945 die eigentliche Kernaufgabe dieser Arbeit ist.

4 Umsetzung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des Referenzierungsansatzes im Detail beschrieben. Zunächst wird die verwendete Software vorgestellt und anschließend folgt die Beschreibung des Vorgehens.

4.1 Verwendete Software

4.1.1 QGIS

QGIS (früher Quantum-GIS) ist ein Open-Source Geoinformationssystem (GIS). Es bietet zahlreiche Werkzeuge zur Verarbeitung und Analyse von Vektor- und Rasterdaten wie ESRI-Shapefile oder GeoTIFF sowie das Einbinden von Internet-Daten wie Google-Maps oder Open Streetmap Karten.

QGIS wird zur Bestimmung der räumlichen Koordinaten der Passpunkte verwendet sowie zur Analyse der berechneten Oberflächenmodelle.

4.1.2 PhotoScan

PhotoScan ist eine photogrammetrische Auswertesoftware zur Bearbeitung von digitalen Bildern zur Erzeugung von räumlichen 3D Daten.

PhotoScan bietet Werkzeuge zur photogrammetrischen Triangulation von digitalen Bildern, zur Erstellung von dünnen und dichten Punktwolken, zum Export von digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen sowie zur Erzeugung von georeferenzierten Orthophotomosaiken. Die erzeugten Daten sind optimiert für die Weiterverarbeitung in GIS-Anwendungen.

4.1.3 MATLAB

MATLAB ist ein matrizenbasiertes Rechenprogramm zur numerischen Lösung mathematischer Probleme. Es dient im Gegensatz zu Computeralgebrasystemen nicht zur analytischen Lösung, sondern zur numerischen Simulation von Problemen. MATLAB bietet auch eine umfangreiche Funktionsbibliothek zur Verarbeitung von Bilddaten.

Mit Hilfe von MATLAB wird die Lageverschiebung auf Grund einer fehlerhaften Geländehöhe berechnet. Weiterhin werden die Bilder auf eine einheitliche Größe beschnitten.

4.2 Vorverarbeitung der Bilder

Bei den verwendeten Luftbildern handelt es sich um eingescannte Kontaktkopien von Luftbildern der alliierten Streitkräfte, die primär zur Dokumentation der Bombenabwürfe angefertigt wurden. Das heißt, der Fokus lag bei der Erstellung in der militärischen Aufklärung und nicht auf einer photogrammetrischen Auswert- bzw. Weiterverarbeitbarkeit. Durch das Kopieren und anschließende Einscannen der Bilder ergeben sich unterschiedliche Bildgrößen. Voraussetzung dafür, dass PhotoScan die Bilder einer Kamera zuordnet, ist, dass diese alle die identische Bilddimension in Pixeln haben müssen.

Um dies zu gewährleisten wurde, im Rahmen dieser Arbeit ein MATLAB-Programm erstellt, welches die Bilder eines Bildfluges jeweils auf die gleiche Größe zuschneidet. Der durch das Zuschneiden entstehende Informationsverlust muss hier in Kauf genommen werden, damit die Auswertung in PhotoScan optimal durchgeführt werden kann. Das Programm ermittelt die Größe des kleinsten Bildes im Verband und schneidet alle anderen Bilder auf diese Größe zu. Dabei wird darauf geachtet, dass die Bilder von allen Seiten gleichmäßig beschnitten werden, um den Informationsverlust möglichst gering zu halten. Ein Nachteil dieses Vorgehens ist, dass durch das Beschneiden der Bildhauptpunkt verschoben wird. Dies ist aber zu vernachlässigen, da keine Informationen über die innere Orientierung vorliegen und diese im Auswerteprozess rekonstruiert wird.

Die Auflösung der Bilder wurde auf 20 % der Originalauflösung reduziert, um die Bearbeitungszeit zu reduzieren. Dies ist möglich, da Rechenzeit und Qualitätsgewinn bei einer höheren Auflösung in keinem angemessenen Verhältnis stehen.

4.3 Orientierung

4.3.1 Innere und relative Orientierung der Bilder

Die Wiederherstellung der inneren Orientierung sowie die relative Orientierung des Bildverbandes erfolgt in PhotoScan in einem Programmschritt, wobei die Berechnung und Orientierung hauptsächlich durch Verknüpfungspunkte erfolgt. Hierbei wurde darauf geachtet, Bereiche zu maskieren, in denen keine Verknüpfungspunkte gesucht werden sollen. Maskiert wurden Bereiche mit sehr geringer Textur, wie zum Beispiel Wälder, oder Artefakte in den Bildern, wie Wolken, da es in diesen Bereichen schnell zu Fehlverknüpfungen kommen kann. Weiterhin wurden Verknüpfungspunkte nicht in den Randbereichen der Bilder gesucht, da dort oft Markierungen und Reste von Klebestreifen sind, welche zu weiteren Fehlverknüpfungen führen.

Nachdem alle Bereiche maskiert wurden, welche nicht zur Verknüpfungspunktsuche verwendet werden, kann das Bildmatching gestartet werden. Dabei wurden in den Bil-

dern Punkte gesucht, die in mehreren, mindestens jedoch in zwei Bildern vorhanden sind. Hierbei musste die maximale Anzahl der zu verwendenden Verknüpfungspunkte angegeben werden. Generell führt eine große Anzahl an Verknüpfungspunkten zu einer längeren Berechnungszeit.

Auffällig ist, dass gerade bei den neueren Bildern von 2002 die Anzahl an Verknüpfungspunkten die dichte Punktwolke und damit das DGM stark beeinflusst. Das DGM wird mit einer größeren Anzahl an Verknüpfungspunkten deutlich detaillierter, sodass sich sogar Wälder und Straßen erkennen lassen. Die Anzahl der Verknüpfungspunkte ist standardmäßig auf 40000 begrenzt. Da es sich gezeigt hat, dass eine größere Anzahl an Verknüpfungspunkten zu besseren Ergebnissen führt, wurde in dieser Arbeit die Begrenzung für die Anzahl der Verknüpfungspunkte deaktiviert, sodass alle erkannten Verknüpfungspunkte verwendet werden.

Die innere Orientierung wird durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Hierzu wurden die Verbesserungsgleichungen der Bündelblockausgleichung um die Parameter der unbekannt inneren Orientierung erweitert. Die Parameter der äußeren Orientierung sind näherungsweise bekannt.

Die Einführung der Brennweite, welche bei manchen Kampagnen gegeben ist, führt nicht wie erwartet zu einer Veränderung der übrigen Parameter oder zu einer Verbesserung der Orientierung. Sie kann somit bei der Auswertung mit PhotoScan vernachlässigt werden.

In den meisten Fällen führte die relative Orientierung und die Schätzung der inneren Orientierung in PhotoScan zu guten Ergebnissen. Diese wurden auf Plausibilität hinsichtlich der Lage der Projektionszentren und der Flughöhe untersucht. In einigen Fällen kam es auf Grund von Fehlzuordnungen bei den Verknüpfungspunkten zu nicht sinnvollen Orientierungen der Bilder. In diesen Fällen konnte eine erneute Berechnung zu besseren Ergebnissen führen. Verbesserte die erneute Berechnung die Orientierung der Bilder nicht, so musste die Anzahl an Verknüpfungspunkten verändert werden. Abb. 17 zeigt ein Beispiel für eine bezüglich der Flughöhe plausible und nicht plausible Ausrichtung. Auch die Lage der Projektionszentren ist unten rechts in der Abb. deutlich linienförmiger als links.

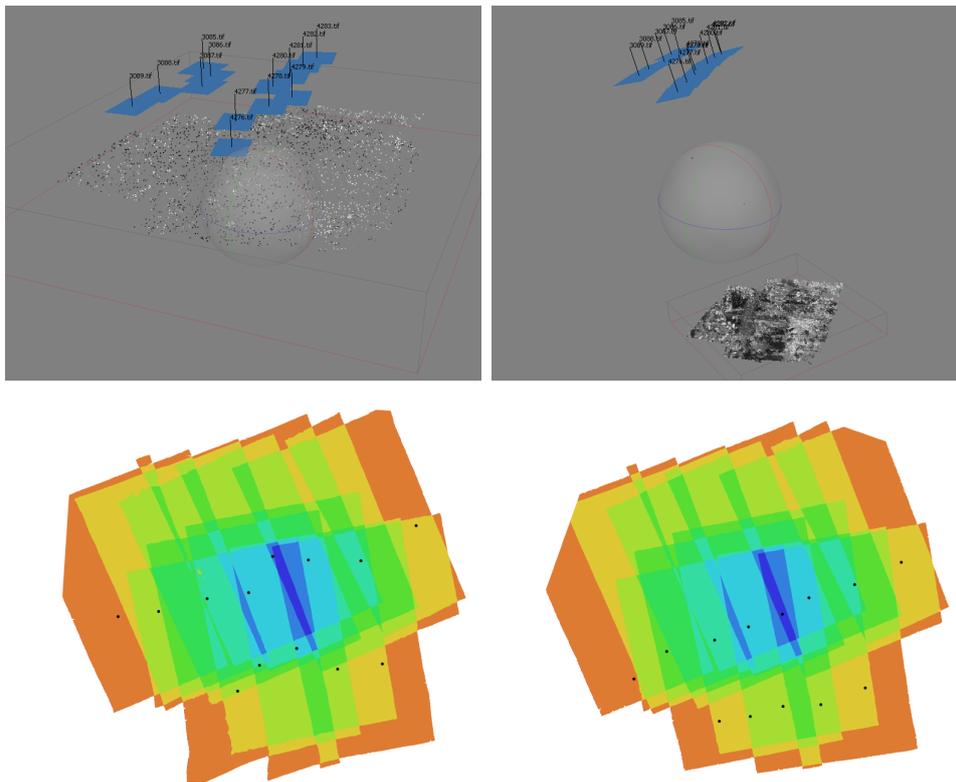


Abbildung 17: Links oben ein Beispiel für eine bezüglich der Flughöhe nicht plausible Ausrichtung der Bilder. Rechts oben eines für eine plausible Ausrichtung. Unten ist jeweils die Lage der Projektionszentren als schwarzer Punkt dargestellt

4.3.2 Bestimmung von Passpunkten

Passpunkte werden für die absolute Orientierung des Bildverbands benötigt. Um das relativ orientierte Modell in das Objektkoordinatensystem zu transformieren, werden mindestens drei Passpunkte benötigt.

Die Passpunkte wurden mit der Software QGIS bestimmt. Als Datengrundlage für die Lagekoordinaten dienten digitale Orthophotos (DOP). Die Geländehöhe wurde mittels des frei verfügbaren Geländemodells der SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) bestimmt, welches die NASA im Februar 2000 weltweit erfasst hat.

Zunächst wurden drei gut erkennbare Passpunkte bestimmt. Mit diesen wurde die Bündelblockausgleichung in PhotoScan neu berechnet, sodass der Bildverband absolut orientiert ist. Das so entstandene vorläufige Orthophotomosaik wurde dem DOP in QGIS überlagert. Durch die Überlagerung des DOP und des Orthophotomosaiks ließen sich gut weitere geeignete Passpunkte finden.

Geeignete Passpunkte waren Wegkreuzungen, Schienenübergänge, Gebäude oder Walddecken. Die Verwendung von Feldwegen und Feldecken als Passpunkte ist kritisch zu

sehen, da diese sich oft über die Zeit verschieben und dadurch nur verwendbar sind, wenn beide Aufnahmezeitpunkte dicht beieinander liegen.

Allgemein wurde darauf geachtet, dass die Passpunkte gut über das gesamte Gebiet verteilt waren und auch die Randbereiche hinreichend mit abdecken.

Zunächst wurden etwa 10 - 15 Passpunkte im Gebiet verteilt bestimmt und deren Koordinaten ermittelt. Mit diesen wurde die Bündelblockausgleichung erneut berechnet und es wurde auch ein DGM erzeugt. In den Bereichen, an denen das berechnete DGM stark von der mittleren Geländehöhe abweicht, wurden weitere Passpunkte zur Verbesserung des Geländemodells bestimmt.

Interessanterweise lässt sich feststellen, dass ab etwa 30 Passpunkten keine signifikante Verbesserung des Geländemodells mehr stattfindet. Es wird zum Teil sogar wieder schlechter, was an auftretenden Widersprüchen in den Passpunkten liegen kann.

Die Bestimmung von Passpunkten gelang auch mit den ältesten Bildern von 1945 leichter als erwartet. Es fanden sich genügend Kreuzungen und Waldkanten, die als lagestabil über die Zeit angesehen werden können. Die Markierung der Passpunkte in PhotoScan und das Messen der Koordinate in QGIS ist qualitätsentscheidend, da hier auftretende Unsicherheiten direkt in das Ergebnis einfließen.

4.3.3 Absolute Orientierung der Bilder

Die Bündelblockausgleichung wurde erneut berechnet, nachdem genügend Passpunkte koordinatenmäßig bestimmt und im Bild markiert wurden. Mit der zusätzlichen Information der Passpunkte wurde nun die äußere Orientierung des Bildverbands, die bisher nur genähert vorlag, genau berechnet.

Das Ergebnis wurde auf Plausibilität der Lage der Projektionszentren und der berechneten Fehler der Passpunkte kontrolliert. Waren die Projektionszentren in einer nicht sinnvollen Anordnung orientiert, half es meistens die Ausgleichung noch einmal zu starten.

Traten in den Passpunkten große Fehler auf, wurden diese auf eine Verwechslung der Punktnummer oder eine Markierung an der falschen Stelle untersucht.

Zur Überprüfung der äußeren Orientierung wurden weitere Punkte mit bekannten Koordinaten im Bild markiert, welche aber nicht als Passpunkte verwendet wurden. Zu diesen Kontrollpunkten wurde die Abweichung zwischen berechneter Koordinate und Sollkoordinate berechnet. Lagen diese Abweichung nicht im erwarteten oder geforderten Bereich wurde entweder die Konfiguration der Passpunkte optimiert oder die bestehenden Passpunkte überprüft.

4.4 Erstellung von DGM und Orthophotomosaik

Sobald ein vollständig orientierter Bildverband vorlag, konnte über eine automatische Oberflächenbestimmung ein DOM berechnet werden. Aus der Bündelblockausgleichung lagen bereits die Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte vor. Diese werden auch als dünne Punktwolke bezeichnet. Bei der Erstellung des Oberflächenmodells ging es nun um die Verdichtung dieser dünnen Punktwolke, sodass eine sogenannte dichte Punktwolke entsteht. PhotoScan verwendet für die Berechnung der Höhe den räumlichen Vorwärtsschnitt.

Mit den berechneten Oberflächen wurden nun die Luftbilder entzerrt und zusammengesetzt, um ein Orthophotomosaik zu erzeugen. Hierbei ist es ratsam, die dichte Punktwolke vorher auf Ausreißer zu kontrollieren oder eine Filterung durchzuführen, um grobe Fehler zu entfernen. Es konnte leider auch auf Nachfrage bei Agisoft nicht herausgefunden werden, wie und in welchem Umfang PhotoScan Ausreißertests und Filterungen durchführt. Die Oberflächenrekonstruktion wurde in PhotoScan nach Poisson (vgl. Abschnitt 2.10.3) aus der dichten Punktwolke durchgeführt. Dabei wurde die Oberfläche über eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung beschrieben. Mit Hilfe dieser mathematischen Beschreibung konnte nun ein weiterer Ausreißertest durchgeführt und das Oberflächenmodell somit geglättet werden.

Im Anschluss wurde das Oberflächenmodell durch eine Triangulation vermascht. Das heißt, die Punkte wurden über Dreiecke verbunden, sodass viele kleine Flächen entstanden, die die Oberfläche repräsentieren. Mit der damit bestimmten Oberfläche und den daraus resultierenden Objektkoordinaten wurden die Luftbilder mit dem im Abschnitt 2.9 vorgestellten Verfahren entzerrt.

Die radiometrischen Unterschiede wurden durch eine Anpassung der Histogramme ausgeglichen, sodass ein einheitliches Orthophotomosaik ohne erkennbare Farbunterschiede entstand.

Es zeigte sich, dass die Qualität der berechneten Oberflächenmodelle stark von der Qualität der Bilder abhängt. So treten bei den neueren Kampagnen von 2002 geringere Abweichungen von der Sollhöhe auf als bei den Kampagnen von 1945, die in Teilbereichen sehr hohe Abweichungen aufweisen.

Die Erstellung des Orthophotomosaiks liefert ein zufriedenstellendes Ergebnis. Es sind kaum Farbunterschiede an den Bildkanten zu erkennen und auch Straßen, Schienen und Flüsse werden an den Bildübergängen kaum versetzt dargestellt. Einzig in den Bereichen, wo die berechnete Höhe stark von der Sollhöhe abweicht oder es sehr große Variationen in der berechneten Höhe gibt, treten große Verschiebungen auf. Abb. 18 zeigt beispielhaft eine Verschiebung im Orthophoto.

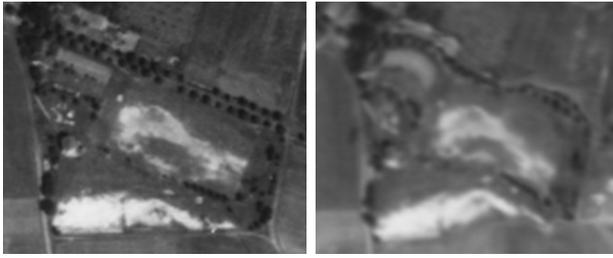


Abbildung 18: Links das Originalbild und rechts das durch die falsche Höhe verzerrte Orthophotomosaik

Die Bereiche, in denen die Höhe stark abweicht, liegen meist über texturarmen Regionen wie Wäldern oder großen Feldern. Auch in Bereichen mit Wolken treten große Abweichungen auf. Um bessere Ergebnisse zu erzielen, wurden diese Regionen im Vorfeld maskiert und somit nicht für die Suche von Verknüpfungspunkten verwendet. In den Randbereichen des Oberflächenmodells treten auch größere Abweichungen auf. Diese wurden verringert, indem zusätzliche Passpunkte in den Randbereichen bestimmt wurden.

4.5 Qualitätskontrolle

Im folgenden wurde die Qualität des erzeugten 3D-Modells überprüft. Dabei wurde zum einen auf die absolute Abweichung in der Höhe eingegangen und zum anderen auf die Verschiebung der Lagekoordinate auf Grund einer falschen Geländehöhe. Die Genauigkeit einer Lagekoordinate wurde in dieser Arbeit als fehlerfrei angenommen.

4.5.1 Absolute Höhenabweichung

Bei der Überprüfung der absoluten Höhenabweichung geht es um die Differenz der berechneten Höhe zu einer unabhängig bestimmten Sollhöhe. Die Sollhöhe liegt in Form eines ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) DGM und eines SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) DGM vor. Beide Modelle wurden von der NASA Anfang 2000 erstellt. Die Aster-Daten haben eine Bodenauflösung von 30 m, die SRTM-Daten eine von 90 m. Vorteil der SRTM-Daten ist, dass sie frei im Internet zugänglich sind.

Zu beachten ist, dass die Referenzdaten digitale Geländemodelle sind, wohingegen die berechneten Modelle digitale Oberflächenmodelle sind. Deshalb treten auch bei einem fehlerfrei bestimmten Oberflächenmodell Differenzen zum Geländemodell auf, da dort keine Bäume und Gebäude enthalten sind. Es treten somit in Bereichen mit Wäldern Fehler in der Größenordnung der Baumhöhe allein auf Grund der unterschiedlichen

Modelle auf. Weiterhin sollte beachtet werden, dass zwischen der Aufnahme der Luftbilder und der Geländemodelle zum Teil über 50 Jahre vergangen sind. Die Geländehöhe kann sich über die Zeit auch verändert haben, sodass auch hier Fehler entstehen können. Im Fall der bearbeiteten Luftbilder muss somit entschieden werden, ob die entstandene Differenz auf den Unterschied der Modelle und den Zeitunterschied zurückzuführen ist, oder ob es sich um Fehler im Verfahren handelt.

Die Berechnung der Abweichung wurde in QGIS mit dem Rasterrechner durchgeführt, da hier der Vorteil ist, dass die beiden Modelle nicht die gleiche Pixelgröße und -anzahl haben müssen. Des weiteren bietet QGIS direkt einfache Möglichkeiten zur Visualisierung der Ergebnisse.

Es fällt auf, dass vor allem die berechneten Höhen aus den Kampagnen von 1945 stark (bis 100 m) von den Sollhöhen abweichen. Bei der Kampagne aus 2002 weicht die Höhe maximal um 20 m von der Sollhöhe ab. Die naheliegendste Erklärung für diese Abweichung ist der Unterschied zwischen DGM und DOM.

4.5.2 Lagefehler auf Grund falscher Geländehöhe

Wie im Abschnitt 2.9 gezeigt wird ein Geländemodell zur Orthophotoentzerrung benötigt. Weichen die Höhen des Geländemodells von der wahren Höhe ab, so kommt es aufgrund der zentralperspektivischen Eigenschaften zu einer Verschiebung der Lagekoordinate im Orthophoto. Die Größe der Verschiebung hängt zum einen von der Größe der Abweichung zur wahren Höhe und zum anderen von der Entfernung zum Projektionszentrum ab. Abb. 19 zeigt schematisch die Berechnung der Verschiebung der Lagekoordinate auf Grund einer falschen Höhe.

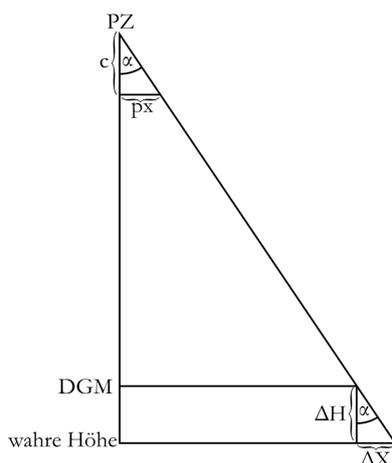


Abbildung 19: Schematische Darstellung der Berechnung des Lagefehlers in einem Orthophoto

Aus der Kammerkonstanten c und dem Abstand px im Bild zum Projektionszentrum PZ

lässt sich mit dem Höhenfehler ΔH die Verschiebung der Lagekoordinate ΔX berechnen.

$$\Delta X = \frac{px}{c} \cdot \Delta H \quad (4.1)$$

Die Größe der Verschiebung nimmt, wie in Abb. 19 dargestellt ist, radial mit dem Abstand zum Projektionszentrum zu.

Die Berechnung der Lageverschiebung wurde in MATLAB durchgeführt. Dazu mussten zunächst das aus den Luftbildern berechnete Ist-Modell und das Soll-DGM in QGIS auf die gleiche Pixelgröße und -anzahl gebracht werden. Die beiden Modelle sowie die Koordinaten der Projektionszentren wurden in MATLAB importiert. Nun wurde für jedes Pixel der Abstand zum nächstgelegenen Projektionszentrum berechnet. Aus dem Abstand zum Projektionszentrum, der Kammerkonstante und dem Höhenfehler, welcher aus dem Vergleich zwischen berechneter Höhe und Sollhöhe bestimmt wurde, wurde nach der Gleichung (4.1) die Lageverschiebung berechnet und als Rasterkarte gespeichert. Da die Pixelgröße der Bilder nicht bekannt war, musste diese zunächst bestimmt werden. Dazu wurde eine Strecke sowohl im Bild in Pixeln a , als auch im Objektraum in Metern A gemessen. Daraus wurde mit Hilfe der Flughöhe h_g und der Kammerkonstanten c die Pixelgröße in Metern nach der Gleichung (4.2) berechnet.

$$\Delta px = \frac{c \cdot A}{h_g \cdot a} \quad (4.2)$$

Die Größe der ermittelten Lageverschiebung fällt gerade bei der Kampagne von 1945 deutlich kleiner als erwartet aus. So erreicht sie nur in den Randbereichen und in Bereichen mit extremen Höhenfehlern wie zum Beispiel in Bereichen, die von Wolken abgedeckt sind, oder in sehr texturarmen Regionen kritische Werte von mehr als 5 m. Zur Mitte des Orthophotomosaiks hin beträgt die Lageverschiebung auf Grund der relativ guten Verteilung der Projektionszentren weniger als 3 m.

Insgesamt lässt sich also sagen, dass das berechnete Höhenmodell trotz der großen absoluten Abweichung zur Sollhöhe dennoch zur Orthophotoentzerrung geeignet ist, da sich die Lageverschiebung auf Grund einer falschen Höhe im akzeptablen Bereich befindet.

4.6 Ergebnisse

Das in Kapitel 4 beschriebene Verfahren wird an drei ausgewählten Kampagnen aus verschiedenen Jahren durchgeführt. Die Kampagne aus 2002 dient als Referenzmodell und soll verdeutlichen, dass das angewandte Verfahren bei Bildern mit guter Qualität

gute Ergebnisse liefert.

4.6.1 Kampagne 2002 (Referenz)

Die Kampagne aus 2002 besteht aus sechs Bildern, die in einer Flughöhe von 4000 m aufgenommen wurden. Die Kammerkonstante beträgt 305 mm und die berechnete Pixelgröße $39.6 \mu\text{m}$. Es wurden 17 räumliche Passpunkte markiert und für die Georeferenzierung und absolute Orientierung verwendet. Abb. 20 zeigt das erzeugte Orthophotomosaik und die verwendeten Passpunkte.

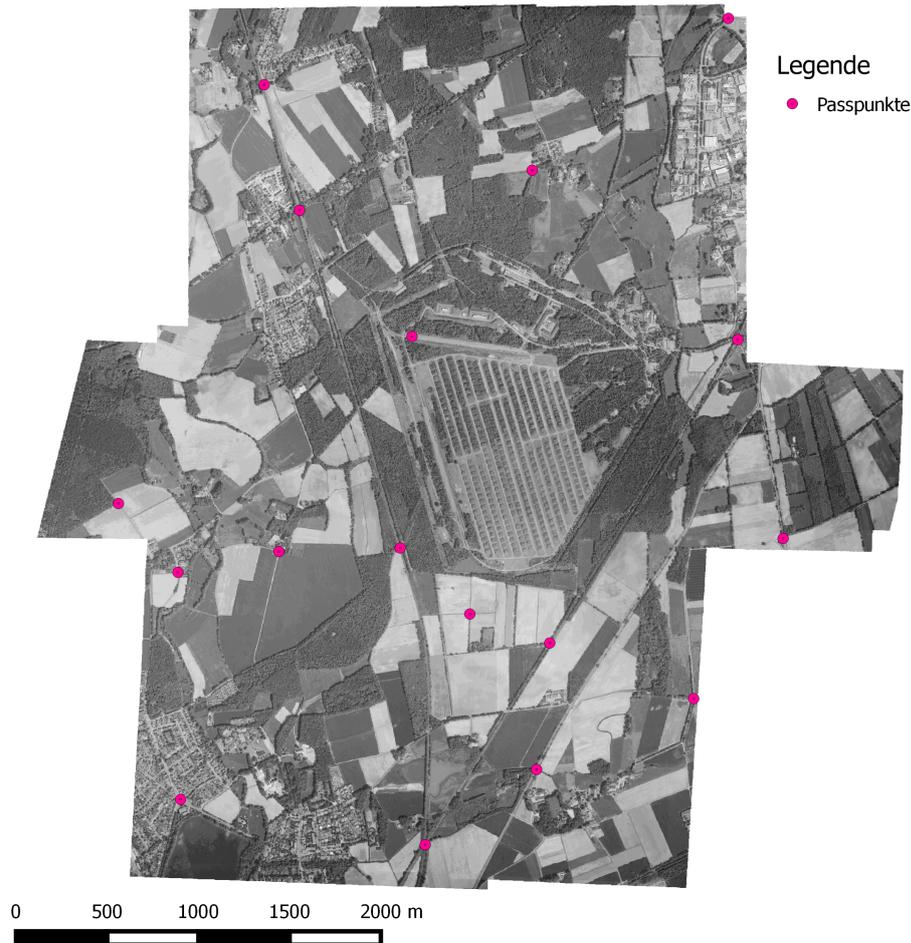


Abbildung 20: Orthophotomosaik der Kampagne 2002 mit den verwendeten Passpunkten

Die Bestimmung der Passpunkte verlief auf Grund des geringen Zeitabstandes zwischen der Aufnahme der Bilder und der Aufnahme der digitalen Orthophotos ohne Probleme. Es konnten viele markante Geländepunkte gefunden werden und diese auch auf Grund der hohen Auflösung der Bilder präzise markiert werden.

Die berechneten Höhen passen gut mit den Sollhöhen zusammen. Abb. 21 zeigt das berechnete digitale Oberflächenmodell.

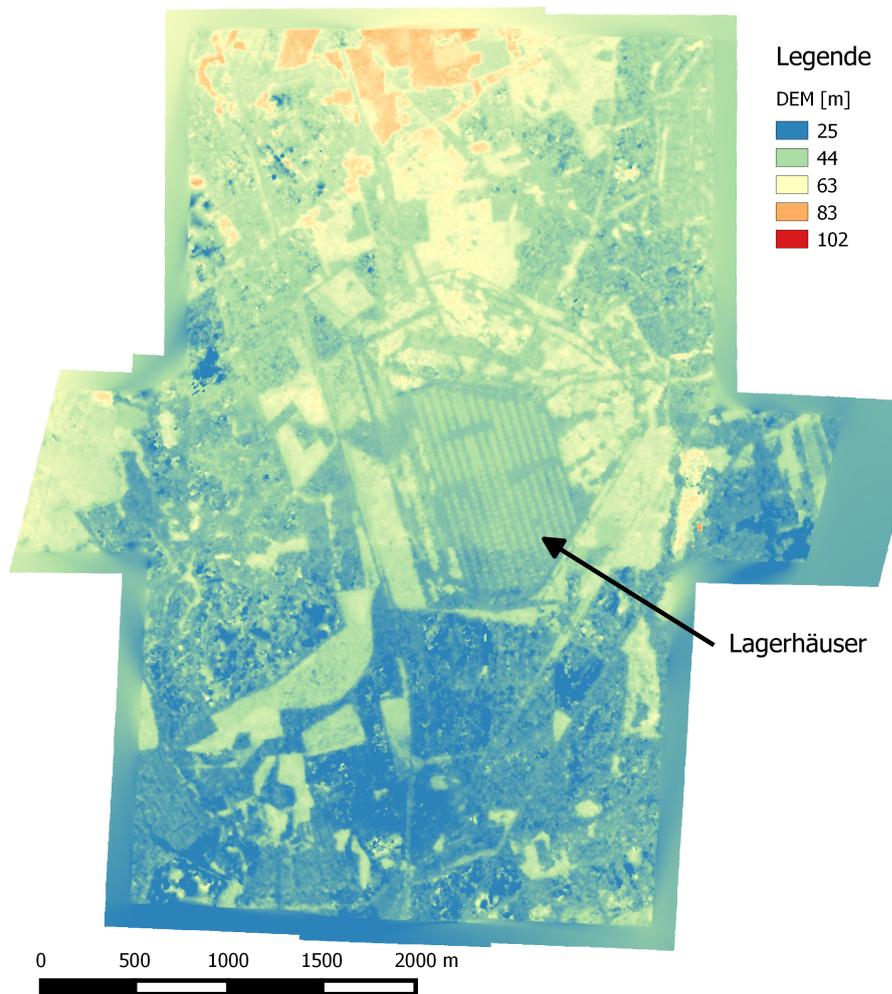


Abbildung 21: Berechnetes digitales Oberflächenmodell der Kampagne 2002

Wie gut zu erkennen ist, ist das Oberflächenmodell sehr gut aufgelöst. So lässt sich leicht der Unterschied zwischen Wäldern und Feldern erkennen. Auch Straßen heben sich deutlich ab. Auch die Reihen an kleinen Lagerhäusern in der Mitte des Bildes sind gut zu erkennen.

Der glattere Eindruck in den Randbereichen entsteht durch das Maskieren der Bildränder. In den maskierten Bereichen wurden aus den in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Gründen keine Verknüpfungspunkte gesucht. Daher wird die Höhe in diesen Bereichen interpoliert.

Der Ist-Soll-Vergleich in Abb. 22 zeigt, dass der absolute Höhenfehler maximal 15 m beträgt. Die naheliegende Erklärung für diesen Wert ist der Unterschied zwischen den Modellen, da das Sollhöhenmodell ein Geländemodell ist und das berechnete Höhenmodell ein Oberflächenmodell.

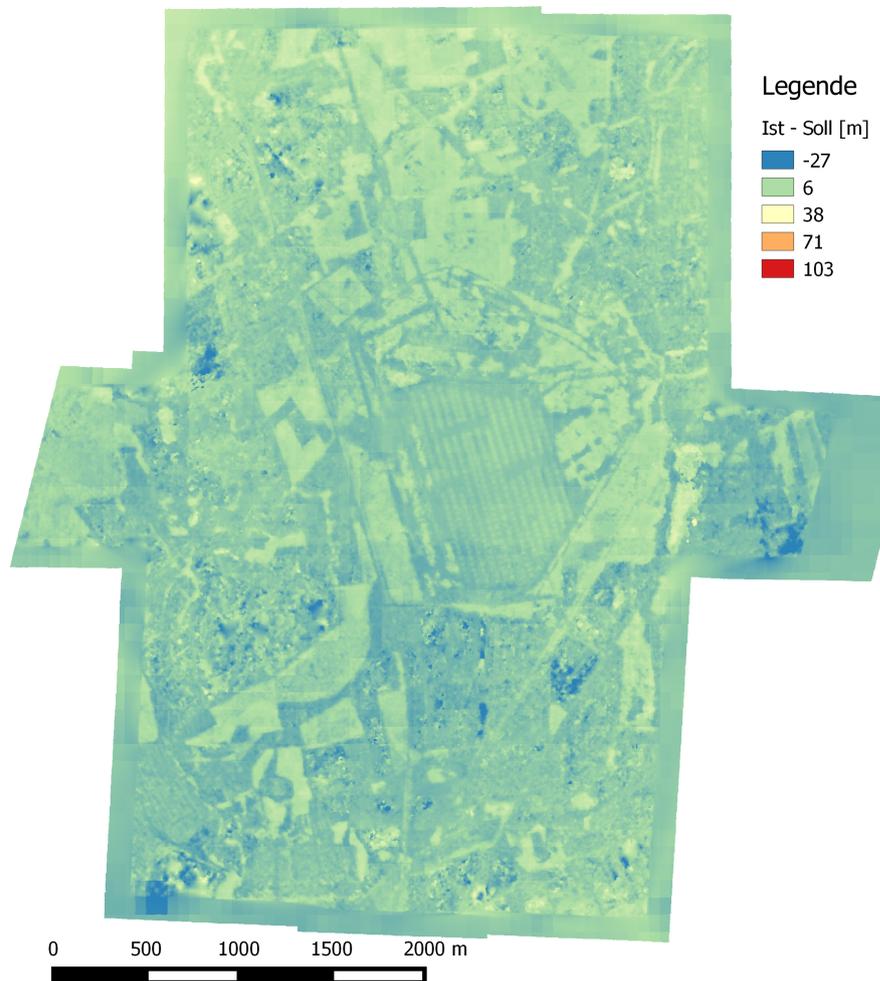


Abbildung 22: Vergleich der Sollhöhen mit den berechneten Höhen in der Kampagne von 2002

Die Berechnung der Lageverschiebung auf Grund einer falschen Geländehöhe zeigt, dass die Verschiebung der Lagekoordinaten in den Randbereichen zwischen 0 und 3 m liegt. Einzig im nördlichen und südlichen Rand des Orthophotomosaiks kommt es zu Verschiebungen der Lagekoordinate von bis zu 10 m.

Beschränkt man die Messung von Lagekoordinaten auf die Mitte des Orthophotomosaiks und lässt die Randbereiche aus, ist die Lageverschiebung im Rahmen der nach [AH KMR, 2014] geforderten Genauigkeit von 3 m.

Abb. 23 zeigt die berechnete Lageverschiebung im Orthophotomosaik auf Grund einer falschen Geländehöhe.

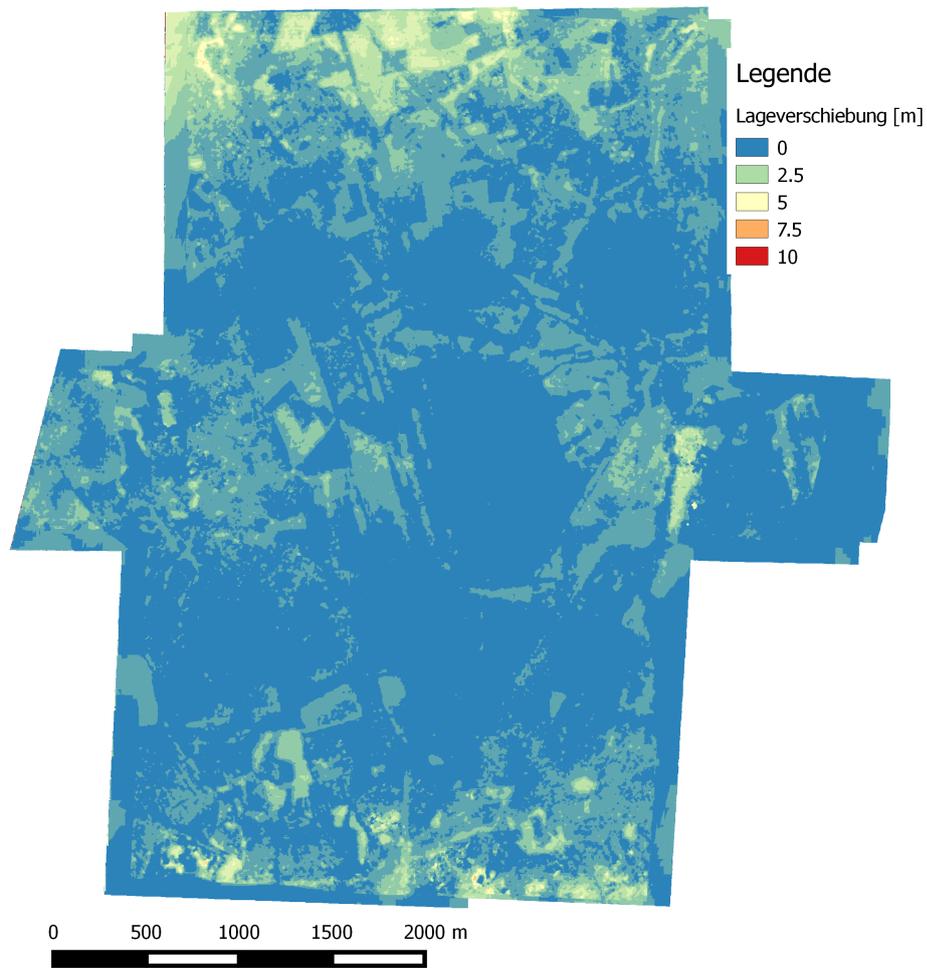


Abbildung 23: Lageverschiebung auf Grund einer falschen Geländehöhe in der Kampagne von 2002

4.6.2 Kampagne 1977

Die Kampagne von 1977 besteht aus sieben Bildern, die in einer Flughöhe von 2000 m aufgenommen wurden. Die Brennweite beträgt 152.9 mm und die berechnete Pixelgröße 39.9 μm . Die absolute Orientierung und Georeferenzierung wurde mit 25 räumlichen Passpunkten hergestellt. Abb. 24 zeigt das Orthophotomosaik mit den verwendeten Passpunkten.

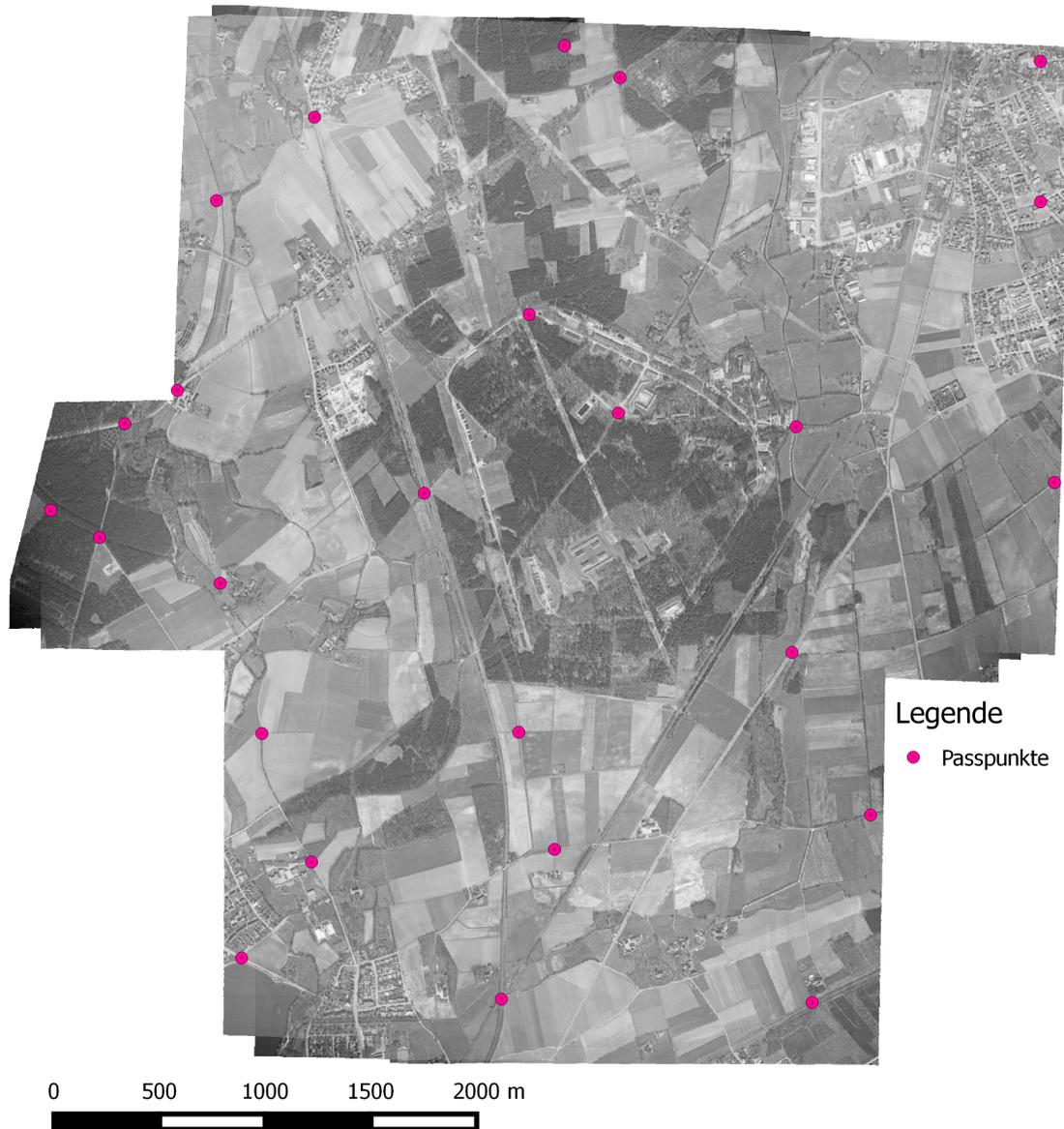


Abbildung 24: Orthophotomosaik der Kampagne aus 1977 mit den verwendeten Passpunkten

Die manuelle Bestimmung der Passpunkte verlief weitestgehend ohne Probleme. Nur in der Mitte des Orthophotomosaiks und ganz im Westen gab es auf Grund starker Veränderung des Geländes und geringer Textur Probleme der Festlegung markanter

Geländepunkte.

Das berechnete Oberflächenmodell ist in Abb. 25 dargestellt. Wie gut zu erkennen ist, sind auch hier in manchen Bereichen Unterschiede zwischen Wäldern, Gebäuden, Feldern und Straßen zu erkennen. Es gibt aber auch Bereiche, in denen keine Unterscheidung möglich ist. Diese schlechtere Auflösung des Oberflächenmodells ist auf die schlechtere Qualität der Bilder zurückzuführen.

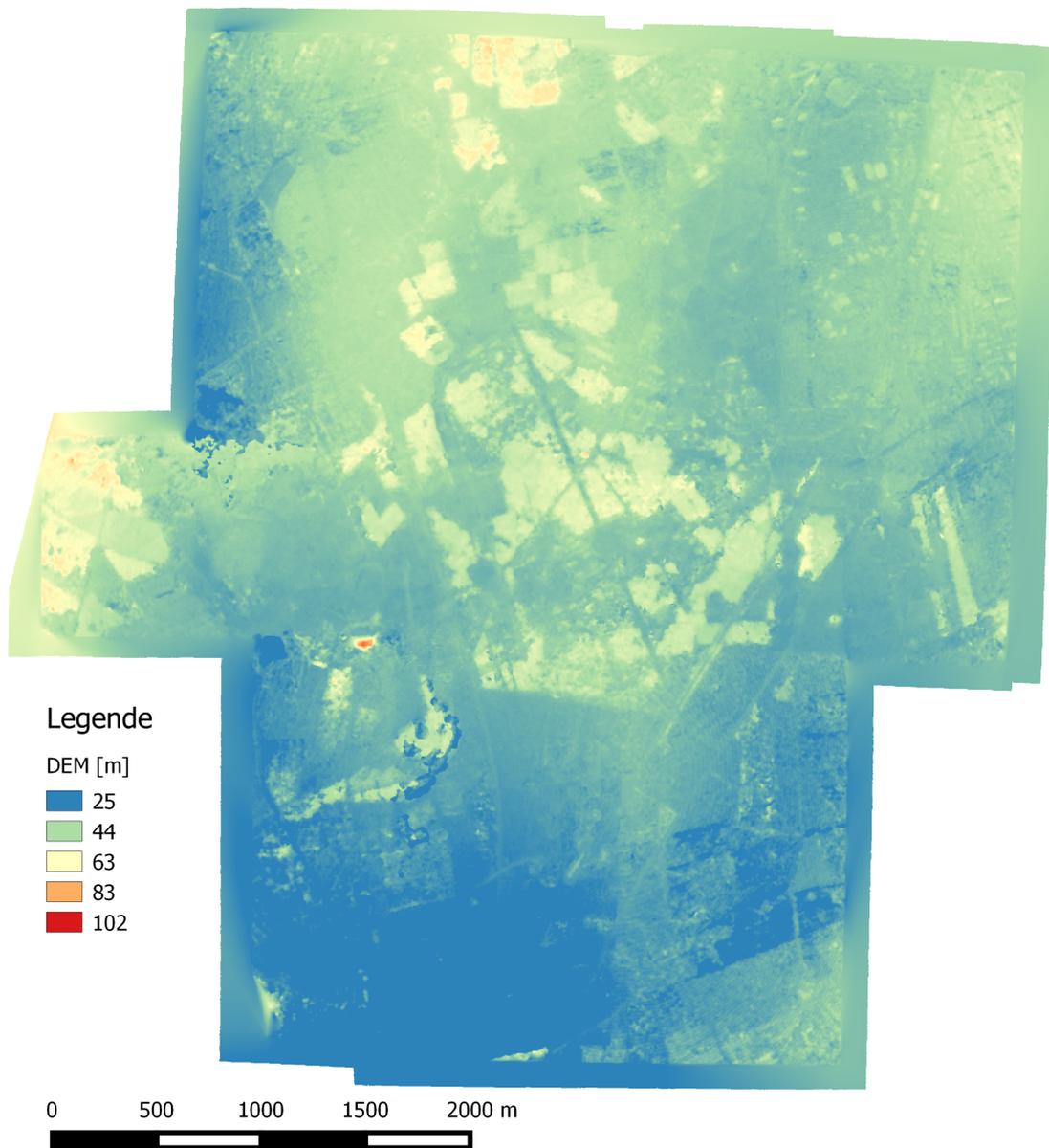


Abbildung 25: Berechnetes digitales Oberflächenmodell der Kampagne 1977

In der Mitte des Orthophotomosaiks ist der Unterschied zwischen Wäldern, Straßen und Feldern gut zu erkennen. Zu den Rändern hin verschimmt der Unterschied und die verschiedenen Höhen heben sich nicht mehr so stark von einander ab.

Ganz im Westen steigt die Höhe stark an. Dies kann daran liegen, dass dort das Gelände sehr homogen ist und somit auf Grund der geringeren Textur weniger Verknüpfungspunkte gefunden werden konnten. Dadurch ist die Höhe in diesem Bereich schlechter bestimmt.

Der Vergleich der berechneten Höhe mit der Sollhöhe ist in Abb. 26 dargestellt.

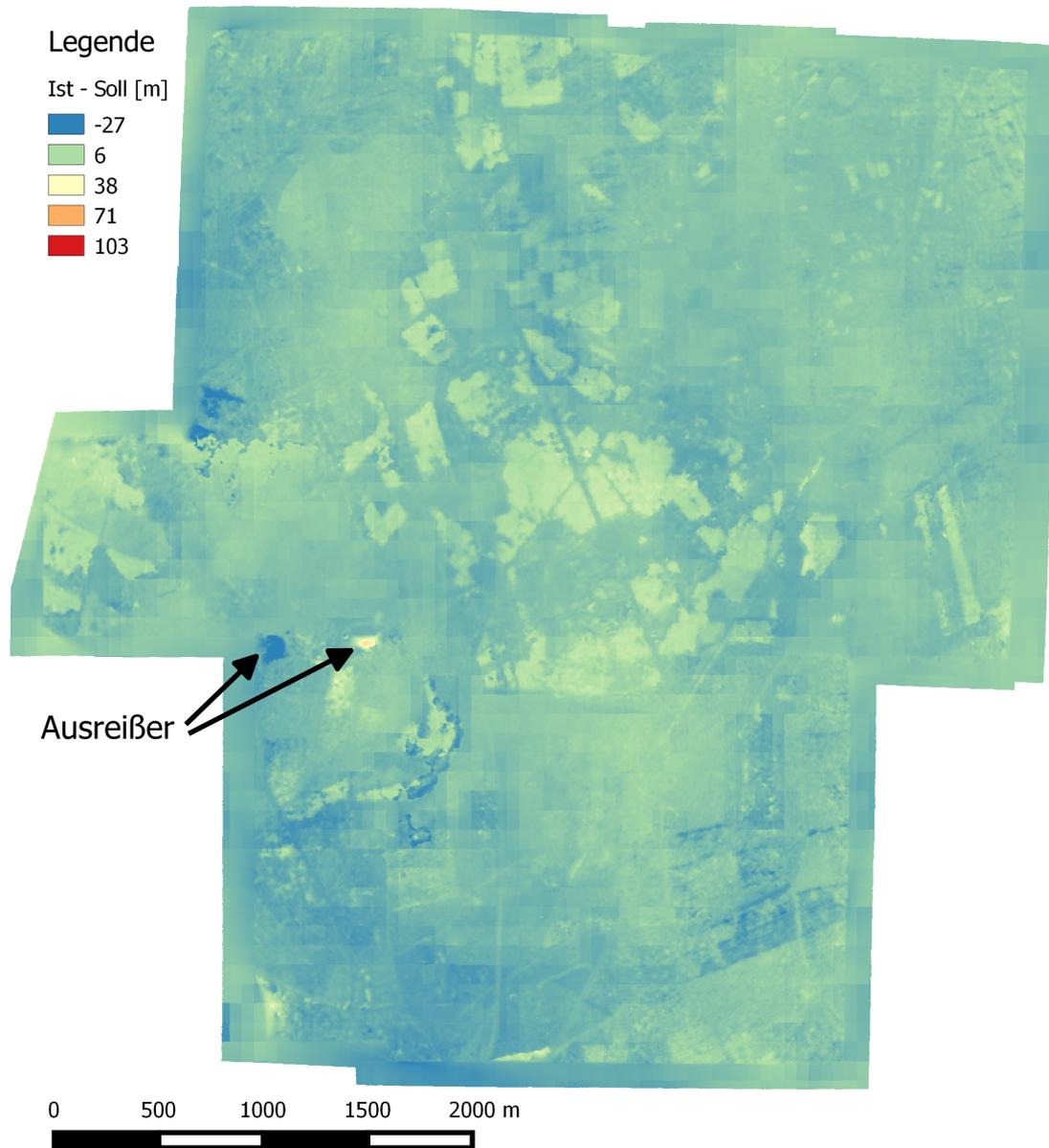


Abbildung 26: Vergleich der Sollhöhen mit den berechneten Höhen in der Kampagne von 1977

Wie Abb. 26 zeigt, ist die absolute Abweichung der Höhe in den meisten Bereichen des Orthophotomosaiks im Bereich um 8-10 m. Dass die Wälder in der Mitte und im nördlichen Bereich eine stärkere Abweichung aufweisen, wird wieder auf den Unterschied zwischen Oberflächen- und Geländemodell zurückgeführt. Im westlichen Teil gibt es zwei

Ausreißer, welche auf die sehr homogene Textur in diesen Bereichen zurückzuführen sind. Die Lageverschiebung, die auf Grund einer abweichenden Geländehöhe entsteht, ist in Abb. 27 dargestellt.

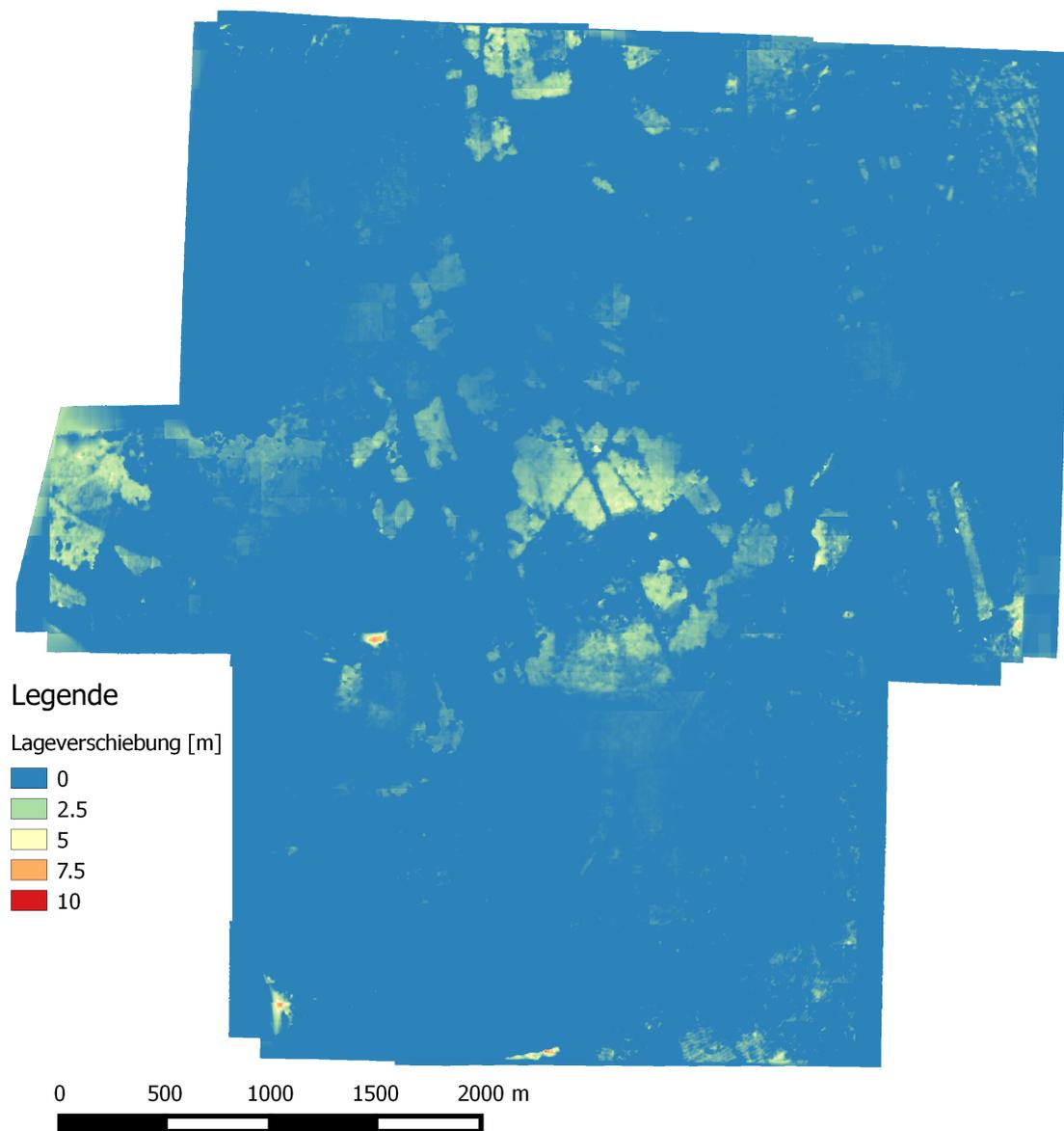


Abbildung 27: Lageverschiebung auf Grund einer abweichenden Geländehöhe in der Kampagne von 1977

Die Verschiebung der Lagekoordinate liegt in den meisten Teilen des Orthophotomosaiks zwischen 0 und 3 m. In der Mitte ist sie in den Waldbereichen höher, da hier der Höhenfehler größer ist. Auch in den Randbereichen kommt es zu größeren Verschiebungen im Bereich von 5-7 m.

Beschränkt man sich beim Messen einer Koordinate auf die mittleren Bereiche und lässt den Rand aus, liegt das Ergebnis im geforderten Bereich von bis zu 3 m.

4.6.3 Kampagne 1945

Die Kampagne aus 1945 besteht aus 13 Bildern. Die Flughöhe beträgt 7600 m und die Brennweite 508 mm. Für die Pixelgröße wurde eine Größe von $36.4 \mu\text{m}$ berechnet. Für die absolute Orientierung wurden 19 Passpunkte mit 3D-Koordinaten bestimmt. Abb. 28 zeigt das Orthophotomosaik und die verwendeten Passpunkte.

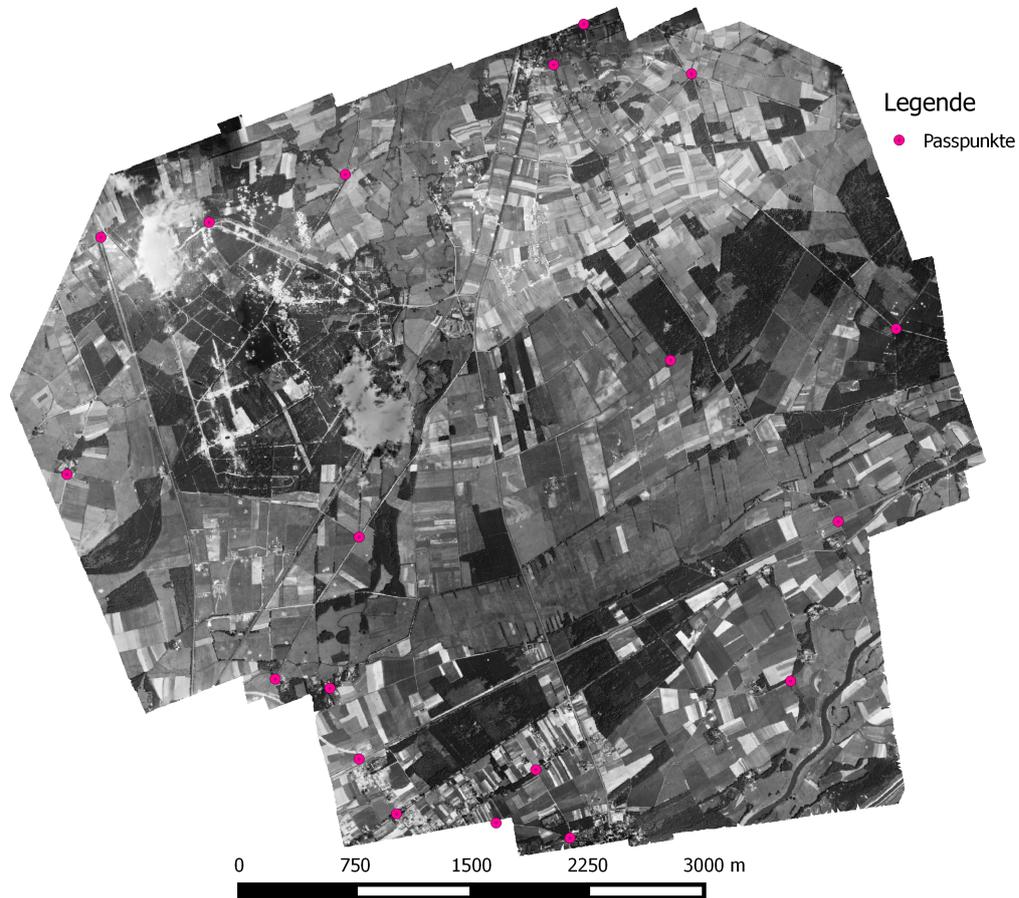


Abbildung 28: Orthophotomosaik der Kampagne aus 1945 mit den verwendeten Passpunkten

Die Bestimmung der Passpunkte war zum Teil schwierig, da der Verlauf von Straßen sich geändert hat. Auch die Qualität und Auflösung der Bilder machte ein präzises Markieren der Passpunkte schwierig.

Die geringere Qualität der Bilder führt im Höhenmodell zu großen Schwankungen und Abweichungen von der Sollhöhe. Die Große Abweichungen treten in Bereichen mit geringer Textur auf. Auch im von Wolken überdeckten Bereich im Nord-Westen des Orthophotomosaiks treten große Variationen der Höhe auf. Die sehr großen Höhen (und damit auch große Höhenabweichungen) im Westen kommen daher, dass in diesem Bereich kaum Passpunkte gefunden wurden, da sich dort nur Felder befinden. Diese

verändern im Laufe der Zeit sehr stark ihre Form und Lage. Auffällig ist auch, dass anders als bei der Kampagne von 2002 kein Unterschied zwischen Bäumen und Feldern im Oberflächenmodell (Abb. 30) zu erkennen ist. Im süd-westlichen Bereich wurde versucht, in die Bereiche großer Höhenabweichungen mehr Passpunkte zu legen, um die Höhe dort zu stabilisieren. Dies erzielte aber nur zum Teil den gewünschten Effekt.

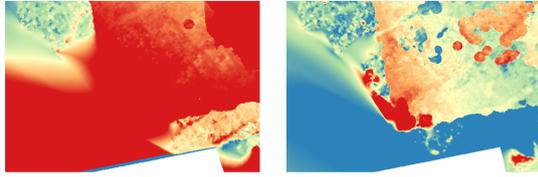


Abbildung 29: Links das Höhenmodell mit wenig Passpunkten und rechts mit mehr Passpunkten, um die Höhe zu korrigieren

Wie in Abb. 29 gut zu erkennen ist, treten dort sehr große Höhenvariationen in einem kleinem Gebiet auf. Es tritt also durch die Einführung von mehr Passpunkten in den betroffenen Gebieten nicht unbedingt eine Verbesserung der Höhenabweichung ein. Einzelne Ausreißer werden zum Teil sogar noch größer.

Abb. 30 zeigt das berechnete Höhenmodell.

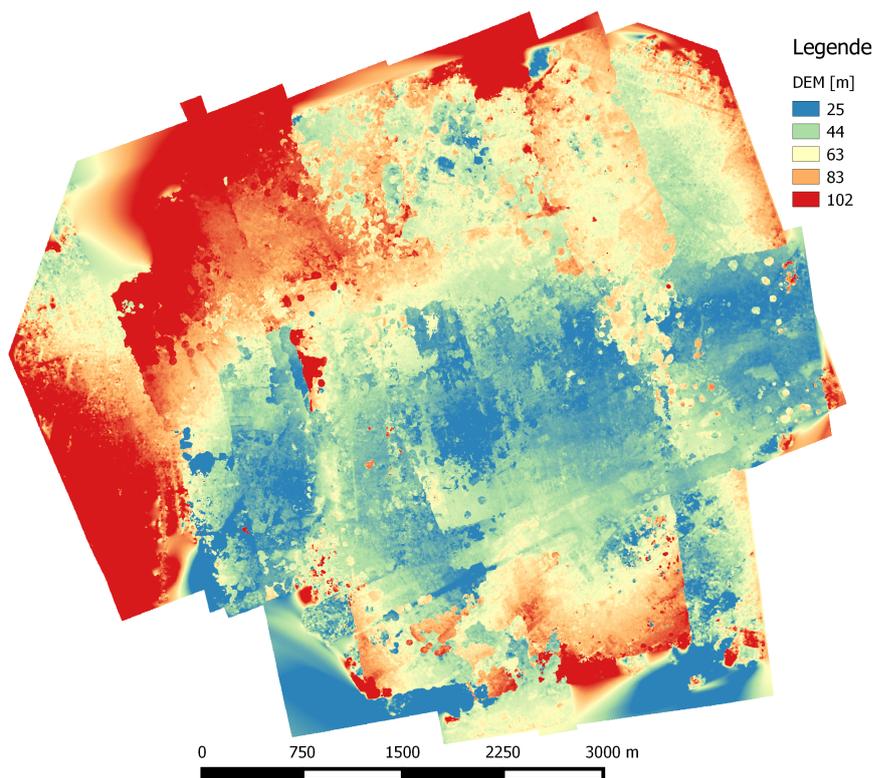


Abbildung 30: Berechnetes digitales Oberflächenmodell der Kampagne 1945

Da im berechneten Oberflächenmodell starke Variationen in der Höhe auftreten, ist

es nicht verwunderlich, dass im Vergleich der berechneten Höhen mit den Sollhöhen große Differenzen auftreten. Diese großen Differenzen treten in den schon beschriebenen Bereichen großer Höhenvariationen auf. Zusätzlich treten auch in den Randbereichen größere Differenzen auf. Dies liegt vor allem daran, dass in den Randbereichen selbst wenig Passpunkte gefunden wurden.

Abb. 31 zeigt den Vergleich zwischen Sollhöhe und der berechneten Höhe der Kampagne 1945.

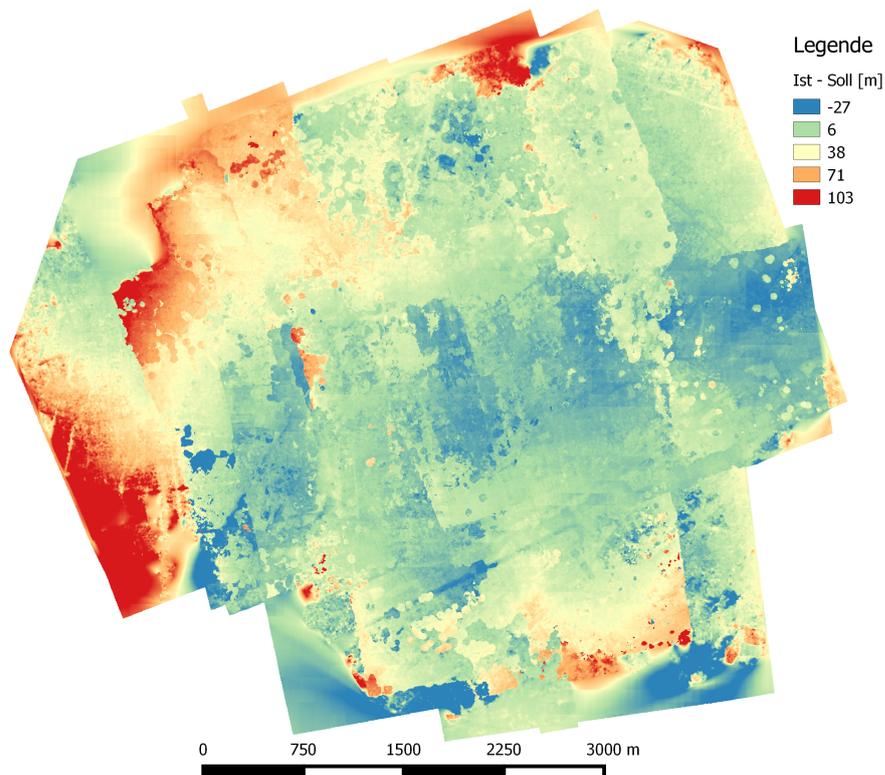


Abbildung 31: Vergleich der Sollhöhen mit den berechneten Höhen in der Kampagne von 1945

Bei der Berechnung der Lageverschiebung auf Grund einer falschen Geländehöhe fällt auf, dass trotz der sehr großen Abweichungen zwischen den berechneten und den Sollhöhen die Lageverschiebung im größten Bereich des Orthophotomosaiks akzeptable Größenordnungen hat.

Die größten Verschiebungen betragen 15 m und befinden sich in den Gebieten an denen die Höhe stark von der Sollhöhe abweicht. Das ist zum einen im von Wolken verdeckten Bereich und an den Randbereichen. In den anderen Bereichen liegt die Verschiebung der Lagekoordinaten im Bereich zwischen 0 m und 3 m.

Diese Werte liegen innerhalb der geforderten Genauigkeit nach [AH KMR, 2014] von 3 m für eine Lagekoordinate. Daher kann das berechnete Oberflächenmodell trotz der großen Abweichungen zur Sollhöhe für die Entzerrung des Orthophotomosaiks verwendet

werden. Es sollte nur drauf geachtet werden, Lagekoordinaten nicht direkt am Rand des Orthophotomosaiks zu messen.

Abb. 32 zeigt die Lageverschiebung auf Grund einer abweichenden Geländehöhe.

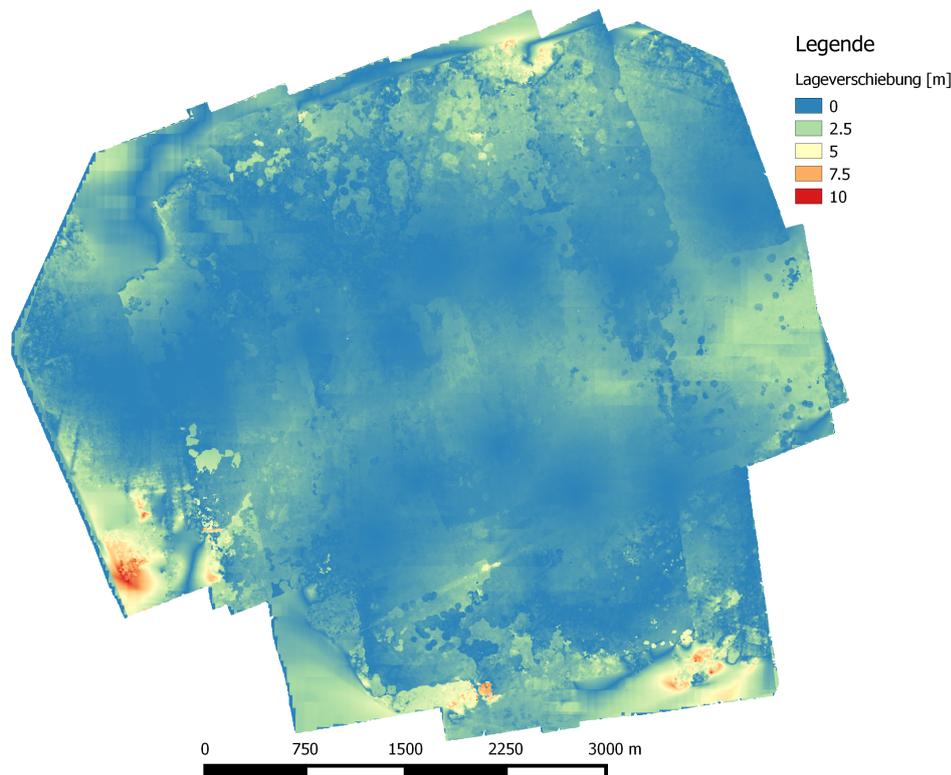


Abbildung 32: Lageverschiebung auf Grund einer abweichenden Geländehöhe in der Kampagne von 1945

4.7 Diskussion der Ergebnisse

In Kapitel 4.6 wurde das erarbeitete Verfahren an drei ausgewählten Beispieldatensätzen aus verschiedenen Jahren getestet. Es zeigte sich, dass je älter der Datensatz ist, desto schlechter werden die Ergebnisse. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Eigenschaften historischer Luftbilder war dieses Ergebnis zu erwarten. Es konnte aber gezeigt werden, dass sich das berechnete Höhenmodell trotz der zum Teil großen absoluten Höhenabweichung zur Entzerrung der Luftbilder eignet. Einzig in den Randbereichen und verdeckten Bereichen kommt es zu Verschiebungen der Lagekoordinate, die über den nach [AH KMR, 2014] geforderten 3 m liegen. Dies ist aber aufgrund der großen Anzahl an Luftbildern und unterschiedlichen Kampagnen (siehe [CARLS ET AL., 1999]) akzeptabel, da sich für jedes Gebiet auswertbare Luftbilder finden lassen. Die Verringerung der Auflösung der Bilder auf etwa 20 % der Originalauflösung führt zu keinem signifikanten Unterschied in den Ergebnissen aber zu einer Verkürzung der

Rechenzeit auf etwa ein fünftel der Zeit. Somit kann die Berechnung auf Grund des geringen Informationsverlustes mit der verringerten Auflösung durchgeführt werden. Tabelle 4.1 stellt die Ergebnisse der einzelnen Kampagnen gegenüber. Es ist gut zu erkennen, dass die maximale Höhenabweichung mit dem Alter der Aufnahmen zunimmt. Auch die Lageverschiebung nimmt mit dem Alter der Aufnahmen zu, jedoch nicht so stark wie die absolute Höhenabweichung.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der drei Kampagnen

	Anzahl Bilder	Anzahl Passpunkte	Höhenabweichung max [m]	Lageverschiebung max [m]
Kampagne 2002	6	17	15	10
Kampagne 1977	7	25	70	10
Kampagne 1945	13	19	103	15

Die Koordinaten von möglichen Blindgängern können in dem erzeugten Orthophotomosaik komfortabel in einem GIS bestimmt werden. Weiterhin können die Daten dort leicht mit anderen Informationsquellen wie Katasterdaten, Luftbildern aus anderen Jahren, Höhenmodellen usw. überlagert werden. So können gefährdete Regionen schnell bestimmt und die Position von vermuteten Blindgängern gemessen werden. Durch eine multitemporale Auswertung von Luftbildern aus vielen verschiedenen Jahren lassen sich zudem Aussagen über die Veränderung des Geländes und der Bebauung treffen.

5 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Bachelorarbeit war das Erarbeiten eines alternativen Arbeitsablaufs zur Orientierung und Georeferenzierung historischer Luftbilder am Beispiel der Aufklärungsfotos der alliierten Streitkräfte während des zweiten Weltkrieges. Es konnte an drei Testbeispielen erfolgreich gezeigt werden, dass mit dem alternativen Vorgehen die geforderten Genauigkeiten meist eingehalten werden können. Bereiche, in denen die geforderte Genauigkeit nicht eingehalten werden konnte, sind meist von Wolken verdeckt, am Rand eines Orthophotomosaiks oder in Bereichen mit sehr geringer Textur, in denen daher auch wenig Passpunkte gefunden wurden. In diesen Bereichen liegt die Verschiebung der Lagekoordinate im Extremfall bei bis zu 15 m, sodass sie sich nur sehr eingeschränkt zur Bestimmung von Koordinaten eignen.

5.1 Nutzbarkeit der Ergebnisse

Die erarbeitete Vorgehensweise ist zur Kartierung von Bombenkratern und möglichen Blindgängern gut nutzbar. Eine Kartierung von Gebäuden oder anderen Objekten, die eine höhere Lagegenauigkeit erfordern, ist nur eingeschränkt und mit Abstrichen in der Genauigkeit möglich.

5.2 Empfehlungen

Das Scannen der Kontaktkopien der Luftbilder mit handelsüblichen Flachbettscannern hat den Nachteil, dass die Bilder geometrisch verzerrt werden. Die Digitalisierung analoger Bilder zu photogrammetrischen Zwecken stellt hohe Anforderungen an den Informationsgehalt und an eine strenge Geometrie. Hierzu wurden spezielle Scanner entwickelt, welche die Anforderungen erfüllen. Dazu zählen zum Beispiel Trommel- und Réseauscanner. Der Einfluss des Scannertyps auf die Geometrie wird zwar in der [AH KMR, 2014] als gering im Bezug auf die ungenauen Näherungskordinaten der äußeren Orientierung und das Fehlen von Informationen über die innere Orientierung eingeschätzt. Aus photogrammetrischer Sicht ist es aber trotzdem zu empfehlen, die Bilder mit speziellen photogrammetrischen Scannern zu digitalisieren, um somit eine weitere Fehlerquelle auszuschließen und die Ergebnisse zu verbessern.

5.3 Zusammenfassung

Die Gefährdung durch Munition des zweiten Weltkrieges ist heute noch ein aktuelles Thema. Aufgabe der Kampfmittelräumung ist es, diese Munition aufzuspüren und unschädlich zu machen. Eine etablierte Form der Suche von Altlasten aus Kriegszeiten ist die Auswertung von Aufklärungsluftbildern der alliierten Streitkräfte während des zweiten Weltkrieges. Die hierfür notwendigen Originale sowie Kontaktkopien der Bilder lagern in verschiedenen nationalen und internationalen Archiven.

Um Blindgänger lokalisieren zu können, muss zunächst der Raumbezug der Bilder hergestellt werden. Die Georeferenzierung der Einzelbilder ist schwierig, da pro Bild mindestens drei Passpunkte verwendet werden müssen. Das Problem hierbei ist, dass sich das Gelände in der Regel im Laufe der Jahre stark verändert hat. Zudem fehlen oft wichtige Informationen über die verwendete Kamera und die Aufnahmekonfiguration.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines alternativen Ansatzes zur Georeferenzierung der Luftbilder. Dabei wurde ein ganzer Bildverband durch eine Bündelblockausgleichung zusammen ausgewertet. Vorteil der Bündelblockausgleichung ist, dass fehlende Elemente der inneren Orientierung geschätzt werden können. Weiterhin müssen nun nicht drei Passpunkte pro Bild erfasst werden, es reichen theoretisch drei Passpunkte für den gesamten Bildverband. Es wurde untersucht, inwieweit das aus den Luftbildern berechnete Oberflächenmodell zur Orthophotoentzerrung geeignet ist. Dazu wurde zum einen die absolute Höhenabweichung als auch der Lagefehler auf Grund einer falschen Geländehöhe betrachtet.

Das Verfahren wurde an drei Beispielen aus den Jahren 2002, 1977 und 1945 getestet. Es zeigt sich, dass die Abweichung der berechneten Höhen mit dem Alter der Bilder zunimmt. Dies war auf Grund der schlechteren Qualität der älteren Aufnahmen zu erwarten. Es konnte aber gezeigt werden, dass die Abweichung der Höhe in den meisten Bereichen des Orthophotomosaiks nicht zu einer Verschiebung der Lagekoordinate führt, die über den geforderten 3 m liegt. Einzig in von Wolken verdeckten Bereichen und in den Randbereichen des Orthophotomosaiks kommt es zu Lageverschiebungen bis 15 m.

Die erreichte Lagegenauigkeit reicht zur Detektion von möglichen Blindgängern aus. Es wurde somit erfolgreich ein alternativer Referenzierungsansatz für die Auswertung von historischen Luftbildern entwickelt.

Literaturverzeichnis

- AH KMR (2014): Arbeitshilfen Kampfmittelräumung, 2. Aufl., Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und Bundesministerium der Verteidigung.
- ALBERTZ, J./WIGGENHAGEN, M. (2009): Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung, 5. Aufl., Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (2015): Digitale Orthophotos (DOP), Web, URL: http://www.bkg.bund.de/nn_170876/DE/Bundesamt/Produkte/Geodaten/Orthophoto/Orthophoto__node.html__nnn=true, Zugriffsdatum: 14.09.2015.
- CARLS, H./GLASER, R./HECK, H. (1999): Luftbilder 1938-1958 zur Bundesrepublik Deutschland, in: Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, S. 33–48.
- DE LANGE, N. (2002): Geoinformatik: in Theorie und Praxis, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- FINSTERWALDER, R./HOFMANN, W. (1968): Photogrammetrie, 3. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin.
- HEIPKE, C. (2014): Photogrammetrie I - III, Vorlesungsskript Leibniz Universität Hannover.
- KAZHDAN, M./BOLITHO, M./HOPPE, H. (2006): Poisson surface reconstruction, in: Eurographics symposium on Geometry processing, S. 61–70, Cagliari, Sardinia, Italy.
- KRAUS, K. (1996): Photogrammetrie Band 2 - Verfeinerte Methoden und Anwendungen, 3. Aufl., Ferd. Dummlers Verlag, Bonn, mit Beiträgen von J. Jansa und H. Kager.
- KRAUS, K. (2004): Photogrammetrie Band1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, 7. Aufl., Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- LI, Z./ZHU, C./GOLD, C. (2004): Digital terrain modeling: principles and methodology, CRC press, Boca Raton.
- LUHMANN, T. (2010): Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 3. Aufl., Herbert Wichmann Verlag, Berlin.
- SCHWIDEFSKY, K./ACKERMANN, F. (1976): Photogrammetrie Grundlagen, Verfahren, Anwendungen, 7. Aufl., BG Teubner, Stuttgart.
- WIEDEMANN, A. (2013): Handbuch Bauwerksvermessung: Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning, Springer-Verlag, Basel.